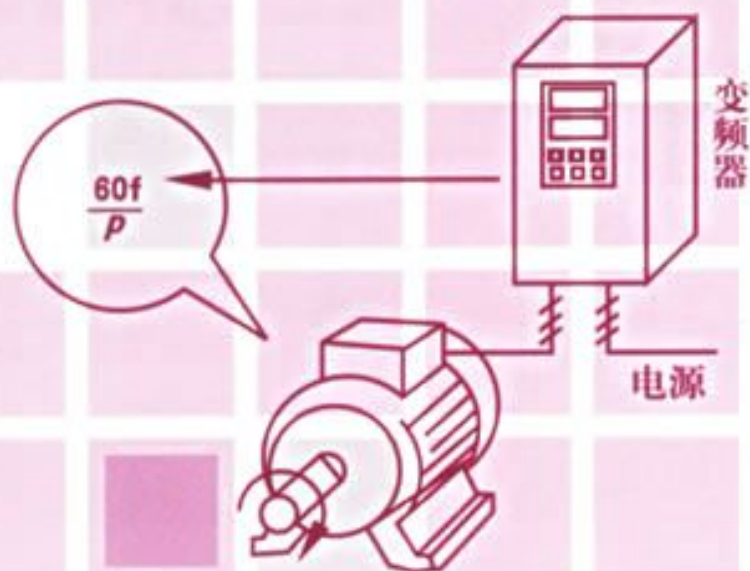


# 电动机变频调速

## 图解

张燕宾 编著  
李鹤轩 审阅



中国电力出版社  
www.ccpp.com.cn

# 前 言

在 20 世纪 80 年代，我承接过研制变频器的任务，对变频器有了一定的了解。退休之前，我又一直从事变频调速的推广应用工作，深深感受到：在工程技术人员中普及变频调速的基础知识，是一件十分有意义的工作。因此，退休以后，我的愿望便是做一个变频调速的吹鼓手。大体上说，我做了如下几方面的事情：一是出了几本关于变频调速方面的小书；二是在杂志上发表了一些介绍应用技术方面的文章；三是每年应邀主讲若干期变频调速的学习班。

因此我常常有机会和应用变频器的工程技术人员互相切磋。除了学习班的学员以外，也常常有读者打电话或写信向我咨询问题。这对我来说，其促进作用是十分明显的：一方面，有些问题看似简单，但询问者却相当普遍。这常常引发我思考：怎样才能形象而生动地把问题说得更加透彻些？另一方面，当前的科学技术发展迅猛，变频器的更新换代也很快。而我的水平本就有限，且又在不断地老化之中。为了能够帮助学员和读者们解决问题，我不得不广泛地接触新的资料，努力学习。于是，我又积累了不少新的素材。所以，当中国电力出版社的李建强同志向我约稿时，我便答应了。

在构思本书的过程中，曾受到下面一些事情的启发：

一次，我应邀到一个工厂去参观，陪同者是一位博士。我惊异地发现，他的手里居然拿着我写的《SPWM 变频调速应用技术》，便开玩笑地说：“这是通俗读物，对博士也有用么？”他的回答使我深受鼓舞：“作为一个变频器的使用者，而不是研制者，我最喜欢这样的书：一是说明问题要定性而准确，二是能具体地告诉我怎样用。我不可能因为要使用一台变频器而去思索和记忆那么多陌生的公式。”

此外，在文化大革命前，我曾经三次讲授过《电机学》。深知：异步电动机的等效电路是一个较大的难点。而要讲清楚变频调速中的各种现象，又难以回避等效电路。我于是下了一点工夫，尝试着用图解的方法来进行说明。从学习班学员们的反应来看，可以说，我取得了初步的成功。

所以，在编写本书时，我的主要着力点便是：

1. 力求深入浅出，尽量用浅显易懂的物理概念来定性地进行讲解；
2. 紧密结合实际，除了我个人的实践经验以外，更多的是和广大的学员和读者们互相切磋得到的间接经验。

令我十分荣幸的是，清华大学的李鹤轩教授对本书进行了十分认真仔细的审阅，并且给予了较高的评价。他在给我的信中说，本书“是一本优秀的工程教育的教科书，也是高等院校有关专业师生很好的参考书”。

在写作期间，中国电力出版社给我提供了不少有用的参考资料，使我受益匪浅。

借此机会，我谨向李鹤轩老师以及所有帮助过我的同志们致以深切的感谢！

本书也有一些遗憾：限于条件，我退休后很少有机会到应用变频器的工厂去作深入的考察和了解，而我又偏执于讲不透的宁愿不写。因此，本书中应用实例的涉及面偏窄，有些实

例也缺少足够的数据。

除此以外，限于本人的水平，书中不妥及谬误之处在所难免，衷心地欢迎批评指正！  
热忱地欢迎广大读者经常与我切磋，共同进步！

作者

2003年7月

# 常用符号与缩写字一览表

## 一、物理量的符号

$B$	旋转磁场的磁感应强度	$I_{RN}$	热继电器发热元件的额定电流
$DF$	位移因数, 即 $\cos\varphi$	$I_M$	电动机的电流
$E$	感应电动势的有效值或直流值 (泛指)	$I_{MN}$	电动机的额定电流
$E_1$	定子绕组的感应电动势	$I_M\%$	电流取用比
$E_{01}$	定子漏磁电动势	$I_1$	定子电流
$E_2, E_2'$	转子绕组的感应电动势及其折算值	$I_2, I_2'$	转子电流及其折算值
$e$	感应电动势的瞬时值 (泛指)	$I_0$	励磁电流
$F$	作用力 (包括摩擦阻力等)	$I_N$	变频器的额定电流
$f$	频率 (泛指)	$I_C$	晶体管的集电极电流
$f_N$	额定频率	$I_{CM}$	晶体管的集电极最大允许电流
$f_X$	给定频率	$I_B$	晶体管的基极电流
$f_{OX}$	输出频率	$I_E$	晶体管的发射极电流
$f_B$	基本频率	$I_m$	直流旋转磁场的励磁电流
$f_{max}$	最大频率	$I_T$	直流旋转磁场的转矩电流
$f_{min}$	最小频率	$i$	电流的瞬时值 (泛指)
$f_{XM}$	最大给定频率	$i_1$	定子绕组的瞬时值
$f_{D1}$	偏置频率	$i_A$	A 相电流瞬时值
$f_H$	上限频率	$i_B$	B 相电流瞬时值
$f_L$	下限频率	$i_C$	C 相电流瞬时值
$f_J$	回避频率	$i_\alpha$	$\alpha$ 相电流瞬时值 (二相交流系统)
$f_{JOC}$	点动频率	$i_\beta$	$\beta$ 相电流瞬时值 (二相交流系统)
$G$	重物的重力	$J$	转动惯量
$G\%$	频率增益	$k_f$	频率调节比
$G_N$	起重机械的额定负荷	$k_U$	电压调节比
$GD^2$	飞轮力矩	$K_d$	电流的畸变因数
$g$	重力加速度	$K_P$	比例增益
$H$	扬程 (泛指)	$L_1$	定子主磁通引起的自感系数
$H_T$	全扬程	$m$	物体的质量
$H_A$	实际扬程	$m_1, m_2$	定、转子绕组的相数
$H_L$	损失扬程	$N_1, N_2$	定、转子每相绕组的匝数
$I$	电流的有效值或直流值 (泛指)	$N$	磁场的北极、传输带上的正压力
$I_a$	电流的平均值	$n$	转速 (泛指)
$I_{QN}$	空气断路器的额定电流	$n_M$	电动机的转速
$I_{KN}$	接触器的额定电流	$n_{MN}$	电动机的额定转速

$n_0$	电动机的理想空载转速或同步转速	$T_{\text{br}}$	电动机自身的制动转矩
$n_k$	电动机的临界转速	$T_{\text{DA}}$	需要附加的制动转矩
$n_L, n'_L$	负载转速及其折算值	$T_L, T'_L$	负载转矩及其折算值
$n_D$	机床的计算转速(分界转速)	$T_J$	拖动系统的动态转矩
$P$	有功功率(泛指), 比例带, 功率的瞬时值	$T_0$	损耗转矩
$P_{\text{RO}}$	制动电阻通电时消耗的电功率	$t$	时间(泛指)
$P_{\text{BA}}$	制动电阻在降速时间内消耗的平均功率	$t_B$	制动时间
$P_B$	制动电阻的实选功率	$t_C$	变频和工频的切换时间
$P_0$	损耗功率(泛指)	$t_d$	降速时间
$P_N$	变频器配用电机的容量	$t_D$	自由制动时的降速时间
$P_M$	电动机的功率	$t_{\text{DB}}$	直流制动时间
$P_{\text{MN}}$	电动机的额定功率	$t_r$	升速时间
$P_L$	负载功率	$t_{\text{ON}}$	晶体管的开通时间
$P_C$	晶体管的耗散功率	$t_{\text{OFF}}$	晶体管的关断时间
$PH$	功率因数	$t_P$	启动时的暂停升速时间
$p$	电动机的磁极对数, 压力(泛指)	$t_S$	升、降速时的 S 形时间
$P_{\text{Cu1}}, P_{\text{Cu2}}$	定、转子的铜损	$U$	电压的有效值或直流值(泛指)
$P_{\text{Fe1}}, P_{\text{Fe2}}$	定、转子的铁损	$U_A$	直流电动机电枢电压
$Q$	流量	$U_{\text{DB}}$	直流制动电压
$Q_C$	供水流量	$U_1$	电源的相电压
$Q_U$	用水流量	$U_L$	电源的线电压
$Q_N$	额定流量	$U_N$	变频器的额定电压
$R_B$	制动电阻	$U_D$	变频器直流电路的电压
$R_L, R'_L$	机械负载的等效电阻及其折算值	$U_{\text{DH}}$	变频器直流电路的允许上限电压
$r$	电阻(泛指)、回转半径	$U_X$	与 $f_X$ 对应的变频器输出电压
$r_1$	定子绕组的电阻	$U_{\text{CEO}}$	晶体管的击穿电压(控制极无反偏)
$r_2, r'_2$	转子绕组及其折算值	$U_{\text{CEA}}$	晶体管的击穿电压(控制极有反偏)
$r_m$	励磁支路中铁损的等效电阻	$u$	电压的瞬时值、给定电压或信号电压
$S$	磁场的南极、视在功率(泛指)	$v$	线速度
$S_N$	变频器的额定容量	$v_f, v_R$	刨床的切削速度和返回速度
$s$	转差率(泛指)	$W$	电动机消耗的电能
$s_N$	额定转差率	$X, X_{\text{max}}$	变频器的给定信号及其最大值
$s_k$	临界转差率	$X_T$	目标信号
$T$	转矩(泛指)、周期(泛指)	$X_f$	反馈信号
$T_E$	有效转矩(泛指)	$X_1$	定子绕组的漏磁电抗
$T_M$	电动机的转矩	$X_2, X'_2$	转子绕组的漏磁电抗及其折算值
$T_{\text{MN}}$	电动机的额定转矩	$X_m$	励磁支路中的等效电抗
$T_k$	电动机的临界转矩	$\alpha_n$	转速调节范围
$T_S$	电动机的启动转矩	$\alpha_f$	频率调节范围
$T_B$	电动机的制动转矩	$\alpha_L$	负载的调速范围
		$\alpha_C$	齿轮箱的速比

$\beta$	晶体管的电流放大倍数、电动机的过载能力	$\theta$	电动机的温升, 水的温度, 仪表的偏转角
$\gamma$	脉冲的占空比	$\lambda$	传动比
$\gamma_{\text{II}}$	制动电阻的容量修正系数	$\mu_1, \mu_2$	动摩擦系数和静摩擦系数
$\Delta n$	转速降落, 转差	$\sigma$	负荷率
$\Delta P$	功率损失	$\tau$	发热时间常数
$\Delta p$	压差	$\Phi$	磁通量 (泛指)
$\Delta \theta$	温差	$\Phi_{\Delta}$	直流电动机电枢磁通
$\varepsilon$	自动调整后的静差	$\varphi$	功率因数角
$\varepsilon_n$	每相邻两挡的转速差	$\psi$	定、转子磁场轴线间的夹角
$\eta$	效率	$\rho$	物体的回转半径

## 二、缩写符号

AC	交流	ON	接通
AVR	自动电压调节	OUT	输出
DC	直流	PAM	脉幅调制
IN	输入	PWM	脉宽调制
L	水位 (泛指)	SPWM	正弦脉宽调制
OFF	断开	VVVF	变压变频

## 三、元、器件符号

AM	交流电动机	PID	比例、积分、微分调节器
AL	交流电抗器	PG	测速装置
BJT	双极晶体管	PLC	可编程控制器
BQ	流量变换器	QF	空气开关
BV	制动单元	RP	电位器
DM	直流电动机	SA	控制开关
DL	直流电抗器	SB	按钮开关
DS	减速机构	SF	正转启动按钮开关
GTR	大功率晶体管	SR	反转启动按钮开关
HA	声响指示器	ST	停止按钮开关
HL	指示灯	SQ	限位开关
IGBT	绝缘栅双极晶体管	SP	压力传感器
IPM	智能模块	SCR	晶闸管
KA	交流继电器, 电流继电器	UF	变频器
KF	变频器内保护继电器	V	晶体管、各类开关管
KH	热继电器	VD	二极管
KM	接触器	VH	发光二极管
L	负载 (泛指)	YA	电磁铁
M	电动机 (泛指)	YB	电磁制动器
MOSFET	场效应管		

## 目 录

前言

常用符号与缩写字一览表

<b>第一章 电动机及拖动系统的基础知识</b> .....	1
第一节 直流电动机及其调速 .....	1
第二节 三相交流异步电动机及其调速 .....	2
第三节 异步电动机的基础分析 .....	6
第四节 异步电动机的机械特性 .....	14
第五节 负载的机械特性 .....	18
第六节 拖动系统运行状况的分析 .....	21
第七节 拖动系统的四象限运行 .....	22
第八节 拖动系统的暂态过程 .....	25
第九节 拖动系统的工作方式 .....	27
第十节 传动装置及其在调速系统中的作用 .....	29
第十一节 调速系统中应注意的问题 .....	33
<b>第二章 交-直-交变频器的基本原理与构成</b> .....	35
第一节 实现变频调速的关键 .....	35
第二节 变频调速的特殊问题 .....	39
第三节 机械特性的改善 .....	44
第四节 变频器内部的主体电路 .....	48
第五节 主体电路的改进 .....	51
第六节 变频器的内部控制框图 .....	55
第七节 操作面板的使用 .....	60
第八节 功能的预置 .....	60
第九节 常用逆变模块介绍 .....	63
<b>第三章 变频器的功能综述</b> .....	66
第一节 频率的给定功能 .....	66
第二节 变频器中频率的名称与功能 .....	72
第三节 变频器的基本控制功能 .....	76
第四节 升速与启动功能 .....	79
第五节 降速与制动功能 .....	82
第六节 变频器的控制方式 .....	87

第七节	变频调速的程序控制功能 .....	95
第八节	变频器的 PID 调节功能 .....	97
第九节	变频器的保护功能 .....	103
第十节	某些变频器的特殊功能 .....	107
<b>第四章 变频器的外接主电路与配件</b> .....		
第一节	外接主电路与主要电器的选择 .....	113
第二节	制动电阻及制动单元 .....	115
第三节	变频器的功率因数及其改善 .....	121
第四节	变频器的干扰及其防止 .....	124
第五节	电源不符时的处理 .....	129
第六节	变频器主电路的测量 .....	131
第七节	变频器的安装与接线 .....	135
<b>第五章 变频调速系统的设计与运行</b> .....		
第一节	对变频调速系统的基本要求 .....	139
第二节	普通异步电动机与变频 .....	140
第三节	变频器及各部分电流 .....	145
第四节	变频调速时的有效转矩线 .....	147
第五节	V/F 控制时的电流变化规律 .....	152
第六节	恒转矩负载的变频调速 .....	154
第七节	恒功率负载的变频调速 .....	157
第八节	二次方律负载的变频调速 .....	160
第九节	变频与工频的切换 .....	161
<b>第六章 工厂运输机械的变频调速</b> .....		
第一节	概述 .....	170
第二节	带式输送机的变频调速 .....	171
第三节	桥式起重机的变频调速 .....	174
第四节	起升机构的变频调速 .....	177
第五节	大车和小车的变频调速 .....	183
第六节	起重机械专用变频器 .....	185
第七节	电梯的变频调速 .....	187
第八节	电梯专用变频器 .....	189
<b>第七章 金属切削机床的变频调速</b> .....		
第一节	机床拖动系统的主要特点 .....	193
第二节	普通车床的实例与基本数据 .....	193
第三节	车床变频调速系统的设计举例 .....	198
第四节	龙门刨床的构造及其主拖动系统 .....	201



第五节	刨台往复运动的控制 .....	203
第六节	刨台运动的变频调速 .....	207
第七节	刀架与横梁的控制 .....	211
第八节	龙门刨床控制电路 .....	216
<b>第八章 水泵、风机的变频调速 .....</b>		<b>220</b>
第一节	水泵的基本特性和节能原理 .....	220
第二节	变频调速恒压供水系统 .....	226
第三节	多台水泵变频调速时的切换控制 .....	228
第四节	水位控制的变频调速系统 .....	231
第五节	中央空调的变频调速 .....	237
第六节	风机的变频调速 .....	241
<b>第九章 变频调速系统的调试与维护 .....</b>		<b>246</b>
第一节	变频调速系统的调试 .....	246
第二节	变频器的维护 .....	247
第三节	过电流、过载与过热 .....	248
第四节	过电压与欠电压 .....	252
第五节	外部故障 .....	254
第六节	机械振动故障 .....	255
第七节	变频器内部故障的检查 .....	256
<b>附录 常见变频器简介 .....</b>		<b>259</b>
附录 1	森兰 SB61 系列变频器 .....	259
附录 2	时代 TVF2000 系列变频器 .....	262
附录 3	康沃 CVF-G1 系列变频器 .....	266
附录 4	惠丰 HF-G 系列变频器 .....	270
附录 5	英威腾 INVT 系列变频器 .....	273
附录 6	安邦信 AMB-G7 系列变频器 .....	277
附录 7	艾默生 TD3000 系列变频器 .....	281
附录 8	台达 VFD-B 系列变频器 .....	285
附录 9	超能士 SMX 系列变频器 .....	288
附录 10	安川 G7 系列变频器 .....	291
附录 11	富士 C11S 系列变频器 .....	297
附录 12	三菱 FR-A540 系列变频器 .....	301
附录 13	日立 SJ300 系列变频器 .....	304
附录 14	明电 VT230S 系列变频器 .....	308
附录 15	东芝 VF-A7 系列变频器 .....	311

附录 16	LG-iS5 系列变频器 .....	315
附录 17	ABB-ACS600 系列变频器 .....	318
附录 18	VACON-CX 系列变频器 .....	322
附录 19	丹佛斯 VLT5000 系列变频器 .....	325
参考文献	.....	329

# 电动机及拖动系统的基础知识

长期以来,在电力拖动领域,尽管电动机的品种十分繁多,但最具典型意义的主要有两个:直流电动机和三相交流异步电动机。

## 第一节 直流电动机及其调速

### 一、基本结构

任何电动机的转矩都是由电流在磁场中受力而产生的,或者说,是两个磁场相互作用的结果。因此,所有电动机都必须具有两个基本组成部分:

- (1) 产生磁场的部分(励磁部分);
- (2) 提供电流(该电流也必产生磁场)的部分。

上述基本组成部分在直流电动机中尤其显得分明,其具体结构如下:

#### 1. 定子

定子除了用于支撑整台电动机外,更重要的是它是主磁通的产生地。因此,其主要部件有:

- (1) 定子磁极。用于产生主磁通。
- (2) 励磁绕组。用于提供励磁电流。

当励磁绕组中通入励磁电流  $I_0$  时,定子磁极便产生主磁通  $\Phi_0$ 。

#### 2. 转子

也叫电枢,用于吸取电源功率,并转换成机械能。主要部件有:

- (1) 转子铁芯。用于构成磁路。
- (2) 转子绕组。用于通入电枢电流,是输入电能的主要部件。所以,转子绕组的结构比较复杂,工艺要求也较高。

当电枢(转子)绕组中通入电枢电流时,便产生电枢磁通  $\Phi_A$ 。

#### 3. 换向器和电刷

因为转子是旋转的,而电源是静止的,所以,要使电流流入转子绕组,必须通过换向器和电刷。换向器的另一个任务是:使处于同一磁极下的电枢绕组中电流的方向都相同,从而产生方向相同的转矩。

#### 4. 直流电动机在结构上的薄弱环节

当转子旋转时,在电刷和换向器之间,进行着很快的相对运动。为了使电刷和换向器在做相对运动时,能始终保持良好的接触,它们之间又必须保持足够大的压力。这构成了直流电动机的一个十分严重的薄弱环节:就是电刷和换向器的磨损,以及随之而来的火花。甚至可以说,在几乎所有的电动机部件中,直流电动机的换向器是故障率最高的部件。直流电动机的构造如图 1-1 所示。

### 二、主要特点

#### 1. 两个磁场互相垂直

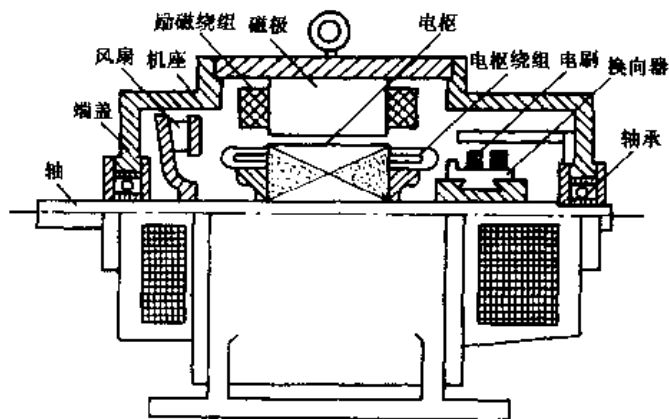


图 1-1 直流电动机的构造

这两个电路由各自的电源供电（也可互相并联），一个电路中电流大小的变化，并不影响另一个电路，所以是互相独立的，如图 1-2 (b) 所示。

### 三、调速特性

直流电动机的调速特性十分优异，长期以来，被认为是所有电动机中调速特性的典范。其主要特点如下。

#### 1. 调压调速

平滑地调节电枢电压  $U_A$  的大小，可以在额定转速以下实现无级调速。并且，调速后的机械特性互相平行。如加入电流反馈和速度反馈环节，则调速后的机械特性可以十分平直，如图 1-2 (c) 下半部所示。这样的调速特性，被认为是非常理想的。

#### 2. 弱磁调速

调节励磁电流  $I_0$  的大小（在一般情况下，励磁电流只能调小，不能调大，故称为弱磁调速），可以在额定转速以上进行无级调速。虽然，励磁电流越小，机械特性也越软，但可以作为补充的调速手段，从而拓宽了调速范围，如图 1-2 (c) 上半部所示。

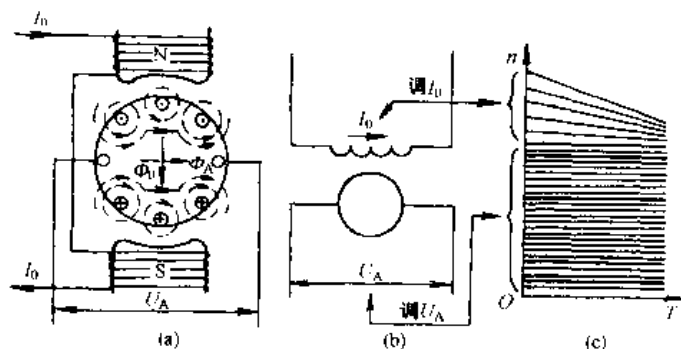


图 1-2 直流电机的特点

(a) 构造示意；(b) 基本电路；(c) 调速特性

## 第二节 三相交流异步电动机及其调速

### 一、结构特点

#### 1. 定子绕组

定子里安放的是三相绕组。所谓三相绕组，就是三组在空间位置上互差  $\frac{2\pi}{3}$  电角度的绕组，把它们按照一定的规律（Y形或△形）连接而成。

当把三相交变电流（其特点是在相位上也互差  $\frac{2\pi}{3}$  电角度）通入三相绕组后，它们的合成磁场是不断地旋转着的旋转磁场。

旋转磁场的转速也叫同步转速，用  $n_0$  表示，由下式计算：

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

式中  $f$ ——电流频率；  
 $p$ ——磁极对数。

### 2. 转子绕组

转子绕组由两侧端部互相短接的铜条或铝条（俗称鼠笼条）构成，和外电路之间没有任何电的联系，因而可自成一体，像个“鼠笼”，如图 1-3 所示。在所有电动机中，这种结构在简单、坚固方面是首屈一指的。这带来了使用寿命长、易于维修以及价格低廉等极为突出的优点，使它在整个电力拖动领域，占领了 85% 以上的阵地。

### 二、运行特点

转子绕组切割旋转磁场而产生感应电动势和电流，感应电流和定子磁场相互作用，产生电磁转矩，使转子旋转起来，如图 1-4 所示。

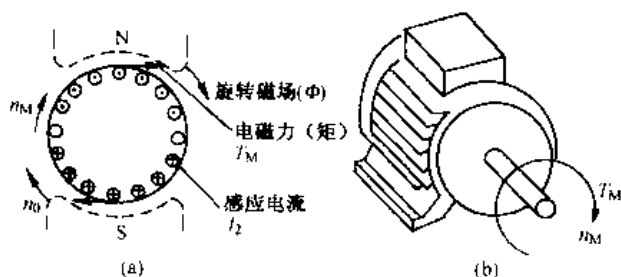


图 1-4 异步电动机的旋转原理  
(a) 截面；(b) 外形

转差率  $s$  的计算公式是

$$s = \frac{n_0 - n_M}{n_0} \quad (1-3)$$

转子绕组中的感应电流也要产生旋转磁场，但十分明显的是，如果定子绕组中没有电流，转子绕组中也就产生不了感应电流。所以，转子磁场是不可能独立存在的，也无法从外部去进行控制。并且，转子磁场和定子磁场在空间上也并不互相垂直。

直流电动机在结构上的两个特点，异步电动机都不具备，这是异步电动机调速困难的根本原因。

### 三、调速的基本途径

式 (1-2) 表明，除变频调速以外，异步电动机调节转速的基本途径有：

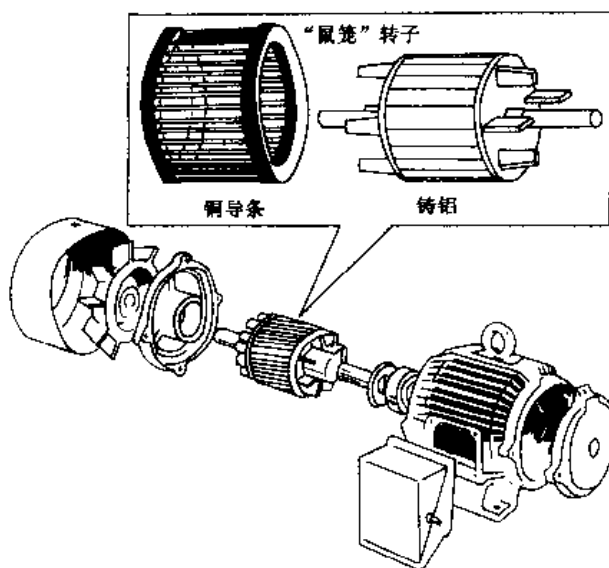


图 1-3 异步电动机的构造

实践表明，转子的旋转速度  $n_M$  和同步转速  $n_0$  是很接近的，但总要比磁场的转速慢一些。很明显，要是两者的转速相等，转子绕组便不再切割磁通，也就没有感应电流和转矩了。所以，电动机的转速公式是

$$n_M = n_0 (1 - s) = \frac{60f}{p} (1 - s) \quad (1-2)$$

式中  $n_M$ ——转子的转速，r/min；  
 $s$ ——转差率。

### 1. 改变磁极对数 $p$

改变磁极对数实际上就是改变定子旋转磁场的转速。所以，磁极对数的改变是通过改变定子绕组的接法来实现的，如图 1-5 (a) 和 (b) 所示。

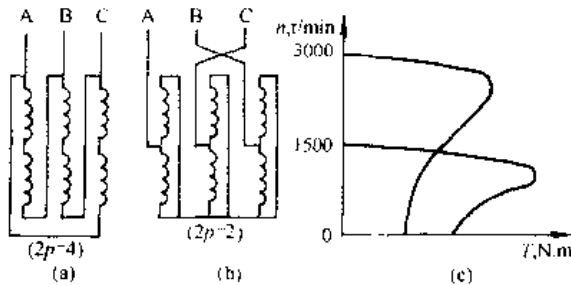


图 1-5 改变磁极对数  
(a) 4 极; (b) 2 极; (c) 机械特性

如图 1-5 (c) 所示，故带负载能力也不一致。

(4) 调速时必须改变绕组接法，故控制电路比较复杂。

显然，这不是一种好的调速方法。

### 2. 改变转差率 $s$

改变转差率是通过在转子电路中串联电阻来实现的。所以，这种方法只适用于绕线式转子异步电动机，如图 1-6 (a) 所示。

这种调速方法虽然在一部分机械中得到了较为普遍的应用，但其缺点也是十分明显的，有如下几点：

(1) 因为调速电阻在外部，为了使转子电路和调速电阻之间建立电的联系，绕线式转子异步电动机在结构上加入了电刷和滑环等薄弱环节，提高了故障率。

(2) 调速电阻内将白白地消耗掉许多电能。

(3) 转速的挡位也不可能很多。

(4) 调速后的机械特性较“软”，不够理想，如图 1-6 (b) 所示。

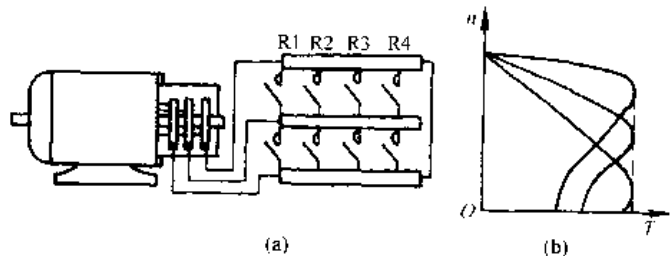


图 1-6 改变转差率的调速  
(a) 电路接法; (b) 机械特性

## 四、实现无级调速的派生产品

如前所述，在变频调速问世之前，异步电动机在实现无级调速方面，完全处于低能的状态。因此，人们在既保持其结构简单坚固、易于维修的优点，又能实现无级调速方面，作出了许多努力，常见的派生产品有：

### 1. 电磁调速电动机

也叫滑差电动机，或电磁转差离合器。其基本构造如图 1-7 (a) 所示。

电磁调速电动机相当于两级异步电动机：第一级就是异步电动机 M；第二级由电枢、励磁绕组、转子等构成，转子的结构与普通异步电动机类似。

其工作原理是：电动机 M 带动电枢及励磁绕组旋转，励磁绕组由调速控制器提供直流电流。当电动机 M 带动电枢及励磁绕组旋转时，在第二级中便产生了一个“直流旋转磁

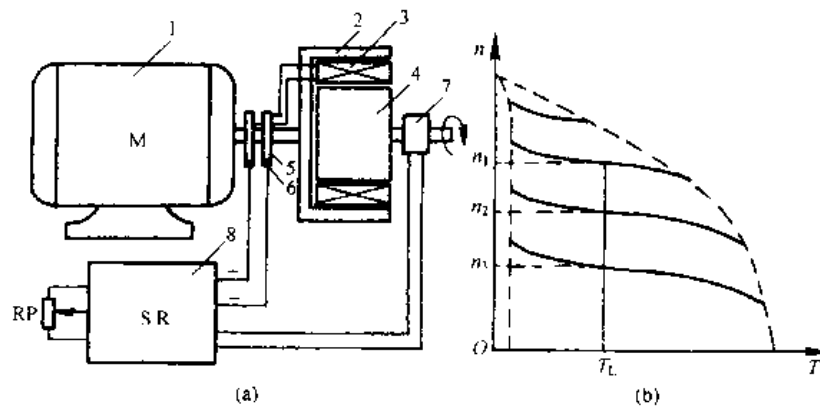


图 1-7 电磁调速电动机

(a) 基本构造；(b) 机械特性

- 1—异步电动机；2—电枢；3—励磁绕组；4—转子；  
5—滑环；6—电刷；7—测速装置；8—调速控制器

场”，于是在转子绕组中产生了感应电流，并产生电磁转矩，使转子旋转。

调节调速控制器的输出电压，也就调节了电枢的励磁电流和电磁转矩，从而调节了转速。在这里，励磁电流的大小并不能如异步电动机那样随转差大小而自动调整，而只能通过转速反馈来调整励磁电流，即：当转速低于给定值时，通过转速反馈来增大励磁电流；转速高于给定值时，又通过转速反馈来减小励磁电流，从而得到如图 1-7 (b) 所示的机械特性。

由于在低速时，励磁电流的给定值较小，故励磁电流的调节范围较大，因而电磁转矩的变化范围也较大；反之，高速时，励磁电流的给定值较大，励磁电流的调节范围较小，因而电磁转矩的变化范围也较小。

电磁调速电动机较好地实现了无级调速，在纺织机械、塑料机械以及其他行业的机械中得到了广泛的应用。

但明显的是：其运行效率较低，且由于有电刷和滑环而增加了薄弱环节。此外，其机械特性的硬度较差，调速范围也较窄。

## 2. 力矩电动机

(1) 异步电动机的调压调速。异步电动机在调节电压时，只能改变其临界转矩，而不能改变其临界转差率，如图 1-8 (a) 所示。因此，虽然普通的异步电动机也能进行调压调速，但调节的范围很小，且电压下降后，其过载能力也将下降。

(2) 力矩电动机及其特性。力矩电动机的基本结构和普通的异步电动机相同，但转子绕组（鼠笼条）由电阻率较高的材料构成。其目的，是使机械特性的临界转速  $n_k$  下降，从而在调节电压时，所得到的调速范围较广，如图 1-8 (b) 所示。如果配以转速反馈，也能得到较硬的机械特性。

但十分明显，其功率损失将因为转子电阻的增大而增大，运行效率较低。

## 五、对变频调速的企盼

调节了频率，便调节了同步转速，也就调节了异步电动机轴上的转速，如图 1-9 所示。

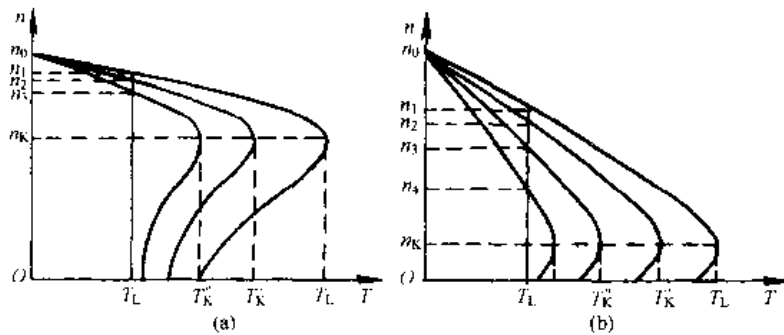


图 1-8 调节电压时的机械特性

(a) 普通电动机; (b) 力矩电动机

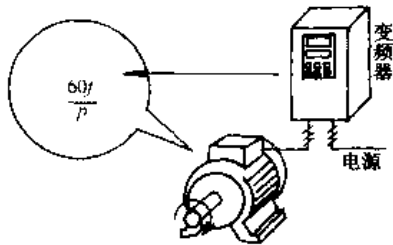


图 1-9 变频调速

显然, 只有平滑地改变频率, 才能实现异步电动机的无级调速, 才有可能和直流电动机的调速特性一比高低。因此, 变频调速是交流电动机中最好的一种调速方法。这个结论, 是从异步电动机诞生之日起就已经知道的。三相交流异步电动机发明于 1889 年, 而变频调速技术却直到 20 世纪 80 年代, 才真正进入实用阶段, 可以说, 人们企盼了近一个世纪!

### 第三节 异步电动机的基础分析

异步电动机的定子和转子之间只有磁的联系, 而没有电的联系, 且转子电路是一个十分复杂的多相电路, 其绕组排列如图 1-10 所示。虽然从结构上说, 这是它的一大优点, 但却给定量分析定、转子之间的关系带来了困难。

为了便于分析, 人们设法用一种等效电路来代替实际的电路, 从而使定、转子各物理量之间的关系能够在统一的电路里进行定量分析。

在分析异步电动机的工作过程时, 必须时时注意能量在传递过程中的平衡状况。

#### 一、异步电动机的定子电路

定子电路由对称的三相绕组构成, 在分析时可以只拿一相来进行观察。

异步电动机定子绕组的特殊之处在于: 它既起输入电源功率的作用, 又起产生主磁通的作用。

因为有铁芯和磁场, 所以, 其电路明显地是一个电感电路。又由于异步电动机中的磁通起着传递能量的重要作用, 所以, 和一般的电感电路又有所不同。在这里, 有必要首先对磁通的路径进行分析。

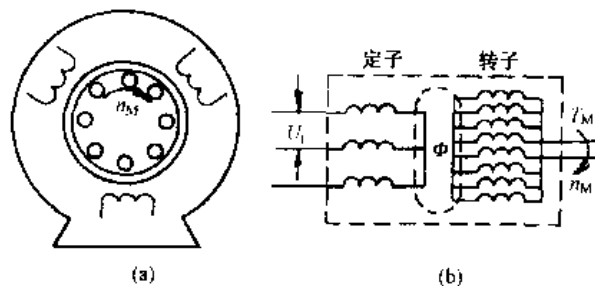


图 1-10 异步电动机的绕组排列

(a) 绕组安排; (b) 定、转子绕组电路



### (一) 定子绕组的磁通

如图 1-11 所示, 定子绕组产生的磁通有主磁通和漏磁通两种情形。

#### 1. 主磁通

主磁通是穿过空气隙, 并与转子绕组相链的磁通, 图 1-11 中的  $\Phi_1$  即为主磁通。所谓“与转子绕组相链”, 也就是能够被转子绕组切割, 使转子绕组因产生感应电动势和感应电流而得到能量。所以, 主磁通是用来传递能量的。

#### 2. 漏磁通

漏磁通是未能穿过空气隙与转子绕组相链的磁通, 图 1-11 中的  $\Phi_0$  即为漏磁通。这部分磁通并未参与传递能量, 仅仅使定子绕组产生自感电动势 (感抗)。

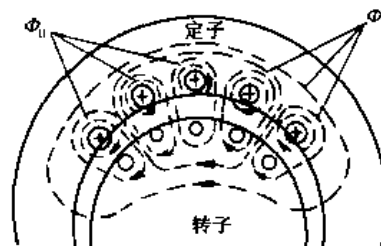


图 1-11 定子绕组的磁通

### (二) 定子绕组的电动势

所有交变磁通都会在绕组中产生自感电动势, 但在电动机里, 根据磁通路径的不同, 对电感的处理方式也不一样。

#### 1. 定子绕组的反电动势

定子绕组的反电动势是定子绕组切割了自己产生的主磁通而感生的自感电动势, 是定子电路中和电源电压相抗衡的主要成分, 因而常称为反电动势。其大小决定于

$$e_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (1-4)$$

式中  $e_1$ ——定子反电动势的瞬时值, V;  
 $L_1$ ——主磁通引起的自感系数, mH;  
 $\frac{di_1}{dt}$ ——定子电流的变化率, A/s。

反电动势的有效值由下式计算:

$$E_1 = 4.44 K_E f_1 N_1 \Phi_1 \quad (1-5)$$

式中  $E_1$ ——反电动势的有效值, V;  
 $f_1$ ——定子电流的频率, Hz;  
 $N_1$ ——每相定子绕组的匝数;  
 $K_E$ ——比例常数。

式 (1-5) 表明, 在频率一定的情况下, 反电动势的有效值和主磁通成正比。因此, 反电动势的大小直接反映了主磁通的大小, 也反映了向转子传递能量的大小。

#### 2. 漏磁通的自感电动势

漏磁通的自感电动势是定子绕组切割漏磁通所产生的自感电动势, 其大小决定于

$$e_{01} = -L_{01} \frac{di_1}{dt} \quad (1-6)$$

式中  $e_{01}$ ——定子漏磁电动势的瞬时值, V;  
 $L_{01}$ ——定子漏磁通引起的自感系数, mH。

定子漏磁电动势的有效值在数值上等于

$$E_{01} = I_1 X_1 \quad (1-7)$$

式中  $E_{01}$ ——定子漏磁电动势的有效值, V;

$X_1$ ——定子绕组的漏磁电抗,  $\Omega$ 。

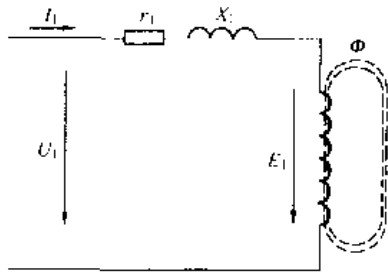


图 1-12 定子绕组的等效电路

$U_1$ —电源的相电压, V;  $r_1$ —定子每相绕组的电阻,  $\Omega$ ;  $X_1$ —定子每相绕组的漏磁电抗,  $\Omega$ ;  $E_1$ —定子每相绕组的反电动势, V

$X_1$  的大小由下式决定:

$$X_1 = 2\pi f L_{01} \quad (1-8)$$

就是说, 漏磁通引起的自感电动势通常是以漏磁电抗的方式来表达的。

### (三) 定子电路与电动势平衡方程

#### 1. 定子电路

综合上述, 可以作出一相定子绕组的等效电路, 如图 1-12 所示。

#### 2. 电动势平衡方程

在定子电路中, 电压  $U_1$  是从电源输入电能的标志; 电流  $I_1$  是电能做功的标志; 电能在做功过程中要克服的主要反作用是反电动势  $E_1$ 。借助等效电路, 可以得到定子绕组每相的电动势平衡方程, 即

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 X_1 \quad (1-9)$$

式中, 电压、电动势和电流都用复数, 说明它们之间并非代数加减的关系。

由式 (1-9) 可知, 定子电流可计算如下:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{E}_1}{r_1 + jX_1} \quad (1-10)$$

### (四) 定子的能量关系

定子的能量关系如图 1-13 所示。

#### 1. 输入功率

定子的输入功率就是从电源吸取的功率, 其计算公式如下:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1-11)$$

#### 2. 损失功率

损失功率包括:

(1) 定子铁损。用  $P_{\text{Fe1}}$  表示, 包括定子铁芯中的涡流损失和磁滞损失。

(2) 定子铜损。用  $P_{\text{Cu1}}$  表示, 就是定子绕组的电阻所消耗的功率, 即

$$P_{\text{Cu1}} = 3I_1^2 r_1 \quad (1-12)$$

#### 3. 电磁功率

输入功率中减去损失功率后余下的功率, 就是通过主磁通传递到转子上的功率, 称为定子电磁功率, 用  $P_M$  表示。计算公式如下:

$$P_M = 3E_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1-13)$$

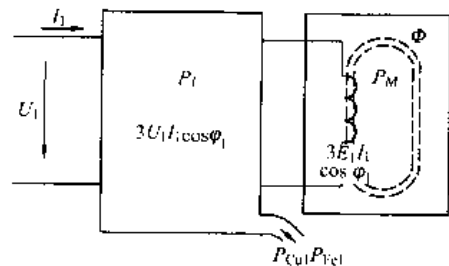


图 1-13 定子的能量关系

## 二、异步电动机的转子电路

### (一) 静止状态下的转子绕组

#### 1. 转子绕组的感应电动势

转子绕组的感应电动势是转子绕组切割主磁通的结果，是转子绕组中得以产生电流的“源”。

在静止状态下，其产生过程和定子绕组完全相同，所以其有效值为

$$E_2 = 4.44 K_E f_1 N_2 \Phi_1 \quad (1-14)$$

式中  $E_2$ ——静止状态下，转子绕组电动势的有效值，V；

$N_2$ ——每相转子绕组的匝数。

在静止状态下，转子电动势的频率和定子电动势是相同的。

#### 2. 转子绕组的漏磁电抗

漏磁电抗的大小和频率有关，在静止状态下，有

$$X_2 = 2\pi f_1 L_2 \quad (1-15)$$

式中  $X_2$ ——静止状态下，转子绕组的漏磁电抗， $\Omega$ ；

$L_2$ ——静止状态下，转子绕组的漏磁电感，H。

### (二) 旋转状态的转子绕组

#### 1. 转子电动势的频率

因为在旋转状态下，转子绕组切割主磁通的速度是

$$\Delta n = n_0 - n_M \quad (1-16)$$

式中  $\Delta n$ ——转差，是转子转速与同步转速之差。

所以，转子电动势的频率为

$$f_2 = \frac{p \Delta n}{60} = \frac{p s n_0}{60} = s f_1 \quad (1-17)$$

式中  $f_2$ ——转子电动势的频率，Hz。

因此，转子电动势和电流的频率通常也称为转差频率。

#### 2. 转子电动势的有效值

转子电动势有效值的基本计算公式和式(1-14)相同，但因为切割主磁通的速度和频率都不一样了，所以

$$E_{2s} = 4.44 K_E f_2 N_2 \Phi_1 = s E_2 \quad (1-18)$$

式中  $E_{2s}$ ——旋转状态下，转子绕组电动势的有效值，V。

#### 3. 转子绕组的漏磁电抗

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = s X_2 \quad (1-19)$$

式中  $X_{2s}$ ——旋转状态下，转子绕组的漏磁电抗， $\Omega$ 。

#### 4. 转子绕组的电流

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{s E_2}{\sqrt{r_2^2 + s^2 X_2^2}} \quad (1-20)$$

式中  $I_2$ ——旋转状态下，转子绕组的电流，A。

### (三) 转子电路的等效变换

图 1-14 (a) 是以转速  $n_M$  旋转着的转子的断面，其绕组由  $n$  根“鼠笼条”构成，每一

根“鼠笼条”为“一相”，故转子电路是  $n$  相电路，如图 1-14 (b) 所示。

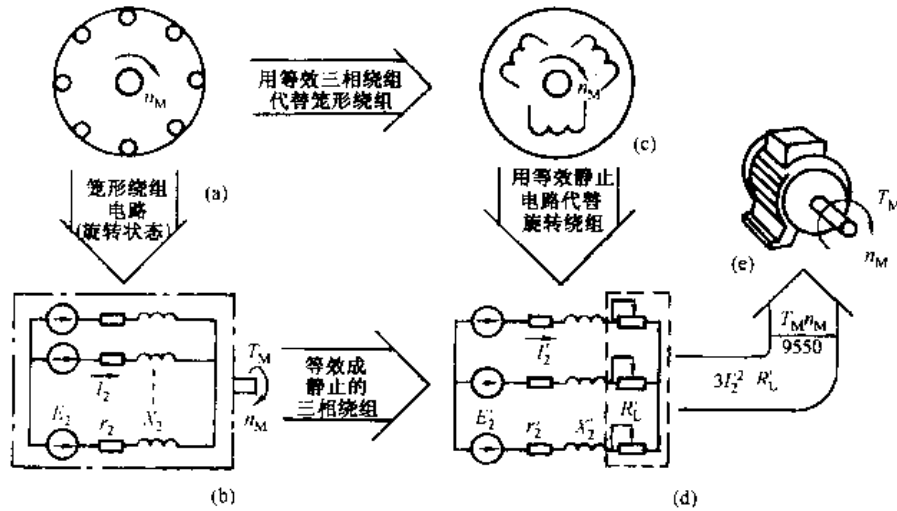


图 1-14 转子电路的等效变换

(a) 转子的断面；(b) 转子的电路；(c) 用三相绕组代替转子绕组；  
(d) 用静止电路代替旋转绕组；(e) 电动机外形

### 1. 绕组的相数变换

转子的  $n$  相电路与定子的三相电路是无法统到一起的。因此，必须用一个等效的三相绕组去代替  $n$  相绕组，如图 1-14 (c) 所示。在这里，等效的条件是：由等效绕组所得到的功率，必须和原来的  $n$  相绕组得到的总功率相等。

### 2. 动静变换

因为转子是旋转的，它输出的是电磁转矩  $T_M$  和转速  $n_M$ ，输出功率为机械功率  $P_2$ ，有

$$P_2 = \frac{T_M n_M}{9550} \quad (1-21)$$

式中  $P_2$ ——电动机的输出功率，kW；

$T_M$ ——电动机的电磁转矩，N·m；

$n_M$ ——电动机轴上的转速，r/min。

所谓“动—静变换”，就是把旋转的、输出机械能的转子等效地变换成静止的“转子电路”。其具体方法是：因为机械功率  $P_2$  是有功功率，所以，在电路里串入一个等效的有功元件  $R_L$ ，条件是在  $R_L$  上所消耗的有功功率应该和电动机输出的机械功率相等（因为是等效电路，所以，电路中各元件的参数都缀以“'”），即

$$3I_2'^2 R_L' = \frac{T_M n_M}{9550} \quad (1-22)$$

式中  $I_2'$ ——等效电路中，转子的相电流，A；

$R_L'$ ——与机械负载等效的电阻， $\Omega$ 。

### 3. 一相等效电路及电动势平衡方程

(1) 一相等效电路。和定子相仿，因为三相电路是对称的，所以，在分析时可以只拿一

相来进行观察。转子的一相等效电路如图 1-15 所示。

(2) 转子的电动势平衡方程。在转子电路中，电动势  $E'_2$  是从通过磁通传输给转子，并转换成电能的标志；电流  $I'_2$  是电能做功的标志；电能在做功过程中要克服的主要反作用是负载阻转矩的等效电阻  $R'_L$ 。借助等效电路，可以得到转子每相绕组的电动势平衡方程为

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \dot{i}'_2 r'_2 + j \dot{i}'_2 X'_2 \quad (1-23)$$

以上各计算公式中，等效电路中的所有物理量的符号旁，都缀以“'”。等效电路中的物理量和实际电路中物理量之间的换算关系，称为折算。因此，所有缀以“'”的物理量，都是“折算值”。本书因为不进行具体计算，故折算公式从略。

因为电动机输出功率的主成分是负载功率，所以， $R'_L$  是一个可变等效电阻，其大小应能随负载的变化而变化。

(3)  $R'_L$  的大小。将式 (1-20) 中各量都变换成折算值后，再将分子和分母同除以  $s$ ，得

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{s}\right)^2 + X'^2_2}} \quad (1-24)$$

式 (1-24) 说明：静止等效电路中总等效电阻的大小是  $r'_2/s$ 。减去转子每相绕组的等效电阻，便是机械负载的等效电阻，即

$$R'_L = \frac{r'_2}{s} - r'_2 = \frac{1-s}{s} r'_2 \quad (1-25)$$

式中  $r'_2$ ——转子等效电路中，每相绕组的电阻， $\Omega$ 。

#### (四) 转子的能量关系

##### 1. 电磁功率

电磁功率就是转子绕组切割定子磁场得到的功率，或者说，是通过磁场传递给转子的功率。是转子侧的输入功率。其计算公式如下：

$$P_M = 3 E'_2 I'_2 \cos \varphi_2 \quad (1-26)$$

##### 2. 损失功率

损失功率包括：

- (1) 转子铁损。用  $P_{Fe2}$  表示，包括转子铁芯中的涡流损失和磁滞损失。
- (2) 转子铜损。用  $P_{Cu2}$  表示，就是转子绕组的电阻所消耗的功率，即

$$P_{Cu2} = 3 I'^2_2 r_2 \quad (1-27)$$

##### 3. 输出功率

因为输出的是机械功率，由式 (1-14) 计算。在等效电路中，则表现为等效的电功率，即

$$P_2 = 3 U'_2 I'_2 = 3 I'^2_2 R'_L \quad (1-28)$$

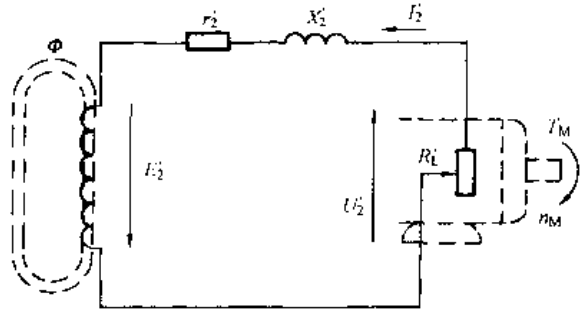


图 1-15 转子的一相等效电路

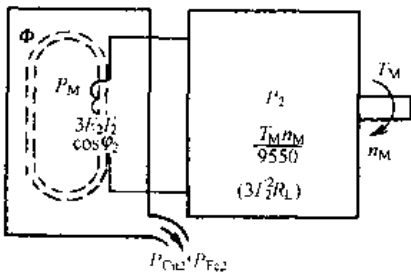


图 1-16 转子的能量关系

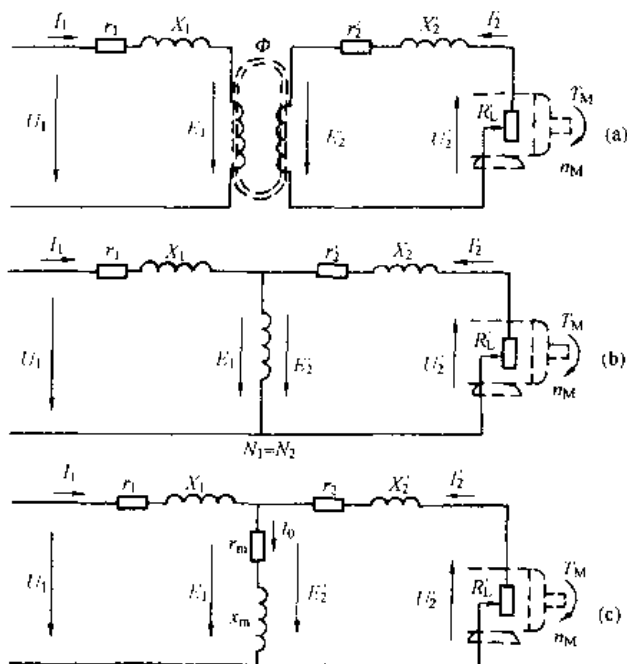


图 1-17 完整的电动机等效电路  
 (a)  $N_1 \neq N'_2$  时的定、转子等效电路;  
 (b)  $N_1 = N'_2$  时的定、转子等效电路;  
 (c) 电动机等效电路

### 三、异步电动机的等效电路

#### (一) 完整的电动机等效电路

##### 1. 定、转子等效电路的合并

把上面的定、转子等效电路放到一起，就得到如图 1-17(a)所示的等效电路。

如果在把转子绕组变换成等效三相绕组时，使每相绕组的匝数  $N'_2$  与定子每相绕组的匝数  $N_1$  相等，即

$$N_1 = N'_2$$

则定、转子绕组在电路中可以合二为一，如图 1-17 (b) 所示。中间的绕组统称为励磁绕组。

##### 2. 励磁支路

励磁绕组所在的电路称为励磁支路，由电阻  $r_m$  和电抗  $X_m$  所构成，如图 1-17(c) 所示。 $r_m$  和  $X_m$  的物理意义如下： $r_m$  是铁损(包括涡流损失和磁滞损失)的等效电阻； $X_m$  则是由主磁通引起的等效电抗。

流经励磁支路的电流称为励磁电流，用  $I_0$  表示。

图 1-17 是比较基本的也是比较常见的等效电路，除此以外，根据不同的需要和考虑，异步电动机的等效电路还可以有各种不同的形式，本书不再赘述。

#### (二) 能量传递和电流平衡

##### 1. 磁动势平衡方程

在异步电动机的磁路中，定子电流的磁动势  $I_1 N_1$  是产生磁场的“源”，是作用的一方；磁通  $\Phi$  (通常用基波分量  $\Phi_1$  表示) 是磁场做功的标志；转子电流的磁动势  $I_2 N_2$  (或  $I'_2 N_1$ ) 则是反作用的一方。因此，磁路传递能量的工作过程，就是定子电流的磁动势  $I_1 N_1$  在克服了电流磁动势  $I_2 N_2$  (或  $I'_2 N_1$ ) 的去磁效应后产生磁通  $\Phi$  的过程，如图 1-18 所示。其能量平衡关系由磁动势平衡方程来描述，即

$$\dot{I}_1 N_1 = -\dot{I}'_2 N_1 + \dot{I}_0 N_1 \quad (1-29)$$

式中  $\dot{I}_1 N_1$ ——定子电流的磁动势；

$\dot{I}'_2 N_1$ ——转子电流的磁动势；

$\dot{I}_0 N_1$ ——励磁磁动势。

励磁磁动势  $\dot{I}_0 N_1$  是定子电流的磁动势  $\dot{I}_1 N_1$  和转子电流的磁动势  $\dot{I}'_2 N_1$  互相平衡的结果，用于产生磁通。

##### 2. 电流平衡方程

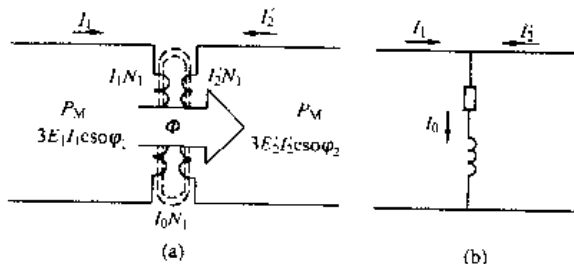


图 1-18 磁动势和电流的平衡

(a) 磁动势的平衡；(b) 电流的平衡

由于式 (1-29) 两边的  $N_1$  可以约去, 故磁动势之间的平衡关系也可以简单地通过电流平衡方程来表述, 即

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 + \dot{I}_0 \quad (1-30)$$

转子电流  $I'_2$  的有效值总是和负载转矩成比例, 故常称为转矩分量;  $I_0$  则是励磁分量, 或称为励磁电流。

### (三) 简化等效电路

在图 1-17 (c) 所示的等效电路中, 如果忽略掉转子漏磁电抗 (因频率下降而减小) 及铁损等次要因素, 则等效电路可简化成图 1-19。图中, 负载电阻为转子侧的总电阻, 见式 (1-25)。

电路简化后的特点是: 励磁电流和转子电流之间的相位差为  $\pi/2$  (互相垂直), 而励磁电流和定子电流之间的相位差则为  $\theta$  角。

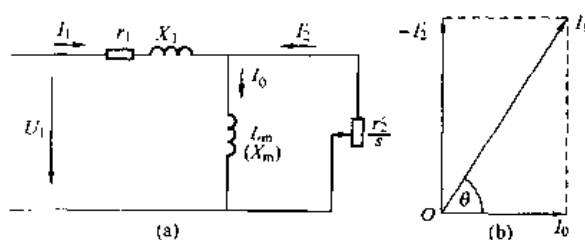


图 1-19 简化等效电路及电流矢量

(a) 简化等效电路; (b) 电流矢量

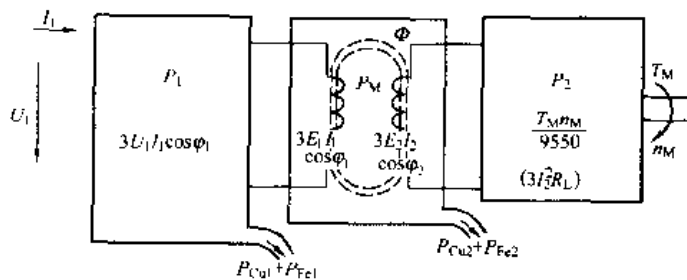


图 1-20 全电动机的能量

### (四) 异步电动机的能量图

把定子和转子的能量图综合到一起, 便得到整台电动机的能量关系图, 如图 1-20 所示。

#### 1. 输入功率

电动机输入的是三相电功率, 即

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

在这里, 决定输入功率大小的主要因素是电源相电压  $U_1$  和相电流  $I_1$ 。

#### 2. 电磁功率

从定子侧看, 传输给转子的功率是

$$P_M = 3E_1 I_1 \cos \varphi_1$$

电磁功率的大小主要由反电动势  $E_1$  和相电流的有功分量  $I_1 \cos \varphi_1$  决定。

从转子侧看, 转子得到的全部功率是

$$P_M = 3E'_2 I'_2 \cos \varphi_2$$

电磁功率的大小也决定于转子电动势  $E'_2$  和转子电流  $I'_2$  的有功分量  $I'_2 \cos \varphi_2$ 。

在不计损失的情况下, 上述两种方法计算的结果是相同的。

#### 3. 输出功率

电动机输出的是轴上的机械功率, 即

$$P_2 = \frac{T_M n_M}{9550}$$

但在等效电路中, 其大小也可由下式计算:

$$P_2 = 3U_2 I_2' = 3I_2'^2 R_2'$$

上述两种计算方法的计算结果是相同的。

## 第四节 异步电动机的机械特性

### 一、电力拖动系统的构成与主要参数

#### (一) 电力拖动系统的构成

电力拖动系统就是电动机带动生产机械运动（大多数为旋转运动）的系统。进一步说，则是电动机的电磁转矩克服了生产机械的阻转矩，把生产机械带动到一定转速的运行系统，如图 1-21 所示。因此，拖动系统主要由电动机、生产机械和传动机构三大部分构成。

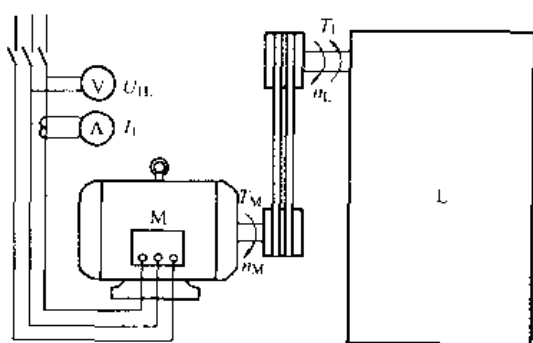


图 1-21 电力拖动系统的构成

#### 1. 电动机

电动机是把电能转换成机械能的装置。在拖动系统里，起原动机的作用。

#### 2. 生产机械

生产机械是拖动系统的工作对象，如鼓风机、水泵、起重机械、机床等。生产机械也是电动机的负载。

#### 3. 传动机构

传动机构是把电动机输出的机械能传递给生产机械的装置。在大多数情况下，是一种减速装置。有时，也能在一定范围内进行调速。常见的传动机构如皮带、齿轮、联轴器等。

#### (二) 拖动系统的主要物理量

##### 1. 转速 $n$

拖动系统的基本工况是由电动机带动生产机械以一定的转速  $n$  运行的。因此，转速  $n$  是说明拖动系统工作目的的主要参数。本书中，电动机输出轴上的转速用  $n_M$  表示；生产机械输入轴上的转速用  $n_L$  表示。

##### 2. 转矩 $T$

拖动系统的工作过程是电动机的转矩  $T_M$  克服负载的阻转矩  $T_L$  而运动的过程，是两种转矩互相平衡的结果。

因此，描绘转速  $n$  与转矩  $T$  之间的关系  $n = f(T)$  是至关重要的，称之为机械特性。

严格地说，作为拖动生产机械的原动转矩，应该是电动机轴上的输出转矩。是电磁转矩克服了电动机内部的摩擦损失和通风损失的结果。但由于摩擦损失和通风损失都很小，为了简化分析的过程，常粗略地把异步电动机的电磁转矩直接看做是电动机轴上的输出转矩。

### 二、异步电动机的自然机械特性

说明电动机的转速和电磁转矩之间关系的特性曲线  $n = f(T_M)$  称为电动机的机械特性曲线，简称机械特性。电动机在没有人地改变其参数时的机械特性，称为自然机械特性。

#### (一) 自然机械特性曲线

电动机中，由电能转换成机械能的根本体现便是产生电磁转矩  $T_M$ 。任何电动机的电磁转矩都是磁场和电流相互作用的结果。异步电动机的电磁转矩便是转子绕组中的感应电流与旋转磁场相互作用的结果。因此，决定电磁转矩  $T_M$  大小的基本公式是



$$T_M = K_T \Phi_1 I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-31)$$

式中  $T_M$ ——电磁转矩,  $N \cdot m$ ;  
 $K_T$ ——与电动机结构等因素有关的系数;  
 $\Phi_1$ ——磁通的基波分量,  $Wb$ ;  
 $I_2$ ——转子绕组中的电流,  $A$ ;  
 $\cos \varphi_2$ ——转子绕组的功率因数。

式 (1-31) 中,  $I_2 \cos \varphi_2$  实际上是转子电流的有功分量。

由此而做出的自然机械特性曲线如图 1-22 所示。其主要特征可由三个点来描述。

### 1. 理想空载点 (NO 点)

电动机输出轴上的转矩为 0 ( $T=0$ ), 称为理想空载。这时, 电动机的转速可以达到同步转速 (旋转磁场的转速)  $n_0$ 。所以, 理想空载点 (NO 点) 的坐标是  $(0, n_0)$ 。

### 2. 启动点 (S 点)

电动机刚接通电源, 但转速仍为 0 时称为启动点。这时的转矩称为启动转矩  $T_S$ , 也叫堵转转矩。因此, 启动点 (S 点) 的坐标是  $(T_S, 0)$ 。

通常, 异步电动机的启动转矩应大于额定转矩的 1.5 倍, 即

$$T_S \geq 1.5 T_{MN}$$

式中  $T_S$ ——电动机的启动转矩,  $N \cdot m$ ;

$T_{MN}$ ——电动机的额定转矩,  $N \cdot m$ 。

### 3. 临界点 (K 点)

异步电动机的机械特性有一个拐点 K, 在这一点, 电动机所能产生的电磁转矩最大, 称为临界转矩, 用  $T_K$  表示, K 点称为临界点。与此对应的转速称为临界转速  $n_K$ , 相应地, 有临界转差  $\Delta n_K$  和临界转差率  $s_K$ 。所以, 临界点 (K 点) 的坐标是  $(T_K, n_K)$ 。

临界转矩与额定转矩之比就是异步电动机的过载能力。通常, 过载能力应大于 2, 即

$$T_K \geq 2.0 T_{MN}$$

## (二) 机械特性说明的问题

### 1. 从电动机的角度看

电动机的自然机械特性曲线说明: 当转速为  $n_1$  时, 电动机所能产生的电磁转矩为  $T_{M1}$ 。

当转速下降为  $n_2$  时, 产生的电磁转矩将增大为  $T_{M2}$ 。这是因为, 当转子的转速下降时, 电动机的同步转速 (旋转磁场的转速)  $n_0$  并不下降, 因而转子绕组切割旋转磁场的速度增大了, 转子绕组内的电动势和电流也增大, 所以电磁转矩也增大了, 如图 1-23 所示。

如转速继续下降为  $n_3$  时, 电磁转矩将继续增

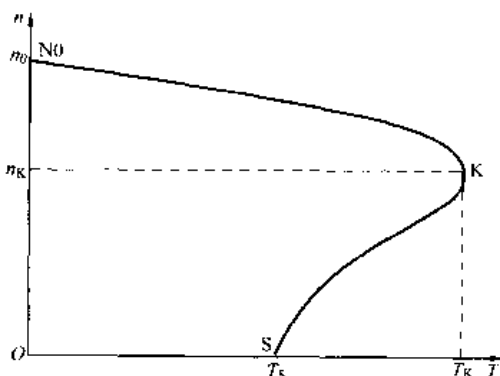


图 1-22 异步电动机的自然机械特性

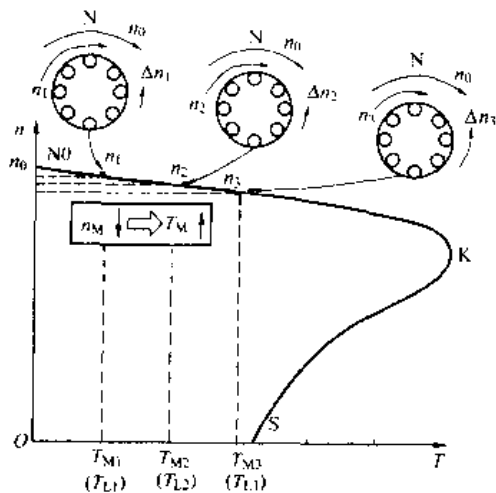


图 1-23 从电动机看机械特性

大为  $T_{M3}$ 。

当转速低于临界转速  $n_K$  后，由于转子电流的功率因数  $\cos\varphi_2$  下降很快，故电磁转矩非但不再增大，反而减小了。

### 2. 从拖动系统的角度看

在拖动系统里，电动机作为一个整体，是系统的部件之一。因此，其电磁转矩通常直接称为电动机的转矩。

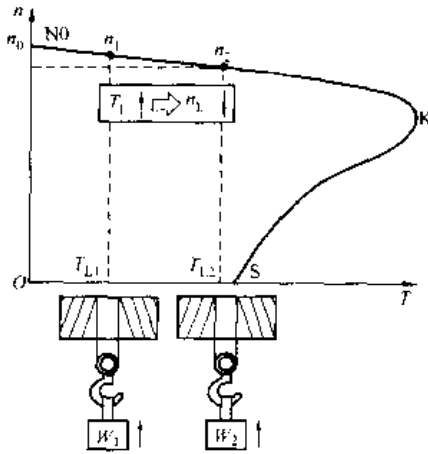


图 1-24 从拖动系统看机械特性

当系统稳定运行时，电动机的转矩  $T_M$  总是和负载转矩  $T_L$  相平衡，即

$$T_M = T_L + T_0 \approx T_L \quad (1-32)$$

式中  $T_0$ ——损耗转矩， $N \cdot m$ 。

本书以后如无特别说明，一律以  $T_L$  来代替 ( $T_L + T_0$ )，这可以有两种解释：①  $T_0$  被忽略不计了；②  $T_0$  已经包含在  $T_L$  内了。

当负载转矩为  $T_{L1}$  时，与此相平衡的电动机转矩为  $T_{M1}$ ，这时的转速为  $n_1$ ，如图 1-24 所示。

因此，在电力拖动系统里，机械特性的含义变成了：对应于某一个负载转矩  $T_L$ ，可以得到多大的转速  $n$ 。例如，由图 1-24 所示的机械特性可知：当负载转矩为  $T_{L2}$  时，拖动系统的转速将是  $n_2$ 。

### 3. 对电动机机械特性的评价

在评价电动机的机械特性时，常常用“硬”、“软”程度来描述，今说明如下：

机械特性的“硬”与“软”，是以负载增加时，转速下降的多少来衡量的。转速下降得少，称为“硬特性”；反之，转速下降得多，则称为“软特性”。

图 1-25 中，当负载转矩为  $T_L$  时，机械特性①的转速降落  $\Delta n_1$ ，而机械特性②的转速降落  $\Delta n_2$ 。两者相比，因为  $\Delta n_2 > \Delta n_1$ ，所以，机械特性①较“硬”，而机械特性②则较“软”。

在大多数情况下，希望机械特性越“硬”越好。

#### (三) 机械特性与能量关系

如图 1-26 所示，当负载转矩为  $T_Q$  时，转速为  $n_Q$ 。

#### 1. 电动机的输出功率

在传动机构的损失忽略不计的情况下，电动机的输出功率就等于负载功率，即

$$P_L = \frac{T_Q n_Q}{9550}$$

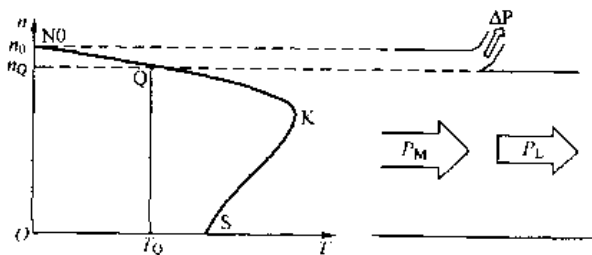


图 1-26 机械特性与能量关系

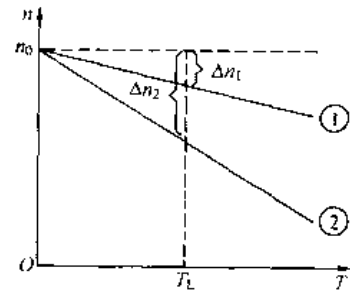


图 1-25 硬特性与软特性

#### 2. 电磁功率

如果转子内没有任何损失，那么，转子所得到的电磁功率将全部用于输出功率，在这种情况下，拖动系统的转速应与同步转速相一致。因此，电磁功率也可以由下式算出：

$$P_M = \frac{T_Q n_0}{9550}$$

### 三、异步电动机的人工机械特性

当人为改变电动机的参数时，电动机的机械特性也必将随之改变。改变后的机械特性称为人工特性。异步电动机主要的人工特性有如下几点。

#### (一) 改变电压的人工机械特性

##### 1. 应用实例

(1) 异步电动机的降压启动。包括自耦变压器启动方式和“Y-Δ”启动方式，其主要目的是减小异步电动机的启动电流。

(2) 软启动器控制方式。软启动器是一种能够使电压按照一定规律平滑上升的设备，它能够将启动电流限制在一定范围内。功能较强的软启动器还能在轻负载时自动降低电压，以达到节能的目的。

##### 2. 电压改变后的人工机械特性

电压改变后的人工机械特性如图 1-27 中的曲线②所示，其主要特点是：

(1) 同步转速  $n_0$  不变；

(2) 临界转矩减小为  $T'_K$ ；

(3) 临界点的转速  $n_K$  不变，故临界转差和临界转差率都不变。

从特性曲线上看，理想空载点不变，但临界点左移至  $K'$  点，启动点也随之左移至  $S'$  点，启动转矩减小为  $T'_{S_0}$ 。

#### (二) 改变转子电阻的人工机械特性

##### 1. 具体应用

改变转子电阻只能用于绕线转子异步电动机中。在转子回路中串入电阻后，非但可以减小启动电流，还可以用于调速。

##### 2. 改变转子电阻后的人工机械特性

改变转子电阻后的人工机械特性如图 1-28 中的曲线②所示，其主要特点是：

(1) 同步转速  $n_0$  不变；

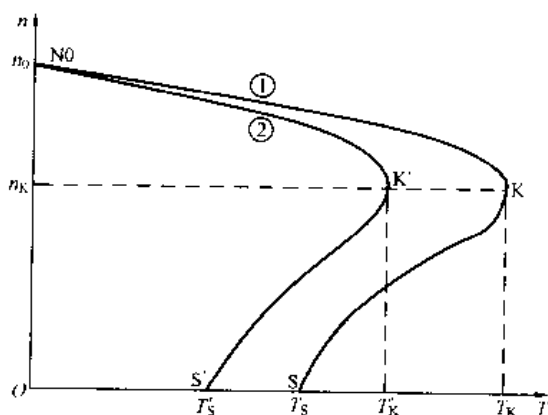


图 1-27 改变电压后的机械特性

(2) 临界转矩  $T_K$  的大小不变；

(3) 临界点的转速减小为  $n'_K$ ，从而临界转差  $\Delta n'$  和临界转差率  $s'$  都增大。

从特性曲线上看，理想空载点不变，但临界点下移至  $K'$  点，启动点则右移至  $S'$  点，启动转矩增大为  $T'_{S_0}$ 。

#### (三) 频率与电压协调控制的人工机械特性

##### 1. 具体应用

即本书将要详述的变频调速系统。这里

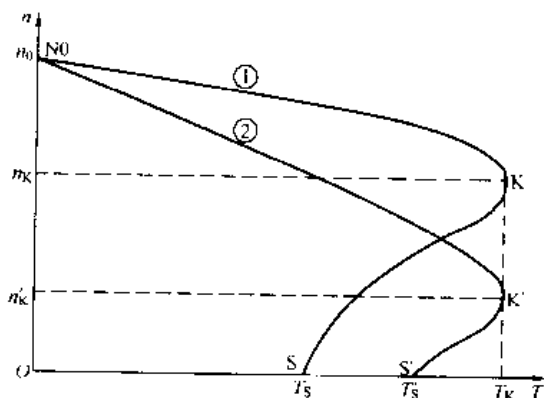


图 1-28 改变转子电阻的机械特性

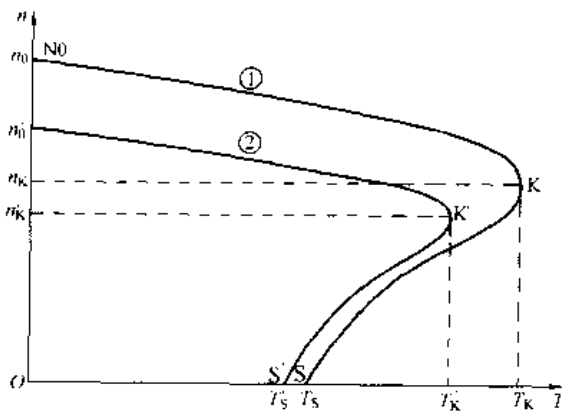


图 1-29 改变频率的机械特性

至  $S'$  点。

仅介绍变频后人工特性的特点。

### 2. 频率下降后的人工机械特性

频率下降后的人工机械特性如图 1-29 中的曲线②所示，其主要特点是：

(1) 同步转速减小为  $n'_0$ ；

(2) 临界转矩减小为  $T'_k$ ；

(3) 临界点的转速减小为  $n'_k$ ，但因同步转速  $n_0$  也下降，故临界转差  $\Delta n$  基本不变。

从特性曲线上看，理想空载点下移，在电压随频率同步下降的情况下，临界点向图 1-29 左下方移至  $K'$  点，启动点也左移

## 第五节 负载的机械特性

任何机械在运行过程中，都有阻碍运动的力或转矩，称为阻力或阻转矩。负载转矩在大多数情况下，都呈阻转矩性质。因此，所谓负载的机械特性，也就是负载的阻转矩与转速的关系。在分析负载的机械特性时，首先应弄清其阻转矩是怎么形成的，然后再分析当转速变化时，阻转矩的变化规律。

负载机械特性的类别很多，但主要的是以下几种。

### 一、恒转矩负载

#### (一) 典型实例

带式输送机是恒转矩负载的典型例子之一，其基本结构和工作情况如图 1-30 (a) 所示，负载阻转矩的大小决定于

$$T_L = Fr$$

式中  $F$ ——皮带与滚筒间的摩擦阻力；

$r$ ——滚筒的半径。

#### (二) 基本特点

##### 1. 转矩特点

由于  $F$  和  $r$  都与转速的快慢无关，所以在调节转速  $n_L$  的过程中，负载的阻转矩  $T_L$  保持不变，具有恒转矩的特点，即

$$T_L = \text{const}$$

其机械特性曲线如图 1-30 (b) 所示。

必须注意：这里所说的转矩大小是否变化，是相对于转速变化而言的，不能和负载轻重变化时，转矩大小的变化

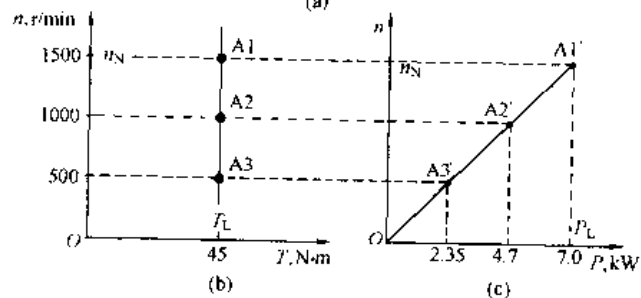
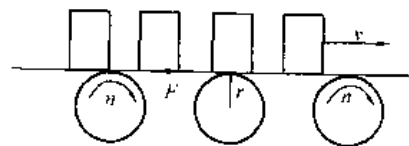


图 1-30 恒转矩负载及其特性

(a) 带式输送机；(b) 机械特性；(c) 功率特性

相混淆。或者说，“恒转矩”负载的特点是：负载转矩的大小，仅仅取决于负载的轻重，而与转速的大小无关。拿带式输送机来说，当传输带上的物品较多时，不论转速有多大，负载转矩都较大；而当传输带上的物品较少时，也不论转速有多大，负载转矩都较小。

## 2. 功率特点

因为

$$P_L = \frac{T_L n_L}{9550} = k_{p1} n_L \quad (1-33)$$

式中  $k_{p1}$ ——比例常数。

故负载功率与转速成正比，其有效功率线如图 1-30 (c) 所示。

## 二、恒功率负载

### (一) 典型实例

各种薄膜的卷取机械是恒功率负载的典型例子之一，如图 1-31 (a) 所示。其工作特点如下：

薄膜在卷取过程中，要求被卷物的张力  $F$  必须保持恒定，其基本手段是使线速度  $v$  保持恒定。所以，在不同的转速下，负载的功率基本恒定：

$$P_L = Fv = \text{const}$$

即，负载功率的大小与转速的高低无关，其功率特性曲线如图 1-31 (c) 所示。

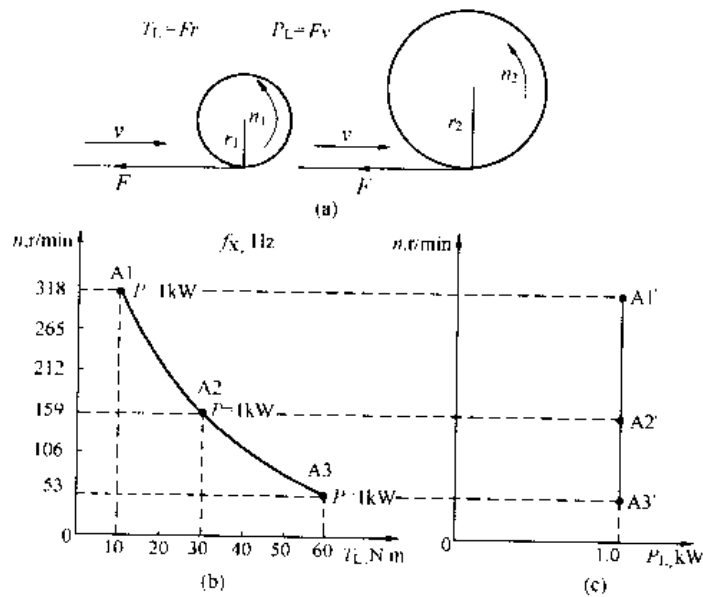


图 1-31 恒功率负载及其特性

(a) 薄膜卷取；(b) 机械特性；(c) 功率特性

同样需要说明的是：这里所说的恒功率，是指在转速变化过程中，功率基本不变，不能和负载轻重的变化相混淆。就卷取机械而言，当被卷物体的材质不同时，所要求的张力和线速度是不一样的，其卷取功率的大小也就不相等。

### (二) 机械特性

负载阻转矩的大小决定于

$$T_L = Fr$$

式中  $F$ ——卷取物的张力；

$r$ ——卷取物的卷取半径。

十分明显的是，随着卷取物不断地卷绕到卷取辊上，卷取半径  $r$  将越来越大，负载转矩也随之增大。另一方面，由于要求线速度  $v$  保持恒定，故随着卷取半径  $r$  的不断增大，转速  $n_L$  必将不断减小。

根据负载的机械功率  $P_L$  和转矩  $T_L$ 、转速  $n_L$  之间的关系，有

$$T_L = \frac{9550 P_L}{n_L} \quad (1-34)$$

即，负载阻转矩的大小与转速成反比，其机械特性如图 1-31 (b) 所示。

### 三、二次方律负载

#### (一) 典型实例

二次方律负载的典型实例是离心式风机和水泵，如图 1-32 (a) 所示。

这类负载大多以使流体（气体或液体）获得一定的流量为目的。由于流体本身无一定形状，且在一定程度上具有可压缩性（尤其是气体），故难以详细分析其阻转矩的形成，本书将只引用有关的结论。

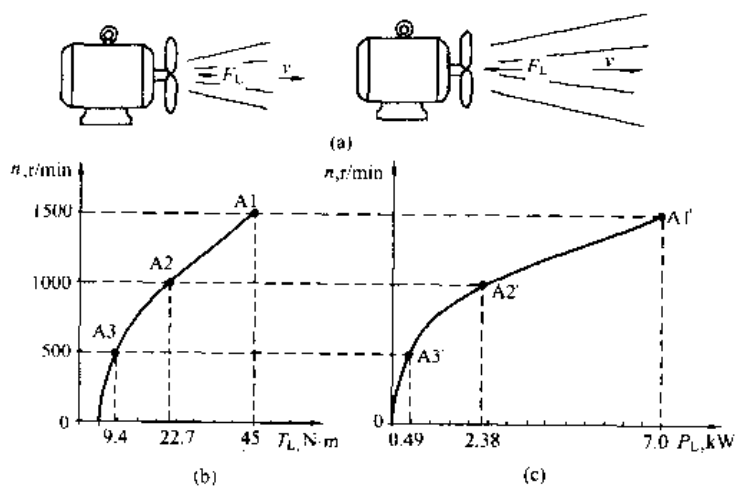


图 1-32 二次方律负载及其特性

(a) 风扇叶片；(b) 机械特性；(c) 功率特性

#### (二) 基本特点

##### 1. 转矩特点

负载的阻转矩  $T_L$  与转速  $n_L$  的二次方成正比，即

$$T_L = K_T n_L^2 \quad (1-35)$$

式中  $K_T$ ——二次方律负载的转矩常数。

其机械特性曲线如图 1-32 (b) 所示。

##### 2. 功率特点

负载的功率  $P_L$  与转速  $n_L$  的三次方成正比，即

$$P_L = \frac{K_T n_L^2 n_L}{9550} = K_P n_L^3 \quad (1-36)$$

式中  $K_P$ ——二次方律负载的功率常数。

功率特性曲线如图 1-32 (c) 所示。

事实上，即使在空载的情况下，电动机的输出轴上，也会有损耗转矩  $T_0$  和损耗功率  $P_0$ ，如摩擦转矩及其功率等。因此，严格地讲，其转矩表达式应为

$$T_L = T_0 + K_T n_L^2 \quad (1-37)$$

功率表达式为

$$P = P_0 + K_P n_L^3 \quad (1-38)$$

## 第六节 拖动系统运行状况的分析

### 一、拖动系统的工作点

#### 1. 工作点的含义

电动机的机械特性与负载机械特性的交点，称为拖动系统的工作点，如图 1-33 所示。图中的曲线①是电动机的机械特性，曲线②是负载的机械特性，交点 Q 即为工作点。

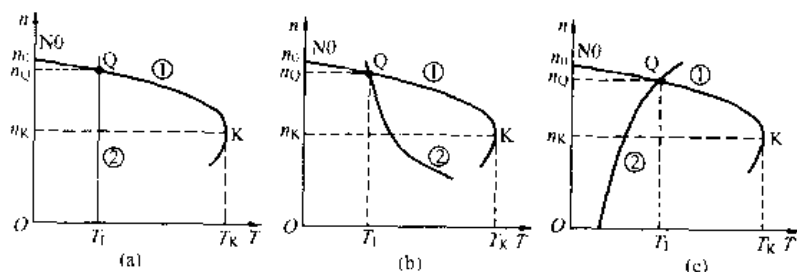


图 1-33 拖动系统的工作点

(a) 恒转矩负载；(b) 恒功率负载；(c) 二次方律负载

#### 2. 工作点的特征

(1) Q 点既在电动机的机械特性上，也在负载的机械特性上。这说明，只有当转速为  $n_Q$  时，电动机的转矩  $T_M$  和负载转矩  $T_L$  正好平衡。

(2) 如果转速上升，则  $T_M < T_L$ ，拖动系统将减速；反之，如果转速下降，则  $T_M > T_L$ ，拖动系统将加速。所以，Q 点是拖动系统唯一能够稳定运行的点。

### 二、负载变化时工作点的转移

#### 1. 工作点的转移过程

如图 1-34 所示，假设负载为恒转矩负载，机械特性是曲线②，负载转矩等于  $T_L$ ，拖动系统在 Q 点稳定运行，转速为  $n_Q$ 。

现负载转矩减小为  $T'_L$ ，负载的机械特性移至曲线②'，在  $T'_L$  刚减小的瞬间， $T_M$  未变，故

$$T_M > T'_L$$

拖动系统的转速将上升。由电动机的机械特性可知，随着转速的上升，电动机的转矩  $T_M$  将减小，拖动系统的工作点将顺着曲线①向 Q' 移动。当到达 Q' 点时，电动机的电磁转矩  $T'_M$  又和负载转矩  $T'_L$  相等，拖动系统将在转速  $n'_Q$  下稳定运行，拖动系统的工作移到了 Q' 点。这时，

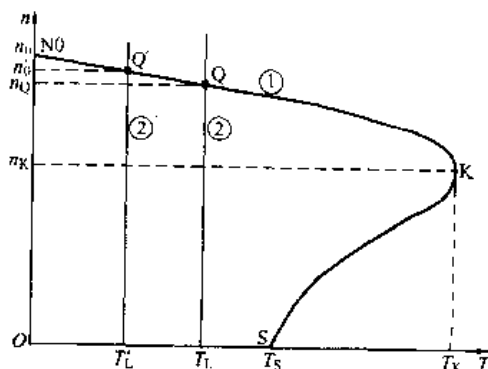


图 1-34 负载变化时的工作点

转速已经上升了。

### 2. 工作点转移的特点

由于电动机的机械特性并未发生变化，因此，从电动机的角度看，工作点的转移是在同一条机械特性上进行的。

由于负载转矩的变化通常是在生产过程中自然发生的，其工作点的转移并非人工干预的结果，由此而引起转速的变化称为速度变化。

## 三、电动机参数变化时工作点的转移

### 1. 工作点的转移过程

当人为地改变电动机的参数时，电动机的机械特性曲线必将改变。今以加大转子回路的电阻为例，说明工作点的转移过程如下：

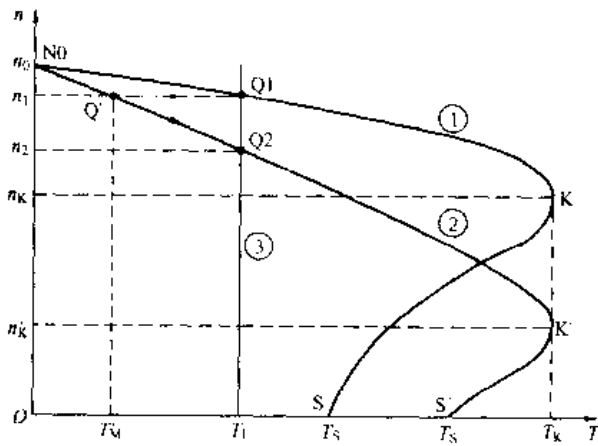


图 1-35 改变转子电阻的运行

如图 1-35 所示，曲线①为异步电动机的自然机械特性，曲线③是负载的机械特性，负载转矩为  $T_l$ ，工作点为  $Q_1$ ，拖动系统的转速为  $n_1$ 。

现在转子电路中加入电阻，电动机的机械特性立即由曲线①改变为曲线②，在刚改变的瞬间，由于拖动系统具有惯性，其转速仍保持为  $n_1$ 。因此，拖动系统的工作点将立即从曲线①上的  $Q_1$  点跳变到曲线②上的  $Q'$  点，电动机的转矩减小为  $T'_M$ 。并导致  $T'_M < T_l$ ，故转速迅速下降，拖动系统的工作点顺着曲线②下移至  $Q_2$  点时，电动机的转矩又和负载转矩相等，

拖动系统重又稳定运行，但转速已下降为  $n_2$ 。

### 2. 工作点转移的特点

(1) 在电动机的参数刚改变的瞬间，按照拖动系统转速不变的原则，工作点将从原来的机械特性跳变到新的机械特性上，电动机转矩的大小将发生变化。

(2) 原有转矩的平衡关系被破坏，导致拖动系统转速的改变，工作点在新的机械特性上移动，直至电动机的转矩重新和负载转矩相等，满足转矩平衡时为止。

这里，电动机参数的改变是人工干预的结果，是人们根据生产的需要进行调节的结果，这种情况下转速的变化，称为转速调节，即调速。

转速调节和速度变化的相同点是：转速都因为原有的转矩平衡关系被破坏而发生了变化。不同点是，两者的起因不同：前者是人为地改变电动机参数的结果，而后者是负载变化的结果。由于在电力拖动系统里，通常是以分析电动机的机械特性为主，所以，从机械特性的角度看，调节转速时工作点在不同的机械特性之间进行转移；而负载变化时，工作点是在同一条机械特性上转移的。

## 第七节 拖动系统的四象限运行

以上所述的电动机的机械特性以及拖动系统的工作点都在第一象限。由于工作情况的改



变，拖动系统的工作过程也可能出现在其他象限。

### 一、第二象限的机械特性

#### 1. 典型例子

以某双速电动机为例，其额定同步转速为 750/1500r/min；额定功率为 3/4.5kW。其机械特性如图 1-36 所示。曲线①是同步转速为 1500r/min 时的机械特性；曲线②是同步转速为 750r/min 时的机械特性。

在电动机从高速挡切换至低速挡的瞬间，电动机的同步转速已经下降了，但拖动系统的实际转速却尚未下降，实际转速高于同步转速，转子绕组切割磁场的方向与电动机状态相反，从而转子绕组中的电流方向也相反了，如图 1-36 的左侧所示，电动机变成了发电机，称为发电机状态或再生状态。其机械特性是原机械特性向第二象限的延伸。这时，电磁转矩的方向也反了，成为制动转矩。拖动系统的工作点从曲线①的 Q1 点跳变到曲线②的 Q' 点。可以看出，这时候的制动转矩是很大的。因此，电动机的工作点将很快地顺着曲线②转移到 Q2 点。

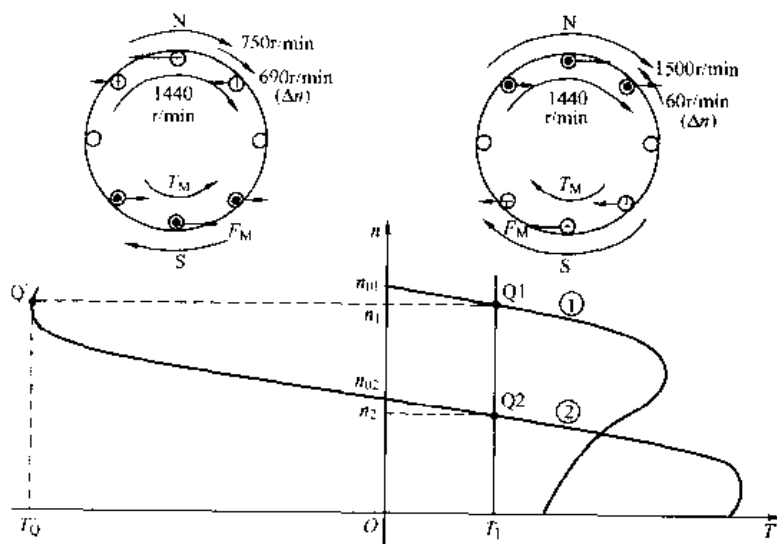


图 1-36 第二象限的机械特性

可见，电动机的运行状态进入第二象限的前提条件是：转子的实际转速高于同步转速。

#### 2. 特例

如果将直流电流通入异步电动机的定子绕组，则异步电动机将处于能耗制动状态。

这时，定子磁场的转速为 0，故转子绕组切割磁力线后产生的电磁转矩与转子的旋转方向相反，是制动转矩，如图 1-37 (a) 所示。

由于磁场本身不旋转，故机械特性在第一象限内是不存在的，但因为它相当于频率等于 0 时的发电机状态，故机械特性在第二象限内，如图 1-37 (b) 中的曲线②所示。

当电动机在 Q 点正常运行时，如切换至能耗制动状态（将定子绕组从三相交流电源上脱开，并立即通入直流电流），则工作点跳变到曲线②的 Q' 点，电磁转矩是负的。电动机的工作点将迅速顺着曲线②下降为 0，电动机得以迅速制动。

能耗制动是能够使异步电动机迅速而准确地停住的一种制动方法，因为是将直流电流通入定子绕组而得到的，故通常也叫直流制动。

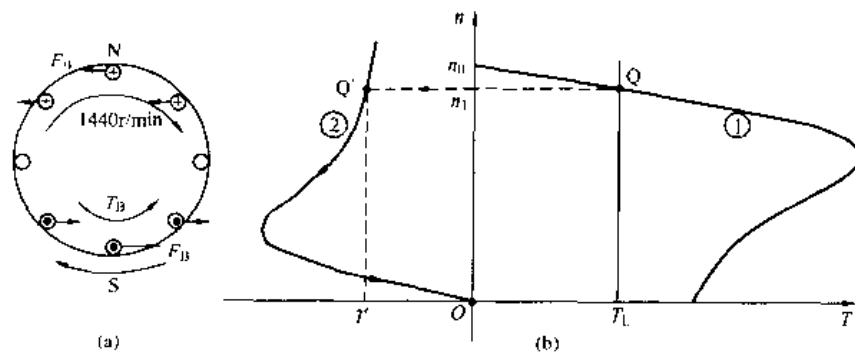


图 1-37 能耗制动

(a) 能耗制动原理; (b) 机械特性

## 二、第三、第四象限的机械特性

### 1. 典型实例

如果说, 第一、第二象限是电动机正转时的机械特性, 那么, 电动机反转时的机械特性在第三、第四象限。

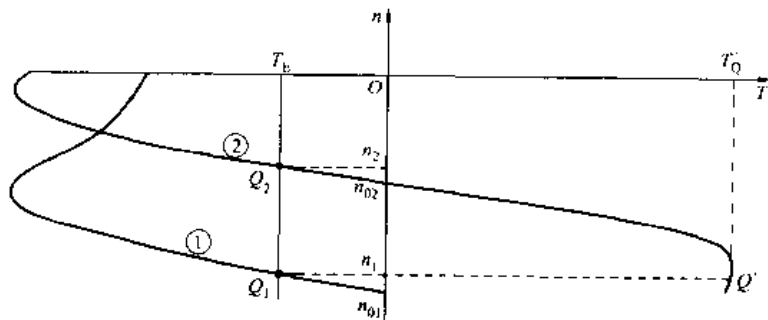


图 1-38 第三、第四象限的机械特性

第三象限是电动机反转时, 处于电动机状态的机械特性; 而第四象限则是电动机反转时, 处于发电机状态 (再生状态) 的机械特性。

如图 1-38 所示, 是双速电动机在反转时从高速挡切换至低速挡时的机械特性。其工作

过程与图 1-36 所示的正转时的工作过程完全相同。

### 2. 特例

如图 1-39 (a) 所示, 是起重机械的起升机构。

当绕线转子异步电动机的转子回路中串入的电阻足够大时, 其机械特性的临界点将出现在第四象限, 如图 1-39 (b) 中的曲线②所示。

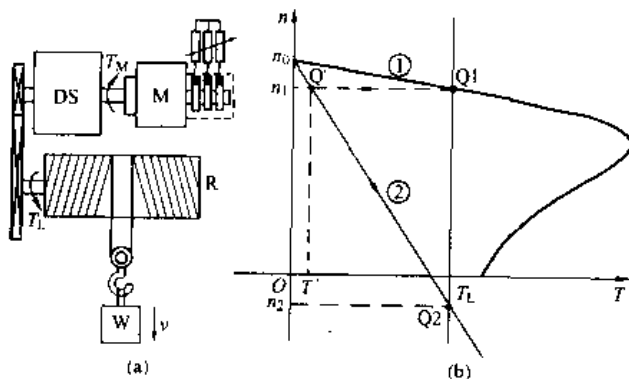


图 1-39 倒拉式反接制动

(a) 起重机械起升机构; (b) 机械特性

M—电动机; DS—减速机构; R—卷筒; W—重物

当重载下降时, 电动机从接法上说, 是正方向的, 产生的转矩也是正的。但由于在转子电路中串入了大量电阻, 电动机

产生的正转矩比重力产生的转矩小，非但不能带动重物上升，反而由于重物的拖动，电动机实际旋转的方向是向下的，其工作点在机械特性向第四象限的延伸线上，如图中的 Q2 点所示，这时，转速为  $n_2$ 。这种工作状态的特点是：电动机的转矩是正的，却被重物“倒拉”着反转了，称为倒拉式反接制动状态。

在起重机械放下重物的过程中，这是一种阻止重物因重力加速度而不断加速的方法。

## 第八节 拖动系统的暂态过程

### 一、拖动系统的暂态过程

上面分析的工作点，是拖动系统的稳定运行点。拖动系统从一个工作点转移到另一个工作点的转移过程，便是暂态过程，也叫过渡过程。

#### 1. 拖动系统的运行状态

拖动系统的运行状态取决于电动机转矩和负载转矩之间比较的结果：

$T_M > T_L \rightarrow$  系统加速， $n \uparrow$ ；

$T_M < T_L \rightarrow$  系统减速， $n \downarrow$ ；

$T_M = T_L \rightarrow$  系统等速运行， $n$  不变。

因此，所谓暂态过程，实际上是当电动机转矩和负载转矩不平衡时发生的加速过程或减速过程。在大多数情况下，暂态过程是非工作的过渡过程。因此，人们总是希望尽量地缩短暂态过程。

#### 2. 动态转矩

在暂态过程里，电动机转矩和负载转矩之差称为动态转矩，用  $T_J$  表示。动态转矩的存在是拖动系统产生加速度 ( $dn/dt$ ) 的原因。因此，上面的运行状态，又可以用如下的方式来描述：

$T_M > T_L \rightarrow T_J > 0 \rightarrow \frac{dn}{dt} > 0 \rightarrow$  系统加速；

$T_M < T_L \rightarrow T_J < 0 \rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \rightarrow$  系统减速；

$T_M = T_L \rightarrow T_J = 0 \rightarrow \frac{dn}{dt} = 0 \rightarrow$  系统等速运行。

#### 3. 与暂态过程有关的因素

(1) 动态转矩。十分明显， $T_J$  越大，加速度 ( $dn/dt$ ) 也越大，暂态过程将缩短；反之， $T_J$  越小，加速度 ( $dn/dt$ ) 也越小，暂态过程将延长。

(2) 系统的惯性。惯性越大，则加速（或减速）过程越长，暂态过程也越长。

### 二、拖动系统的飞轮力矩

#### (一) 描述惯性大小的物理量

##### 1. 转动惯量

用  $J$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) 表示，基本定义为

$$J = m\rho^2$$

式中  $m$ ——物体的质量， $\text{kg}$ ；

$\rho$ ——物体的回转半径，几种典型物体的回转半径如图 1-40 所示。

##### 2. 飞轮力矩

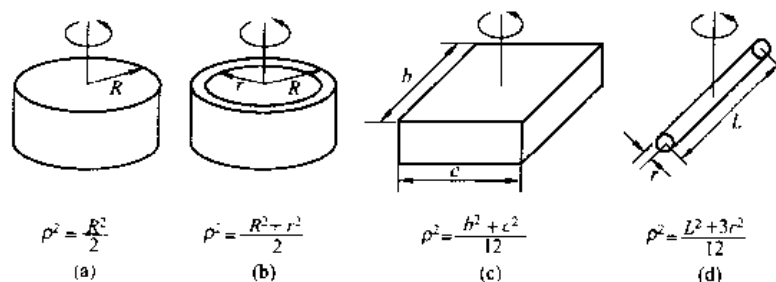


图 1-40 几种典型物体的回转半径

(a) 圆柱体; (b) 圆环体; (c) 长方体; (d) 长轴

用  $GD^2$  ( $N \cdot m^2$ ) 表示, 它和转动惯量  $J$  的关系是

$$GD^2 = 4gJ \quad (1-39)$$

式中  $g$ ——重力加速度。

## (二) 飞轮力矩的简易测定

### 1. 加速度与飞轮力矩的关系

加速度与动态转矩及飞轮力矩的关系可由下式计算:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{375}{GD^2} T_1 \quad (1-40)$$

由式 (1-40) 可以推出, 拖动系统的转速由  $n_1$  改变为  $n_2$  所需的升、降速时间粗略地由下式计算:

$$t = \frac{GD^2(n_2 - n_1)}{375(T_M - T_L)} \quad (1-41)$$

式中  $t$ ——拖动系统从  $n_1$  升速 (或降速) 到  $n_2$  所需要的时间。

### 2. 飞轮力矩的简易测定

由于拖动系统中, 转动部分的形状常常比较复杂, 且大多由若干部件组合而成, 很难准确地计算其飞轮力矩。在实际工作中, 如对计算精度的要求并不很高, 则飞轮力矩可以简易测定如下: 使拖动系统在某一转速下运行, 然后切断电源, 使之处于自由制动状态, 测得  $n = f(t)$  曲线, 如图 1-41 中的曲线①所示。图中的曲线②为负载的机械特性。

在曲线①上变化较为适中处取一小段, 量出其对应的时间与转速为  $t_1$ 、 $t_2$  和  $n_1$ 、 $n_2$ ,

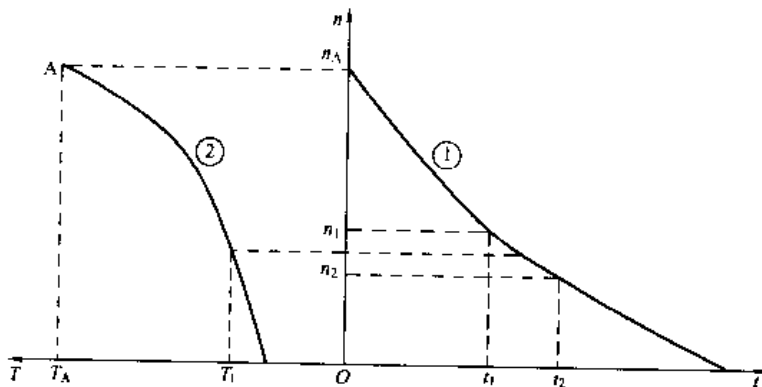


图 1-41 飞轮力矩的简易测定

并从曲线②上量出与该转速对应的负载转矩  $T_L$  (因电动机的电源已经切断, 故  $T_M = 0$ ), 代入式 (1-41), 即可求出该拖动系统的飞轮力矩为

$$GD^2 = \frac{-T_L(t_2 - t_1)}{(n_2 - n_1)} \quad (1-42)$$

## 第九节 拖动系统的工作方式

电动机在运行时的发热情况是判断其能否正常工作的重要标志之一。具体地说, 电动机在运行期间的温升, 应不超过其额定温升; 或者说, 在温升不超过额定温升的前提下, 只要电动机带得动, 即使在短时间内过载了一些, 也是允许的。所以, 电动机在工作过程中的发热情况对于设计拖动系统来说, 是十分重要的。

### 一、电动机的发热

#### (一) 电动机的温升曲线

##### 1. 电动机的温升

电动机在运行过程中, 其内部的损耗功率将转换成热能, 使温度升高。所升高的温度称为温升, 用  $\theta$  表示。温升并不是电动机的实际温度。电动机的实际温度是随环境而变的, 而温升则是指在环境温度的基础上升高的温度。

##### 2. 温升曲线

电动机在发热的同时, 它和周围温度之间, 便产生了温差, 并开始了散热过程。温差越大, 散热也越快。所以, 电动机的温升并不能直线上升, 而只能按指数规律上升, 如图 1-42 中的曲线①所示。当温升上升到一定程度, 电动机内发出的热量和散发的热量相平衡时, 温升将不再增加。这时的温升称为稳定温升。图中的  $\theta_N$  就是当电动机的电流等于额定电流 ( $I_M = I_{MN}$ ) 时的稳定温升, 也是电动机的额定温升。温升曲线的切线与  $\theta = \theta_N$  线的交点所对应的时间  $\tau$  称为发热时间常数。其物理意义是: 如果电动机产生的热量不散发, 则温升必将直线上升, 如图中的  $OQ$  线所示。在这种情况下, 达到稳定温升所需的时间即为  $\tau$ 。

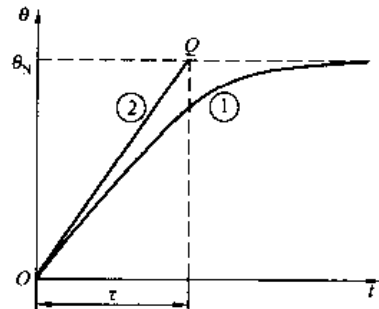


图 1-42 电动机的温升曲线

#### (二) 不同负载时的温升曲线

##### 1. 稳定温升

负载不同, 则运行过程中产生的热量不同。因此, 其稳定温升也不同, 如图 1-43 所示。

当  $I_M = 100\% I_{MN}$  时, 长时间运行后的稳定温升为  $\theta_{SN}$ , 称为额定温升, 如图 1-43 中的曲线①所示; 当  $I_M = 70\% I_{MN}$  时, 温升曲线如图 1-43 中的曲线②所示, 长时间运行后, 其稳定温升  $\theta_{S2}$  小于额定温升  $\theta_{SN}$ ; 当  $I_M = 130\% I_{MN}$  时, 温升曲线如图 1-43 中的曲线③所示, 长时间运行后的稳定温升  $\theta_{S3}$  将大于额定温升  $\theta_{SN}$ , 实际达到额定温升的时间缩短为  $t'$ 。

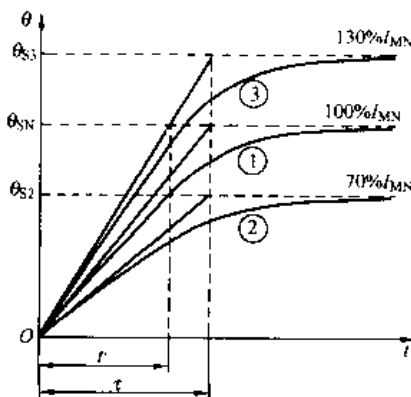


图 1-43 不同负载的温升曲线

## 2. 时间常数

对于同一台电动机，其发热时间常数只有一个。也就是说，在不同的负载下，如果电动机产生的热量不散发，则达到各自的稳定温升所需要的时间是相等的。

### 二、电动机运行方式的分类

按照电动机的发热状况来分，拖动系统的运行方式可以分为以下几类。

#### (一) 连续运行方式

连续负载是指负载在足够长的时间内是不间断地运行着的。所谓“足够长的时间”，是说在这段时间内，电动机的温升将能够达到稳定值。

根据负载在连续运行期间，负荷大小是否发生变化的情形，连续负载又分为如下两种。

##### 1. 连续恒定负载

负载在连续运行期间，转矩基本不变。这种负载的特点是，在运行期间，电动机的温升能够达到稳定温升，如图 1-44 (a) 所示。

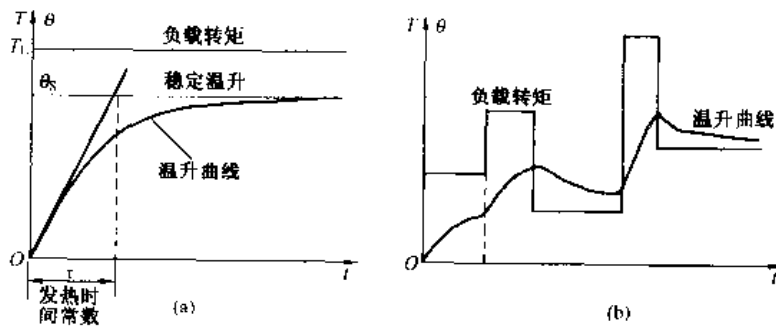


图 1-44 连续负载

(a) 连续恒定负载；(b) 连续变动负载

属于这种负载的典型例子是恒速运行的风机和水泵。

##### 2. 连续变动负载

负载在运行期间，转矩是经常变动的，其温升曲线如图 1-44 (b) 所示。对于这种负载，除了满足温升方面的要求外，还必须注意负载对过载能力的要求。就是说，只要温升不超过允许值，电动机在工作过程中出现的短时间过载是允许的。

属于这类负载的典型例子如塑料挤出机、金属切削机床等。

#### (二) 间断运行方式

并不连续工作的负载，称为间断负载。根据电动机发热情况的不同，又可分为如下两种。

##### 1. 断续负载

负载时而运行，时而停止。在运行期间，电动机的温升不足以达到稳定值；在停止期间，温升也不致降为 0，其温升曲线如图 1-45 (a) 所示。

属于这类负载的有起重机械等。这种负载常常允许电动机短时间过载，因此，在满足温升方面要求的同时，还必须有足够的过载能力。有时，过载能力可能是更主要的方面。

##### 2. 短时负载

负载每次运行的时间很短，在运行期间，温升达不到稳定值；而每两次运行之间的间隔时间很长，足以使电动机的温升下降为 0，其温升曲线如图 1-45 (b) 所示。对于这类负载，

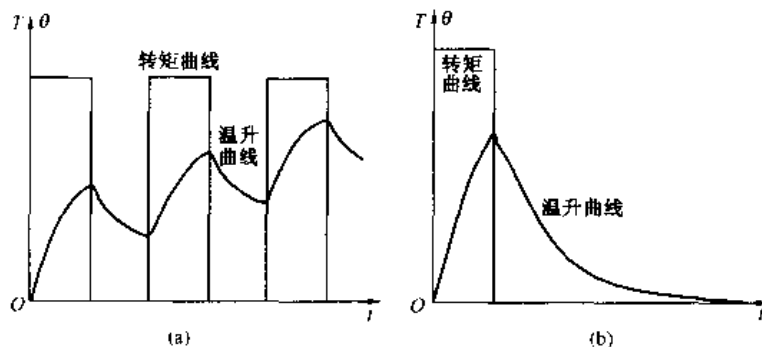


图 1-45 断续负载和短时负载

(a) 断续负载; (b) 短时负载

电动机主要考虑的是要有足够的过载能力, 而对温升则只需进行必要的校核即可。

属于这类负载的如船闸闸门的拖动系统等。

## 第十节 传动装置及其在调速系统中的作用

### 一、传动装置与传动比

#### 1. 传动装置

在大多数电力拖动系统中, 电动机和生产机械之间, 是通过传动机构 (多数情况下是减速机构) 相连接的, 常见的传动机构有联轴器、皮带、齿轮等, 如图 1-46 所示。图中电动机 M 输出轴上的转矩和转速为  $T_M$ 、 $n_M$ ; L 是负载, 其输入轴上的转矩和转速为  $T_L$ 、 $n_L$ 。因为负载转矩通常是阻转矩, 故  $T_L$  的方向与  $n_L$  相反。

#### 2. 传动比

电动机侧的转速  $n_M$  与负载侧的转速  $n_L$  之比, 称为传动机构的传动比, 用  $\lambda$  表示, 即

$$\lambda = \frac{n_M}{n_L} \quad (1-43)$$

式中  $\lambda$ ——传动比。

就是说, 经过传动机构以后, 负载侧的转速变为

$$n_L = \frac{n_M}{\lambda} \quad (1-44)$$

忽略传动机构中的功率损失不计, 则传动机构输入侧 (电动机侧) 和输出侧 (负载侧) 的机械功率应该相等, 即

$$P_M = \frac{T_M n_M}{9550} \approx \frac{T_L n_L}{9550} = P_L \quad (1-45)$$

式中  $P_M$ ——电动机的功率, kW;

$P_L$ ——负载的功率, kW。

所以, 传动机构两侧的转矩是与转速是成反比的, 即

$$\frac{T_M}{T_L} = \frac{n_L}{n_M} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-46)$$

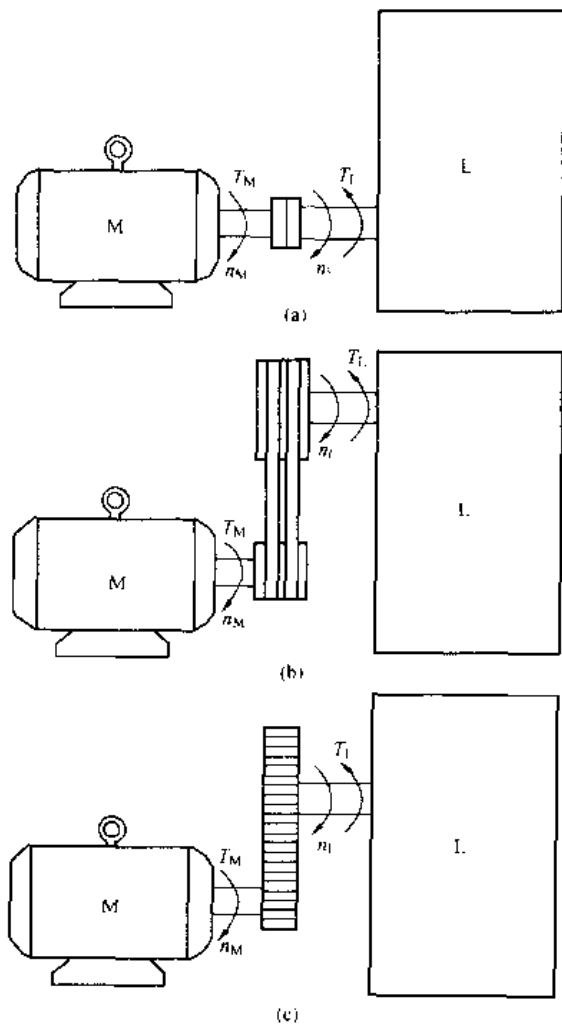


图 1-46 常见的传动机构  
(a) 联轴器传动；(b) 皮带传动；(c) 齿轮传动

或者说，经过传动机构减速以后，负载侧的转矩为

$$T_L = T_M \lambda \quad (1-47)$$

可见，如果负载侧所得到的转速比电动机侧减小了  $\lambda$  倍，那么，负载侧所得到的转矩则比电动机侧增大了  $\lambda$  倍。

## 二、转速与转矩的折算

### 1. 问题的提出

为了分析拖动系统的工作状态，必须在同一个坐标系里对电动机和负载的机械特性进行比较。而传动机构却把被传递的转速和转矩的数据改变了，使它们无法在同一个坐标系里进行比较。

例如，假设传动机构的传动比  $\lambda = 4$ ，当电动机侧的转速  $n_M = 1500 \text{r/min}$ 、转矩  $T_M = 4 \text{N}\cdot\text{m}$  时，在  $n = f(T)$  坐标系里的位置是  $(4, 1500)$ ，如图 1-47 中的 Q1 点所示；而这时，在负载侧却是：转速  $n_L = 375 \text{r/min}$ 、转矩  $T_L = 16 \text{N}\cdot\text{m}$ ，在同一个  $n = f(T)$  坐标系里的位置是  $(16, 375)$ ，如图 1-47 中的 Q2 点所示。就是说，在同一个坐标系里，描绘同一个工作状态的工作点却不在一起，因而难以说明这时候的电动机能否带得动负载。

为了解决这个问题，需要把转速和转矩等效地“折算”到同一个轴上，通常是把负载侧的转速和转矩折算到电动机轴上。

### 2. 折算的基本原则与公式

折算的基本原则是折算前后传动机构所传递的功率不变。

有关的折算公式如下：

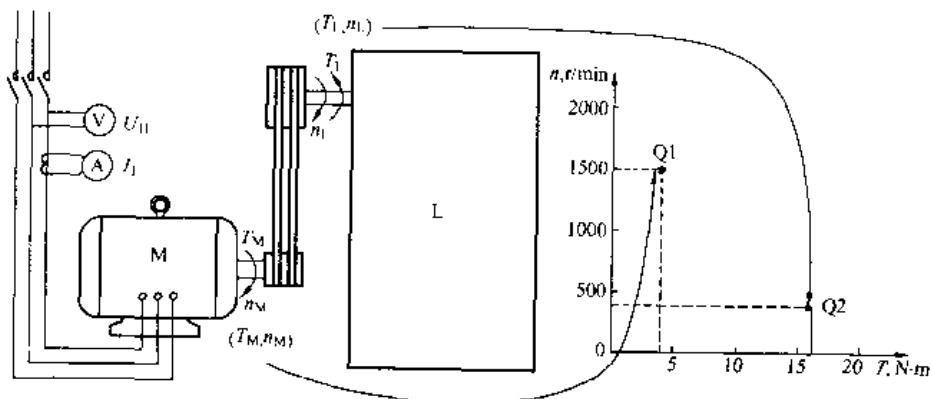


图 1-47 电动机和负载的工作点



(1) 转速的折算。由式 (1-44), 得

$$n'_L = \lambda n_L \quad (1-48)$$

(2) 转矩的折算。根据传递功率不变的折算原则, 由式 (1-46), 得

$$T'_L = \frac{T_L}{\lambda} \quad (1-49)$$

式中  $n'_L$ ——折算到电动机轴上的负载转速 (数值上等于电动机的转速), r/min;

$T'_L$ ——折算到电动机轴上的负载转矩, N·m。

式 (1-49) 表明, 经过传动机构减速以后, 电动机轴上的负载减轻了。

(3) 飞轮力矩的折算

$$(GD^2)' = \frac{GD^2}{\lambda^2} \quad (1-50)$$

可见, 经传动机构减速以后, 电动机轴上的飞轮力矩将大为减小。

本书在进行定性分析时, 为了方便起见, 对于负载转速和转矩, 常笼统地用  $n_L$  和  $T_L$  表示。实际上, 在大多数情况下, 应该是折算到电动机轴上的值。在进行定量计算时, 必须充分注意这一点。

### 三、传动比对电动机调速系统的影响

(一) 传动比与电动机容量的关系

为了便于说明, 这里举一个实际例子。

某负载: 阻转矩  $T_L = 89\text{N}\cdot\text{m}$ ; 转速  $n_L = 375\text{r}/\text{min}$ ; 消耗功率  $P_L = 3.5\text{kW}$ 。所选调速电动机的额定转速为  $1500\text{r}/\text{min}$ 。

今比较在传动比  $\lambda$  不同的情况下, 所需电动机的容量。

1.  $\lambda = 1$

(1) 电动机的运行转速。因为  $\lambda = 1$ , 所以

$$n_{MX} = n_L = 375\text{r}/\text{min}$$

(2) 电动机的转矩。因为  $\lambda = 1$ , 所以, 电动机轴上的转矩等于负载的阻转矩, 即

$$T_{MX} = T_L = 89\text{N}\cdot\text{m}$$

(3) 电动机的容量为

$$P_{MX} = \frac{89 \times 1500}{9550} = 13.98 \text{ (kW)}$$

选用  $P_{MN} = 15\text{kW}$  的电动机, 为负载功率的 4.28 倍, 如图 1-48 所示。

2.  $\lambda = 2$

(1) 电动机的转速。因为  $\lambda = 2$ , 所以

$$n_{MX} = n'_L = 375 \times 2 = 750 \text{ (r/min)}$$

(2) 电动机的转矩。因为  $\lambda = 2$ , 所以

$$T_{MX} = T'_L = 89/2 = 44.5 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

即, 电动机轴上所需转矩减小了一半。

(3) 电动机的容量

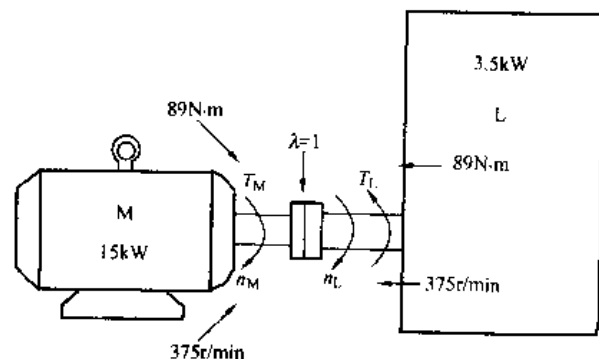


图 1-48  $\lambda = 1$  带负载

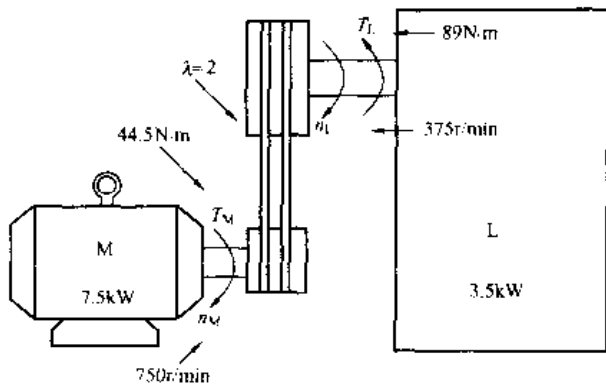


图 1-49  $\lambda = 2$  带负载

$$P_{MN} = \frac{44.5 \times 1500}{9550} = 7.0 \text{ (kW)}$$

选用  $P_{MN} = 7.5 \text{ kW}$  的电动机，仍为负载功率的 2.14 倍，如图 1-49 所示。

可见，当传动比加大为 2 时，所需电动机的容量减小了一半。

3.  $\lambda = 4$

(1) 电动机的转速。因为  $\lambda = 4$ ，所以  $n_{MX} = n'_L = 375 \times 4 = 1500 \text{ (r/min)} = n_{MN}$

(2) 电动机的转矩。因为  $\lambda = 4$ ，所以

$$T_{MN} = T'_L = 89/4 = 22.25 \text{ (N·m)}$$

即，电动机轴上所需转矩又减小了一

半。

(3) 电动机的容量

$$P_{MN} = \frac{22.25 \times 1500}{9550} = 3.5 \text{ (kW)}$$

选用  $P_{MN} = 3.7 \text{ kW}$  的电动机，如图 1-50 所示。

可见，所需电动机的容量又减小了一半，与负载功率吻合。这已经是最优化的结果了，从能量的角度看，电动机容量已不可能再减小。

#### 4. 结论

当负载转速较低时，仅仅依靠电动机调速来实现 ( $\lambda = 1$ ) 时，所需电动机的容量将增大。适当加大传动比  $\lambda$ ，可以减小电动机的容量。

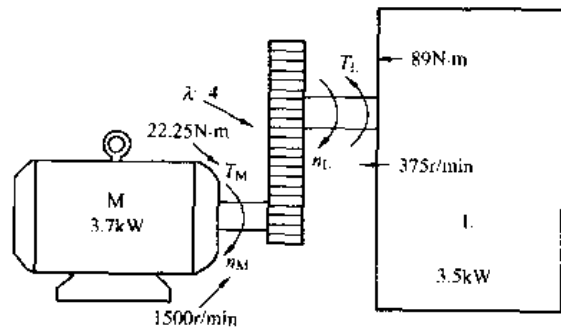


图 1-50  $\lambda = 4$  带负载

#### (二) 传动比与电动机的启动

对于某些飞轮力矩较大的负载，如图 1-51 所示的锯片磨床。有一个直径达 2m 的大卡盘，工件（通常为锯片）安置在卡盘上。加工时，卡盘作旋转运动，另有一砂轮边旋转边做

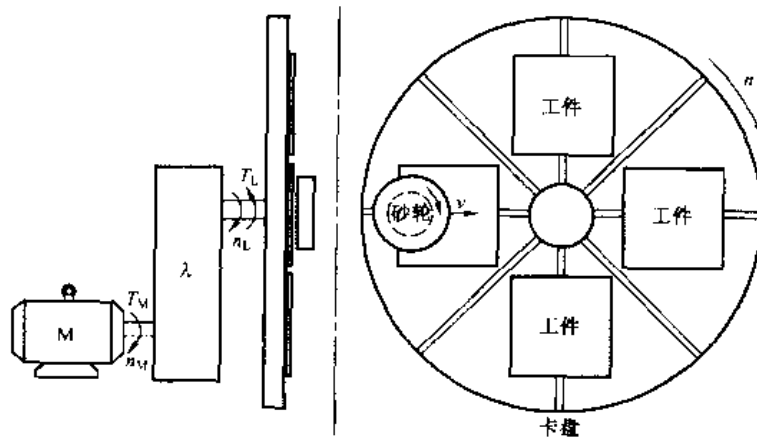


图 1-51 锯片磨床示意

径向运动。

由于砂轮在磨削过程中，对卡盘的压力不大，故负载的阻转矩也不大。如果根据负载在运行时所需的功率来选择电动机容量，则电动机的容量将是比较小的。

但由于卡盘的飞轮力矩 ( $GD^2$ ) 较大，导致容量较小的电动机启动困难。

由式 (1-50) 知，如适当增大传动比  $\lambda$ ，则电动机轴上的飞轮力矩 ( $GD^2$ )' 将大为减小，使拖动系统容易启动。

## 第十一节 调速系统中应注意的问题

### 一、电动机调速与机械调速的区别

#### 1. 电动机的输出功率随转速而下降

(1) 电动机的转矩不可能超过额定转矩。任何电动机的电磁转矩都是电流与磁通相互作用的结果。其计算方法见式 (1-31)。

在电动机内，如电流超过额定值，则电动机要发热；如磁通超过额定值，则磁路要饱和。所以，电流和磁通以及电磁转矩是不可能超过额定值的。

(2) 输出功率随转速下降。电动机输出轴上机械功率的计算方法见式 (1-21)，是和转矩与转速的乘积成正比的。所以，当转速下降时，电动机的输出功率也必将下降。

#### 2. 机械变速具有恒功率的特点

通过机械变速机构调速时，如果不计机械变速机构的功率损失，则减速机构输入轴和输出轴上的功率应相等，如图 1-52 所示，即

$$\frac{T_M n_M}{9550} \approx \frac{T_L n_L}{9550}$$

所以，当  $n_L < n_M$  时，必有

$$T_L > T_M$$

如  $\frac{n_M}{n_L} = \lambda$ ，则

$$T_L = \lambda T_M$$

可见，机械减速时，输出轴的转矩为输入轴转矩的  $\lambda$  倍。

### 二、功率与转矩两方面之间的关系

在考虑电动机的调速系统时，必须同时注意功率与转矩两方面之间的关系。

#### 1. 功率

电动机轴上输出的额定功率一定要大于负载在恒转矩区最高转速时的功率，即

$$P_{MN} = \frac{T_{MN} n_{MN}}{9550} \geq \frac{T_L n_L}{9550} = \frac{T'_L n_M}{9550} = P_L \quad (1-51)$$

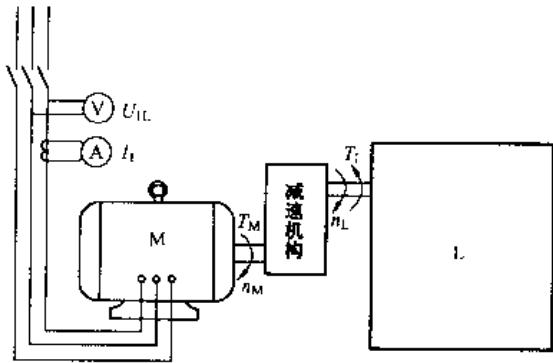


图 1-52 机械调速

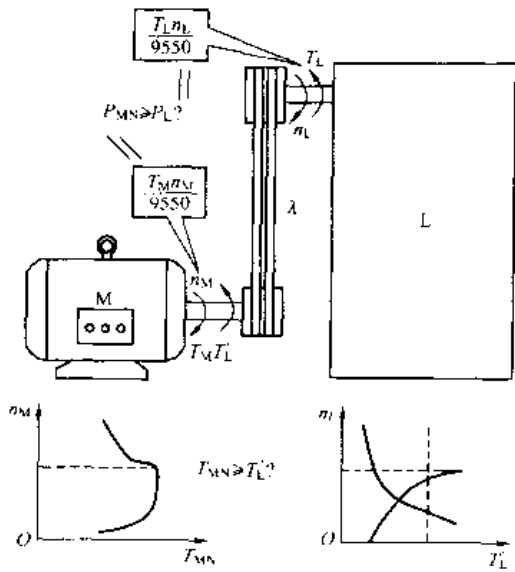


图 1-53 拖动系统的功率和转矩

## 2. 转矩

电动机经过调速后的有效转矩在所要求的转速范围内，都必须大于负载转矩的折算值，即

$$T_{ME} \geq T'_L = \frac{T_L}{\lambda} \quad (1-52)$$

上述基本关系如图 1-53 所示。

## 三、关于电动机的发热问题

在第九节中已经阐述了在拖动各种不同类型的负载时，电动机温升的变化情形。

在电动机的调速系统中，还应注意电动机在低速运行时的发热和散热的规律及状况。因为普通电动机主要是依靠转子上的叶片来散热的，当转速下降时，散热效果将变差，如图 1-54 中的  $E_c = f(n_M)$  所示 ( $E_c$  为散热系数， $n_M$  为电动机转速)，从而影响电动机实际的带负载能力。

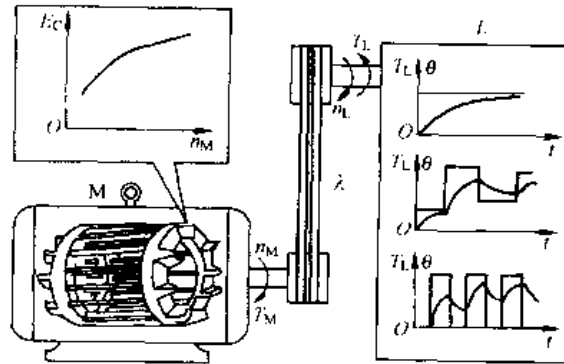


图 1-54 电动机的发热和散热

# 交-直-交变频器的基本原理 与构成

## 第一节 实现变频调速的关键

迄今为止，在中小容量变频器中应用得最为广泛的是“交-直-交”、电压型变频器，其基本结构如图 2-1 所示。

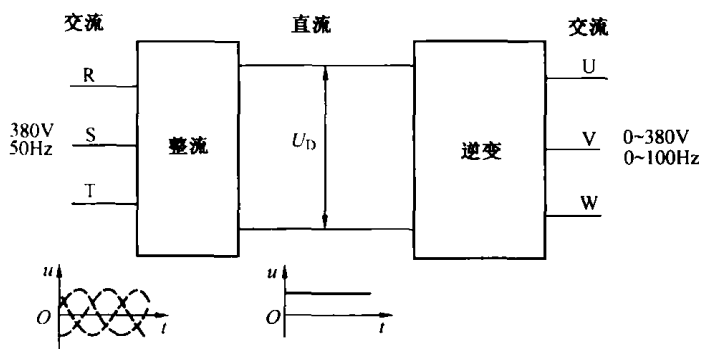


图 2-1 “交-直-交”变频器的结构

变频器的工作可分为两个基本过程：

(1) 先将电源的三相（或单相）交流电经整流桥整流成直流电（交-直变换），这方面的技术早已解决了，并已为大家所熟知。

(2) 再把直流电“逆变”成频率任意可调的三相交流电（直-交变换），这是长期以来要解决的核心问题。

### 一、“逆变”的基本原理

首先通过单相逆变桥的工作情况来看一下直流电是如何“逆变”成交流电的。

单相逆变桥的构成如图 2-2 所示。图中，将四个开关器件（V1~V4）接成桥形电路，两端加直流电压  $U_D$ ，负载 ZL 接至两“桥臂”的中点 a 与 b 之间。现在就来看看负载 ZL 上是怎样得到交变电压和电流的。

#### 1. 前半周期

令 V1、V2 导通；V3、V4 截止。则负载 ZL 上所得的电压为 a “+”、b “-”，设这时的电压为 “+”。

#### 2. 后半周期

令 V1、V2 截止；V3、V4 导通。则负载 ZL 上所得的电压为 a “-”、b “+”，电压的方向与前半周期相反，为 “-”。

上述两种状态如能不断地反复交替进行，则负载 ZL 上所得到的便是交变电压了。这就是把直流电“逆变”成交流电的工作过程。

三相逆变桥的工作过程与单相逆变桥相同，只要注意三相之间互隔  $T/3$ （ $T$  是周期）就可以了。即，V 相比 U 相滞后  $T/3$ ，W 相又比 V 相滞后  $T/3$ ，如图 2-3 所示。具体的导通顺

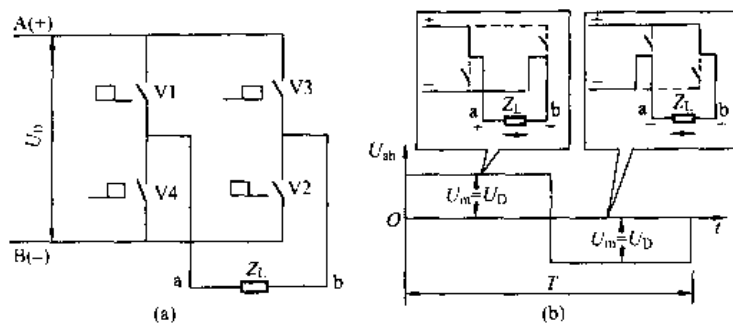


图 2-2 单相逆变桥  
(a) 逆变电路; (b) 电压波形

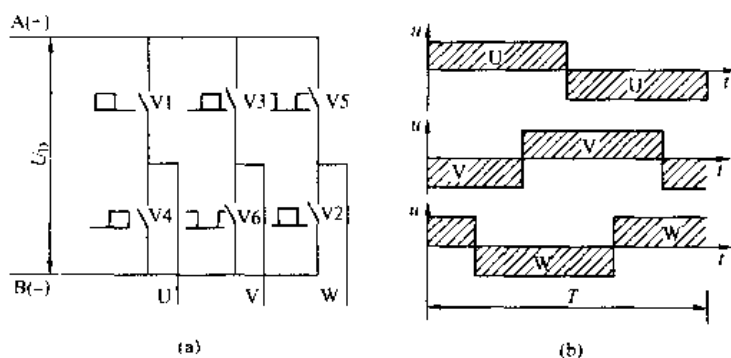


图 2-3 三相逆变桥  
(a) 逆变电路; (b) 电压波形

序如下:

- 第 1 个  $T/6$ : V1、V6、V5 导通, V4、V3、V2 截止。
- 第 2 个  $T/6$ : V1、V6、V2 导通, V4、V3、V5 截止。
- 第 3 个  $T/6$ : V1、V3、V2 导通, V4、V6、V5 截止。
- 第 4 个  $T/6$ : V4、V3、V2 导通, V1、V6、V5 截止。
- 第 5 个  $T/6$ : V4、V3、V5 导通, V1、V6、V2 截止。
- 第 6 个  $T/6$ : V4、V6、V5 导通, V1、V3、V2 截止。

总之,所谓“逆变”过程,就是若干个开关器件长时间不停息地交替导通和关断的过程。

## 二、逆变器件必须满足的条件

由前述可知,逆变桥是实现变频的关键部分,三相逆变桥由六个开关器件构成。在这里,并不是所有的开关器件都可以构成逆变桥的,因为,构成逆变桥的开关器件必须满足以下要求:

(1) 能承受足够大的电压。我国三相交流电的线电压为 380V,经三相全波整流后的直流电压为 537V。所以,开关器件能够承受的电压必须超过 537V,如图 2-4 所示。

(2) 能承受足够大的电流。电动机的额定容量大至成百上千千瓦,额定电流高达数千安,不言而喻,逆变管允许通过的电流至少应超过电动机电流的振幅值。

(3) 允许长时间频繁地接通和关断。  
 这是由逆变电路的工作过程所决定的。

一般来说，开关器件有两大类：一类是机械式的开关器件，如刀开关、接触器等，它们能满足上面的第1和第2个条件，但满足不了第3个条件。另一类是半导体开关器件，它对第3个条件毫不介意，但是否能满足第1和第2个条件就成了能否实现变频调速的焦点。

### 三、电力电子技术的进步为变频调速技术奠定了基础

毫无疑问，半导体器件从低电压、小电流的控制器件发展成为高电压、大电流的电力电子器件是一大飞跃，它为变频调速的实现奠定了基础。其发展过程大致如下。

#### 1. 起步始于晶闸管

20世纪60年代，大功率晶闸管(SCR)的出现，使变频调速开始得到了实施，出现了一丝曙光。但由于晶闸管在直流电路内自身不能关断，故主电路与控制电路都比较复杂，如图2-5(a)所示。图中，电容器C是用于关断晶闸管的。因为电动机的工作电流是随负载而变化的，而电容器的电容量不可能跟踪负载电流的变化，所以，逆变电路难以设计得既经济又可靠。此外，逆变后的电压与电流的波形如图2-5的(b)和(c)所示，也不很理想，故变频后电动机的性能不够完善。所以，虽然实现了变频调速，但未能达到推广普及的程度。

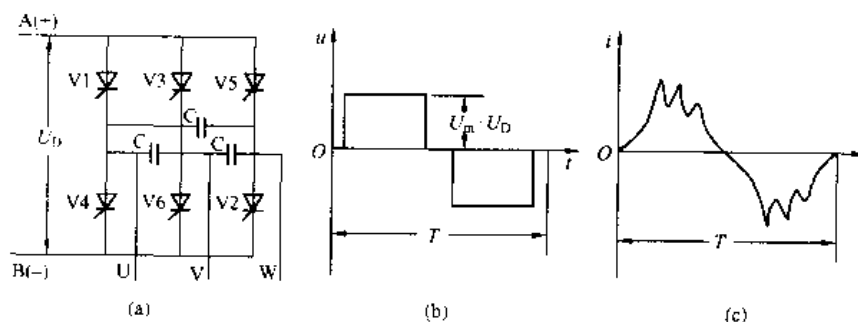


图 2-5 晶闸管逆变电路

(a) 逆变电路；(b) 电压波形；(c) 电流波形

#### 2. 普及归功 GTR

20世纪70年代，大功率晶体管(GTR或BJT)与可关断晶闸管(GTO)相继问世，把变频调速推向了实用阶段，于80年代初开始逐渐推广。

GTR(BJT)为复合晶体管(达林顿管)，工作特点与普通晶体管基本相同，其逆变电路如图2-6(a)所示。由于晶体管控制方便，能较好地实现正弦脉宽调制技术，逆变后的电压与电流的波形如图2-6(b)和(c)所示。与晶闸管变频相比，其电流波形得到了很大的改善。同时，也大大简化了控制电路，提高了工作可靠性，从而使变频调速技术达到了能够普及的阶段。

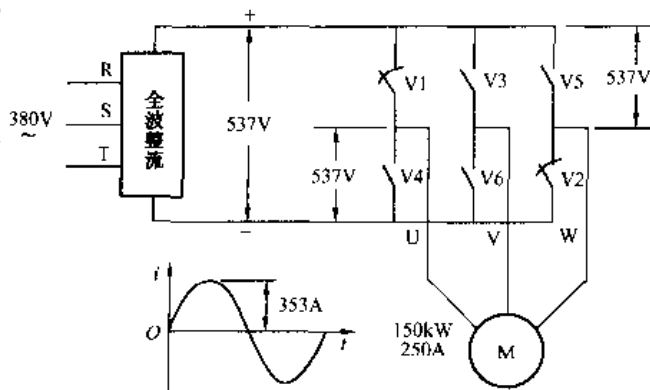


图 2-4 逆变管承受的电压和电流

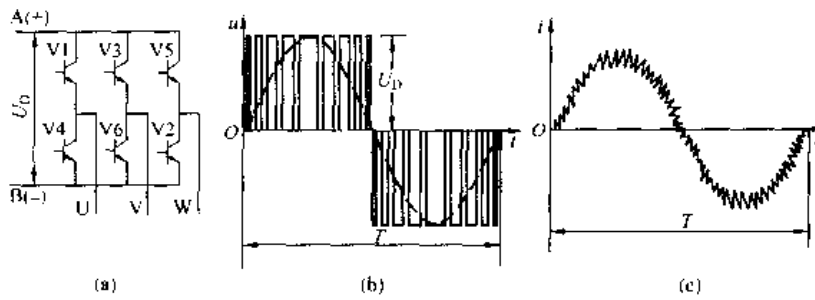


图 2-6 晶体管逆变电路

(a) 逆变电路; (b) 电压波形; (c) 电流波形

但由于 GTR 的开关频率较低 ( $\leq 2\text{kHz}$ ), 使变频器具有以下弱点:

- (1) 电流波形较差, 电动机的转矩略小;
- (2) 电动机内的电磁噪声较大;
- (3) 故障率较高。

### 3. 提高全靠 IGBT

20 世纪 80 年代末, 一种新型的场效应晶体管 (IGBT) 的问世, 使变频器在许多方面提高了一大步。

IGBT 的主体部分与 GTR 类似, 但控制部分却与场效应管类似, 属于电压控制器件。故控制功率大为减小, 开关频率也提高了一个数量级 ( $\leq 20\text{kHz}$ ), 从而使变频器具有以下优点:

(1) 电流波形大为改善, 如图 2-7 所示, 与 GTR 变频调速系统相比, 电动机的转矩有所增大;

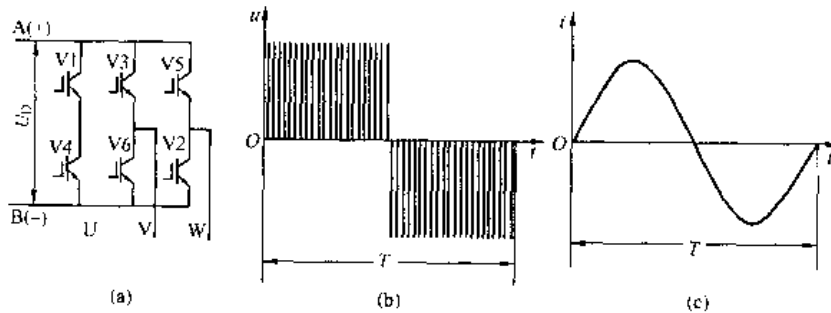


图 2-7 IGBT 逆变电路

(a) 逆变电路; (b) 电压波形; (c) 电流波形

- (2) 电磁噪声极小;
- (3) 进一步简化了电路;
- (4) 增强了对常见故障 (过电流、过电压、瞬间断电等) 的自处理能力, 故障率大为减少;
- (5) 变频器自身的损耗也大为减少。

可以说, IGBT 为变频调速的迅速普及和进一步提高奠定了基础。



## 第二节 变频调速的特殊问题

### 一、异步电动机改变输入或输出时的能量传递过程

在频率恒定的常规情况下，当定子侧的输入功率或转子侧的输出功率发生变化时，电动机的工作状态将会自动进行调整。

#### (一) 电源电压变化时的自调整过程 (以电压升高为例)

电源电压升高，意味着定子侧的输入功率增加了。在刚升高的瞬间，转子侧的输出功率并未变化，于是作为中间环节的磁场能量必然增大。增大了的磁场能传递到转子，又必将使转子的输出功率增加，最后达到新的平衡。具体的变化过程如下。

##### 1. 定子侧

(1) 在电压  $U_1$  升高的瞬间，反电动势  $E_1$  未变，由式 (1-9) 可知，定子侧的电动势平衡方程被破坏。

(2) 由式 (1-14) 可知，磁通  $\Phi_1$  增大。

##### 2. 转子侧

(1) 随着磁通  $\Phi_1$  的增大，转子电动势  $E_2$  也增大，转子电流  $I_2$  增大。

(2) 由式 (1-21) 可知，电磁转矩  $T_M$  增大，原有的转矩平衡状态被破坏 ( $T_M > T_L$ )，转速  $n$  升高，输出功率  $P_1$  增加。

(3) 随着转速  $n$  的升高，转差  $\Delta n$  和转差率  $s$  减小，转子侧的等效电阻 ( $r_2/s$ ) 增大，又使  $I_2$  和电磁转矩  $T_M$  开始减小。

##### 3. 新的平衡

由于负载转矩  $T_L$  未变，故转速  $n$  一直升高到电磁转矩  $T_M$  重新与负载转矩  $T_L$  平衡 ( $T_M = T_L$ ) 时为止。实际上，重新平衡后的  $T_M$  与电压升高前的相同。

由式 (1-22) 可知，因为磁通  $\Phi_M$  已经增大，故重新平衡后的  $I'_2$ ，甚至比原来的  $I'_2$  还略有减小。

与此同时，由于磁通  $\Phi_M$  已经增大，反电动势  $E_1$  也增大，使定子电流  $I_1$  减小，重新平衡后的  $I_1$ ，甚至比原来的  $I_1$  还略有减小。这是因为，与原来的平衡状态相比，转速升高的比率远小于电压上升的比率的缘故。

##### 4. 结论

上述过程可以归纳为：电源电压增大时，输入功率  $P_1 (= 3U_1 I_1 \cos \varphi_1)$  必然增大，又通过磁场能 (以磁通  $\Phi_M$  的大小为标志) 而将增大了的功率传输给转子，最终使转子的输出功率  $P_2 (= T_M n_M / 9550)$  也增大了。

需要说明的是，这里所说的“电压升高”，是指电压在允许范围内的升高。也就是说，由电压升高引起的磁通增大，并不足以使磁路饱和。如果电压升高得过大，足以使磁路饱和时，情况就很不一样了。

#### (二) 负载变化时的自调整过程 (以负载增加为例)

负载转矩的增加，意味着转子侧的输出功率增加了。在刚增加的瞬间，定子侧的输入功率并未变化，于是作为中间环节的磁场能量必然减小。减小了的磁场能反映到定子，又必将使定子的输入功率增加，最后达到新的平衡。具体过程如下。

##### 1. 转子侧

(1) 负载增加的结果是转矩平衡方程被破坏 ( $T_M < T_L$ ), 转速  $n$  开始下降。

(2) 在转速  $n$  下降的同时, 转差  $\Delta n$  和转差率  $s$  增大, 转子侧的等效电阻 ( $r_2/s$ ) 减小, 使转子电流  $I_2$  增大。

(3) 由式 (1-30) 可知, 在  $I_1$  尚未增大的情况下, 随着转子电流  $I_2$  的增大, 励磁电流  $I_0$  和磁通  $\Phi_1$  将减小。

## 2. 定子侧

磁通  $\Phi_1$  的减小, 又使定子侧的反电动势  $E_1$  也减小, 定子侧的电动势平衡方程被破坏, 定子电流  $I_1$  增大。

## 3. 新的平衡

(1) 在转速  $n$  下降、转子电流  $I_2$  增大的同时, 电磁转矩  $T_M$  也开始增大, 直至电磁转矩  $T_M$  和负载转矩  $T_L$  重又平衡 ( $T_M = T_L$ ) 时为止。这时, 转速已经有所下降了。

(2) 随着定子电流  $I_1$  的增大, 励磁电流  $I_0$  和磁通  $\Phi_1$  又将增大。但由于反电动势  $E_1$  的减小是和磁通  $\Phi_M$  的减小相关联的, 故总的来说, 磁通  $\Phi_1$  是略有减少的。

## 4. 结论

上述过程可以归纳为: 负载转矩增加, 说明负载所需的功率增加, 电动机是通过增大转子电流来削弱磁通而向电源“索取”更大输入功率的。

## 二、变频时的特殊情况

异步电动机变频调速的特殊之处在于: 调节行为是在定子侧进行的, 在单纯调节频率的情况下, 输入功率有增无减, 而转子的输出功率却减小了 (频率下调时)。导致输入和输出功率之间严重失衡。

### (一) 频率下降时定、转子能量的变化

#### 1. 定子侧

由式 (1-5) 可知, 频率下降时, 定子绕组的反电动势  $E_1$  随之下降。导致定子电流  $I_1$  增加, 从而输入功率  $P_1$  增加。

#### 2. 转子侧

频率下降的结果是转子转速  $n$  的下降, 由式 (1-21) 可知, 在负载转矩  $T_L$  没有变化的情况下, 输出的机械功率  $P_L$  将与转速成正比地下降。

#### 3. 励磁电流

输入功率增加而输出功率下降, 使定、转子之间的能量关系严重失衡, 这必将导致起传递作用的磁场能量的严重堆积。

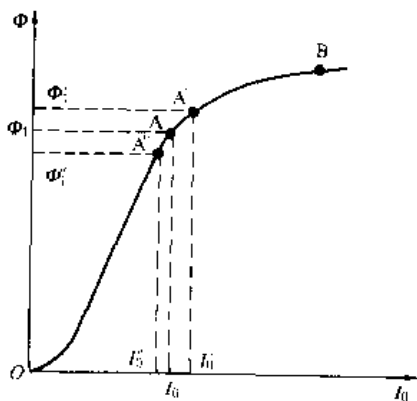


图 2-8 电动机磁路的磁化曲线

从式 (1-22) 反映的转子电流与转矩的关系来看, 负载转矩  $T_L$  不变, 则转子电流  $I_2$  也基本不变。所以, 定子电流  $I_1$  中增加的是励磁电流  $I_0$ 。

### (二) 磁通增大的后果

#### 1. 磁化曲线

励磁电流  $I_0$  的增加, 必然使磁通  $\Phi_1$  增加。而电动机磁路中, 磁通和励磁电流之间的关系是由磁化曲线决定的。磁化曲线的形状如图 2-8 所示。

图中, A 点以前为非饱和区, 磁通  $\Phi_1$  随励磁电流  $i_0$  成正比地增加; 从 A 点到 B 点为开始饱和区, 励磁

电流  $i_0$  继续增加时，磁通  $\Phi_1$  的增加比较缓慢；B 点以后为深度饱和区，励磁电流  $i_0$  继续增加时，磁通  $\Phi_1$  的增加甚微。

普通电动机是按工频运行设计的，在工频下运行时，磁路应在非饱和区（A 点以下）。

### 2. 磁路饱和的后果

当磁路饱和时，磁通和励磁电流的波形如图 2-9 所示：图 2-9 (a) 是磁化曲线。图 2-9 (b) 是磁通的波形，由于磁路饱和的原因，磁通波形的上面被“削平”了，变成了平顶波。图 2-9 (c) 是励磁电流的波形，其横坐标是励磁电流  $i_0$ ，与图 2-9 (a) 的磁化曲线的横坐标对应；纵坐标是时间  $t$ ，它和磁通曲线的横坐标相对应。因此，它是由图 2-9 (a) 和 (b) 综合做出的。由图可以看出，励磁电流  $i_0$  的波形将发生严重畸变，是一个峰值很高的尖峰波。磁路越饱和，励磁电流的畸变越严重，峰值也越大。为此，在变频调速技术里，为了避免磁路的饱和和励磁电流波形的畸变，特别强调地要求电动机磁路内的磁通保持不变，即

$$\Phi_1 = \text{const}$$

### (三) 保持磁通不变的途径

#### 1. 基本方法

由式 (1-5) 可知，在任意频率  $f_x$  下，要使磁通  $\Phi_1$  保持不变，必须保持

$$\frac{E_{1x}}{f_x} = \text{const} \quad (2-1)$$

式中  $E_{1x}$ ——定子绕组在任意频率  $f_x$  时的反电动势，V；

$f_x$ ——任意频率，Hz。

#### 2. 近似方法

由于反电动势  $E_{1x}$  是线圈自身产生的，无法从外部控制其大小。考虑到在一般情况下，式 (9) 中的阻抗压降  $\Delta U$  所占的比例较小，可以忽略不计。因此，可以认为，反电动势  $E_{1x}$  的大小与电源电压  $U_{1x}$  是近似相等的。从而可以用

$$\frac{U_{1x}}{f_x} = \text{const} \quad (2-2)$$

来近似地代替式 (2-1)。

因此，变频器在逆变过程中，在改变频率的同时，必须同时改变电压。所以，变频器也常用 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 来表示。其目的便是为了保持磁通不变。

这是在解决了开关器件后，变频调速技术必须解决好的又一个重要问题。

### 三、变频又变压的方法

#### (一) 几种方法

##### 1. 脉幅调制 (PAM)

这是最容易想到的办法。即：在频率下降的同时，使直流电压也随着下降，从而，逆变

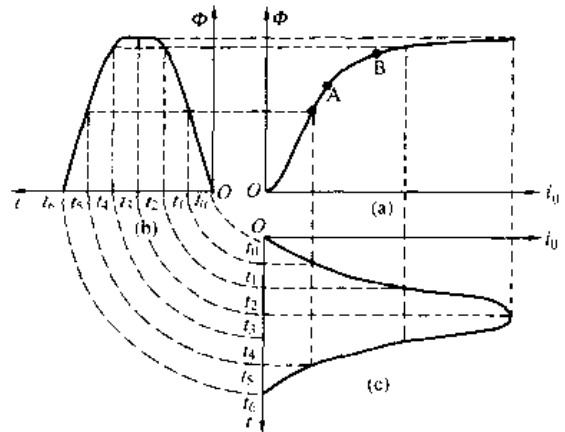


图 2-9 磁路在饱和区工作时的励磁电流  
(a) 磁化曲线；(b) 磁通曲线；(c) 励磁电流

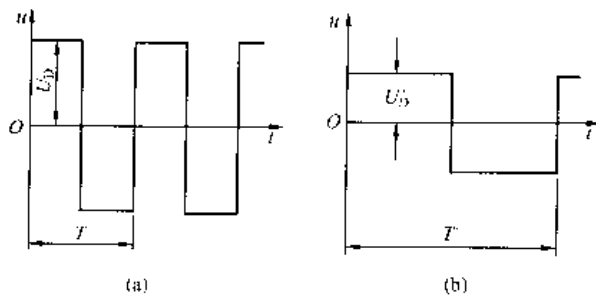


图 2-10 PAM 的含义  
(a) 频率较高; (b) 频率较低

后交流电压的振幅值也一起下降, 其一相的电压波形如图 2-10 所示。图 2-10 (a) 为频率较高时的电压波形, 周期小而振幅值较高; 图 2-10 (b) 为频率较低时的电压波形, 周期大而振幅值较低。

人们很容易想到利用晶闸管整流来实施 PAM。但线路比较复杂, 因为要同时控制整流和逆变两个部分。并且晶闸管整流后的直流电压值并不和移相角成线性关系, 也使两个部分之间的协调比较困难。

### 2. 脉宽调制 (PWM)

通过调节脉冲宽度和各脉冲间的“占空比”来调节逆变后输出电压的平均值, 如图 2-11 所示。频率较高时, 脉冲的占空比较大, 如图 2-11 (a) 所示; 频率较低时, 脉冲的占空比较小, 如图 2-11 (b) 所示。但两者的振幅值是一样的。

PWM 的优点是不必控制直流侧, 因而大大简化了电路。但是, 电流的谐波分量将是很大的。

### 3. SPWM (正弦脉宽调制)

如果脉冲宽度和占空比的大小按正弦规律分布, 便是正弦脉宽调制 (SPWM), 如图 2-12 所示。当正弦值较大时, 脉冲宽度和占空比都大; 而当正弦值较小时, 脉冲宽度和占空比都小。

SPWM 的显著优点是: 由于电动机的绕组具有电感性, 因此, 尽管电压是由一系列的矩形脉冲构成的, 但通入电动机的电流却和正弦波十分接近。

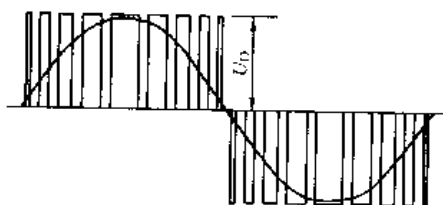


图 2-12 SPWM 的含义

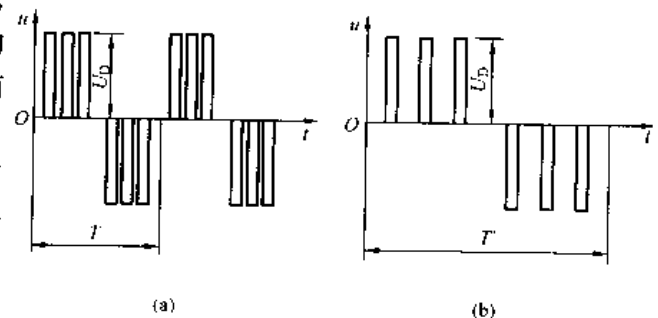


图 2-11 PWM 的含义  
(a) 频率较高; (b) 频率较低

### (二) SPWM 脉冲系列的得到

产生 SPWM 脉冲系列的基本方法是各脉冲的上升沿与下降沿由正弦波和三角波的交点来决定, 具体方法又分两种。

#### 1. 单极性调制

特点是在每半个周期内, 三角波的极性是单方向的, 所得到的脉冲系列的极性也是单方向的, 如图 2-13 所示。通常, 正弦波称为调制波, 三角波称为载波。

调制时, 三角波的振幅是不变的, 当正弦波的振幅值较大时, 则调制所得的脉冲系列的占空比较大, 如图 2-13 (a) 中的曲线①和图 2-13 (b) 所示; 反之, 当正弦波的振幅值较小时, 则调制所得的脉冲系列的占空比也较小, 如图 2-13 (a) 中的曲线②和图 2-13 (c) 所示。

在改变频率时, 有:

(1) 正弦波的频率随给定频率而变; 三角波的频率原则上也跟着一起变化, 但变化规律

在不同品牌的变频器中不尽相同。

(2) 正弦波的振幅按比值  $U_{1x}/f_x$  和给定频率  $f_x$  同时变化；三角波的振幅则不变。

单极性调制方式易于理解，但由于调制所得的线电压波形并不好，实际上已很少使用。

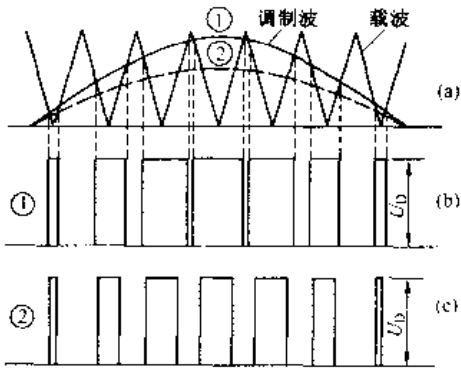


图 2-13 单极性调制

(a) 调制方式；(b) 电压较高；(c) 电压较低

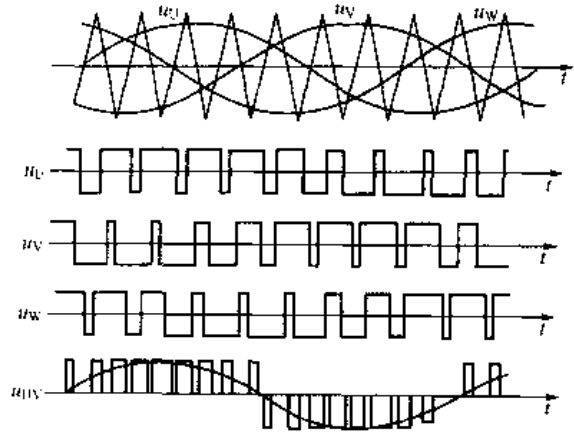


图 2-14 双极性调制

## 2. 双极性调制

实际变频器中，更多地使用双极性调制方式，其特点是：三角波和所得到的相电压脉冲系列都是双极性的，但线电压脉冲系列却是单极性的，如图 2-14 所示。

在具体电路中，各开关器件的工作情况如图 2-15 所示，图 2-15 (a) 和 (b) 为双极性调制波，图 2-15 (c) 则画出了各开关管控制极所得到的控制脉冲。由图可以看出，双极性脉冲系列的上半部分是桥臂上面管子的控制脉冲；而下半部分则是桥臂下面管子的控制脉冲。其工作特点是：每个桥臂的上下两管总是处于不断地交替导通的状态。

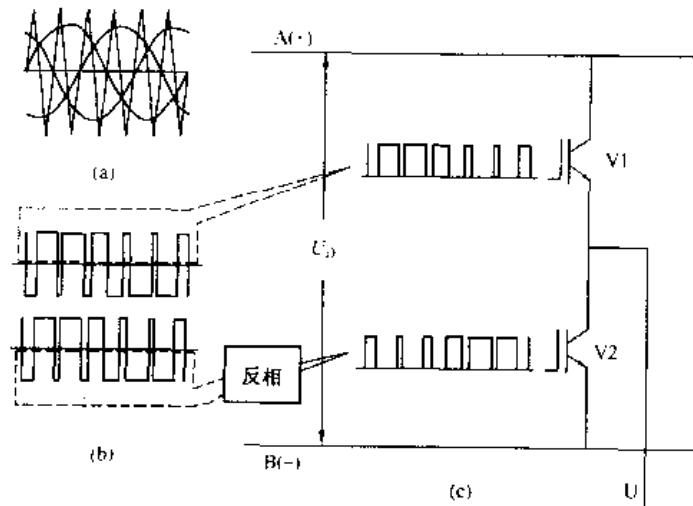


图 2-15 开关器件的工况

(a) 双极性调制波形；(b) 调制后的脉冲序列

(c) 各开关管控制极所得到的控制脉冲

要具体地实施 SPWM，必须实时地求出各相的正弦波与三角波的交点。它们的周期以及正弦波的振幅都必须根据用户的需要而随时调整。直到 20 世纪 80 年代，在微机技术高度发

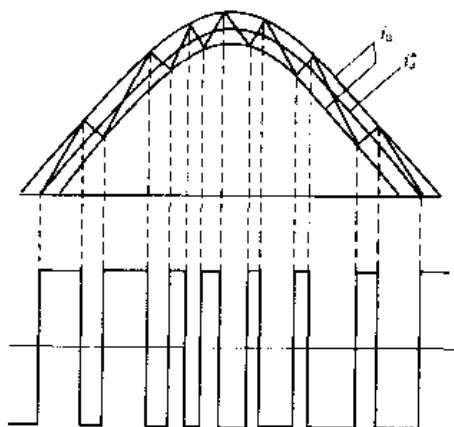


图 2-16 电流跟踪的含义

图中,  $i_a^*$  是标准的正弦电流的波形,  $i_a$  是实测电流的波形。当  $i_a < i_a^*$  时, 脉冲上升; 反之, 当  $i_a > i_a^*$  时, 脉冲下降。

(2) 基本框图。如图 2-17 所示,  $i_a^*$ 、 $i_b^*$ 、 $i_c^*$  是标准的三相交变电流信号, 而  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  则是三相电流的实测信号。两者经过比较后送入电流放大器 (ACR), 在 ACR 中, 把信号放大并处理后, 输出给 PWM 调制电路, 得到 PWM 调制信号并控制逆变电路。

### 2. 电压空间矢量控制的 PWM 调制

由于三相正弦交变电流的合成磁场是一个幅值恒定的圆旋转磁场。电压空间矢量 PWM 调制的基本思想, 就是以标准的圆旋转磁场作为参照来进行脉宽调制。因为是通过控制电压的空间矢量来实现的, 故称为电压空间矢量 PWM 调制。

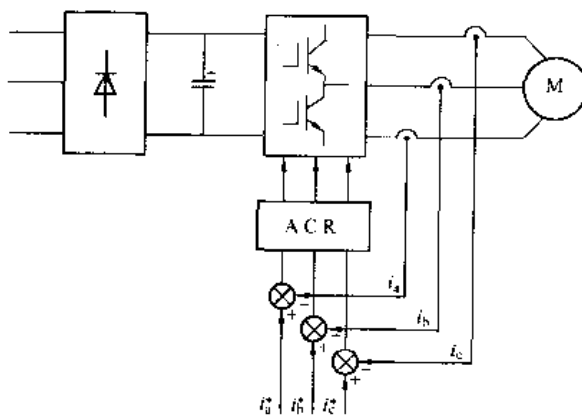


图 2-17 电流跟踪 PWM 调制框图

## 第三节 机械特性的改善

如前所述, 长期以来, 直流电动机调速系统的机械特性一直是人们公认的佼佼者。所以, 三相交流异步电动机变频调速系统的机械特性能否和直流调速系统相媲美, 便成为了评价变频调速系统的试金石。

### 一、满足 $\frac{U}{f} = \text{const}$ 的机械特性

#### 1. 额定频率以下的机械特性

异步电动机在额定频率以下, 满足  $\frac{U}{f} = \text{const}$  条件的机械特性如图 2-18 所示。由图可知: 频率下降时, 机械特性的“运行段”大体上是平行的, 其“硬度”基本不变。但频率下降后, 电动机的临界转矩  $T_k$  变小, 带负载能力也降低。显然, 这样的机械特性是难于和直流

调速系统相匹配的。

### 2. 低频时临界转矩减小的原因

从根本上说，这是用  $\frac{U_X}{f_X} = \text{const}$  近似地代替  $\frac{E_X}{f_X} = \text{const}$  的结果。

当电压  $U_X$  随频率  $f_X$  同步下降时，电阻压降  $\Delta U$  却是不变的，这是因为，不管在多大频率下，电动机的额定电流不会改变。由式 (1-9) 可知， $E_X$  在  $U_X$  中所占的比例将逐渐减小。从而，当  $U_X/f_X = \text{const}$  时， $E_X/f_X$  实际上是随  $f_X$  的下降而减小的。由式 (1-5) 可知，主磁通  $\Phi_1$  也随之减小，如图 2-19 所示。由于异步电动机是靠磁通来传递能量的，所以，当磁通减小时，电动机的带负载能力必将随之减小，在机械特性上的具体体现便是临界转矩  $T_{KX}$  减小。

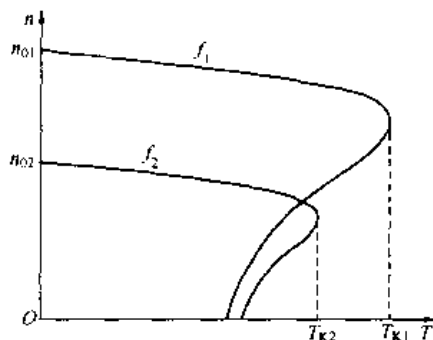


图 2-18  $U/f = \text{const}$  的机械特性

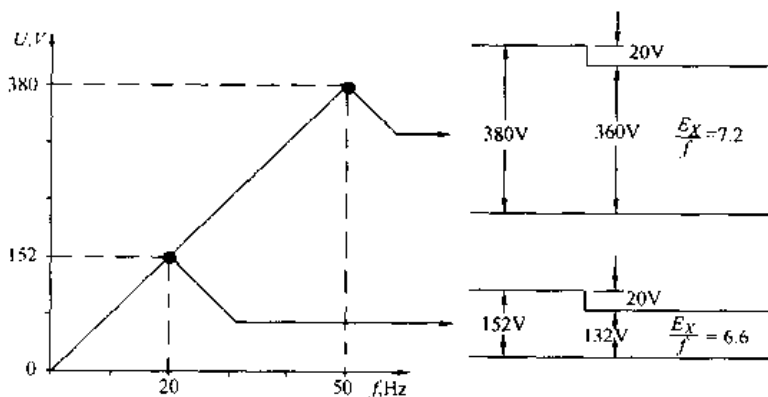


图 2-19 电压下降对磁通的影响

## 二、电压的补偿

### 1. 电压的补偿方法

为了使  $E_X/f_X = \text{const}$  的条件得到满足，人们首先想到的办法便是：频率下降时，在  $U_X/f_X = \text{const}$  的基础上适当提高  $U_X/f_X$  的比值，以补偿  $\Delta U$  所占比例增大的影响。这种方法称为电压补偿或转矩补偿，也叫转矩提升。因为是通过改变  $U/f$  来实现的，故通常称为 V/F 控

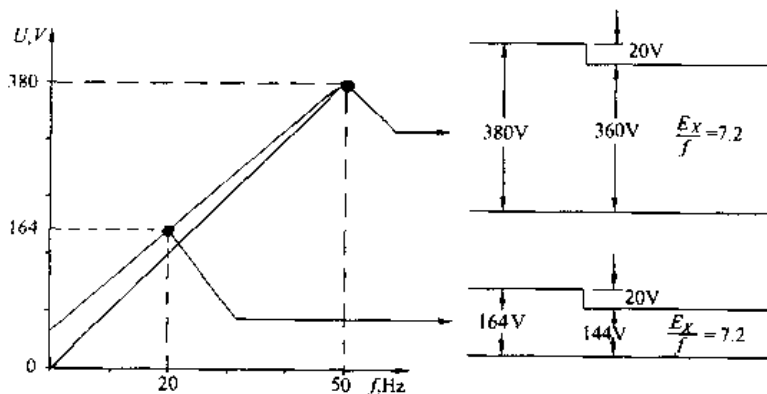


图 2-20 电压补偿的含义

制法,如图 2-20 所示。

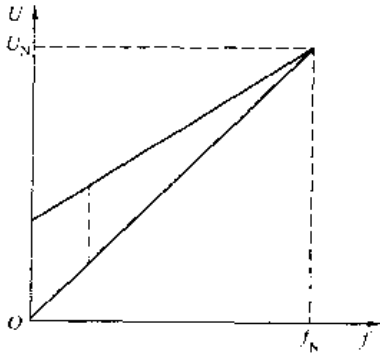


图 2-21  $U/f$  比的预置范围

通常,  $U/f$  可在一定范围内调整, 如图 2-21 所示。用户可根据不同机械的具体情况进行预置。

### 2. V/F 控制法的缺点

V/F 控制法中, 当转矩补偿线选定后, 电动机输入电压  $U_{1X}$  的大小只与工作频率  $f_X$  有关, 而与负载的大小无关。

但在同一转速下, 许多负载转矩常常是变动的。例如, 塑料挤出机在工作过程中, 负载的阻转矩是随塑料的加料情况、熔融状态以及塑料本身的性能等而经常变动的。

而用户在决定  $U/f$  线时, 只能根据额定负载时的状况 ( $I = I_N$ ) 进行选择。当负载较轻时, 电压的补偿量将处于过补偿状态。这是因为: 负载较轻时, 电流  $I$  下降, 定子绕组的电阻压降  $\Delta U = Ir$  也减小。结果, 比值  $E_X/f_X$  将增大, 从而磁通也增大, 使磁路处于饱和状态。

上述分析表明, 当变动负载采用 V/F 控制法时, 电动机磁路的饱和程度将随着负载的变化而变化, 这无疑是个缺点, 使它仍难于和直流电动机相媲美。

## 三、矢量控制法

为了改进变频调速时的机械特性, 人们开始比较异步电动机和直流电动机的主要特点与区别, 并发现: 最大的差异在磁场方面。要解决好异步电动机在变频调速时的机械特性, 必须在变频调速时, 也能具有类似于第一章中所介绍的直流电动机磁场的特点 (见图 1-2), 并以此为突破口。

### 1. 基本思路

矢量控制的基本思想是: 仿照直流电动机的调速特点, 使异步电动机的转速也能通过控制两个互相垂直的直流磁场来进行调节。

### 2. 矢量控制的框图

(1) 对给定信号的处理。变频器在控制电路中, 将给定信号假想地分解成两个互相垂直的直流磁场信号, 分别称为磁场分量  $i_M^*$  和转矩分量  $i_T^*$ ; 以模拟直流电动机的两个磁场。

(2) 进行等效变换。根据电动机的参数, 将互相垂直的直流磁场信号进行一系列的等效变换, 把它们变换成控制三相逆变桥的控制信号  $i_A^*$ 、 $i_B^*$  和  $i_C^*$ , 如图 2-22 所示。

当给定信号改变时, 使直流磁场之一 (转矩分量) 得到调整, 从而获得和直流电动机相仿的调速特性。

转速反馈的作用, 是使电动机的转速严格地和给定转速保持一致, 因此, 电动机的机械特性是很硬的, 并且具有很高的动态响应能力。

### 3. 无反馈矢量控制

由于矢量控制技术的核心是等效变换, 而转速反馈信号并不是等效变换的必要条件。因此, 出现了无反馈矢量控制方式。

所谓无反馈矢量控制, 仅仅指用户不需要在变频器外部另装转速反馈装置, 而并不是说, 变频器内部也是开环的。

由于转速反馈需要在变频器外部附加测速装置, 比较麻烦。进一步的研究表明, 在了解



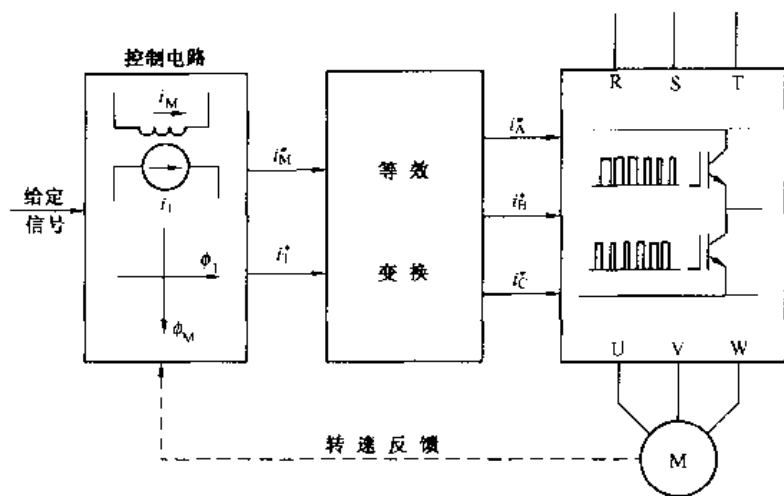


图 2-22 矢量控制框图

电动机参数的前提下，即使只检测电动机的端电压和电流，也能算出转子磁通及其角速度，并进而推算出所需要的转矩电流指令  $i_T^*$  和励磁电流  $i_M^*$  指令，实现矢量控制。

无反馈矢量控制也能得到很硬的机械特性，但由于运算环节相对较多，故动态响应能力与有反馈矢量控制相比，略见逊色。

#### 四、与直流电动机的比较

时至今日，异步电动机变频调速系统与直流电动机调速系统相比，已经毫不逊色了。

##### 1. 性能灵活，异步电动机缺点变优点

例如，对于风机、水泵一类的负载，其阻转矩与转速的二次方成正比，转速较低时，阻转矩减小较多，这就要求电动机的电磁转矩也不必太大，以免造成能量的浪费。异步电动机在低频运行时，如不进行补偿，其电磁转矩较小，与负载的特性比较接近。甚至还可以进行“负补偿”，进一步减小电磁转矩，提高节能效果。而直流电动机在额定转速以下，电磁转矩是恒定的，在拖动风机、水泵类负载时，节能效果不佳。如图 2-23 所示。

图中的曲线 1 是水泵的机械特性；曲线 2 是异步电动机变频调速无补偿时的有效转矩线，它与曲线 1 比较接近；曲线 3 是直流电动机调压调速时的有效转矩线，它具有恒转矩的特点，与曲线 1 相距较远，低速时能量不能充分利用。

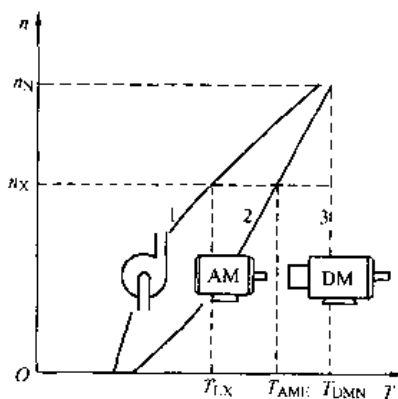


图 2-23 拖动水泵的比较

##### 2. 额定转速以上，直流电动机优点变缺点

如前所述，直流电动机的优点之一，是电枢回路和励磁回路互相独立，故容易实现调速。然而，直流电动机在调速过程中的硬机械特性，是通过两个闭环（电流环和速度环）而得到的。由于其两个电路是互相独立的，两个闭环只可能作用于一个电路。所以，在额定转速以上的部分（弱磁调速部分），机械特性是较“软”的，如图 2-24 (b) 所示，只能用于拖动辅助运动。以龙门刨床为例，它只能用于刨台返回过程，而不能用于高速切削过程中。

异步电动机中，电流的转矩分量和励磁分量都在同一个电路中，这本是使它难以得到硬机械特性的缺点。然而，一旦成功地通过矢量控制法得到了硬机械特性，由于毕竟只有一个电路，矢量控制的方法，非但适用于额定频率以下，也同样适用于额定频率以上。因此，在额定转速以上，也可以得到硬机械特性，如图 2-24 (a) 所示，它完全可以应用于龙门刨床的高速切削过程中。

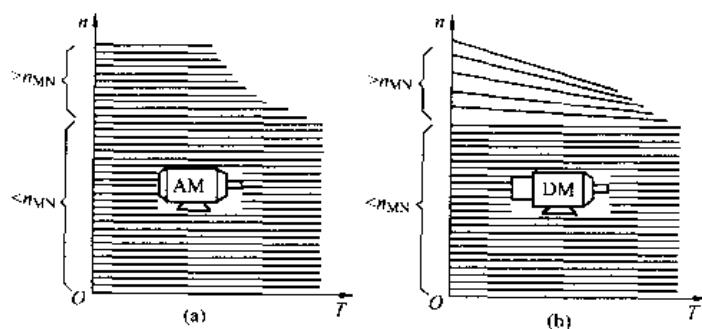


图 2-24 额定转速以上的特性比较  
(a) 异步电动机的特性；(b) 直流电动机的特性

## 第四节 变频器内部的主体电路

不同系列交-直-交变频器内部的主体电路基本相同，变频调速过程中出现的许多现象，都可通过主体电路来进行分析。因此，熟悉主体电路的结构，透彻了解各部分的原理，具有十分重要的意义。

### 一、交-直变换

交一直变换电路就是整流和滤波电路，其任务是把电源的三相（或单相）交流电变换成平稳的直流电。由于整流后的直流电压较高，且不允许再降低，因此，在电路结构上具有特殊性。

#### 1. 全波整流电路

在 SPWM 变频器中，大多采用桥式全波整流电路。在中、小容量的变频器中，整流器件采用不可控的整流二极管或二极管模块，如图 2-25 中的 VD1 ~ VD6 所示。

当三相线电压为 380V 时，整流后的峰值电压为 537V，平均电压为 515V。

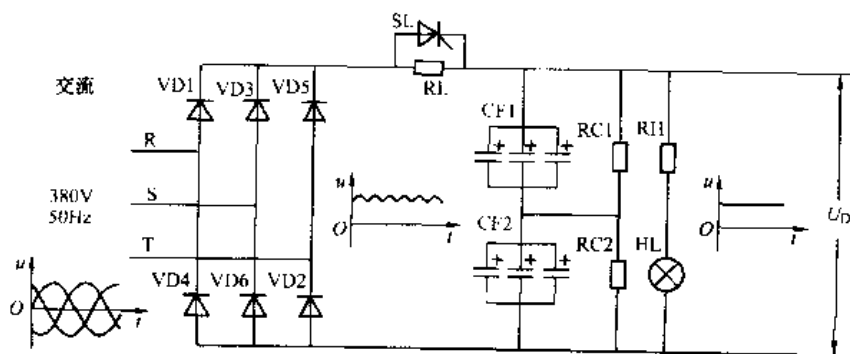


图 2-25 交一直变换

## 2. 滤波及限流电路

(1) 滤波电路，即图 2-25 中的 CF1 和 CF2。由于受到电解电容的电容量和耐压能力的限制，滤波电路通常由若干个电容器并联成一组，又由两个电容器组 CF1 和 CF2 串联而成。因为电解电容器的电容量有较大的离散性，故电容器组 CF1 和 CF2 的电容量常不能完全相等。其结果是各电容器组承受的电压  $U_{D1}$  和  $U_{D2}$  不相等，使承受电压较高一侧的电容器组容易损坏。

为了使  $U_{D1}$  和  $U_{D2}$  相等，在 CF1 和 CF2 旁各并联一个阻值相等的均压电阻 RC1 和 RC2。

(2) 限流电路，即图 2-25 中，串接在整流桥和滤波电容器之间，由限流电阻 RL 和短路开关 SL 组成的并联电路。

限流电阻 RL 的作用是：变频器在接入电源之前，滤波电容 CF 上的直流电压  $U_D = 0$ 。因此，当变频器刚接入电源的瞬间，将有一个很大的冲击电流经整流桥流向滤波电容，使整流桥可能因此而受到损坏。如果电容器的容量很大，还会使电源电压瞬间下降而形成对电网的干扰。限流电阻 RL 就是为了削弱该冲击电流而串接在整流桥和滤波电容之间的。

短路开关 SL 的作用是：限流电阻 RL 如常期接在电路内，会影响直流电压  $U_D$  和变频器输出电压的大小。所以，当  $U_D$  增大到一定程度时，令短路开关 SL 接通，把 RL 切出电路。SL 大多由晶闸管构成，在容量较小的变频器中，也常由继电器的触点构成。

## 3. 电源指示

电源指示灯 HL 除了表示电源是否接通外，还有一个十分重要的功能，即在变频器切断电源后，表示滤波电容器 CF 上的电荷是否已经释放完毕。

由于 CF 的容量较大，而切断电源又必须在逆变电路停止工作的状态下进行，所以 CF 没有快速放电的回路，其放电时间往往长达数分钟。又由于 CF 上的电压较高，如不放完，对人身安全将构成威胁。故在维修变频器时，必须等 HL 完全熄灭后才能接触变频器内部的导电部分，所以，HL 也具有提示保护的作用。

## 二、直-交变换

### 1. 三相逆变桥电路

逆变桥电路的功能是把直流电转换成三相交流电，其工作原理在绪论中已经说明。

逆变桥电路由图 2-26 中的开关器件 V1 ~ V6 构成。目前中小容量的变频器中，开关器件大部分使用 IGBT 管。

### 2. 续流电路

由图 2-26 中的 VD7 ~ VD12 构成。其功能是：

(1) 为电动机绕组的无功电流返回直流电路时提供通路。

(2) 当频率下降从而同步转速下降时，为电动机的再生电能反馈至直流电路提供通路。

(3) 为电路的寄生电感在逆变过程中释放能量提供通路。

### 3. 缓冲电路 (R01 ~ R06、C01 ~ C06、VD01 ~ VD06)

逆变管在关断和导通的瞬间，其电压和电流的变化率是很大的，有可能使逆变管受到损

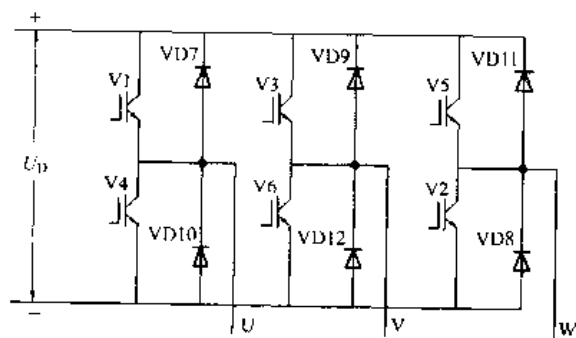


图 2-26 直-交变换

害。因此，每个逆变管旁还应接入缓冲电路，以减缓电压和电流的变化率。缓冲电路的结构因逆变管的特性和容量等的不同而有较大差异，图 2-27 所示是比较典型的一种。各元件的功能如下：

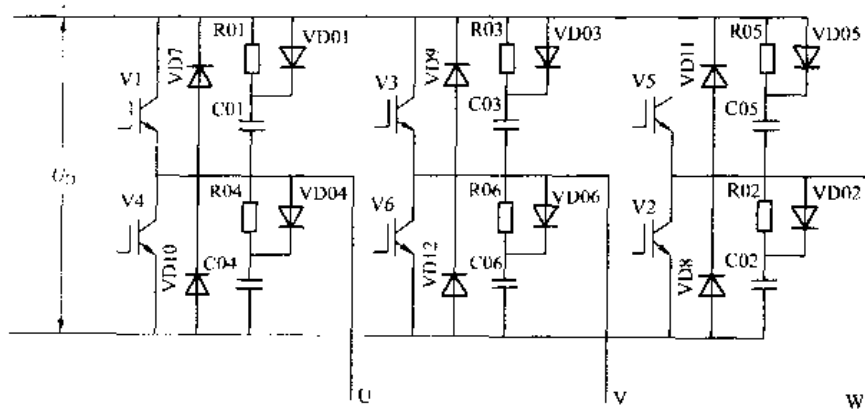


图 2-27 缓冲电路

(1) 电容 C01 ~ C06。逆变管 V1 ~ V6 每次由导通状态转换成截止状态的过程中，集电极（C 极）和发射极（E 极）之间的电压  $U_{CE}$  将极为迅速地由近乎 0V 上升至直流电压值  $U_D$ 。在此过程中，电压增长率是很高的，将容易导致逆变管损坏。C01 ~ C06 的功能便是减小 V1 ~ V6 在关断时的电压增长率。

(2) 电阻 R01 ~ R06。V1 ~ V6 每次由截止状态转换为导通状态时，C01 ~ C06 上所充的电压（等于  $U_D$ ）将向 V1 ~ V6 放电。放电电流的初始值是很大的，并且将迭加到负载电流上，导致 V1 ~ V6 损坏。电阻 R01 ~ R06 就是用来限制 C01 ~ C06 对 V1 ~ V6 的放电电流的。

(3) 二极管 VD01 ~ VD02。限流电阻 R01 ~ R06 的接入，又会影响 C01 ~ C06 在 V1 ~ V6 关断时限制电压增长率的效果。VD01 ~ VD02 接入后，在 V1 ~ V6 的关断过程中，使 R01 ~ R06 不起作用。

### 三、能耗制动电路

#### 1. 能耗制动电路的作用

在变频调速系统中，电动机的降速和停机，是通过逐渐减小频率来实现的。在频率刚减小的瞬间，电动机的同步转速随之下降，而由于机械惯性的原因，电动机的转速未变。当同步转速低于转子转速时，转子绕组切割磁力线的方向相反了，转子电流的相位几乎改变了  $\pi$  ( $180^\circ$ )，使电动机处于发电状态，也称为再生制动状态。

电动机再生的电能经图 2-26 中的续流二极管（VD7 ~ VD12）全波整流后反馈到直流电路中，由于直流电路的电能无法回输给电网，只能由 CF1 和 CF2 吸收，使直流电压升高，称为“泵升电压”。过高的直流电压将使变流器件受到损害。因此，当直流电压超过一定值时，就要求提供一条放电回路，将再生的电能消耗掉。这一条放电回路，就是能耗制动电路。

#### 2. 能耗电路的构成

能耗电路由制动电阻 RB 和制动单元 BV 构成，如图 2-28 所示。

制动电阻 RB 用于消耗掉直流电路中的多余电能，使直流电压保持平稳。

制动单元 BV 的功能是控制放电回路的工作。具体地说，当直流回路的电压  $U_D$  超过规定的限值时，VB 导通，使直流回路通过 RB 释放能量，降低直流电压。而当  $U_D$  在正常范围内时，VB 将可靠截止，以避免不必要的能量损失。

#### 四、主电路

将上述各部分电路汇总后成为主电路，如图 2-29 所示。

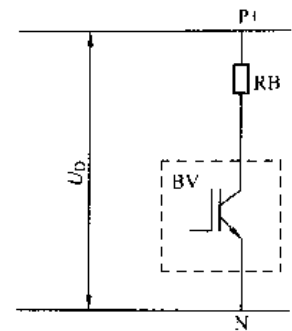


图 2-28 能耗电路

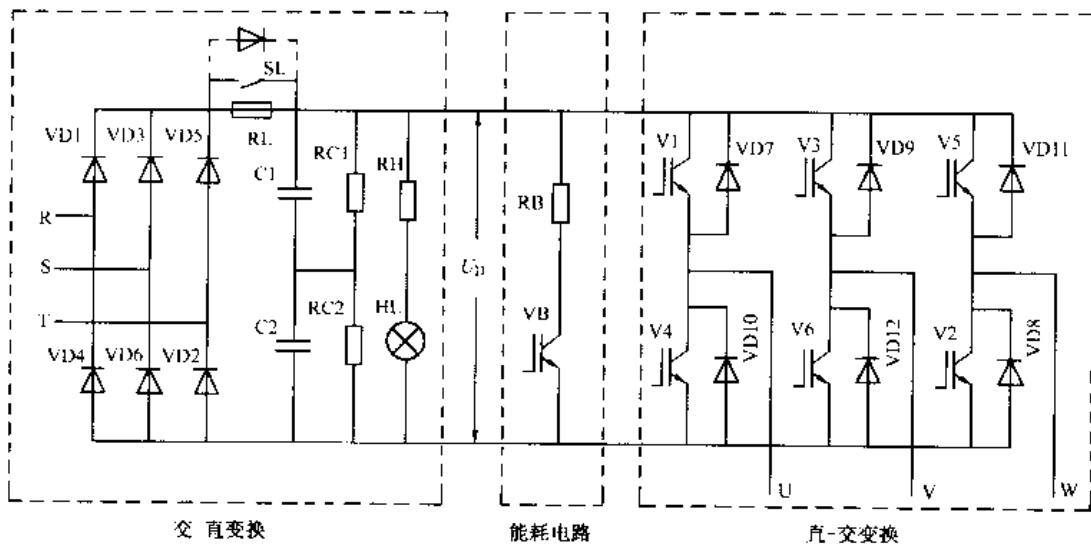


图 2-29 变频器的主电路

## 第五节 主体电路的改进

近年来，有些公司为了进一步改善变频器的某些指标，相继推出了一些改进措施，效果较好，必将逐渐地成为一种发展趋势。

### 一、整流电路的改进

#### (一) 三相全波整流电路的特点

图 2-30 (a) 所示，是普通的三相全波整流电路，由图可知，其电流和电压波形的特点是：

#### 1. 电路的结构特点

三相桥形全波整流电路可以看成是由两个半波整流电路串联而成的，它们分别是：图 2-30 (b) 所示的共阴极半波整流电路和图 2-30 (c) 所示的共阳极半波整流电路。

#### 2. 电压矢量图

图 2-31 (a) 所示是变压器的接法（这里所说的变压器是为了说明问题而假想的，实际并不存在）；图 2-31 (b) 所示是变压器两个二次绕组的电压矢量；图 2-31 (c) 所示是两者串联后（即桥形电路）的矢量。

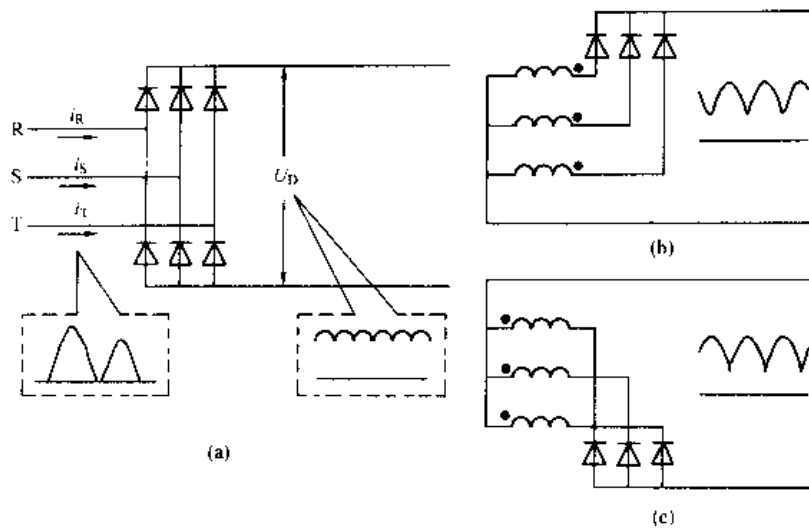


图 2-30 三相全波整流电路

(a) 桥形整流电路；(b) 共阴极整流电路；(c) 共阳极整流电路

### 3. 输出直流电压波形

由图 2-30 可知，各半波整流电路输出的电压波都只有三个峰值，而合成后则是一个具有 6 个峰值的脉动波，这和矢量图是一致的，见图 2-31。因此，三相桥形全波整流电路也可以认为是六相整流电路。

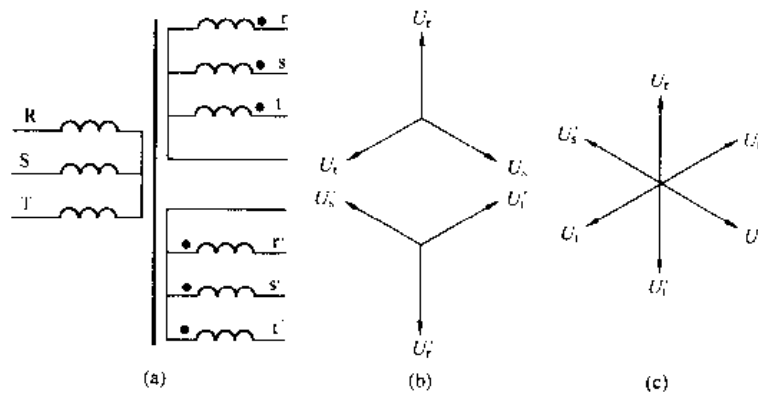


图 2-31 电压矢量

(a) 变压器接法；(b) 半波矢量；(c) 全波矢量

### 4. 输入电流波形

是一个畸变十分严重的双峰波，它的高次谐波分量是很大的。如果电动机容量较大，将导致电网电压的波形也发生畸变，从而对电网形成“污染”。

#### (二) 十二相整流电路

##### 1. 电路的结构特点

十二相整流的特点是，变压器的二次方真实地具有两个绕组，一个接成 Y 形，另一个接成  $\Delta$  形，如图 2-32 所示。

##### 2. 电压矢量图

众所周知， $\Delta$  形接法的电压矢量和 Y 形接法的电压矢量之间，互差  $\pi/6$  电角度，如图 2-

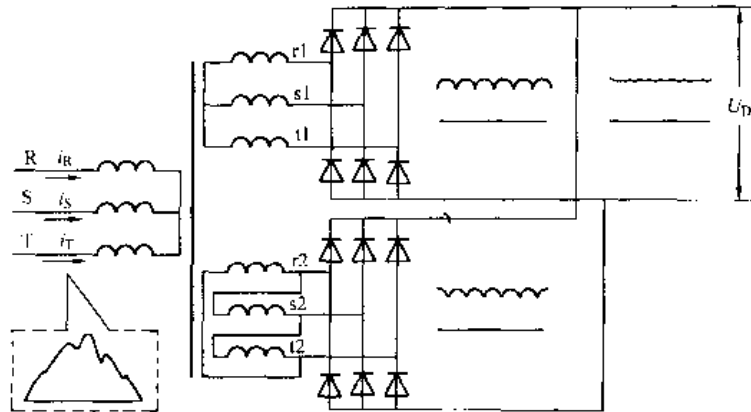


图 2-32 十二相整流电路

33 所示。图 2-33 (b) 的上面是 Y 形接法的输出端经桥形整流时的电压矢量；下面是  $\Delta$  形接法的输出端经桥形整流时的电压矢量；图 2-33 (c) 是两者串联后的电压矢量，可以看出，它具有十二相的特点。

### 3. 输出直流电压波形

由图 2-32 可知，两个桥形电路整流后的波形都是具有 6 个峰值的脉动波，但因为两者互差  $\pi/6$  电角度，所以，合成后的电压波形的脉动幅度要小得多。

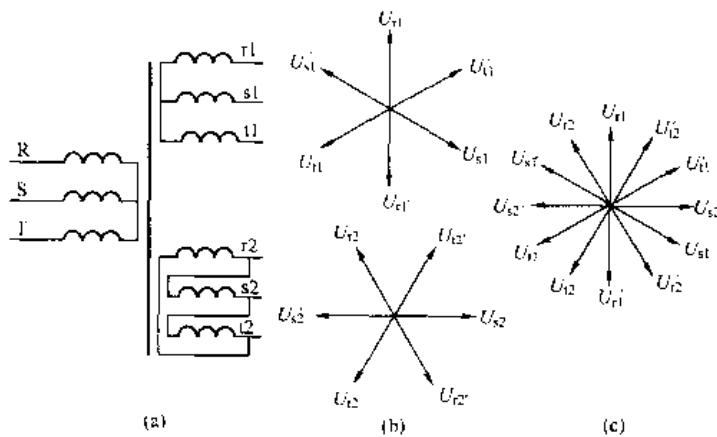


图 2-33 十二相的电压矢量

(a) 变压器接法；(b) 两种电压矢量；(c) 合成矢量

### 4. 输入电流波形

如图 2-32 左侧所示，其输入电流波形已经十分接近于正弦波了。有关资料表明：六相整流时，输入电流的畸变率为 88%；十二相整流时，输入电流的畸变率只有 12%。

## 二、逆变电路的改进

近年来，有些公司推出了三电平低压变频器，在改善电流波形、减少对外界的干扰方面，都取得了较好的效果。

### (一) 三电平逆变电路的构成

三电平逆变电路，也称为中心点箝位逆变电路，其构成如图 2-34 所示，基本特点是：

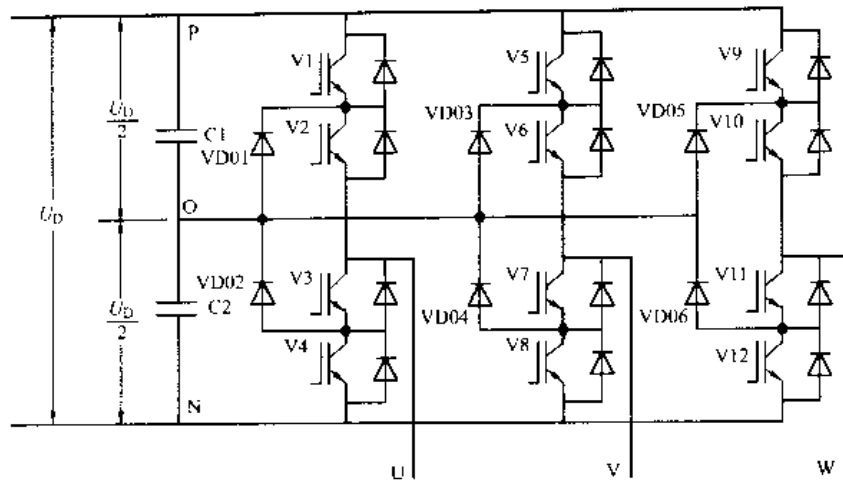


图 2-34 三电平逆变电路

1. 逆变电路

由 12 个开关器件 V1 ~ V12 构成，每个桥臂有 4 个开关器件。

2. 箝位二极管

每个桥臂中间的两个开关器件被二极管箝位于两组电容的中心点（零电平点）。

3. 三电平的含义

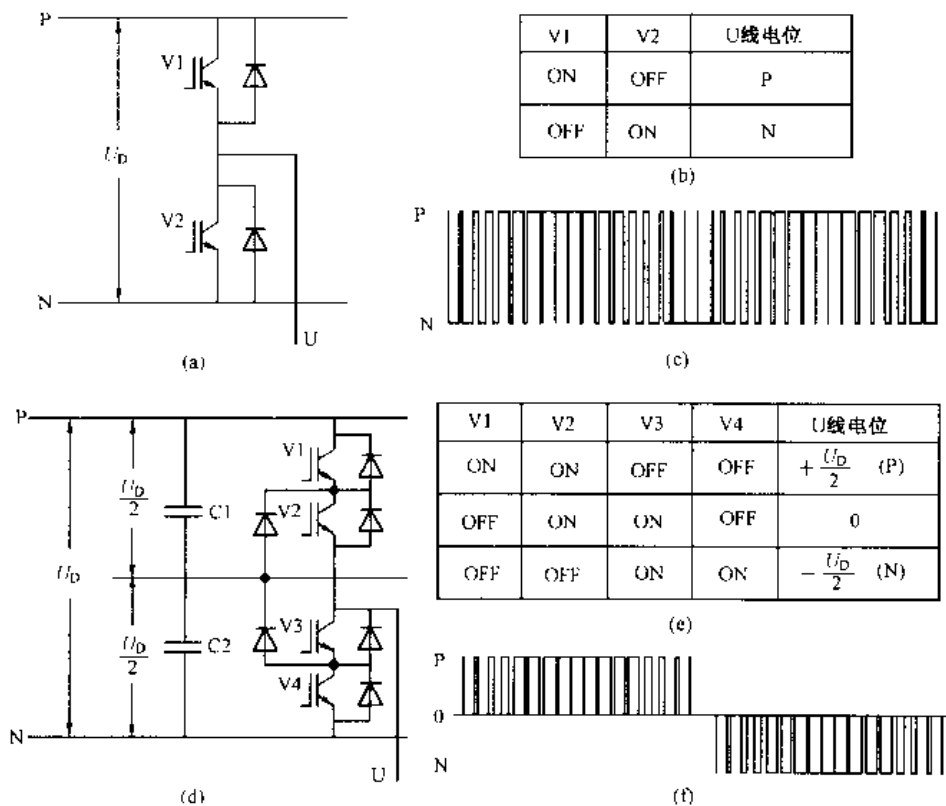


图 2-35 三电平逆变电路的工作特点

(a) 二电平逆变电路的桥臂；(b) 开关器件的状态；(c) U 线的电位变化；

(d) 三电平逆变电路的桥臂；(e) 开关器件的状态；(f) U 线的电位变化



- (1) 直流电路的正端为高电平；
- (2) 直流电路的负端为低电平；
- (3) 两组互相串联的滤波电容器的中点为零电平。

#### (二) 三电平逆变电路的工作特点

三电平逆变电路的工作特点如图 2-35 所示。

图 2-35 (a) ~ (c) 是二电平逆变电路的工作状况，其特点是：

- (1) 同一桥臂的开关器件只有两种状态，如图 2-35 (b) 所示。
- (2) 在逆变过程中，U 线的电位变化如图 2-35 (c) 所示，只有两个电位：直流电压  $U_D$  的“+”电位和  $U_D$  的“-”电位。

图 2-35 (d) 是三电平逆变桥的一个桥臂，其工作特点是：

- (1) 开关器件有三种状态，如图 2-35 (e) 所示。其中，晶体管 V1 和 V3 的状态总是互反的，V2 和 V4 也总是互反的。
- (2) 在逆变过程中，U 线的电位变化如图 2-35 (f) 所示，有三个电位： $U_D$  的“+”电位、 $U_D$  的“-”电位、电容器组中点的“0”电位。

#### (三) 三电平逆变电路的优点

图 2-36 所示是三相输出线之间的线电压波形。图 2-36 (a) 是二电平逆变电路的输出线电压，每个脉冲的变化率等于  $U_D$ 。

图 2-36 (b) 是三电平逆变电路的输出线电压，每个脉冲的变化率等于  $U_D/2$ 。

可见，三电平逆变电路线电压的变化率比二电平逆变电路减小了一半，这是三电平逆变电路的主要特点。由此而带来的好处有：

- (1) 减小了对电动机槽绝缘的冲击，延长了绝缘材料的寿命；
- (2) 减小了由于 SPWM 调制而产生的电磁辐射；
- (3) 减小了因线路分布电容而引起的漏电流；
- (4) 减小了电动机的轴和轴承内的感应电流以及由此而引起的电腐蚀。

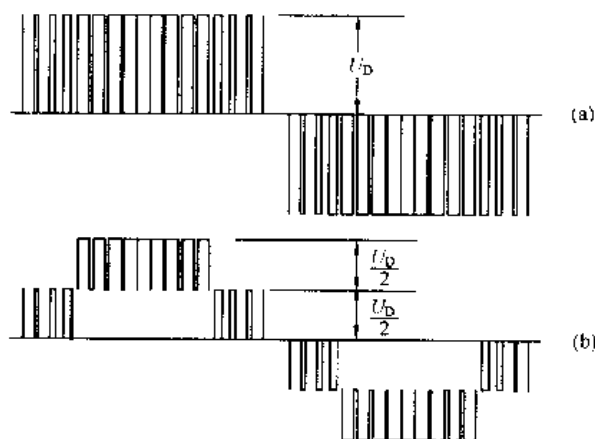


图 2-36 逆变电路的线电压  
(a) 二电平；(b) 三电平

## 第六节 变频器的内部控制框图

变频器内部的控制电路框图如图 2-37 所示。

### 一、主控电路

#### (一) 主控电路的基本任务

- 1. 接受各种信号
  - (1) 在功能预置阶段，接受对各功能的预置信号；
  - (2) 接受从键盘或外接输入端子输入的给定信号；

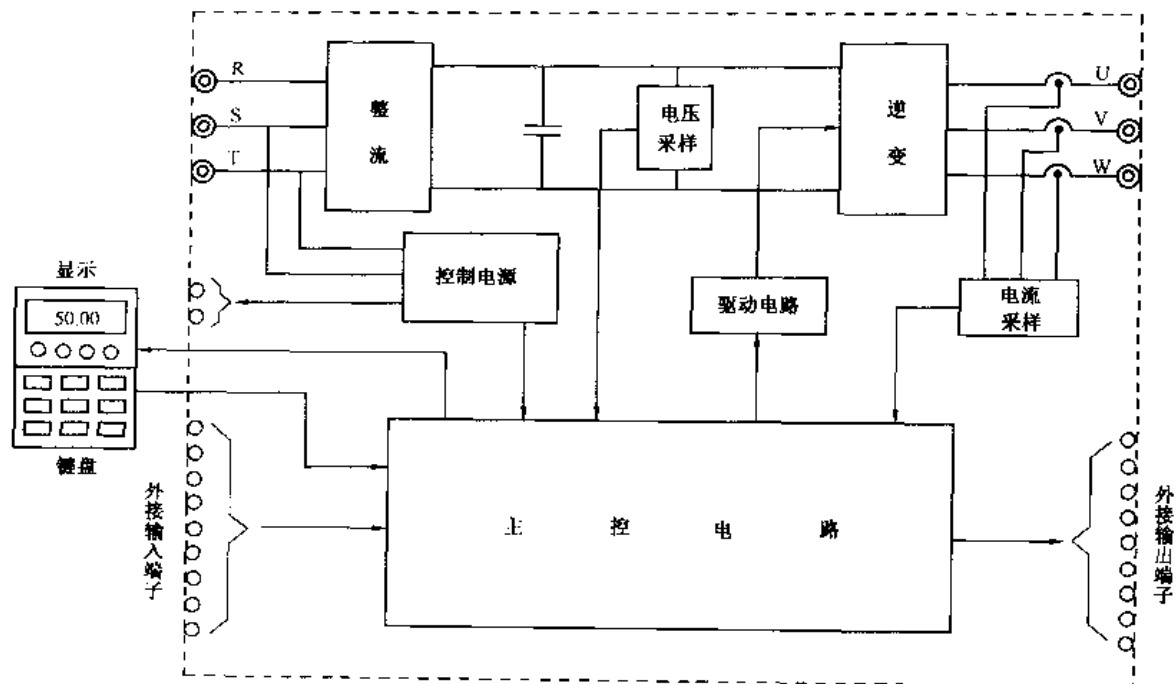


图 2-37 变频器内的控制电路框图

- (3) 接受从外接输入端子输入的控制信号；
- (4) 接受从电压、电流采样电路以及其他传感器输入的状态信号。

## 2. 进行基本运算

最主要的运算包括：

- (1) 进行矢量控制运算或其他必要的运算；
- (2) 实时地计算出 SPWM 波形各切换点的时刻。

## 3. 输出计算结果

- (1) 输出至逆变管模块的驱动电路,使逆变管按给定信号及预置要求输出 SPWM 电压波。
- (2) 输出给显示器,显示当前的各种状态。
- (3) 输出给外接输出控制端子。

## (二) 主控电路的其他任务

### 1. 实现各项控制功能

接受从键盘和外接输入端子输入的各种控制信号,对 SPWM 信号进行启动、停止、升速、降速、点动等的控制。

### 2. 实施各项保护功能

接受从电压、电流采样电路以及其他传感器(如温度传感器)的信号,结合功能中预置的限值,进行比较和判断,如认为已经出现故障,则:

- (1) 停止发出 SPWM 信号,使变频器中止输出;
- (2) 向输出控制端输出报警信号;
- (3) 向显示器输出故障原因信号。

## 二、面板控制器

操作面板由显示器和键盘输入器构成,不同品牌变频器的操作面板各不相同,现以如图

2-38 所示的森兰 SB61 系列变频器为例进行说明。

### (一) 显示器

显示器接受主控电路的显示信号，其构成和各部分的功能如下。

#### 1. 数据显示屏

- (1) 在功能预置时，显示功能码和数据码；
- (2) 在运行过程中，用于显示各种数据，如频率、电流、电压、转速等；
- (3) 在发生故障时，显示故障原因的代码。

#### 2. 发光二极管

- (1) 显示数据的单位，如 Hz、A、V 等；
- (2) 显示变频器的工作状态，如 FWD（正转）、REV（反转）等。

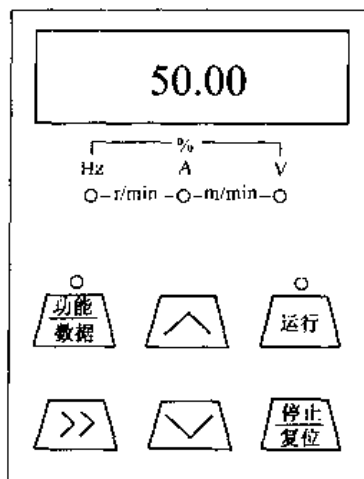


图 2-38 森兰 SB61 变频器面板

### (二) 键盘输入器

#### 1. 键盘输入器的主要功能

- (1) 在进行功能预置时输入各功能的预置数据；
- (2) 在进行面板操作时，输入各项操作指令。

#### 2. 键盘输入器的组成

不同变频器的键盘配置的差异较大，但归纳起来，不外有以下几类按键：

(1) 模式转换键。用于更改工作模式，如运行模式、功能预置模式等，常见的符号有 PRG、MOD、FUNC 等，森兰 SB61 变频器则为“功能/数据”键。

(2) 数据增、减键。用于增加或减小数据，常见的符号有  $\wedge$  和  $\vee$ 、 $\blacktriangle$  和  $\blacktriangledown$ 、 $\uparrow$  和  $\downarrow$  等。此外，不少变频器还配置了移位键（常见的符号如  $\gg$ 、 $\blacktriangleright$ 、 $\blacktriangleright$  等），用于加速更改数据。

(3) 读出、写入键。在功能预置模式下，用于“读出”或“写入”数据码，常见的符号有 SET、READ、DATA、ENTER 等，森兰 SB61 变频器则为“功能/数据”键。

(4) 运行操作键。在运行模式下，用于进行“运行”、“停止”等操作，主要有：RUN（运行）、FWD（正转）、REV（反转）、STOP（停止）、JOG（点动）等，森兰 SB61 变频器则为“运行”键。

(5) 复位键。用于在故障跳闸后，使变频器恢复为正常状态，符号为 RST，森兰 SB61 变频器则为“停止/复位”键。

某些变频器的操作面板还配置了一个调速旋钮，如森兰 SB60 系列变频器、康沃 CVF-G1 系列变频器、日本明电的

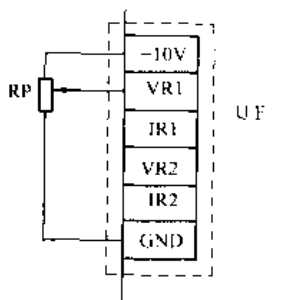


图 2-39 变频器的外接给定电路

VT230S 系列变频器等。

## 三、外接给定与输入控制端

### (一) 外接给定端

各种变频器都配有接受从外部输入给定信号的端子，见图 2-39。根据给定信号类别的不同，通常有如下两类。

#### 1. 电压信号给定端

如图中的端子 VR1 和 VR2。

#### 2. 电流信号给定端

如图中的端子 IR1 和 IR2。

## (二) 外接输入控制端

外接输入控制端接受外部输入的各种控制信号，以便对变频器的工作状态和输出频率进行控制。

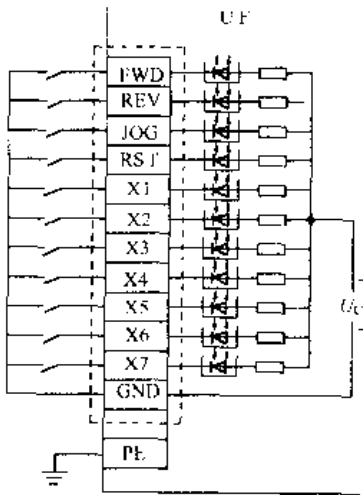


图 2-40 外控输入电路

### 1. 控制信号的类别

(1) 基本控制信号。如正转 (FWD)、反转 (REV)、点动 (JOG)、复位 (RST) 等，基本信号输入端在多数变频器中是单独设立的，其功能比较固定，如图 2-40 所示。

(2) 可编程控制信号。如多挡转速控制，多挡升、降速时间控制，可编程序控制等。

(3) 外部故障信号。当外部控制电路发生故障时，将故障信号输入给变频器，使变频器作出反应。

(4) 外部升、降速给定控制。通过外部触点进行升速或降速的控制。

上述 (2) ~ (4) 各项功能由图中的 X1 ~ X7 等控制端输入，这些端子的具体功能并不固定，须在编程模式下通过功能预置来确定。

### 2. 外接控制端的电路

外接输入控制端接受的都是开关信号、变频器内部则由光电耦合管来接受信号，如图 2-40 所示。

## 四、外接输出控制端

### (一) 报警输出端

当变频器发生故障时，变频器将发出报警信号，通常都采取继电器输出，如图 2-41 中的 30A、30B 和 30C 输出端 (虚线框①) 所示。报警时，30B、30C 间的动断触点断开，而 30B、30A 间的动合触点闭合。继电器可接至 AC 250V 的电路中，最大电流约为 1A。图中画出了实际使用的一个例子：报警时，动断触点将主接触器的控制回路断开，使变频器脱离电源。

### (二) 测量信号输出端

外接测量信号端有如图 2-41 中的 FM 和 AM (虚线框②) 所示，有的变频器配置的测量信号端可多至 3~4 个。

#### 1. 测量内容

通常给出的测量内容是：FM 用于测量频率，AM 用于测量变频器的输出电流。

但通过功能预置，可以改变其测量内容。如可以测量变频器的输出电压、负荷率等。

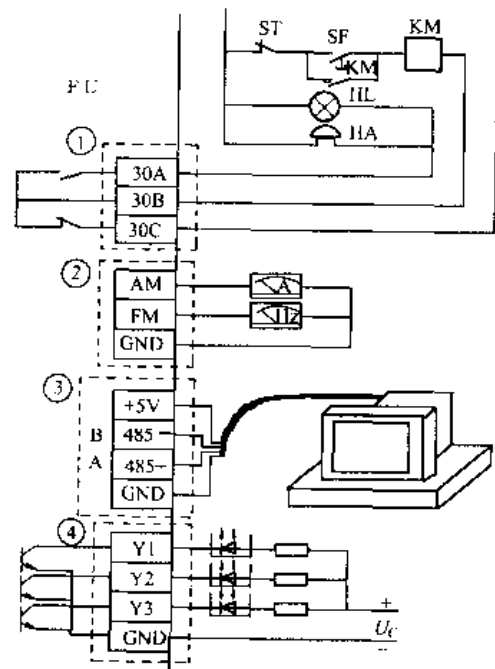


图 2-41 外接输出控制端

## 2. 测量信号

变频器通常可提供两种测量信号：

- (1) 模拟量测量信号，如 DC 0~10V 等。
  - (2) 数字量测量信号，可直接接至需要数字量的仪器或仪表。
- (三) 通信接口

用于和上位微机相接（图 2-41 中的虚线框③）。多数变频器提供的是 RS485 接口，而上位微机的通信口多为 RS232C 接口，中间应加接一个“RS485—RS232C”的转接口。

## (四) 状态信号输出端

### 1. 状态信号的内容

主要有：“运行”信号、“频率到达”信号、“频率检测”信号（图 2-41 中的虚线框④）等，各输出端的具体测量内容可通过功能预置来设定。

### 2. 状态信号的输出电路

通常是晶体管的集电极开路输出方式，用于直流低压电路中。外电路可通过光电耦合管接受其信号，可直接用发光二极管来指示各种状态，如图 2-41 所示。

## 五、控制电源、采样及驱动电路

### (一) 控制电源

控制电源为以下各部分提供稳压电源：

#### 1. 主控电路

主控电路以微机电路为主体，要求提供稳定性非常高的 0~+5V 电源。

#### 2. 外控电路

- (1) 为给定电位器提供电源，通常为 0~+5V 或 0~+10V；
- (2) 为外接传感器提供电源，通常为 0~+24V。

### (二) 采样电路

采样电路的作用主要是提供控制用数据和保护采样。

#### 1. 提供控制用数据

尤其是进行矢量控制时，必须测定足够的的数据，提供给微机进行矢量控制运算。

#### 2. 提供保护采样

将采样值提供给各保护电路（在主控电路内），在保护电路内与有关的极限值进行比较，必要时采取跳闸等保护措施。

### (三) 驱动电路

用于驱动各逆变管。如逆变管为 GTR，则驱动电路还包括以隔离变压器为主体的专用驱动电源。但现在大多数中、小容量变频器的逆变管都采用 IGBT 管，逆变管的控制极和集电极、发射极之间是隔离的，不再需要隔离变压器，故驱动电路常常和主控电路在一起。

## 六、变频器的内部布置

以森兰 SB61 通用系列变频器为例，其内部的大致布置如图 2-42 所示。图中左侧是电容器和接触器；

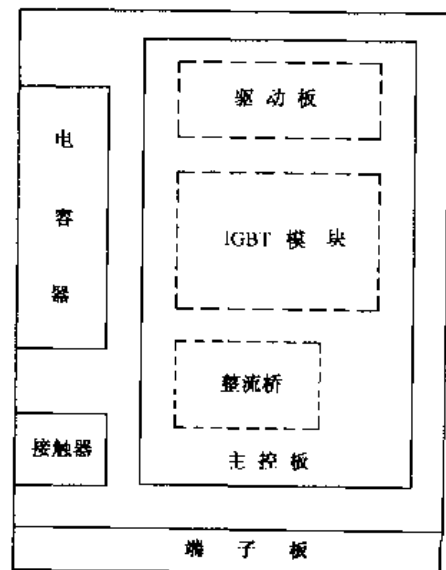


图 2-42 变频器的内部布置

右侧分若干层，上层是主控板，主控板的下面安装主电路的一些部件，如逆变桥、整流桥等。底部有较厚的散热层。此外还有冷却风扇（图中未画出）和端子板等。

## 第七节 操作面板的使用

### 一、用操作面板直接操作变频器的运行

#### 1. 准备工作

通过“功能预置”，使变频器允许“面板操作”。以康沃 CVF-G1 系列变频器为例，须进行如下的功能预置：

(1) 将功能码为 L-26 的数据码预置为“0”，使运行命令从面板输入。

(2) 将功能码为 b-2 的数据码预置为“0”，则频率给定由面板上的电位器输入；如预置为“1”，则频率给定由面板上的增、减键（▲键或▼键）输入。

#### 2. 运行操作

(1) 按“运行 (RUN)”键，使变频器开始运行；

(2) 按“增、减 (▲或▼)”键，调整输出频率；

(3) 按“停止 (STOP)”键，使变频器停止运行；

(4) 按“点动 (JOG)”键，变频器可点动运行。

### 二、显示内容的选择

变频器在运行过程中，其显示屏的显示内容可以十分方便地进行切换，以便了解各项运行数据，判断变频调速系统的工况。

改变显示内容通常可以直接切换。以森兰 SB60 系列变频器为例，其切换顺序如图 2-43 所示。

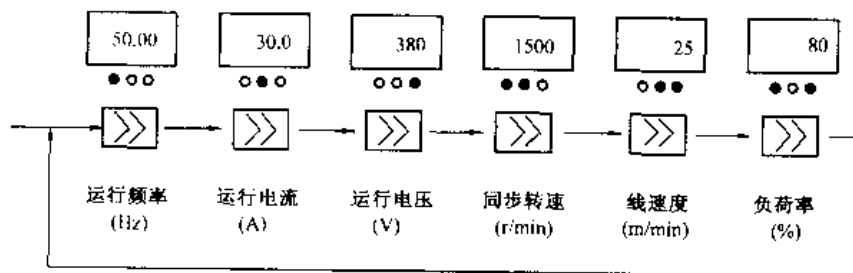


图 2-43 显示内容的切换

变频器在接通电源时，首先显示的是运行频率，每次按动“>>”键后，其显示内容依次是：运行频率 (Hz) → 运行电流 (A) → 运行电压 (V) → 同步转速 (r/min) → 线速度 (m/min) → 负荷率 (%) → 运行频率 (Hz)。

## 第八节 功能的预置

### 一、功能预置的概念

各种变频器都具有许多可供用户选择的功能，用户在使用前，必须根据生产机械的特点和要求预先对各种功能进行设定，这种预先设定的工作称为功能预置。准确地预置变频器的

各项功能，可使变频调速系统的工作过程尽可能地与生产机械的特性和要求相吻合，使变频调速系统运行在最佳状态。

### （一）功能码和数据码

用户在进行功能预置时，首先要找到所需预置的功能，然后用简单明了的方式来预置所要求的数据。为此，变频器必须对各种功能以及在该功能中提供选择的数据进行编码。

#### 1. 功能码

表示各种功能的代码。例如，在森兰 SB61 系列变频器中，功能码“F001”表示频率给定方式选择；“F413”表示加、减速方式等。在艾默生 TD3000 变频器中，功能码“F0.08”表示上限频率；功能码“F0.10”表示升速时间等。

不同的变频器对功能码的编制方式也不一样，但大致有以下两种类型：

（1）大模式型。即所有的功能码依次编码，不分区域。属于这种类型的变频器如：森兰 SB61 系列、三菱 FR-540 系列（日）、富士 G11S 系列（日）等。

（2）功能码分区型。即，将所有的功能分成若干个功能区，从一个功能区到另一个功能区，必须经过模式转换。例如：

康沃 CVF 变频器将主要功能分为基本功能区、中级功能区和高级功能区。在预置完基本功能后，须按“MODE”键，才能进入中级功能区，再按“MODE”键，便进入高级功能区。

艾默生 TD3000 系列变频器则将主要功能分为一级菜单、二级菜单和三级菜单，在预置完一级菜单的功能后，须按“ENTER”键，才能进入二级菜单功能区，再按“ENTER”键，便进入三级菜单功能区。

明电 VT230 系列变频器（日）的主要功能分为 A 组、B 组和 C 组，从 A 组转入 B 组须按“RST/MOD”键，再按“RST/MOD”键，则进入 C 组。

#### 2. 数据码

表示各种功能所需预置的数据或代码。它有以下几种情形：

（1）直接数据。有些功能中所需预置的内容本身就是数据，如最高频率为 50Hz、升速时间为 20s 等。

（2）间接数据。有些功能中所需预置的内容难以提供准确的数据，而只能将该项内容分成若干挡，如对于“转矩补偿”（转矩提升）功能，选择第“5”挡  $U/f$  线等。

（3）赋值代码。有些功能中所需预置的内容本身并不是数据，例如频率给定方式、升速方式、降速方式等，在这种情况下，通常对于不同的预置内容分别用不同的代码来表示，称之为赋值代码。例如，在艾默生 TD3000 系列变频器中，对于操作模式的选择功能，分别赋值为：0 表示键盘操作方式，1 表示外部操作方式，2 表示通信控制方式等。

### （二）功能预置的一般步骤

功能预置一般都是通过编程方式来进行的。因此，功能预置都必须在“编程模式”下进行。尽管各种变频器的功能预置各不相同，但基本方法和步骤是十分类似的。大致如下：

- （1）转入编程模式；
- （2）找出需要预置的功能码；
- （3）“读出”该功能码中原有的数据；
- （4）修改数据码；
- （5）“写入”新数据；

(6) 转入运行模式。

## 二、功能预置的流程图和实例

流程图能够简洁明了地表达功能预置的方法和步骤，下面通过实例来进行说明。

### 1. 实例 1——森兰 SB60 变频器的预置流程

如图 2-44 所示，以把升速时间由原来的 5s 修改为 30s 为例，说明如下：

- (1) 按 **功能/数据** 键，将变频器切换至编程模式。
- (2) 按 **▲** 键或 **▼** 键并结合移位键，找出所需预置的功能码“F009”（升速时间）。
- (3) 又按 **功能/数据** 键，“读出”原有数据（原有升速时间为“5s”）。
- (4) 按 **▲** 键或 **▼** 键和移位键，修改数据。根据要求，将升速时间修改为“30s”。
- (5) 又按 **功能/数据** 键，“写入”新数据。
- (6) 如预置尚未结束，则转第（2）步。
- (7) 如全部预置完毕，则在功能码和数据码交替显示 2 次后，变频器将自行切换至运行模式。

### 2. 实例 2——康沃 CVF 变频器的预置流程

如图 2-45 所示，说明如下：

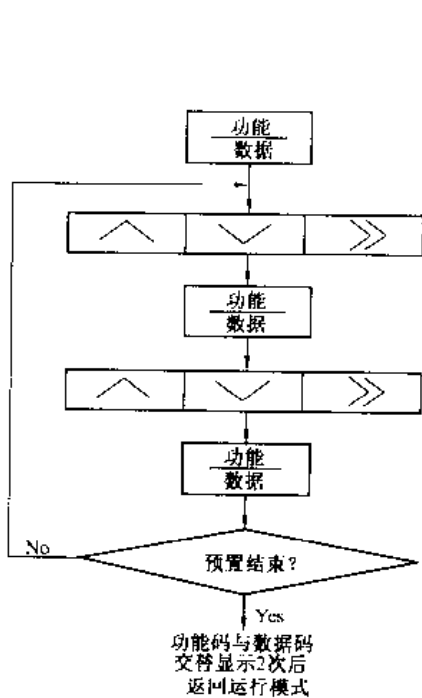


图 2-44 SB61 的预置流程

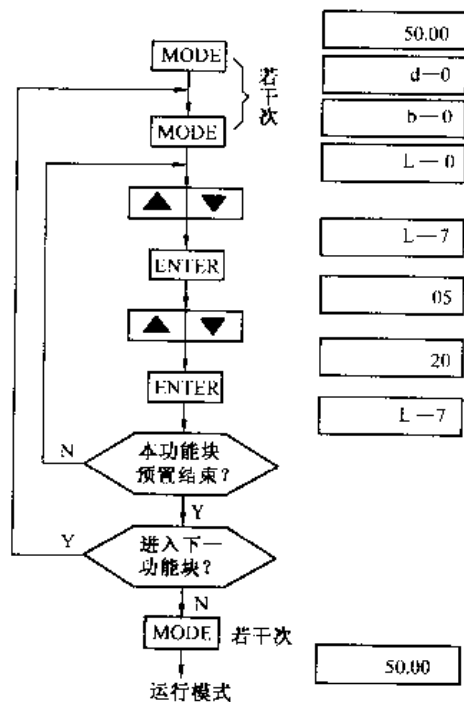


图 2-45 康沃 CVF 的预置流程

- (1) 在运行模式下，按 **MODE** 键，进入查询模式，再按 **MODE** 键，进入基本功能区。
- (2) 按增、减（**▲**或**▼**）键，找出需要修改的功能码，如“b-2”。
- (3) 按 **ENTER** 键，读出该功能码中的原有数据码。假设原有数据码为“0”（由面板电位器给定）。
- (4) 按增、减（**▲**或**▼**）键，将数据码修改成希望值，如修改为“3”（外部电流信号



给定)。

(5) 按 **ENTER** 键, 写入新的数据码。

(6) 如基本功能尚未预置完, 再按增、减 (**▲**或**▼**) 键, 找出下一个需要修改的功能码, 重复上述过程。

(7) 如基本功能的预置已经结束, 需要转入中级功能区, 则按 **MODE** 键, 便进入中级功能区。数据码的预置方法和基本功能区相同。

(8) 同样, 如中级功能的预置已经结束, 需要转入高级功能区, 则再按 **MODE** 键, 便进入高级功能区, 进行数据码的预置。

(9) 在基本功能 (或中级功能) 预置完后, 如并不需要转入下一级功能区, 则连续按 **MODE** 键, 直至转入运行模式为止。

## 第九节 常用逆变模块介绍

### 一、几种常见的功率器件

#### 1. 大功率晶体管 (BJT 或 GTR)

(1) 基本特点。也叫双极结型晶体管, 实际上是复合晶体管 (达林顿管)。其基本特征与晶体管相同, 由集电极 (C)、发射极 (E) 和基极 (B) 构成, 如图 2-46 (a) 所示。其工作特点是: 集电极电流 ( $I_C$ ) 的大小受基极电流 ( $I_B$ ) 的控制, 属于电流控制型器件。

(2) BJT 的主要优缺点。优点是击穿电压和集电极最大饱和电流都较大; 缺点是开关频率较低, 最高为 2kHz 左右。因而以 BJT 为逆变器件的变频器的载波频率也较低, 电动机有较大的电磁噪声。

此外, 控制电路的驱动功率也较大。

#### 2. 功率场效应管 (MOSFET)

(1) 基本特点。与场效应管相同, 由漏极 (D)、源极 (S) 和控制极 (G) 构成, 如图 2-46 (b) 所示。其工作特点是:

漏极电流 ( $I_D$ ) 的大小受控制极与源极间的电压 ( $u_{GS}$ ) 的控制, 属于电压控制型器件。

(2) 主要优缺点。MOSFET 的开关频率较高, 最高达 20kHz 以上。因而以 MOSFET 为逆变器件的变频器的载波频率也较高, 电动机基本无电磁噪声。此外, 控制电路所需的驱动功率极小。但迄今为止, 其击穿电压和漏极最大饱和电流都较小, 难以满足多数变频器的要求。

#### 3. 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT 管)

(1) 结构特点。是 MOSFET 和 BJT 相结合的产物。其主体部分与晶体管相同, 也是集电极 (C) 和发射极 (E); 但驱动部分却和场效应管相同, 是绝缘栅结构。如图 2-46 (c) 所示。其工作特点是: 集电极电流 ( $I_D$ ) 的大小受控制极与发射极间的电压 ( $u_{GS}$ ) 的控制, 也属于电压控制型器件。

根据变频器的工作特点, IGBT 管旁边通常都并联一个反向连接的续流二极管, 并且也

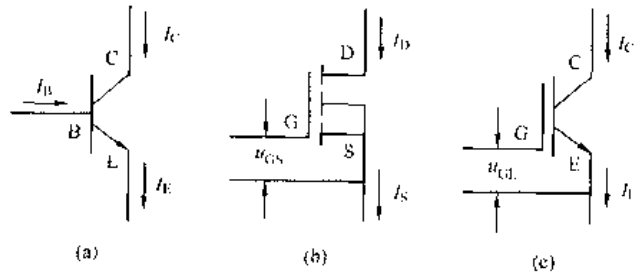


图 2-46 常用功率器件  
(a) BJT; (b) MOSFET; (c) IGBT

常做成双管模块和六管模块，如图 2-47 所示。

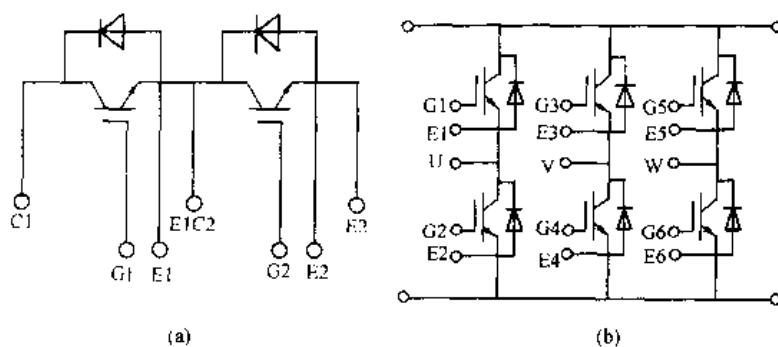


图 2-47 IGBT 模块

(a) 双管模块；(b) 六管模块

(2) 主要优点。IGBT 兼有 BJT 管和 MOSFET 管的优点：

一方面，击穿电压和集电极最大饱和电流也较大；迄今为止，IGBT 的击穿电压已能做到 1200V，集电极最大饱和电流已超过 1500A。由 IGBT 模块作为逆变器件的变频器容量已达 250kVA 以上。

另一方面，IGBT 的开关频率也可达 20kHz。使变频器的载波频率在 10kHz 以上，故电动机的电流波形比较平滑，基本无电磁噪声。

因此，目前绝大部分中、小容量变频器的逆变模块，都采用 IGBT 管。

(3) IGBT 的驱动电路。IGBT 的驱动电路已经集成化，其内部结构大同小异。这里介绍其中的一种——EXB850 集成驱动电路如图 2-48 所示。

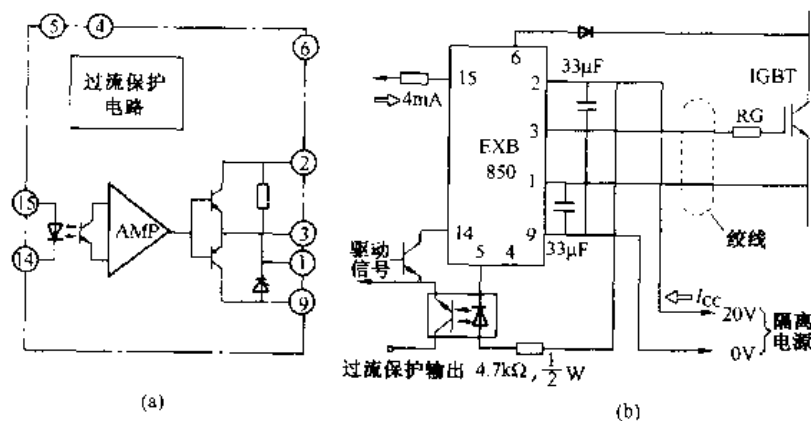


图 2-48 EXB850 集成驱动电路

(a) 内部功能框图；(b) 外部接线

图 2-48 (a) 为 EXB850 集成驱动电路的内部结构框图。图中，1 号脚和 9 号脚之间的稳压管用于在 IGBT 截止时，在 IGBT 的发射极 (E 极，接 1 号脚) 与栅极 (G 极，接 3 号脚) 之间加入反向偏置电压，以保证 IGBT 的可靠截止。

图 2-48 (b) 为 EXB850 集成驱动电路与 IGBT 之间的接线。由图可以看出，IGBT 的过流保护信号是从集电极上取出的。这是因为，IGBT 在饱和状态下的集电极—发射极电压 ( $U_{CE}$ ) 与集电极电流  $I_C$  的大小是密切相关的，如图 2-49 所示。

## 二、智能模块 (IPM)

### 1. 基本结构

所谓智能模块,是把与逆变管配套的驱动电路、检测与保护电路以及某些接口电路等和功率模块都集成到一起的功率集成模块。其内部电路如图 2-50 所示。图中,UP、VP、WP 是与直流电路正端相接的各管的控制输入端, UFO、VFO、WFO 是这些逆变管的保护输出端; UN、VN、WN 则是与负端相接的各管的控制输入端, FO 是它们共用的保护输出端。

如图 2-50 所示,该电路除了包含完整的逆变电路外,还把制动单元及其驱动电路也包括进去了。

### 2. IPM 的主要优点

(1) 由于驱动电路是内含的,不必另行选择,故可设计成与 IGBT 管配合得最好的电路。并且,由于驱动电路与 IGBT 管之间的距离很短,更提高了其工作的可靠性。

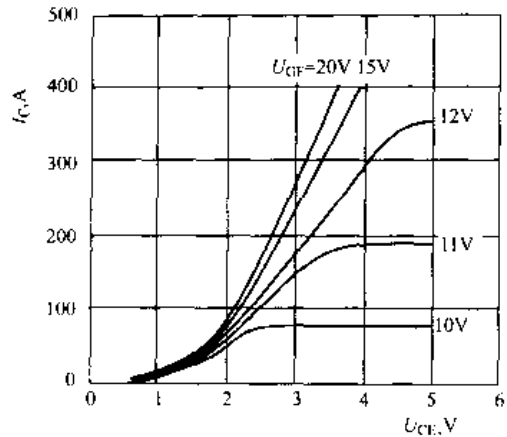


图 2-49  $U_{cr}$  和  $I_c$  的关系

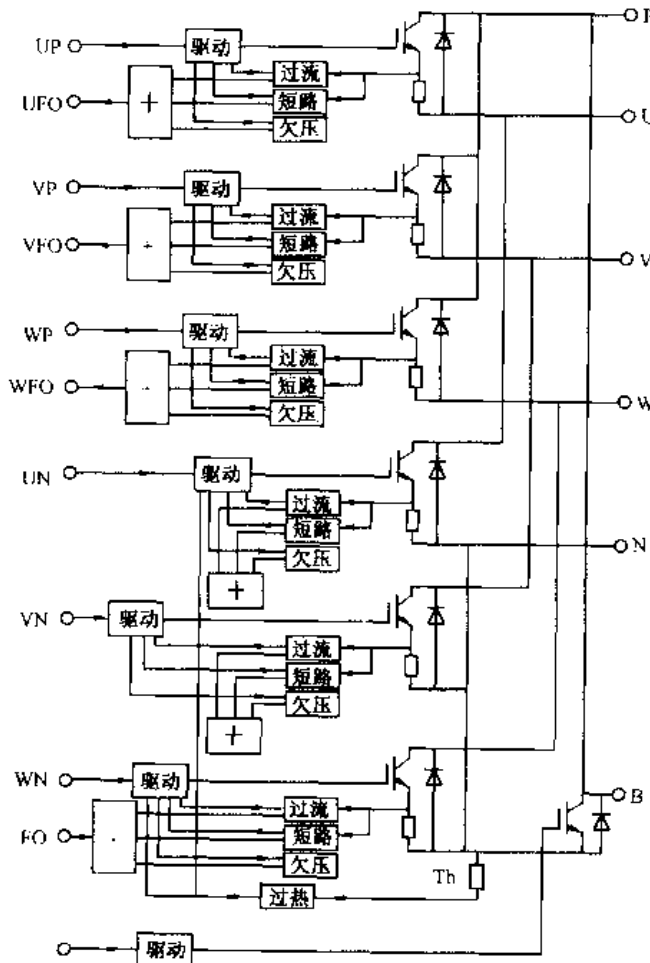


图 2-50 IPM 的内部电路

(2) 内含过流保护、短路保护、欠电压保护等电路,由于其检测都在内部进行,既十分方便,也极大地提高了检测的灵敏度和准确性,还减小了检测部分的功耗。

(3) 内含过热保护。用于保护 IGBT 和续流二极管的过热。一旦结温过高,将立即报警,大大提高了保护的灵敏度。

(4) 散热效果好。这是由于采用了陶瓷绝缘结构,模块可以直接安装在散热板上。

(5) 进一步缩小了体积,节省了使用者设计电路的时间。

### 3. 选用时的注意事项

由于内部具有过电流保护功能,因此,在选用时,除了考虑其最大饱和电流外,还应注意其过电流保护的動作电流。应根据负载的具体工况适当选择,做到既可靠保护,又不会误动作。

## 变频器的功能综述

## 第一节 频率的给定功能

## 一、给定方式的种类与选择

要调节变频器的输出频率，必须首先向变频器提供改变频率的信号，这个信号，称为给定信号。所谓给定方式，是调节变频器输出频率的具体方法，也就是提供给定信号的方式。

## (一) 模拟量给定方式

当给定信号为模拟量时，称为模拟量给定方式。模拟量给定时的频率精度略低，通常为最高频率的 $\pm 0.2\%$ 以内。给定信号有以下几种：

## 1. 电压信号

以电压大小作为给定信号。给定信号的范围有：

- (1) 单方向给定信号，包括 $0 \sim +10V$ 、 $0 \sim +5V$ 、 $+1 \sim +5V$ 。
- (2) 双方向给定信号，包括 $0 \sim \pm 10V$ 、 $0 \sim \pm 5V$ 等。

## 2. 电流信号

以电流大小作为给定信号。给定信号的范围有： $0 \sim 20mA$ 、 $4 \sim 20mA$ 。

由于电流信号所传输的信号不受线路电压降、接触电阻及其压降、杂散的热电效应以及感应噪声等的影响，因此，抗干扰能力较强。

## 3. 零信号与无信号的区分

在远距离控制中，给定信号的范围常用“ $1 \sim 5V$ ”或“ $4 \sim 20mA$ ”，其“零”信号分别为 $1V$ 和 $4mA$ 。这是为了便于检

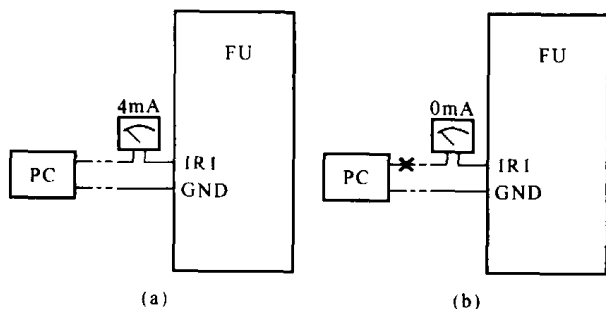


图 3-1 零信号和无信号

(a) 零信号；(b) 无信号

查工作是否正常，具体说明如下：

(1) 零信号。即给定信号为“0”。在进行测量时，因为电路内还有 $1V$ 或 $4mA$ ，说明给定信号电路的工作是正常的，如图 3-1 (a) 所示。

(2) 无信号。给定信号因传感器或信号电路发生故障而根本没有信号，在进行测量时，如果给定信号值为 $0V$ 或 $0mA$ ，说明给定电路的工作不正常，如图 3-1 (b) 所示。

## 4. 常见的具体给定方式

(1) 电位器给定。给定信号为电压信号，信号电源通常由变频器内部的直流电源（ $10V$ 或 $5V$ ）提供，频率给定信号由电位器的滑动触点上得到，如图 3-2 所示。图中：端子“ $10V$ ”为变频器提供的 $+10V$ 电源；端子“ $GND$ ”是输入信号的公共端（通常为公共负端）；端子“ $VR1$ ”为电压信号输入端。

(2) 直接电压（或电流）给定。由外部仪器设备直接向变频器的给定端输出电压或电流

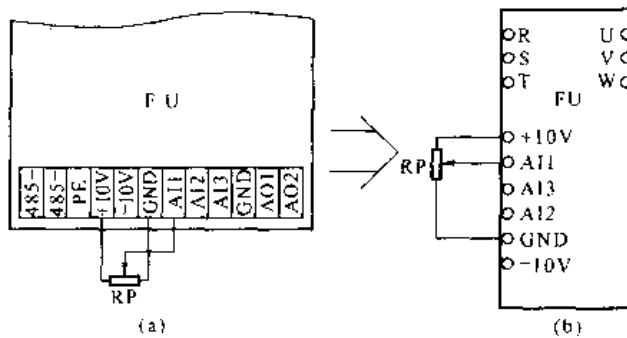


图 3-2 电位器给定  
(a) 实际接线; (b) 符号

信号，图 3-3 所示是一个由温控器获得电流给定信号，直接控制风机的例子。传感器（热敏电阻）取出温度信号，由温控器转换成电流信号，输出至变频器的 IR1 端。温度高时，电流信号大，变频器的输出频率也大，从而加快风机的转速。反之，温度低时，电流信号和变频器的输出频率都小，使风机的转速减慢。

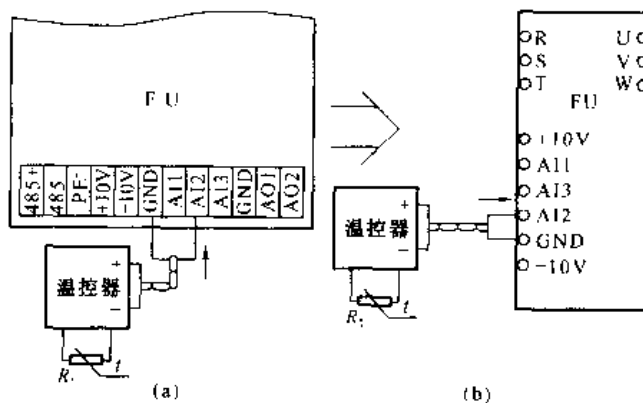


图 3-3 直接电流给定  
(a) 实际接线; (b) 符号

(3) 辅助给定。在变频器的给定信号输入端中，还常常配置有辅助给定信号输入端（简称辅助给定）。辅助给定信号通常与主给定信号迭加（相加或相减），起调整变频器输出频率的辅助作用。

### (二) 数字量给定方式

即给定信号为数字量，这种给定方式的频率精度很高，可达给定频率的 0.01% 以内。常见的给定方式有如下几种。

#### 1. 面板给定方式

即通过面板上的“升键”（ $\wedge$  键或  $\triangle$  键）和降键（ $\vee$  键或  $\nabla$  键）来控制频率的升、降，如图 3-4 所示。

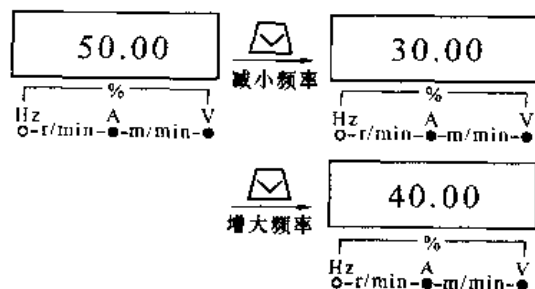


图 3-4 面板给定

## 2. 外接升、降速给定方式

(1) 外接升、降速功能。在变频器的外控端子中，有两个“升、降速 (UP/DOWN) 控制端”。即，由外部的开关信号通过该两个控制端子来进行升速和降速的控制，也就是进行频率给定。以森兰 SB61 系列变频器为例，说明如下：

经过必要的功能预置后，可使外部给定信号从 X4 和 X5 端子输入，如图 3-5 所示。

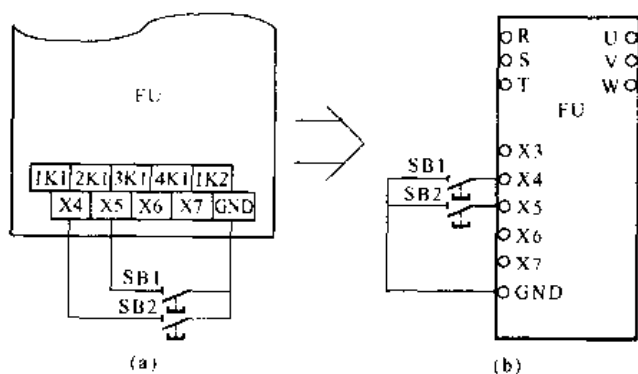


图 3-5 外接升、降速给定

(a) 实际接线；(b) 符号

对于 X4 和 X5 输入端子的功能，可通过 F503 和 F504 进行预置：F503 预置为“16”，则当按下 SB1 (X4 接通) 时，变频器将升速；F504 预置为“16”，则当按下 SB2 (X5 接通) 时，变频器将降速。

在对 F503 和 F504 进行预置的同时，还须对 F001 功能进行预置：F001 预置为“0”，则无上述功能；F001 预置为“1”，则当松开按钮开关后，将保持改变后的频率；F001 预置为“2”，则当松开按钮开关后，将不保持改变后的频率。

的频率。

(2) 应用举例。某厂锅炉的鼓风机和引风机在实现变频调速后，要求在炉前和控制室 (在楼上) 都能进行升、降速控制。

解决方法如下：

1) 功能预置。通过功能预置，使变频器的 X4 为升速信号输入端；X5 为降速信号输入端。

2) 控制盒。采用两个控制盒 CA 和 CB，如图 3-6 所示。每个控制盒内各安装两个按钮开关 (CA 盒内是 SB1 和 SB2，CB 盒内是 SB3 和 SB4) 和一个频率计 (CA 盒内是 FA，CB 盒内是 FB)。

CA 控制盒放在炉前，CB 控制盒则放在控制室内。

3) 接线特点。SB1 和 SB3 互相并联，SB2 和 SB4 互相并联，FA 和 FB 也互相并联。

4) 工作情况。在炉前按下 SB1，或在控制室按下 SB3，都能使 X4 得到升速信号，从而使变频器的输出频率上升，松开后频率保持；反之，在炉前按下 SB2，或在控制室按下“SB4”，都能使频率下降，松开后频率保持。从而在两个不同的地点，都可以进行升速或降速控制。

以此类推，还可实现多处控制。

## 3. 多挡转速控制

在变频器的外接输入控制端子中，通过功能预置，可以将若干个输入端 (通常为 2~4 个) 作为多挡转速控制端。根据这若干个输入端子的状态 (接通或断开) 可以按二进制方式组合成 3~16 挡。每一挡可预置一个对应的工作频率。则电动机转速的切换便可以用开关器件通过改变外接输入端子的状态及其组合来实现。

假设输入端子 X1、X2、X3 被预置为多挡转速的信号输入端，则通过继电器 KA1、KA2、KA3 的不同组合，可输入 7 挡或 8 挡转速信号 (0 状态不计时为 7 挡，计入时为 8 挡)，如图

3-7 所示。

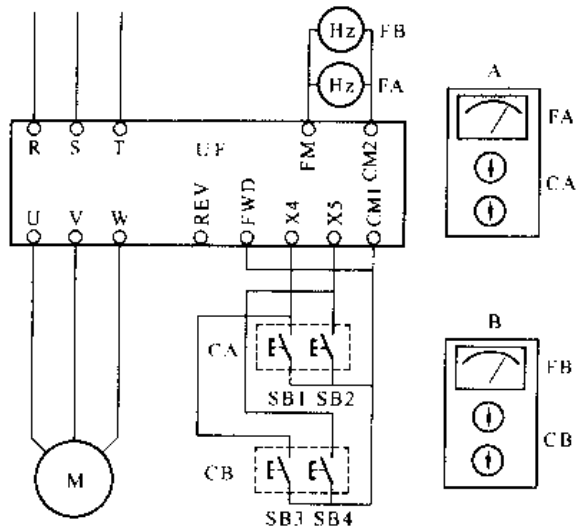


图 3-6 升、降速的两处控制

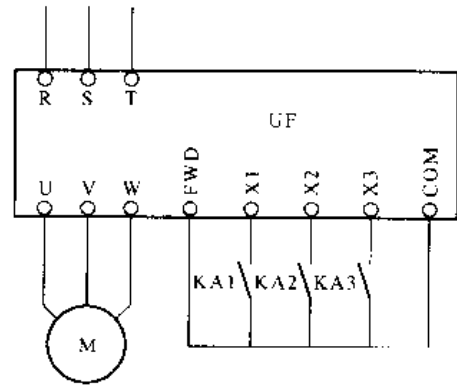


图 3-7 多挡转速控制

转速挡与各输入端状态之间的关系如表 3-1 所示。

表 3-1 转速挡与各输入端状态之间的关系

各输入端子状态			转速挡	各输入端子状态			转速挡
X3	X2	X1		X3	X2	X1	
OFF	OFF	OFF	0	ON	OFF	OFF	4
OFF	OFF	ON	1	ON	OFF	ON	5
OFF	ON	OFF	2	ON	ON	OFF	6
OFF	ON	ON	3	ON	ON	ON	7

在使用多挡转速功能时，必须进行两步预置：

第一步，通过预置，确定哪几个输入端子为多挡转速输入端子；

第二步，预置与各挡转速对应的工作频率（即进行频率给定）。

例如，在康沃 CVF-G1 系列变频器（中国）中：

第一步，将 H-15 功能预置为“1”、H-16 功能预置为“2”、H-17 功能预置为“3”，则输入控制端子 X1、X2、X3 即成为多挡转速控制端子。

第二步，通过 L-15 ~ L-21 功能分别预置各挡（7 挡）转速对应的频率。

#### 4. 外接脉冲给定

部分变频器通过功能预置，可以从指定的输入端子通过输入脉冲序列来进行频率给定，如图 3-8 所示。即，变频器的输出频率将和外部输入的脉冲给定频率成正比。

图 3-8 (a) 所示，是艾默生 TD3000 系列变频器（美资）中的脉冲给定安排。

首先，通过功能预置，使输入端子 X8 成为外接脉冲给定的输入端。

其次，预置最大脉冲给定频率。所谓最大脉冲给定频率，就是和变频器输出的最高频率 ( $f_{max}$ ) 相对应的脉冲给定频率。预置范围是 1 ~ 50kHz。

对于给定脉冲的幅值，规定为 18 ~ 24V。

在安川 G7 系列变频器（日本）中，则设置了外接脉冲给定的专用端子 RP，如图 3-8 (b) 所示。其最大脉冲给定频率的预置范围是 1 ~ 32kHz。

对脉冲序列的要求是：

低电平电压——0.0 ~ 0.8V；

高电平电压——3.5 ~ 13.5V；

脉冲的占空比——30% ~ 70%。

### 5. 通信给定

由上位微机或 PLC 通过接口进行给定，如图 3-9 所示。

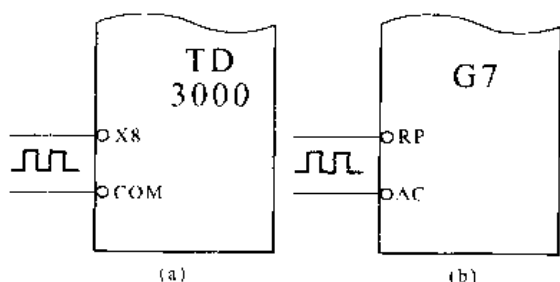


图 3-8 外部脉冲给定

(a) 艾默生输入端子；(b) 安川输入端子

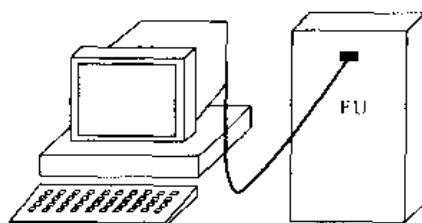


图 3-9 通信给定

如前所述，多数变频器所提供的是 RS485 接口，如上位机的通信口为 RS-232C 接口的话，必须加接一个 RS485 与 RS-232C 的转换器。

### 6. 预置给定

即通过功能预置的方式进行给定。例如，森兰 SB61 系列变频器中，可通过对功能码 F000 的预置来进行频率给定。

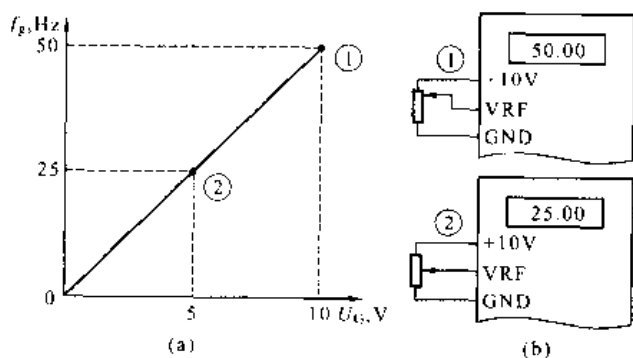


图 3-10 频率给定线的概念

(a) 频率给定线；(b) 对应的变频器状态

## 二、频率给定线

### (一) 频率给定线的概念

#### 1. 频率给定线的定义

由模拟量进行外接频率给定时，变频器的给定信号  $X$  与对应的给定频率  $f_X$  之间的关系曲线  $f_X = f(X)$ ，称为频率给定线。这里的给定信号  $X$ ，既可以是电压信号  $U_G$ ，也可以是电流信号  $I_G$ 。

#### 2. 基本频率给定线

在给定信号  $X$  从 0 增至最大值  $X_{max}$  的过程中，给定频率  $f_X$  线性地从 0 增大到最大频率  $f_{max}$  的频率给定线称为基本

频率给定线。其起点为  $(X = 0, f_X = 0)$ ，终点为  $(X = X_{max}, f_X = f_{max})$ ，如图 3-10 (a) 所示。

例如，给定信号为  $U_G = 0 \sim 10V$ ，要求对应的输出频率为  $f_X = 0 \sim 50Hz$ 。则： $U_G = 0V$  与  $f_X = 0Hz$  相对应； $U_G = 10V$  与  $f_X = 50Hz$  相对应（图 3-10 中的状态①）； $U_G = 5V$  与  $f_X = 25Hz$  相对应（图 3-10 中的状态②）。



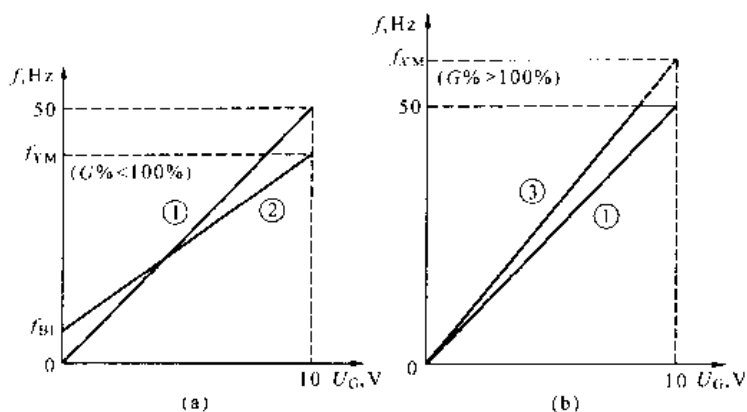


图 3-11 频率给定线的预置

(a)  $f_{BI} > 0\text{Hz}$ ,  $G\% < 100\%$ ; (b)  $f_{BI} = 0\text{Hz}$ ,  $G\% > 100\%$

### (二) 频率给定线的预置

频率给定线的起点（给定信号为“0”时对应的频率）和终点坐标（给定信号为最大值时对应的频率）是可以根据拖动系统的需要任意预置的。

#### 1. 基本方法

(1) 起点坐标 ( $X = 0$ ,  $f_X = f_{BI}$ )。这里,  $f_{BI}$  为与给定信号  $X = 0$  所对应的给定频率, 称为偏置频率, 如图 3-11 (a) 所示。

预置时, 可直接设定  $f_{BI}$  的频率值。

(2) 终点坐标: ( $X = X_{max}$ ,  $f_X = f_{XM}$ )。这里,  $f_{XM}$  为与给定信号  $X = X_{max}$  所对应的给定频率, 称为最大给定频率。

最大给定频率  $f_{XM}$  常常是通过预置“频率增益”  $G\%$  来设定的, 如图 3-11 (b) 所示。

$G\%$  的定义是: 最大给定频率  $f_{XM}$  与最大频率  $f_{max}$  之比的百分数, 即

$$G\% = (f_{XM}/f_{max}) \times 100\% \quad (3-1)$$

因此, 基本频率给定线也就是  $f_{BI} = 0\text{Hz}$ 、 $G\% = 100\%$  时的频率给定线, 如图 3-11 中的曲线①所示。当  $f_{BI} > 0\text{Hz}$ 、 $G\% < 100\%$  时的频率给定线如图 3-11 (a) 中的曲线②所示。

如  $G\% > 100\%$ , 则  $f_{XM} > f_{max}$ 。这时的  $f_{XM}$  为假想值, 其中,  $f_{XM} > f_{max}$  的部分, 变频器的实际输出频率等于  $f_{max}$ , 如图 3-11 (b) 中的曲线③所示。

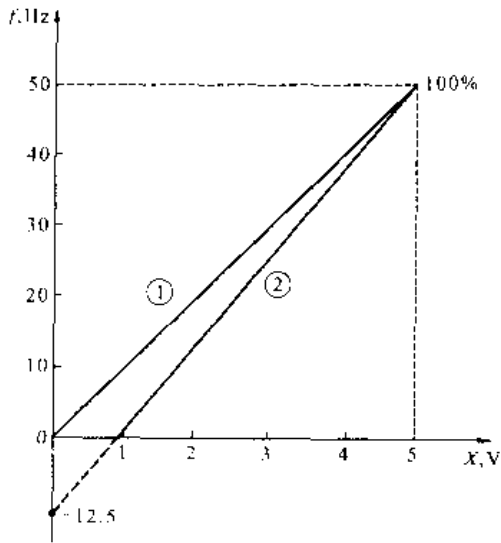


图 3-12 实例 1

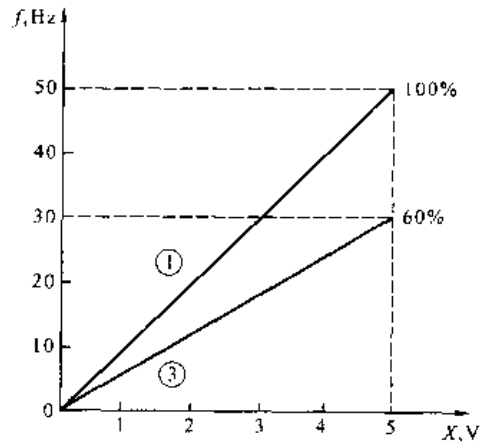


图 3-13 实例 2

由图可知，应该预置频率增益  $G\%$ 。因为所要求的最大频率低于基本频率，故  $G\% < 1$ ，求出如下：

$$G\% = 60\%$$

实例 3：某仪器输出电压为  $0 \sim 5\text{V}$  时，变频器的实际频率范围为  $0 \sim 48\text{Hz}$ ，如何修正为  $0 \sim 50\text{Hz}$ 。

这种情况之所以发生，是由于测量误差的原因，使仪器输出电压的  $5\text{V}$ ，与变频器内部的  $5\text{V}$  不相吻合。

变频器的基本频率给定线如图 3-14 中的曲线 ① 所示；根据上述情况作出的频率给定线如图 3-14 中的曲线 ④ 所示。由图可知，仪器输出的  $5\text{V}$  比变频器的  $5\text{V}$  小，只相当于变频器的  $4.8\text{V}$ 。即：要求变频器在给定电压为  $4.8\text{V}$  时，输出频率为  $50\text{Hz}$ 。由此求出

$$G\% = 104.2\%$$

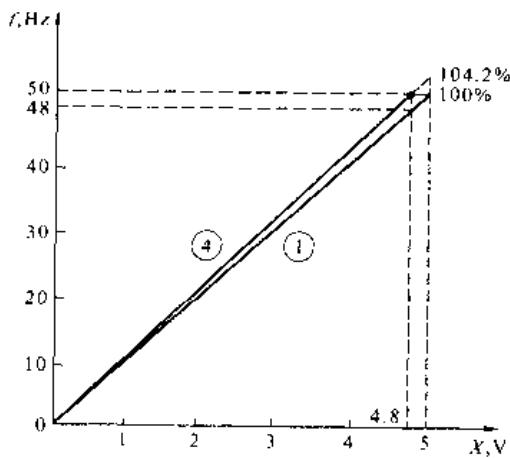


图 3-14 实例 3

## 第二节 变频器中频率的名称与功能

### 一、给定频率与输出频率

#### 1. 给定频率

与给定信号相对应的频率称为给定频率，上述的各频率给定线所对应的频率均指给定频率。

#### 2. 输出频率

输出频率即变频器实际输出的频率。

### 3. 输出频率不等于给定频率的原因

(1) 受到频率限制功能的制约。上述的最大给定频率超过最大频率 ( $f_{XM} > f_{max}$ ) 的情况便是一例。

(2) 受到各种补偿功能的影响。为了改善变频调速后异步电动机的特性, 变频器设置了一些补偿功能, 如转差补偿、矢量控制功能等。补偿功能直接或间接地对变频器的输出频率进行调整, 这些调整是在给定频率的基础上进行的, 从而使变频器实际输出的频率与给定频率常常不相等。

### 4. 频率的显示

变频器既能显示给定频率, 也能显示输出频率。但由于电动机的负荷常常是不断变化的, 其补偿量也随之变化。因此, 在显示输出频率时, 其频率值是不停地跳动的。所以, 如无特殊需要, 通常只需显示给定频率就可以了。

## 二、基本频率与最大频率

### (一) 基本频率

#### 1. 定义

与变频器的最大输出电压相对应的频率, 称为基本频率, 用  $f_B$  表示, 如图 3-15 (a) 所示。需要注意的是: 基本频率的大小与给定信号是无关的。

#### 2. 基本频率的预置

在绝大多数情况下, 基本频率总是和电动机的额定频率相等的。

### (二) 最大频率

#### 1. 定义

最大频率是与最大给定信号相对应的频率, 也是变频器允许输出的最高频率, 如图 3-15 (b) 所示。在任何情况下, 变频器的输出频率都不可能超过最大频率。

#### 2. 最大频率的预置

通常应根据负载的具体情况来进行预置, 在大多数情况下, 以电动机的额定频率作为最大频率。例如, 对于风机和泵类负载, 当工作频率超过额定频率时, 负载的阻转矩是按平方规律增加的, 将导致电动机的严重过载。所以, 最大频率不能超过电动机的额定频率。

预置了最大频率, 也就预置了基本频率给定线。

## 三、上限频率与下限频率

### (一) 定义

#### 1. 上限频率

与生产机械所要求的最高转速相对应的频率, 称为上限频率, 用  $f_H$  表示。

例如, 某搅拌机要求的最高转速是 600r/min, 相应的电动机转速是 1200r/min, 与此对应的运行频率便是上限频率  $f_H$ , 如图 3-16 所示。

上限频率与最高频率之间, 必有

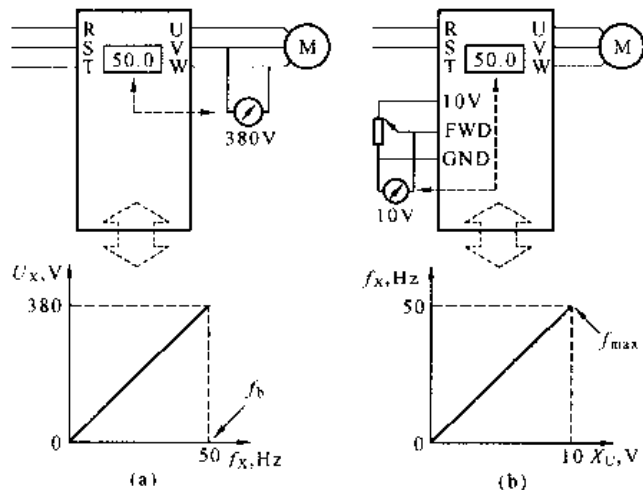


图 3-15 基本频率与最大频率

(a) 基本频率; (b) 最大频率

$$f_H \leq f_{max}$$

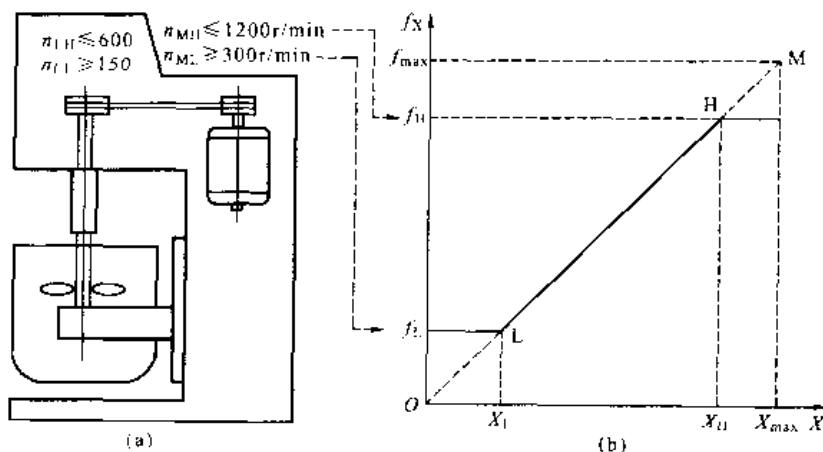


图 3-16 上、下限频率  
(a) 搅拌机实例; (b) 上限频率和下限频率

## 2. 下限频率

与生产机械所要求的最低转速相对应的频率，称为下限频率，用  $f_L$  表示。

例如，上述搅拌机要求的最低转速是 150r/min，相应的电动机转速是 300r/min，与此对应的运行频率便是下限频率  $f_L$ ，如图 3-16 所示。

### (二) 上限频率与最大频率、最大给定频率的关系

上限频率  $f_H$  是根据生产需要预置的最大运行频率，它并不和某个确定的给定信号  $X$  相对应。

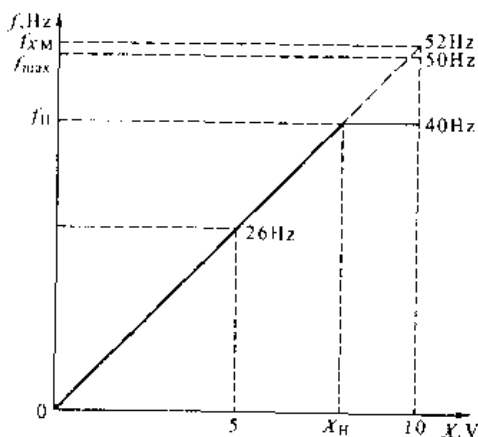


图 3-17  $f_{max}$ 、 $f_{XM}$  和  $f_H$

当  $f_H < f_{max}$  时，变频器能够输出的最大频率由  $f_H$  决定， $f_H$  并不与  $X_{max}$  对应；当  $f_H > f_{max}$  时，变频器能够输出的最大频率由  $f_{max}$  决定，上限频率不起作用。

如图 3-17 所示，假设给定信号为 0~10V 的电压信号，最大频率为  $f_{max} = 50\text{Hz}$ ，最大给定频率为  $f_{XM} = 52\text{Hz}$ ，上限频率为  $f_H = 40\text{Hz}$ 。则：

(1) 频率给定线的起点为 (0, 0)，终点为 (10, 52)。就是说，如果最大给定频率不等于最大频率 ( $f_{XM} \neq f_{max}$ )，则频率给定线的终点由最大给定频率  $f_{XM}$  决定，但实际的最大输出频率不能超过  $f_{max}$  (50Hz)。

(2) 变频器实际输出的最大频率为 40Hz。在这里，与上限频率 (40Hz) 对应的给定信号  $X_H$  为多大并不重要。

## 四、回避频率

### (一) 机械谐振及其消除

#### 1. 机械谐振

任何机械都有一个固有的振荡频率，它取决于机械的结构。其运动部分的固有振荡频率常常和运动部分与基座之间以及各运动部分之间的紧固情况有关。

而机械在运行过程中的实际振荡频率则与运动的速度有关。在对机械进行无级调速的过程中，机械的实际振荡频率也在不断地变化。

当机械的实际振荡频率和它的固有振荡频率相等时，机械将发生谐振。这时，机械的振动将十分剧烈，可能导致机械的损坏。

### 2. 消除机械谐振的途径

(1) 改变机械的固有振荡频率。如改善运动部分与基座之间以及各运动部分之间的紧固情况等。

(2) 避开可能导致谐振的速度。在变频调速的情况下，就是设置回避频率  $f_j$ ，使拖动系统“回避”掉可能引起谐振的转速，如图 3-18 所示。

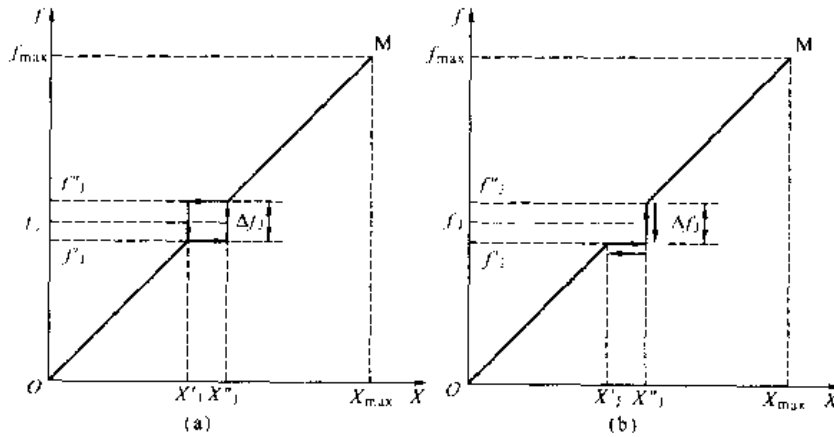


图 3-18 回避频率

(a) 升、降异值；(b) 升、降单值

图 3-18 (a) 所示，为升、降异值法，即在频率随给定信号的增大而上升的过程中，当频率升至  $f'_1$  (对应的给定信号为  $X'_1$ ) 时，频率将不再随  $X$  的增大而上升。直至给定信号增大至  $X'_2$  时，频率将跳跃为  $f'_2$ 。这以后，频率又将随给定信号的增大而上升。反之，在频率随给定信号的减小而下降的过程中，当频率降至  $f''_1$  (对应的给定信号为  $X''_1$ ) 时，频率将不再随  $X$  的减小而下降。直至给定信号减小至  $X'_1$  时，频率将跳跃为  $f'_1$ 。这以后，频率又将随给定信号的减小而下降。

图 3-18 (b) 所示，为升、降单值法，即上升与下降的轨迹是相同的。

### (二) 预置回避频率的具体方法

不同变频器的预置方法略有差异，大致有以下三种方法。

#### 1. 预置回避区的上、下限频率

如图 3-18 所示：

(1) 回避区的下限频率  $f'_1$ 。即在频率上升过程中，开始进入回避区的频率。

(2) 回避区的上限频率  $f''_1$ 。即在频率上升过程中，开始退出回避区的频率。

#### 2. 预置中心回避频率和回避宽度

如图 3-18 所示，预置内容如下：

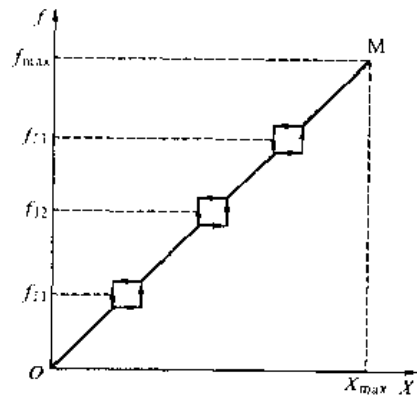


图 3-19 三个回避区

(1) 中心回避频率  $f_j$ ，即回避区的中心频率。

(2) 回避宽度  $\Delta f_j$ ，即回避区内上限频率  $f'_j$  与下限频率  $f''_j$  之差

$$\Delta f_j = f'_j - f''_j$$

3. 只预置中心回避频率

有的变频器只需预置中心回避频率即可。其回避宽度由变频器内定，通常为 1Hz 或 0.5Hz。大多数变频器都可以预置三个回避频率区，如图 3-19 所示。

### 第三节 变频器的基本控制功能

#### 一、基本操作及控制电路

##### 1. 键盘操作

即通过面板上的键盘来进行如启动、停止、正转、反转、点动、复位等操作。

如果变频器已经通过功能预置，选择了键盘操作方式的话，则变频器在接通电源后，就可以通过操作键盘来控制变频器的运行了，如图 3-20 所示。

##### 2. 外接输入正转控制

如果变频器通过功能预置，选择了“外接端子控制”方式的话，则其正转控制如图 3-21 所示。

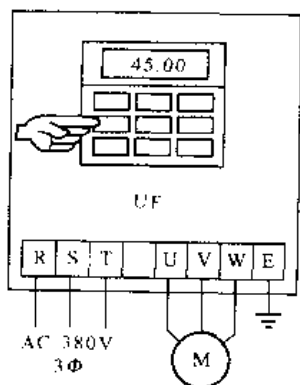


图 3-20 键盘操作

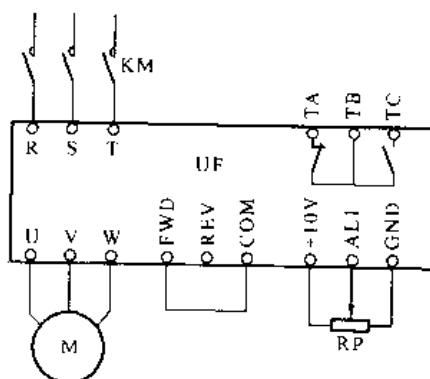


图 3-21 外接控制

首先应把正转输入控制端“FWD”和公共端“COM”相连接，这样，当变频器通过接触器 KM 接通电源后，变频器便处于运行状态。如果这时电位器 RP 并不处于“0”位的话，电动机将开始启动并升速。

但一般来说，用这种方式来使电动机启动或停止是不适宜的。因为：

(1) 容易出现误动作。变频器内，主电路的时间常数较短，故直流电压上升至稳定值也较快。而控制电源的时间常数较长，控制电路在电源未充电至正常电压之前，工作状态有可能出现紊乱。所以，不少变频器在说明书中明确规定：禁止用这种方法来启动电动机。

(2) 电动机不能准确停机。变频器在切断电源后，其逆变电路将立即“封锁”，输出电压为 0。因此，电动机将处于自由制动状态，而不能按预置的降速时间进行降速。

(3) 容易对电源形成干扰。变频器在刚接通电源的瞬间，有较大的充电电流。如果经常用这种方式来启动电动机，将使电网经常受到冲击而形成干扰。

正确的控制方法是：

(1) 接触器 KM 只起变频器接通电源的作用。

(2) 电动机的启动和停止通过继电器 KA 控制“FWD”和“COM”之间的通、断来控制。

(3) KM 和 KA 之间应该有互锁：一方面，只有在 KM 动作，使变频器接通电源后，KA 才能动作；另一方面，只有在 KA 断开，电动机减速并停止后，KM 才能断开，切断变频器的电源。

具体电路如图 3-22 所示。图中，按钮开关 SB1、SB2 用于控制接触器 KM，从而控制变频器的通电；按钮开关 SF 和 ST 用于控制继电器 KA，从而控制电动机的启动和停止。

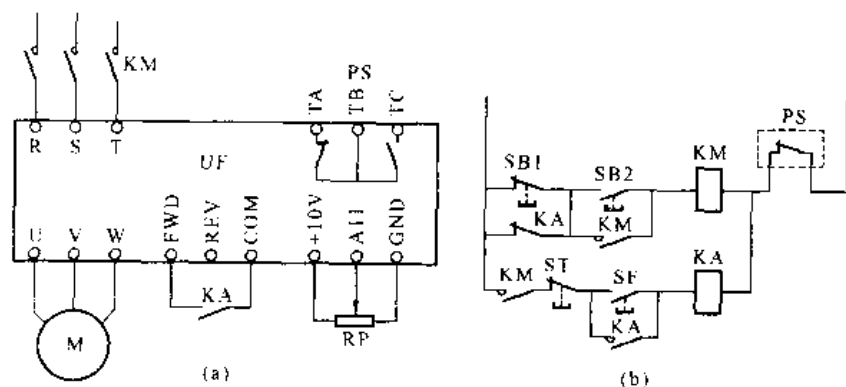


图 3-22 正确的外接正转控制

(a) 变频器电路；(b) 控制电路

### 3. 外部控制时“STOP”键的功能

在进行外部控制时，键盘上的“STOP”键（停止键）是否有效，要根据用户的具体情况来决定。主要有以下几种情形：

(1) “STOP”键有效，有利于在紧急情况下的“紧急停机”。

(2) 有的机械在运行过程中不允许随意停机，只能由现场操作人员进行停机控制。对于这种情况，应预置“STOP”键无效。

(3) 许多变频器的“STOP”键常常和“RESET”（复位）键合用，而变频器在键盘上进行“复位”操作是比较方便的。

## 二、电动机旋转方向的控制功能

### 1. 旋转方向的选择

在变频器中，通过外接端子可以改变电动机的旋转方向，如图 3-23 (a) 所示：继电器 KA1 接通时为正转，KA2 接通时为反转。此外，通过功能预置，也可以改变电动机的旋转方向。

因此，当 KA1 闭合时，如果电动机的实际旋转方向反了，可以通过功能预置来更正旋转方向。

### 2. 死区控制

如果电动机直接通过外接端子来改变旋转方向，例如，由 KA1 闭合切换为 KA2 闭合时，如果负载的

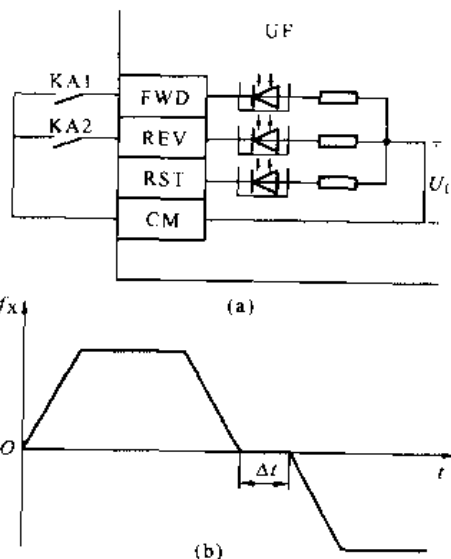


图 3-23 电动机的正反转及死区控制  
(a) 正反转控制；(b) 死区控制

惯性较大，则在切换瞬间，电动机还在正转，甚至还有较高的转速，而旋转磁场的转速已经反转，使电动机处于“反接制动”状态，产生较大的冲击电流。为了防止这种情况，可以在零速时设置一个死区  $\Delta t$ ，等负载实际降至零速时再开始反转，如图 3-23 (b) 所示。

### 3. 控制电路示例

如图 3-24 所示。按钮开关 SB1、SB2 用于控制接触器 KM，从而控制变频器接通或切断电源；按钮开关 SF 用于控制正转继电器 KA1，从而控制电动机的正转运行；按钮开关 SR 用于控制反转继电器 KA2，从而控制电动机的反转运行；按钮开关 ST 用于控制停机。

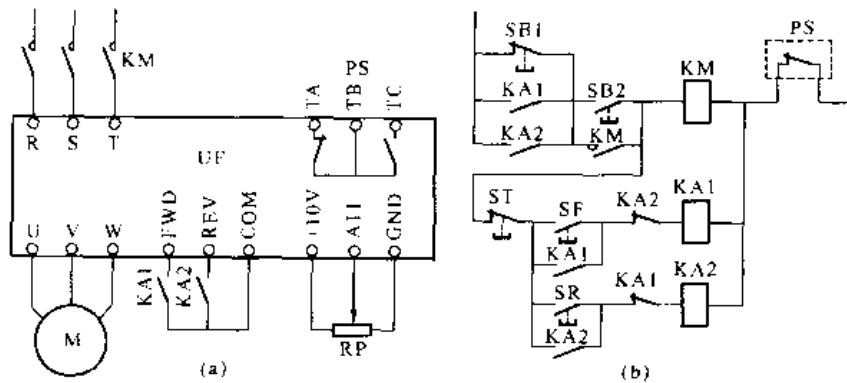


图 3-24 电动机正反转控制电路

(a) 变频器电路；(b) 控制电路

正转与反转运行只有在接触器 KM 已经动作、变频器已经通电的状态下才能进行。

与动断（常闭）按钮开关 SB1 并联的 KA1、KA2 触点用于防止电动机在运行状态下通过 KM 直接停机。

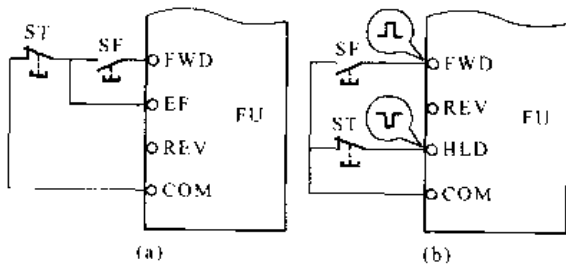


图 3-25 运行的自锁控制

(a) 自锁控制；(b) 脉冲控制

### 三、其他控制功能

#### 1. 运行的自锁功能

和接触器控制电路类似，如图 3-25 (a) 所示，当按下动合（常开）按钮 SF 时，电动机正转启动，由于 EF 端子的保持（自锁）作用，松开 SF 后，电动机的运行状态将继续下去；当按下动断按钮 ST 时，EF 和 COM 之间的联系被切断，自锁解除，电动机将停止。

图 3-25 (b) 所示是自锁功能的另一种

形式，其特点是可以接受脉冲信号进行控制。

由于自锁控制需要将控制线接到三个输入端子，故在变频器说明书中，常称为“三线控制”方式。

#### 2. 紧急停机功能

在明电 VT230S 系列变频器（日本）的输入端子中，配置了专用的紧急停机端子“EMS”。由功能码 C00-3 预置其工作方式，各数据码的含义如下：1——闭合时动作；2——断开时动作。

#### 3. 操作的切换功能



在安川 G7 系列变频器（日本）中，键盘操作和外接操作可以通过 **MENU** 键十分方便地进行切换。在功能码 b1-07 中，各数据码的含义如下：0——不能切换；1——可以切换。

## 第四节 升速与启动功能

### 一、变频调速系统的启动与升速过程

#### (一) 异步电动机启动时的基本特点

##### 1. 定、转子在启动瞬间的状态

(1) 转子状态。在启动的瞬间，转子仍保持静止状态。

(2) 定子状态。定子绕组在接通电源的瞬间，旋转磁场就建立了，其转速（即同步转速）取决于电流的频率。

##### 2. 启动电流

启动电流的大小取决于在启动瞬间，转子绕组与旋转磁场的相对速度，即转子绕组切割磁力线的速度。

#### (二) 工频启动和变频启动

##### 1. 工频启动

以 4 极电动机为例，在接通电源瞬间，同步转速高达  $1500\text{r/min}$ ，转子绕组与旋转磁场的相对速度很高，故转子电动势和电流很大，从而定子电流也很大，可达额定电流的 4~7 倍，如图 3-26 (a) 和 (c) 所示。从机械特性上看，则在整个启动过程中，动态转矩很大，所以，启动时间很短。

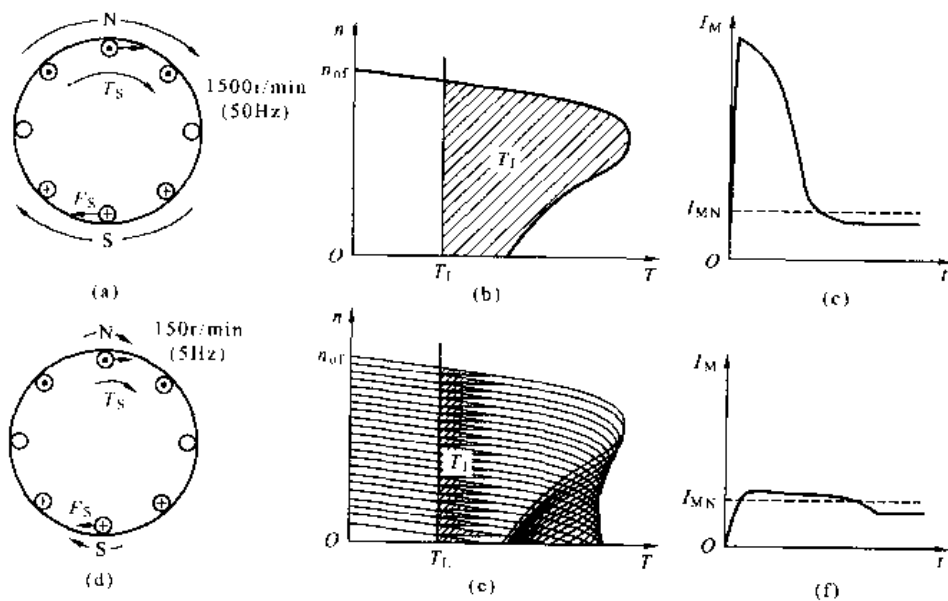


图 3-26 异步电动机的启动

(a) 工频启动转差；(b) 工频启动特性；(c) 工频启动电流；  
(d) 变频启动转差；(e) 变频启动特性；(f) 变频启动电流

直接启动存在的主要问题有：

(1) 启动电流大。当电动机的容量较大时，其启动电流将对电网产生干扰；

(2) 对生产机械的冲击很大, 影响机械的使用寿命。

## 2. 变频启动

采用变频调速后, 可通过降低启动时的频率来减小启动电流。仍以 4 极电动机为例, 假设在接通电源瞬间, 将启动频率降至 5Hz, 则同步转速只有 150r/min, 转子绕组与旋转磁场的相对速度只有工频启动时的十分之一, 如图 3-26 (d) 所示。同时, 可通过逐渐增大频率以减缓启动过程, 如在启动过程中, 使同步转速与转子转速间的转差限制在一定范围内, 则启动电流也将限制在一定范围内, 如图 3-26 (f) 所示; 另一方面, 也减小了启动过程中的动态转矩, 升速过程将能保持平稳, 减小对生产机械的冲击。

## 二、变频器的升速功能

### (一) 升速时间

#### 1. 升速时间对启动过程的影响

如图 3-27 (a) 所示, 升速时间  $t_{r1}$  长, 意味着频率上升较慢, 电动机在启动过程中的转差较小, 动态转矩较小, 如图 3-27 (c) 所示。其结果是减小了启动电流, 如图 3-27 (b) 所示。

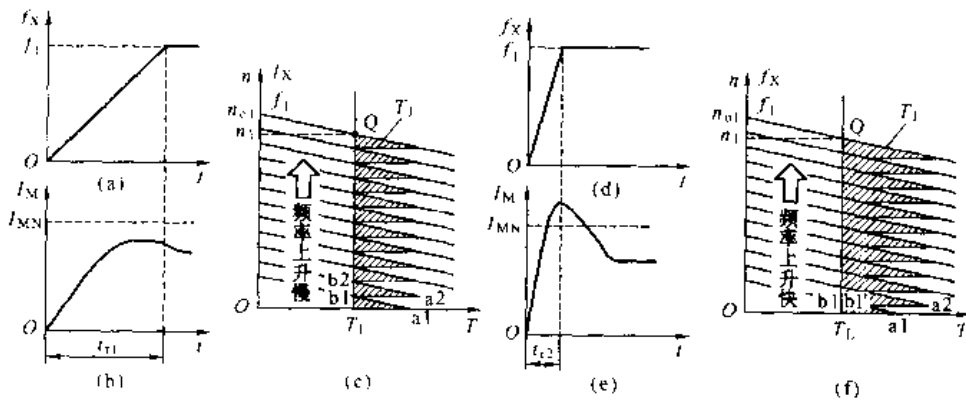


图 3-27 升速时间对启动电流的影响

(a) 升速时间较长; (b)、(e) 升速电流曲线; (c)、(f) 升速过程; (d) 升速时间较短

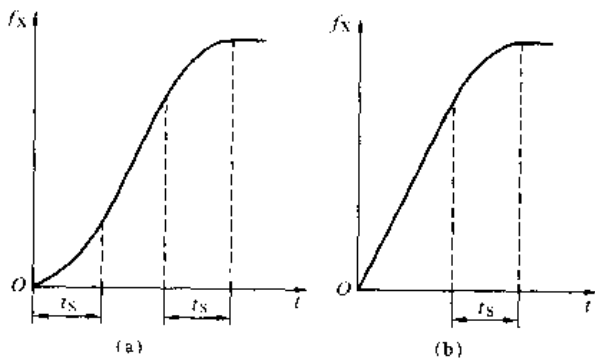


图 3-28 非线性升速方式

(a) S 形方式; (b) 半 S 形方式

反之, 升速时间  $t_{r2}$  短, 如图 3-27 (d) 所示, 意味着频率上升较快, 如拖动系统的惯性较大, 则电动机转子的转速将跟不上同步转速的上升, 结果使转差和动态转矩增大, 如图 3-27 (f) 所示, 导致升速电流超过允许值, 如图 3-27 (e) 所示。

#### 2. 预置升速时间的原则

在生产机械的工作过程中, 升速过程 (或启动过程) 属于从一种状态转换到另一种状态的过渡过程, 在这段时间内, 通常是不进行生产活动的。因此, 从提高生产力的角度出发, 升速时间越短越好。但

如前述, 升速时间越短, 频率上升越快, 越容易“过流”。所以, 预置升速时间的基本原则,

就是在不过流的前提下，越短越好。

通常，可先将升速时间预置得长一些，观察拖动系统在启动过程中电流的大小，如启动电流较小，可逐渐缩短升速时间，直至启动电流接近最大允许值时为止。

有些负载对启动和制动时间并无要求，如风机和水泵，其升、降速时间可适当地预置得长一些。

## (二) 升速方式

根据不同机械对启动过程的不同要求，变频器除了可以控制升、降速时间外，还可以通过对升速方式的预置，对不同时段的加速度进行控制。常见的升速方式有线性方式和非线性方式（包括 S 形方式和半 S 形方式）。

### 1. 线性方式

在升速过程中，频率与时间成线性关系，图 3-27 中的升速曲线即为线性方式，多数负载可预置为线性方式。

### 2. S 形方式

在开始阶段和结束阶段，升速的过程比较缓慢；而在中间阶段，则按线性方式升速。如图 3-28 (a) 所示。在电梯中，如果加速度变化过快，会使乘客感到不舒服，故以采用 S 形方式为宜。

### 3. 半 S 形方式

升速过程呈半 S 形，如图 3-28 (b) 所示。鼓风机在低速时负载转矩很小，升速过程可以快一些，但随着转速的增加，负载转矩增大较多，升速过程应减缓一些，采用半 S 形升速方式是比较适宜的。

### 4. 非线性升速方式的预置

非线性升速方式的预置方法主要有两种：

(1) 用户在一定范围内（如  $0 \sim 5s$ ）预置非线性区的时间（ $t_s$ ）长短，如图 3-28 所示。

(2) 用户只需预置采用 S 形或半 S 形方式即可，其非线性区的时间由变频器内定。

## (三) 与启动有关的其他功能

### 1. 启动频率

对于静摩擦系数较大的负载，为了易于起转，启动时须有一点冲击力。为此，用户可根据需要预置启动频率  $f_s$ ，使电动机在该频率下“直接启动”，如图 3-29 (b) 中的曲线①所示。

有些负载往往还需要在启动频率下运行一个短时间后再开始升速，如图 3-29 (b) 中的曲线②所示。为此，变频器还可以预置启动频率维持时间  $t_s$ ，如图 3-29 (b) 所示。

### 2. 启动前的直流制动功能

一般情况下，变频器总是从  $0Hz$  或较低频率下开始启动，如果在启动前，电动机的转速不为  $0$ ，则在启动瞬间，有可能引起过电流或过电压。例如：拖动系统在启动前是以自由制动方式停机的，如果在尚未停住前又重新启动，就会出现上述现象；风机在停机状态下，由于外界风力的原因，叶片常自行转动，且往往是反转的，因此，启动时，电动机将处于反接制动状态而产生过电流。

为此，变频器可以在启动前，向电动机的绕组中短时间地通入直流电流，以保证拖动系统在零速下启动，如图 3-30 所示。

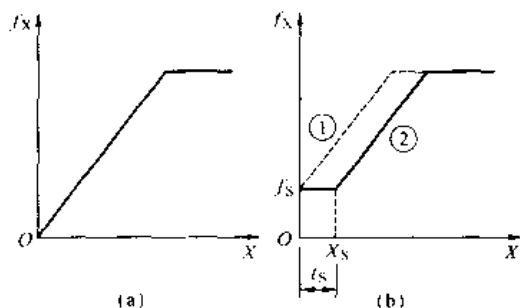


图 3-29 启动频率  
(a)  $f_s = 0$ ; (b)  $f_s > 0$

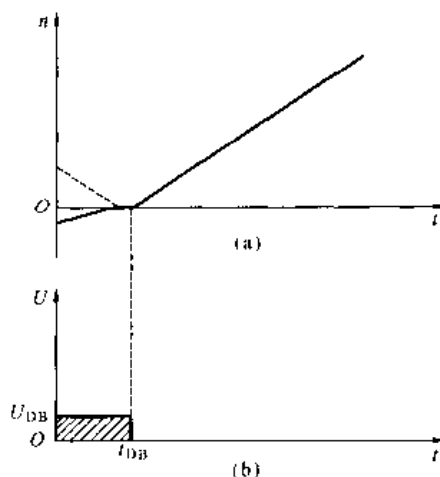


图 3-30 启动前直流制动  
(a) 转速; (b) 制动电压

### 3. 暂停升速功能

有的负载，或者因惯性较大，或者因润滑油在低温时凝住的原因，在启动的初始阶段，拖动系统的转速上升过程常常跟不上频率的变化，导致因过电流而跳闸。

针对这种情况，可预置暂停升速功能，使拖动系统先在低速下运转一段时间，然后再继续升速，如图 3-31 所示。

### 4. 升速过流的自处理功能

对于惯性较大的负载，如果升速时间预置得过短，也会因拖动系统的转速上升跟不上频率的变化而引起过电流。但生产工艺又要求尽量缩短启动过程，不宜将升速时间预置得过长。为此，变频器设置了升速过流的自处理功能。如果升速电流超过某一设定值  $I_{set}$ （即启动电流的最大允许值），变频器的输出频率将不再增加，暂缓升速，待电流下降到设定值以下后再继续升速，如图 3-32 所示。

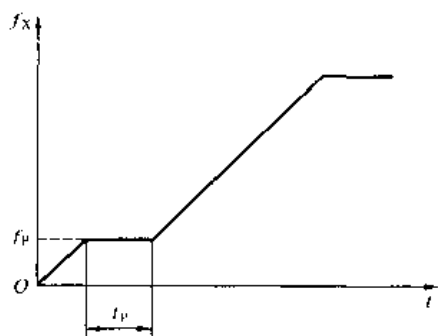


图 3-31 暂停升速

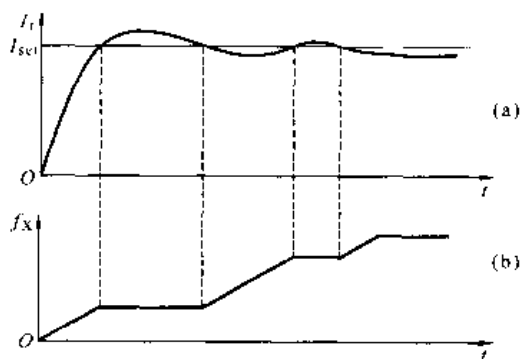


图 3-32 升速自处理

## 第五节 降速与制动功能

### 一、变频调速系统的降速过程

#### 1. 电动机的状态

在变频调速系统中，转速的下降是通过降低频率来实现的。仍以 4 极电动机为例，说

明如下：

(1) 正常运行状态。正常运行时，电动机的实际转速总是低于同步转速的，设为  $1440\text{r/min}$ 。这时，转子绕组以转差  $\Delta n$  反方向（与旋转磁场方向相反）切割旋转磁场，转子电流和转子绕组所受电磁力  $F_M$  的方向如图 3-33 (a) 所示。由图可知，由  $F_M$  构成的电磁转矩  $T_M$  的方向是与磁场的旋转方向相同的，从而带动转子旋转。

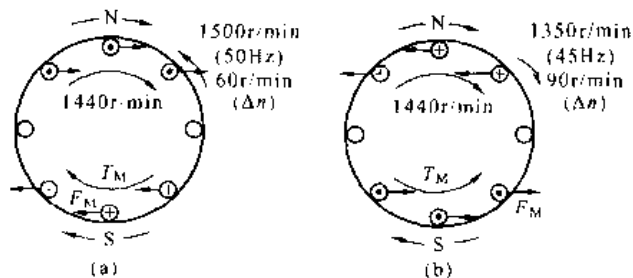


图 3-33 降速时的电动机状态

(a) 正常运行；(b) 频率下降

(2) 频率下降时的状态。在频率刚下降（设下降为  $45\text{Hz}$ ）的瞬间，由于惯性原因，转子的转速仍为  $1440\text{r/min}$ ，但旋转磁场的转速却已经下降了（例如，下降为  $1350\text{r/min}$ ）。从而，转子绕组切割旋转磁场的方向、转子电动势和电流等都与原来的相反，电动机变成了发电机，处于再生制动状态，如图 3-33 (b) 所示。

从能量平衡的观点来看，降速过程是拖动系统释放动能的过程，所释放的动能转换成了再生电能。

### 2. 降速过程的机械特性

假设降速前拖动系统的运行频率是  $f_1$ ，电动机的机械特性如图 3-34 中的曲线①所示；负载为恒转矩性质，阻转矩为  $T_L$ （为简便起见，假设  $T_L$  中已包括了损耗转矩）。这时，工作点为 Q 点，电动机的电磁转矩  $T_M$  与负载转矩  $T_L$  相平衡，即  $T_M = T_L$ 。

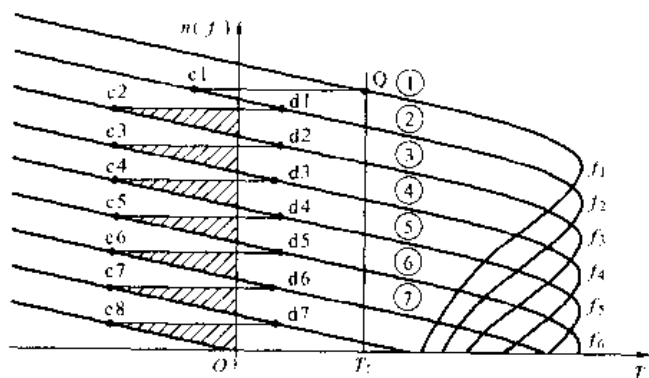


图 3-34 频率下降过程的机械特性

以此类推。

图 3-34 所示的过程是被大大地放大的了，实际每两挡频率之间的间隔要小得多。

从以上的降速过程可以看出，每次频率下降时，电动机只有部分时间处于再生制动状态，如图中的阴影部分所示。所以，反馈到直流电路的电压是脉冲式的，故称为“泵升电压”。

### 3. 变频调速系统的工作状态

电动机在再生制动状态时发出的电能经变频器逆变管旁边的二极管全波整流成直流，反馈到直流电路，产生泵升电压，使直流电压升高。当直流电压升高到一定限值时，将通过制动电阻 RB 和制动单元 VB 将电能释放掉，如图 3-35 所示。

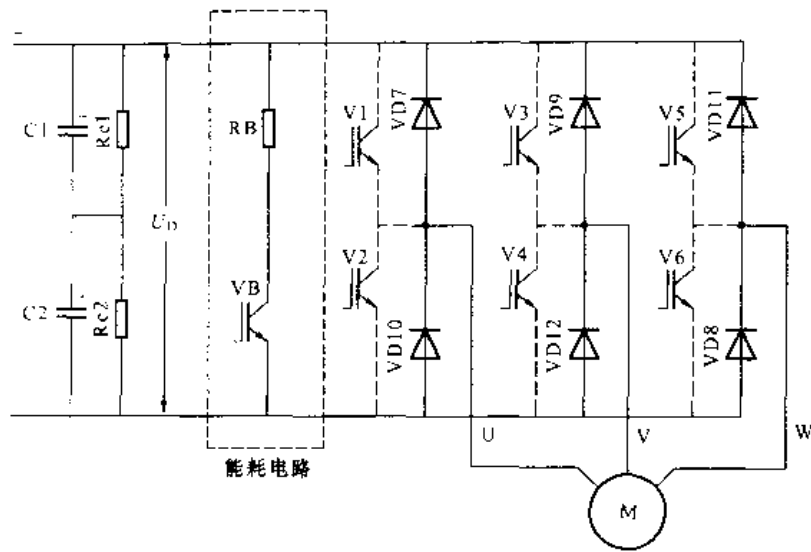


图 3-35 再生制动状态的能耗电路

从变频调速系统来看，在降速过程中，拖动系统的动能最终是被制动电阻消耗掉了。因此，就整个变频调速系统而言，其工作状态属于能耗制动状态。

## 二、降速时间与降速方式

### (一) 降速时间

#### 1. 降速时间对直流电压的影响

降速时间越短，则频率下降得越快，拖动系统的实际转速还没来得及下降多少，频率却又下降了，结果，频率变换时转折点（如图 3-34 中的  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、…所示）的位置也左移，使泵升电压增大。

在实际工作中，降速的快慢是一个和惯性大小 ( $GD^2$ ) 有关的相对概念。例如，降速时间预置为  $10s$ ，对于一个惯性较大的系统来说，可能是太快了；但在惯性较小的系统里，则显然是太慢了。以这样的认识为基础，则降速快慢对泵升电压（从而对直流电压）的影响如图 3-36 所示：如预置的降速时间较长，见图 (a)，则频率变换时转折点的位置右移，如图 (b) 所示。其结果是泵升电压较小，达不到直流电压的上限值，如图 (c) 所示。反之，如预置的降速时间较短，如图 (d) 那样。则频率变换时转折点的位置左移，如图 (e) 所示。其结果是泵生电压增大，超过了直流电压的上限值，如图 (f) 所示。

#### 2. 降速时间的预置

(1) 基本原则。降速过程和升速过程一样，也属于从一种状态转换到另一种状态的过渡过程，从提高生产力的角度出发，降速时间应越短越好。

实际工作中，也可以先预置得长一些，观察直流电压  $U_D$  升高的情况，在直流电压不超过允许范围的前提下，尽量缩短降速时间。

(2) 水泵降速时间的预置。水泵类负载由于有液体（水）的阻力，一旦切断电源，水泵将立即停住，故不存在惯性的问题。因此，在降速过程中，不会产生泵生电压，直流电压不会增大。但是，过快的降速和停机，会导致管路系统的“水锤效应”，必须尽量避免。所以，即使直流电压不增大，也应预置一定的降速时间。

(3) 风机降速时间的预置。风机的惯性较大，且风机在任何情况下，都属于长期连续负

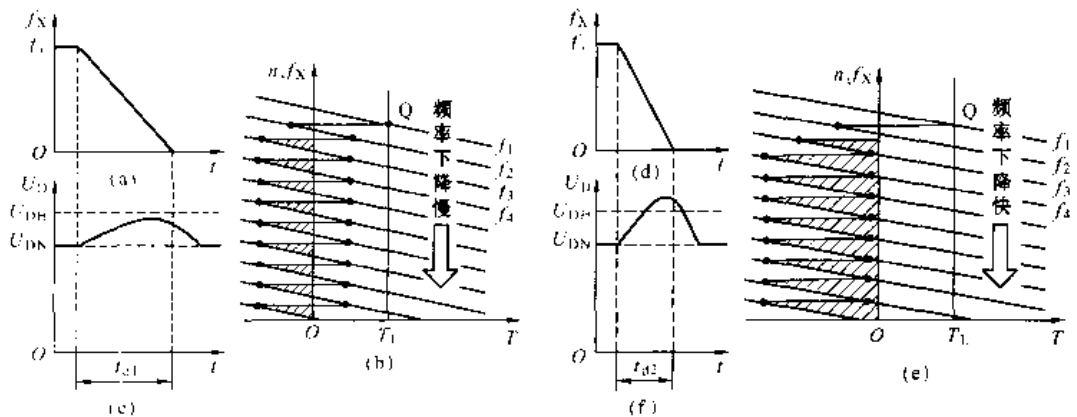


图 3-36 降速快慢与泵升电压

(a) 降速时间长；(b)、(e) 降速过程；(c) 泵升电压小；  
(d) 降速时间短；(f) 泵升电压大

载，因此，其降速时间应适当预置得长一些。

## (二) 降速方式

与升速方式一样，降速方式也有三种。

### 1. 线性方式

在降速过程中，频率与时间成线性关系，图 3-34 所示，即为线性方式，多数负载可预置为线性方式。

### 2. 非线性方式

(1) S 形方式。在开始阶段和结束阶段，降速的过程比较缓慢；而在中间阶段，则按线性方式降速。如图 3-37 (a) 所示。

(2) 半 S 形方式。降速过程呈半 S 形，如图 3-37 (b) 所示。

### 3. 非线性降速方式的预置

非线性降速方式的预置方法也有两种：

(1) 用户在一定范围内（如 0~5s）预置非线性区时间（ $t_s$ ）的长短，如图 3-37 所示。

(2) 用户只需预置采用 S 形或半 S 形方式即可，其非线性区的时间由变频器内定。

### 4. 降速过快的自处理功能

和升速过程相仿，对于惯性较大的负载，如果降速时间预置得过短，会因拖动系统的动能释放得太快而引起直流回路的过电压。但某些负载又要求尽量缩短降速过程，不宜将降速时间预置得较长。为此，变频器设置了降速过电压的自处理功能。如果在降速过程中，直流电压超过了某一设定值  $U_{Dset}$ ，变频器的输出频率将不再下降，暂缓降速，待直流电压下降到设定值以下后再继续降速，如图 3-38 所示。

## 三、电动机的制动

### (一) 常规制动方式

#### 1. 斜坡制动

变频器按照预置的降速时间和方式逐渐降低输出频率，使电动机的转速随着下降，直至停住。

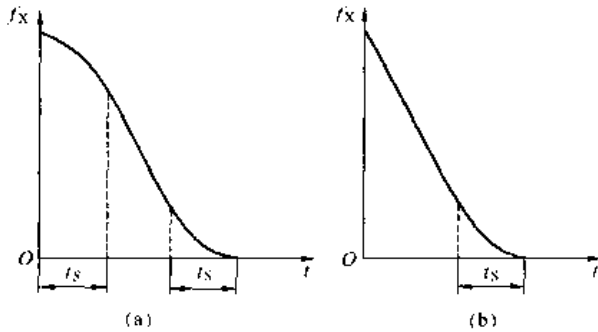


图 3-37 降速方式的预置  
(a) S 形方式; (b) 半 S 形方式

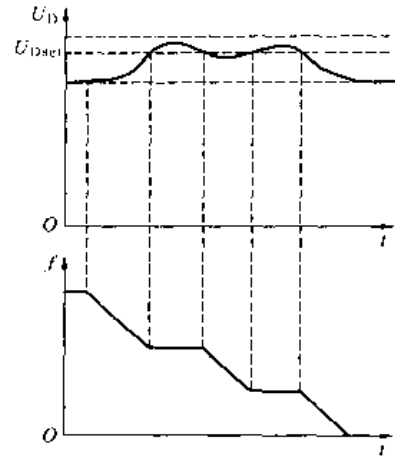


图 3-38 降速自处理功能

## 2. 自由制动

变频器关闭输出信号, 使输出电压为 0, 实际上就是切断电动机的电源。在这种情况下, 电动机将自行停止, 停止的时间长短不受控制, 因拖动系统的惯性大小而异。

### (二) 直流制动

在大多数情况下, 可以采用再生制动方式来停住电动机。但对于某些要求快速制动, 而再生制动又容易引起过电压的场合, 则应以加入直流制动方式为宜。

此外, 有的负载虽然允许制动时间稍长一些, 但因为惯性较大而停不住, 停止后有“爬行”现象。这对于某些机械来说, 是不允许的。例如龙门刨床的刨台, “爬行”的结果将有可能使刨台滑出台面, 造成十分危险的后果。因此, 也有必要加入直流制动。

#### 1. 直流制动的原理

直流制动 (也叫能耗制动) 的原理和机械特性已如第一章第七节图 1-37 所述, 就是向定子绕组内通入直流电流, 使电动机产生很强烈的制动转矩, 使拖动系统快速停住。此外, 停止后, 定子的直流磁场对转子铁芯还有一定的“吸住”作用, 以克服机械的“爬行”。

#### 2. 直流制动的预置

采用直流制动时, 需预置以下功能:

(1) 直流制动的起始频率  $f_{DB}$ 。在大多数情况下, 直流制动都是和再生制动配合使用的。即: 首先用再生制动方式将电动机的转速降至较低转速, 其对应的频率即作为直流制动的起始频率  $f_{DB}$ , 然后再加入直流制动, 使电动机迅速停住, 如图 3-39 所示。图 (a) 和图 (b) 是起始频率较低时, 机械特性的切换过程; 图 (c) 和图 (d) 是起始频率较高时, 机械特性的切换过程。

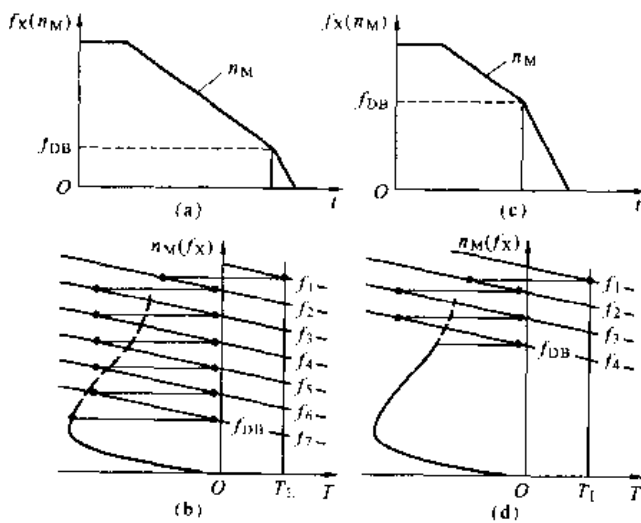


图 3-39 直流制动的起始频率  
(a) 起始频率较低; (b)、(d) 制动过程;  
(c) 起始频率较高



预置起始频率  $f_{DB}$  的主要依据是负载对制动时间的要求，要求制动时间越短，则起始频率  $f_{DB}$  应越高。

(2) 直流制动电压  $U_{DB}$ 。即在定子绕组上施加直流电压的大小，它决定了直流制动的强度。如图 3-40 所示，当制动电压较低（为  $U_{DB1}$ ）时，制动转矩的临界值（ $T'_{K1}$ ）较小，如图（b）所示；反之，当制动电压较高（为  $U_{DB2}$ ）时，制动转矩的临界值（ $T'_{K2}$ ）较大，如图（d）所示。

预置直流制动电压  $U_{DB}$  的主要依据是负载惯性的 大小，惯性越大， $U_{DB}$  也应越大。

(3) 直流制动时间  $t_{DB}$ 。即施加直流制动的 时间长短。

预置直流制动时间  $t_{DB}$  的主要依据是负载是否有“爬行”现象，以及对克服“爬行”的要求，要求高者， $t_{DB}$  应适当长一些。

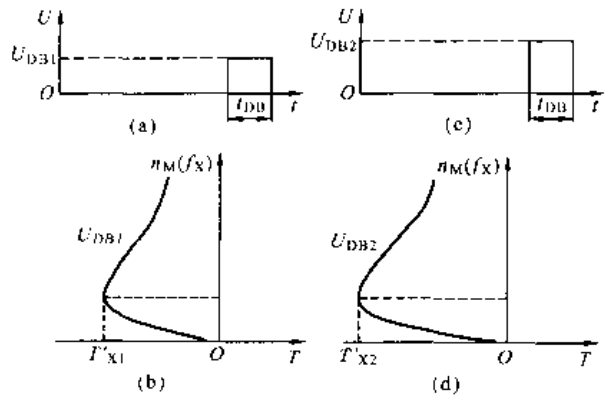


图 3-40 直流制动电压

(a)  $U_{DB}$  较低；(b)  $U_{DB}$  较低时的机械特性；  
(c)  $U_{DB}$  较高；(d)  $U_{DB}$  较高时的机械特性

## 第六节 变频器的控制方式

### 一、V/F 控制方式

#### (一) 概述

##### 1. V/F 控制方式的含义

所谓 V/F 控制方式，就是通过调节电压与频率的比值（ $U/f$ ）来调整变频后电动机特性的控制方式。通常称为转矩补偿，或转矩提升功能。

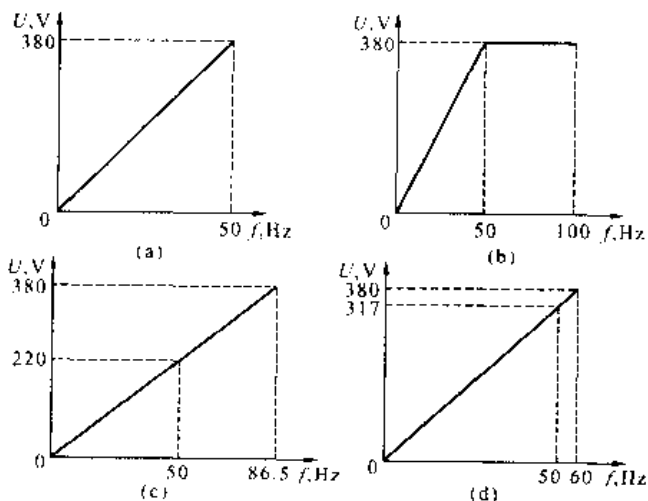


图 3-41 基本  $U/f$  线的几种类型

(a) 380V/50Hz；(b) 380V/50 ~ 100Hz；  
(c) 220V/50Hz；(d) 380V/60Hz

##### 2. 基本 $U/f$ 线

在变频器的输出频率从 0Hz 上升到基本频率的过程中，输出电压从 0V 成正比地上升到最大输出电压的  $U/f$  线，称为基本  $U/f$  线，比较典型的几种如图 3-41 所示。

图 3-41 (a) 所示，是我国工矿企业中用得最多的情形：当变频器的输出频率从 0Hz 上升到 50Hz 时，输出电压从 0V 成正比地上升到 380V。

图 3-41 (b) 所示，基本规律和图 3-41 (a) 相同，但变频器的最大输出频率可以上升到 100Hz。

图 3-41 (c) 所示，是当变频器的输出频率上升到 50Hz 时，输出电压只上升到 220V，如果频率继续上升至

86.5Hz时, 电压可达380V。

图3-41(d)所示, 是基本频率为60Hz、最大输出电压为380V时的基本 $U/f$ 线, 在这种情况下, 当频率为50Hz时, 输出电压只有317V。

基本 $U/f$ 线的特征是

$$k_U = k_f \quad (3-2)$$

$$k_U = U_X / U_N \quad (3-3)$$

$$k_f = f_X / f_N \quad (3-4)$$

式中  $k_U$ ——电压调节比;

$k_f$ ——频率调节比;

$f_X$ ——变频器的输出频率, Hz;

$U_X$ ——当变频器的输出频率为 $f_X$ 时的输出电压, V;

$f_N$ 、 $U_N$ ——电动机的额定频率与额定电压。

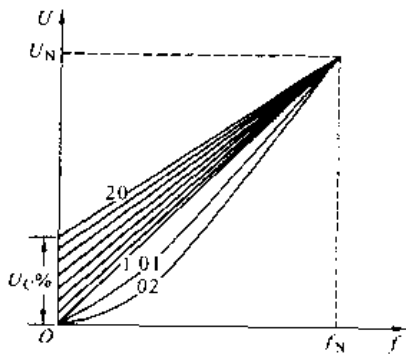


图3-42 直线型 $U/f$ 线

## (二) $U/f$ 线的类型及预置

### 1. 直线型

变频器在“恒转矩区”供用户选择的 $U/f$ 线是许多条直线, 如图3-42所示。对于二次方律负载, 则专门提供了两条“低减 $U/f$ 线”, 如图中的01号曲线和02号曲线所示。

不同变频器对 $U/f$ 线的预置方法略有差异, 这里举两种比较典型的例子:

(1) 编号方式。变频器对所提供的 $U/f$ 线从小到大编了号。通常基本 $U/f$ 线为1号, 编号越大, 补偿量也越大, 用户可根据需要进行选择。

(2) 起点补偿量预置方式。用户可直接预置当 $f_X = 0$ 时的补偿量 $U_c\%$ , 其定义是

$$U_c\% = \frac{U_c}{U_N} \times 100\% \quad (3-5)$$

式中  $U_c$ ——起点补偿电压, V。

### 2. 折线型

经补偿后的 $U/f$ 线为折线, 如图3-43所示。预置方法有:

(1) 起点补偿量预置型。如图3-43(a)所示, 需要预置的内容有:

1) 起点补偿量 $U_c\%$ ;

2) 转折频率 $f_t$ , 即转折点所在位置的频率。

(2) 坐标预置型。用户可直接预置各转折点的坐标, 如图3-43(b)所示。

(3) 多段 $U/f$ 线型。有的变频器可以将 $U/f$ 线分成若干段, 各段转折点的坐标可由用户根据负载的特点任意预置。多段 $U/f$ 线也称为可编程 $U/f$ 线。

### 3. 转矩的自动补偿

变频器可以根据负载电流的大小自动地调整电压的补偿量, 常称为“自动转矩提升”功能。

变频器在进行自动转矩补偿时, 不同补偿程度的 $U/f$ 线是互相平行的, 如图3-44所示。

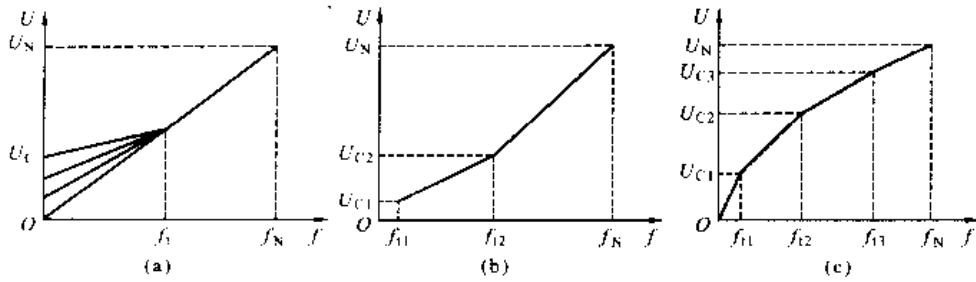


图 3-43 折线型  $U/f$  线  
(a) 预置补偿量; (b) 预置坐标; (c) 多段  $U/f$  线

采用自动转矩补偿功能的最大优点,是可以加大启动转矩。当启动电流为额定电流的 150% 时,启动转矩可达额定转矩的 200% 左右。但在预置自动转矩补偿功能时,须注意以下事项:

(1) 采用自动转矩补偿功能后,由于在变频器内部,需要不断地进行检测、比较、判断和执行等程序,故拖动系统的动态响应能力较差。因此,对于负载变化较剧烈的负载,不宜采用此功能。

(2) 当电动机的基本频率超过额定频率时,变频器的运算可能发生较大偏差,故不宜采用此功能。

(3) 当负载所要求的恒转矩运行范围较大时,拖动系统的运行可能不够稳定,不宜采用此功能。

#### 4. 手动转矩补偿的预置要点

(1) 开始时可将补偿量预置得小一些,如果带负载困难,则逐渐加大补偿量,直至能够带动负载为止。

(2) 如果补偿量预置得较大,则应观察拖动系统在负载最轻时的电流大小。如电流过大,说明磁路饱和严重,应适当降低补偿量。

(3) 在带负载困难的情况下,应考虑和加大传动比相结合的方法。

#### (三) 转差补偿功能

##### 1. 转差补偿的原理

异步电动机的自然机械特性如图 1-22 所示,其工作特点是:随着负载转矩  $T_L$  的增加,转差  $\Delta n$  也增大。在图 3-45 (a) 中,负载转矩为  $T_{L1}$  时,工作点为  $Q_1$ ,转差为  $\Delta n_1$ ;负载转矩为  $T_{L2}$  时,工作点为  $Q_2$ ,转差为  $\Delta n_2$ 。

尽管异步电动机在稳定运行段的转差并不大,其机械特性基本上属于硬特性,但不少机械往往要求有更硬的机械特性。

##### 2. 转差补偿

转差补偿的实质,是通过适当提高变频器的输出频率,使电动机因转差而降低了的转速得到补偿。

例如,当负载转矩为  $T_{L1}$  时,通过预置“转差补偿”,使电动机的同步转速从  $n_0$  上升至  $n'_0$ ,而拖动系统的工作点则从  $Q_1$  上升至  $Q'_1$ ;当负载转矩增加为  $T_{L2}$  时,通过进一步“补

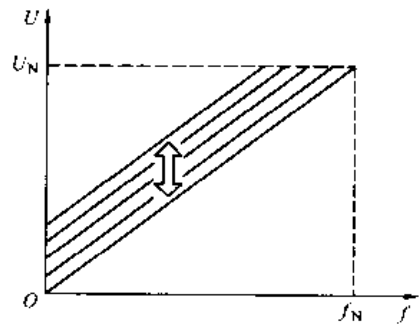


图 3-44 自动转矩补偿线

偿”变频器的输出频率，使电动机的同步转速从  $n_0$  上升至  $n''_0$ ，拖动系统的工作点从  $Q_2$  上升至  $Q'_2$ 。

由于上述转差补偿是在变频器内自动进行的，而用户的给定频率并未改变。因此，从拖动系统的转速给定的角度看，电动机的机械特性变“硬”了，如图 3-45 (b) 所示。

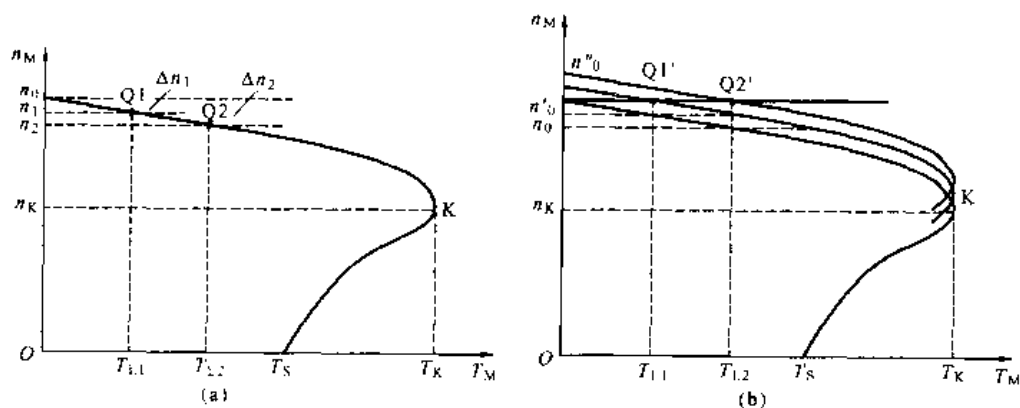


图 3-45 转差补偿原理  
(a) 未补偿；(b) 补偿后

### 3. 变频器的转差补偿功能

变频器中的转差补偿功能，都是在 V/F 控制模式下设置的，需要预置的功能大致有以下几个方面：

- (1) 选择转差补偿功能是否有效；
- (2) 预置补偿量；
- (3) 预置转差补偿的时间常数；
- (4) 其他功能。

#### (四) 变频器的节能功能

##### 1. 变频器的调压功能及其引出的问题

变频器中， $U/f$  可以任意预置，换一个角度看，则：变频器在某一个工作频率下，其输出电压是可以通过预置  $U/f$  而任意调节的。

于是提出了一个问题：在运行频率和负载转矩都不变的情况下，改变变频器的输出电压，电动机的电流大小将如何变化？

##### 2. 异步电动机的电流

(1) 如第一章第三节所述，电动机的电流  $I_M$  (指定子电流  $I_1$ ) 由励磁电流  $I_0$  和转矩电流  $I_2$  (转子电流的折算值) 两部分合成。

(2) 电动机输入电压的改变，将直接影响磁通  $\Phi$  的大小，从而也影响励磁电流  $I_0$  的大小。

(3) 电动机的电磁转矩  $T_M$ ，是由转子电流和磁通相互作用而产生的，其大小与转子电流和磁通的乘积成正比。而电磁转矩  $T_M$  只有在和负载的阻转矩  $T_L$  相平衡的情况下，才能在某一转速下稳定运行。因此，当负载转矩  $T_L$  不变时，电动机的电磁转矩  $T_M$  也是基本不变的。

##### 3. 电流大小和电压的关系

(1) 电压过小：一方面，磁通必然减小，但在磁路不饱和的情况下，励磁电流的变化不大。另一方面，为了产生足够大的电磁转矩  $T_M$ ，转矩电流  $I_2'$  必增大，如图 3-46 (a) 中的 A' 点所示。所以，电压越低，电流将越大。

(2) 电压过大：一方面，磁通必然增大，这将导致电动机磁路的饱和，使励磁电流的波形发生畸变，产生很大的尖峰电流。电压越大，励磁电流的尖峰电流也越大。另一方面，磁路饱和的结果是磁通变化不大，故转矩电流  $I_2'$  的变化也不大。所以，电压越大电流也越大。

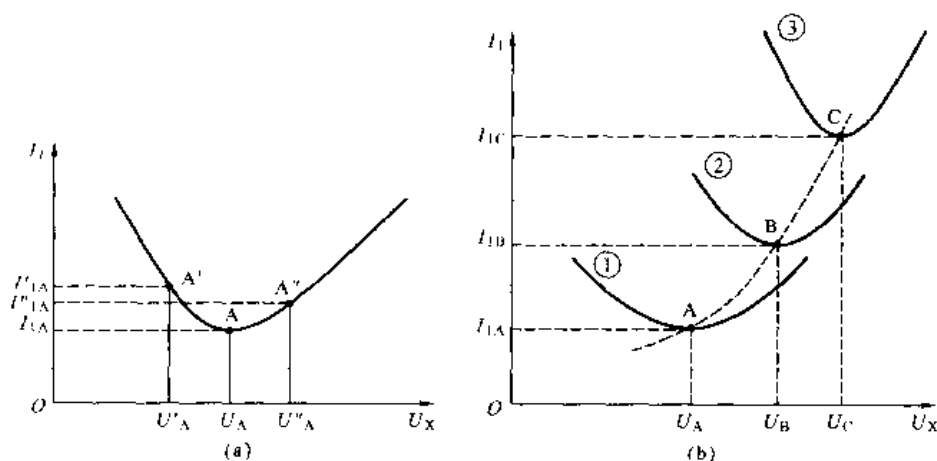


图 3-46 电动机的电流—电压曲线

(a) 一个工作点；(b) 三个工作点

因此，电动机存在着一个最佳工作点，如图 3-46 (a) 中之 A 点。负载改变，电动机的工作状态也改变，最佳工作点也随之改变，如图 3-46 (b) 所示。

#### 4. 节能功能的实质及应用

就是随时搜索电动机最佳工作点的功能，使电动机在任何情况下，其取用电流始终保持最小，从而达到节能的目的。

由于搜索最佳工作点需要时间，因此，当变频器在节能功能下运行时，其动态响应能力较差。所以，节能功能只能用于如风机、水泵一类运行状态的变化比较缓慢，对动态响应要求不高的场合。

### 二、矢量控制方式

#### (一) 采用矢量控制方式的基本要领

##### 1. 电动机参数的输入

在第二章第三节中，介绍了矢量控制的基本思想。要实现矢量控制功能，必须根据电动机自身的参数进行一系列的等效变换。因此，把电动机的参数预置给变频器，就是实现矢量控制的必要条件。需要输入的参数有：

(1) 电动机的额定数据，主要有额定容量、额定电压、额定电流、额定频率、额定转速、磁极数等。

(2) 定、转子绕组的参数，主要有定子每相绕组的电阻和漏磁电感、转子每相等效绕组的电阻和漏磁电感、定转子绕组间的互感、空载励磁电流等。

##### 2. 电动机参数的自测定

由于大多数用户难以准确掌握定、转子绕组的参数，给充分利用变频调速的优越特性带

来困难。因此，大多数新系列的变频器都配置了“自测定功能”，能够自动地测定电动机的有关参数。具体方法如下：

- (1) 使电动机脱离负载（实在不能脱离时，须参照说明书的有关规定）。
- (2) 输入电动机的额定参数。
- (3) 使变频器处于“键盘操作”方式。
- (4) 将自测定功能预置为“自动”方式。
- (5) 按下“RUN”键，电动机将按照预置的升速时间升速至一定转速（约为额定转速的一半），然后又按照预置的降速时间逐渐降速并停止，当显示屏上显示“自测定结束”时，自整定过程即告完成，约需 1.5min。

### 3. 矢量控制方式的适用范围

变频器内，通常以配用容量与变频器要求相吻合的 4 极电动机为基本模型进行计算。由于受到内部微机容量的限制，变频器对于灵活处理不同电动机参数的能力也就有限。主要限制有：

(1) 矢量控制只能用于一台变频器控制一台电动机的情况下。当一台变频器控制多台电动机时，矢量控制将无效。

(2) 电动机容量和变频器要求的配用容量之间，最多只能相差一档。例如，变频器要求的配用电动机容量为 7.5kW，则配用电机的最小容量为 5.5kW，对于 3.7kW 的电动机，就不适用了。

(3) 磁极数一般以 2、4、6 极为宜，极数较多时须查阅有关说明书（不同变频器对极数的限制也不一样）。

(4) 特殊电动机不能使用矢量控制功能。如力矩电动机、深槽电动机、双鼠笼电动机等。

(5) 当电动机与变频器之间的距离超过 30m 时，须查阅说明书对有关问题的规定。

### (二) 有反馈矢量控制

这里所说的反馈，专指转速反馈，而不涉及其他物理量的反馈（如压力反馈、温度反馈等）问题。

有反馈矢量控制的转速信号大多由编码器测得，编码器按安装方法分，有轴型和轴套型两种。轴套型可直接套在电动机轴上，是比较理想的一种方法，但普通电动机因受到轴长度的限制而难以采用。故有矢量控制型变频器专用电动机，其特点之一，便是输出轴能和轴套型编码器相配。今介绍如下：

#### 1. 编码器的信号与接线

变频器常用编码器为二相（A 相和 B 相）原点输出型，其输出信号分为两相：A 相和 B 相。两者在相位上互差  $90^\circ \pm 45^\circ$ ，如图 3-47（b）所示， $\bar{A}$  和  $\bar{B}$  分别是 A 相和 B 相的“非”。每旋转一转，编码器输出的脉冲数可根据情况选择。例如，TRD-J 系列编码器的脉冲数从 10 ~ 1000p/r 分 16 挡可选。

Z 相为原点标记，其特点是：每转一转，只输出 1 个相位固定的脉冲，作为原点的标志。

图 3-47（a）所示是编码器的引出线。

#### 2. 编码器与变频器的连接

编码器与变频器的连接主要有两种类型：一种是直接连接，例如艾默生 TD3000 系列变

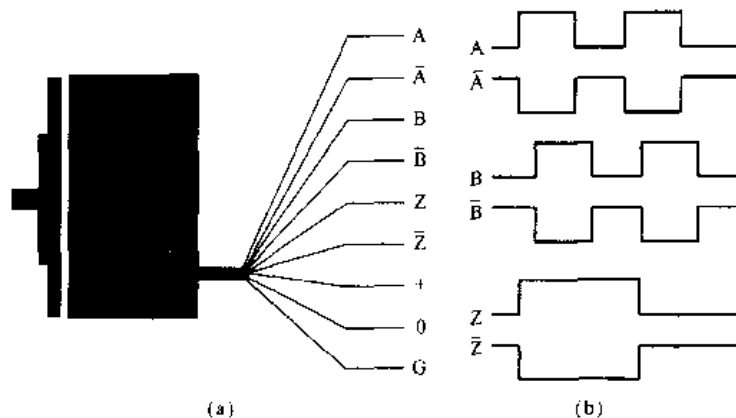


图 3-47 编码器的信号与接线

(a) 编码器的引出线; (b) 编码器的输出信号

频器和编码器之间的连接,如图 3-48 所示;另一种类型以安川 VS-616G5 系列变频器为例,须配置专用的 PG 速度控制卡。将控制卡插入变频器的相关插座中,再将 PG 的引出线接至控制卡上。

### 3. 有反馈矢量控制的功能预置

以艾默生 TD3000 系列变频器为例,需要预置的功能有:

- (1) F0.02: 选择“闭环矢量控制”方式。
- (2) Fb.00: 编码器每转的脉冲数。
- (3) Fb.01: 编码器的方向选择。
- (4) Fb.02: 编码器断线后的动作选择,对于矢量控制方式,只能选择自由制动。

### (三) 无反馈矢量控制

无反馈矢量控制,即不需要外接转速反馈,对于用户来说,方便了许多。但与有反馈矢量控制相比,存在如下一些差异。

#### 1. 机械特性

在改善电动机的机械特性方面,无反馈矢量控制已能得到接近于有反馈矢量控制的效果,即可以得到较“硬”的机械特性。但因为缺少转速的检测,所以转速的控制精度稍差。

#### 2. 低频特性

在低频运行的稳定性方面( $\leq 5\text{Hz}$ ),不同品牌变频器的差异较大,须注意了解和选购。在一般情况下,无反馈矢量控制适用于转速调节范围不太大( $\leq 10$ )的场合。

#### 3. 动态响应性能

无反馈矢量控制实质上是通过对其他物理量(电流、磁通、功率因数等)的检测和计算而间接地使转速得到补偿。因为计算需要时间,所以,无反馈矢量控制方式在动态响应方面的性能较差。

总之,对于一些要求有较硬机械特性,但调速范围不很广,对动态响应要求不高的场

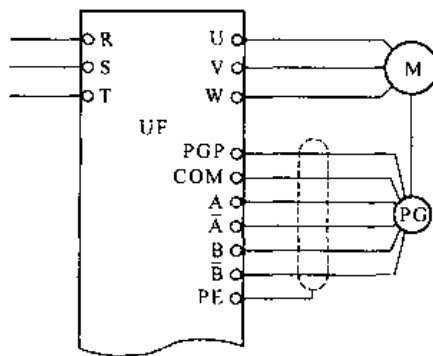


图 3-48 编码器与变频器的连接

合，应尽量采用无反馈矢量控制方式。

### 三、转矩控制方式

在绝大多数情况下，变频器是以频率大小为控制对象的。但转矩控制方式则不然，它是以转矩大小作为控制对象的。

转矩控制方式只在“有反馈矢量控制方式”的情况下才能进行。

#### 1. 转矩控制的基本含义

当变频器被预置为转矩控制时，给定信号  $X$  的大小将与电动机的输出转矩  $T_M$  成比例，其转矩给定线如图 3-49 所示。

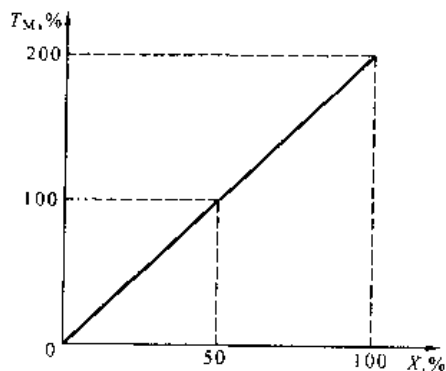


图 3-49 转矩给定线

通常，给定信号的最大值与电动机额定转矩的 200% 相对应。

当转矩控制功能有效时，将无法控制电动机转速的大小，只能通过预置上限频率来限制变频器的最大输出频率。

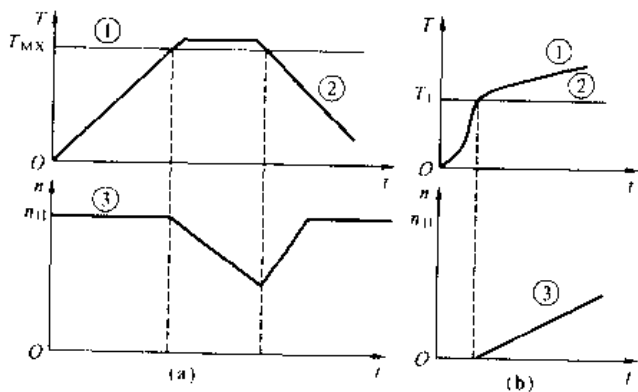


图 3-50 转矩控制的特点

(a) 给定转矩恒定；(b) 给定转矩上升

而难以启动，或者负载启动要求十分平稳的场合（如电梯），可以使转矩按 S 形方式逐渐上升，直至超过负载转矩时，转速再缓缓上升，如图 3-50 (b) 所示。由于转矩控制方式不能控制转速，所以，这种控制方式在启动后通常要切换到转速控制方式。

#### 3. 应用实例

以薄膜卷绕机为例，其工作状态如图 3-51 所示。在卷绕过程中，要求薄膜的线速度和张力都保持恒定。因此，随着卷绕辊的直径越卷越大，其阻转矩也必越来越大。

但当变频器预置为转矩控制方式时，在不改变给定信号（电位器 RP 滑动触点的位置不动）的情况下，电动机的输出转矩是恒定的。

工作时，当卷绕辊的直径逐渐增大时，

#### 2. 转矩控制的应用

(1) 转矩限制。在转速控制的同时，给定一个转矩的极限值  $T_{MH}$ ，当负载转矩超过该极限值时，转速将下降，直至停止。

(2) 决定转速变化。有的负载要求：当负载转矩在所规定的限值范围  $T_{MX}$  内运行时，拖动系统以转速  $n_H$  运行，当负载转矩超过  $T_{MX}$  时，转速将下降，如图 3-50 (a) 所示。

(3) 用于启动。当负载因惯性较大

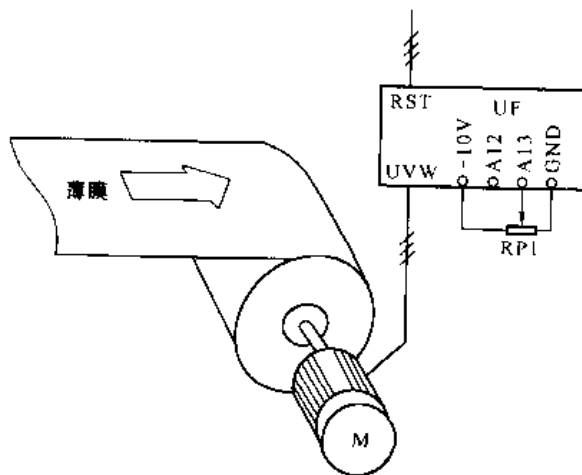


图 3-51 卷绕机的控制



电动机实际上处于“带不动”的状态，因而卷绕辊的转速将自动地越卷越慢，从而达到了保持张力和线速度恒定的目的。

调节电位器 RP，可调节薄膜卷绕的松紧程度。

## 第七节 变频调速的程序控制功能

变频器的程序控制方式主要有两种，分述如下。

### 一、由程序步进行控制

#### (一) 变频器的程序控制功能

各种变频器都具有简单的程序控制功能，各程序段的运行时间由变频器内部的计时器根据用户预置的参数计时决定。今以艾默生 TD3000 系列变频器为例，说明如下。

对于编程功能的预置，大致有两个部分。

#### 1. 基本要求的预置

在 TD3000 系列变频器里，有：

(1) 程控功能选择 (F8.00)：

“0”——程控功能无效。

“1”——单循环：运行一个循环后停止。

“2”——连续循环：运行完一个循环后，又回到起点，继续循环。

“3”——保持最终值：运行完一个循环后，以最后循环段的预置频率继续运行。

(2) 计时单位选择 (F8.01)：

“0”——计时单位为 s；

“1”——计时单位为 min。

#### 2. 各程序段的预置

如图 3-52 所示，每个程序段要设定三个数据：

(1) 运行方向及加减速时间。由三位数字构成：

最高位——设定运行方向：“0”，正转；“1”，反转。

后两位——设定加减速时间。

(2) 运行频率。预置方法与多挡转速相同，功能码如 F2.24、F2.25、F2.26 等。

(3) 运行时间。功能码如 F8.03、F8.05、F8.07 等。

#### (二) 实例——工业洗涤机的脱水程序

##### 1. 控制要求

(1) 低速脱水。由于洗涤物在洗涤过程中浸满了水，故电动机的负荷很重，只能低速运行。设具体要求为  $n_{L1} \approx 187.5 \text{r/min}$ ，脱水时间为  $t_1 = 3 \text{min}$ 。

(2) 中速脱水。经过 3min 的低速脱水后，洗涤物中的水分已经大为减少，电动机的负荷也已大为减轻，但在高速甩干之前，尚需进一步脱水。脱水转速上升至  $n_{L2} \approx 375 \text{r/min}$ ，

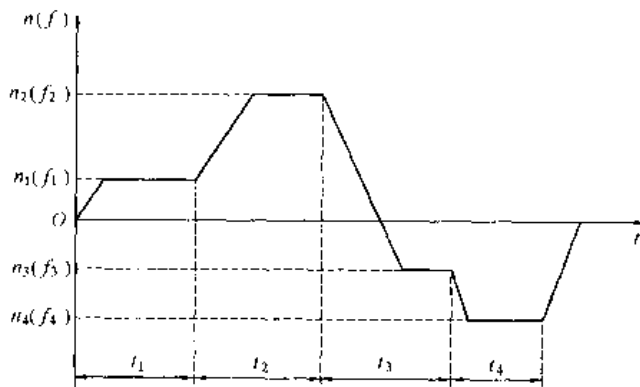


图 3-52 变频器的编程功能

脱水时间为  $t_2 = 2\text{min}$ 。

(3) 高速甩干。经过中速脱水后，电动机的负荷已经很轻，可以进行高速甩干了。这时，将转速缓慢加速至  $n_{L3} \approx 675\text{r/min}$ ，甩干时间为  $t_3 = 2\text{min}$ 。

## 2. 计算数据及程序安排

(1) 电动机的主要额定数据： $P_{MN} = 7.5\text{kW}$ ， $n_{MN} = 1440\text{r/min}$ ，传动比为  $\lambda = 4$ 。

(2) 各挡的工作频率。为简便起见，计算中不考虑转差率的问题，计算结果见表 3-2。

表 3-2 工业洗涤机的脱水程序

挡位	负载转速 ( $\text{r/min}$ )	电动机转速 ( $\text{r/min}$ )	工作频率 ( $\text{Hz}$ )	工作时间 ( $\text{min}$ )
1	187.5	750	25	3
2	375	1500	50	2
3	675	2700	90	2

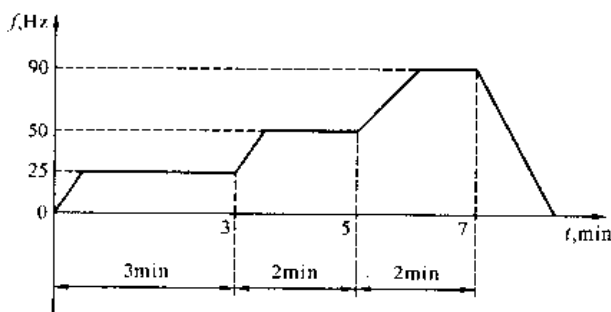


图 3-53 脱水程序

(3) 程序段的安排。如图 3-53 所示。

共分三个程序段：

第 1 程序段为低速脱水程序段，工作频率预置为 25Hz。由于负荷较重，升速过程应尽量缓慢一些。今将升速时间预置为 1min（升速至 25Hz 所需的时间为 30s），运行时间预置为 3min。

第 2 程序段为中速脱水程序段，工作频率预置为 50Hz。升速时间预置为 1min（从 25Hz 升速至 50Hz 所需的时间为 30s），运行时间预置为 2min。

第 3 程序段工作频率预置为 90Hz，升速时间预置为 1min（从 50Hz 升速至 90Hz 所需的时间为 54s），运行时间预置为 2min。

第 3 程序段工作频率预置为 90Hz，升速时间预置为 1min（从 50Hz 升速至 90Hz 所需的时间为 54s），运行时间预置为 2min。

## 二、由多挡转速功能实现程序控制

### (一) 控制特点

#### 1. 切换条件

由多挡转速功能实现程序控制的特点是：各程序段之间的切换是由外部条件来决定的。例如：

(1) 由接近开关的状态来决定。这是用得较多的一种。如龙门刨床的刨台在往复运动中，转速与方向的切换控制，就是由接近开关（行程开关）的状态来决定的。

(2) 由多种因素共同决定。例如，对工件进行加热处理的生产线，每次运行的区间由接近开关决定，但加热的时间则由时间继电器来控制。也有的须根据加热炉的温度来决定运行速度。

#### 2. 切换程序

如图 3-54 所示，电动机启动后以转速  $n_1$ （频率为  $f_1$ ）运行；当碰到行程开关 SQ1 时，转速升高至  $n_2$ （频率为  $f_2$ ），进入第二个程序段；当碰到行程开关 SQ2 时，转速下降至  $n_3$ （频率为  $f_3$ ），进入第三个程序段；当碰到行程开关 SQ3 时，电动机降速并停止，程序结束。

## (二) 控制电路

如图 3-54 所示的程序可由图 3-55 所示的电路来实现。

### 1. 变频器接法

如图 3-55 (a) 所示, 电动机启动后的第一挡工作频率由 X1 的状态决定; 第二挡工作频率由 X2 的状态决定; 第三挡工作频率由 X3 的状态决定。

### 2. 控制电路

如图 3-55 (b) 所示, 工作步骤如下:

(1) 启动。按下按钮 SF, 使继电器 KA0 的线圈得电并自锁, 其触点将变频器的 FWD 与 CM 接通, 电动机开始升速。同时, 使继电器 KA1 线圈得电, 将变频器的 X1 与 CM 接通, 决定了第 1 挡的工作频率  $f_1$ 。

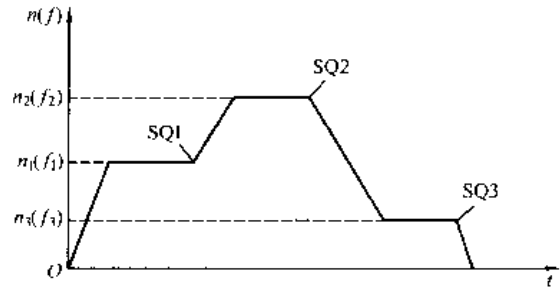


图 3-54 多挡速实现程序控制

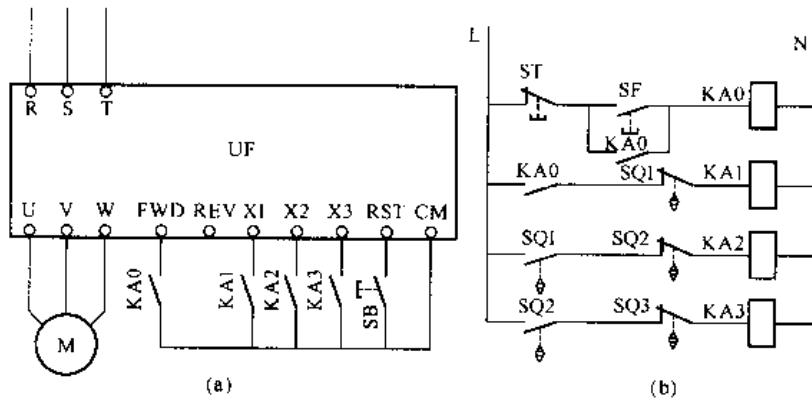


图 3-55 多挡转速实现程序控制

(a) 变频器的外部接法; (b) 控制电路

(2) 第 1 次切换。接近开关 SQ1 动作, 使 KA1 线圈失电, KA2 线圈得电, 进而使变频器的 X1 与 CM 断开, 而 X2 与 CM 接通, 决定了第 2 挡的工作频率  $f_2$ 。

(3) 第 2 次切换。接近开关 SQ2 动作, 使 KA2 线圈失电, KA3 线圈得电, 进而使变频器的 X2 与 CM 断开, 而 X3 与 CM 接通, 决定了第 3 挡的工作频率  $f_3$ 。

(4) 程序的结束。接近开关 SQ3 动作, 使 KA3 线圈失电, 进而使变频器的 X3 与 CM 断开, 输出频率下降至 0Hz。

如果转速挡超过 4 挡, 则可考虑用 PLC 来进行控制。

## 第八节 变频器的 PID 调节功能

PID 控制属于闭环控制, 是使控制系统的被控量在各种情况下, 都能够迅速而准确地无限接近控制目标的一种手段。具体地说, 则随时将传感器测得的实际信号 (称为反馈信号) 与被控量的目标信号相比较, 以判断是否已经达到预定的控制目标。如尚未达到, 则根据两者的差值进行调整, 直至达到预定的控制目标为止。现在, 大多数变频器都已经配置了 PID

控制功能。

### 一、PID 控制系统的构成

现以某空气压缩机的恒压控制为例进行说明。

#### (一) 反馈信号与目标信号

##### 1. 反馈信号

就是用压力传感器实际测得的压力信号。因为变频调速系统的控制对象是空气的压力，现在又把空气压力的信号反送给变频器，故称为反馈信号。

##### 2. 目标信号

就是与所要求的空气压力相对应的信号。目标信号的大小，总是和所选用的压力传感器的量程相联系的。例如，要求储气罐的空气压力保持为 0.6MPa，则：如压力传感器的量程为 0~1MPa，则目标值为 60%；如压力传感器的量程为 0~2MPa，则目标值为 30%。

因为目标信号是一个固定的百分数，所以，在多数情况下，是通过键盘来进行给定的。但有时，由于有特别的需要，也可以通过给定信号端进行给定。

#### (二) 控制系统的接线

空气压缩机 PID 控制系统的接线情况如图 3-56 所示。

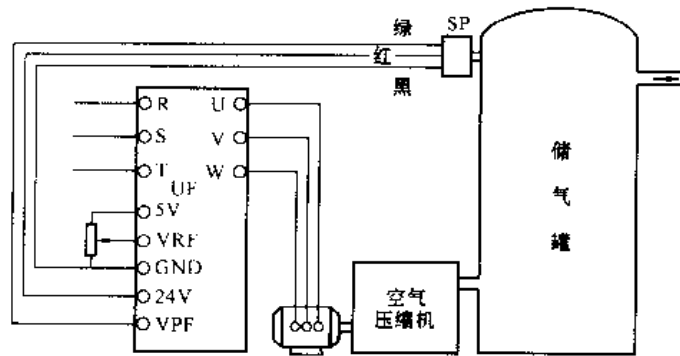


图 3-56 PID 控制系统的接线

##### 1. 反馈信号的接入

图 3-56 中，SP 是压力传感器。将红线和黑线分别接至变频器的“+24V”和“GND”之间，则在绿线与黑线之间即得到与被测压力成正比的电压信号，把绿线接到变频器的“VPF”端，变频器就得到了压力反馈信号。

##### 2. 目标信号的接入

为了说明问题，这里采用由电位器输入目标信号的方式。如图 3-56 所示，目标信号通常接在给定频率的输入端。当变频器预置为 PID 工作方式时，VRF 端所得到的便是目标信号。

### 二、PID 控制的工作过程

#### (一) 基本工作过程与问题

##### 1. 基本工作过程

空气压缩机变频调速系统的工作过程如下：

设： $X_T$  为目标信号，其大小与所要求的储气罐压力相对应； $X_F$  为压力传感器的反馈信号。则：变频器输出频率  $f_x$  的大小由合成信号  $(X_T - X_F)$  决定。

如储气罐压力  $p$  超过了目标值, 则  $X_F > X_T \rightarrow (X_T - X_F) < 0 \rightarrow$  变频器的输出频率  $f_X \downarrow \rightarrow$  电动机转速  $n_X \downarrow \rightarrow$  储气罐压力  $p \downarrow \rightarrow$  直至与所要求的目标压力相符 ( $X_F \approx X_T$ ) 为止。

反之, 如储气罐压力  $p$  低于目标值, 则  $X_F < X_T \rightarrow (X_T - X_F) > 0 \rightarrow$  变频器的输出频率  $f_X \uparrow \rightarrow$  电动机转速  $n_X \uparrow \rightarrow$  储气罐压力  $p \uparrow \rightarrow$  直至与所要求的目标压力相符 ( $X_F \approx X_T$ ) 为止。

## 2. 问题的提出

上述工作过程明显地存在一个矛盾: 一方面, 我们要求储气罐的实际压力 (其大小由反馈信号  $X_F$  来体现) 应无限接近于目标压力 (其大小与目标信号  $X_T$  来体现), 也就是说, 要求  $(X_T - X_F) \rightarrow 0$ ; 另一方面, 变频器的输出频率  $f_X$  又是由  $X_T$  和  $X_F$  相减的结果来决定的。

可以想像, 如果把  $(X_T - X_F)$  直接作为给定信号  $X_G$ , 则当  $X_G = X_T - X_F = 0$  时,  $f_X$  也必等于 0, 变频器就不可能维持一定的输出频率, 储气罐的压力无法维持, 系统将达不到预想的目的。

就是说, 为了维持储气罐有一定的压力, 变频器必须维持一定的输出频率  $f_X$ , 这就要求有一个与此相对应的给定信号  $X_G$ 。这个给定信号既需要有一定的值, 又要和  $X_T - X_F = 0$  相联系, 这就是矛盾所在。

## (二) PID 调节功能

### 1. 比例增益环节 (P)

解决上述矛盾的方法是将  $(X_T - X_F)$  进行放大后再作为频率给定信号, 即

$$X_G = K_P(X_T - X_F) \quad (3-6)$$

式中  $K_P$ ——放大倍数, 也叫比例增益。

上述关系如图 3-57 所示。由于  $X_G$  是  $(X_T - X_F)$  成正比地放大的结果, 故称为比例放大环节。显然,  $K_P$  越大, 则

$$(X_T - X_F) = \frac{X_G}{K_P} \quad (3-7)$$

越小,  $X_F$  越接近于  $X_T$ 。

就是说, 当  $K_P$  足够大时, 虽然  $X_G$  仍保持一定的值, 但  $\frac{X_G}{K_P}$  却接近于 0。

这里,  $X_F$  只能是无限接近于  $X_T$ , 却不能等于  $X_T$ 。这说明,  $X_F$  和  $X_T$  之间总会有一个差值, 称为静差, 用  $\epsilon$  表示。不消说, 静差值应该越小越好。

显然, 比例增益 ( $K_P$ ) 越大, 静差 ( $\epsilon$ ) 越小, 如图 3-58(a) 所示。

比例环节的引入, 又出现了新的矛盾: 为了减小静差, 应尽量增大比例增益, 但由于系统有惯性, 因此,  $K_P$  太大了, 一旦  $X_F$  和  $X_T$  之间的差值变大,  $X_G = K_P(X_T - X_F)$  一下子增大 (或减小) 了许多, 使变频器的输出频率很容易超调 (调过了头), 又容易引起被控量 (压力) 忽大忽小, 形成振荡, 如图 3-58 (b) 所示。

### 2. 积分环节 (I)

引入积分环节的目的在于:

(1) 使给定信号  $X_G$  的变化与乘积  $K_P(X_T - X_F)$  对时间的积分成正比。意思是说, 尽管  $K_P(X_T - X_F)$  一下子增大 (或减小) 了许多, 但  $X_G$  只能在“积分时间”内逐渐地增大 (或减小), 从而减缓了  $X_G$  的变化速度, 防止了振荡。积分时间越长,  $X_G$  的变化越慢。

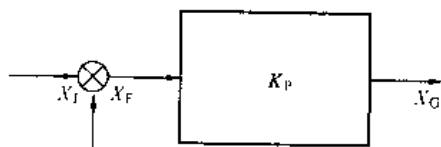


图 3-57 比例放大前后各量间的关系

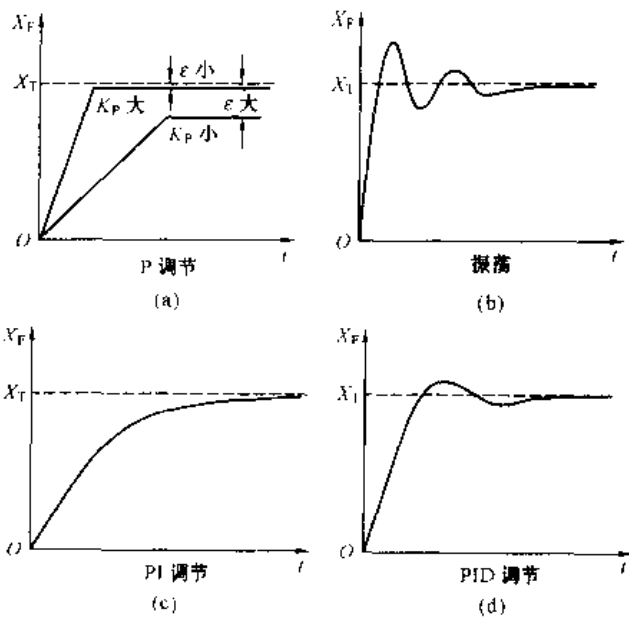


图 3-58 P、I、D 的综合作用示意  
(a) P 调节; (b) 振荡现象; (c) PI 调节;  
(d) PID 调节

(2) 只要偏差不消除 ( $X_T - X_F \neq 0$ ), 积分就不停止, 从而能有效地消除静差, 如图 3-58 (c) 所示。

但积分时间 (I) 太长, 又会发生当用气量急剧变化时, 被控量 (压力) 难以迅速恢复的情况。

### 3. 微分环节 (D)

微分环节的作用是: 可根据偏差的变化趋势, 提前给出较大的调节动作, 从而缩短调节时间, 克服了因积分时间太长而使恢复滞后的缺点, 如图 3-58 (d) 所示。

## 三、变频器中 PID 调节功能的预置和调整

### (一) PID 功能预置与目标值给定

#### 1. PID 功能预置

即: 预置变频器的 PID 功能有效。

当变频器完全按 P、I、D 调节的规律运

行时, 其工作特点是:

(1) 变频器的输出频率 ( $f_x$ ) 只根据储气罐的实际压力 ( $X_F$ ) 与目标压力 ( $X_T$ ) 比较的结果进行调整, 所以, 频率的大小与被控量 (压力) 之间并无对应关系。

(2) 变频器的加、减速过程将完全取决于由 P、I、D 数据所决定的动态响应过程, 而原来预置的“加速时间”和“减速时间”将不再起作用。

(3) 变频器的输出频率 ( $f_x$ ) 始终处于调整状态, 因此, 其显示的频率常不稳定。

#### 2. 目标值的给定

(1) 键盘给定法。由于目标信号是一个百分数, 所以可由键盘直接给定。

(2) 电位器给定法。如图 3-59 所示, 目标信号从变频器的频率给定端输入。但这时, 由于变频器已经预置为 PID 运行方式, 所以, 在通过调节电位器来调节目标值时, 显示屏上显示的仍是百分数。

(3) 变量目标值给定法。在生产过程中, 有时要求目标值能够根据具体情况进行适当调整。今通过两个实例来说明:

实例 1——中央空调的循环冷却水进行变频调速时, 是根据出水温度和进水温度之差 (温差) 来调节冷却水的流量的。但为了进一步节省能源, 用户提出, 当进水温度较低 (从而环境温度也较低) 时, 温差的目标值可以大一些 (即冷却水的流速慢一些), 而当进水温度较高 (环境温度也较高) 时, 温差的目标值应小一些 (冷却水的流速快一些), 以保证其对主机的冷却效果。所以, 其目标值如图 3-59 (a) 所示, 是一个随温度  $\theta$  而变的曲线。

实例 2——塑料挤出机的油泵电动机进行变频调速时, 要求实现恒油压控制。但对于不同的原材料, 油压的目标值也不一样。因此, 可以将目标值分成若干挡, 如图 3-59 (b) 所示。

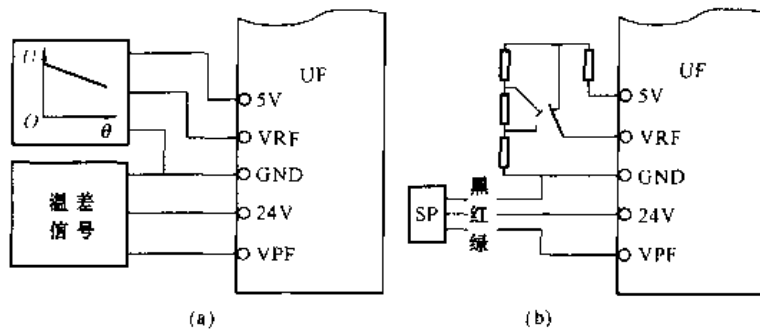


图 3-59 变量目标值给定  
(a) 目标值为一直线; (b) 目标值分挡

## (二) P、I、D 的调试

### 1. 逻辑关系的预置

在自动控制系统中, 电动机的转速与被控量的变化趋势, 有时是相反的, 称为负反馈。如空气压缩机的恒压控制中, 压力越高, 要求电动机的转速越低, 其逻辑关系如图 3-60 中的曲线①所示。但也有时是相同的, 称为正反馈。例如在空调机中, 温度越高, 要求转速也越高, 其逻辑关系如图 3-60 中的曲线②所示。

习惯上把曲线①所示的逻辑关系称为“正逻辑”, 而把曲线②所示的逻辑关系称为“负逻辑”。

用户应根据具体情况进行预置, 下面的调试过程都是以负反馈(正逻辑)为例的。

### 2. 比例增益与积分时间的调试

(1) 手动模拟调试。在系统运行之前, 可以先用手动模拟的方法对 PID 功能进行初步的调试。

首先, 将目标值预置到实际需要的数值(可以通过图 3-61 中的 RP1 调节); 将一个手控的电压或电流信号(图 3-61 中是从 RP2 上取出的电压信号)接至变频器的反馈信号输入端(图 3-61 中的 VPF 端)。

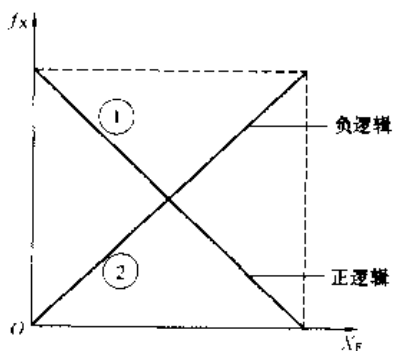


图 3-60 反馈量的逻辑关系

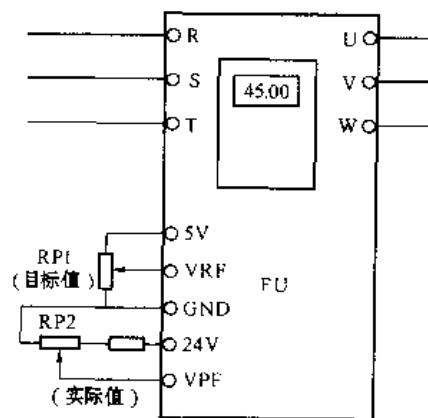


图 3-61 PID 功能的手动模拟调试

缓慢地调节反馈信号, 正常的情况是: 当反馈信号超过目标信号时, 变频器的输入频率将不断地上升, 直至最高频率; 反之, 当反馈信号低于目标信号时, 变频器的输入频率将不

断下降，直至频率为 0Hz。上升或下降的快慢，反映了积分时间的大小。

(2) 系统调试。由于 P、I、D 的取值与系统的惯性大小有很大的关系，因此，很难一次调定。这里，根据笔者的经验，介绍一个大致的调试过程。

首先将微分功能 D 调为 0。在许多要求不高的控制系统中，微分功能 D 可以不用。

保持变频器的出厂设定值不变，使系统运行起来，观察其工作情况：

如果在压力下降或上升后难以恢复，说明反应太慢，则应加大比例增益  $K_P$ ，直至比较满意为止；在增大  $K_P$  后，虽然反应快了，但却容易在目标值附近波动，说明系统有振荡，应加大积分时间，直至基本不振荡为止。

总之，在反应太慢时，应调大  $K_P$ ，或减小积分时间；在发生振荡时，应调小  $K_P$ ，或加大积分时间。

在某些对反应速度较高的系统中，可考虑增加微分环节 D。

(三) 外接 PID 调节器的 P、I、D 控制

在变频器本身没有 PID 调节功能的情况下，有必要配用外接的 PID 调节器。

### 1. 电路接法

外接的 PID 调节器常常不提供变频器所需要的直流电源，故需另配，如图 3-62 所示。图

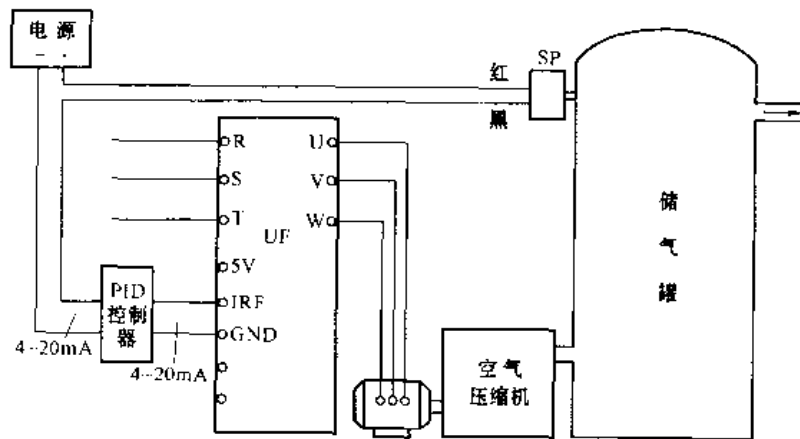


图 3-62 外接 PID 控制器的控制电路

中，SP 采用电流输出方式。PID 调节器的输入端输入变送器输出的 4~20mA 电流信号。经与目标值比较，并经 P、I、D 调制后，输出端输出的也是 4~20mA 电流信号，可直接接至变频器的频率给定端（电流输入）。

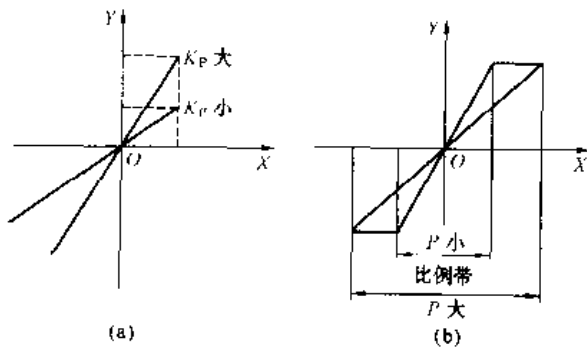


图 3-63 比例与比例带

### 2. 功能特点

在专用的 PID 调节器中，比例增益的大小常常是通过“比例带”来进行调节的。所谓比例带，就是按比例放大的区域，用  $P$  表示（等于  $K_P$  的倒数），即

$$P = \frac{1}{K_P} \quad (3-8)$$

如图 3-63 所示，比例带 ( $P$ ) 越小，相当于比例增益 ( $K_P$ ) 越大。而在几乎所有变频器中，内置 PID 调节功能的“P”



参数，都是直接预置比例增益  $K_p$ 。

## 第九节 变频器的保护功能

### 一、变频器的保护功能

#### (一) 过电流保护功能

##### 1. 过电流的原因

(1) 外部故障引起的过电流。如电动机堵转、变频器输出侧短路、变频器输出侧接地等。

(2) 运行过电流。如加速或减速时间过短引起的过电流，电动机遇到冲击负载引起的过电流等。

(3) 变频器自身故障引起的过电流。如逆变桥中，同一桥臂的两个逆变管在逆变过程中，总是不断地交替导通。由于逆变器件从饱和导通到截止以及从截止到饱和导通都需要时间，因此，在交替过程中，须有一个等待时间  $t_w$ 。在环境温度过高，或器件本身老化等情况下，等待时间  $t_w$  将变窄，有可能出现一个逆变管尚未完全截止，而另一个逆变管已经开始导通，导致上下两个逆变管“直通”、直流电压被短路的现象，如图 3-64 所示。

##### 2. 变频器对过电流的处理

变频器将首先根据电流上升的“陡度”来判断是否出现短路或接地，如果是，则立即跳闸；如果不是短路，而属于运行过电流，则首先进行自处理，在自处理不能使电流下降的情况下，则跳闸。对于加、减速过电流的自处理功能，已分别在第三节和第四节中介绍过了。对于电动机遇到冲击负载引起的过电流，变频器的自处理方法是：当电流超过设定值  $I_{set}$  时，变频器首先将工作频率适当降低，到电流低于设定值  $I_{set}$  时，工作频率再逐渐恢复，如图 3-65 所示。

变频器内，通常把这种对于过电流或过电压的自处理功能称为“防失速”（即防止跳闸）功能。

#### (二) 过载保护功能

过载保护功能是保护电动机过载的。从根本上说，对电动机进行过载保护的目的是使电动机不因过热而烧坏。因此，进行保护的主要依据便是电动机的温升不应超过其额定值。

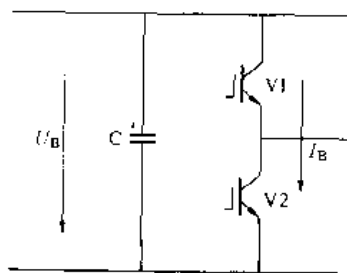


图 3-64 逆变管直通

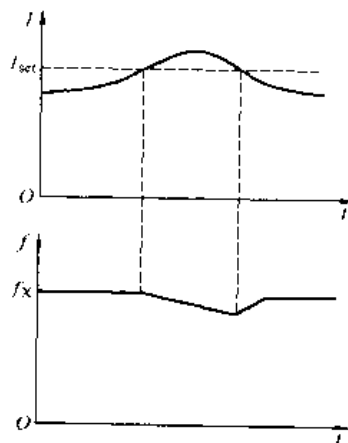


图 3-65 运行过流的自处理

### 1. 发热保护的反时限特性

电动机的热保护功能应该具有反时限特性。即，电动机的运行电流越大，保护动作的时间越短。

例如，当运行电流为额定电流的 106% 时，可维持 5min 后才进行保护；当运行电流为额定电流的 150% 时，运行 1min 就需进行保护；而当运行电流为额定电流的 180% 时，允许的持续运行时间只有 36s (0.6min)，如图 3-66 所示。

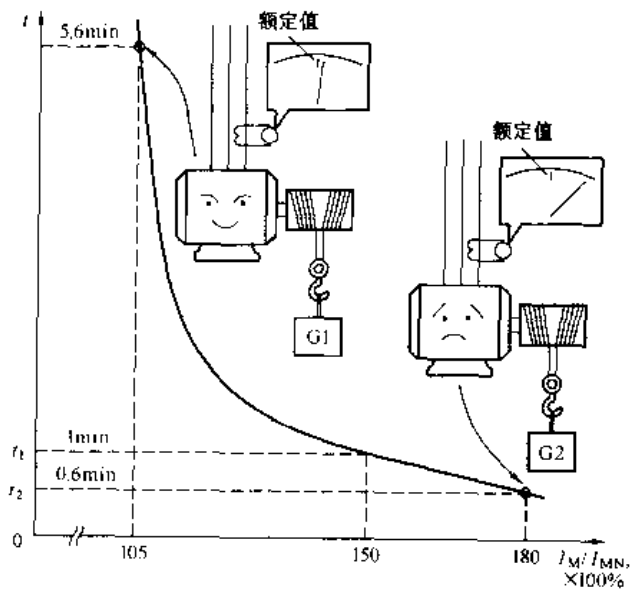


图 3-66 电动机热保护的反时限特性

### 2. 温升与频率的关系

电动机在低频运行时，如没有外部强迫通风，散热情况将变差，即使在  $I_M = 100\% I_{MN}$  的情况下，其稳定温升也会超过电动机的允许温升。

例如，在图 3-67 中，当频率  $f_X = 50\text{Hz}$ 、 $I_M = 100\% I_{MN}$  时，其温升曲线为曲线①；而当频率  $f_X = 20\text{Hz}$ 、 $I_M = 100\% I_{MN}$  时，其温升曲线为曲线②。允许长时间运行的时间将缩短为  $t'$ 。

### 3. 变频器中的电子热保护功能

根据电动机发热的上述规律，所有的变频器都配置了电子热保护功能，其热保护曲线如图 3-68 所示。主要特点有：

(1) 具有反时限特性。

(2) 在不同的运行频率下有不同的保护曲线，当频率为 50Hz 时，允许连续运行的时间较长，为  $t_1$ ；当频率为 20Hz 时，允许连续运行的时间缩短为  $t_2$ ；而当频率为 10Hz 时，允许连续运行的时间进一步缩短为  $t_3$ 。可见，频率越低，允许连续运行的时间越短。

### 4. 电子热保护功能的预置

在实际应用中，变频器的容量和电动机容量之间的配用情况常不是固定的。例如，对于长期不变的负载，一台 55kVA 的变频器配用的电动机应该是 37kW。但对于变动负载或断续负载，由于电动机是允许短时间过载的，因此，只能配用 22kW 其或 15kW 的电动机。

针对这种情况，在进行电子热保护时，必须预置“电流取用比”，即

$$I_M \% = \frac{I_{MN}}{I_N} \times 100\% \quad (3-9)$$

式中  $I_M\%$  —— 电流取用比；

$I_{MN}$  —— 电动机的额定电流，A；

$I_N$  —— 变频器的额定电流，A。

### (三) 电压保护功能

#### 1. 过电压的原因及保护

(1) 电源过电压。当电源过电压时，可利用变频器的“自动电压调整”(AVR)功能，使输出的平均电

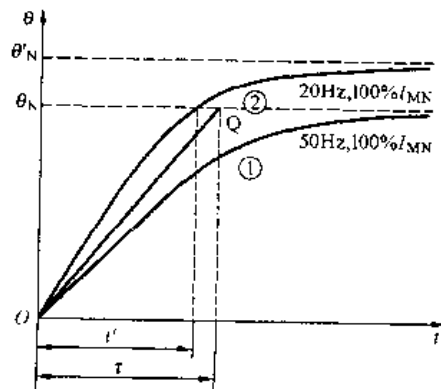


图 3-67 低频时的发热曲线

压维持恒定。但电压太高，电动机侧电压脉冲的幅值过高，对电动机绕组的绝缘不利，必须跳闸，进行保护。

(2) 降速过电压。即降速过快引起的过电压，如本章第四节所述，变频器将首先进行自处理，如自处理后电压仍偏高，则跳闸。

#### 2. 欠电压的原因及保护

变频器发生欠电压的原因大致有以下几种情况：

(1) 电源电压过低或缺相。

(2) 变频器的整流桥损坏。

(3) 变频器整流后的限流电阻未切除电路。

这是由于和限流电阻并联的晶闸管或继电器发生故障所致。

对于电源欠电压，如运行频率低于 50Hz，变频器可在一定范围内通过“自动电压调整”(AVR)功能调整其输出电压。对于其他几种情况，变频器必须跳闸，进行保护。

#### (四) 其他保护功能

现在，变频器的保护功能已经十分完善，这里，仅就几种主要的功能说明如下。

##### 1. 模块的过热保护

变频器内部最需要进行发热保护的部件是逆变模块，这除了因为它是最关键的器件外，还因为逆变模块的工作过程是高频切换的过程，其累计的损耗功率较大，是主要的发热器件。所以，对逆变模块的散热必须给予高度重视，因此，变频器内设置了温度检测环节，当温度超过一定值时，变频器将跳闸。

##### 2. 软件的自检保护

由于变频器软件系统的运算错误有可能导致十分严重的后果，因此，变频器对自身的软件具有完善的自检系统，一旦软件运算出错，将立即跳闸。

##### 3. 接受外部故障信号的保护

变频器的输入控制端中，有 1~2 个专门接受外部故障信号的端子，拖动系统中任何需要保护的信号，都可以接到该端子上。变频器在接到外部故障信号时，将立即跳闸，进行保护。

## 二、变频器的跳闸

变频器因故障而跳闸时，将立即作出以下反应。

### (一) 再试重合闸

设置重合闸功能有如下几个作用：

(1) 避免误动作。因为变频器的保护环节较多，且灵敏度较高，存在着误动作的可能。为了防止拖动系统因误动作而停机，变频器在跳闸后，将允许一定次数的自动重合闸。

(2) 防止因外部的不重复冲击而跳闸。例如，电源变压器的功率因数补偿柜投入的瞬间，电压波形将发生畸变，出现尖峰电压，如图 3-69 所示。对于这样的过电压，如出现变频器跳闸，可以重合闸。

(3) 电源的瞬间过电压或停电。电源网络如因某种原因（如雷电等）出现瞬间过电压或

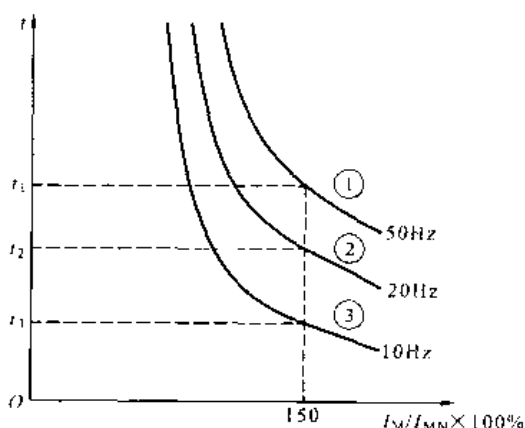


图 3-68 热保护曲线

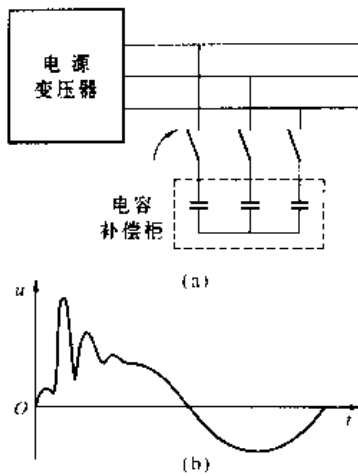


图 3-69 电容投入  
(a) 投入电路; (b) 电压波形

停电, 变频器可以重试重合闸。

## (二) 重合闸功能的预置

重合闸功能的预置项目主要有两个:

### 1. 重合闸次数

即允许重合闸的次数, 有的变频器最多可重合闸 10 次之多。

### 2. 重合闸的间隔时间

即每两次重合闸之间的时间间隔, 预置的范围通常是 0 ~ 10s, 也有可长达 20s 的。

## (三) 跳闸信号输出

### 1. 变频器的跳闸信号输出配置

变频器的输出控制端中, 都配置有报警信号输出端, 如图 3-70 中的 Ta、Tb 和 Tc 所示。报警信号输出端通常都是继电器输出, 可以接在 220V 交流电路内。

### 2. 与报警信号输出端配合的外控电路

通常, 其动断 (常闭) 触点用于切断变频器电源接触器的线圈电路, 使变频器迅速断电; 其动合 (常开) 触点则用于接通声光报警电路, 如图 3-70 所示。

## (四) 跳闸的原因显示

当代变频器在故障跳闸后, 都有十分详细的故障原因显示。显示内容大致有以下几个方面:

### 1. 故障代码

如森兰 SB61 系列变频器的故障代码

有:

ou, 表示过电压;

Lu, 表示欠电压;

oL, 表示过载;

.....

FL, 表示短路;

oLE, 表示外部报警;

oc, 表示过电流;

.....

### 2. 查询最近一次发生故障时的参数

为了便于分析故障原因, 不少变频器在因故障而跳闸后, 还可以查询发生故障时的各项参数。如输出频率、给定频率、输出电流、输出电压、直流电压、模块温度、旋转方向、累计运行时间等。

### 3. 查询故障史

为了便于分析故障原因, 不少变频器还可以查询该变频器最近若干次的故障原因。

## (五) 故障的复位

变频器排除故障后, 在恢复正常工作时, 必须首先使变频器“复位”, 使之脱离跳闸状态。复位的方法有键盘复位和外接输入控制端复位。

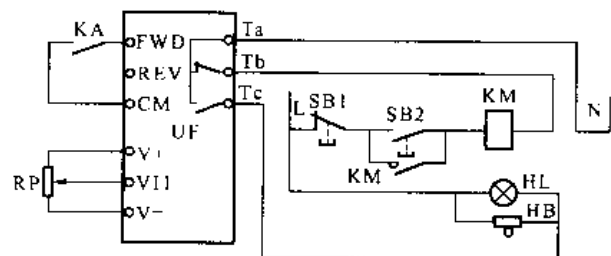


图 3-70 报警输出及电路

### 1. 键盘复位

变频器面板上，都配置有“复位按钮 (RESET)”，按下复位按钮，即可使变频器复位。

### 2. 外接输入控制端复位

在变频器的外接输入控制端中，有一个复位控制输入端，只要从外部输入一个开关量信号，就可使变频器复位。

## 第十节 某些变频器的特殊功能

### 一、给定方式中的特殊功能

#### (一) 模拟量给定的正、反转控制

不少变频器具有用模拟量给定信号直接进行正、反转控制的功能，主要有两种方式：

(1) 由给定信号的正、负值来控制正、反转。例如，给定信号可以预置为  $-10 \sim +10\text{V}$ ，其中， $-10 \sim 0\text{V}$  为反转信号； $0 \sim +10\text{V}$  为正转信号。

(2) 由给定信号的中间值作为正转和反转的分界点。例如，给定信号为  $0 \sim +10\text{V}$  时，可以预置成： $0 \sim 5\text{V}$  为反转信号； $5 \sim 10\text{V}$  为正转信号。

针对这种正、反转控制方式，有的变频器设置了如下的功能。

#### 1. 死区功能

用模拟量给定信号进行正、反转控制时，“0”速控制很难稳定，常常出现正转或反转的“蠕动”现象。为了防止这种“蠕动”现象，需要在“0”速附近设定一个死区。具体方法是：在正转和反转方向分别预置一个最低频率“ $f_{Xmin}$ ”和“ $-f_{Xmin}$ ”，死区范围即为“ $f_{Xmin} \sim -f_{Xmin}$ ”。

例如，在 Vacon CX 系列变频器（芬兰）中，采用上述的第（1）种方式，其死区呈回线状，如图 3-71（a）所示；而在时代 TVF2000 系列变频器（中国）和 ABB-ACS600 变频器（瑞典）中，则采用上述的第（2）种方式，其死区如图 3-71（b）所示。

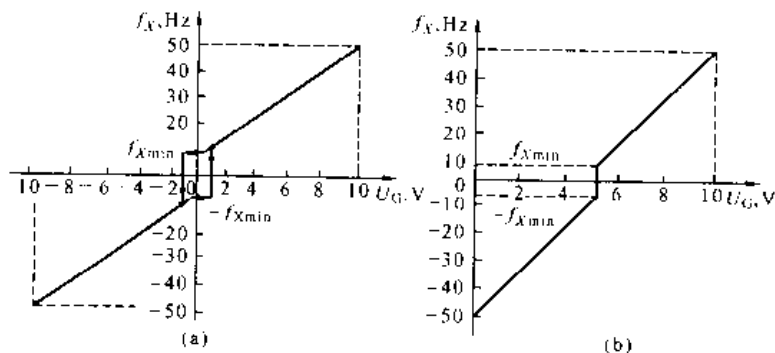


图 3-71 模拟给定的正、反转控制

(a) 正负信号控制；(b) 正信号控制

#### 2. 有效“0”信号功能

在上述第（2）种控制方式中，存在着一个特殊的问题。即，万一给定信号因电路接触不良或其他原因而“丢失”，则变频器的给定输入端得到的信号为“0”。按照图 3-71（b）所示曲线，其输出频率应为  $-50\text{Hz}$ ，电动机将处于高速反转状态。在实际工作中，这种情况常常是十分有害的，甚至有可能损坏生产机械。

对此，变频器设置了一个有效“0”功能。例如，将有效“0”预置为0.5V或更高。则当给定信号小于预置的有效“0”时，变频器的输出频率将降为0Hz。

## (二) 比例连锁给定

### 1. 功能说明

在实际生产中，变频器的基本转速由主给定信号给定。但在生产过程中，常常还需要根据其他信号对电动机的转速进行修正（微调）。例如，某机械的冷却风机，其基本转速由操作工根据具体情况进行调节。同时，当环境温度发生变化时，要求转速将能自动地进行微调。一般的变频器都能实现这种控制，而明电 VT230S 系列变频器（日本）则专门设置了一个辅助信号输入端，并给出了十分明确的计算方法，如图 3-72 所示。图 3-72 (a) 为外接给定端子的安排：FSV 是主信号给定端；AUX 是辅助信号给定端。其逻辑关系如图 3-72 (b) 所示，图中各量之间的关系是

$$Y = AX + B + C \quad (3-10)$$

式中  $Y$ ——综合给定信号；  
 $X$ ——主给定信号；  
 $A$ ——频率增益；  
 $B$ ——偏置频率；  
 $C$ ——辅助给定信号。

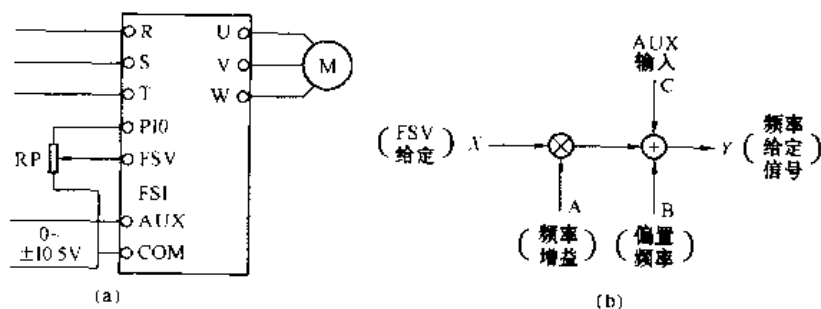


图 3-72 比例连锁给定

(a) 接线；(b) 逻辑关系

### 2. 应用实例

在纺织、印染以及造纸机械中，往往具有许多单元，每个单元都有各自独立的拖动系统，如图 3-73 所示。在这种情况下，总是要求被加工物在各单元的线速度一致，即

$$v_1 = v_2 = v_3$$

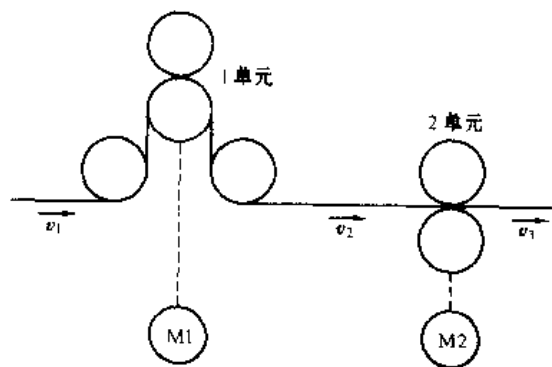


图 3-73 多单元同步运行

显然，如果后面的速度低于前面的，将导致被加工物的堆积；反之，如果后面的速度高于前面的，将导致被加工物的撕裂。因此，要求各单元的运行速度能够步调一致，即实现同步运行。

如图 3-74 所示，同步信号采用调节辊取出。调节辊的位置取决于前后单元的布速：如后面单元比前面单元快，则调节辊上升；反之，则调节辊下降。调节辊与可变电阻  $RP$  的

活动端 O' 相联，从而在 O' 点得到与调节辊位置成比例的信号，也就是前后单元之间转速差异的信号。为了使可变电阻不易磨损，较老的机械上采用容量较大的磁盘变阻器。近年来，已有无触点电位器问世，则以采用无触点电位器为宜。

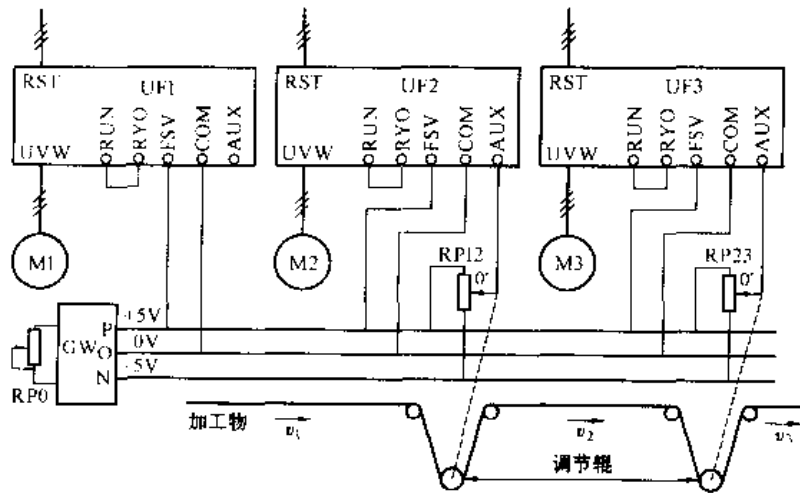


图 3-74 自动同步控制

把电位器的两个固定端接到一个直流电源上，即可从电位器的活动端取出同步信号。

### 3. 电路特点

(1) 控制电源。由 +5V、0V、-5V 的可调直流电源构成，其输出电压由电位器 RPO 进行调节，正、负电压同步调节。

(2) 统调信号。将各变频器的主要给定端 FSV-COM 都接至可调直流电源的 +5V 和 0V 之间。当调节 RPO 时，各变频器的主给定信号同时改变，实现了统调。

(3) 各单元的微调。与各调节辊相联的电位器的固定端都接至 +5V 和 -5V 之间，活动端取出的信号接至各变频器的辅助给定信号端 AUX-COM。1 单元是主令单元，不需要进行微调。

所用变频器是明电 VT230S 系列（日）的，通过预置，合成给定信号  $X_{\Sigma}$  由主给定信号  $X_F$  和辅助给定信号  $X_A$  相减而得，即

$$X_{\Sigma} = X_F - X_A \quad (3-11)$$

### 4. 工作过程

以第 1、2 单元之间的同步为例，说明如下：

如  $v_2 > v_1$ ，调节辊上移，同步信号向电源的“+”端偏移，则  $X_A$  为“+”，由式 (3-11)，2 单元变频器 UF2 的合成给定信号  $X_{\Sigma}$  减小，2 单元的转速将下降；

如  $v_2 < v_1$ ，调节辊下移，同步信号向电源的“-”端偏移，则  $X_A$  为“-”，由式 (3-11)，2 单元变频器 UF2 的合成给定信号  $X_{\Sigma}$  增大，2 单元的转速将上升。

后面的单元以此类推。

## 二、升、降速的特殊功能

### (一) 齿隙补偿功能

当传动机构中有齿轮箱的情况下，电动机从静止状态刚开始升速，以及从运行状态刚开始降速时，齿轮间将发生撞击，影响齿轮的寿命。为此，有的变频器专门设置了齿隙补偿功

能，以三菱 FR-A500 系列变频器（日本）为例，其功能设置如图 3-75 所示。

当电动机从停止状态开始升速时，预置一个较低的上升频率  $\Delta f_1$  和维持时间  $\Delta t_1$ ，使电动机在极低的频率  $\Delta f_1$  下运行一个短时间  $\Delta t_1$ ，然后再按预置的升速时间升速，从而避免了齿轮间的撞击。反之，当电动机从运行状态开始降速时，预置一个较低的下降频率  $\Delta f_2$  和维持时间  $\Delta t_2$ ，以达到避免齿轮间撞击的目的。

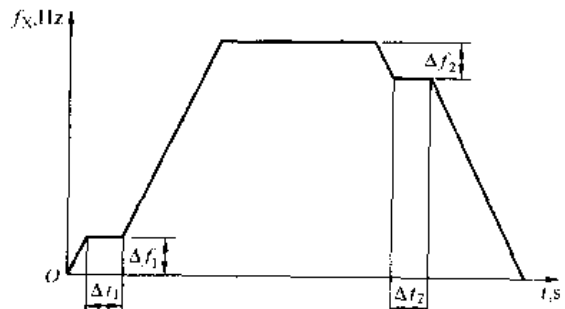


图 3-75 齿隙补偿功能

## (二) 断电后的减速功能

### 1. 功能的含义

大多数变频器在断电后，变频器将因发生“欠压”故障而把逆变电路封锁，停止输出。这时，电动机将处于自由制动状态。但有的生产机械不希望出现自由制动的状态，例如，水泵在变频器停止输出时，将会迅速停住，产生“水锤现象”，对水泵、阀门和管路等具有破坏作用。为此，有的变频器在停电或低电压的情况下，也可以按预置的降速时间进行降速，如图 3-76 所示。

### 2. 功能的设置

以三菱 FR-A500 系列变频器（日本）为例，其预置功能的步骤如下：

- (1) 选择断电后的“降速停机”方式；
- (2) 预置刚开始断电时的起始频率降  $\Delta f$ ；
- (3) 预置断电后的降速时间  $t_{d1}$  和  $t_{d2}$ ；
- (4) 预置改变降速时间的切换频率  $f_{xc}$ 。

## 三、特殊控制功能

### (一) 多挡转速控制中的模拟量给定

#### 1. 转速特点

大多数变频器中，多挡转速控制中的各挡转速，都只能预置为一个固定的转速。但有的变频器可以将前几挡转速（最多 3 挡）预置为由模拟量给定的可调转速。

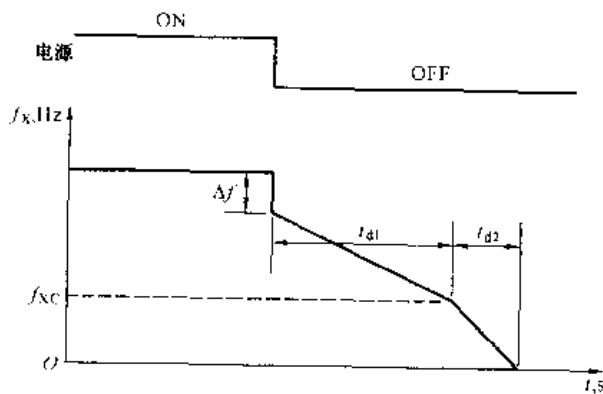


图 3-76 断电后的减速功能

### 2. 具体例子

以安川 G7 系列变频器（日本）为例，如图 3-77 所示，当输入控制端 S5、S6、S7 预置为多挡转速时，通过功能预置，可使第 1~3 挡转速由电位器 RP1、RP2、RP3 来进行调节，如表 3-3 所示。

表 3-3

八挡转速与输入端状态的关系

转速挡	S5	S6	S7	可选频率
	KA1 状态	KA2 状态	KA3 状态	
1	OFF	OFF	OFF	频率 1，或由 A1 给定信号决定



续表

转速挡	S5	S6	S7	可选频率
	KA1 状态	KA2 状态	KA3 状态	
2	ON	OFF	OFF	频率 2, 或由 A2 给定信号决定
3	OFF	ON	OFF	频率 3, 或由 A3 给定信号决定
4	ON	ON	OFF	频率 4
5	OFF	OFF	ON	频率 5
6	ON	OFF	ON	频率 6
7	OFF	ON	ON	频率 7
8	ON	ON	ON	频率 8

## (二) 下垂功能

### 1. 下垂特性及其作用

有的生产机械, 需要有 2 台或 2 台以上的电动机同时拖动。例如, 桥式起重机的“大车”, 通常在两侧各设一台容量相同的电动机, 由该两台电动机同时拖动。在这种情况下, 非但要求两台电动机的转速同步, 而且要求它们的负荷分配尽量均衡。

解决上述问题的常用方法, 是选用转子绕组的电阻值较大的“高阻电动机”。其机械特性曲线如图 3-78 (a) 中之曲线②所示 (曲线①是普通电动机的自然机械特性), 在额定转矩下运行时, 转差较大, 故称为“下垂特性”。

下垂特性能够自动协调两台电动机的转速和负荷分配。说明如下:

假设电动机 M1 的转速偏高, 为  $n_1$ ; 而电动机 M2 的转速偏低, 为  $n_2$ 。由图可知, M1 的电磁转矩  $T_1$  较小, 从而其转速必将下降; 而 M2 的电磁转矩  $T_2$  则较大, 其转速必将上升。从而使两台电动机的转速趋于同步, 而负荷分配也趋于均衡。

不少变频器通过功能预置, 可以使普通的异步电动机人为地得到“下垂特性”, 并且所得到的下垂特性控制方便, 易于调整。

### 2. 下垂增益功能

由于不同机械对于下垂特性的“下垂度”的要求也往往各不相同。为了满足不同用户的不同要求, 变频器可以通过预置“下垂增益”, 得到所要求的下垂特性曲线。如图 3-78 (b) 所示。

### 3. 下垂死区

为了防止两台电动机在自动调整过程中出现转速上下波动的振荡现象, 在例如东芝 VF-A7 系列变频器 (日本) 中, 还具有设置“死区”的功能。就是说, 允许两台电动机在一个小范围内有所差异。根据负载性质的不同, 变频器可以预置两种死区:

(1) 转矩死区。即允许两台电动机在相同的转速下, 负荷的分配不完全均衡, 而存在较小的转矩差异 ( $\Delta T$ ), 如图 3-78 (c) 所示。

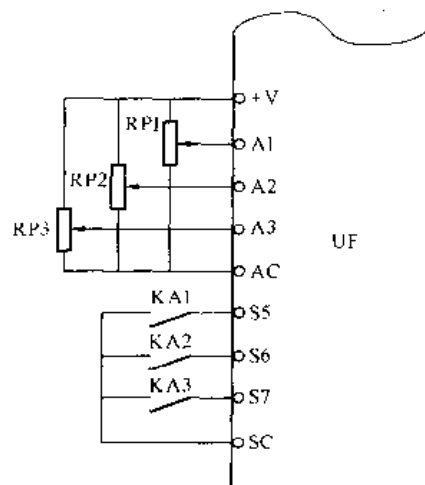


图 3-77 多挡转速中的模拟量给定

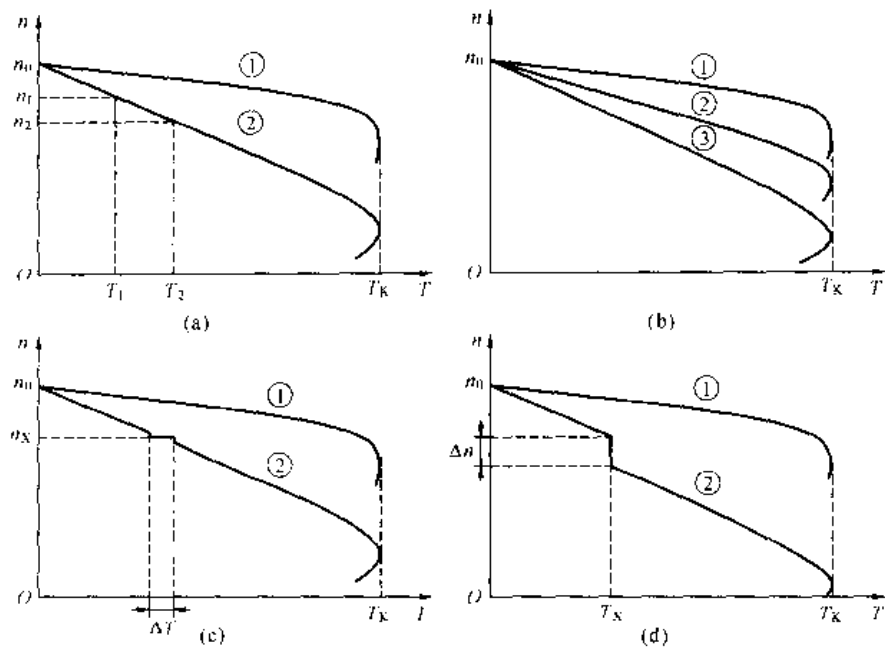


图 3-78 下垂特性

(a) 下垂机械特性；(b) 不同下垂增益的机械特性；(c) 具有转矩死区的特性；  
(d) 具有转速死区的特性

(2) 转速死区。即允许两台电动机在转矩相同的情况下，它们的转速不完全一致，存在转速差异 ( $\Delta n$ )，如图 3-78 (d) 所示。

## 变频器的外接主电路与配件

## 第一节 外接主电路与主要电器的选择

## 一、外接主电路的结构

在实际应用中，变频器还需要和许多外接的配件一起使用，图 4-1 所示是单独控制的外接主电路。

## (一) 变频器的主电路接线端

## 1. 输入端

输入端即电源进线端。大多数变频器的进线端都用 R、S、T 表示。

## 2. 输出端

输出端即接至电动机的出线端，大多数变频器都用符号 U、V、W 表示，如图 4-1 (a) 所示。

## (二) 主要电器及功能

## 1. 空气断路器

空气断路器的主要功能有：

(1) 隔离作用。当变频器需要检修时，或者因某种原因而长时间不用时，将 Q 切断，使变频器与电源隔离。

(2) 保护作用。当变频器的输入侧发生短路等故障时，进行保护。

## 2. 接触器

接触器的主要功能有：

(1) 可通过按钮开关方便地控制变频器的通电与断电。

(2) 变频器发生故障时，可自动切断电源。

由于变频器有比较完善的过电流和过载保护功能，且空气断路器也具有过流保护功能，故进线侧可不必接熔断器。

又因为变频器内部具有电子热保护功能，故在只接一台电动机的情况下，可不必接热继电器。

## 二、主要电器的选择

## (一) 空气断路器 (Q)

现代的空气断路器都具有过电流保护功能，选用时应充分考虑电路中是否有正常过电流，以防止过电流保护功能的误动作。

## 1. 在变频器单独控制的主电路中

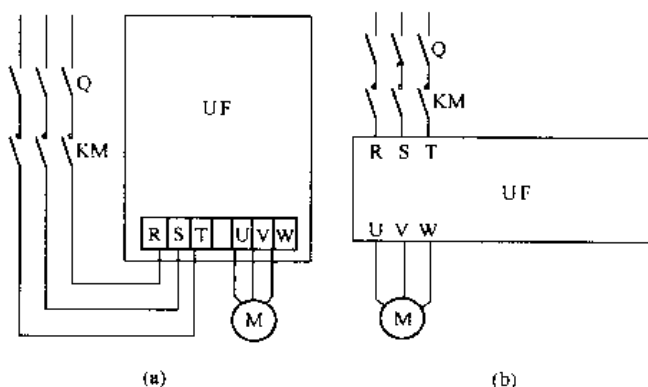


图 4-1 变频器的外接主电路

(a) 实际接线；(b) 电路符号

Q—空气断路器；KM—接触器的主触点；UF—变频器

属于正常过电流的情况有：

- (1) 变频器在刚接通电源的瞬间，对电容器的充电电流可高达额定电流的 2~3 倍。
- (2) 变频器的进线电流是脉冲电流，其峰值常可能超过额定电流。
- (3) 变频器允许的过载能力为 150%， $I_{min}$ 。

所以，为了避免误动作，空气断路器的额定电流  $I_{QN}$  应选

$$I_{QN} \geq (1.3 \sim 1.4) I_N \quad (4-1)$$

式中  $I_N$ ——变频器的额定电流，A。

## 2. 在切换控制的主电路中

因为电动机有可能在工频下运行，故应按电动机在工频下的启动电流来进行选择，即

$$I_{QN} \geq 2.5 I_{MN} \quad (4-2)$$

式中  $I_{MN}$ ——电动机的额定电流。

## (二) 接触器

### 1. 输入接触器 (KM1)

由于接触器自身并无保护功能，不存在误动作的问题。故选择原则是，主触点的额定电流  $I_{KN}$  只需不小于变频器的额定电流即可，即

$$I_{KN} \geq I_N \quad (4-3)$$

### 2. 输出接触器 (KM2)

因为变频器的输出电流中含有较强的谐波成分，其有效值略大于工频运行时的有效值，故主触点的额定电流  $I_{KN}$  应满足

$$I_{KN} \geq 1.1 I_{MN} \quad (4-4)$$

### 3. 工频接触器 (KM3)

工频接触器的选择应考虑到电动机在工频下的启动情况，其触点电流通常可按电动机的额定电流再加大一档（接触器的额定电流挡）来选择。

## (三) 保护电器

### 1. 熔断器 (FU)

可仿照空气断路器的选择方法来选。

### 2. 热继电器 (KH)

热继电器发热元件的额定电流可按下式选择：

$$I_{RN} \geq (1.1 \sim 1.15) I_{MN} \quad (4-5)$$

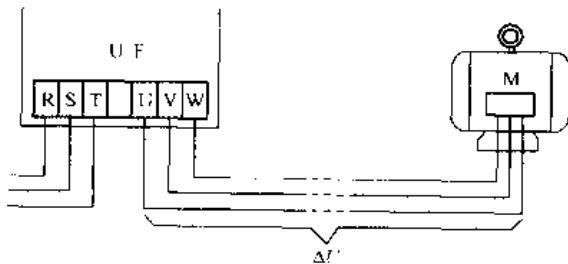


图 4-2 输出线压降

## (四) 主电路线径的选择

### 1. 电源与变频器之间的导线

一般来说，与同容量普通电动机的电线选择方法相同。考虑到其输入侧谐波电流较多，功率因数往往较低，应本着宜大不宜小的原则来决定线径。

### 2. 变频器与电动机之间的导线

因为频率下降时，电压也要下降，在电流相等的情况下，线路电压降  $\Delta U$  在输出电压中占的比例将上升，而电动机得到电压的比例则下降，有可能导致电动机带不动负载并发热。

所以，在决定变频器与电动机之间导线的线径时，最关键的因素便是线路电压降  $\Delta U$  的影响。一般要求

$$\Delta U \leq (2\% \sim 3\%) U_N \quad (4-6)$$

$\Delta U(V)$  的计算公式是

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} I_{MN} R_0 l}{1000} \quad (4-7)$$

式中  $I_{MN}$ ——电动机的额定电流，A；  
 $R_0$ ——单位长度导线的电阻， $m\Omega/m$ ；  
 $l$ ——导线的长度，m。

为了便于读者进行选择，今将常用电动机引出线的单位长度电阻值列于表 4-1 中。

表 4-1 电动机引出线的单位长度电阻值

标称截面 ( $mm^2$ )	1.0	1.5	2.5	4.0	6.0	10.0	16.0	25.0	35.0
$R_0$ ( $m\Omega/m$ )	17.8	11.9	6.92	4.40	2.92	1.73	1.10	0.69	0.49

### 3. 实例

某电动机的主要额定数据如下： $P_{MN} = 30kW$ ， $U_{MN} = 380V$ ， $I_{MN} = 57.6A$ ， $n_{MN} = 1460r/min$ 。变频器与电动机之间的距离为 60m，原选导线截面为  $10mm^2$ ，采用变频调速后，线径是否需要加粗？

解

由式 (4-6) 可知，允许的电压降为

$$\Delta U = 0.02 \times 220 = 4.4 \text{ (V)}$$

又由式 (4-7) 有

$$4.4 = \frac{\sqrt{3} \times 57.6 \times R_0 \times 60}{1000}$$

解得

$$R_0 = 0.735 \text{ (m}\Omega/m\text{)}$$

由表 4-1 可知，导线截面应加粗为  $25mm^2$ 。

## 第二节 制动电阻及制动单元

关于制动电阻和制动单元的作用，在第二章第四节中已经介绍过了，这里介绍其具体选用问题。

### 一、制动电阻的阻值

#### (一) 准确计算制动电阻的方法

准确计算制动电阻值是十分麻烦的，在实际工作中基本不用。但通过对准确计算制动电阻的分析，可以清楚地了解与选择制动电阻有关的因素。

1. 电动机在  $t_d$  时间内从  $n_{M1}$  降至  $n_{M2}$  所需的制动转矩

$$T_B = \frac{GD^2(n_{M1} - n_{M2})}{375t_d} - T'_L \quad (4-8)$$

式中  $T_B$ ——所需要的制动转矩， $N \cdot m$ ；

$GD^2$ ——拖动系统的飞轮力矩（包括电动机、传动机构和负载的飞轮力矩的总和），

$N \cdot m^2$ ;

$n_{M1}$ ——降速前的电动机转速, r/min;

$n_{M2}$ ——降速后的电动机转速, r/min;

$t_J$ ——转速从  $n_1$  降至  $n_2$  所需的时间, s;

$T'_L$ ——负载阻转矩的折算值,  $N \cdot m$ 。

此外, 电动机内部的损失功率也能产生约 20%  $T_{MN}$  的制动转矩, 在计算制动电阻时,  $T_B$  中应减去 20%  $T_{MN}$ 。

## 2. 制动电阻的计算值

$$R_B = \frac{9.55 U_{DH}^2}{(T_B - 0.2 T_{MN}) n_{M1}} \quad (4-9)$$

式中  $R_B$ ——制动电阻的计算值,  $\Omega$ ;

$U_{DH}$ ——直流回路电压的允许上限值, V;

$T_{MN}$ ——电动机的额定转矩。

在计算式 (4-9) 时, 需要说明的是:

(1) 关于直流电压的上限值  $U_{DH}$ 。在三相线电压为 380V 的情况下, 根据国家对电压波动上限值的规定, 有

$$U_{DH} \geq 380 \times \sqrt{2} \times 1.1 = 591 \text{ (V)} \approx 600\text{V}$$

但大多数变频器中, 对于制动单元的动作电压, 均取  $U_{DH} = 700\text{V}$ 。

(2) 关于降速前的电动机转速  $n_{M1}$ 。生产机械在运行过程中,  $n_{M1}$  常常是变化的, 是不大可能确定的。在实际计算中, 可以用电动机的额定转速  $n_{MN}$  代入。

(3) 关于飞轮力矩  $GD^2$ 。在公式 (4-8) 中的飞轮力矩, 可参照第一章第八节中图 1-41 所介绍的方法测量。

### (二) 制动电阻的近似计算法

上面介绍的计算制动电阻的方法, 虽然比较准确, 但也相当麻烦。从实际应用的角度看, 必要性也不大。因此, 许多变频器的使用说明书上, 给出了一些近似计算的方法。也有的直接提供了供用户选用的制动电阻的规格, 今介绍如下。

#### 1. 方法 1 [见 VLT5000 变频器 (丹麦)]

$$R_B = \frac{478801}{P_{MN}} \quad (4-10)$$

式中  $P_{MN}$ ——电动机的额定容量, W。

式 (4-10) 中的常数“478801”是按  $U_{DH} = 850\text{V}$  计算而确定的, 如要减小  $U_{DH}$  值, 可按比例减小。根据式 (4-10) 的计算结果选用制动电阻时, 所得到的制动转矩  $T_B$  约为电动机额定转矩  $T_{MN}$  的 1.6 倍, 即

$$T_B \approx 1.6 P_{MN} \quad (4-11)$$

#### 2. 方法 2 [见明电 VT230S 变频器 (日本)]

$$R_B = \frac{593}{T_B} \quad (4-12)$$

式中  $T_B$ ——所需要的制动转矩。

式 (4-12) 中的常数“593”是针对 400V 级别变频器的。

3. 方法3 (根据各说明书提供的数据统计而得)

当通过制动电阻的电流等于电动机额定电流的50%时, 所得到的制动转矩约等于电动机的额定转矩, 归纳如下:

$$\text{如 } I_B = \frac{U_{DH}}{R_B} = 0.5 I_{MN} \quad (4-13)$$

$$R_B = \frac{2 U_{DH}}{I_{MN}} \quad (4-14)$$

$$\text{则 } T_B \approx T_{MN} \quad (4-15)$$

### (三) 制动电阻的取值范围

各变频器生产厂家为了减少制动电阻的阻值档次, 常对若干种不同容量的电动机提供相同阻值的制动电阻。因此, 在制动过程中所得到的制动转矩的差异是较大的。统计的结果表明:

1. 制动转矩的取值范围

$$T_B = (0.8 \sim 2.0) T_{MN} \quad (4-16)$$

2. 制动电阻的取值范围

$$R_B = \frac{2.5 U_{DH}}{I_{MN}} \sim \frac{U_{DH}}{I_{MN}} \quad (4-17)$$

由此也可看出, 制动电阻的大小, 是允许在一定范围内变动的。

## 二、制动电阻的容量

(一) 决定电阻容量的依据

1. 电阻的温升曲线

决定电阻容量的最根本依据便是其发热状况必须在允许范围内。

和其他任何物体的发热过程一样, 电阻的温升曲线也是指数曲线, 如图4-3所示。图中, 横坐标是制动电阻的通电时间  $t_B$ , 纵坐标是温升  $\theta$ 。  $\theta_s$  是稳定温升, 与电动机相比, 由于其散热条件往往较差, 故  $\theta_s$  的值要高得多;  $\tau$  是发热时间常数, 与电动机相比, 电阻的发热时间常数较小, 通常为数秒到数十秒。

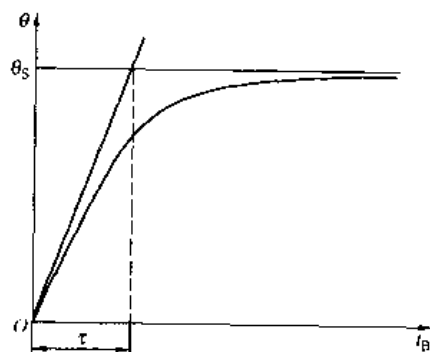


图4-3 制动电阻的温升曲线

2. 降速过程中的平均功率

电动机的降速过程, 实质上是释放动能的过程, 也是机械功率下降的过程。所以, 制动电阻在降速时间内消耗的平均功率可由下式计算:

$$P_{BA} = \frac{(T_B - 0.2 T_{MN}) n_A}{9550} \quad (4-18)$$

$$n_A = \frac{n_{M1} + n_{M2}}{2} \quad (4-19)$$

式中  $P_{BA}$ —— $R_B$  在降速时间内消耗的平均功率, kW。

$n_A$ ——制动过程中, 电动机的平均转速。

公式(4-18)虽然是一种比较准确的计算方法, 但存在着两个问题:

(1)  $T_B$  不易计算, 已如前述。

(2) 在实际运行时, 制动电阻的通电时间是由直流电压的上升过程以及制动单元的通、断状况来决定的。这与储能电容器的容量以及制动单元所设定的电压上限值的大小有关。就是说, 制动电阻中实际消耗的平均功率和上述计算结果之间还有差异。因此, 上述计算只能作为理论分析的依据。

## (二) 电阻容量的实际估算法

### 1. 电阻通电时的消耗功率

当制动电阻接入电路时, 它所消耗的电功率  $P_{B0}$  是

$$P_{B0} = \frac{U_{BH}^2}{R_B} \quad (4-20)$$

### 2. 电阻容量的修正

由于在大多数情况下, 能耗电路只是断断续续地工作。因此, 只要制动电阻的温升不超过允许值, 其容量可以进行如下适当修正:

$$P_B = \frac{P_{B0}}{\gamma_B} \quad (4-21)$$

式中  $\gamma_B$ ——修正系数。

### 3. 较准确的修正

(1) 不反复降速时  $\gamma_B$  的取值。所谓不反复降速, 就是一次降速后, 在短时间内, 不再降速, 如图 4-4 (a) 所示。

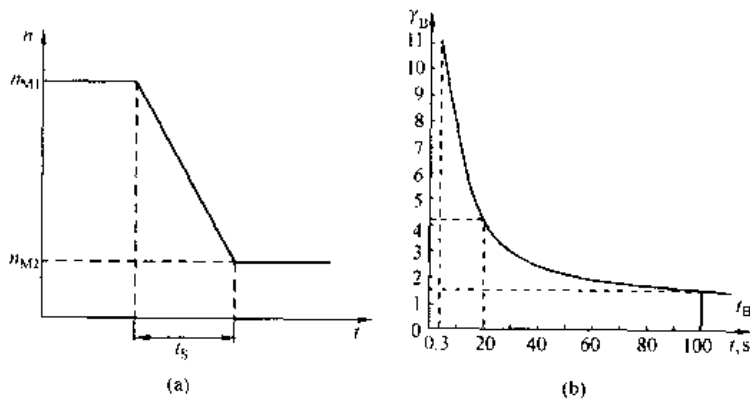


图 4-4 不反复降速时的  $\gamma_B$

(a) 不反复降速的含义; (b)  $\gamma_B$  的取值

$\gamma_B$  的取值大致如图 4-4 (b) 所示, 这实际上是图 4-3 所示的电阻温升曲线的倒置。由图可以看出:

- 1) 如降速时间  $t_B < 0.3$  s, 则取  $\gamma_B = 11$ 。
- 2) 如降速时间  $0.3$  s  $< t_B < 20$  s, 则  $\gamma_B$  的取值基本上按比例下降。这是因为, 在这样短的时间内, 电阻的温升基本上按线性规律上升。
- 3) 如降速时间  $t_B > 20$  s, 由于电阻的温升曲线开始接近稳定温升, 故  $\gamma_B$  的取值减小得比较缓慢。

(2) 反复降速时  $\gamma_B$  的取值。反复降速的工况如图 4-5 (a) 所示, 拖动系统的升速与降速是反复进行的。



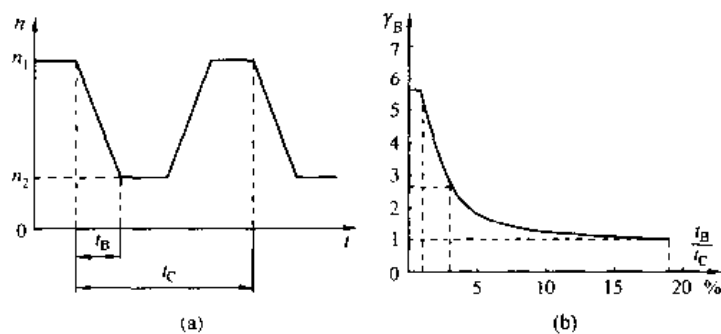


图 4-5 反复降速时的  $\gamma_B$

(a) 反复降速的含义; (b)  $\gamma_B$  的取值

$t_B$ —每次降速所需时间;  $t_C$ —每个降速周期所需时间

- 1) 如  $t_B/t_C \leq 0.01$ , 则取  $\gamma_B = 5$ ;
- 2) 如  $0.01 < t_B/t_C < 0.03$ ,  $\gamma_B$  基本上按比例下降;
- 3) 如  $t_B/t_C > 0.03$ , 则  $\gamma_B$  的取值开始缓慢地减小。

#### 4. 粗略修正

上述修正方法虽然比较准确, 但图 4-4 和图 4-5 所示曲线通常不易得到。一般来说, 根据各变频器说明书所提供相关数据的统计结果,  $\gamma_B$  的取值范围大致如下:

$$P_{MN} \leq 18.5\text{kW} \rightarrow \gamma_B = 5 \sim 9; \quad P_{MN} \geq 22\text{kW} \rightarrow \gamma_B = 2.5 \sim 4。$$

### 三、按照说明书选择制动电阻时的注意事项

如前述, 变频器生产厂为了减少制动电阻档次, 常常对若干种不同容量的电动机提供相同阻值和容量的制动电阻。例如, 艾默生 TD3000 系列变频器说明书中, 对于配用电动机容量为 22kW、30kW 和 37kW 的变频器, 所提供的制动电阻规格, 都是 3kW、20Ω。选用时, 应注意根据生产机械的具体情况进行调整。

#### (一) 关于电阻值的调整

##### 1. 制动转矩的估算

(1) 制动电流。通常, 制动单元在直流电压为 700V 时导通, 则制动电流为

$$I_B = \frac{700}{20} = 35\text{A}$$

(2) 电动机的额定电流。设所用电动机为 Y 系列的 4 极电动机, 则:

当  $P_{MN} = 22\text{kW}$  时,  $I_{MN} \approx 42.5\text{A}$ ;

当  $P_{MN} = 30\text{kW}$  时,  $I_{MN} \approx 56.8\text{A}$ ;

当  $P_{MN} = 37\text{kW}$  时,  $I_{MN} = 69.8\text{A}$ 。

(3) 制动转矩的估算。按照式 (4-13) 和式 (4-15), 则:

$$P_{MN} = 22\text{kW} \rightarrow I_B = 0.82 I_{MN} \rightarrow T_B \approx 1.64 T_{MN};$$

$$P_{MN} = 30\text{kW} \rightarrow I_B = 0.62 I_{MN} \rightarrow T_B \approx 1.24 T_{MN};$$

$$P_{MN} = 37\text{kW} \rightarrow I_B = 0.50 I_{MN} \rightarrow T_B \approx 1.00 T_{MN}。$$

##### 2. 调整电阻值的原则

(1) 对于同一挡中电动机容量较小者。如前述, 在制动电阻相同的情况下, 电动机容量较小者, 制动转矩与额定转矩的比值偏大。为了减少能量的消耗, 应根据制动过程的缓急程

度以及飞轮力矩的大小，考虑能否选择阻值较大一档的制动电阻。

例如，电动机的容量为 22kW，拖动系统的飞轮力矩并不大，生产机械要求的制动过程又较缓，如选择阻值为 40Ω 的制动电阻，则：

$$I_B = 17.5A = 0.41 I_{MN} \rightarrow T_B \approx 0.82 T_{MN}, \text{ 应该是能够满足要求的。}$$

(2) 对于同一挡中电动机容量较大者。由于制动电阻相同的情况下，电动机容量较大者，制动转矩与额定转矩的比值相对偏小。在一些飞轮力矩较大，又要求快速制动的场合，或者如起重机械那样，需要释放位能的场合，上述制动电阻有可能满足不了要求，可考虑选择阻值较小一档的制动电阻。

例如，当电动机的容量为 37kW 时，如需要增大制动转矩，可选择 10Ω 的制动电阻，则：

$$I_B = 70A \approx I_{MN} \rightarrow T_B \approx 2 T_{MN}, \text{ 制动转矩是足够大的。}$$

## (二) 关于电阻容量的调整

### 1. 修正系数的计算

(1) 电阻的通电功率。由式 (4-20) 有

$$P_{R0} = \frac{(700)^2}{20} = 24500 \text{ (W)} = 24.5 \text{ kW}$$

(2) 修正系数。由式 (4-21) 可得

$$\gamma_R = \frac{P_{R0}}{P_B} = \frac{24500}{3000} = 8.17$$

### 2. 对修正系数的修正

(1) 不反复降速的场合。根据图 4-4 (b) 所示曲线，如降速时间  $t_B < 8s$ ，则  $\gamma_R = 8.17$  是可用的。在大多数情况下，8s 的降速时间是足够的。

(2) 反复降速的场合。根据图 4-5 (b) 所示曲线，当  $\gamma_B = 8.17$  时，只能用于  $t_B/t_C < 0.01$  的情况下。在实际工作中，可以这样推算：首先估计每次降速所需时间，设  $t_B = 4s$ ，则只要每个周期的时间  $t_C < 400s = 6.7 \text{ min}$ ，便是可用的。在多数工况下，这是足够的。但对于某些需要频繁点动的场合，则有必要另行估算了。

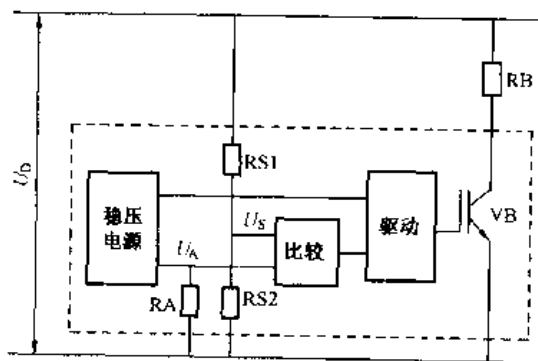


图 4-6 制动单元

(3) 起重机械下放重物的场合。起重机械在下放重物的整个过程中，电动机一直处于再生制动状态，故制动电阻的运行时间将较长，通常取  $\gamma_B = 1$ 。

## 四、制动电阻和制动单元的接线

### (一) 制动单元的构成

#### 1. 制动单元的功能与构成

制动单元的功能是：当直流回路的电压  $U_D$  超过规定的限值时，接通耗能电路，使直流回路通过制动电阻  $R_B$  释放能量。其基本构成如图 4-6 的虚线框所示，分述如下：

(1) 功率管。用于接通与关断耗能电路，是制动单元的主体。

(2) 电压取样与比较电路。由于功率管 VB 的驱动电路是低压电路，故只能通过电阻  $RS1$  和  $RS2$  进行分压，按比例取出  $U_D$  的一部分  $U_S$  作为采样电压，和稳定不变的基准电压

$U_A$  进行比较, 得到控制 VB 导通或截止的指令信号。基准电压  $U_A$  的大小应与  $U_D$  的限值成比例。

(3) 驱动电路。驱动电路用于接受比较电路发出的指令信号, 驱动 VB 导通或截止。

## 2. 功率管 VB 的选择

(1) 集电极最大电流。通常, 可按制动电流的两倍来计算, 即

$$I_{CM} \geq \frac{2U_D}{R_B} \quad (4-22)$$

(2) 击穿电压。由于 VB 的负载是电阻负载, 在导通和截止过程中, 基本上没有附加电动势, 故击穿电压可以略低一些。当电源电压为 380V 时, 取

$$U_{CEO} = 1000 \sim 1200V$$

## (二) 制动电阻和制动单元的实际接线

### 1. 无内接能耗电路的变频器

配用电动机容量大于 7.5kW 的变频器, 通常都没有内接的能耗电路, 其接线方法如图 4-7 (a) 所示。

制动电阻的阻值和容量非但与降速时间有关, 还与降速或制动的频繁程度以及负载的性质有关, 不易准确地选择。如果选择不当, 或电阻值偏小, 或容量偏小, 都会使制动电阻过热。所以, 在制动电阻箱内, 应配置热继电器 KH, 进行保护。

### 2. 有内接能耗电路的变频器

部分配用电动机容量小于 7.5kW 的变频器, 具有内接能耗电路, 如图 4-7 (b) 所示。

但有时, 依靠内接能耗电路, 其制动电流偏小, 制动时间满足不了要求, 需要在外部另配制动电阻。

由于外接的制动电阻和内部的制动电阻是并联的, 而内部制动电阻的阻值通常是不知道的, 这更使外接的制动电阻的阻值难以确定。通常的做法是, 在接入外部制动电阻之前, 先要把内部制动电阻的连接线取下, 使内部制动电阻不再接入, 以免内、外制动电阻同时接入, 合成电阻过小, 损坏内部的制动单元。

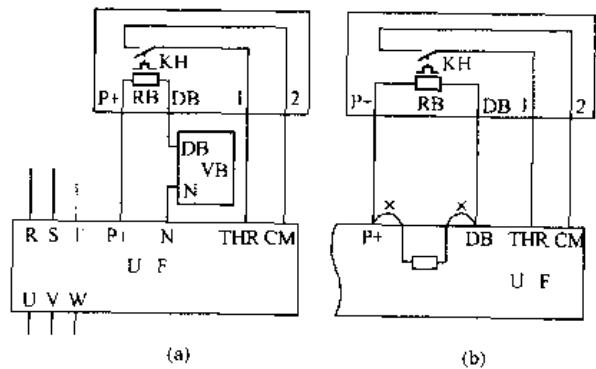


图 4-7 能耗电路的接线

(a) 无内接能耗电路; (b) 有内接能耗电路

RB—制动电阻; VB—制动单元

## 第三节 变频器的功率因数及其改善

### 一、变频器的功率因数

#### (一) 变频器输入电流的波形

##### 1. 输入电流波形

如前所述, “交一直一交、电压型”变频器的输入侧是整流和滤波电路。显然, 只有当电源线电压的瞬时值  $u_L$  大于电容器两端的直流电压  $U_D$  时, 整流桥中才有充电电流。因此, 充电电流总是出现在电源电压的振幅值附近, 呈不连续的冲击波形式, 如图 4-8 (c) 所示。

它具有很大的高次谐波成分。有关资料表明，输入电流中的5次谐波和7次谐波分量是很大的，如图4-8(d)所示。

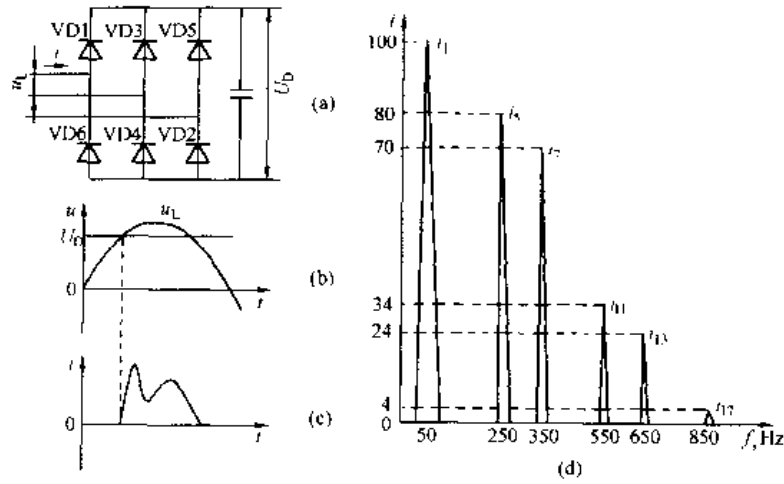


图4-8 输入电流的波形及其谐波分析

(a) 电路；(b) 电压波；(c) 电流波；(d) 谐波分析

## 2. 高次谐波电流消耗的功率

以5次谐波电流为例，它所消耗的功率瞬时值的大小等于5次谐波电流瞬时值和电压瞬时值的乘积，即

$$P_5 = ui_5 \quad (4-23)$$

式中  $P_5$ ——5次谐波电流的功率瞬时值，

W；

$u$ ——电压的瞬时值，V；

$i_5$ ——5次谐波电流，A。

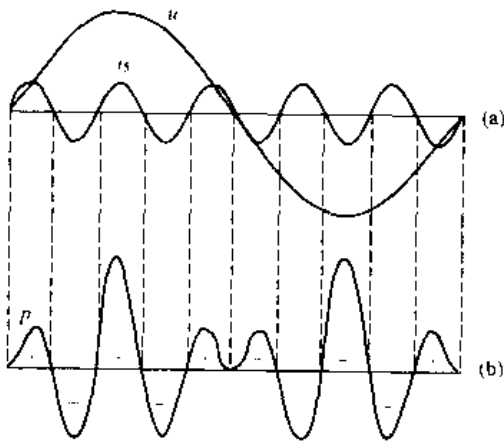


图4-9 谐波电流的功率

(a) 电压和5次谐波电流；(b) 5次谐波电流功率

图4-9(b)所示，即为由式(4-23)算得的功率曲线，由图可知，瞬时功率的一部分为“+”，另一部分为“-”。可以证明，在一个周期内，正功率的总和与负功率的总和正好相等，平均功率等于零。

所以，高次谐波电流的平均功率都等于零，属于无功功率。

## (二) 变频器的功率因数

### 1. 功率因数的定义

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = DF \cdot K_d \quad (4-24)$$

式中  $PF$ ——功率因数；

$P$ ——有功功率，kW；

$S$ ——视在功率，kVA；

$DF$ ——位移因数，等于电流基波分量与电压之间相位差角的余弦，即  $\cos\varphi$ ；

$K_d$ ——电流的畸变因数，等于电流基波分量的有效值与总有效值之比。

式(4-24)表明,产生无功功率的原因有两种:

- (1) 电流与电压不同相;
- (2) 高次谐波电流。

## 2. 变频器的功率因数

变频器中,输入电流的基波分量基本上与电压同相,故  $DF \approx 1$ ; 但电流的畸变因数较低。所以,变频调速系统的功率因数较低,约为 0.7~0.75。

## 二、功率因数的改善

改善功率因数的基本途径是削弱高次谐波电流。比较有效的方法是,在输入电路内串入电抗器。根据接线位置的不同,主要有两种。

### (一) 交流电抗器 AL

交流电抗器在电路中的接法及构造如图 4-10 所示。

#### 1. 提高功率因数的效果

在只接交流电抗器的情况下,可将功率因数提高到 0.85 以上。

#### 2. 其他功能

(1) 削弱冲击电流。电源侧短暂的尖峰电压可能引起较大的冲击电流。交流电抗器将能起到缓冲作用。例如,在电源侧投入补偿电容(用于改善功率因数)的过渡过程中,可能出现较高的尖峰电压等。

(2) 削弱三相电源电压不平衡的影响。

#### 3. 常用交流电抗器的规格

常用交流电抗器的规格如表 4-2 所示。

表 4-2 常用交流电抗器的规格

电动机容量 (kW)	30	37	45	55	75	90	110	132	160	200	220
允许电流 (A)	60	75	90	110	150	170	210	250	300	380	415
电感量 (mH)	0.32	0.26	0.21	0.18	0.13	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05	0.05

### (二) 直流电抗器

直流电抗器在电路中的接法及构造如图 4-11 所示。

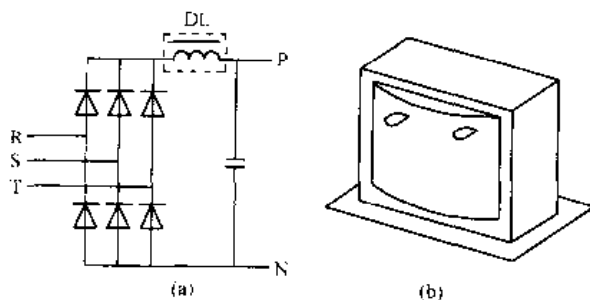


图 4-11 直流电抗器

(a) 在电路中的接法; (b) 构造

#### 1. 主要功能

直流电抗器可将功率因数提高至 0.9 以上。由于其体积较小,故不少变频器已将直流电抗器直接装在变频器内。

直流电抗器除了提高功率因数外,还可削弱在电源刚接通瞬间的冲击电流。如果同时配用交流电抗器和直流电抗器,则可将变频调速系统的功率因数提高至 0.95 以上。

#### 2. 常用直流电抗器的规格

常用直流电抗器的规格如表 4-3 所示。

表 4-3

常用直流电抗器的规格

电动机容量 (kW)	30	37 ~ 55	75 ~ 90	110 ~ 132	160 ~ 200	220	280
允许电流 (A)	75	150	220	280	370	560	740
电感量 (mH)	600	300	200	140	110	70	55

## 第四节 变频器的干扰及其防止

### 一、变频器的干扰问题

在变频器的输入和输出电路中，除上述较低次的谐波成分外，还有许多频率很高的谐波电流，这些高次谐波电流除了增加输入侧的无功功率、降低功率因数（主要是频率较低的谐波电流）外，频率较高的谐波电流将以各种方式把自己的能量传播出去，形成对其他设备的干扰信号，严重的甚至使某些设备无法正常工作。

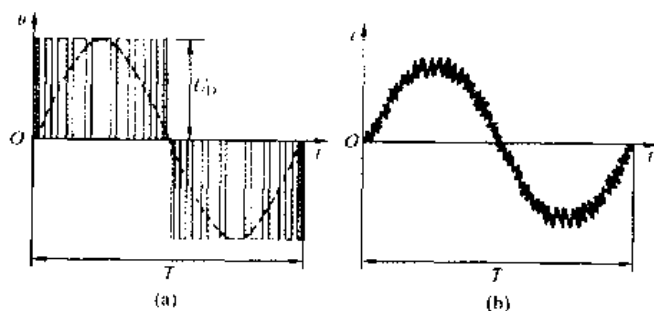


图 4-12 输出电压电流波形  
(a) 电压波形；(b) 电流波形

调制方式，其输出电压为占空比按正弦规律分布的系列矩形波，如图 4-12 (a) 所示。又由于电动机定子绕组的电感性质，其定子电流十分接近正弦波，但其中与载波频率相等的谐波分量仍较大，如图 4-12 (b) 所示。

### (二) 干扰信号的传播方式

大体上说，干扰信号的传播方式有以下几种。

#### 1. 电路传导方式

电路传导方式即通过相关电路传播干扰信号，具体的传播途径有：

(1) 通过电源网络传播。这是变频器输入电流干扰信号的主要传播方式。由于输入电流为非正弦波，当变频器的容量较大时，网络电压将产生畸变，影响其他设备工作。其传播途

### (一) 变频器的干扰源

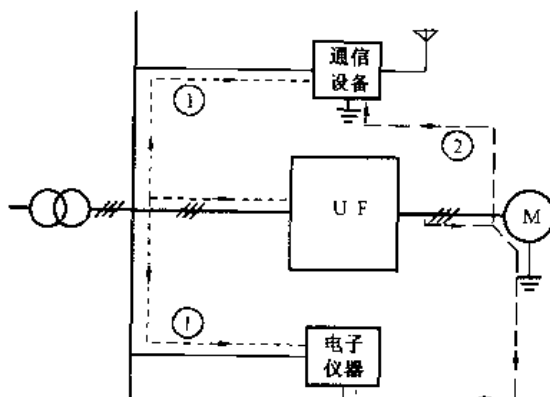
变频器干扰其他设备的根本原因，是因为其输入和输出电流中具有高次谐波成分，分述如下。

#### 1. 变频器的输入电流

如本章第三节所述，变频器的输入电流中具有很大的高次谐波成分。这些高次谐波电流除了影响功率因数外，也可能对其他设备形成干扰。

#### 2. 变频器的输出电流

由于绝大多数逆变桥都采用 SPWM



变频器输出的高频脉冲电压通过分布电容流向大地的漏电流是比较可观的，这些高频漏电流又通过地线而传播到其他设备。如图 4-13 中的虚线②所示。

### 2. 感应耦合方式

当变频器的输入电路或输出电路与其他设备的电路挨得很近时，变频器的高次谐波信号将通过感应的方式耦合到其他设备中去。感应的方式又有两种：

(1) 电磁感应方式。这是电流干扰信号的主要传播方式。由于变频器的输入电流和输出电流中的高频成分要产生高频磁场，该磁场的高频磁力线穿过其他设备的控制线路而产生感应干扰电流，如图 4-14 所示。

电磁感应方式产生的干扰电流，是以控制电路为回路的，并将迭加到控制电流上去，如图 4-14 右下角所示。

具有这种特点的干扰信号，通常称为差模干扰信号。

(2) 静电感应方式。这是电压干扰信号的主要传播方式。是变频器输出的高频电压波通过线路的分布电容传播给控制电路的，如图 4-15 所示。

静电感应方式产生的干扰电流在两根控制线内的瞬间电流将具有相同的方向，他们共同与大地构成回路，如图 4-15 右下角所示。

具有这种特点的干扰信号，通常称为共模干扰信号。

### 3. 空中辐射方式

频率很高的谐波分量具有向空中辐射电磁波的能力，从而对其他设备形成干扰。尤其对于通信设备的干扰更为严重，如图 4-16 所示。

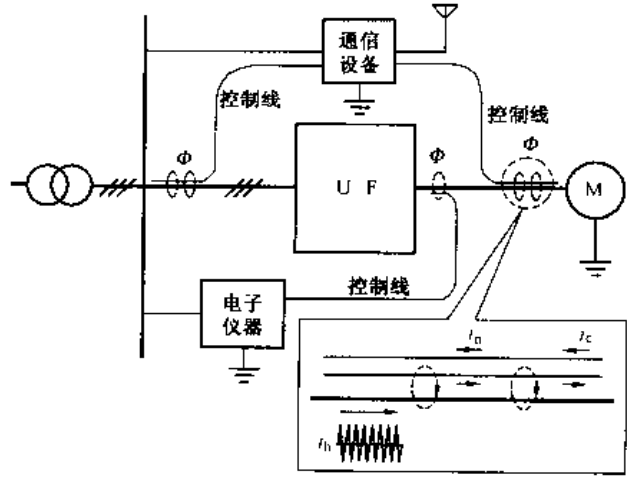


图 4-14 电磁感应传播方式

$i_n$ —变频器主电路电流中的高频成分； $i_c$ —其他设备的控制电流； $i_n$ —因电磁感应而产生的干扰电流

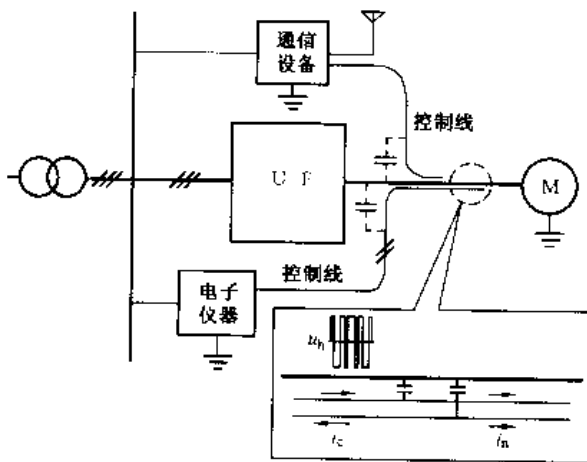


图 4-15 静电感应传播方式

$u_h$ —变频器输出电压的波形； $i_c$ —其他设备的控制电流； $i_n$ —因电磁感应而产生的干扰电流

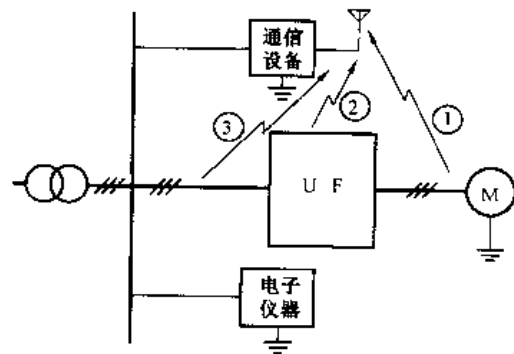


图 4-16 空中辐射方式

## 二、变频调速系统的抗干扰措施

### (一) 合理布线

合理布线能够在相当大程度上削弱干扰信号的强度，布线时，应遵循以下几个原则。

#### 1. 远离原则

干扰信号的大小与受干扰控制线和干扰源之间距离的平方成反比。有数据表明，如果受干扰的控制线距离干扰源 30cm，则干扰强度将削弱  $\left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right)$ 。

因此，各种设备的控制线应尽量远离变频器的输入、输出线。

#### 2. 相绞原则

两根控制线相绞，能够有效地抑制差模干扰信号。这是因为，两个相邻绞距中，通过电磁感应产生的干扰电动势的方向是相反的，如图 4-17 所示。

资料表明，控制线相绞后，其抑制差模干扰信号的效果与绞距有关：绞距越小，则抑制差模干扰信号的效果越好。

#### 3. 不平行原则

控制线如果和变频器的输入、输出线平行，则两者间的互感越大，分布电容也大，故电磁感应和静电感应的干扰信号也越大。

因此，控制线在空间上，应尽量和变频器的输入、输出线交叉，最好是垂直交叉。

### (二) 削弱干扰源

#### 1. 接入电抗器

(1) 输入电抗器。本章第三节已经介绍过，变频器在电源输入侧接入电抗器（包括交流电抗器和直流电抗器）后，可使输入电流的波形大为改善。这非但如第三节所说，能够显著地提高功率因数，同时，也非常有效地削弱了输入电流中的高次谐波成分对其他设备的干扰。

(2) 输出电抗器。变频器的输出侧一般不接电抗器，但在十分必要时，也可以接入输出电抗器，如图 4-18 所示。

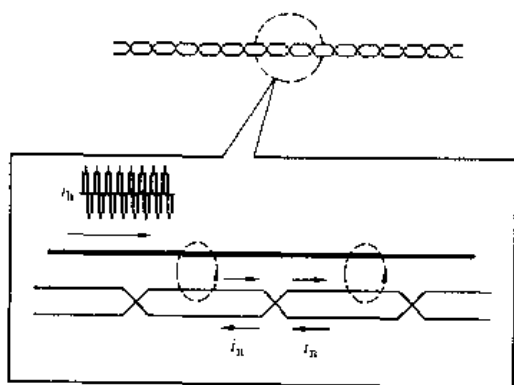


图 4-17 绞线的作用

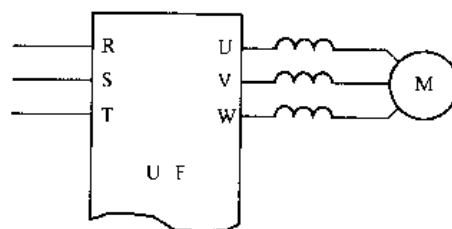


图 4-18 输出电抗器

对输出电抗器的要求是：在最高频率下工作时，电抗器上的电压降不得超过额定电压的 2% ~ 5%。因此，其计算公式如下：

$$L_0 = \frac{(2\% \sim 5\%) U_{MN}}{2\pi f_{\max} I_{MN}} \quad (4-25)$$



式中  $L_0$ ——变频器输出侧电抗器的电感量, H;

$U_{MN}$ ——电动机的额定电压, V;

$I_{MN}$ ——电动机的额定电流, A;

$f_{max}$ ——最高工作频率, Hz。

## 2. 接入滤波器

滤波器主要用于抑制具有辐射能力的频率很高的谐波电流, 串联在变频器的输入和输出电路中, 如图 4-19 (a) 所示, 其基本构成如图 4-19 (b) 所示, 主要由线圈和电容器组成。必须注意的是: 变频器输出侧的滤波器中, 其电容器只能接在电动机侧, 且应串入电阻, 以防止逆变管因电容器的充、放电而受到冲击。

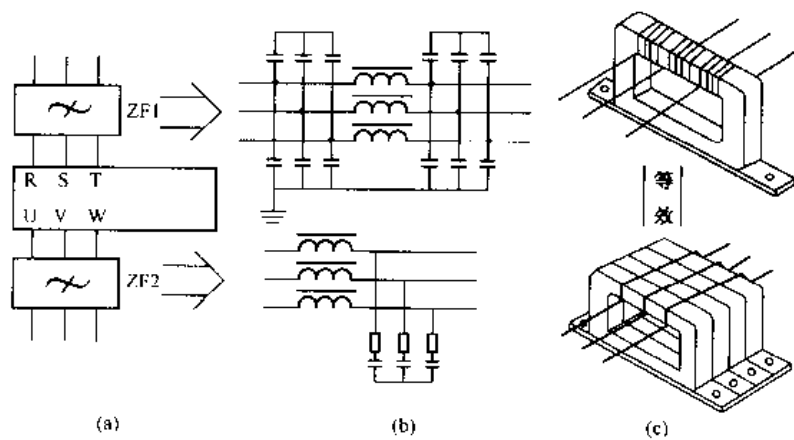


图 4-19 滤波器的构成

(a) 符号; (b) 内部电路; (c) 线圈结构

滤波电抗器的结构如图 4-19 (c) 所示, 由各相的连接线在同一个磁芯上按相同方向绕 4 圈 (输入侧) 或 3 圈 (输出侧) 构成。今说明如下:

(1) 三相的连接线必须按相同方向绕在同一个磁芯上, 这样, 其基波电流的合成磁场为零, 因而对基波电流毫无影响。

(2) 在一个磁芯上绕 4 圈和在四个磁芯上绕 1 圈是等效的。从而, 可根据连接线的粗细灵活地决定其加工方法。

## 3. 降低载波频率

变频器输出侧谐波电流的辐射能力、电磁感应和静电感应的能力都和载波频率有关。适当降低载波频率, 对于抑制干扰是有利的。

### (三) 对线路进行屏蔽

屏蔽的主要作用是吸收和削弱高频电磁场。

#### 1. 主电路的屏蔽

变频器到电动机之间的连接线, 应尽量穿入金属管内, 金属管应该接地, 如图 4-20 中的①所示。

主电路屏蔽, 主要是吸收和削弱干扰源向外辐射的能力。

#### 2. 控制电路的屏蔽

控制电路的屏蔽, 主要是防止外来的干扰信号窜入控制电路, 常用的方法是采用屏蔽

线。当控制线和变频器相接时，屏蔽层可不用接地，而只需将其中的一端接至仪器（如变频器）的信号公共端即可，如图 4-20 中的②所示。

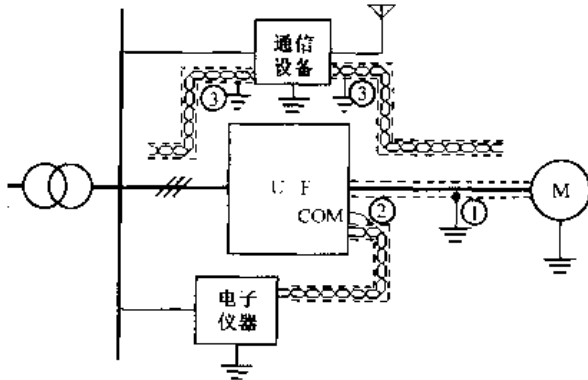


图 4-20 电路的屏蔽

屏蔽层也可以在一端接地，如图 4-20 中的③所示。

必须强调，屏蔽层不论是接公共端还是接地，都只能在一端进行，切不可两端都接。

#### （四）隔离干扰信号

隔离技术主要用于把已经窜入线路的干扰信号阻隔掉。

##### 1. 电源隔离

对于一些耗电量较小的仪器设备，其电源可通过隔离变压器和电网进行隔离，以防止窜入电网的干扰信号进入仪器，如图 4-21 中的①所示。变压器的一、二次侧都可以加接一些滤波器件，如图中的电容等。

##### 2. 信号隔离

信号隔离是设法使已经窜入控制线的干扰信号不进入仪器。隔离器件是采用线性光电耦合管，如图 4-21 中的②所示。

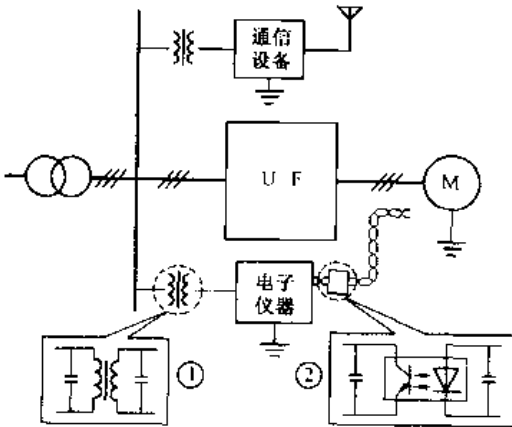


图 4-21 隔离干扰信号

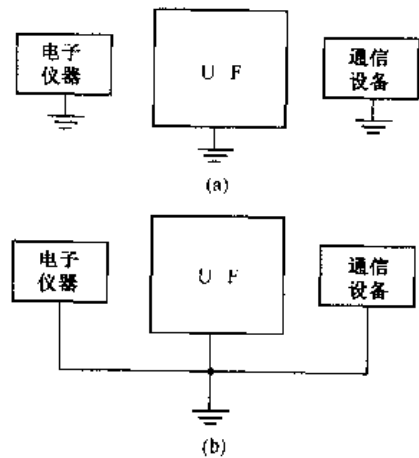


图 4-22 接地方法

(a) 正确；(b) 错误

#### （五）准确接地

设备接地的主要目的是安全，但对于一些具有高频干扰信号的设备来说，也具有把高频干扰信号引入大地的功能。接地时，应注意以下几点：

(1) 接地线应尽量地粗一些，接地点应尽量靠近变频器。

(2) 接地线应尽量远离电源线。

(3) 变频器所用的接地线，必须和其他设备的接地线分开，如图 4-22 (a) 所示；必须绝对避免把所有设备的接地线连在一起后再接地，如图 4-22 (b) 所示的那样。

(4) 变频器的接地端子不能和电源的“零线”相接。

## 第五节 电源不符时的处理

### 一、电动机的额定电压为 220V

我国的电网电压都是 380V 的，但有时会遇到额定电压为 220V 的电动机，需要进行变频调速，根据不同的情况，可以有如下不同的处理方法。

#### (一) 利用 380V 变频器

##### 1. 电动机的绕组为 $\Delta$ 形连接

如果电动机绕组是  $\Delta$  形连接的，则只需将绕组改接成 Y 形连接就可以了。

这是因为，当电动机的额定电压为 220V，而绕组接成  $\Delta$  形时，其每相绕组的额定电压为 220V，如图 4-23 (a) 所示。

当把电动机绕组改接成 Y 形时，它能够承受的线电压为 380V，可以接到 380V 的电源上去，如图 4-23 (b) 所示。

##### 2. 电动机的绕组为 Y 形连接

当电动机的绕组为 Y 形连接时，说明其每相绕组的额定电压只有

$$\frac{220}{\sqrt{3}} = 127V$$

在这种情况下，当变频器的额定电压为 380V 时，可通过适当预置变频器的基本  $U/f$ ，使变频器在输出频率为 50Hz 时，对应的输出电压为 220V，如图 4-24 所示。

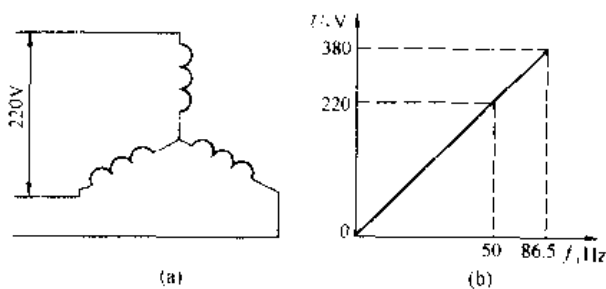


图 4-24 电动机绕组为 Y 形连接  
(a) 绕组接法；(b) 基本  $U/f$  的预置

具体的预置方法是：将变频器的基本频率（即与 380V 对应的频率）预置为

$$50 \times \sqrt{3} = 86.5\text{Hz}$$

则当变频器的输出频率为 50Hz 时，其输出的平均电压为 220V。

但在这种情况下，必须注意电动机的绝缘问题。这是因为：虽然施加于电动机的平均线电压是 220V，但实际上，因为变频器的输入线电压是 380V（相电压是

220V），所以，电压脉冲的幅值仍然是三相桥式整流后的平均值，即

$$220 \times 2.34 = 515V$$

因此，如果电动机是按照相电压为 127V 设计的，则其绝缘强度是不够的。

反之，在绝缘强度足够的前提下，如果把频率提高到 86.5Hz，使电动机的线电压提高为 380V。由于电动机的反电动势也增大，即

$$E_{1X} = 4.44 f_X N_1 \Phi_1$$

式中  $E_{1X}$ ——每相绕组的反电动势，V；

$f_X$ ——电动机的工作频率，Hz；

$N_1$ ——定子每相绕组的匝数；

$\Phi_1$ ——定子每个磁极下，主磁通的基波分量。

所以，电动机的电流并不会因电压的增大而增大。结果是，电动机的额定容量增大了 $\sqrt{3}$ 倍。

## (二) 利用“单进三出”变频器

所谓“单进三出”变频器，就是变频器的输入侧接单相电源（在我国，通常是 220V），而输出侧是三相交流电压，如图 4-25 所示。

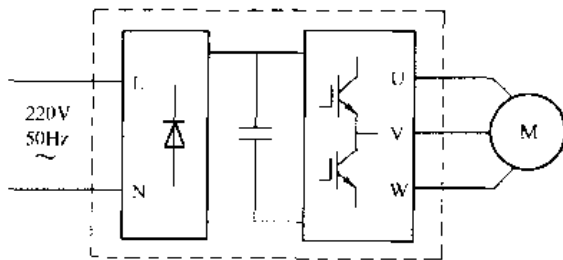


图 4-25 单进三出变频器

### 1. “单进三出”变频器的特点

(1) 直流电压。单相 220V 交流电压经桥式整流后的平均电压  $U_{D(1)}$  为

$$U_{D(1)} = 0.9 \times 220 = 198 \text{ (V)}$$

(2) 逆变后的三相线电压。按照“三进三出”变频器（输入侧为三相电源的变频器）的同样规律，算出逆变成三相交流后的线电压大小是

$$U_1 = \frac{198}{1.35} = 146 \text{ (V)}$$

即只有电动机额定电压的 66.4%。

### 2. 配用三相电动机的要点

异步电动机的电磁转矩是与电压的平方成正比的，当电压为额定电压的 66.4% 时，其带负载的能力只有额定转矩的 44%。因此，当单进三出变频器与三相 220V 的电动机相配用时，必须注意以下两点：

(1) 电动机的负荷率较低。负荷率较大时，可能带不动负载。

(2) 电动机的工作频率较低。在较低频率下工作时，可以通过增大转矩补偿来提高电动机的带载能力。

## 二、电动机的额定频率为 50/60Hz

某厂有一台 4 极电动机，额定频率为 50/60Hz，额定转差率为 0.04，额定功率为 5.5kW。在实现变频调速时，其基本频率  $f_b$ （与最大输出电压对应的频率）应如何预置？

### (一) 电动机在不同频率时的额定数据

#### 1. 电动机在 50Hz 时的额定数据

电动机在  $f_b = 50\text{Hz}$  时的基本  $U/f$  线如图 4-26 (a) 所示。

##### (1) 额定转速

$$n_{M1} = 1440 \text{ r/min}$$

##### (2) 额定转矩

$$T_{M1} = \frac{9550 \times 5.5}{1440} = 36.5 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

其有效转矩线如图 4-26 (b) 所示（假设有外部通风）。

#### 2. 电动机在 60Hz 时的额定数据

电动机在  $f_b = 60\text{Hz}$  时的基本  $U/f$  线如图 4-26 (c) 所示。

##### (1) 额定转速

$$n_{M2} = \frac{60 \times 60}{2} (1 - 0.04) = 1728 \text{ (r/min)}$$

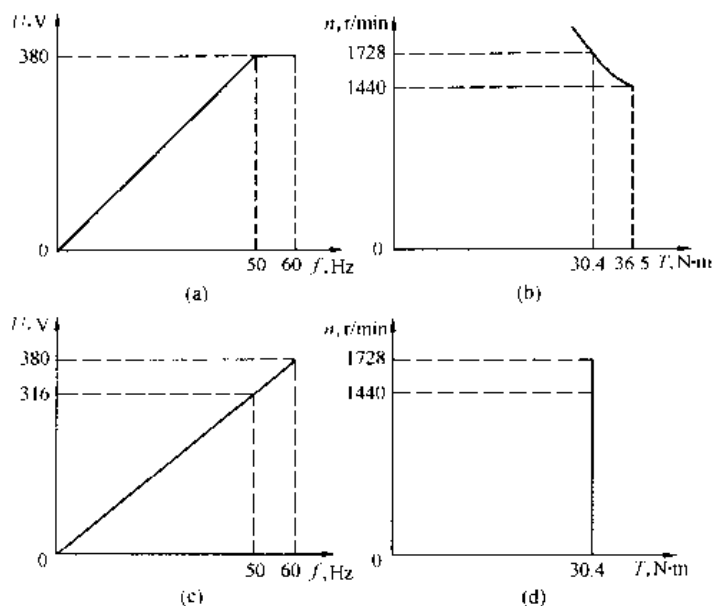


图 4-26 50/60Hz 的情形

- (a) 50Hz 基本  $U/f$  线; (b) 50Hz 有效转矩线;  
 (c) 60Hz 基本  $U/f$  线; (d) 60Hz 有效转矩线

## (2) 额定转矩

$$T_{M2} = \frac{9550 \times 5.5}{1728} = 30.4 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

可见, 当频率为 60Hz 时, 额定转速增大, 但额定转矩则减小, 其有效转矩线如图 4-26 (d) 所示 (假设有外部通风)。

### (二) 决定基本频率的原则

(1) 如负载的阻转矩较大, 而平均的运行转速不高, 则基本频率  $f_b$  以选择 50Hz 为宜。即, 当工作频率为 50Hz 时, 变频器的输出线电压为 380V。

(2) 如负载的阻转矩不大, 而平均的运行转速较高, 则基本频率  $f_b$  以选择 60Hz 为宜。即, 当工作频率为 60Hz 时, 变频器的输出线电压为 380V; 而当频率为 50Hz 时, 变频器的输出线电压为 316V, 故电动机的转矩较小。

## 第六节 变频器主电路的测量

### 一、主电路各物理量的特点

#### (一) 输入侧

##### 1. 输入电压

输入电压为电源电压, 通常是正弦波。其频率和电压值都比较恒定, 大多为 380V、50Hz。

##### 2. 输入电流

如本章第三节所述, 输入电流呈不连续的冲击波形式, 如图 4-27 所示 (此图中的电流波形是负载较轻时的情形, 图 4-8 所示是负载较重时的波形)。其基波频率和电压相同, 在

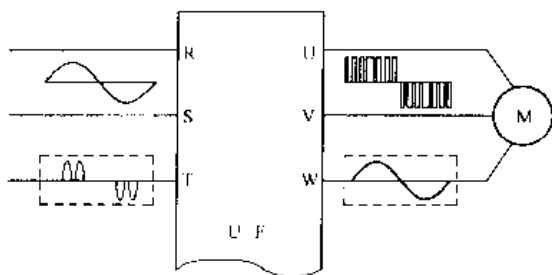


图 4-27 主电路的波形

大多数情况下，也是 50Hz，但含有很多高次谐波成分。

## (二) 输出侧

### 1. 输出电压

输出电压是经 SPWM 调制后的系列脉冲，如图 4-27 所示。同时，其宏观频率是任意可调的。

### 2. 输出电流

输出电流是具有微小锯齿的正弦波，其频率随输出电压而变。

## 二、常用仪表在变频器主电路中的应用

### (一) 电磁式仪表

#### 1. 结构与特点

电磁式仪表的基本结构如图 4-28 所示。当线圈中通入电流后，铁芯被吸入，并带动指针偏转，偏转角与线圈内电流的二次方成正比，即

$$\theta_a \approx K_{\theta i} I^2 \quad (4-26)$$

式中  $\theta_a$ ——指针的偏转角；

$K_{\theta i}$ ——常数；

$I$ ——通入线圈的电流。

偏转部分不必通入电流是电磁式仪表的一大优点。这使它的结构比较简单、坚固。又由于其偏转角与电流的二次方成正比，可以十分方便地测量交变量。因此，在工程应用中，电磁式仪表应用得较多。

#### 2. 在变频器主电路中的应用

(1) 输入电压。因为是正弦波，所以可用。

(2) 输入和输出电流。其偏转角与各次谐波电流二次方的和成正比，即

$$\theta_a \approx K_{\theta i} \sum I^2 \quad (4-27)$$

式中  $\sum I^2$ ——是各次谐波电流有效值的二次方的和。

所以，用电磁式仪表测量非正弦电流时，其测量结果是总电流（含谐波电流）的有效值。

(3) 输出电压。电磁式仪表由于线圈是固定的，所以，在用做电压表时，线圈的圈数很多，电感量很大。在测量频率不变的电路时，因为感抗相同，所以线圈电流与电压成正比，不存在什么问题。但在频率变化时，情况就不同了，因为

$$X_{LX} = 2\pi f_X L \quad (4-28)$$

式中  $X_{LX}$ ——频率为  $f_X$  时的感抗， $\Omega$ ；

$f_X$ ——工作频率，Hz；

$L$ ——线圈的电感，H。

当工作频率  $f_X$  降低时，感抗  $X_{LX}$  也减小，在被测电压未变的情况下，线圈中的电流却增大了，从而指针的偏转角也增大。

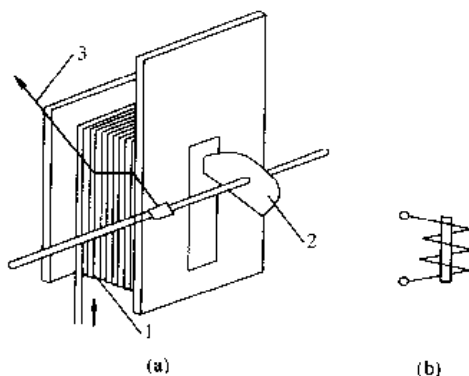


图 4-28 电磁式仪表

(a) 结构；(b) 符号

1—固定线圈；2—铁芯，是带动指针旋转的（为简明起见，图中所画为吸入式的，实际应用中，更多的是排斥式的）；3—指针

所以，电磁式仪表不能用来测量变频器的输出电压。

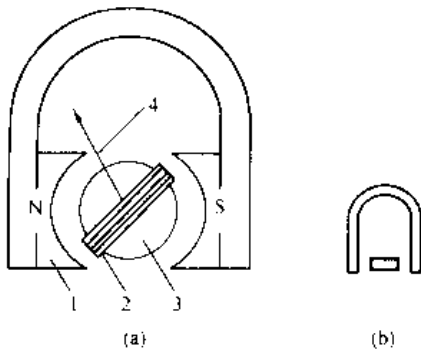


图 4-29 磁电式仪表

(a) 结构；(b) 符号

1—永久磁铁，是固定的；2—线圈，是带动指针旋转的；3—铁芯，用于增强磁路的磁通；4—指针

## (二) 磁电式仪表

### 1. 结构与特点

磁电式仪表的基本结构如图 4-29 所示。

当线圈中通入电流后，将因受到磁场的作用力而转动，并带动指针偏转，偏转角与线圈内电流的平均值成正比，即

$$\theta_a \approx K_{02} I_a \quad (4-29)$$

式中  $K_{02}$ ——常数；

$I_a$ ——电流的平均值，A。

由于磁电式仪表的偏转部分是线圈，故比较娇嫩，且一般情况下，磁电式仪表只能用来测量直流电流和电压，故不能用来测量变频器的电流和电压。

### 2. 整流式仪表及其功用

所谓整流式仪表，就是把交变电压或电流经整流后再通入磁电式仪表，是用磁电式仪表来测量交流电的一种方式，如图 4-30 (a) 所示。

由于线圈是偏转部分，其匝数不能太多，故电感量小。当用来测量交流电压时，须串联阻值很大的附加电阻  $r_a$ ，使整个测量电路基本上呈纯电阻性质。所以，利用它来测量变频器的输出电压时，流入线圈的电流波形基本上和电压波形相同，如图 4-30 (c) 所示。利用这一特点，由整流式仪表来测量变频器的输出电压是比较准确的。但须注意，磁电式仪表的读数是和电流的平均值成正比的，要得到有效值，须进行必要的校准。

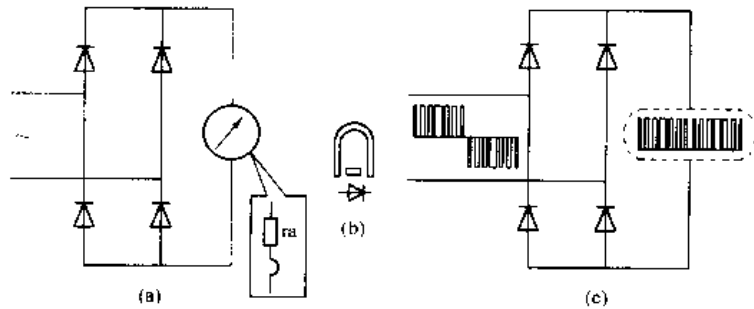


图 4-30 整流式仪表

(a) 接法；(b) 符号；(c) 测量变频器输出电压

## (三) 电动式仪表

### 1. 结构与特点

电动式仪表由两组线圈构成：固定线圈 1 和偏转线圈 2，指针 3 与偏转线圈同轴。如图 4-31 (a) 所示。

当两个线圈中通入电流时，它们的磁场相互作用，使偏转线圈受力而旋转，偏转角与两线圈内电流的乘积成正比，即

$$\theta_a \approx K_{03} I_1 I_2 \cos \varphi \quad (4-30)$$

式中  $K_{03}$ ——常数；

- $I_1$ ——线圈 1 中的电流, A;
- $I_2$ ——线圈 2 中的电流, A;
- $\varphi$ —— $I_1$  与  $I_2$  之间的相位差角。

2. 应用

电动式仪表通常用来作为功率表。一般情况下, 不动的线圈 1 为电流线圈, 导线较粗, 串联在被测电路中; 偏转线圈 2 为电压线圈, 导线较细, 经串联附加电阻后跨接在被测电压两端。如图 4-32 所示。

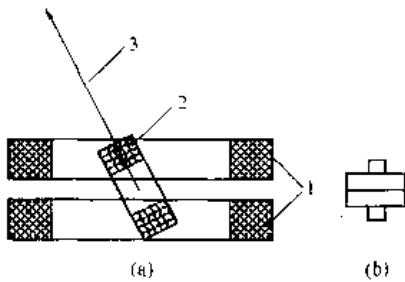


图 4-31 电动式仪表  
(a) 结构; (b) 符号

1—固定线圈; 2—偏转线圈; 3—指针

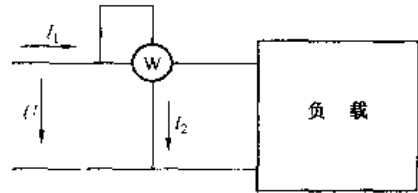


图 4-32 功率的测量

(四) 数字式仪表

1. 概述

数字式仪表中并无线圈, 它主要是以一定的频率对被测量进行“采样”而得到与被测量成比例的数值, 然后进行“模-数转换”等一系列变换而显示被测量的。

2. 在变频器电路中的应用

用数字式仪表来测量输入电压与电流, 以及输出电流都不成问题。

但由于变频器的输出电压是通过改变占空比来调节其平均电压的, 而数字电压表则无法采样出占空比的变化, 所以, 不能用数字电压表来测量变频器的输出电压。

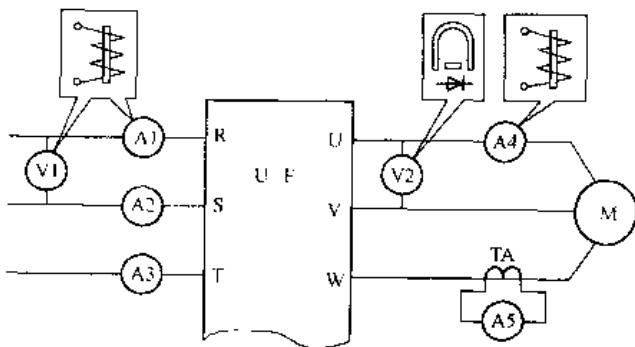


图 4-33 电流和电压的测量

4. 输出电流

以采用电磁式仪表为宜。

(二) 三相功率的测量

与普通三相交流电路的测量方法相同, 都使用电动式仪表。

三、变频器主电路测量方法汇总

(一) 电流和电压的测量

电流和电压的测量见图 4-33。

1. 输入电压

因为是工频正弦电压, 故各类仪表均可使用。

2. 输入电流

以采用电磁式仪表为宜。

3. 输出电压

只能采用整流式仪表。



### 1. 输入侧

由于三相全波整流电路在负荷较轻时，三相电流常不平衡，故各相宜分别测量，再把测量结果相加，得到三相总功率，即

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

如图 4-34 所示。

如果在运行过程中，负载较重，三相电流较平衡时，可采用两表法。

### 2. 输出侧

因为在正常情况下，电动机的三相电流总是平衡的，故可采用两表法，如图 4-34 所示。

## (三) 绝缘电阻的测量

### 1. 外接线绝缘电阻的测量

为了防止兆欧表的高电压施加到变频器上，必须把需要测量的外接线拆离变频器后再进行测量。

### 2. 变频器主电路绝缘电阻的测量

测量时，必须把变频器所有的进线端（R、S、T）和出线端（U、V、W）都连接起来，然后再进行测量，如图 4-35 所示。

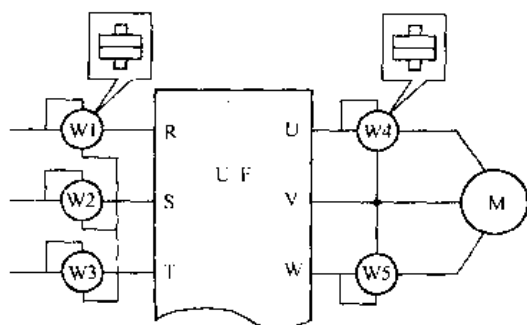


图 4-34 三相功率的测量

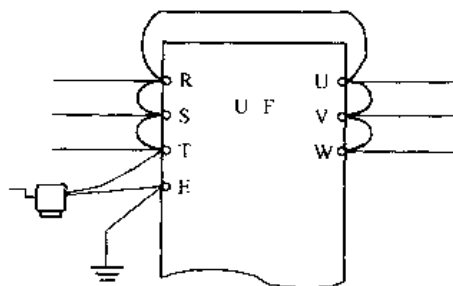


图 4-35 绝缘电阻的测量

### 3. 控制电路绝缘电阻的测量

应该用万用表的高阻挡进行测量，而不要用兆欧表或其他有高电压的仪表进行测量。

## 第七节 变频器的安装与接线

### 一、变频器的安装

#### (一) 变频器对安装环境的要求

变频器是一台全晶体管设备，所以，对周围环境的要求和其他晶体管设备大致相同。

#### 1. 环境温度

变频器工作时的环境温度一般规定为  $-10 \sim +40^{\circ}\text{C}$ ，测试环境温度的点应在距变频器约 5cm 处，如图 4-36 所示。

在环境温度大于  $+40^{\circ}\text{C}$  的情况下，每增加  $5^{\circ}\text{C}$ ，其运行功率应下降 30%。

#### 2. 环境湿度

相对湿度应不超过 90%，无结露现象。

#### 3. 其他条件

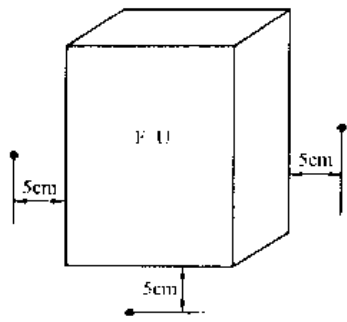


图 4-36 测试环境温度的位置

在变频器安装的位置应无直射阳光、无腐蚀性气体及易燃气体、尘埃少、海拔低于 1000m 等。

## (二) 变频器安装时的散热处理

### 1. 变频器的发热与散热

和任何设备一样，变频器在运行过程中的功率损耗，也会转换成热能，并使自身的温度升高。粗略地说，每 1kVA 的变频器容量，其损耗功率约为 40 ~ 50kW。

为了不使变频器的温度升高，在安装变频器时必须考虑如何把变频器所产生的热量充分地散发出去。通常采用的办法，是利用冷却风扇把热量带走。大体上说，每带走 1kW 热量所需的风量约为  $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 2. 壁挂式安装的散热处理

由于变频器本身具有较好的外壳，故一般情况下，允许直接靠墙安装，称为壁挂式。

为了保证良好的通风，所有变频器都必须垂直安装，且变频器与周围阻挡物之间的距离应符合如图 4-37 (a) 所示的要求，即：两侧， $\geq 100\text{mm}$ ；上下方， $\geq 150\text{mm}$ 。

为了防止异物掉在变频器的出风口而阻塞风道，最好在变频器出风口的上方加装保护网罩。

### 3. 单台柜式安装的散热处理

当周围的尘埃较多，或和变频器配用的其他控制电器较多，需要和变频器安装在一起时，可采用柜式安装。

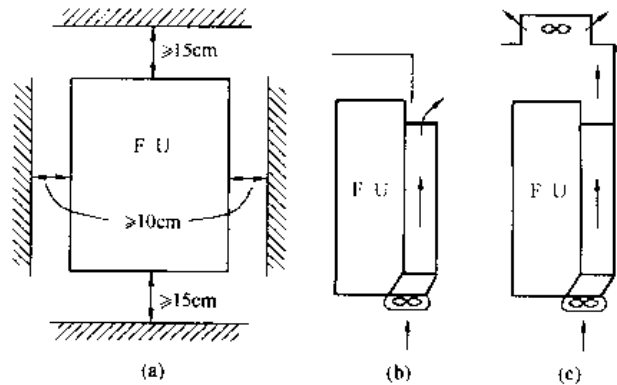


图 4-37 单台安装

(a) 壁挂式；(b) 柜式外冷；(c) 柜式内冷

如周围环境比较洁净、尘埃较少时，应尽量采用柜外冷却方式，如图 4-37 (b) 所示；如必须采用柜内冷却方式时，则应在柜顶加装抽风式冷却风扇。冷却风扇的位置应尽量在变频器的正上方，如图 4-37 (c) 所示。

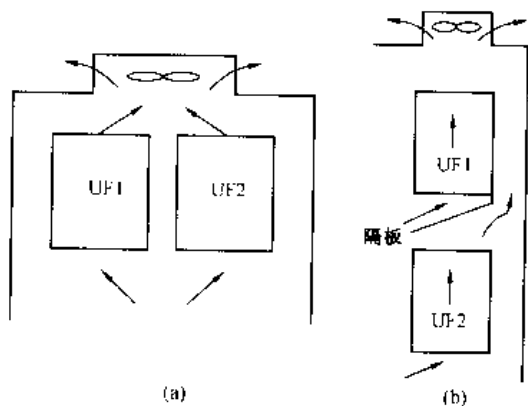


图 4-38 两台变频器的柜式安装

(a) 横向排列；(b) 纵向排列

### 4. 多台柜式安装的散热处理

当一个控制柜内装有两台或两台以上变频器时，应尽量并排安装（横向排列），如图 4-38 (a) 所示。

如必须采用纵向方式排列时，则应在两台变频器之间加一隔板，以避免下面变频器排出的热风进入到上面的变频器中去，如图 4-38 (b) 所示。

### 5. 户外安装的散热处理

一般来说，变频调速控制柜应安装在室内。如必须安装在户外（例如油田的抽油机用变频器）时，则控制柜必须采用双层结构方式，如图

4-39 所示。

所用控制柜必须既能防止太阳的直接照射，又能防止雨水的浸入。如有可能，在隔层之间，最好能采用强制风冷方式。

除此以外，户外安装时，还必须注意当地的冬季最低温度。如果低于 10℃，应在柜内安装加热装置。并且，应能进行温度的自动控制。

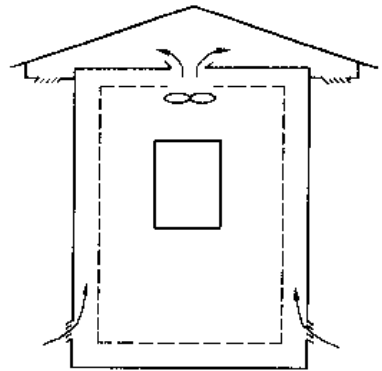


图 4-39 户外控制柜

## 二、变频器的接线

### 1. 主电路的接线

以艾默生 TD3000 为例，其主电路接线端子的排列如图 4-40 (a) 所示。说明如下：

- (1) R、S、T 为电源进线端子。
- (2) U、V、W 为变频器的输出端子，接至电动机。
- (3) P、N 为直流电路的 +、- 端子。

(4) P1 为直流电抗器 DL 的接线端子，DL 接在 P1 和 P 之间。如无直流电抗器时，应将 P1 和 P 短接。

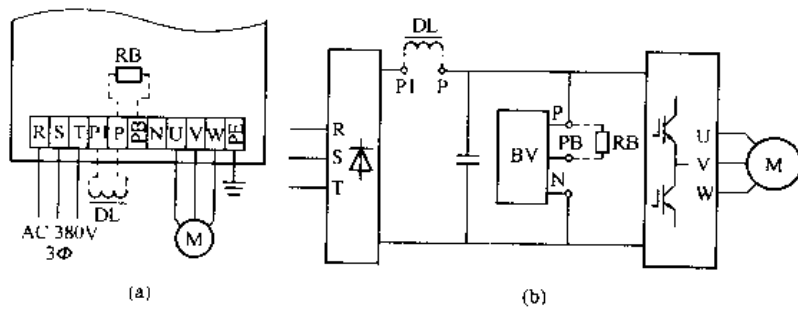


图 4-40 主电路的接线

(a) 主电路的接线端子；(b) 内部电路

(5) PB 为制动电阻 RB 的接线端子（在制动单元上）。如变频器内部有制动单元，则只需将 RB 接在 P 和 PB 之间即可；如变频器内部没有制动单元，则需将外配制动单元接至 P 和 N 之间，再将 RB 接在 P 和制动单元上的 PB 之间。

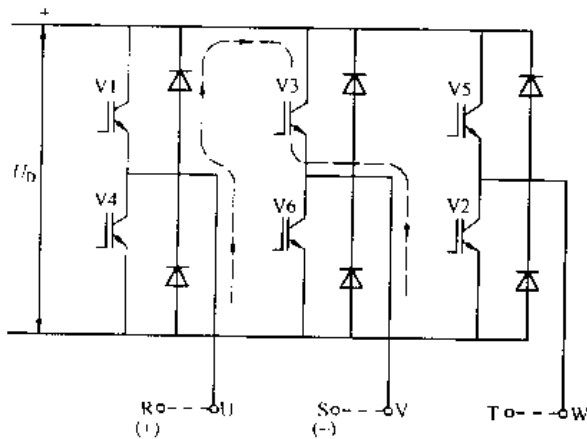


图 4-41 电源接错的后果

在进行主电路接线时，应注意以下事项：

(1) 变频器的输入端和输出端之间绝对不能接错。万一将电源进线错误地接到了变频器的 U、V、W 端，则不管哪个逆变管导通，都将引起两相间的短路而将逆变管迅速烧坏，如图 4-41 所示。图中，设在某一瞬间，电源的 R 端为“+”，而 S 端为“-”，则在逆变管 V3 导通时，电流将经 VD1 和 V3 而短路，V3 将立即被烧坏。

(2) 为了防止输入、输出电流中的高次谐波成分对其他设备的干扰，主电路的导线应尽量穿在金属管内。

## 2. 控制电路的接线

控制电路在接线时，最主要的问题是防止干扰。为此，应注意以下事项：

(1) 所有控制线，都应采用屏蔽线。屏蔽线靠近变频器一侧的屏蔽层应与控制电路的公共端（COM）相接，但不接地。屏蔽层的另一端悬空。

(2) 与主电路之间的距离应大于 100mm，并应尽量不和主电路交叉，必须交叉时，应采取垂直交叉的方式。

## 变频调速系统的设计与运行

## 第一节 对变频调速系统的基本要求

## 一、在机械特性方面的要求

## (一) 对调速范围的要求

任何调速装置的首要任务,便是必须满足负载对调速范围的要求。负载调速范围  $\alpha_L$  的定义是

$$\alpha_L = \frac{n_{Lmax}}{n_{Lmin}} \quad (5-1)$$

式中  $n_{Lmax}$ ——负载的最高转速, r/min;

$n_{Lmin}$ ——负载的最低转速, r/min。

就变频器的频率调节范围而言,绝大多数在 1Hz ~ (200 ~ 400) Hz 之间,可以说,能够满足所有负载的调速范围。问题是,三相异步电动机在实施了变频调速后,是否在整个频率范围内都带得动负载,能不能长时间运行。为此,在设计之前,必须对负载和电动机这两方面的情况有比较充分的了解,具体地说,是:

- (1) 负载的机械特性;
- (2) 电动机在变频调速后的有效转矩线。

## (二) 对机械特性“硬度”的要求

异步电动机的自然机械特性的运行部分属于“硬特性”,频率改变后,其机械特性的稳定运行部分基本上是互相平行的。因此,在大多数情况下,只需采用 V/F 控制方式,变频调速系统的机械特性就已经能够满足要求了。

但是,对于某些对精度要求较高的机械,则有必要采用矢量控制方式,以保证在变频调速后得到足够硬的机械特性。

除此以外,某些负载根据节能的要求需配置低减  $U/f$  功能等。

所以,负载对机械特性“硬度”的要求对于选择变频器的类型具有十分重要的意义。

## (三) 对升、降速过程及动态响应的要求

一般来说,近代的变频器在升、降速时间和升、降速方式方面,都有着相当完善的功能,足以满足大多数负载对升、降速过程的要求。但也有必须注意的方面。

## 1. 负载对启动转矩的要求

有的负载由于静态的摩擦阻力特别大,而要求具有足够大的启动转矩,例如:印染机械及浆纱机械在穿布或穿纱过程中;又如起重机械的起升机构在开始上升时,也必须有足够大的启动转矩,以克服重物的重力转矩等。

## 2. 负载对制动过程的要求

对于制动过程,需要考虑的问题有:

- (1) 根据负载对制动时间的要求,考虑是否需要制动电阻,需要多大的制动电阻以及对

制动电阻容量的确定。

(2) 对于可能在较长时间内, 电动机处于再生制动状态的负载(如起重机)来说, 还应考虑是否采用电源反馈方式的问题。

### 3. 负载对动态响应的要求

在大多数情况下, 变频调速开环系统的动态响应能力是能够满足要求的。但对于某些对动态响应要求很高的负载, 则应考虑采用具有转速反馈环节的矢量控制方式。

## 二、在运行可靠性方面的要求

### 1. 对于过载能力的要求

电动机在决定其容量时, 主要考虑的是发热问题, 只要电动机的温升不超过其额定温升, 短时间的过载是允许的。在连续变化负载、断续负载以及短时负载中, 这种情况是常见的。必须注意的是: 这里所说的短时间, 是相对于电动机的发热过程而言的。对于容量较小的电动机来说, 可能是几分钟; 而对于容量较大的电动机, 则可能是几十分钟、甚至几个小时。

变频器也有过载能力, 但允许的过载时间只有 1min。这仅仅对电动机的启动过程才有意义, 而相对于电动机允许的“短时间过载”而言, 变频器实际上是没有过载能力的。在这种情况下, 必须考虑加大变频器的容量。

### 2. 对机械振动和寿命的要求

在这方面, 需要考虑的有:

(1) 避免机械谐振的问题;

(2) 高速(超过额定转速)时, 机械的振动以及各部分轴承及传动机构的磨损问题等。

## 第二节 普通异步电动机与变频

### 一、异步电动机的额定数据

#### (一) 主要铭牌数据

以 Y-160M-4 异步电动机为例, 说明如下:

#### 1. 额定功率 ( $P_{MN}$ )

$P_{MN} = 11\text{kW}$ , 指电动机输出轴上允许长时间运行的最大输出功率。

#### 2. 额定电压 ( $U_{MN}$ )

$U_{MN} = 380\text{V}$ , 通常都指线电压。

#### 3. 额定电流 ( $I_{MN}$ )

$I_{MN} = 22.6\text{A}$ , 指定子侧允许长时间运行的最大线电流。

#### 4. 额定转速 ( $n_{MN}$ )

$n_{MN} = 1460\text{r/min}$ , 指输出轴在输出额定功率时的转速。

#### 5. 额定频率 ( $f_{MN}$ )

$f_{MN} = 50\text{Hz}$ 。

#### 6. 磁极数 ( $2p$ )

$2p = 4$ 。

#### 7. 绕组接法

$\Delta$ 接法, 指定子绕组的接法。

## (二) 派生数据

### 1. 额定转矩 ( $T_{MN}$ )

可由额定功率和额定转速算出, 即

$$T_{MN} = \frac{9550 P_{MN}}{n_{MN}} = \frac{9550 \times 11}{1460} = 71.95 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

### 2. 额定同步转速 ( $n_{0N}$ )

$$n_{0N} = \frac{60f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ (r/min)}$$

### 3. 额定转差率 ( $s_{MN}$ )

$$s_{MN} \% = \frac{n_{0N} - n_{MN}}{n_{0N}} \times 100 \% = \frac{1500 - 1460}{1500} \times 100 \% = 2.67 \%$$

## (三) 其他额定数据

### 1. 额定效率 ( $\eta_{MN}$ )

$\eta_{MN} = 88\%$ , 指电动机工作在额定功率时的效率。

### 2. 额定功率因数 ( $\cos \varphi_{MN}$ )

$\cos \varphi_{MN} = 0.84$ , 指电动机工作在额定功率时的功率因数。

### 3. 启动电流倍数 ( $I_s/I_{MN}$ )

$I_s/I_{MN} = 7.0$ 。

### 4. 启动转矩倍数 ( $T_s/T_{MN}$ )

$T_s/T_{MN} = 2.0$ 。

### 5. 过载能力 ( $T_k/T_{MN}$ )

$T_k/T_{MN} = 2.2$ 。

## 二、变频对异步电动机的影响

### (一) 对电流的影响

#### 1. 基本情况

因为变频器的输出电压是经过 SPWM 调制过的系列脉冲波, 故流入电动机的电流中含有频率与载波频率相等的高次谐波成分。这些高次谐波电流并不能在电动机输出轴上产生有效转矩。

2. 由于只有基波电流才能产生有效转矩, 因此, 与工频运行相比, 在带动相同负载的情况下, 变频运行时的电流要大一些。有关资料表明, 同为 50Hz、输出额定转矩时, 变频时的电流约增大 5% ~ 10%。

### (二) 对磁路的影响

#### 1. 工频运行的状况

工频运行时, 由于电阻压降在电压中所占比例甚小, 负载从空载到额定负载, 反电动势的变化率只有 3% ~ 4%, 磁路在磁化曲线上的工作点十分接近, 磁通及其励磁电流的变化很小, 如图 5-1 (a) 所示。

#### 2. 变频运行的状况

在 V/F 控制方式下, 因为电压随频率而下降, 在定子电流相同的情况下, 其电阻压降所占比例增大, 而反电动势所占比例减小, 故磁通减小, 使输出转矩减小。为了在变频以

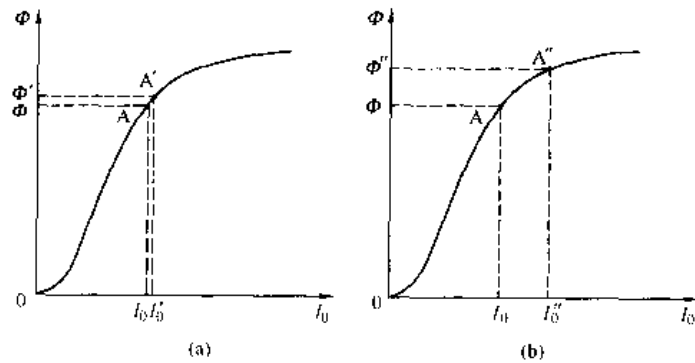


图 5-1 变频对磁路的影响  
(a) 工频运行; (b) 运行在 10Hz

后, 使电动机的输出转矩也能达到额定值, 必须补偿足够的电压, 使反电动势与频率之比保持不变。

例如, 当  $f_X = 10\text{Hz}$  时, 如要使机械特性的临界转矩和工频时相等或接近, 所需电压补偿量约为 20%。就是说, 只有当  $k_f = 120\% k_U$  时, 比值  $E_X/f_X$  和磁通才能保持不变。如图 5-1 (b) 中的 A 点所示。但在空载时, 由于电阻压降很小, 比值  $E_X/f_X$  和磁通必增大 20%, 在磁化曲线上的工作点上移至 A'' 点, 磁路将饱和。由第二章的图 2-9 可知, 励磁电流将变成尖峰波。

### (三) 对发热的影响

#### 1. 损耗与频率的关系

电动机各部分的损耗, 是导致电动机发热的原因。在变频调速系统中, 以运行在额定电流下为参照, 各部分的损耗与频率之间的关系如图 5-2 所示。

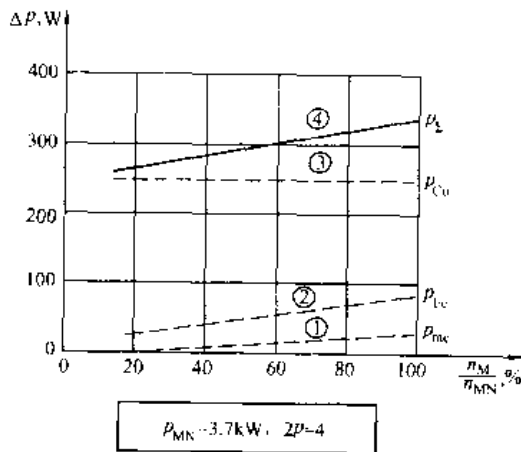


图 5-2 损耗与频率的关系

(1) 机械损失  $P_{me}$ 。包括轴承的磨损及通风损失等,  $P_{me}$  的大小与电动机的转速成正比, 如图 5-2 中的曲线①所示。

(2) 铁损  $P_{Fe}$ 。包括涡流损失和磁滞损失。 $P_{Fe}$  与频率有关: 频率越高,  $P_{Fe}$  越大, 如图 5-2 中的曲线②所示。

(3) 铜损  $P_{Cu}$ 。即消耗在定、转子电阻上的功率。因为定、转子的电阻是不随频率而变的, 又都运行在额定电流下, 故  $P_{Cu}$  的大小与频率无关。如图 5-2 中的曲线③所示。

(4) 合成损失  $P_{\Sigma}$ 。把以上三种损失总合起来, 便得到异步电动机的损失  $P_{\Sigma}$  与转速 (频率) 的关系, 如图 5-2 中的曲线④所示。

#### 2. 散热与频率的关系

普通异步电动机是依靠转子上的扇叶来冷却的。显然, 转速慢时, 散热效果也差。所以, 其散热系数  $E_c$  与转速 (频率) 的关系如图 5-3 所示。



#### (四) 对效率和功率因数的影响

##### 1. 对效率的影响

由于定子电流中有高次谐波分量，与工频运行时相比，其铜损和铁损都略有增加，故同样工作在 50Hz 下，变频时电动机的效率略低。

##### 2. 对功率因数的影响

在第四章第三节中已经论述了：所有谐波电流所消耗的功率都是无功功率。因为电动机电流中增加了高次谐波分量，也就增加了无功功率的成分。所以，电动机的功率因数也略有下降。

#### (五) 其他方面的影响

##### 1. 对电动机绝缘的影响

变频调速时，作用于电动机绕组上的电压是峰值超过 500V 的高频脉冲电压，在这样的高频作用下，绝缘材料的介电常数将会减小，而损耗增大。同时，相与相之间、各相与铁芯之间的分布电容的影响也大为增加。因此，普通电动机在进行变频调速时，绝缘较易击穿。

##### 2. 对噪声的影响

上面已经提及，在 SPWM 变频调速时，定子电流内含有与载波频率相等的谐波分量，这些谐波电流将在铁芯内引起涡流，并使硅钢片与硅钢片之间因产生电磁力而振动，产生噪声。

近代的中小系列变频器，由于逆变管采用了 IGBT 管，载波频率在 10kHz 上下。一方面大大减小了定子电流的谐波分量，另一方面，也使铁芯的振动频率超过了人类较敏感的范围。所以，噪声已基本听不到了。

##### 3. 对振动的影响

就 50Hz 时的运行状况而言，变频调速时，电动机的振动与工频运行时相比，是相差无几的。但振动总是存在的，当电动机的转速从 0 到额定转速之间进行无级调速时，其机械振动频率也是在不断变化的。而任何生产机械，又都存在着一个固有振荡频率。因此，如果电动机在某一频率下运行时，其振动频率恰好与生产机械的固有振荡频率相等或接近时，整个拖动系统的振动将加剧。

### 三、电动机的主要类别

#### (一) 常用电动机的主要类别

##### 1. 通用型异步电动机

主要特点：

##### (1) 最大转矩

$$T_{MK} \geq 2.5 T_N$$

##### (2) 启动转矩

$$T_{MS} \geq 1.84 T_N$$

大部分无特殊要求的机械如机床、水泵、风机、运输机械、农业机械等，都可选用通用型异步电动机。

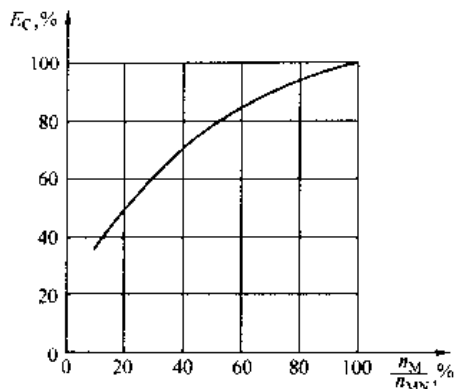


图 5-3 散热与频率的关系

## 2. 特殊系列异步电动机

特殊系列异步电动机是指适用于各种特殊场合，或具有特殊要求的电动机，其种类很多，例如：

(1) 具有特殊电气参数的电动机。如变极多速电动机、高转差率电动机、工作频率为 60Hz 的电动机等。

(2) 具有特殊结构的电动机。如绕线转子异步电动机、电磁调速电动机、齿轮减速电动机、电磁制动电动机、深井水泵用电动机等。

(3) 特殊环境用电动机。如防腐蚀电动机、防爆电动机等。

(4) 特殊用途电动机。如起重、冶金、潜水用电动机等。

## 3. 具有特殊拖动性能的电动机

(1) 高转差率电动机。特点是启动转矩大，而启动电流较小，一般为

$$T_{MS} \approx 2.6 T_N \quad I_{MS} \approx 5.5 I_N$$

高转差率电动机主要用于飞轮力矩较大、具有冲击负荷、启动或反向较频繁的场合，如剪床、冲床、锻压机械等。

(2) 起重、冶金专用电动机。除结构上的特点外，也具有启动转矩大的特点：

$$T_{MS} \geq 2.0 T_N$$

此外，其磁极数一般为 6 级以上 ( $2p \geq 6$ )。

起重、冶金专用电动机主要用于各种起重机械和冶金辅助设备中。

## (二) 变频调速专用电动机

为了克服普通电动机进行变频调速时的某些缺点，不少生产厂已开始生产专门针对变频调速的专用电动机了。

### 1. 主要特点

(1) 加强散热。为了改善电动机在低速运行时的散热条件，变频调速专用电动机把风扇移到了电动机的外面，单独接 380V 电源，使电动机的散热不受工作频率的影响。

(2) 加强槽绝缘。针对绝缘材料在高频电压作用下，容易击穿的特点，变频调速专用电动机一方面增加了槽绝缘的厚度，同时，在绝缘材料的选用上，也注意了它们的高频特性。

(3) 增大了电磁负荷。针对变频调速时，电动机的磁路容易饱和的特点，变频调速专用电动机在设计时，增大了电磁负荷，使磁路不易饱和，从而改善了电动机在低频时的工作特性。

### 2. 专用电动机的主要类别

迄今为止，变频调速专用电动机在分类上尚不规范。大体上说，主要有以下几种：

(1) 恒转矩专用电动机。主要特点是，改善了电动机在低速运行时的性能，是比较通用的电动机。

(2) 带测速装置的专用电动机。这是为了便于变频调速装置采用有反馈矢量控制功能而生产的专用电动机。这种电动机在方便矢量控制运算方面也做了一些工作，故也称矢量控制专用电动机。

(3) 中频电动机。通常，工作频率超过 60Hz 的工作频率统称为中频电动机。例如，化纤机械中丝锭电动机的工作频率约为 270Hz；内圆磨床“电主轴”的工作频率范围为 400 ~ 2000Hz 等。

此外，中频电动机也常用于木工机械、印刷机械等机械中。

### 第三节 变频器及各部分电流

#### 一、变频器的额定数据

##### (一) 输入侧的额定数据

###### 1. 电压与相数

在我国，中小容量变频器主要有以下几种：

- (1) 三相 380V，绝大多数是这样。
- (2) 三相 220V，主要用于某些进口设备中。
- (3) 单相 220V，主要用于家用电器中。

###### 2. 频率

常见的有 50Hz 和 60Hz 两种。

##### (二) 输出侧的额定数据

###### 1. 输出电压 $U_N$

由于变频的同时也要变压，故变频器输出电压的额定值是指输出电压中的最大值。在大多数情况下，就是输出频率等于电动机额定频率时的输出电压值。通常，输出电压的额定值总是和输入电压相等的。

###### 2. 输出电流 $I_N$

是允许长时间输出的最大电流，是用户在选择变频器时的主要依据。

###### 3. 输出容量 $S_N$

$S_N$  的大小取决于  $U_N$  和  $I_N$  的乘积，即

$$S_N = \sqrt{3} U_N I_N \quad (5-2)$$

###### 4. 配用电动机容量 $P_N$

这是变频器说明书中为用户提供的，可以作为变频器与电动机之间适配依据的一个数据。但必须注意：这种适配关系只是对连续不变负载才是完全适用的。对于变动负载、断续负载或短时负载来说，必须注意电动机所允许的短时间过载电流与变频器额定电流之间的配合问题。

###### 5. 过载能力

指变频器的输出电流超过额定电流的允许范围和时间。大多数变频器都规定为 150%，1min。

##### (三) 变频器的频率指标

###### 1. 频率范围

即变频器输出的最高频率  $f_{\max}$  和最低频率  $f_{\min}$ 。

###### 2. 频率精度

即变频器输出频率的准确程度。由变频器的实际输出频率与给定频率之间的最大误差与最高频率之比的百分数来表示。

例如，用户预置的最高工作频率为 80Hz，频率精度为 0.01%，则最大误差为

$$\Delta f = 0.0001 \times 80 = 0.008 \text{ (Hz)}$$

通常，由数字量给定时的频率精度要比模拟量给定时高一个数量级。

### 3. 频率分辨率

指输出频率的最小改变量，即每相邻两挡输出频率之间的最小差值。

例如，设某变频器的频率分辨率为  $0.01\text{Hz}$ ，则当工作频率为  $f_x = 25\text{Hz}$  时，其上一挡的最小频率为

$$f'_x = 25 + 0.01 = 25.01 \text{ (Hz)}$$

而下一挡的最大频率为

$$f''_x = 25 - 0.01 = 24.99 \text{ (Hz)}$$

## 二、变频器的种类与选用

迄今为止，普及应用得最广的中、小容量变频器是交-直-交、电压型变频器。由于科学技术的迅猛发展，变频器的类别已经十分繁多。但总的说来，主要是以下几类。

### 1. 通用变频器

通常指没有特殊功能、要求也并不很高的变频器。由于分类的界线不很分明，因此，绝大多数变频器都可归到这一类。

### 2. 风机、水泵用变频器

主要特点有：

(1) 过载能力较低。这是因为风机和水泵在运行过程中很少发生过载。

(2) 具有闭环控制和 PID 调节功能。水泵在具体运行时常常需要进行闭环控制，如在供水系统中，要求进行恒压供水控制；在中央空调系统中，要求恒温控制、恒温差控制等，故此类变频器大多设置了 PID 调节功能。

(3) 具有“1 控 X”的切换功能。为了减少设备投资，常常采用由 1 台变频器控制若干台水泵的控制方式，为此，许多变频器专门设置了切换功能。

### 3. 高性能变频器

通常指具有矢量控制功能且能进行四象限运行的变频器，主要用于对机械特性和动态响应要求较高的场合。

### 4. 具有电源再生功能的变频器

当变频器中直流母线上的泵生电压过高时，能将直流电源逆变成三相交流电反馈给电源，主要用于电动机长时间处于再生状态的场合，如起重机械的吊钩电动机等。

### 5. 其他专用变频器

如电梯专用变频器、纺织专用变频器、张力控制专用变频器、中频变频器等。

## 三、变频器各部分的电流

### (一) 变频器的输入电流

关于输入电流的波形已经在第四章第三节中介绍过了。这里主要分析输入电流有效值的大小。

#### 1. $f_x < 50\text{Hz}$

在工作频率低于工频的情况下，变频器的输入电流比输出电流小，即

$$I_{\text{IN}} < I_{\text{OUT}}$$

这是因为，当  $f_x < 50\text{Hz}$  时，变频器的输出电压要随频率而下降，使输入电压高于输出电压。如略去变频器的损失功率不计，则根据能量守恒原理，输入电流必小于输出电流。

2.  $f_x = 50\text{Hz}$

在同样是 50Hz 的情况下, 输入电流比工频运行时的电动机电流大, 原因如下:

(1) 如前述, 输入电流中有很多高次谐波成分, 其总电流的大小为

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + \dots} \quad (5-3)$$

式中  $I_1$ 、 $I_5$ 、 $I_7$  和  $I_{11}$ ——电流的基波分量及 5 次谐波、7 次谐波和 11 次谐波分量。

其中, 真正做功的只有基波分量。所以, 测出的电流比工频运行时的大。

(2) 变频器在采用各种补偿功能, 使机械特性变得较硬的情况下。在 50Hz 时的实际转速常常略高于工频运行时的转速, 其输出功率增大了, 故输入电流也增大。

(3) 变频器本身具有一定的功率损失。

#### (二) 变频器的直流电流

异步电动机是一个电感性的负载, 它在工作过程中, 有一部分无功电流需要和电源不断地进行交换。在变频器内, 由于中间有直流电路, 其感性电流并不真正和电源交换, 而是和直流电路内的滤波电容进行交换。因此, 直流电流具有以下特点:

(1) 电流的瞬时值是脉动的。

(2) 电流的平均值只与电动机的有功电流成正比。

(3) 其大小与频率成正比。这是因为:

当频率  $f_x$  下降时, 电动机的转速和输出功率也下降。根据能量守恒原理, 直流电路传输的电功率  $U_D I_D$  也必同步下降。但  $U_D$  的大小与频率无关, 所以, 只有直流电流  $I_D$  随频率同步下降。

#### (三) 变频器的输出电流

变频器的输出电流就是电动机电流, 其主要特点有:

1. 与工频电流相比

由于变频器的输出电流中具有高次谐波成分, 所以, 同样在 50Hz 的情况下运行, 变频时测得的电流略大于工频运行时的电流。

2. 与输入电流相比

变频器的输出电流取决于负载转矩, 而输入电流则取决于其输出功率。所以:

(1) 当  $f_x < f_N$  时。如果负载转矩没有变化, 在不同频率下的输出电流也基本相同; 但随着频率的下降, 电动机的输出功率也在下降, 因此, 变频器的输入电流也是减小的。

(2) 当  $f_x > f_N$  时。因为变频器在额定频率以上调节时, 电动机具有恒功率性质, 其输入电压和输出电压相等, 故输入电流与输出电流也基本相等。

## 第四节 变频调速时的有效转矩线

### 一、有效转矩线的概念

#### (一) 有效转矩线的定义

##### 1. 有效转矩线

电动机在额定频率  $f_N$  下工作时, 其允许连续运行的最大电磁转矩称为额定转矩  $T_{MN}$ , 在机械特性上的工作点如图 5-4 中曲线①上的 QN 所示。

电动机在某一频率  $f_x$  下工作时, 其允许连续运行的最大电磁转矩, 称为有效转矩

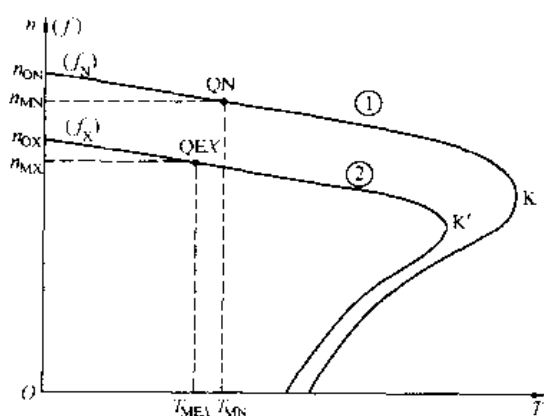


图 5-4 电动机的有效工作点

A3、A4 分别为不同频率下的有效转矩点。将这些点连接起来，便得到有效转矩线  $T_{ME} = f(n)$ ，如图 5-5 (b) 所示。

$T_{ME}$ ，在机械特性上的工作点如图 5-4 中曲线②上的 QEX 所示。

QN 和 QEX 分别是曲线①和曲线②上的有效工作点。

将所有频率下的有效转矩点连接起来，即得到电动机在变频调速过程中的有效转矩线。

### 2. $k_U = k_f$ 时的有效转矩线

在第二章第三节中，介绍了异步电动机在满足  $U/f = \text{const}$  ( $k_U = k_f$ ) 条件时，临界转矩的大小将随频率的下降而减小。所以，其机械特性曲线簇如图 5-5 (a) 所示。图中，A1、A2、

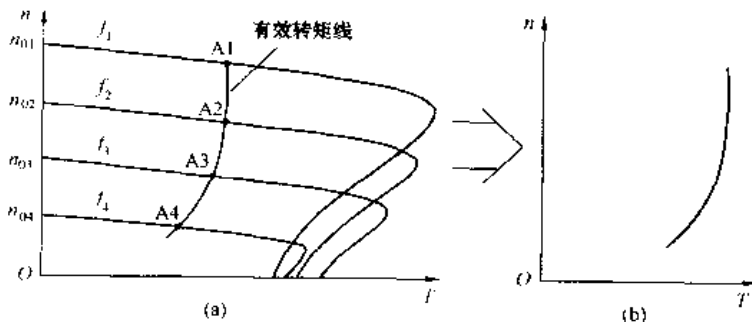


图 5-5  $k_U = k_f$  时的有效转矩线

(a) 机械特性曲线；(b) 有效转矩线

### (二) 有效转矩线与工作点

有效转矩线是说明电动机允许工作范围的曲线，而不是说明电动机工作状态的特性曲线。因此，不能在有效转矩线上决定工作点。

#### 1. 工作点不在有效转矩线上

如图 5-6 所示：

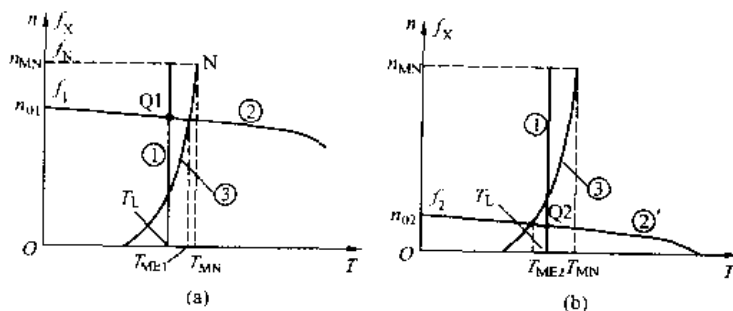


图 5-6 有效转矩线与工作点

(a) 高速时；(b) 低速时

(1) 曲线①是负载的机械特性，设为恒转矩负载，转矩为  $T_L$ ，其大小和拖动系统的调速过程无关。

(2) 图 5-6 (a) 中的曲线②是在频率为  $f_1$  时，电动机的机械特性；图 5-6 (b) 中的曲线②'是在频率为  $f_2$  时，电动机的机械特性。

可见，电动机的机械特性曲线是与工作频率相对应的，不同频率时，电动机的机械特性曲线也不同。

(3) 曲线③是有效转矩线，是电动机在不同频率下有效转矩点的连线。例如，频率为  $f_1$  时的有效转矩等于  $T_{ME1}$ ，如图 5-6 (a) 所示；频率为  $f_2$  时的有效转矩等于  $T_{ME2}$ ，如图 5-6 (b) 所示。

(4) 拖动系统的工作点是由负载的机械特性曲线和电动机的机械特性曲线的交点决定的，如图 5-6 (a) 中的 Q1 点和图 5-6 (b) 中的 Q2 点所示。

## 2. 有效转矩线决定了正常工作的范围

图 5-6 (a) 中，拖动系统的工作点 (Q1) 在有效转矩线以内，说明在该转速下，负载的阻转矩  $T_L$  比有效转矩  $T_{ME1}$  小，拖动系统能够正常运行；图 5-6 (b) 中，拖动系统的工作点 (Q2) 在有效转矩线以外，说明在该转速下，负载的阻转矩  $T_{L2}$  比电动机的有效转矩  $T_{ME2}$  大，如长时间运行，电动机的温升将可能超过允许值，不能正常工作。

显然，要使拖动系统在全调速范围内都能正常运行，必须使有效转矩线把负载机械特性曲线的运行段包围在内。如果负载机械特性曲线的运行段超越了电动机的有效转矩线，则超越的部分将不能长时间连续运行。

这里所说的负载机械特性曲线的运行段，是指在负

载所要求的调速范围内的那一段。以上述恒转矩负载为例，如果该负载的调速范围为 2:1，如图 5-7 所示，其运行段为 ab 段，如图中的粗线所示。Q2 点并不在运行段之内，就是说，负载正常工作时的最低转速是与 b 点对应的转速。因此，如图 5-7 所示的拖动系统是能够正常运行的。

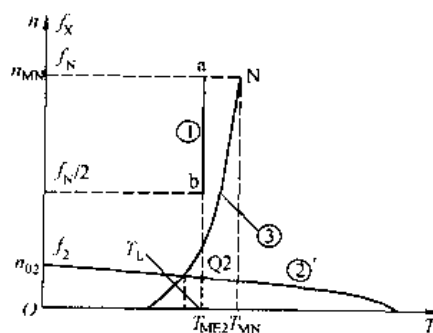


图 5-7 负载的运行段

## 二、 $f_x \leq f_N$ 时的有效转矩线

### (一) 决定有效转矩线的因素

#### 1. 电动机本身的功耗与散热

由图 5-2 和图 5-3 可知，低频运行时，虽然电动机的功耗  $P_2$  也有所减小，但电动机的散热系数  $E_c$  下降得更多。因此，长时间地在额定转矩下运行，将导致电动机因过热而损坏。

#### 2. 外部的通风条件

如果在外部进行强迫通风，则可以增加低频运行时的有效转矩。

### (二) $f_x \leq f_N$ 时的有效转矩线

#### 1. 普通电动机的有效转矩线

如前述，一般情况下，转速下降时，风扇叶的风量和内部的通风情况都将变差，散热效果下降，电动机的有效转矩也就下降，如图 5-8 中的曲线①所示。

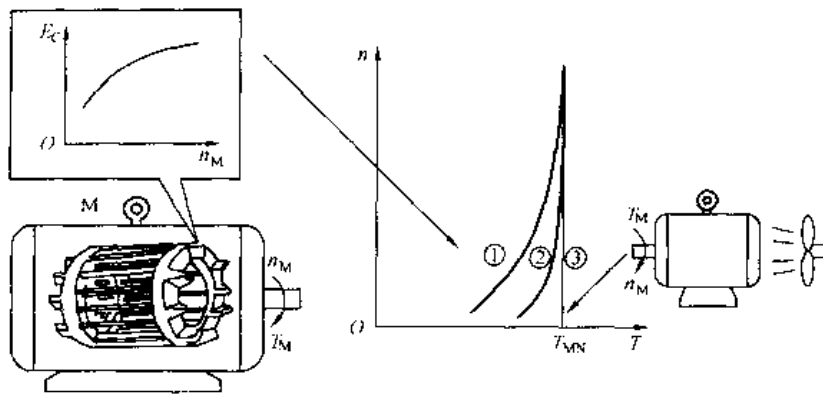


图 5-8 有效转矩线的改善

## 2. 有效转矩的改善

在下列情况下，有效转矩线可以得到改善：

- (1) 如果能够充分改善散热条件（如外加强迫通风，或采用变频调速专用电动机）。
- (2) 在拖动短时负载或低速运行时间不长的负载时。

在良好的通风条件下，甚至可以得到如图 5-8 中曲线③所示的恒转矩特性。

## 3. V/F 控制方式下的有效转矩线

在 V/F 控制方式下，如果将最低频时的转矩补偿到与额定转矩相等的程度，则轻载或空载时，将出现磁路严重饱和、励磁电流严重畸变的问题。所以，转矩补偿的程度是受到限制的。因此，即使在具有外部强迫通风的条件下，其有效转矩线通常也只能如图 5-8 中曲线②所示。

## 三、 $f_x > f_N$ 时的有效转矩线

### (一) 异步电动机在 $f_x > f_N$ 时的特点

#### 1. 输出电压不变

因为变频器的输出电压不可能超过电源电压，所以，当  $f_x > f_N$  时，其输出电压不可能和频率一起上升，而只能保持恒值，即

$$U_{1X} \equiv U_{1N}$$

#### 2. 主磁通减小

由于  $U_{1X} \equiv U_{1N}$ ，反电动势  $E_{1X}$  的大小也基本不变。所以，当  $f_x > f_N$  时，随着  $f_x$  的上升， $U/f$  将下降，主磁通  $\Phi_1$  也将减小。

#### 3. 允许电流不变

电动机的额定电流是由电动机的允许温升决定的，所以，不管在多大的频率下工作，电动机的允许工作电流都是不变的。

#### 4. 最大输入功率基本不变

因为电动机的电压和允许电流都不变，功率因数的变化不大，所以，当频率  $f_x$  上升时，其最大输入功率的大小基本不变，即

$$P_{1X} = 3U_{1N}I_{1N}\cos\varphi_{1X} \approx \text{const}$$

### (二) $f_x > f_N$ 的有效转矩线

#### 1. 功率不变的有效转矩线

由前述，最大输入功率不变，如假设电动机的效率也不变，则电动机的输出功率基本不



变。所以，在额定频率以上的有效转矩线具有恒功率的特点。即有效转矩的大小与转速成反比：

$$T_{ME.Y} = \frac{9550 P_{MX}}{n_{MY}} \propto \frac{1}{n_{MY}} \quad (5-4)$$

其机械特性曲线簇如图 5-9 (a) 所示。有效转矩线如图 5-9 (b) 中曲线①所示。

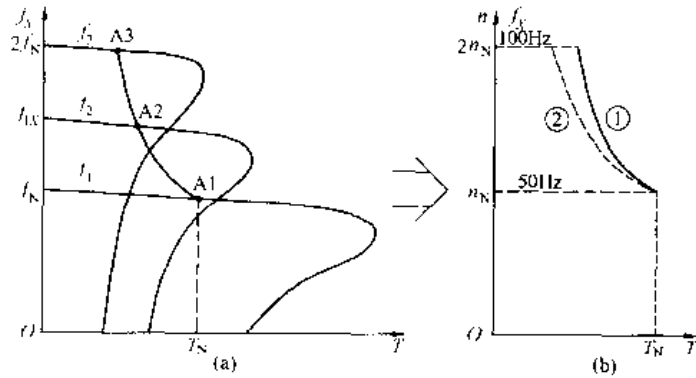


图 5-9  $f_A > f_N$  时的机械特性和有效转矩

(a) 机械特性曲线簇；(b) 有效转矩线

## 2. 过载能力不变的有效转矩线

事实上，当  $f_A$  上升时，漏磁电抗是增加的，从而使功率因数  $\cos \varphi_{1X}$  减小。因此，随着  $f_A$  的上升，电动机的临界转矩  $T_{KY}$  有所减小。所以，如果按过载能力不变的原则来确定有效转矩，则随着  $f_A$  的上升，有效转矩与恒功率时相比，将有所减小，如图 5-9 (b) 中的曲线 ② 所示。

但由于大部分机械在高速运行时对过载能力的要求不高。所以，在一般情况下，可以认为额定频率以上的有效转矩线具有恒功率特点。

## (三) 全频率范围的有效转矩线

### 1. 无强迫通风的有效转矩线

多数变频器根据其自身的控制特点，给出全频率范围内的有效转矩线如图 5-10 中的实线所示。一般来说，这是在没有外部通风情况下的有效转矩线。

### 2. 有强迫通风的有效转矩线

如果采用了变频调速专用电动机，或在外部增加了强迫通风装置，并且又选择了有反馈矢量控制方式，则在额定频率以下，有效转矩线是恒转矩的，如图 5-10 中的虚线所示。

各种变频器提供的有效转矩线不尽一致，读者应根据具体情况灵活处理。

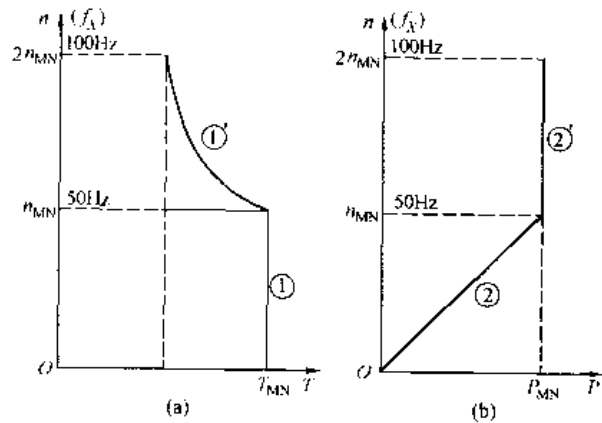


图 5-10 全频率范围的有效转矩线

(a) 有效转矩线；(b) 有效功率线

## 第五节 V/F 控制时的电流变化规律

### 一、问题的提出

在电压和频率都不变的常规情况下，人们习惯于“负载越大、电流也越大”的规律。然而，在变频调速的 V/F 控制方式下，情况却不尽如此。

#### 1. 电动机磁路的工况

如第二章第二节所述，在  $f_x < f_N$  的情况下，常常需要进行转矩补偿，其实质是补偿电阻压降  $I_1 r_1$  在电压  $U$  中所占比例的增加，以保持  $E/f$  不变。但因为：

(1) 转矩补偿的具体手段是提升变频器输出的  $U/f$ ，而一般情况下，变频器内的  $U/f$  一经预置之后，就不再改变了。

(2) 在许多负载中，负载阻转矩的大小是常常变化的，从而电流  $I_1$  及其压降  $I_1 r_1$  也是常常变化的，结果是比值  $E/f$  和磁通  $\Phi$  也将发生变化，磁路的饱和程度也随之变化。

所以，在 V/F 控制方式中，一个十分突出的问题，就是磁路系统工况的不稳定。

在实际工作中，通常是以重载时也能带得动负载作为预置  $U/f$  的依据。显然，重载时电流  $I_1$  和电阻压降  $\Delta U_r$  都较大，需要的补偿量（即  $U/f$ ）也大。但这样一来，在负载较轻， $I_1$  和  $\Delta U_r$  都较小时，必将引起“补偿过分”，导致磁路饱和。如前述，这将导致励磁电流的波形发生畸变，其有效值也有较大幅度的上升。

#### 2. 实际工作中的几种现象

(1) 有一台用于带式输送机的变频器，运行状态一直良好。后因故改用到一台容量相同的风机上，结果，启动到一定频率（如 10Hz）时就跳闸；

(2) 变频器用于塑料挤出机上，重载时运行正常，但空转时极易跳闸；

(3) 有的单位的供水系统采用了变频调速，却因为  $U/f$  预置失当而不节能。

### 二、具体分析

假设电动机在工作频率为  $f_x (< f_N)$  时带动某变动负载，负载的最大转矩接近于电动机的额定转矩 ( $T_L \approx T_{MN}$ )，为了在频率较低时也能带动负载，在 V/F 控制方式下进行了转矩补偿，选定了  $U/f$  ( $k_U > k_f$ )。

要讨论的问题是：在负载由空载逐渐增大的过程中，电流的变化规律如何（电动机的工作频率  $f_x$  不变）。作为讨论的基础，我们假定：在所选的  $U/f$  下，电动机刚好能克服负载最重时的阻转矩。就是说，在负载最重的情况下，电动机的定子电流不超过额定值。这意味着，在负载最重的情况下，输入功率与输出功率正好平衡。

#### 1. 空载时的电动机电流

简单地说，空载时，即使不进行补偿 ( $k_U = k_f$ )，电动机也能带得动。因此，被提升了的  $U/f$  将使电动机处于“补偿过分”的状态。

其结果如前述，将引起磁路的深度饱和、励磁电流  $I_0$  的波形发生严重畸变，峰值很大。在定子电流  $I_1$  中 [见式 (1-30)]， $I_0$  居主导地位。 $I_1$  的有效值因  $I_0$  的增大而增大，达到接近或超过额定电流  $I_N$  的程度，甚至有可能导致因过流而跳闸。如图 5-11 中的 A 点所示。

#### 2. 负载增大时电流的变化

负载增大时，转子电流  $I_2$  及其磁动势  $I_2 N_2$ （或  $I_2' N_1$ ）也增大。其去磁作用使励磁磁动

势  $I_0 N_1$  与磁通  $\Phi_1$  减小，铁芯的饱和程度逐渐减轻，励磁电流的尖峰值迅速减小，故  $I_1$  反而下降，如图 5-11 所示的 Q 点以前的情形。

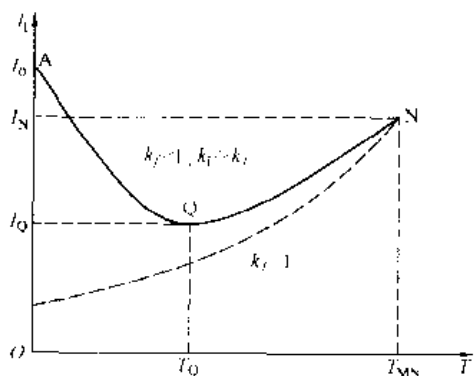


图 5-11 转矩补偿过大时的  
电流—转矩曲线

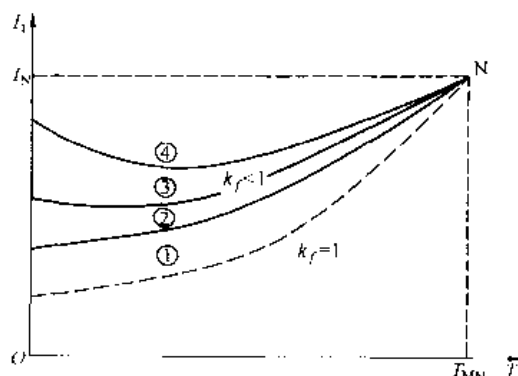


图 5-12 负载较轻时的  
电流—转矩曲线

### 3. 负载较重时电流的变化

当转子电流  $I_2$  及其磁动势  $I_2 N_2$  (或  $I_2' N_1$ ) 增大到足以使铁芯脱离饱和的状态，励磁电流  $I_0$  的波形及其有效值恢复正常时，在定子电流  $I_1$  中，代表负载大小的转子电流  $I_2$  又居主导地位。这以后，随着负载和转子电流  $I_2$  的增大，定子电流  $I_1$  也随之增大。如图 5-11 所示的 Q 点以后的情形。

图 5-11 所示的电流-转矩曲线，是在频率较低、负载较重时的比较极端的情形。在大多数情况下的电流-转矩曲线如图 5-12 中的曲线②~④所示（曲线①是额定频率时的情形）。

## 三、 $I_1 = f(T_1)$ 曲线的实际意义

### 1. 变动负载中 $U/f$ 的设定

对于转矩变化较大的负载，在采用 V/F 控制方式时，正确地设定  $U/f$  是十分重要的。毫无疑问，人们首先关心的是：低频时电动机能否带得动最重的负载，因而容易把  $U/f$  设定得较大。然而，图 5-11 所示的曲线表明，如  $U/f$  过大，则空载时容易跳闸。上述塑料挤出机的跳闸原因就在于此。

因此，调试时， $U/f$  宜由小逐渐加大，每加大一档，观察能否带得动重负载，及至能带动时，还应反过来观察空载时会不会跳闸，一直到在低频运行时，既能带得动重负载，又不会空载跳闸时为止。

此外，当变频器的应用场合改变时，其转矩补偿功能应根据新的负载特点重新预置。

### 2. 二次方律负载的低速跳闸

二次方律负载在低速时，负载的阻转矩甚小，如果变频器的  $U/f$  由于某种原因而设定得较大时，有可能因此而跳闸。在上述实际工作中的第 (1) 例中，由于带式输送机是恒转矩负载，因此，变频器的转矩补偿预置得较大，当改用到风机上时，低速时的负载转矩甚小，所以发生低速跳闸的现象。这时，只须将  $U/f$  设定得小一些，就可正常运行了。

上述实际工作中的第 (3) 例虽然在低频时没有跳闸，但因  $U/f$  预置不当（偏大），低速时的电流也偏大，影响了节能效果。

## 第六节 恒转矩负载的变频调速

### 一、需要注意的主要问题

恒转矩负载在设计变频调速系统时，必须注意的要害问题，是调速范围能否满足要求。

#### (一) 工作频率范围

##### 1. 最低工作频率

变频调速系统中允许的最低工作频率除了决定于变频器本身的性能及控制方式外，还和电动机的负荷率及散热条件有关，综合如表 5-1 所示。

表 5-1 各种控制模式的最低工作频率

控制模式	最低工作频率 (Hz)	允许负荷率	
		无外部通风	有外部通风
有反馈矢量控制	0.1	≤ 75%	100%
无反馈矢量控制	5	≤ 80%	100%
V/F 控制	1	≤ 50%	≤ 55%

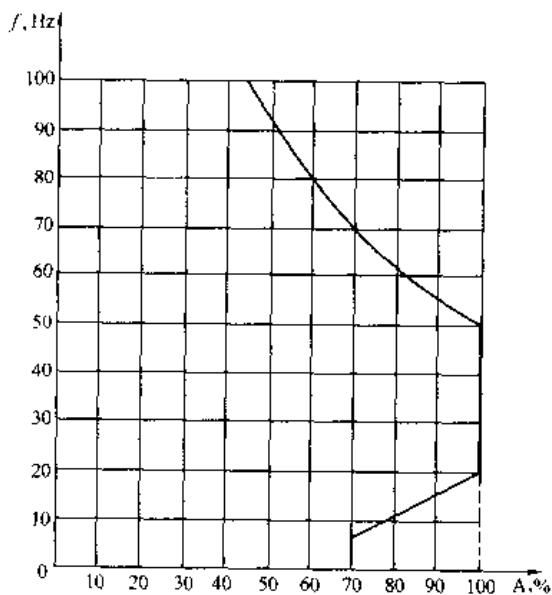


图 5-13 两倍频率以下有效转矩

这里，负荷率的定义是：电动机轴上的负载转矩  $T'_L$ （负载折算到电动机轴上的转矩）与电动机额定转矩  $T_{MN}$  的比值，用  $\sigma$  表示为

$$\sigma = \frac{T'_L}{T_{MN}} \quad (5-5)$$

##### 2. 最高工作频率

如前述，当工作频率高于额定频率时，其有效转矩线具有恒功率的特点。这实际上也说明了：在  $f_x > f_N$  ( $k_f > 1$ ) 时，变频调速系统允许的负荷率  $\sigma$  为

$$\sigma = \frac{1}{k_f} \quad (5-6)$$

就是说，拖动系统允许的负荷率是和工作频率的大小成反比的。工作频率越高 ( $k_f$  越大)，允许的负荷率越小。

#### (二) 调速范围与传动比

##### 1. 调速范围和负荷率的关系

如上所述，变频调速系统的最高和最低工作频率都和负荷率有关，所以，调速范围也就和负荷率有关。

假设某变频器在外部无强迫通风的状态下提供的有效转矩线如图 5-13 所示。由图可知，在拖动恒转矩负载时，允许的频率范围和负荷率之间的关系如表 5-2 所示。

表 5-2 说明：负荷率越低，允许的调速范围越大。

##### 2. 负荷率与传动比的关系

表 5-2 不同负荷率时的调速范围

负荷率 (%)	最高频率 (Hz)	最低频率 (Hz)	调速范围
100	50	20	2.5
90	56	15	3.7
80	62	11	5.6
70	70	6	11.6
60	78	6	13.0

尽管负载本身的阻转矩是不变的，但负载转矩折算到电动机轴上的值却是和传动比  $\lambda$  有关的。传动比越大，则负载转矩的折算值越小，电动机轴上的负荷率也就越小。传动机构的这一特点，提供了一个扩大调速范围的途径。

### 3. 调速范围与传动比的关系

由表 5-2 可知：

(1) 当电动机轴上的负荷率为 100% 时，允许的调速范围仅为 2.5。

(2) 在负载转矩不变的前提下，传动比  $\lambda$  越大，则电动机轴上的负荷率越小，调速范围（频率调节范围）越大。当负荷率只有 60% 时，调速范围可达 13.0。

因此，当调速范围不能满足负载要求时，可以考虑通过适当增大传动比，来减小电动机轴上的负荷率，增大调速范围。

### (三) 传动比的选择实例

某恒转矩负载：要求最高转速为 720r/min；最低转速为 80r/min（调速范围  $\alpha_n = 9$ ）。满负荷时负载侧的转矩为  $140\text{N}\cdot\text{m}$ 。

原选电动机的数据： $P_N = 11\text{kW}$ ， $n_N = 1440\text{r}/\text{min}$ 。

原有传动装置的传动比为  $\lambda = 2$ 。

今采用变频调速，用户要求不增加额外的装置，如转速反馈装置及风扇等。但可以适当改变皮带轮的直径，在一定的范围内调整传动比。

解

#### 1. 计算负荷率

(1) 电动机的额定转矩。根据电动机的额定功率和额定转速求出

$$T_{MN} = \frac{9550 \times 11}{1440} = 72.95 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

(2) 负载转矩的折算值。根据负载转矩与传动比求出

$$T'_L = \frac{140}{2} = 70 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

(3) 电动机的负荷率。根据电动机轴上的负载转矩与额定转矩求出

$$\sigma = \frac{70}{72.95} = 0.96$$

#### 2. 核实允许的变频范围

由图 5-13 可知，当负荷率为 0.96 时，允许频率范围是 19 ~ 52Hz，调频范围为

$$\alpha_f = \frac{52}{19} = 2.74 \ll \alpha_n (= 9)$$

显然，与负载要求的调速范围相去甚远。

#### 3. 选择传动比

(1) 由图 5-13 可知，如果负荷率为 70%，则允许调频范围为 6 ~ 70Hz，调频范围为

$$\alpha_f = \frac{70}{6} = 11.7 > \alpha_n (= 9)$$

(2) 电动机轴上的负载转矩应限制在

$$T'_L \leq 72.95 \times 70\% = 51 \text{ (N}\cdot\text{m)}$$

(3) 确定传动比，有

$$\lambda' \geq \frac{140}{51} = 2.745$$

选

$$\lambda' = 2.75$$

#### 4. 校核

##### (1) 电动机的转速范围

$$n_{M\max} = 720 \times 2.75 = 1980 \text{ (r/min)}$$

$$n_{M\min} = 80 \times 2.75 = 220 \text{ (r/min)}$$

##### (2) 工作频率范围

$$s = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

$$f_{\max} = \frac{pn}{60(1-s)} = \frac{2 \times 1980}{60 \times 0.96} = 68.75 \text{ (Hz)} < 70\text{Hz}$$

$$f_{\min} = \frac{2 \times 220}{60 \times 0.96} = 7.64 \text{ (Hz)} > 6\text{Hz}$$

可见, 增大传动比后, 工作频率在允许范围内。

## 二、电动机和变频器的选择

### (一) 电动机的选择

#### 1. 可供选择的方法

在上例中, 可以采取的方法有以下几种:

(1) 原有电动机不变, 增大传动比, 如上例所述。

(2) 原有电动机不变, 增加外部通风, 并采用带转速反馈的矢量控制方式。

(3) 选择同容量的变频调速专用电动机, 并采用带转速反馈的矢量控制方式。

(4) 采用普通电动机, 不增加外部通风, 也不采用带转速反馈的矢量控制方式, 而是增大电动机容量。增大后的容量可按如下方法求出

$$P'_{MN} = P_{MN} \frac{\lambda'}{\lambda} = 11 \times \frac{2.75}{2} = 15 \text{ (kW)}$$

#### 2. 选择原则

在实际工作中, 大致有以下几种情况:

(1) 如果属于旧设备改造, 则应尽量不改变原有电动机。

(2) 如果是设计新设备, 则应尽量考虑选用变频调速专用电动机, 以增加运行的稳定性和可靠性。

(3) 如果在增大传动比以后, 电动机的工作频率过高, 则可考虑采取增大电动机容量的方法。

#### 3. 电动机最高工作频率的确定

电动机最高工作频率以多大为宜, 需要根据具体情况来决定。

(1)  $2p \geq 4$  的普通电动机。如前述, 当  $f_x > 2f_N$  时, 电动机的有效转矩将减小很多, 有

$$T_x < \frac{T_N}{2}$$

这对于拖动恒转矩负载来说, 并无实际意义。一般来说, 在拖动恒转矩负载时, 实际工作频率的范围是

$$f_x \leq 1.5f_N$$

(2)  $2p = 2$  的普通电动机。由于在额定频率以上运行时, 电动机转速超过 3000r/min。这时, 需要考虑轴承和传动机构的磨损及振动等问题, 通常以

$$f_N \leq 1.2f_N$$

为宜。

## (二) 变频器的选择

### 1. 容量的选择

(1) 对于连续恒定负载。变频器的容量（指变频器说明书中的“配用电动机容量”）只需与电动机容量相当即可。

(2) 对于长期变化负载、断续负载和短时负载。由于电动机有可能在“短时间”内过载，故变频器的容量应适当加大。通常，应满足最大电流原则，即

$$I_N \geq I_{Mmax}$$

式中  $I_N$ ——变频器的额定电流；

$I_{Mmax}$ ——电动机在运行过程中的最大电流。

### 2. 类型及控制方式的选择

在选择变频器类型时，需要考虑的因素有：

(1) 调速范围。如前述，在调速范围不大、对机械特性的硬度要求也不高的情况下，可考虑选择较为简易的只有 V/F 控制方式的变频器，或无反馈矢量控制方式。当调速范围很大时，应考虑采用有反馈的矢量控制方式。

(2) 负载转矩的变动范围。对于转矩变动范围不大的负载，也可首先考虑选择较为简易的只有 V/F 控制方式的变频器。但对于转矩变动范围较大的负载，由于所选的  $U/f$  线不能同时满足重载与轻载时的要求，故不宜采用 V/F 控制方式。

(3) 负载对机械特性的要求。如负载对机械特性的要求不很高，则可考虑选择较为简易的只有 V/F 控制方式的变频器，而在要求较高的场合，则必须采用矢量控制方式。如果负载对动态响应性能也有较高要求，还应考虑采用有反馈的矢量控制方式。

## 第七节 恒功率负载的变频调速

### 一、需要注意的主要问题

恒功率负载在设计变频调速系统时，必须注意的要害问题，是如何减小拖动系统的容量。

#### (一) 实例

某卷取机的转速范围为 53 ~ 318 r/min，电动机的额定转速为 960 r/min，传动比  $\lambda = 3$ 。

卷取机的机械特性如图 5-14 (a) 的曲线①所示。图中的横坐标是负载转矩  $T_L$  及其折算值  $T'_L$ ；纵坐标是负载转速  $n_L$  及其折算值  $n'_L$ 。这里，转速的折算值  $n'_L$  实际上就是电动机的转速  $n_M$ 。在计算时，为了便于比较，负载的转矩和转速都用折算值。

#### 1. 最高转速时的负载功率

因为

$$T'_L = T'_{Lmin} = 10N \cdot m$$

$$n'_L = n'_{Lmax} = 960r/min$$

所以

$$P_L = \frac{10 \times 960}{9550} \approx 1(kW)$$

#### 2. 最低转速时的负载功率

因为

$$T'_L = T'_{Lmax} = 60N \cdot m$$

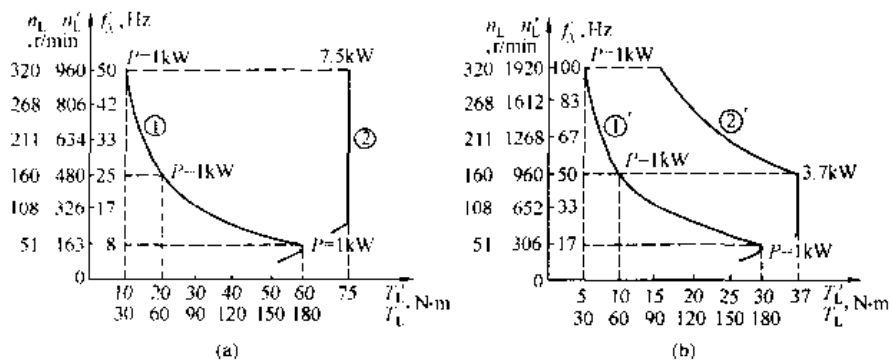


图 5-14 电动机拖动恒功率负载

(a)  $f_x \leq f_N$ ; (b)  $f_x \leq 2f_N$

$$n'_{L} = n'_{L\min} = 153 \text{ r/min}$$

所以

$$P_L = \frac{60 \times 153}{9550} \approx 1 \text{ (kW)}$$

### 3. 所需电动机的容量

因为 电动机的额定转矩必须能够带动负载的最大转矩，即

$$T_{MN} \geq T'_{L\max} = 60 \text{ N}\cdot\text{m}$$

同时，电动机的额定转速又必须满足负载的最高转速，即

$$n_{MN} \geq n'_{L\max} = 960 \text{ r/min}$$

所以 电动机的容量应满足

$$P_{MN} \geq \frac{60 \times 960}{9550} \approx 6 \text{ (kW)}$$

选

$$P_{MN} = 7.5 \text{ kW}$$

可见，所选电动机的容量为负载所需功率的 7.5 倍。

这是因为，如果把频率范围限制在  $f_x \leq f_N$  内，则所需电动机容量为

$$P_{MN} \geq \frac{T'_{L\max} n_{L\max}}{9550}$$

而负载所需功率为

$$P_L = \frac{T'_{L\max} n_{L\min}}{9550}$$

两者之比为

$$\frac{P_{MN}}{P_L} \geq \frac{n_{L\max}}{n_{L\min}} = \lambda$$

式中  $\lambda$ ——负载的调速范围。

变频调速系统的容量为负载所需功率的  $\lambda$  倍，是很浪费的。

## (二) 减小容量的对策

### 1. 基本考虑

电动机在  $f_x > f_N$  时的有效转矩线也具有恒功率性质，应考虑利用电动机的恒功率调速区来带动恒功率负载，使两者的特性比较接近。



2. 频率范围扩展至  $f_X \leq 2f_N$  时的系统容量

以  $f_{\max} = 2f_N$  为例，因为电动机的最高转速比原来增大了一倍，则传动比  $\lambda'$  也必增大一倍，为  $\lambda' = 6$ 。图 5-14 (b) 画出了传动比增大后的机械特性曲线。

(1) 电动机的额定转矩。因为  $\lambda' = 2\lambda$ ，所以负载转矩的折算值减小了一半，即

$$T_{MN} \geq T'_{L\max} = 30 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 电动机的额定转速仍为 960r/min。

(3) 电动机的容量为

$$P_{MN} \geq \frac{30 \times 960}{9550} \approx 3 \text{ (kW)}$$

取

$$P_{MN} = 3.7 \text{ kW}$$

可见，所需电动机的容量减小了一半。

由于电动机的工作频率过高会引起轴承及传动机构磨损的增加，故对于卷取机一类的必须连续调速的机械来说，拖动系统的容量已经不大可能进一步减小了。

3.  $f_X \leq 2f_N$ 、两挡传动比时的系统容量

有些机械对转速的调整，只在停机时进行，而在工作过程中并不调速，如车床等金属切削机床的调速。对于这类负载，可考虑将传动比分为两挡，如图 5-15 所示。

(1) 低速挡。当电动机的工作频率从  $f_{\min} \rightarrow f_{\max}$  时，负载转速从  $n_{L\min} \rightarrow n_{L\text{mid}}$ ， $n_{L\text{mid}}$  是高速挡与低速挡之间的分界速。

(2) 高速挡。当电动机的工作频率从  $f_{\min} \rightarrow f_{\max}$  时，负载转速从  $n_{L\text{mid}} \rightarrow n_{L\max}$ 。

如计算准确，可使电动机的有效转矩线与负载的机械特性曲线十分贴近，则所需电动机容量也与负载所需功率接近，如图 5-15 中的面积 OA'H'G" 所示。

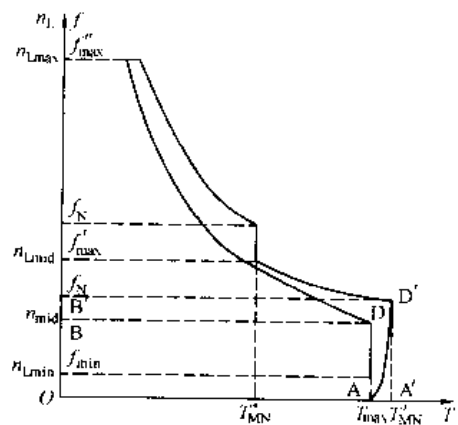


图 5-15  $f_X \leq 2f_N$ 、两挡传动比带恒功率负载

## 二、电动机和变频器的选择

### 1. 电动机的容量

如前例，电动机的容量与传动比密切相关，所以在进行计算时，必须和传动机构的传动比、调速系统的最高工作频率等因素一起，进行综合考虑。总的原则是：在最高工作频率不超过两倍额定频率的前提下，通过适当调整传动机构的传动比，尽量减小电动机的容量。

### 2. 电动机的类别

对于卷取机械，由于随着卷径的增大，转速（频率）不断下降，机械特性曲线也就不断变换。因此，机械特性的“硬度”对于这类负载来说，并无意义（因为机械特性是针对在同一条曲线上运行时的转速变化而言的）。一般来说，选用普通电动机就可满足要求。

对于机床类负载，则由于在切削过程中转速是不调节的，故对机械特性的要求较高，且调速范围也往往很大，应考虑采用变频调速专用电动机。

### 3. 变频器的容量和类别

卷取机械是很少出现过载的，故变频器的容量只需与电动机相符即可。变频器也可选择通用型的，采用 V/F 控制方式已经足够。但对动态性能有较高要求的卷取机械，则必须考

考虑采用具有矢量控制功能的变频器。

机床类负载是长期变化负载，是允许电动机短时间过载的，故变频器的容量应加大一挡。并且，应采用矢量控制方式。

## 第八节 二次方律负载的变频调速

### 一、需要注意的主要问题

二次方律负载实现变频调速后的主要问题是如何得到最佳节能效果。

#### 1. 节能效果与 V/F 线的关系

如图 5-16 (a) 所示，曲线 0 是平方律负载的机械特性；曲线 1 是电动机在 V/F 控制方式下转矩补偿为 0 ( $k_U = k_f$ ) 时的有效转矩线，与图 5-16 (b) 中的曲线 1 对应。当转速为  $n_X$  ( $n_X < n_N$ ) 时：由曲线 0 可知，负载转矩为  $T_{LX}$ ；由曲线 1 可知，电动机的有效转矩为  $T_{MX}$ 。

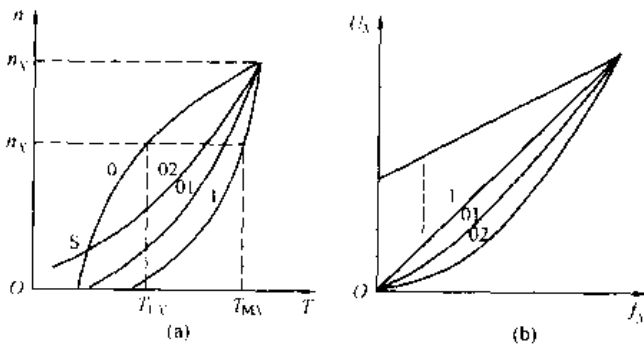


图 5-16 电动机的有效转矩线与低减  $U/f$   
(a) 有效转矩线与平方律负载；(b) 低减  $U/f$

十分明显，即使转矩补偿为 0，在低频运行时，电动机的转矩与负载转矩相比，仍有较大余量。这说明，该拖动系统还有相当大的节能余量。

为此，变频器设置了若干低减  $U/f$  ( $k_U < k_f$ ) 线，如图 5-16 (b) 中的曲线 01 和 02 所示。与此对应的有效转矩线如图 5-16 (a) 中的曲线 01 和 02 所示。

但在选择低减  $U/f$  线时，有时会发生难以启动的问题，如图 5-16 (a) 中的曲线 0 和曲线 02 相交于 S 点所示。

显然，在 S 点以下，拖动系统是不能启动的。对此，可采取的对策有：

- (1)  $U/f$  线选用曲线 01；
- (2) 适当加大启动频率。

应该注意的是，几乎所有的变频器在出厂时都把  $U/f$  线设定在具有一定补偿量的情况下 ( $U/f > 1$ )。如果用户未经功能预置，直接接上水泵或风机运行，节能效果就不明显了。个别情况下，甚至会出现低频运行时因励磁电流过大而跳闸的现象。

由于电动机有效转矩线的形状不可能与负载的机械特性完全吻合，所以，即使在低减  $U/f$  的情况下运行，仍具有节能潜力。为此，有的变频器还设置了“自动节能”功能，以利于进一步挖掘节能潜力。

#### 2. 节能效果与变频器台数的关系

由于变频器的价格较贵，为了减少设备投资，不少单位常常采用由一台变频器控制多台泵的方案，即只有一台泵进行变频调速，其余都在工频下运行。从控制效果（如恒压供水）来说，这是完全可行的。但显然，这是以牺牲节能效果为代价的。

### 二、电动机与变频器的选择

#### 1. 电动机的选择

绝大多数风机水泵在出厂时都已经配上了电动机，采用变频调速后没有必要另配。

#### 2. 变频器的选择

大多数生产变频器的工厂都提供了“风机、水泵用变频器”，可以选用。它们的主要特点有：

(1) 风机和水泵一般不容易过载，所以，这类变频器的过载能力较低，为 120%，1min（通用变频器为 150%，1min）。因此，在进行功能预置时必须注意，由于负载的阻转矩与转速的平方成正比，当工作频率高于额定频率时，负载的阻转矩有可能大大超过额定转矩，使电动机过载。所以，其最高工作频率不得超过额定频率。

(2) 配置了进行多台控制的切换功能。如前述，在水泵的控制系统中，常常需要由 1 台变频器控制多台水泵，为此，大多数变频器都配置了能够自动切换的扩展功能。

(3) 配置了一些其他专用的控制功能，如“睡眠”与“唤醒”功能、PID 调节功能等。

## 第九节 变频与工频的切换

### 一、切换过程的基本分析

#### (一) 切换控制的提出

有的用户在采用变频调速拖动系统时，常常提出变频器和工频电源进行切换的要求。主要有故障切换和多泵供水切换两种类型。

##### 1. 故障切换

部分生产机械在运行过程中，是不允许停机的。如纺织厂的鼓风机、锅炉的送风机和引风机等。针对这些机械的要求，在“变频运行”过程中，一旦变频器因故障而跳闸时，必须能够自动地切换为“工频运行”方式，同时进行声光报警。

##### 2. 多泵供水切换

在多泵供水系统中，常常采用由一台变频器控制多台水泵的方案。通常称为“1 拖 X”（由 1 台变频器控制 X 台水泵）。

“1 拖 X”的工作情况是：首先由变频器控制“1 号泵”运行；当用水量增大，变频器的运行频率已经达到上限频率（通常等于工频）时，如果在确认时间（通常为 2~5min）内，水压始终低于“目标压力”，则将“1 号泵”切换为工频运行。

同时，变频器的输出频率迅速降为 0Hz，并切换至“2 号泵”，使“2 号泵”变频启动。

#### (二) 切换控制的主电路

##### 1. 主电路的构成

如图 5-17 所示，各接触器的功用是：

(1) KM1。用于将电源接至变频器的输入端。

(2) KM2。用于将变频器的输出端接至电动机。

(3) KM3。用于将工频电源直接接至电动机。

此外，因为在工频运行时，变频器不可能对电动机的过载进行保护，所以，有必要接入热继电器 KH，用于作为工频运行时的过载保护。

##### 2. 切换的动作顺序

切换时，应先断开 KM2，使电动机脱离变频器。经适当延时后合上 KM3，将电动机接至工频电源。

由于在变频器的输出端是不允许与电源相接的，因

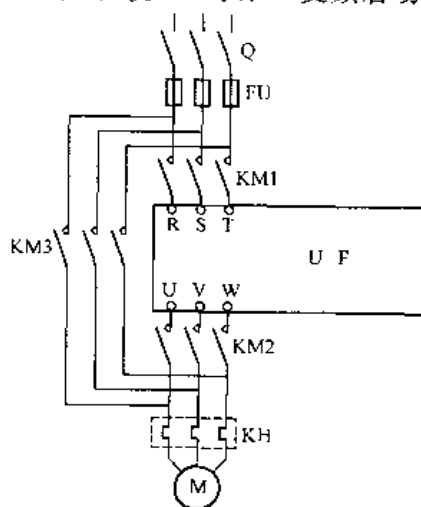


图 5-17 切换控制的主电路

此，接触器 KM2 和 KM3 绝对不允许同时接通，相互间必须有非常可靠的互锁。所以，从 KM2 断开到 KM3 闭合之间的延迟时间是必须的，通常称为“切换时间”，用  $t_c$  表示。

当 KM3 闭合，电动机接至工频电源时，应避免产生过大的冲击电流，干扰电网。

## 二、电动机切断电源后的过渡过程

### (一) 电磁过渡过程

#### 1. 定子绕组的自感电动势立即消失

KM2 断开后，电动机定子绕组中的电流及其磁场将立即消失，其能量消耗在 KM2 断开瞬间触点间的电弧上。因此，定子绕组的自感电动势将随着磁场的消失而消失。

#### 2. 转子绕组中存在衰减的直流电流

由于电动机的转子绕组是自成回路的，所以，转子绕组的自感电动势将阻止电流的消失。从而，转子绕组中的电流将有一个逐渐衰减的过程，它不再交变，其初始值取决于接触器 KM2 断开瞬间的转子电流值。

毋庸置疑，转子电流将产生一个逐渐衰减的直流磁场。

#### 3. 电动机的状态和同步发电机类似

转子是直流磁场，定子是三相绕组，这是同步发电机的基本组态。就是说，转子的直流磁场被定子绕组所切割，并在定子绕组中产生三相感应电动势。

有必要指出，这和异步电动机的再生状态（异步发电机状态）是不同的。异步发电机发电的充要条件，是定子绕组必须和电源相接，以得到励磁电流。而在 KM2 断开后，定子绕组是开路的。

总之，异步电动机在切断电源后，存在着一个处于同步发电机状态的电磁过渡过程。

#### 4. 电动势的初始值

异步电动机在正常运行时，有两个基本情况：

(1) 根据电动势平衡方程，定子绕组反电动势的有效值是和电源电压十分接近的。

(2) 根据磁动势平衡原理，转子电流的磁动势和定子电流的磁动势也是十分接近的。

按照能量不能跃变的原理，在 KM2 刚断开的瞬间，转子电流的磁动势和磁通必将维持原值。所以，定子绕组电动势的初始值  $E_0$  也必将和电源电压十分接近。

在电磁过渡过程中，定子电动势的衰减方程如下：

$$E = E_0 e^{-\frac{t}{\tau_E}} \quad (5-7)$$

式中  $E$ —— $t$  秒时定子绕组的电动势（有效值），V；

$E_0$ ——电源切断瞬间，定子绕组电动势的初始值（有效值），V；

$\tau_E$ ——电磁时间常数，s。

定子电动势的衰减曲线如图 5-18 所示。

#### 5. 电磁过渡过程的时间常数

准确地计算上述过渡过程的时间常数是十分困难的。但可以通过简单的实验进行粗略的测定：

(1) 将三个功率相同的灯泡（220V、40W）连接成 Y 形后和电动机并联，如图 5-19 所示。合上开关 Q，令变频器的输出频率上升至 50Hz，使电动机在额定转速下空载运行，同时，灯泡 HL 将在额定电压下正常发光。

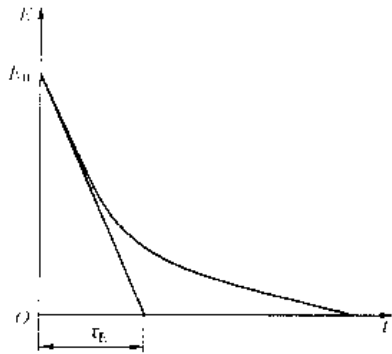


图 5-18 定子电动势的衰减过程

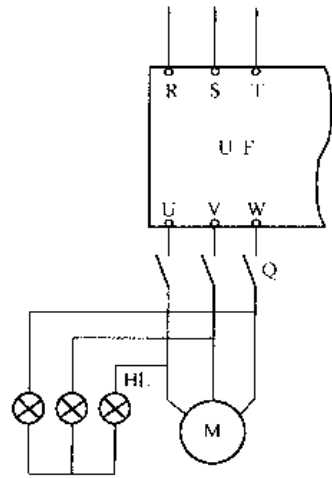


图 5-19 发电时间的测量

(2) 切断开关 Q,同时接通 PLC 的计时器。由于电动机处于发电状态,灯泡 HL 将继续发光,但必将逐渐变暗,到灯泡 HL 完全熄灭时,令 PLC 停止计时。由此测出的时间为 1.77~1.80s。

又通过实验知,220V、40W 的灯泡完全熄灭时的电压约为 7V。考虑到电压越低,衰减越慢。因此推断,总的过渡过程约在 2s 以上。由于电动机空转时惯性很大,在 2s 内的转速下降十分有限,故可以粗略地认为,上述数据基本上表达了电磁过渡过程的时间。当然,具体数据将因电动机的容量而异,但应在同一个数量级内。

按过渡过程的一般规律,过渡过程的总时间约为时间常数的 3 倍。则电磁时间常数约在 0.6s 以上,即

$$\tau_E \geq 0.6s$$

需要说明的是,由于 Q 断开时,定子绕组与灯泡构成了回路,定子的反电动势将通过灯泡放电。但可以证明,其时间常数不足 1ms,对上述试验结果并无大的影响。

#### 6. 电动势在不同时刻的计算数据

按  $\tau_E = 0.6s$  计,则由式 (5-7),定子绕组电动势在不同时刻的计算数据如表 5-3 所示。

表 5-3 定子绕组电动势在不同时刻的计算数据

计算时间 (s)	0.1	0.2	1.0	2.0	3.0
$E/E_0$ (%)	84.6%	54.9%	18.9%	3.57%	0.07%

上述数据与实验结果基本相符。

#### (二) 拖动系统的自由制动过程

所谓自由制动过程,就是在没有任何制动措施的情况下,断电后拖动系统转速下降的过程。自由制动过程中,转速的基本表达式是

$$n_t = n_{MN} e^{-\frac{t}{\tau_M}} \quad (5-8)$$

式中  $n_t$ —— $t$  秒时刻的转速, r/min;

$n_{MN}$ ——电动机的额定转速, r/min;

$\tau_M$ ——拖动系统的机械时间常数, s。

时间常数  $\tau$  的大小主要和拖动系统的惯性 (用飞轮力矩  $GD^2$  表达) 大小有关。

比较典型的实例如下:

(1) 风机。风机的惯性很大，较大容量风机的机械时间常数可达数分钟之久。

今假设  $n_{MN} = 1440 \text{ r/min}$ ， $\tau = 2 \text{ min} = 120 \text{ s}$ ，则当  $t = 3 \text{ s}$  时的转速为

$$n_t = 1440e^{-\frac{3}{120}} = 1404 \text{ (r/min)}$$

可见，在 3s 的时间内，转速的下降是十分有限的，其过渡过程中的转速曲线如图 5-20 所示。

(2) 供水系统的水泵。供水水泵在切断电源时，由于水具有位能，阻力较大，如图 5-21 (a) 所示，故停机十分迅速。

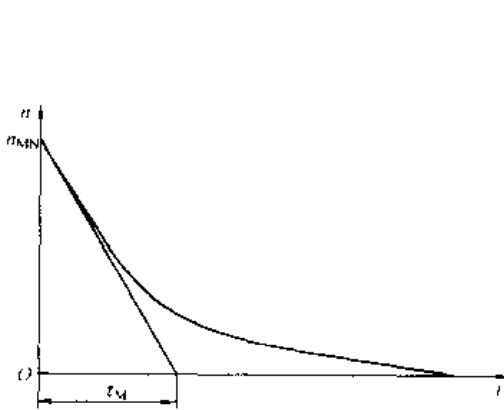


图 5-20 风机断电后的转速变化

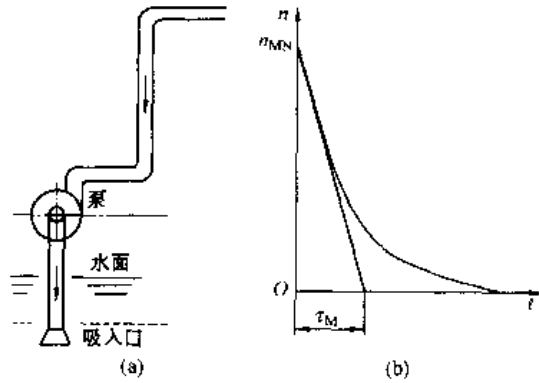


图 5-21 供水泵断电的转速变化

(a) 水泵工况；(b) 转速变化

根据经验较丰富的专家提供的情况以及不少读者和用户协助进行测试的结果，由于水泵的结构和工况不同，断电后停机时间的差异很大。最短者约为 0.25s 或更短。但大多数供水系统的管路中都装有止回阀，切断电源后的停机时间在 2.2s 以上，最长的甚至超过 2min。由此判断，供水系统中的电动机在自由制动过程中时间常数约在 0.7 ~ 1.0s 以上，即

$$\tau_M \geq 0.7 \sim 1.0 \text{ s}$$

其转速变化曲线如图 5-21 (b) 所示。

### 三、风机的故障切换控制

#### (一) 故障切换的特点

##### 1. 切换瞬间的频率不定

因为风机的工作频率是由工况决定的，变频器发生故障时，究竟在多大频率下工作，是无法预知的。

所以，故障切换不考虑变频器输出频率与电源电压的频率和相位等的关系。

##### 2. 风机转速的衰减情况

根据式 (5-8)，计算出风机在不同时间常数、不同切换时间的转速百分数如表 5-4 所示。

表 5-4 风机在不同时间常数、不同切换时间的转速百分数

拖动系统的机械时间 常数 $\tau_M$ (s)	切换时间 $t_c$ (s)					%
	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	
10	86.0	82.0	74.0	67.0	60.0	
15	90.0	87.5	82.0	76.6	71.6	
20	93.0	90.0	86.0	82.0	78.0	
30	95.0	93.5	90.0	87.5	88.6	
60	97.5	96.7	95.0	93.5	92.0	

### 3. 切换时间的选择

由于风机的机械时间常数较大，故选择切换时间的基本原则是：

(1) 切换应在电磁过渡过程基本结束后进行。为了避免电动机定子绕组的电动势和电源电压叠加，切换时间应大于电磁时间常数。

(2) 切换时电动机的转速不宜过低。如果当 KM3 闭合时，电动机的转速已经十分低，则切换电流将接近其或等于启动电流，这对于大容量电动机来说，当然是不允许的。

一般来说，电动机在切换时的转速（指 KM3 闭合时的转速）以不低于额定转速的 80% 为宜。

由于负载的机械时间常数各不相同，因此，切换时间的确定也不能一概而论。表 5-4 中，拖动系统的机械时间常数  $\tau_M$  可以粗略地估算为停机时间的三分之一，即

$$\tau_M \approx \frac{t_D}{3}$$

式中  $t_D$ ——停机时间，即从电动机切断电源到拖动系统完全停住所需的时间。

例如，某鼓风机，停机时间  $t_D = 3\text{min} = 180\text{s}$ ，则  $\tau_M \approx 60\text{s}$ 。由表 5-4 可知，只要切换时间  $t_C < 5\text{s}$  即可，今选 3s。理由是：

- (1) 电动机切断电源 3s 时，电动机的电磁过渡过程已经结束；
- (2) 这时，电动机的转速  $n_{MX} > 95\% n_{MN}$ ，切换电流不会很大。

#### (二) 故障切换电路示例

##### 1. 控制电路的基本要求

- (1) 运行方式的切换。操作人员既可以切换为变频运行，也可以切换为工频运行。
- (2) 故障切换。在变频运行的过程中，一旦变频器发生故障，应能自动地切换到工频运行，并进行声光报警。

##### 2. 控制电路

满足上述要求的切换控制电路如图 5-22 所示，运行方式由三位开关 SA 进行选择。

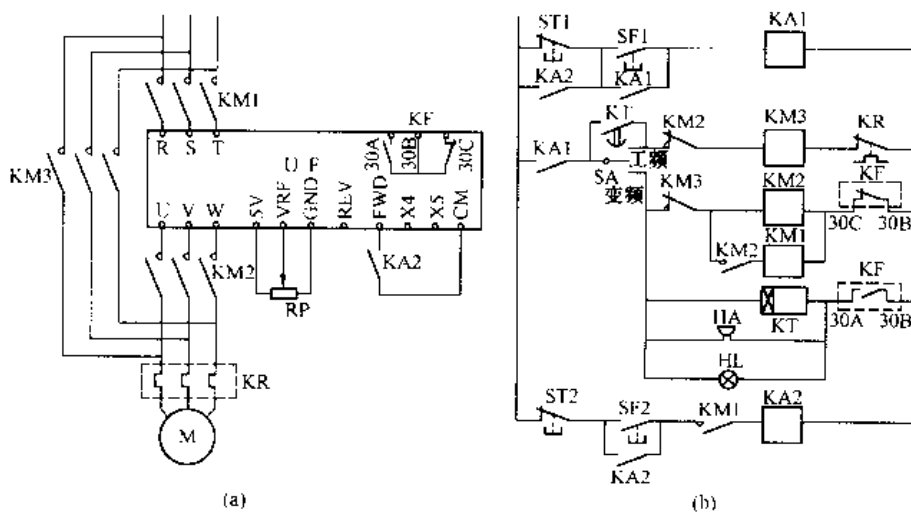


图 5-22 继电器控制的切换电路

(a) 变频器电路；(b) 继电器控制电路

当 SA 合至“工频运行”方式时，按下启动按钮 SF1，中间继电器 KA1 动作并自锁，进

而使接触器 KM3 动作，电动机进入“工频运行”状态。按下停止按钮 ST1，中间继电器 KA1 和接触器 KM3 均断电，电动机停止运行。

当 SA 合至“变频运行”方式时，按下启动按钮 SF1，中间继电器 KA1 动作并自锁，进而使接触器 KM2 动作，将电动机接至变频器的输出端。KM2 动作后，KM1 也动作，将工频电源接到变频器的输入端，并允许电动机启动。

按下 SF2，中间继电器 KA2 动作，变频器的 FWD 与 CM 接通，电动机开始升速，进入“变频运行”状态。KA2 动作后，停止按钮 ST1 将失去作用，以防止直接通过切断变频器电源使电动机停机。

在变频运行过程中，如果变频器因故障而跳闸，则：“30B—30C”断开，接触器 KM2 和 KM1 均断电，变频器和电源之间以及电动机和变频器之间，都被切断；与此同时，“30B—30A”闭合，一方面，由蜂鸣器 HA 和指示灯 HL 进行声光报警。同时，时间继电器 KT 线圈得电，其触点延时（如延时 3s）后闭合，使 KM3 动作，电动机进入工频运行状态。

操作人员发现后，应将选择开关 SA 旋至“工频运行”位。这时，声光报警停止，并使时间继电器断电。

在变频调速正常运行时，如按下 ST2，则 KA2 断电，变频器的 FWD 与 CM 之间断开，电动机减速并停止。

#### 四、多泵供水系统的运行切换控制

##### (一) 供水系统运行切换的特点

##### 1. 切换时变频器的工作频率接近工频

如前所述，供水系统的切换是当变频器的输出频率已经达到上限频率，而压力仍不足时进行的。所以，切换时变频器的输出频率基本上等于工频。但因为计量上有差异的原因，以及工频频率也可能有波动，因此，绝对相等是很难出现的。

##### 2. 切换时电动机的电磁过渡过程远未结束

根据式 (5-8)，计算出供水水泵在不同时间常数、不同切换时间的转速百分数如表 5-5 所示。

表 5-5 供水水泵在不同时间常数、不同切换时间的转速百分数 %

拖动系统的机械时间 常数 $\tau_M$ (s)	切 换 时 间 $t_c$ (ms)				
	50	100	150	200	250
0.7	93.1	86.7	80.7	75.1	70.0
0.8	94.0	88.2	82.9	77.9	73.1
1.0	95.1	90.5	86.0	81.9	77.9
2.0	97.5	95.1	92.8	90.5	88.2
3.0	98.3	96.7	95.1	93.5	92.0
4.0	98.7	97.5	96.3	95.1	94.0

由表 5-5 可以看出，满足电动机转速不低于额定转速的 80% 的切换时间，远小于电动机的电磁过渡过程的时间常数。所以，必须考虑定子电动势和电源电压的相位关系。

##### (二) 相位关系对切换电流的影响

##### 1. 定子电动势的波形特点

定子电动势的波形与电源电压波形之间的关系如图 5-23 所示，电动势的波形特点如下：



- (1) 因为  $e_0$  已经有所衰减, 所以, 电动势的振幅值低于工频电压的振幅值。
- (2) 因为转子的转速也已经有所降低, 故电动势的周期大于工频电压的周期。

### 2. 切换时刻对电流的影响

十分明显, 如果在 KM3 闭合的瞬间, 电源电压恰好与定子绕组的电动势同相, 如图 5-23 (a) 所示, 则切换时将没有电流冲击; 反之, 如果在 KM3 闭合的瞬间, 电源电压恰好与定子绕组的电动势反相, 如图 5-23 (b) 所示, 则切换时必将形成很大的冲击电流。

因此, 只有在定子电动势与电源电压同相的瞬间, 才是切换的最佳时刻。所以, 切换控制的关键是如何“捕捉”到定子电动势与电源电压的同相点。

## 五、差频同相的原理与方法

### 1. 差频同相的概念

要使变频器的输出频率与电源的工频频率完全相同, 是十分困难的。如果在两者的频率之间保留一定差值 ( $\Delta f$ ) 的情况下“捕捉”同相点, 将会容易得多。

由于是在频率不相等的情况下“捕捉”同相点, 故称为差频同相。

差频同相的基本出发点是: 当变频器的输出频率与电源频率存在差异时, 两者的同相点之间将不断地作相对移动, 如图 5-24 所示。这个特点, 十分有利于“捕捉”到同相点。因此, 差频同相的方法可使捕捉同相点的工作更加简单可靠。实现差频同相的装置称为自动转换监控器。

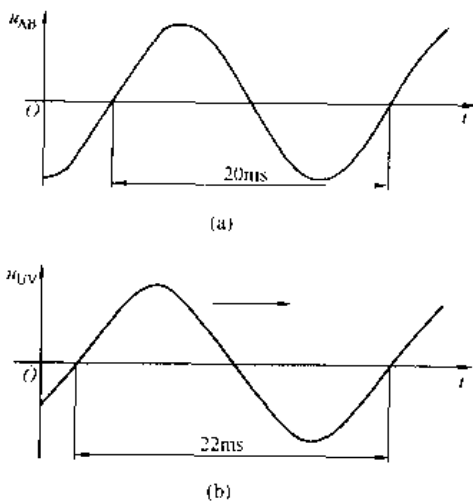


图 5-24 同相点的相对移动

(a) 电源电压波形; (b) 变频电压波形

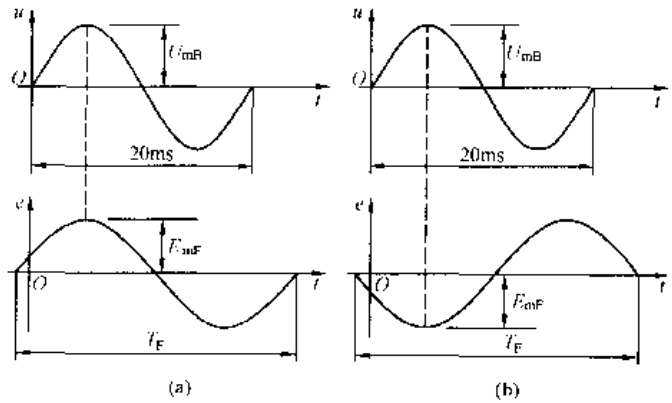


图 5-23 切换瞬间的电压波形

(a) 电压与电动势同相; (b) 电压与电动势反相

### 2. 差频同相的实施

(1) 设置“频段陷阱”。图 5-24 表明, 变频器与电源的频率差越小, 同相点之间作相对移动的速度越慢, “捕捉”同相点将越困难。

为此, “自动转换监控器”设置了一个“频段陷阱” ( $50 \pm \Delta f$ ) Hz。就是说, 在“自动转换监控器”要求切换时, 变频器的输出频率与电源频率之间应该有一个频率差  $\Delta f$ 。这可以通过预置变频器的上限频率来实现。例如, 变频器的上限频率预置为 49.6Hz, 则  $\Delta f \approx 0.4$ Hz。

这个要求和供水系统的工作并不矛盾。事实上, 从节能的观点出发, 变频供水时, 工作在 50Hz 是并不可取的。因为, 同样运行在 50Hz 下, 变频运行比工频运行时的功耗要大一些。所以, 把变频器的上限频率预置为 49.5Hz 或稍高一些是较好的选择。

(2) 切换的工作过程。当供水系统中变频器的运行频率达到上限频率, 并且经过确认时

间，确认需要切换时，供水系统将向“自动转换监控器”发出切换指令。“自动转换监控器”在得到指令后立即开始“捕捉”同相点。

当“捕捉”到同相点时，便断开 KM2，并在延时 100ms 后，接通 KM3，切换工作即告完成。

### 3. 关于切换时间 (100ms)

(1) 转速方面。由表 5-5 知，当 KM2 切断后 100ms 的瞬间，电动机的转速在额定转速的 86.7% 以上，满足切换转速不低于  $80\% n_{MN}$  的要求。

(2) 相位方面。一方面，100ms 是电源电压的 5 个整周期。

另一方面，按变频器的上限频率为  $50 - 0.5 = 49.5$  (Hz) 计算，其周期为 20.2s；又按表 5-5 中的最坏情况 ( $\tau_p \approx 0.7s$ ) 计算，100ms 时，电动机的转速为上限转速的 86.7%，则定子绕组电动势的周期是 23.5ms。这里，周期的大小是随转速的下降而逐渐增加的。为简便起见，取 5 个周期的平均值 20.86ms，5 个周期的总时间为 104.3ms。

就是说，电源电压与定子电动势之间，在 5 个周期内的时间差为 4.3ms。在第 5 周期的相位差为

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = 0.43\pi = 77.4^\circ$$

实际上，在大多数情况下， $\tau_p$  的数值都大于 0.7s， $\Delta\varphi$  的值要小得多。

为了减小  $\Delta\varphi$ ，在“捕捉”到同相点后，可适当增加一个提前量，如图 5-25 所示。则在切换瞬间 (KM3 闭合的瞬间)，将十分接近于同相点。

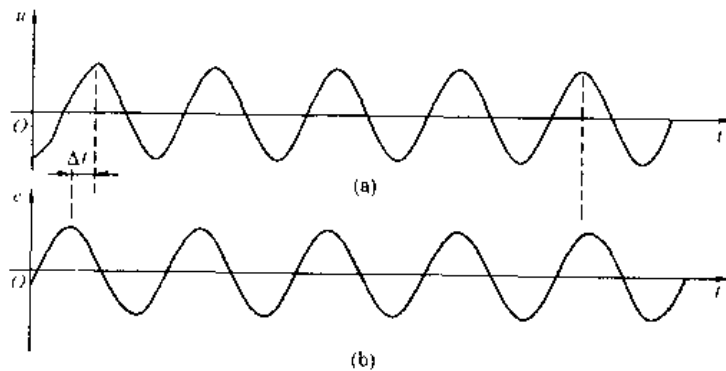


图 5-25 差频同相时的瞬间压差

(a) 电源电压的波形；(b) 定子电动势的波形

### 4. 设置“频段陷阱”的注意点

(1) 陷阱宽度。陷阱越宽，则同相点的相对移动速度越快，捕获率越大，但在第 5 周期时的相位差越大，可能产生较大切换电流的可能性也越大；反之，陷阱越窄，则切换电流越平稳，但由于同相点的相对移动速度较慢，捕获率降低，甚至有可能捕获不到。实践表明，陷阱宽度  $\Delta f = \pm 0.5\text{Hz}$  是比较适宜的。

(2) 分辨率。如果在陷阱区间内，出现两个或多个相位重合点时，应能准确地分辨出最佳的切换点。

(3) 灵敏度。捕捉同相点时必须解决好捕捉的灵敏度，就是说，必须能够及时地捕捉到同相点。由于电源的“A”相和发电机的哪一相同相并不重要，因此，在一个同期内有三个捕捉点，并且，电源的 B 相和 C 相也同时捕捉。所以，捕捉的机率是较高的。

### 5. 关于接触器 KM3 的选择

由于在实际工作中，很难准确地估计时间常数  $\tau_p$ ，因此，很难保证在第 5 个周期时，定子电动势和电源电压之间的同相度。

此外，由于在 100ms 后，电动机的转速多少有些下降，定子绕组电动势的周期略有加大。因此，在切换瞬间，即使 A 相的相位对齐了，其他两相的波形也不可能同时对齐，如图 5-26 所示。所以，实际上不可能完全没有电流的冲击，而只能把电流的冲击限制在较小范围内。

因此，在选择接触器 KM3 时，其触点电流以适当加大为宜，一般有

$$I_{KN} \geq (1.5 \sim 2.5) I_{MN} \quad (5-9)$$

式中  $I_{KN}$ ——接触器触点的额定电流；

$I_{MN}$ ——电动机的额定电流。

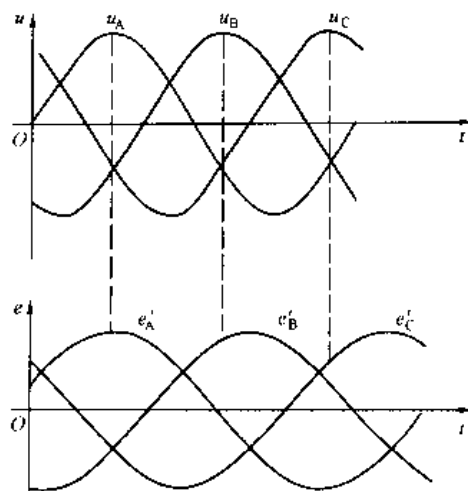


图 5-26 三相的相位情形

# 工厂运输机械的变频调速

## 第一节 概 述

### 一、工厂运输机械的任务和类别

#### 1. 工厂运输机械的任务

- (1) 完成原材料、半成品、成品等的装卸及堆垛等任务；
  - (2) 把原材料、半成品、成品等从一道工序转移到另一道工序；
  - (3) 在运输过程中同时进行某些加工工艺，如电镀、油漆、干燥、装配等。
- 工厂运输贯穿在生产的全过程中，是工业生产中十分重要的环节之一。

#### 2. 工厂运输机械的主要作用

- (1) 减少停机时间，缩短生产周期，提高生产效率；
- (2) 保护工件和产品，减少物料损耗；
- (3) 减轻劳动强度，改善劳动条件；
- (4) 缩短生产周期，减少运输人员等。

#### 3. 工厂运输机械的类别

工厂运输机械的类别很多，难以尽述，主要的有：

- (1) 起重机械。具有起吊物品功能的机械，如各种类型的起重机、电梯等。
- (2) 地面运输机械及悬置运输机械。用来整批地搬运物品的机械，如叉车、电动平车、转运台车、架空索道等。
- (3) 连续输送机械。将物品按一定的路线，连续地进行运输的机械，如悬挂输送机、带式输送机等。

### 二、工厂运输机械的拖动系统

#### 1. 工厂运输机械的负荷特点

绝大多数工厂运输机械的阻转矩都具有恒转矩的特点，如第一章第五节所分析的那样。

#### 2. 对机械特性的要求

不同类型的运输机械对机械特性的要求很不相同，例如：有的机械对机械特性并无要求，如输煤机、部分带式输送机等；有的机械由于要求能够准确定位，对机械特性的要求较高，如桥式起重机、部分与生产工艺紧密相关的带式输送机等。

因此，在考虑工厂运输机械的拖动系统时，需要针对具体情况，进行具体分析。

#### 3. 对调速的要求

工厂运输机械普遍地要求能够调速，但大部分机械的调速范围并不大。

## 第二节 带式输送机的变频调速

### 一、概述

#### (一) 基本构造

见图 6-1。

#### (二) 主要类别

##### 1. 按运行方式分

(1) 连续输送式。输送机连续地以恒速运行，如输煤机、生产流水线等。

(2) 间歇输送式。输送机在工作时，运行和停止不断地交替。如部分生产流水线，每隔一段时间，所有工件同时向下一个工位移动。通常，运行的时间和停止的时间都是一定的。

##### 2. 按负载的变化情形分

(1) 负载恒定式。在传输过程中，负载的大小基本不变。多数生产流水线属于这一类。

(2) 负载变动式。输送物料的多少是不断变动的，如输煤机、输矿石机等。

##### 3. 按输送的倾斜状况分

(1) 水平输送式。运输带处于水平状态。

(2) 向上或向下输送式。运输带处于倾斜状态。

(3) 混合式。运输带既有水平部分，也有向上或向下的部分。

### 二、变频调速举例

以某饮料灌装输送带为例，电动机的额定容量为 5.5kW，额定转速为 960r/min。今欲采用变频调速系统，其设计步骤和方法如下。

#### (一) 电动机与变频器的选择

##### 1. 电动机的选择

由于要求输送带在转换工位时必须准确停住，不允许出现滑动。因此，选择 YEJ 系列电磁制动电动机，其基本电路如图 6-2 所示。

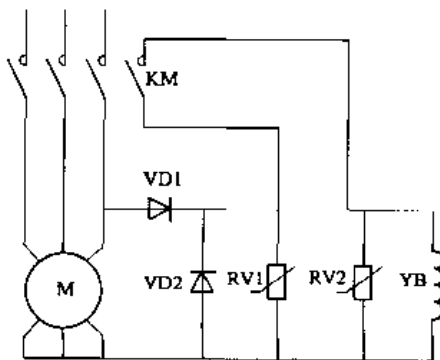


图 6-2 电磁制动电动机电路

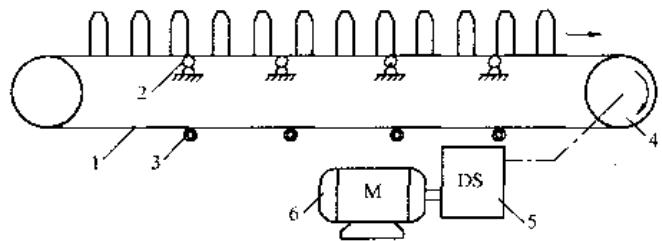


图 6-1 带式输送机的基本构造

1—运输带；2—上托辊；3—下托辊；4—改向滚轮；

5—减速机构；6—电动机

当接触器 KM 断开、电动机 M 未运行时，制动电磁铁的线圈 YB 处于失电状态，制动器的抱闸为抱紧状态；当接触器 KM 接通时，YB 经 KM 的辅助触点而得电，所得电压是经半波整流的相电压（DC 99V）。这时，制动器的抱闸松开，电动机启动。

图 6-2 中，二极管 VD1 用于进行半波整流；VD2 用于当外加电压过零时，为线圈 YB 提供一个续流通路；压敏电阻 RV1、RV2 用于当 KM 断开时，防止 YB 因反电动势过大而击穿。

##### 2. 变频器的选择

(1) 变频器的容量。因饮料灌装输送带不大会有严重过载的情形，因此，可选与 5.5kW 电动机相配的变频器 ( $S_N = 8.5\text{kVA}$ ,  $I_N = 14.2\text{A}$ )。

(2) 变频器的型号。由于饮料灌装输送带在启动时，静摩擦力较大，需要较大的启动转矩。因此，以选用具有无反馈矢量控制方式的变频器为宜。由于在运行过程中负载变化和调速范围均不大，即使是只有 V/F 控制方式的通用型变频器也可选用。

## (二) 控制电路示例

### 1. 变频控制电路

采用变频调速方案后，其控制电路如图 6-3 所示。要点如下：

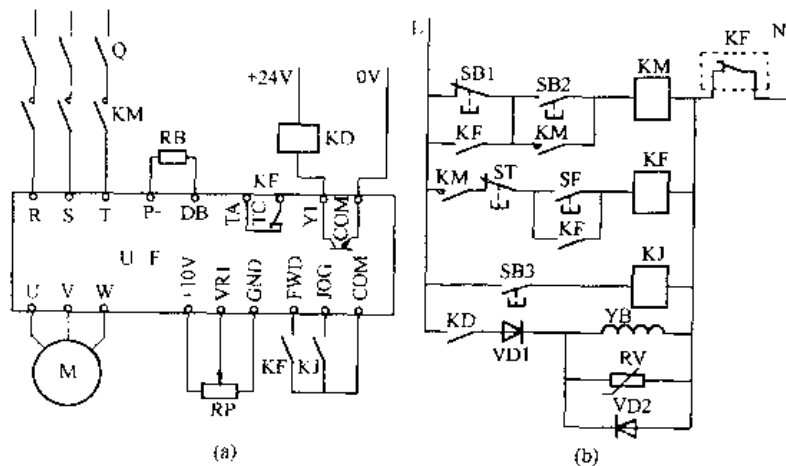


图 6-3 变频调速的控制电路

(a) 变频器电路；(b) 控制电路

(1) 变频器的通电。由按钮开关 SB1、SB2 通过接触器 KM 而进行控制。

(2) 变频器的运行。由按钮开关 SF、ST 通过继电器 KF 控制变频器的“FWD”与“COM”之间的接通与否，进而控制电动机的启动与停止。

(3) 电动机的制动。变频器在停止过程中，频率低于某一预置频率（如 0.5Hz）时，直流继电器 KD 失电，电磁制动器的线圈 YB 失电，将电动机抱紧。

(4) 变频器的点动。由按钮开关 SB3 通过继电器 KJ 控制变频器的“JOG”与“COM”之间的接通与否，进而控制电动机的点动。当变频器的输出频率超过 0.5Hz 时，直流继电器 KD 得电，电磁制动器的线圈 YB 得电并放松，使电动机能够启动。

(5) 变频器的调速。通过电位器 RP 进行无级调速。

### 2. 主要元器件的选择

(1) 空气断路器 Q。由式 (4-1) 有

$$I_{QN} \geq (1.3 \sim 1.4) \times 14.2 = 18.46 \sim 19.88(\text{A})$$

选  $I_{QN} = 20\text{A}$

(2) 接触器 KM。由式 (4-3) 有

$$I_{KN} \geq 14.2\text{A}$$

选  $I_{KN} = 20\text{A}$

(3) 调速电位器。选  $2\text{k}\Omega/2\text{W}$  电位器或  $10\text{k}\Omega/1\text{W}$  的多圈电位器。

(4) 制动电阻。由于每次频率下降的时间远小于整个周期的时间，故可以按说明书进行

选择:

$$R_B = 200\Omega$$

$$P_B = 0.5\text{kW}$$

### (三) 变频器的功能预置

#### 1. 拖动系统的运行周期

如图 6-4 所示。

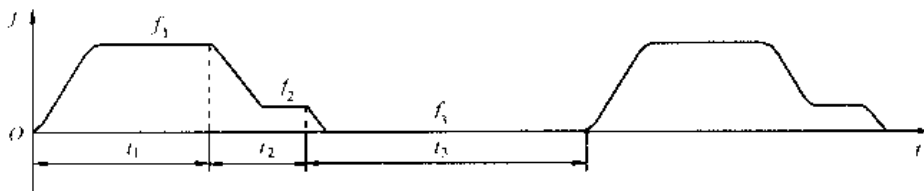


图 6-4 拖动系统的运行周期

$t_1$ —转换工位所需时间;  $f_1$ —与运行速度对应的频率;  $t_2$ —为了准确停机而降低转速所需时间;  $f_2$ —与低速对应的频率;  $t_3$ —停机进行加工(灌装、加盖、贴标签等)所需时间;  $f_3$ —停机时变频器的输出频率 (0Hz)

#### 2. 功能预置

设所选变频器为艾默生 TD3000 系列变频器, 其功能预置如下 (与出厂设定相同者不再预置):

##### (1) 控制方式的预置:

F0.02 = 0——选择无反馈矢量控制方式。

F0.03 = 5——选择模拟给定方式。

F0.05 = 1——选择由输入控制端子进行控制。

##### (2) 输入电动机的铭牌数据:

F1.01 = 5.5——电动机额定功率为 5.5kW。

F1.02 = 380——电动机额定电压为 380V。

F1.03 = 12.6——电动机额定电流为 12.6A。

F1.05 = 960——电动机额定转速为 960r/min。

##### (3) 预置电动机的自动测试功能:

F1.09 = 1——允许自动测试 (说明书中为“自动调谐”)。

F1.10 = 1——选择通过 RUN (运行) 键进行自动测试的功能。

##### (4) 预置点动功能:

F2.15 = 20——点动频率选择 20Hz。

F2.16 = 5.0——点动升速时间选择 5s。

F2.17 = 5.0——点动降速时间选择 5s。

##### (5) 升、降速功能预置:

F2.05 = 1——选择 S 形升、降速方式, 这是为了减缓在升、降速过程中加速度的变化, 以防止玻璃瓶倒下。

F0.10 = 5.0——升速时间选择 5s。

F0.11 = 5.0——降速时间选择 5s。

(6) 预置程序控制功能:

F8.00 = 2 ——选择连续循环方式。

F2.24 = 45.00 ——第1挡工作频率为45Hz。

F8.02 = 0 ——选择正方向旋转, 升速时间的预置如前述。

F8.03 = 20 ——工位转换时间为20s。

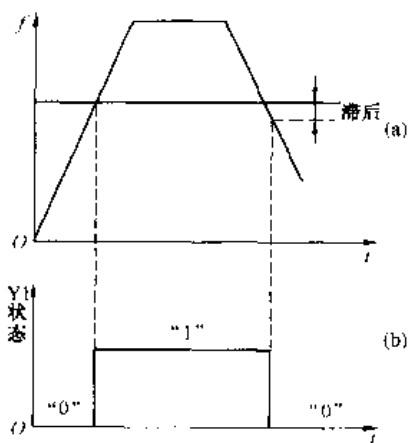


图 6-5 频率检测功能

(a) 输出频率; (b) Y1 状态

F2.25 = 10.00 ——第2挡工作频率为10Hz。  
F8.04 = 0 ——选择正方向旋转, 升速时间的预置如前述。

F8.05 = 5 ——低速缓冲时间为5s。

F2.26 = 0.00 ——第3挡工作频率为0Hz。

F8.06 = 0 ——选择正方向旋转, 升速时间的预置如前述。

F8.07 = 30 ——停机加工时间为30s。

(7) Y1 输出端子的功能预置:

F5.09 = 5 ——Y1 输出端子的功能是频率检测信号, 其含义如图 6-5 所示: 当频率上升至预置频率后, Y1 为导通状态; 当频率下降至预置频率, 并略滞后  $\Delta f$  后, Y1 恢复为截止状态。

F5.15 = 1% ——当变频器的输出频率大于  $50 \times 1\% = 0.5\text{Hz}$  时, Y1 的输出为“1”状态 (内部晶体管导通)。

F5.16 = 0.2% ——频率下降时, Y1 的输出转为“0”状态 (内部晶体管截止) 的频率将滞后 0.2%, 即实际转换频率为 0.4Hz。

### 第三节 桥式起重机的变频调速

#### 一、桥式起重机的基本构成

起重机械的种类很多, 其拖动系统的差异也较大, 但基本特点则大同小异。本书以桥式起重机作为代表, 说明其采用变频调速时的特点。

桥式起重机俗称行车, 是工矿企业中应用得十分广泛的一种起重机械, 其基本结构如图 6-6 所示。

##### 1. 桥架

是桥式起重机的基本构件, 它又由下列部件构成:

- (1) 主梁。用于铺设供小车运行的钢轨。
- (2) 端梁。在主梁的两侧, 用于和主梁连接并承受全部载荷。
- (3) 走台。在主梁外侧, 为安装和检修大、小车运行机构而设。

##### 2. 大车运行机构

用于拖动整套起重机顺着车间作“横向”运动 (以驾驶者的坐向为准)。由电动机、制动器、减速装置和车轮等组成。

##### 3. 小车运行机构

用于拖动吊钩及重物顺着桥架作“纵向”运动。也由电动机、制动器、减速装置和车轮



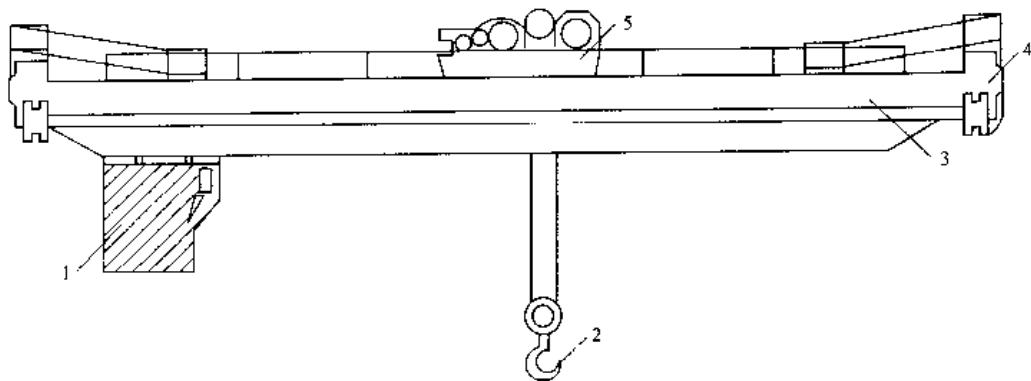


图 6-6 桥式起重机的基本结构

1—驾驶室；2—主钩；3—主梁；4—端梁；5—小车

等组成。

#### 4. 起升机构

用于拖动重物作上升或下降的起升运动。由电动机、减速装置、卷筒和制动器等组成。大型起重机（超过 10t）有两个起升机构：主起升机构（主钩）和副起升机构（副钩）。通常，主钩与副钩不能同时起吊重物。

### 二、桥式起重机的负载特点

#### 1. 负载性质

桥式起重机械的大车、小车和起升机构在调速过程中，它们的阻转矩都是基本不变的，具有恒转矩的特点，属于恒转矩负载。

#### 2. 起升机构的负载特点

由于重物在空间具有位能，因此，是位能负载。其特点是：重物上升时，是电动机克服各种阻力（包括重物的重力、摩擦阻力等）而做功，属于阻力负载；重物下降时，由于重物本身具有按重力加速度下降的能力（位能），因此，当重物的重力大于传动机构的摩擦阻力时，重物本身的重力（位能）将成为下降的动力，电动机变成了能量的接受者，故属于动力负载。但当重物的重力小于传动机构的摩擦阻力时，重物仍须由电动机拖动下降，仍属于阻力负载。

### 三、桥式起重机的调速方法与节能比较

#### 1. 原拖动系统的调速方法

起重机械各部分的拖动系统，一般都需要调速，由于异步电动机与其他电动机相比，有着无可匹敌的优点：结构简单坚固，易于维护。因此，在变频调速问世之前，尽管各种调速方法都不尽如人意，但从使用的可靠性出发，仍被广泛地使用着。在起重机械中，比较常见的是采用绕线转子异步电动机改变转子回路内电阻的调速方法，其主电路如图 6-7 所示。调速方法是通过滑环和电刷在转子回路内串入若干段电阻，由接触器来控制接入电阻的多少，从而控制了转速。

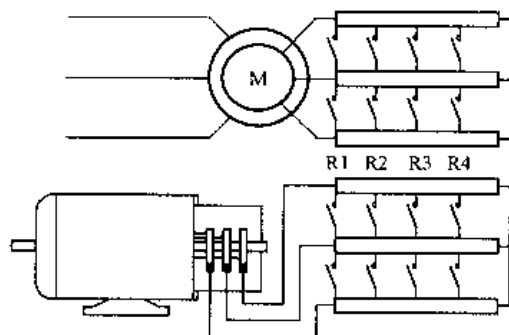


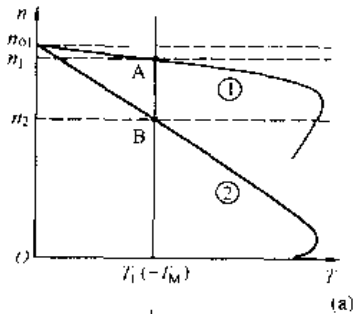
图 6-7 绕线转子异步电动机的主电路

#### 2. 绕线转子异步电动机调速时的功率损失

当异步电动机的转子回路串入电阻后，其机械特性如图 6-8 (a) 中的曲线②所示。这

时, 机械特性变“软”, 在负载转矩  $T_L$  不变的情况下, 拖动系统的工作点由 A 点移至 B 点, 转速由  $n_1$  下降为  $n_2$ 。根据第一章第四节所述的原理, 功率分配情况的变化如下。

(1) 同步转速  $n_{01}$  未变, 故电磁功率  $P_{M1}$  与未调速前的相同, 即



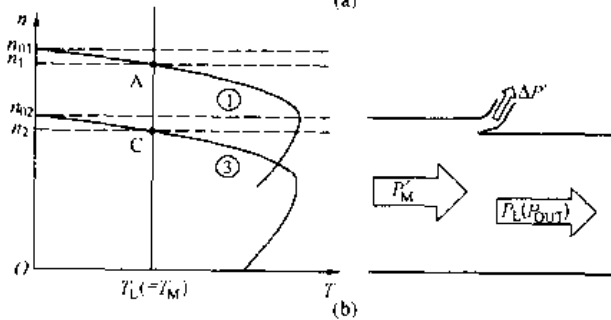
$$P_{M1} = \frac{T_L n_{01}}{9550}$$

(2) 电动机轴上的转速为  $n_2$ , 故输出功率  $P_{12}$  将随之下降, 即

$$P_{12} = \frac{T_L n_2}{9550}$$

(3) 电动机的功率损失为

$$\Delta P = \frac{T_L (n_{01} - n_2)}{9550} = \frac{T_L \Delta n_2}{9550}$$



功率分配如图 6-8 (a) 右侧所示, 可见, 损失的功率在电磁功率中所占的比例是相当大的。事实上, 转速的下降 (或者说, 机械功率的减少) 是通过在转子的外接电阻中消耗能量来实现的。并且, 转速越低, 机械特性越“软”, 损失功率在电磁功率中所占的比例也越大,

图 6-8 转子功率分配的比较

(a) 转子串入电阻时; (b) 变频调速时

是很不经济的。

### 3. 变频调速时的功率损失

异步电动机在改变频率后, 其机械特性基本上与自然机械特性平行。所以, 在不同转速下的转差大致相等, 如图 6-8 (b) 中的曲线③所示, 当负载转矩  $T_L$  不变时, 拖动系统的工作点为 C 点。这时:

(1) 同步转速下降为  $n_{02}$ , 故电磁功率也随之下降为  $P'_{M2}$ , 有

$$P'_{M2} = \frac{T_L n_{02}}{9550}$$

(2) 电动机轴上的转速也是  $n_2$ , 故输出功率  $P_{12}$  与上面的相同, 为

$$P_{12} = \frac{T_L n_2}{9550}$$

(3) 电动机的功率损失为

$$\Delta P' = \frac{T_L (n_{02} - n_2)}{9550} = \frac{T_L (n_{01} - n_1)}{9550} = \frac{T_L \Delta n_1}{9550}$$

可见, 损失的功率与额定转速时的基本相等, 如图 6-8 (b) 右侧所示。

所以, 两种调速方法相比, 变频调速的功率损失要小得多, 节能效果是十分显著的。

除此以外, 如果变频调速系统再配上电源反馈选件, 则在吊钩放下重物时, 还可将重物释放的位能反馈给电源, 进一步节能。

## 第四节 起升机构的变频调速

### 一、电动机的工作状态

#### (一) 起升机构的主要特点

##### 1. 起升机构的大致组成

如图 6-9 所示。

##### 2. 起升机构的转矩分析

在起升机构中，主要有三种转矩：

(1) 电动机的转矩  $T_M$ 。即由电动机产生的转矩，是主动转矩，其方向可正可负。

(2) 重力转矩  $T_G$ 。由重物及吊钩等作用于卷筒的转矩，其大小等于重物及吊钩等的重量  $G$  与卷筒半径  $r$  的乘积，即

$$T_G = Gr \quad (6-1)$$

$T_G$  的方向永远向下。

(3) 摩擦转矩  $T_0$ 。由于减速机构的传动比较大，最大可达 50 ( $\lambda = 50$ )，因此，减速机构的摩擦转矩（包括其他损失转矩）不可小视。摩擦转矩的特点是，其方向永远与运动方向相反。

#### (二) 起升过程中电动机的工作状态

##### 1. 重物上升

重物的上升，完全是电动机正向转矩作用的结果。这时，电动机的旋转方向与转矩方向相同，处于电动机状态，其机械特性在第 1 象限，如图 6-10 中的曲线①所示，工作点为 A 点，转速为  $n_1$ 。

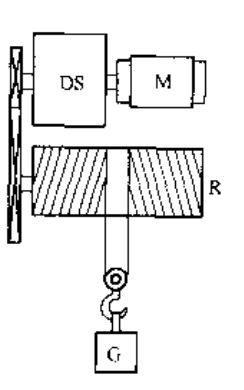


图 6-9 起升机构的结构

M—电动机；DS—减速机构；R—卷筒； $r$ —卷筒的半径；G—重物

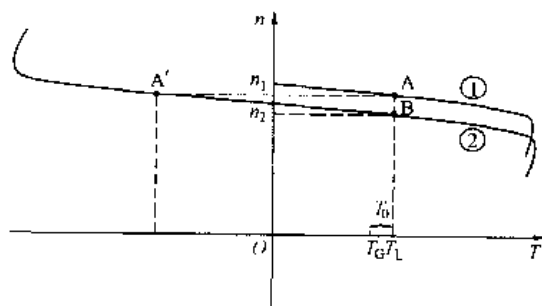


图 6-10 重物上升时的工作点

当通过降低频率而减速时，在频率刚下降的瞬间，机械特性已切换至曲线②了，工作点由 A 点跳变至 A' 点，进入第二象限，电动机处于再生制动状态（发电机状态），其转矩变为反方向的制动转矩，使转速迅速下降，并重又进入第一象限，至 B 点时，又处于稳定运行状态，B 点便是频率降低后的新工作点，这时，转速已降为  $n_2$ 。

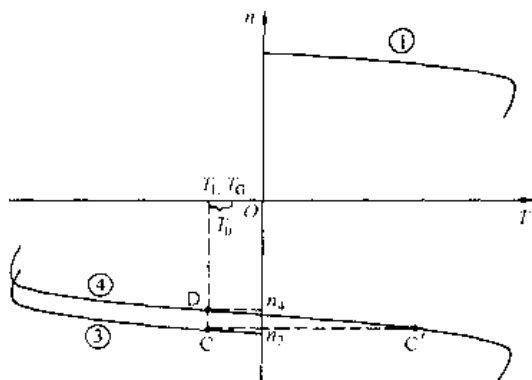


图 6-11 空钩下降时的工作点

使下降的速度减慢，并重又进入第三象限，至 D 点时，又处于稳定运行状态，D 点便是频率降低后的新的工作点，这时，转速为  $n_4$ 。

### 3. 重载下降

重载时，重物将因自身的重力而下降，电动机的旋转速度将超过同步转速而进入再生制动状态。电动机的旋转方向是反转（下降）的，但其转矩的方向却与旋转方向相反，是正方向的，其机械特性如图 6-12 的曲线⑤所示，工作点为 E 点，转速为  $n_5$ 。这时，电动机的作用是防止重物由于重力加速度的原因而不断加速、达到使重物匀速下降的目的。在这种情况下，摩擦转矩将阻碍重物下降，故相同的重物在下降时构成的负载转矩比上升时的小。

### (三) 与原拖动系统的比较

这里的原拖动系统专指绕线转子异步电动机拖动系统。

#### 1. 重物上升

机械特性也在第一象限，如图 6-13 中的曲线①所示，转速为  $n_1$ 。降速是通过转子电路串入电阻来实现的，这时，机械特性为曲线②，工作点由 A 点跳变至 A' 点，电动机的转矩大为减小，拖动系统因带不动负载而减速，直至到达 B 点时，电动机的转矩重新和负载转矩平衡，工作点转移至 B 点，转速降为  $n_2$ 。

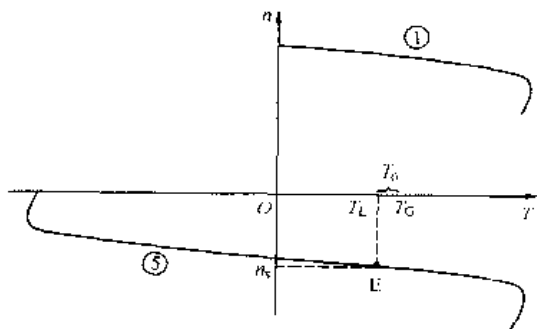


图 6-12 重载下降时的工作点

#### 2. 空钩（包括轻载）下降

空钩（或轻载）时，重物自身是不能下降的，必须由电动机反向运行来实现。电动机的转矩和转速都是负的，故机械特性曲线在第三象限，如图 6-11 中的曲线③所示，工作点为 C 点，转速为  $n_3$ 。

当通过降低频率而减速时，在频率刚下降的瞬间，机械特性已经切换至曲线④，工作点由 C 点跳变至 C' 点，进入第四象限，电动机处于反向的再生制动状态（发电机状态），其转矩变为正方向，以阻止重物下降，所以也是制动转矩，

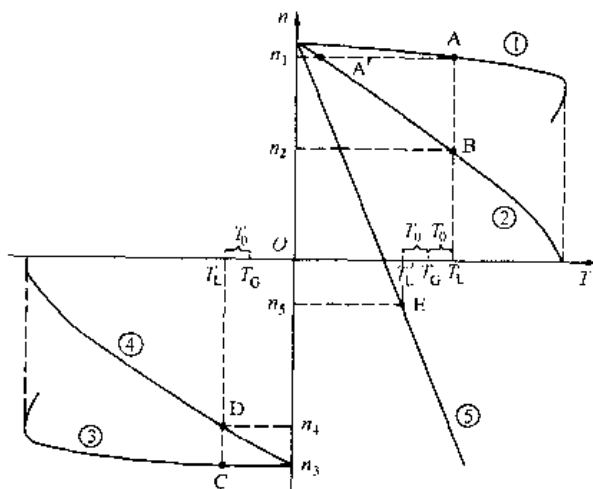


图 6-13 绕线转子异步电动机的机械特性

## 2. 轻载下降

其工作特点与重物上升时的相同，只是转矩和转速都是负的，机械特性在第三象限，如图 6-13 中的曲线③和曲线④所示。

## 3. 重载下降

重载下降时，电动机从接法上来说，是正方向的，产生的转矩也是正的。但由于在转子电路中串入了大量电阻，使机械特性倾斜至如图 6-13 中的曲线⑤所示。这时，电动机产生的正转矩比重力产生的转矩小，非但不能带动重物上升，反而由于重物的拖动，电动机的实际旋转方向是负的，其工作点在机械特性向第四象限的延伸线上，如图中的 E 点所示，这时，转速为  $n_5$ 。这种工作状态的特点是：电动机的转矩是正的、却被重物“倒拉”着反转了，电动机处于倒拉式反接制动状态。

与变频调速方式相比较，在重载下降时，两种调速方法的工作点都在第四象限，但电动机的工作状态是不同的。

## 二、起升机构对拖动系统的要求

起升机构的主要部件是吊钩，容量较大的桥式起重机通常配有主钩和副钩，这里以主钩为例说明其对拖动系统的要求。

### 1. 速度调节范围

通常

$$\alpha_n = 3$$

调速范围较广者，可达

$$\alpha_n \geq 10$$

空钩或轻载时，速度应快一些，重载时则较慢。

### 2. 上升时的预备级速度

吊钩从“床面”（地面或某一放置物体的平面）上升时，必须首先消除传动间隙，将钢丝绳拉紧。在原拖动系统中，其第 1 挡速度称为预备级，预备级时的速度不宜过大，以免机械冲击过强。

### 3. 重力位能的处理

重载下降时，电动机处于再生制动状态，对于再生的电能，必须能够妥善处理。

### 4. 制动方法

起升机构中，由于重物具有重力，如没有专门的制动装置，重物在空中是难以长时间停住的。为此，电动机轴上必须加装机械制动装置，常用的有电磁铁制动器和液压电磁制动器等。为了保证制动器的工作安全可靠，多数制动装置都采用常闭式的，即：线圈断电时制动器依靠弹簧的力量将轴抱住，线圈通电时松开。

### 5. 必须解决好溜钩问题

在重物开始升降或停住时，要求制动器和电动机的动作之间，必须紧密配合。由于制动器从抱紧到松开，以及从松开到抱紧的动作过程需要时间（约 0.6s，因电动机的容量而异），而电动机转矩的产生或消失，是在通电或断电瞬间就立刻反映的。因此，两者在动作的配合上极易出现问题。如电动机已经通电，而制动器尚未松开，将导致电动机的严重过载；反之，如电动机已经断电，而制动器尚未抱紧，则重物必将下滑，即出现溜钩现象。

溜钩现象非但降低了重物在空中定位的准确性，有时还会产生严重的安全问题。因此，必须可靠地解决好。

## 6. 具有点动功能

起重机械常常需要调整被吊物体在空间的位置，因此，点动功能是必需的。

### 三、起升机构采用变频调速的基本考虑

#### (一) 拖动系统的选择

##### 1. 电动机的选择

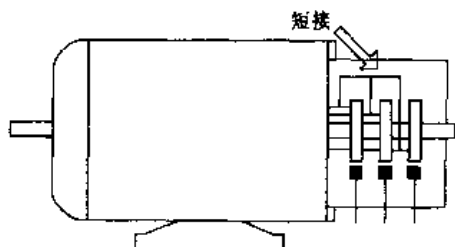


图 6-14 绕线转子短接

(1) 如果原电动机已经年久失修，需要更换，最好选用变频专用电动机。

(2) 如果原电动机是较新的鼠笼转子异步电动机，则可以直接配用变频器。

(3) 如果原电动机是较新的绕线转子异步电动机，则应将转子绕组短接，并把电刷举起，如图 6-14 所示。

##### 2. 变频器容量的选择

在起重机械中，因为升、降速时的电流较大，应求出对应于最大启动转矩和升降速转矩的电动机电流。通常，变频器的额定电流  $I_N$  可由下式求出：

$$I_N > I_{MN} \frac{k_1 \times k_3}{k_2} \quad (6-2)$$

式中  $I_{MN}$ ——电动机的额定电流，A；

$k_1$ ——所需最大转矩与电动机额定转矩之比；

$k_2$ ——1.5（变频器的过载能力）；

$k_3$ ——1.1（余量）。

此外，主钩和副钩电动机必须分别配用变频器，不能共用。

##### 3. 制动电路的选择

制动电阻的精确计算是比较复杂的，这里介绍的粗略算法，虽然并不十分严谨，但在实际应用中是足够准确的。

(1) 位能的最大释放功率等于起升机构在装载最大重荷的情况下以最高速度下降时，电动机的功率，实际上就是电动机的额定功率。

(2) 耗能电阻的容量。电动机在再生制动状态下发出的电能全部消耗在耗能电阻上，因此，耗能电阻的容量  $P_{RB}$  应与电动机容量  $P_{MN}$  相等，即

$$P_{RB} = P_{MN} \quad (6-3)$$

(3) 电阻值的计算。由于耗能电阻 RB 接在直流回路（电压为  $U_D$ ）中，故电阻值的计算方法是

$$R_B \leq \frac{U_D^2}{P_{MN}} \quad (6-4)$$

(4) 制动单元的计算。制动单元的允许电流可按工作电流的两倍考虑，即

$$I_{VB} \geq \frac{2U_D}{R_B} \quad (6-5)$$

#### 4. 电能的反馈

近年来,不少变频器生产厂都推出了把直流电路中过高的泵升电压反馈给电源的新品种或新附件,其基本方式有两种:

(1) 电源反馈选件,接法如图 6-15 所示。图中,接线端 P 和 N 分别是直流母线的“+”极和“-”极。当直流电压超过限值时,电源反馈选件将把直流电压逆变成三相交流电反馈回电源去。这样,就把直流母线上过多的再生电能又送回给电源。

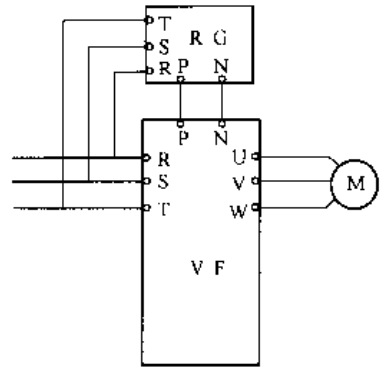


图 6-15 电源反馈选件的接法

(2) 具有电源反馈功能的变频器。其“整流”部分的电路如图 6-16 所示。VD1~VD6 是三相全波整流用的二极管,与普通的变频器相同;VT1~VT6 是三相逆变管,用于将过高的直流电压逆变成三相交变电压反馈给电源。

这种方式非但进一步节约了电能,并且还具具有抑制谐波电流的功效。

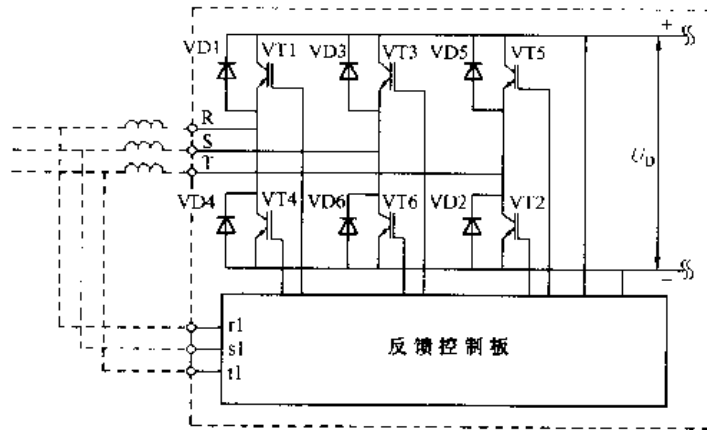


图 6-16 具有电源反馈功能的变频器

#### 5. 公用直流母线

在起重机械中,由于变频器的数量较多,这些变频器可以采用公用直流母线的方式,即所有变频器的整流部分是公用的。由于各台变频器不可能同时处于再生制动状态,因此,可以互相补偿。公用直流母线方式与电源反馈相结合,非但结构简洁,并可使起重机械各台变频器的电压稳定、不受电源电压波动的影响。

##### (二) 变频器的调速方案

##### 1. 控制要点

(1) 控制模式。一般来说,为了保证在低速时能有足够大的转矩,最好采用带转速反馈的矢量控制方式,但近年来,无反馈矢量控制的技术已经有了很大提高,在定位要求不高的场合,也可以采用。

(2) 启动方式。为了满足吊钩从“床面”上升时,需先消除传动间隙,将钢丝绳拉紧的要求,应采用 S 形启动方式。

(3) 制动方法。采取再生制动、直流制动和电磁机械制动相结合的方法,详见第六节。

(4) 点动控制。点动控制是用来调整被吊物体空间位置的,应能单独控制。点动频率不宜过高。

## 2. 调速方案

(1) 变频器的选型。考虑到起升机构对运行的可靠性要求较高，故选用具有带速度反馈矢量控制功能的变频器。

(2) 调速机构。虽然变频调速是无级的，完全可以用外接电位器来进行调速。但为了便于操作人员的迅速掌握，多数用户希望，调速时的基本操作方法能够和原拖动系统的操作方法相同。因此，采用左、右各若干挡转速的控制方式，如图 6-17 所示。

## 3. 控制电路

这里以选用日本安川 G7 系列变频器为例，并结合 PLC 控制，如图 6-17 所示。

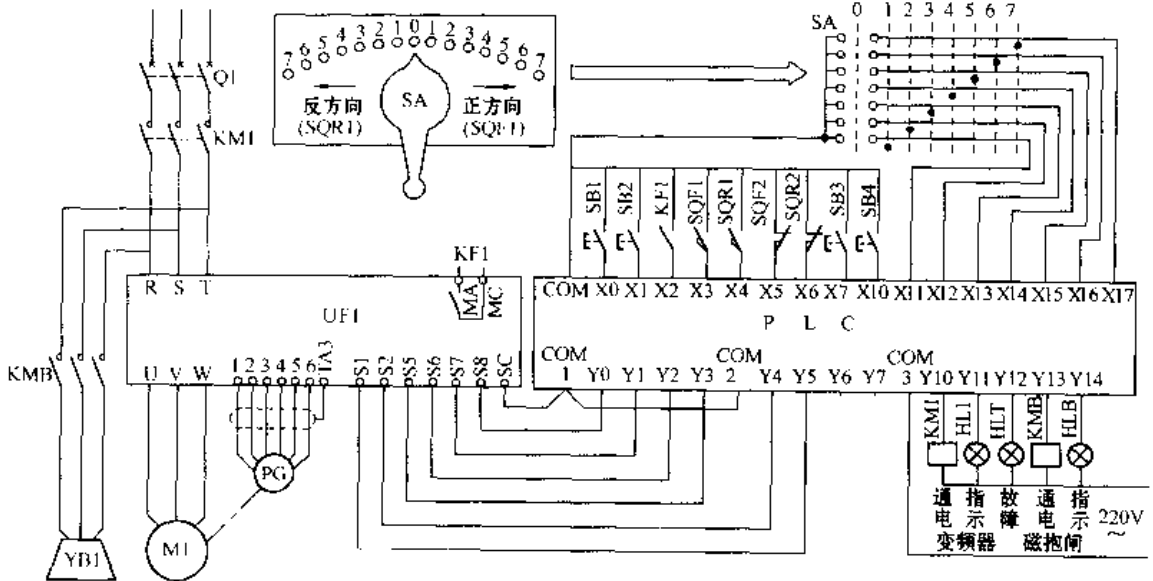


图 6-17 吊钩的变频调速方案

控制电路的主要特点如下：

- (1) 变频器的通电与否，由按钮开关 SB1 和 SB2 通过接触器 KMI 进行控制。
- (2) 电动机的正、反转及停止由 PLC 控制变频器的输入端子 S1 和 S2 来实现。
- (3) YB 是制动电磁铁，由接触器 KMB 控制其是否通电，KMB 的动作则根据在起升或停止过程中的需要来控制。
- (4) SA 是操作手柄，正、反两个方向各有 7 挡转速。正转时接近开关 SQF1 动作，反转时接近开关 SQR1 动作。
- (5) SQF2 是吊钩上升时的限位开关。
- (6) 按钮开关 SB3 和 SB4 是正、反两个方向的点动按钮。
- (7) PG 是速度反馈用的旋转编码器，这是有反馈矢量控制所必需的。

### (三) 关于防止溜钩问题

#### 1. 原拖动系统防止溜钩的方法

(1) 重物从空中的停止状态转为上升或下降。如果使制动电磁铁 YB1 先通电，等抱闸松开后再接通电动机，则在抱闸逐渐松开，而电动机尚未通电的过程中，重物必将下滑，形成溜钩。为了防止这种现象的发生，只能使电动机和制动电磁铁 YB 同时通电。其缺点是：当抱闸尚未松开，以及尚未完全松开的过程中，电动机将处于过载状态。



(2) 重物上升或下降到半空中转为停止状态。如果使电动机和制动电磁铁 YB1 同时断电, 则因为抱闸从断电到完全抱紧, 约需要 0.6s 的时间, 在抱闸尚未完全抱紧的过程中, 重物必将下滑, 形成溜钩。为此, 令制动电磁铁 YB1 在电动机断电之前, 提前 0.6s 断电, 待电动机断电时, 抱闸已经抱紧了。这个方法的缺点是: 在制动电磁铁 YB1 逐渐抱紧的过程中, 电动机也必将处于过载状态。

对于制动器 YB1 来说, 在开始抱紧和电动机断电之间, 也必将具有闸皮与制动轮之间进行滑动摩擦的过程, 影响闸皮的寿命。

即使这样, 在要求重物准确停位的场合, 仍不能满足要求。操作人员往往通过反复点动来达到准确停位的目的。这又将导致电动机和传动机构不断受到冲击以及继电器、接触器的频繁动作, 从而进一步影响制动器的寿命。

#### 2. 变频调速系统防止溜钩的方法

由于 G7 系列变频器具有四象限运行功能, 在零速时也能有足够大的转矩“拖动”负载。因此, 防止溜钩问题变得十分简单了。

(1) 重物从空中的停止状态转为上升或下降。可先令变频器处于“0”速状态, 进行“预励磁”, 使电动机产生足够大的转矩拉住重物。与此同时, 使制动电磁铁 YB1 通电即可。

(2) 重物上升或下降到半空中转为停止状态。当需要被吊物体在空中停住时, 只需将速度调节为“0”, 同时迅速令制动电磁铁 YB1 断电即可。变频调速系统有足够大的转矩使重物在空中停住 0.6s 以上。

因此, 调速手柄在正、反方向的第 1 挡转速应为“0”速。

由于制动器 YB1 是在重物已经停住的状态下抱紧或松开的, 每次抱紧和松开时, 闸皮与制动轮之间都基本没有相对运动, 因而磨损甚小, 大大延长了制动器的寿命。

此外, 重物在空间的定位也变得容易了。

## 第五节 大车和小车的变频调速

### 一、大车拖动系统

#### (一) 大车拖动系统的主要特点

##### 1. 拖动方式

(1) 集中拖动。由一台电动机经减速装置后拖动大车的两个主动轮同时转动。

(2) 分别拖动。由两台电动机分别拖动两个主动轮同时转动, 多数吨位较大的桥式起重机都采用这种方式。

##### 2. 大车拖动系统的主要特点

(1) 调速范围。一般在 6:1 以内。

(2) 基本工况。大车拖动系统属于断续工作方式, 因此, 在按照发热原则选择电动机时, 允许电动机过载。

(3) 供电方式。通常采用滑线供电的方式。

(4) 终端保护。大车在行程的两侧, 都有行程开关进行终端保护。

#### (二) 大车变频调速要点

##### 1. 电动机的选择

基本原则与起升机构相同, 即:

(1) 尽量采用原有电动机。如原有电动机为绕线转子异步电动机，则将转子绕组短接，并把电刷举起。

(2) 如须更换电动机，则以选用变频调速专用电动机为宜。

### 2. 变频器的选择

(1) 集中拖动方式。考虑到电动机允许过载的情况，变频器的容量以加大一档为宜。

(2) 分别拖动方式。两台电动机可共用一台变频器，因此，只能采用 V/F 控制方式，变频器的容量  $P_N$  应在两台电动机容量  $2P_{MN}$  的基础上加大一档。

### 3. 控制要点

(1) 调速方式。与上述起升机构的调速方式类似。

(2) 过载保护。由于一台变频器同时为两台电动机供电，故变频器的热保护功能将不起作用。因此，每台电动机的热继电器是必需的。

(3) 重合闸功能。由于采用滑线供电方式，在运行过程中，有可能出现因短暂的接触不良造成的瞬间停电。因此，变频器在瞬时停电以及故障跳闸后的重合闸功能是必需的。

(4) 升、降速方式。因为大车实际上是带着重物运行的，因此，为了避免被吊物发生晃动，应采用 S 形升、降速方式。

大车变频调速系统的主电路如图 6-18 (a) 所示。

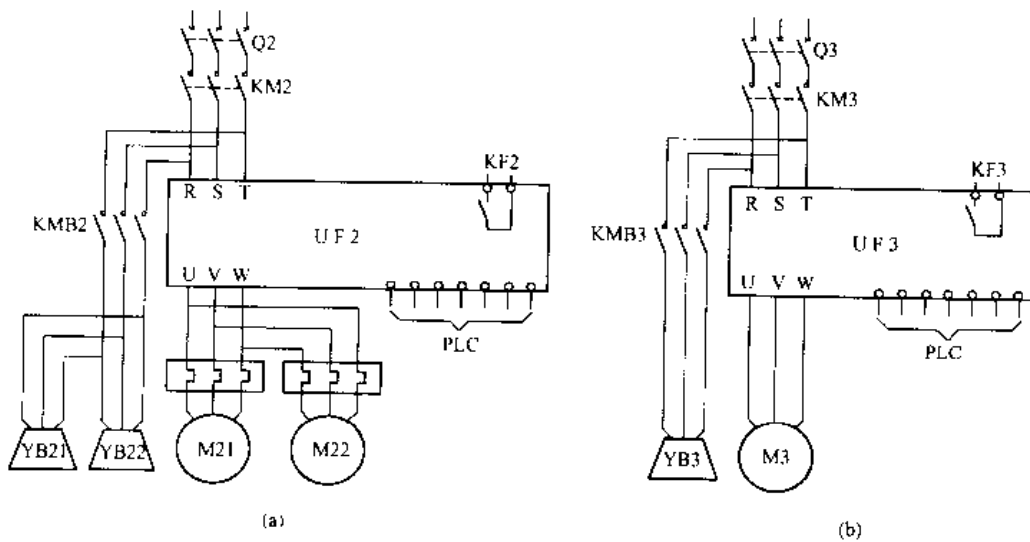


图 6-18 大、小车的变频调速主电路

(a) 大车的主电路；(b) 小车的主电路

## 二、小车拖动系统的主要特点

### 1. 主要特点

由于行程较短，故调速范围较小，一般在 4:1 以内。其基本工况、供电方式与终端保护等都和大车相同。

### 2. 电动机的选择

基本原则与大车相同。

### 3. 变频器的选择

只用一台变频器，可采用 V/F 控制方式或无反馈矢量控制方式。

小车变频调速系统的主电路如图 6-18 (b) 所示。

## 第六节 起重机械专用变频器

近年来,不少变频器生产厂推出了专门针对起升机构的起重机械专用变频器,使起升机构的变频调速问题更加方便和可靠了,这里以日本三菱公司生产的 FR-241E 系列变频器为例进行介绍。

### 一、变频器内防止溜钩的措施

#### 1. 重物从停止到运行(升降)的控制过程

(1) 设定一个“升降起始频率” $f_{SD}$ 。当变频器的工作频率上升到 $f_{SD}$ 时,将暂停上升, $f_{SD}$ 通常预置为 0.5~3Hz。

(2) 检测电流。为了确保当制动电磁铁松开后,变频器已能控制住重物的升降而不会溜钩,所以,在工作频率到达 $f_{SD}$ 的同时,变频器将开始检测电流,并设定检测电流所需时间 $t_{SC}$ ,以确认电动机的转矩是否已经建立, $t_{SC}$ 通常预置为 0.3~0.5s。

(3) 向制动电磁铁发出“通电指令”。当变频器确认已经有足够大的输出电流时,将向制动电磁铁发出“通电指令”,使制动电磁铁开始松开。

(4) 设定一个 $f_{SD}$ 的维持时间 $t_{SD}$ 。 $t_{SD}$ 的长短应略大于制动电磁铁从通电到完全松开所需要的时间, $t_{SD}$ 通常预置为 0.3~0.8s。

(5) 变频器将工作频率上升至所需频率。经过上述步骤后,制动电磁铁已经完全松开,工作频率可以上升到所需的运行频率了。

上述过程如图 6-19 左侧所示。

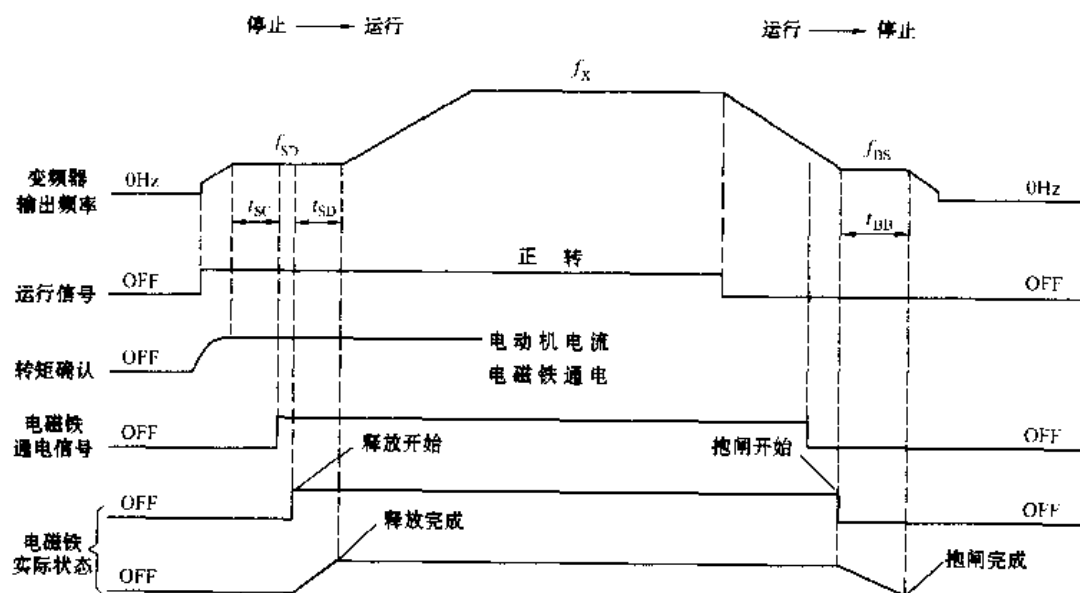


图 6-19 FR-241E 系列变频器的升降与停止过程

#### 2. 重物从运行(升降)到停住的控制过程

(1) 设定一个“停止起始频率” $f_{BS}$ 。当变频器的工作频率下降到 $f_{BS}$ 时,暂停下降, $f_{BS}$ 通常预置为 3~8Hz。

(2) 向制动电磁铁发出断电指令。当变频器的输出频率到达  $f_{BS}$  时，将输出一个“频率到达信号”，使制动电磁铁断电。

(3) 设定一个  $f_{RS}$  的维持时间  $t_{BR}$ 。 $t_{BR}$  的长短应略大于制动电磁铁从开始释放到完全抱住所需的时间，通常预置为 0.3 ~ 0.8s。

(4) 变频器停止运行。当制动电磁铁已经完全抱紧后，将工作频率下降至 0Hz，变频器停止运行。

上述过程如图 6-19 右侧所示。

## 二、基本控制电路

FR-241E 系列变频器控制起升机构的基本控制电路如图 6-20 所示，其主要特点如下。

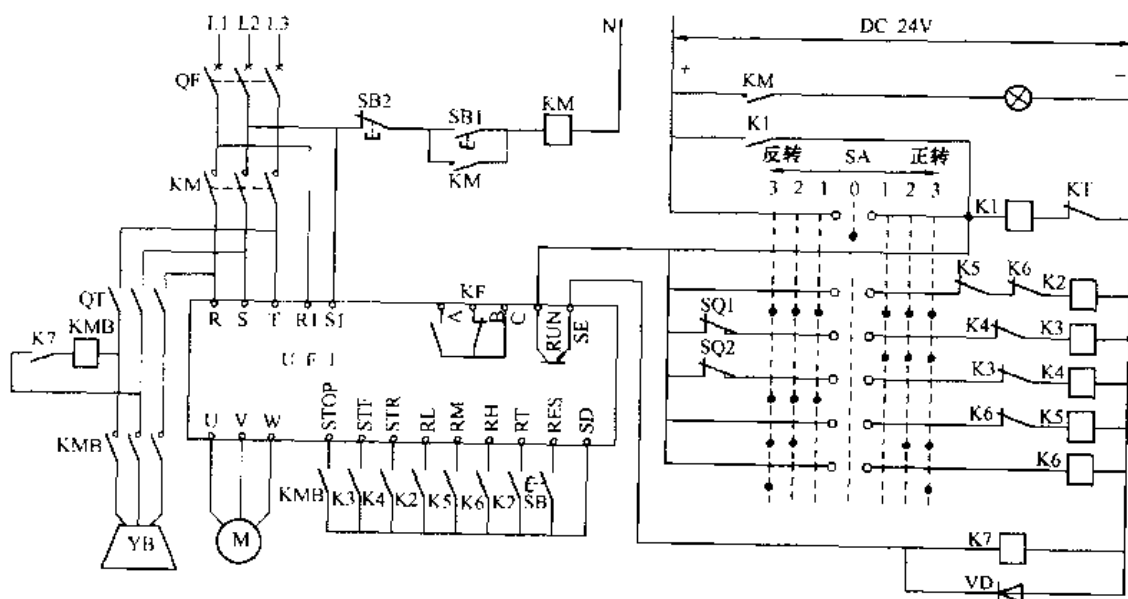


图 6-20 FR-241E 系列变频器的控制电路

### 1. 变频器各输入端子的功能

(1) “STOP” 当控制制动电磁铁通电的接触器 KMB 得电并吸合时，“STOP”与“SD”之间闭合，变频器的运行状态将被自锁（保持原状态，并非停止）。这是因为，在主令开关 SA 换挡过程中，各控制信号将可能出现瞬间的断开状态，变频器的自锁功能可以避免其运行状态受到控制信号瞬间切断的影响。反之，当接触器 KMB 失电并断开后，自锁功能也随之结束。

(2) “STF”、“STR” 正、反转控制，由继电器 K3 与 K4 进行控制。

(3) “RL”、“RM”、“RH” 由主令控制器 SA 通过继电器 K2、K5、K6 进行多挡转速控制，升速与降速都只有 3 挡转速（也可以通过 PLC 进行更多挡调速）。

(4) “RT” 第 2 加减速控制端，它与低速挡端子“RL”同受继电器 K2 的控制，以设定低速挡的升、降速时间。

(5) “RES” 复位端，用于变频器出现故障并修复后的复位。

### 2. 变频器各输出端子的功能

(1) “RUN” 当变频器预置为升降机运行模式时，其功能为：变频器从停止转为运行时，其输出频率到达由功能码“Pr.85”预置的频率时，内部的晶体管导通，从而继电器 K7 得电

并吸合→接触器 KMB 得电并吸合→制动电磁铁 MB 得电并开始释放；变频器从运行转为停止时，其输出频率到达由功能码“Pr.89”预置的频率时，内部的晶体管截止，从而继电器 K7 失电→接触器 KMB 失电→制动电磁铁 MB 失电并开始抱紧。

(2) “B”、“C”用符号 KF 来表示，当变频器发生故障时，将控制电路断开。

### 3. 继电器 K1 的作用

当变频器运行时，继电器 K1 吸合并自锁。当 SA 的手柄转到“0”位时，继电器 K7 并不立即失电，继续接受变频器“RUN”端的控制。

## 第七节 电梯的变频调速

### 一、电梯拖动系统的基本构成及工作过程

#### 1. 基本构成

如图 6-21 所示，图中：轿箱，用于装载人和物；对重，用于和轿箱起平衡作用，实际上就是平衡锤；导向轮，用于防止对重和轿箱之间的碰撞。

#### 2. 工作过程

设电梯位于基层且处于关门待运行状态。

基层门外呼梯。

→电梯开门，人进入轿厢。

→经延时，或接到手动关门指令后关门。

→接收厢内选层指令（设为 5 层），并判定为“上行”方向。

→接通电磁制动器线圈，使电磁制动器松开。

→电梯按给定的升速曲线上行，在运行期间，速度给定信号不断地与反馈信号进行比较，并不断进行校正，令速度曲线尽量符合理想的运行曲线，使运行平稳。

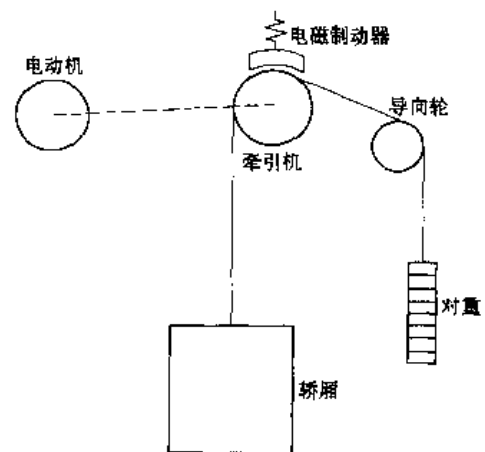


图 6-21 电梯拖动系统的基本构成

在运行过程中：

(1) 轿厢位置传感器 PAD 每过一个楼层信号（隔磁板）即核对一次运行位置，且更换一次楼层显示。

(2) “先行楼层”不断搜索呼梯信号，如搜索到呼梯信号且即将到站时：

→经延时，开始减速运行。

→当隔磁板插入平层感应器时，电梯进一步减速。

→轿厢到达平层位置，电梯停止运行。

→电磁制动器线圈断电，制动器抱闸，电梯停稳，并发出开门信号。

→电梯开门。

→经延时，发出关门信号。

……

### 二、电梯变频调速的特点

#### (一) 对升、降速的要求

有关的研究证明，乘客的感觉与速度无关，但与加速度有关，而与加速度变化率的关系

更大。所以：

(1) 要求启动与制动必须平稳、舒适。加速度一般在  $0.9\text{m/s}^2$  以下，并采用 S 形加、减速方式。

(2) 上、下运行的速度则力求加快，一般为  $30 \sim 105\text{m/min}$ 。

(3) 在启动或停止时，如果加速（或减速）转矩较大，则在刚开始升速（或减速）的瞬间，总会有一点冲击的感觉。为了消除这种感觉，确保运行平稳，在某些电梯专用变频器中，还增加了“S 形转矩控制模式”，在启动或停止时，转矩是逐渐增加或减小的，使乘客毫无冲击的感觉。

### (二) 电动机的工作状态

#### 1. 轿厢满载（轿厢重量 > 对重重量）

(1) 轿厢上升。为电动机状态，机械特性在第一象限。

(2) 轿厢下降。为反转发电机状态，机械特性在第四象限。

#### 2. 轿厢轻载（轿厢重量 < 对重重量）

(1) 轿厢上升。由于对重的重力将拉着轿厢上升，使电动机的转速超过同步转速，处于发电机状态，机械特性在第二象限。

(2) 轿厢下降。为反转电动机状态，机械特性在第三象限。

### (三) 变频器的主电路

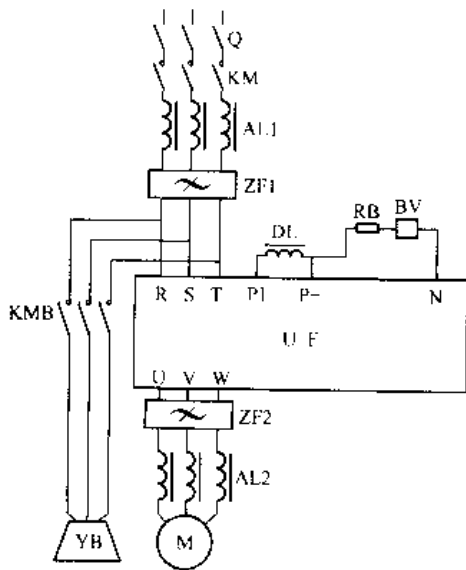


图 6-22 电梯变频调速的主电路

如图 6-22 所示为电梯变频调速的主电路。

#### 1. 输入侧

(1) 应配置交流电抗器，以减小高次谐波电流并改善功率因数，同时，还能减小电源电压不平衡的影响。

(2) 为了抑制高频噪声，应接入噪声滤波器。

#### 2. 输出侧

(1) 应接入输出噪声滤波器，抑制高频噪声。

(2) 当变频器与电动机之间的距离较长（超过 20m）时，输出侧也应接入交流电抗器，以防止因线路的分布电容而引起的过电流。

#### 3. 制动装置

(1) 由于电梯在重载下降时，电动机处于再生状态，因此，外接制动电阻与制动单元是必需的。

(2) 电梯在每一楼层停止时，必须十分可靠。因此，电磁制动器也是必需的。

### (四) 控制要求

#### 1. 轿厢的运行规律

应尽量符合理想的运行曲线。为此，给定信号应不断地与速度反馈信号比较，不断校正。

#### 2. 判断功能

随时判断轿厢当前所在的位置，并根据轿厢当前所在位置、状态和运行方向，以及所接收到的呼梯指令判断下一站应停在哪一楼层，算出与当前位置的距离，并根据当前的速度来

决定应该加速或减速，为此，必须具有位置检测信号。

### 3. 搜索功能

控制器应能随时搜索以下信息：当前位置信息、当前速度信息、手动或自动状态、呼梯指令、平层信息等。

### 4. 平层功能

平层用制动电磁铁的控制和动作必须十分准确、可靠。

## 第八节 电梯专用变频器

本节以艾默生 TD3100 系列变频器为例，介绍其主要工作特点。

### 一、变频器控制电路

#### (一) 拖动系统

拖动系统的框图如图 6-23 所示。

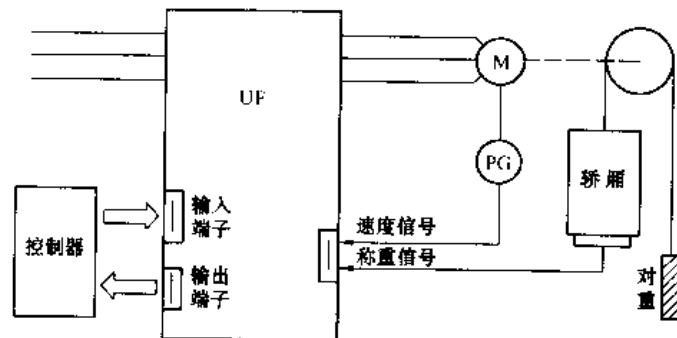


图 6-23 电梯变频调速系统框图

由于电梯的运行要求十分准确，故采用有反馈矢量控制方式。

如前述，电梯的速度信号和轿厢的称重信号是必需的。电梯的具体控制由控制器进行控制。

#### (二) 控制电路

控制电路如图 6-24 所示，要点如下。

##### 1. 输入控制端的功能

(1) ENA。此信号有效时，才允许变频器运行。

(2) CSM。变频器输出端的接触器吸合后，此信号有效，用于防止变频器在已经输出一定频率的情况下，输出接触器才吸合，形成电动机直接启动，产生过大的冲击电流。

(3) FWD 和 REV。电梯上行或下行的控制端。

(4) SL。自动检测控制端。此控制端和 FWD 均有效时，变频器将根据脉冲反馈信号来记录每层的层高并记录。

(5) INS。检修运行端。此控制端和 FWD、REV 一起，控制检修时的上行或下行。

(6) UPL 和 DWL。上、下平层控制端。

(7) FLE。楼层设定控制端。此信号有效时，多功能输入端的 F1 ~ F5 的二进制编码即为所设定的楼层。

(8) X1 ~ X10。多功能输入端。

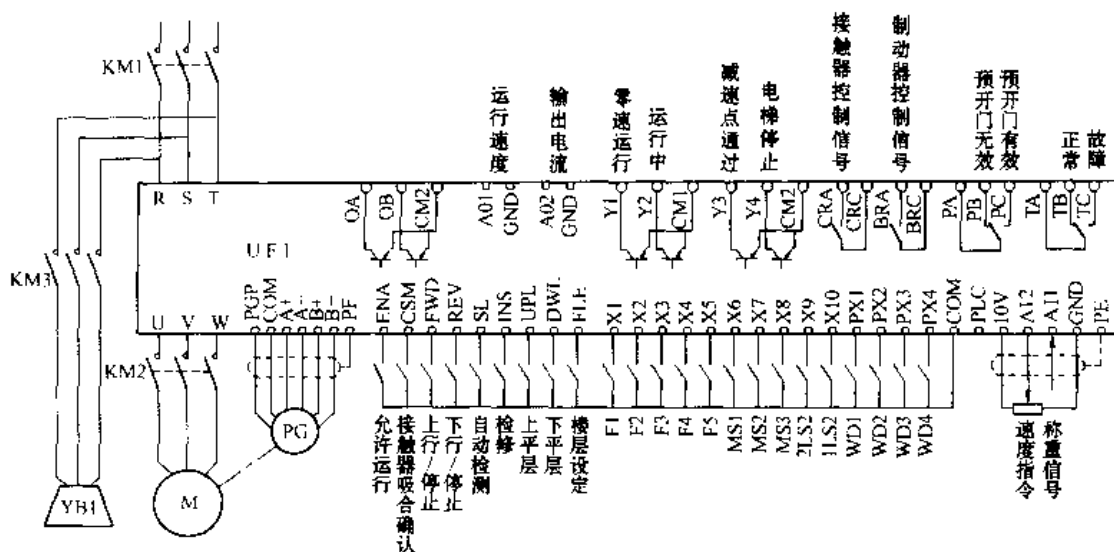


图 6-24 TD3100 变频器的接线

- (9) PX1 ~ PX4。逻辑编程输入端。
- (10) AI2。速度指令信号输入端。
- (11) AI1。模拟量称重信号，变频器将根据此信号的大小，来决定转矩的补偿量。

## 2. 输出控制端的功能

- (1) CRA。变频器输出端接触器的控制信号，继电器输出。
- (2) BRA。电磁制动器的控制信号，继电器输出。
- (3) Y1 ~ Y4。多功能输出端，集电极开路输出。
- (4) PA、PB、PC。可编程输出端，继电器输出。
- (5) TA、TB、TC。变频器故障信号输出端，继电器输出。

## 二、电梯专用功能介绍

### 1. 牵引机的机械参数

牵引机的机械参数是一个说明电梯速度和电动机转速之间对应关系的参数，其计算公式如下：

$$v = \frac{n_M}{60} \times \frac{x}{1000} \quad (6-6)$$

$$x = \frac{\pi D}{\lambda Z} \quad (6-7)$$

式中  $v$ ——电梯的速度，m/s；

$n_M$ ——电动机的转速，r/min；

$x$ ——机械参数，即功能码（F1.07）中预置的数据码；

$D$ ——牵引机的直径，mm；

$\lambda$ ——传动比；

$Z$ ——绕绳方式，由电梯配置决定。

### 2. 转矩补偿系数的调整

一方面，电梯的乘客人数是不定的，其负载转矩也就总在变动。另一方面，电梯在每次



运行过程中，其负载又是不变的。

因此，电梯在每次关门后，可以根据称重的信号，对电动机的转矩进行调整（补偿），调整的框图如图 6-25 所示。用户主要预置两个参数：

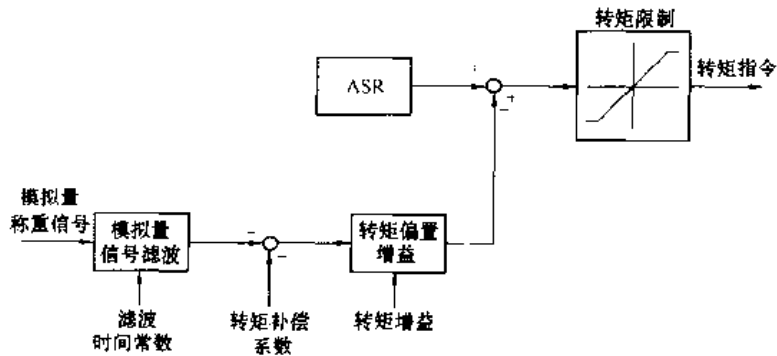


图 6-25 转矩补偿的调整框图

- (1) 转矩补偿系数。是一个以额定转矩为基数的百分数，也叫转矩偏置。
- (2) 转矩增益。是补偿量的放大倍数。

经过调整后的转矩补偿信号，与 ASR（自动转速调整器）的信号相加，得到变频器的转矩指令。

### 3. 距离控制功能

电梯的运行有以下特点：

(1) 每次运行的距离是随机的，因此，每次运行时，其运行曲线（包括最高转速升、降速时的 S 形曲线等）都应该随运行距离而变化。

(2) 运行距离又是分级的，运行距离每增加一个楼层，距离就增加一级。运行曲线并无必要每增加一个楼层，就变化一次。一般来说，运行距离包含的楼层较少时，运行曲线的变化应频繁些；反之，运行距离包含的楼层较多时，运行曲线的变化可以不必太频繁；当运行距离包含的楼层超过一定数量时，运行曲线就没有必要再变化了。

为此，TD3100 变频器给出了 6 种运行曲线，如图 6-26 所示。

6 条曲线的 S 形拐点转速 ( $v_1 \sim v_6$ )、最高转速 ( $v_{max1} \sim v_{max6}$ ) 和运行距离 ( $S_1 \sim S_6$ ) 都可以由用户根据具体情况进行预置。

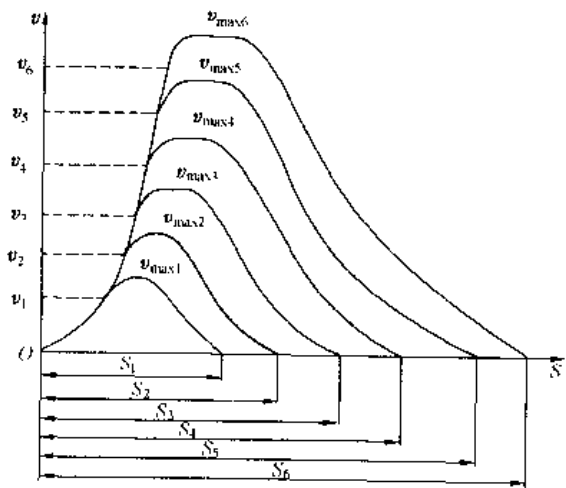


图 6-26 电梯的运行曲线

除此以外，用户还应将总的楼层数和最大的楼层高度预置给变频器，以便变频器根据运行间隔包含的楼层来判断运行距离和选择运行曲线。

### 4. 平层的调整功能

平层，就是使电梯恰到好处地停稳在每一楼层的楼面。在每一楼层的楼面处，都有产生平层信号的平层感应器，也称为平层开关。另一方面，在电梯的底部，有一个隔磁板。隔磁

板靠近平层开关，便得到平层信号。

平层开关有双平层开关和单平层开关两种，如图 6-27 所示。

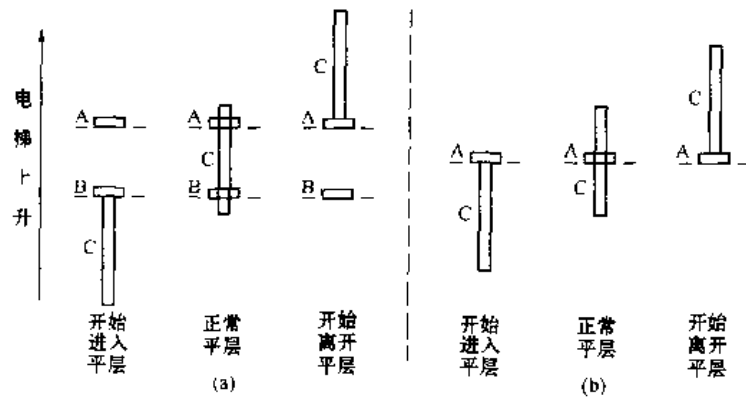


图 6-27 平层信号的产生

(a) 双平层开关；(b) 单平层开关。

图 6-27 (a) 是双平层开关的情形，A 和 B 是两个平层开关，C 是隔磁板。当隔磁板同时接近 A、B 两个平层开关时，将产生平层信号。

图 6-27 (b) 是单平层开关的情形，隔磁板接近平层开关时，便产生平层信号。

为了提高平层效果，变频器设置了一个平层距离调整的功能，供用户酌情调整。

# 金属切削机床的变频调速

## 第一节 机床拖动系统的主要特点

### 一、概述

金属切削机床的种类很多,主要有车床、铣床、磨床、钻床、刨床、镗床等。

金属切削机床的基本运动是切削运动,即工件与刀具之间的相对运动。切削运动由主运动和进给运动组成。

在切削运动中,承受主要切削功率的运动称为主运动。在车床、磨床和刨床等机床中,主运动是工件的运动;而在铣床、镗床和钻床等机床中,主运动则是刀具的运动。

金属切削机床的主运动都要求调速,并且调速的范围往往较大。例如,CA6140型普通车床的调速范围为120:1,X62W型铣床的调速范围为50:1等。

但金属切削机床主运动的调速,一般都在停机的情况下进行,在切削过程中是不进行调速的。这在进行变频调速时,为采用多挡传动比方案的可行性提供了基础。

### 二、主运动的负载性质

#### 1. 低速段

由于刀具的耐用程度与进刀量、切削速度等因素有关。在刀具耐用程度一定的情况下,允许的进刀量与切削速度成反比。即进刀量越大,允许的切削速度越小。但进刀量又要受到刀具和工件的强度等因素的限制。实际上,任何切削机床在低速段的最大进刀量都是一定的。因此,低速段的最大切削力并无变化,其负载转矩是相同的,属于恒转矩调速范围,或称为恒转矩区。

#### 2. 高速段

一方面,如前述,在刀具耐用程度一定的情况下,转速越高,则允许的进刀量越小;另一方面,速度越高,还要受到机床床身机械强度等因素的限制,也要求允许的进刀量越小。总之,在高速段,转速越高,负载转矩越小,但切削功率保持相同,属于恒功率区。

恒转矩区和恒功率区的分界转速,称为计算转速,用 $n_D$ 表示。机床的计算转速因种类和型号而异,通常在说明书中都有规定。

综上所述,机床的机械特性如图7-1所示。

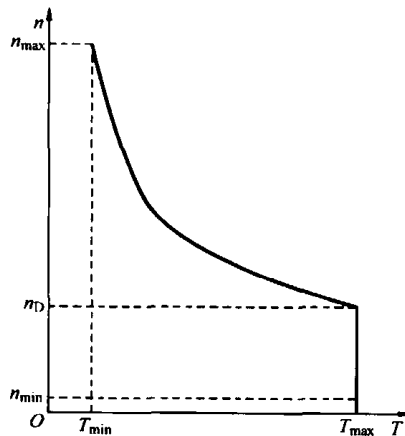


图 7-1 机床的机械特性

## 第二节 普通车床的实例与基本数据

### 一、普通车床的大致构造与拖动系统

车床是金属切削机床中应用得最为广泛的一种,主要用于切削具有旋转表面的工件,如

车削工件的外圆、内圆、端面、螺纹等。

### 1. 大致构造

普通车床的外形如图 7-2 所示，主要部件有：

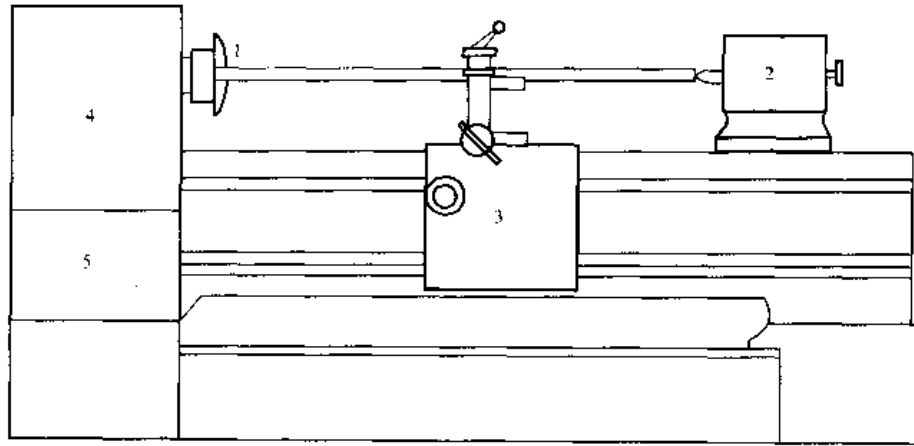


图 7-2 普通车床的外形

1—头架；2—尾架；3—刀架；4—主轴变速箱；5—进给箱

- (1) 头架。用于固定工件。内藏齿轮箱，是主要的传动机构之一。
- (2) 尾架。用于顶住工件，是固定工件用的辅助部件。
- (3) 刀架。用于固定车刀。
- (4) 主轴变速箱。用于调节主轴的转速（即工件的转速）。
- (5) 进给箱。在自动进给时，用于和齿轮箱配合，控制刀具的进给运动。

### 2. 车床的拖动系统

普通车床的拖动系统主要包括以下两种运动：

(1) 主运动。车床的主轴带动工件的旋转运动是普通车床的主运动，带动主轴旋转的拖动系统为主拖动系统。

(2) 进给运动。车床的进给运动是刀架作横向或纵向的直线运动。由于在车削螺纹时，刀架的移动速度必须和工件的旋转速度严格配合，故大多数中小型车床的进给运动通常是由主电动机经进给传动链而拖动的，并无独立的进给拖动系统。也有的车床为了提高工作效率，配置了单独的进给电动机，用于刀架的快速移动。

### 3. 小型车床对主拖动系统的要求

(1) 由于有车削螺纹的需要，要求主拖动系统能够正、反转；

(2) 为了便于在安装工件时的调整，要求具有点动功能。

### 4. 主拖动系统阻转矩的形成

主拖动系统的阻转矩就是工件在切削过程中形成的阻转矩，如图 7-3 所示。理论上说，切削功率用于切削的剥落和变形。故切削力正比于被切削的材料性质和截面积，切削面积由切削深度和走刀量决定。而切削转矩则取决于切削力和工件回转半径的乘积，即

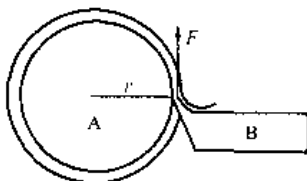


图 7-3 车削的阻转矩

A—工件；B—车刀

$$T_L = Fr \quad (7-1)$$

式中  $F$ ——切削力, N;

$r$ ——工件的半径, m。

切削转矩的大小与下列因素有关:

- (1) 切削深度;
- (2) 进刀量;
- (3) 工件的材质与直径等。

## 二、实例及基本数据

某意大利产 SAG 型精密车床, 原拖动系统采用电磁离合器配合齿轮箱进行调速。由于电磁离合器损坏率较高, 国内无配件, 进口件又十分昂贵, 故改用变频调速。具体情况如下。

### 1. 基本数据

- (1) 主轴转速共分 75、120、200、300、500、800、1200、2000r/min 8 挡。
- (2) 电动机额定容量 2.2kW。
- (3) 电动机额定转速 1440r/min。

### 2. 主要计算数据

- (1) 调速范围为

$$\alpha_L = \frac{n_{Lmax}}{n_{Lmin}} = \frac{2000}{75} = 26.67$$

- (2) 计算转速。根据机械工程师提供的数据, 计算转速的大小为

$$n_D = 300\text{r/min}$$

即:  $n_L \leq 300\text{r/min}$  为恒转矩区;  $n_L \geq 500\text{r/min}$  为恒功率区。

(3) 各挡转速下的负载转矩。负载的实际功率按 2kW 计算, 则各挡转速下负载转矩的计算结果如表 7-1 所示。

表 7-1 各挡转速下的负载转矩

转速挡	1	2	3	4	5	6	7	8
转速 (r/min)	75	120	200	300	500	800	1200	2000
转矩 (N·m)	63.7	63.7	63.7	63.7	38.2	23.9	15.9	9.55

- (4) 电动机额定转矩为

$$T_{MN} = \frac{9550 P_{MN}}{n_{MN}} = \frac{9550 \times 2.2}{1440} = 14.6(\text{N} \cdot \text{m})$$

## 三、变频调速拖动系统的计算

### (一) 对调速方案的分析

#### 1. 频率调节范围限制在额定频率以下

如图 7-4 所示, 车床的机械特性如曲线①所示, 电动机的有效转矩线如曲线②所示。这时, 电动机必须满足:

$$T_{MN} > T_L = 63.7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$n_{MN} \geq n_L = 2000 \text{ r/min}$$

所以

$$P_{MN} > P_L = \frac{63.7 \times 2000}{9550} = 13.34 \text{ (kW)}$$

取

$$P_{MN} = 15 \text{ kW}$$

可见，所需电动机的容量比原来增大了近 7 倍。

### 2. 频率调节范围达 100Hz，一挡传动比

因为车床的大部分机械特性属于恒功率性质，而电动机在额定频率以上的有效转矩线也具有恒功率性质，因此，从充分利用电动机的潜能出发，将电动机的最高工作频率增大为 100Hz。这时，电动机的有效转矩线如图 7-5 的曲线③所示。

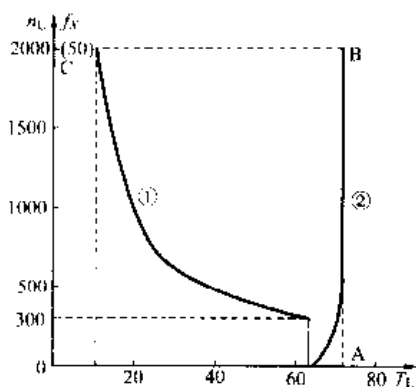


图 7-4 额定频率以下带车床

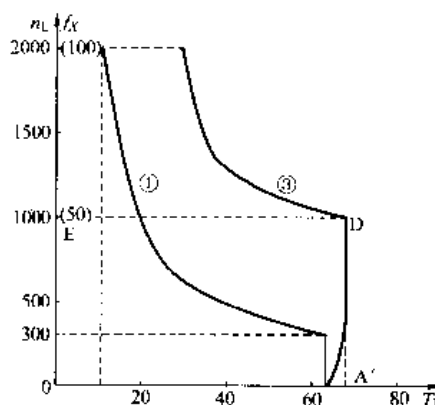


图 7-5 二倍频以下带车床

在这种情况下，电动机的额定转速只需和负载最高转速的 1/2 相等就可以了，即

$$n_{MN} \geq n_L/2 = 1000 \text{ r/min}$$

所以

$$P_{MN} > P_L = \frac{63.7 \times 1000}{9550} = 6.67 \text{ (kW)}$$

取

$$P_{MN} = 7.5 \text{ kW}$$

所需电动机容量虽然减小了一半，但仍比原来的大 3 倍多。

### 3. 频率调节范围达 100Hz，两挡传动比

按照第五章第七节所阐明的指导思想，可以考虑采用两挡传动比的方案。

这时，电动机折算到负载轴上的机械特性如图 7-6 中的曲线④和曲线④'所示。曲线④是低速挡（传动比较大）时的有效转矩线；曲线④'是高速挡（传动比较小）时的有效转矩线。

由图 7-6 可知，在这种情况下，电动机的有效转矩线与负载的机械特性曲线十分贴近，其额定转速只需与负载的计算转速相当，即

$$n_{MN} \geq 300 \text{ r/min}$$

所以  $P_{MN} > P_L = \frac{63.7 \times 300}{9550} = 2.0(\text{kW})$

取  $P_{MN} = 2.2\text{kW}$

可见，如采用两挡传动比，原来的电动机可以留用，而不必增大其容量了。

### (二) 两挡传动比调速系统的计算

#### 1. 决定高速挡和低速挡的分界转速

由于：

(1) 电动机的额定转速与负载的  $300\text{r/min}$  相对应；

(2) 分界转速  $n_D$  在低速挡与电动机的最高工作频率  $f_{\max}$  相对应，而  $f_{\max}$  不宜超过额定频率  $f_N$  的两倍，故取

$$n_D = 300 \times 2 = 600(\text{r/min})$$

于是，拖动系统的工作区如表 7-2 所示。

表 7-2 拖动系统的工作区

工 作 区	低 速 挡		高 速 挡	
	恒转矩区	恒功率区	恒转矩区	恒功率区
负载转速范围	75 ~ 300	300 ~ 600	600 ~ 1000	1000 ~ 2000
工作频率范围	12.5 ~ 50	50 ~ 100	30 ~ 50	50 ~ 100
电机转速范围	360 ~ 1440	1440 ~ 2880	864 ~ 1440	1440 ~ 2880

#### 2. 决定系统的传动比

(1) 低速挡的传动比为

$$\lambda_L = 1440/300 = 4.8$$

取

$$\lambda_L = 5$$

(2) 高速挡的传动比为

$$\lambda_H = 1440/1000 = 1.44$$

取

$$\lambda_H = 1.5$$

由于所取的  $\lambda_L$  和  $\lambda_H$  值均与计算值不同，故表 7-1 中的数据将有所调整。

#### 3. 核算

核算时所用的公式如下：

(1) 低速挡负载的折算转矩（即折算到电动机轴上的转矩）为

$$T'_{LX} = T_{LX}/\lambda_L \quad (7-2)$$

式中  $T'_{LX}$ ——第  $X$  挡转速时负载转矩的折算值， $\text{N}\cdot\text{m}$ ；

$T_{LX}$ ——第  $X$  挡转速时负载轴上的转矩， $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

(2) 高速挡负载的折算转矩为

$$T'_{LX} = T_{LX}/\lambda_H \quad (7-3)$$

(3) 电动机的过载能力为

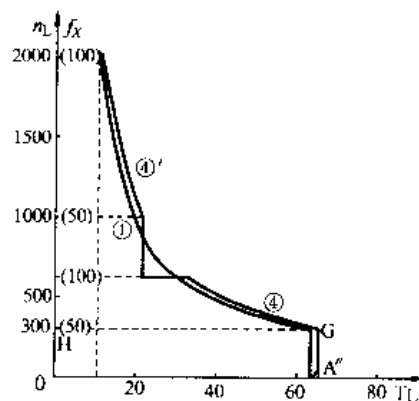


图 7-6 两挡传动比带车床

$$\beta_X = \beta_{MN} T_{MX} / T'_{LY} \quad (7-4)$$

式中  $\beta_X$ ——电动机在第  $X$  挡转速时的过载能力；

$\beta_{MN}$ ——电动机的额定过载能力；

$T_{MX}$ ——第  $X$  挡转速时的电动机转矩， $N \cdot m$ 。

根据上述公式，将计算结果列于表 7-3 中。

表 7-3 各挡转速的转矩核算结果

转 速 挡	1	2	3	4	5	6	7	8
负载转速 (r/min)	75	120	200	300	500	800	1200	2000
传 动 比	5					1.5		
电动机转速 (r/min)	375	600	1000	1500	2500	1200	1800	3000
电动机工作频率 (Hz)	13	21	35	52	87	42	62.5	104
电动机的调频比	0.26	0.42	0.7	1.04	1.74	0.84	1.25	2.08
电动机有效转矩 ( $N \cdot m$ )	14.6	14.6	14.6	14.0	8.4	14.6	11.7	7.0
负载转矩 ( $N \cdot m$ )	63.7	63.7	63.7	63.7	38.2	23.9	15.9	9.55
负载转矩折算值 ( $N \cdot m$ )	12.7	12.7	12.7	12.7	7.64	15.9	10.6	6.37
带负载的过载能力	2.87	2.87	2.87	2.87	2.75	2.3	2.76	2.75

与表中的各挡负载转矩相比，可以看出：

(1) 除第 6 挡 ( $n_L = 800r/min$ ) 电动机的有效转矩与负载转矩相比，略显逊色外，其余各转速挡电动机的有效转矩与过载能力都能满足要求。

(2) 在第 6 挡，电动机的有效转矩为负载转矩的  $14.6/15.9 = 0.92$  倍，在实际工作中，已能满足要求。

### 第三节 车床变频调速系统的设计举例

#### 一、变频器的选择

##### 1. 变频器的容量

考虑到车床在低速车削毛坯时，常常出现较大的过载现象，且过载时间有可能超过 1min。因此，变频器的容量应比正常的配用电动机容量加大一档。上述实例中的电动机容量是 2.2kW，故选择：

变频器容量  $S_N = 6.9kVA$  (配用  $P_{MN} = 3.7kW$  电动机)

额定电流  $I_N = 9A$

##### 2. 变频器控制方式的选择

(1) V/F 控制方式。车床除了在车削毛坯时，负荷大小有较大变化外，以后的车削过程中，负荷的变化通常是很小的。因此，就切削精度而言，选择 V/F 控制方式是能够满足要求的。但在低速切削时，需要预置较大的  $U/f$ ，在负载较轻的情况下，电动机的磁路常处于饱和状态，励磁电流较大。因此，从节能的角度看，是并不理想的。

(2) 无反馈矢量控制方式。新系列变频器在无反馈矢量控制方式下，已经能够做到在 0.5Hz 时稳定运行，所以，完全可以满足普通车床主拖动系统的要求。由于无反馈矢量控制



方式能够克服 V/F 控制方式的缺点，故可以说，是一种最佳选择。

(3) 有反馈矢量控制方式。有反馈矢量控制方式虽然是运行性能最为完善的一种控制方式，但由于需要增加编码器等转速反馈环节，非但增加了费用，对编码器的安装也比较麻烦。所以，除非该车床对加工精度有特殊需要，一般没有必要选择此种控制方式。

目前，国产变频器大多只有 V/F 控制功能。但在价格和售后服务等方面较有优势，可以作为首选对象；大部分进口变频器的矢量控制功能都是既可以无反馈、也可以有反馈的；但也有的变频器只配置了无反馈控制方式，如日本日立公司生产的 SJ300 系列变频器。如采用无反馈矢量控制方式，则进行选择时需要注意其能够稳定运行的最低频率（部分变频器在无反馈矢量控制方式下的实际稳定运行的最低频率为 5~6Hz）。

## 二、变频器的频率给定

变频器的频率给定方式可以有多种，可根据具体情况进行选择。

### 1. 无级调速频率给定

从调速的角度看，采用无级调速方案非但增加了转速的选择性，且电路也比较简便，是一种理想的方案。它既可以直接通过变频器的面板进行调速，也可以通过外接电位器调速，如图 7-7 所示。

但在进行无级调速时，必须注意：当采用两挡传动比时，存在着一个电动机的有效转矩线小于负载机械特性的区域，如图 7-6 所示。在这个区域（约为 600~800r/min）内，当负载较重时，有可能出现电动机带不动的情况。操作工应根据负载的具体情况，决定是否需要避开该转速段。

### 2. 分段调速频率给定

由于该车床原有的调速装置是由一个手柄旋转 9 个位置（包括 0 位）控制 4 个电磁离合器来进行调速的。为了防止在改造后操作工一时难以掌握，用户要求，调节转速的操作方法不变。故采用电阻分压式给定方法，如图 7-8 所示。

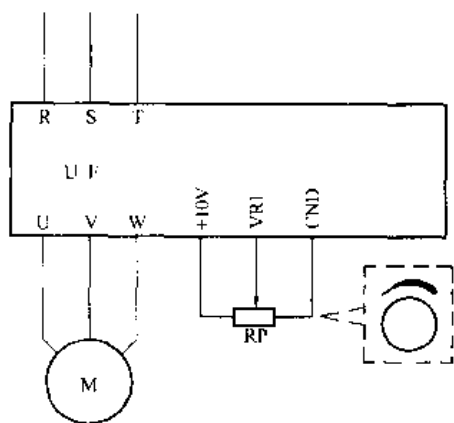


图 7-7 车床调速的电位器给定

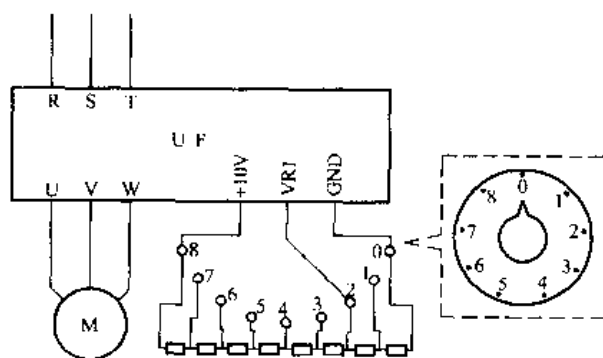


图 7-8 分段调速频率给定

图中，各挡电阻值的大小应计算得使各挡的转速与改造前相同。

### 3. 配合 PLC 的分段调速频率给定

如果车床由于还需要进行较为复杂的程序控制而应用了可编程序控制器（PLC），则分段调速频率给定可通过 PLC 结合变频器的多挡转速功能来实现，如图 7-9 所示。

图中，转速挡由按钮开关（或触摸开关）来选择，通过 PLC 控制变频器的外接输入端

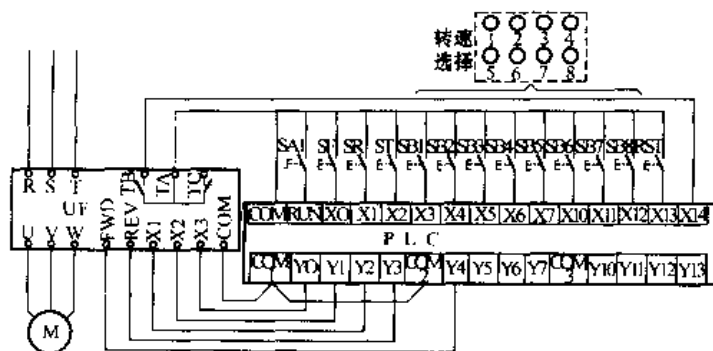


图 7-9 通过 PLC 进行分段调速频率给定

子 X1、X2、X3 的不同组合，得到 8 挡转速（见第三章第七节的多挡速功能）。图中，电动机的正转、反转和停止分别由按钮开关 SF、SR、ST 来进行控制。

### 三、变频调速系统的控制电路

#### (一) 控制电路

以采用外接电位器调速为例，控制电路如图 7-10 所示。图中，接触器 KM 用于接通变频器的电源，由 SB1 和 SB2 控制。继电器 KA1 用于正转，由 SF 和 ST 控制；KA2 用于反转，由 SR 和 ST 控制。

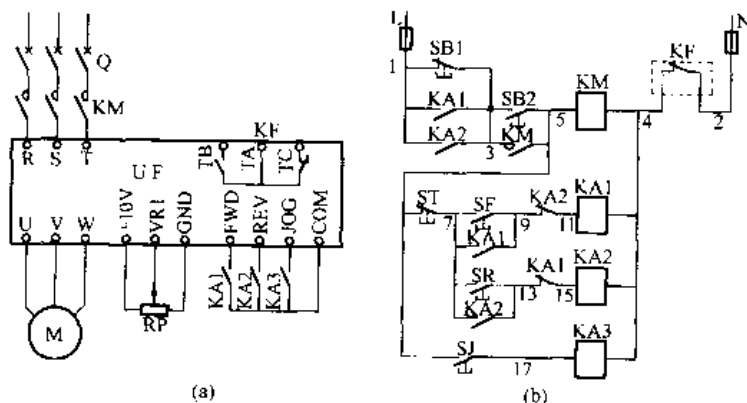


图 7-10 车床变频调速的控制电路

(a) 变频器电路；(b) 控制电路

正转和反转只有在变频器接通电源后才能进行；变频器只有在正、反转都不工作时才能切断电源。由于车床需要有点动环节，故在电路中增加了点动控制按钮 SJ 和继电器 KA3。

#### (二) 主要电器的选择

##### 1. 空气断路器 Q

由式 (4-1) 可得

$$I_{QN} \geq (1.3 \sim 1.4) \times 9 = 11.7 \sim 12.6(A)$$

选

$$I_{QN} = 20A(\text{空气断路器中的最小者})$$

##### 2. 接触器 KM

由式 (4-3) 可得

$$I_{KN} \geq 9A$$

选

$$I_{KN} = 10A$$

### 3. 调速电位器

选 2kΩ/2W 电位器或 10kΩ/1W 的多圈电位器。

### (三) 变频器的功能预置

#### 1. 基本频率与最高频率

(1) 基本频率。在额定电压下，基本频率预置为 50Hz。

(2) 最高频率。当给定信号达到最大时，对应的最高频率预置为 100Hz。

#### 2. $U/f$

预置方法如下：使车床运行在最低速挡，按最大切削量切削最大直径的工件，逐渐加大  $U/f$ ，直至能够正常切削，然后退刀，观察空载时是否因过电流而跳闸。如不跳闸，则预置完毕。

#### 3. 升、降速时间

考虑到车削螺纹的需要，将升、降速时间预置为 1s。由于变频器容量已经加大了一挡，升速时不会跳闸。为了避免降速过程中跳闸，将降速时的直流电压限值预置为 680V（过电压跳闸值通常大于 700V）。经过试验，能够满足工作需要。

#### 4. 电动机的过载保护

由于所选变频器容量加大了一挡，故必须准确预置电子热保护功能。

在正常情况下，变频器的电流取用比为

$$I\% = \frac{I_{MN}}{I_N} \times 100\% = \frac{4.8}{9.0} \times 100\% = 53\%$$

所以，将保护电流的百分数预置为 55% 是适宜的。

#### 5. 点动频率

根据用户要求，将点动频率预置为 5Hz。

## 第四节 龙门刨床的构造及其主拖动系统

龙门刨床主要用来加工机床床身、箱体、横梁、立柱、导轨等大型机件的水平面、垂直面、倾斜面以及导轨面等，是重要的工作母机之一。

### 一、龙门刨床的基本结构

主要由七个部分组成，如图 7-11 所示。

#### 1. 床身

是一个箱形体，上有 V 形和 U 形导轨，用于安置工作台。

#### 2. 刨台

也叫工作台，用于安置工件。下有传动机构，可顺着床身的导轨作往复运动。

#### 3. 横梁

用于安置垂直刀架。在切削过程中严禁动作，仅在更换工件时移动，用以调整刀架的高度。

#### 4. 左右垂直刀架

安装在横梁上，可沿水平方向移动，刨刀也可沿刀架

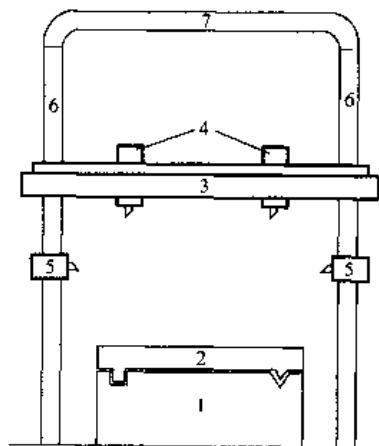


图 7-11 龙门刨床结构

1—床身；2—刨台；3—横梁；4—左右垂直刀架；5—左右侧刀架；6—立柱；7—龙门顶

本身的导轨垂直移动。

5. 左右侧刀架

安置在立柱上，可上、下沿移动。

6. 立柱

用于安置横梁及刀架。

7. 龙门顶

用于紧固立柱。

## 二、龙门刨床的主运动

龙门刨床的刨削过程是工件（安置在刨台上）与刨刀之间作相对运动的过程。因为刨刀是不动的，所以，龙门刨床的主运动就是刨台频繁的往复运动。

### 1. 刨台的调速

以 A 系列龙门刨床为例，其最低刨削速度是 4.5m/min，最高刨削速度是 90m/min，调速范围为 20。

为了提高电动机的工作效率，龙门刨床采取两级齿轮变速箱变速的机电联合调速方法。即：45m/min 以下为低速挡，45m/min 以上为高速挡。

### 2. 刨台运动的负荷性质

刨台的计算转速是 25m/min，具体地说，则：

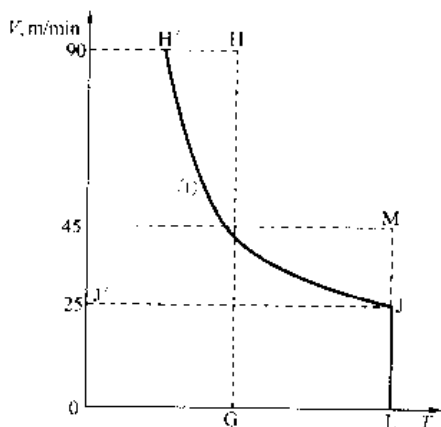


图 7-12 刨台运动的机械特性

(1) 切削速度  $v_Q \leq 25\text{m/min}$ 。在这一速度段，由于受刨刀允许切削力的限制，在调速过程中负荷具有恒转矩性质。

(2) 切削速度  $v_Q > 25\text{m/min}$ 。在这一速度段，由于受横梁与立柱等机械结构强度的限制，在调速过程中负荷具有恒功率性质。其机械特性如图 7-12 所示。

### 3. 刨台对电动机机械特性的要求

龙门刨床在刨削过程中，由于工件表面不平、工件材质不均匀，以及工件内部存在砂眼等原因，负载转矩可能发生变化。当负载转矩发生变化时，要求电动机的转速变化越小越好，即要求电动机有较硬的机械特性。

龙门刨床把负荷变化时引起的转速变化  $\Delta n_M$  与最低速时的理想空载转速  $n_{0L}$  之比称为静差度  $s$ ，即

$$s = \frac{\Delta n_M}{n_{0L}} \times 100\% \quad (7-5)$$

龙门刨床对静差度的要求是

$$s \leq 0.05 \sim 0.1$$

对静差度的要求实际上也就是对电动机机械特性硬度的要求，即要求电动机的机械特性越硬越好。

### 4. 刨台的原拖动系统

早期的刨台拖动系统采用 G-M（发电机-电动机组）调速系统，以 A 系列龙门刨床为例，

如图7-13所示。图中，直接拖动刨台的是直流电动机DM，DM由直流发电机G1提供电源，G1又由交流电动机AM1来带动，AM1在带动G1的同时，还带动一台励磁发电机G2。G2发出的电，一方面为DM和G1提供励磁电流，同时也为控制电路提供电源。除此以外，为了改善DM的机械特性，还采用了一台交磁放大机DMA。

尽管直流电动机在额定转速以上，可以进行具有恒功率性质的弱磁调速，但由于在弱磁调速时无法利用电流反馈和速度反馈环节来改善机械特性，故不能用于切削过程中。

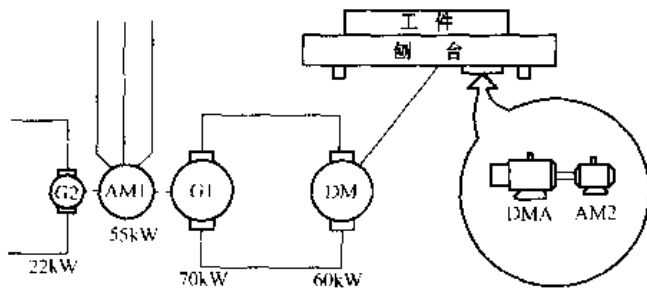


图 7-13 刨台的原拖动系统

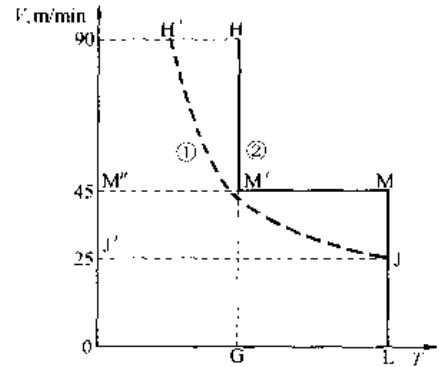


图 7-14 原拖动机械特性

所以，电动机的机械特性如图 7-14 所示，图中，曲线①是负载的机械特性，曲线②是直流电动机的有效转矩线。当刨削速度低于 45m/min 时，由于传动机构的传动比较大，故折算到负载轴上的电动机转矩也较大；反之，当刨削速度高于 45m/min 时，由于传动机构的传动比较小，故折算到负载轴上的电动机转矩也较小。由图可以看出，所需电动机的容量与面积 OLM $M'$ 成正比，比负载实际所需功率大很多。

## 第五节 刨台往复运动的控制

### 一、刨台运动的往复周期

所谓往复运动周期，是指刨台每往返一次的速度变化。以国产 A 系列龙门刨床为例，其往复周期如图 7-15 所示。

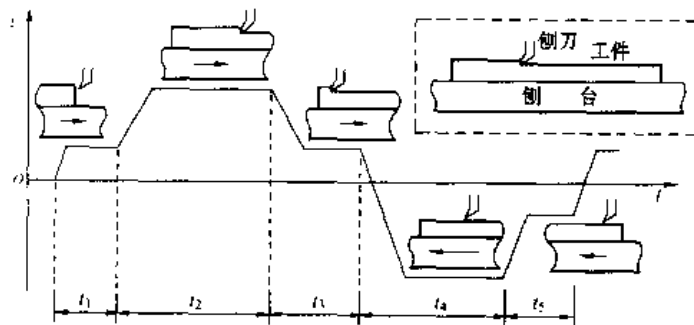


图 7-15 刨台的往复运动

图中， $v$  为线速度， $t$  为时间。各时间段 ( $t_1 \sim t_5$ ) 的工况如下。

#### 1. 切入工件段

即刨台启动、刨刀切入工件的阶段 ( $t_1$  段)。在这一阶段, 为了减小刨刀刚切入工件的瞬间, 刀具所受的冲击, 并防止工件被崩坏, 故速度较低, 为  $v_0$ 。

## 2. 正常切削段

刨刀切入工件后, 刨台将加速至正常的刨削速度  $v_F$  ( $t_2$  段)。

## 3. 退出工件段

在一次切削行程即将结束, 刨刀退出工件之前, 为了防止在刨刀退出时, 工件边缘被崩裂, 故又将速度降低为  $v_0$  ( $t_3$  段)。

## 4. 高速返回段

返回过程是不切削工件的空行程, 为了节省返回时间, 提高工作效率, 返回速度应尽可能高一些, 设为  $v_R$  ( $t_4$  段)。

## 5. 缓冲段

返回行程即将结束、再反向到工作速度之前, 为了减小对传动机构的冲击, 又应将速度降低为  $v_0$  ( $t_5$  段)。

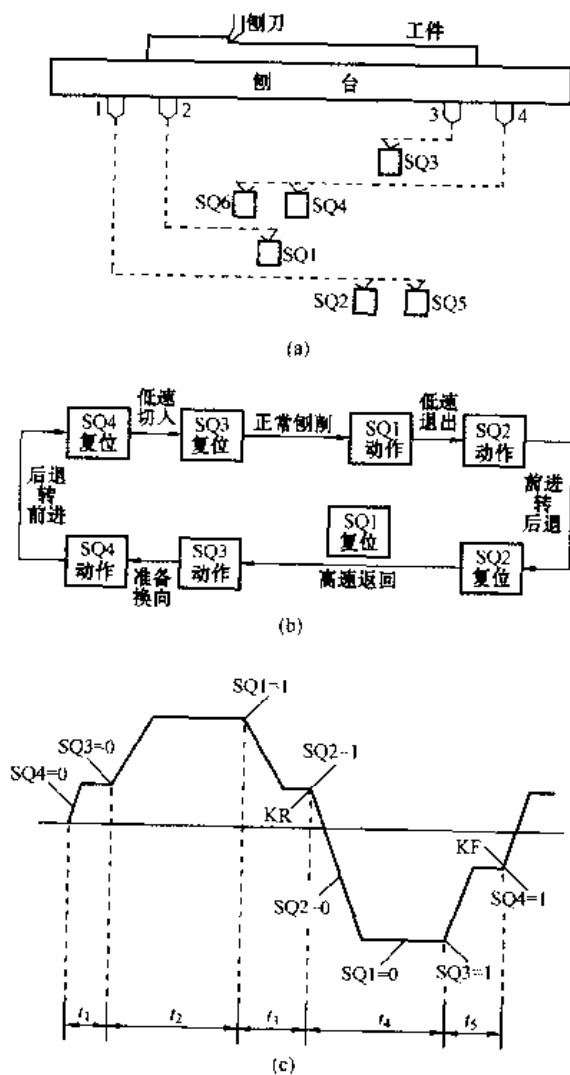


图 7-16 行程开关布置之一

(a) 布置; (b) 动作顺序; (c) 时序

之后, 便进入下一周期, 重复上述过程。

## 二、行程开关 (接近开关) 的安排

### (一) 行程开关布置之一

这是早期龙门刨床中常见的布置方式, 共有 6 个双向行程开关, 分别是 SQ1 ~ SQ6; 碰撞行程开关的是 4 个挡块, 分别是 1、2、3、4, 它们的布置示意如图 7-16 (a) 所示。假设: 刨台正处于刨削过程中, 各行程开关的动作顺序如下。

### 1. 退出工件段

挡块 2 碰 SQ1, 使刨削速度降为低速, 刨刀准备退出工件。

### 2. 高速返回段

挡块 1 碰 SQ2, 使刨台高速返回; 如果刨台因 SQ2 发生故障而未返回, 则挡块 1 将碰 SQ5, 迫使刨台停止运行; 在返回过程中, SQ2 与 SQ1 相继复位。

### 3. 缓冲段

挡块 3 碰 SQ3, 使返回速度降为低速, 准备反向。

### 4. 切入工件段

挡块 4 碰 SQ4, 刨台反向, 低速切入工件; 如果刨台因 SQ4 发生故障而未反向, 则挡块 4 将碰 SQ6, 迫使刨台停止运行; 在反向过程中, SQ4 复位。

### 5. 正常切削段

SQ3 复位, 刨台升速为所要求的切削速度。

重复上述过程。

### (二) 行程开关布置之二

如图 7-17 所示, 其特点是:

行程开关 SQ1 ~ SQ6 是垂直分布的, 其状态由压杆 AB 和 CD 的位置决定;

挡块 A、B、B' 以及 C、D、D' 在不同的平面内。

假设: 刨台正处于刨削过程中, 各行程开关的动作顺序如下。

#### 1. 退出工件段

挡块 A 把压杆 AB 压下一段距离, 使 SQ1 动作, 使刨削速度降为低速, 刨刀准备退出工件。

#### 2. 高速返回段

挡块 B 把压杆又压下一段距离, 使 SQ2 动作, 刨台高速返回; 如果刨台因 SQ2 发生故障而未返回, 则挡块 B' 把压杆再压下一段距离, 使 SQ5 动作, 迫使刨台停止运行; 在返回过程中, SQ2 与 SQ1 相继复位。

#### 3. 缓冲段

挡块 C 把压杆 CD 压下一段距离, 使 SQ3 动作, 使刨台返回速度降为低速, 准备反向。

#### 4. 切入工件段

挡块 D 把压杆又压下一段距离, 使 SQ4 动作, 刨台反向, 低速切入工件; 如果刨台因 SQ4 发生故障而未反向, 则挡块 D' 把压杆再压下一段距离, 使 SQ6 动作, 迫使刨台停止运行; 在反向过程中, SQ4 复位。

### 5. 正常切削段

SQ3 复位, 刨台升速为所要求的切削速度。

重复上述过程。

### (三) 接近开关及其布置

近年来, 开发出了刨台专用的电子接近开关, 由于消除了机械碰撞, 因而具有故障率低, 使用寿命长等优点。

如图 7-18 所示, 专用接近开关由 3 个接近开关 S1、S2 和 S3 组成, 安装在刨床的床身上。其中, S1、S2 的感应头朝向外侧面, S3 的感应头则朝上, 如图 7-18 (b) 所示。

A、B 是两块感应挡板, C、D 为上挡板, 其形状如图 7-18 (c) 所示。挡板与感应头之间的距离为  $\delta = 5\text{mm} \pm 10\%$ 。

假设: 刨台正处于刨削过程中, 各接近开关的动作顺序如下。

#### 1. 退出工件段

挡板 A 的侧挡板接近 S1, 使刨削速度降为低速, 刨刀准备退出工件。

#### 2. 高速返回段

挡板 A 的侧挡板又接近 S2, 刨台高速返回; 如果刨台因 S2 发生故障而未返回, 则上挡

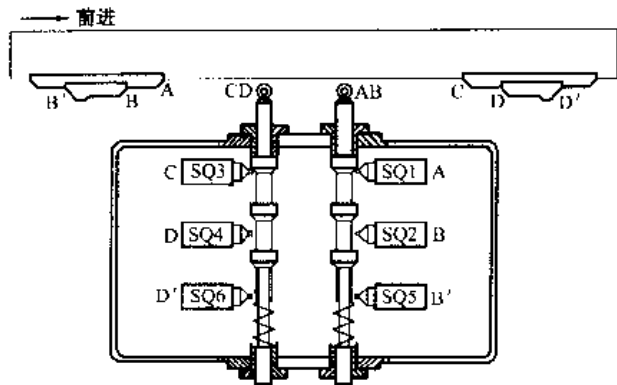


图 7-17 行程开关的布置之二

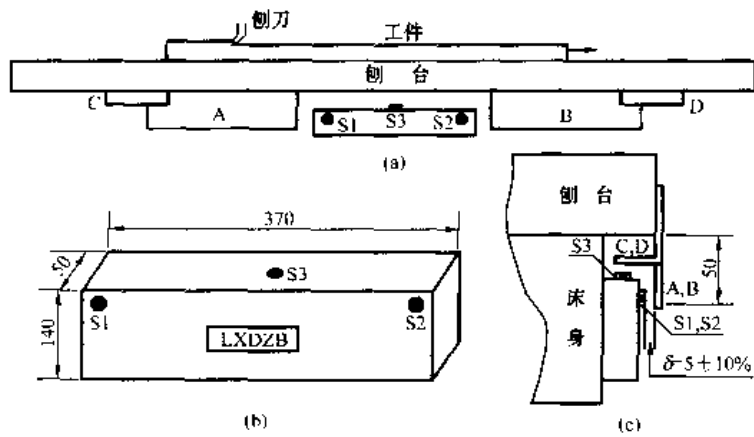


图 7-18 刨台专用接近开关  
(a) 专用接近开关的布置; (b) 外观; (c) 安装侧视

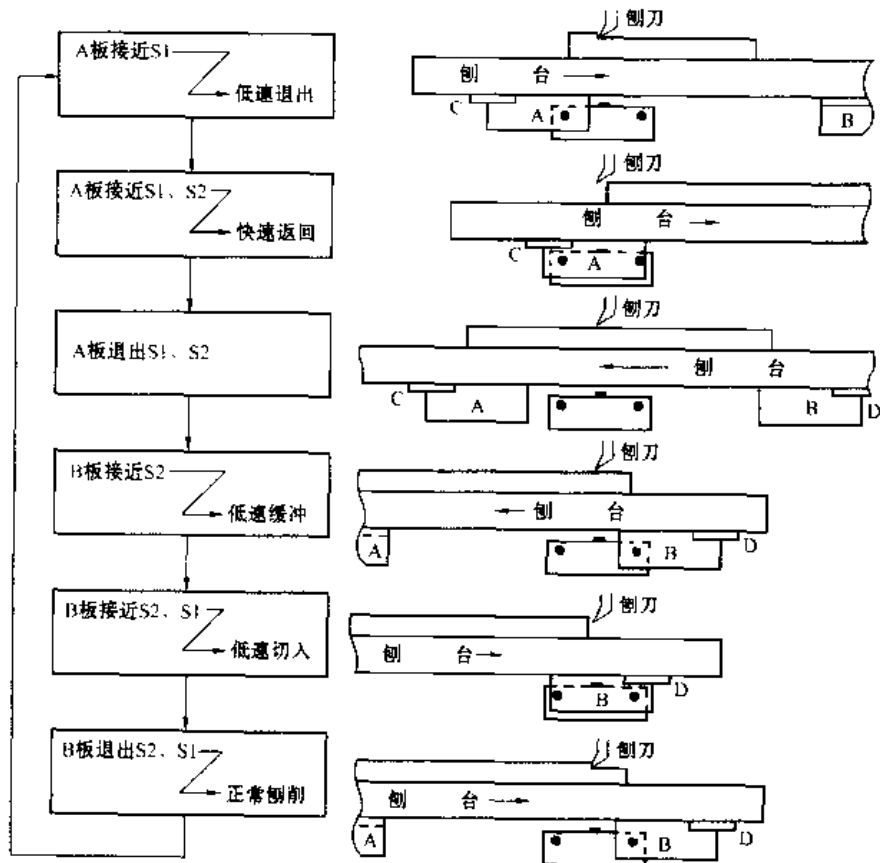


图 7-19 专用接近开关的工作程序

板 C 接近 S3, 迫使刨台停止运行; 在返回过程中, 挡板 A 相继退出 S2 和 S1。

### 3. 缓冲段

挡板 B 的侧挡板接近 S2, 使返回速度降为低速, 刨台准备反向。

### 4. 切入工件段



挡板 B 的侧挡板又接近 S2，刨台反向，低速切入工件；如果刨台因 S1 发生故障而未反向，则上挡板 D 接近 S3，迫使刨台停止运行；在反向过程中，挡板 B 退出 S1。

#### 5. 正常切削段

挡板 B 退出 S1，刨台升速为所要求的切削速度。

重复上述过程。

接近开关的内部布置及接线端子如图 7-20 所示。

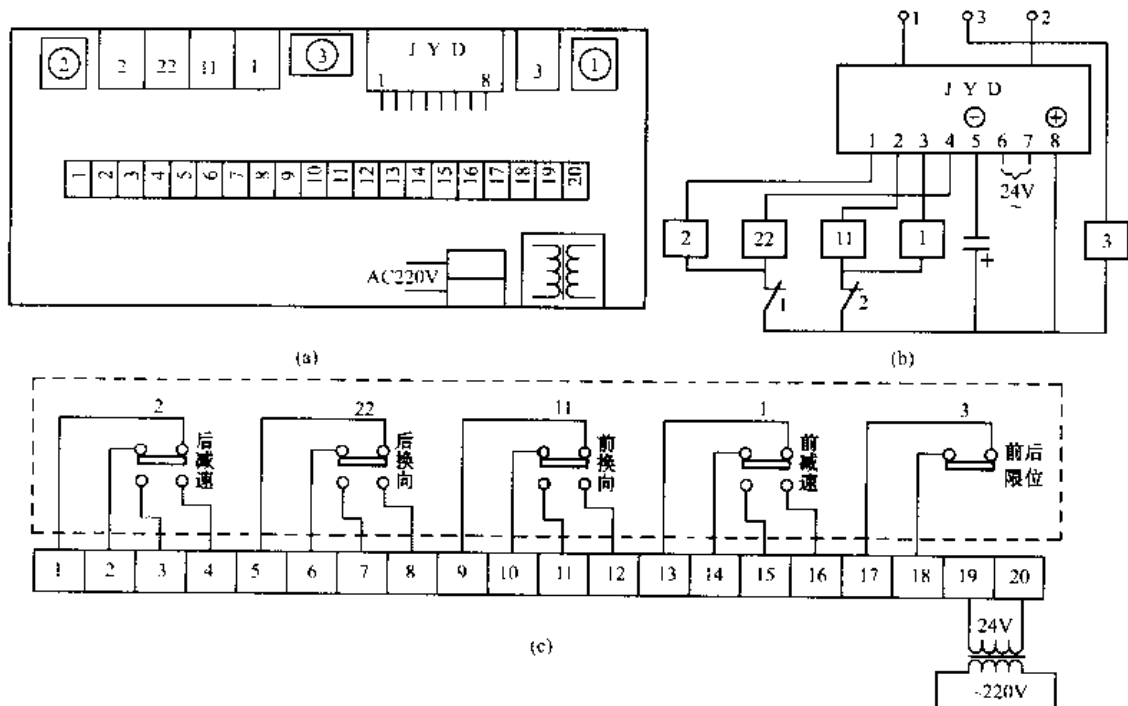


图 7-20 专用接近开关的内部布置及接线端子  
(a) 内部布置；(b) 换向专用电路及其接线；(c) 外部接线端子的排列

## 第六节 刨台运动的变频调速

### 一、变频调速系统及设计要点

#### (一) 变频调速系统的构成

刨台的拖动系统采用变频调速后，主拖动系统只需要一台异步电动机就可以了，与图 7-13 所示的直流电动机调速系统相比，系统结构变得简单多了，如图 7-21 所示。

由专用接近开关得到的信号，接至 PLC 的输入端；PLC 的输出端控制变频器，以调整刨台在各时间段的转速。可见，控制电路也比较简单明了。

#### (二) 采用变频调速的主要优点

##### 1. 减小了静差度

由于采用了有反馈的矢量控制，电动机调速后的机械特性很“硬”，静差度可小于 3%。

##### 2. 具有转矩限制功能

下垂特性是指在电动机严重过载时，能自动地将电流限制在一定范围内，即使堵转，也能将电流限制住。新系列的变频器，都具有“转矩限制”功能，十分方便。

### 3. “爬行”距离容易控制

各种变频器在采用有反馈矢量控制的情况下，一般都具有“零速转矩”，即使工作频率为 0Hz，也有足够大的转矩，使负载的转速为 0r/min。从而可有效地控制刨台的爬行距离，使刨台不越位。

### 4. 节能效果可观

拖动系统的简化使附加损失大为减少；更兼采用变频调速后，电动机的有效转矩线十分贴近负载的机械特性，进一步提高了电动机的效率。

所以，节能效果是十分可观的。

## 二、刨台往复运动的控制

### (一) 对刨台控制的要求

#### 1. 控制程序

刨台的往复运动必须能够满足本章第五节中说明的转速变化和控制程序。

#### 2. 转速的调节

刨台的刨削速率和高速返回的速率都必须能够十分方便地进行调节。

#### 3. 点动功能

刨台必须能够点动，常称为“刨台步进”和“刨台步退”，以利于切削前的调整。

#### 4. 连锁功能

(1) 与横梁、刀架的连锁。刨台的往复运动与横梁的移动、刀架的运动之间，必须有可靠的连锁。

(2) 与油泵电动机的连锁。一方面，只有在油泵正常供油的情况下，才允许进行刨台的往复运动；另一方面，如果在刨台往复运动过程中，油泵电动机因发生故障而停机，刨台将不允许在切削中间停止运行，而必须等刨台返回至起始位置时再停止。

### (二) 变频调速系统的控制电路

控制电路如图 7-22 所示。其控制特点如下。

#### 1. 变频器的通电

当空气断路器合闸后，由按钮 SB1 和 SB2 控制接触器 KM，进而控制变频器的通电与断电，并由指示灯 HLM 进行指示。

#### 2. 速度调节

(1) 刨台的刨削速度和返回速度分别通过电位器 RP1 和 RP2 来调节。

(2) 刨台步进和步退的转速由变频器预置的点动频率决定。

#### 3. 往复运动的启动

通过按钮 SF2 和 SR2 来控制，具体按哪个按钮，须根据刨台的初始位置来决定。

#### 4. 故障处理

一旦变频器发生故障，触点 KF 闭合，一方面切断变频器的电源，同时，指示灯 HLT 亮，进行报警。

#### 5. 油泵故障处理

一旦油泵发生故障，继电器 KP 闭合，PLC 将使刨台在往复周期结束之后，停止刨台的继续运行。同时，指示灯 HLP 亮，进行报警。

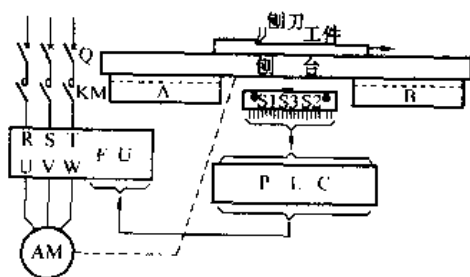


图 7-21 刨台的变频调速系统框图

FU—变频器；PLC—可编程序控制器

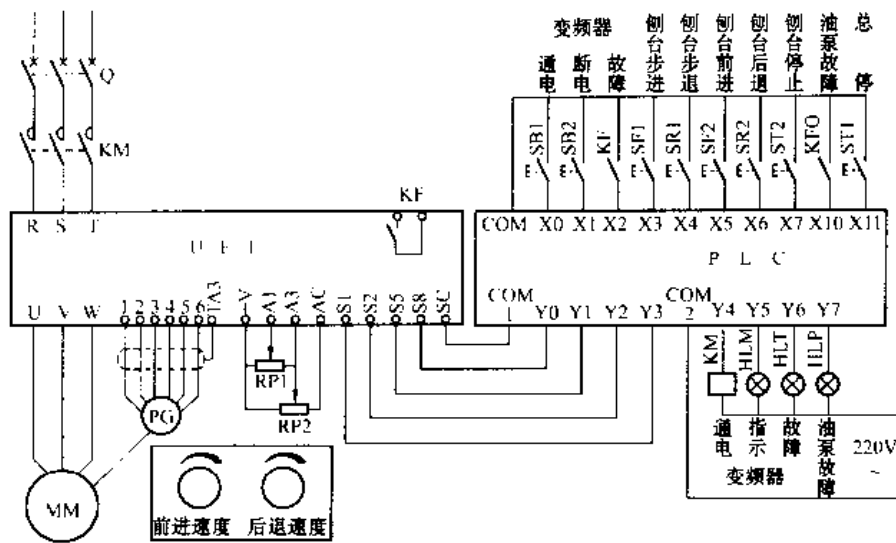


图 7-22 刨台的变频调速系统

### 6. 停机处理

正常情况下，按 ST2，则刨台应在一个往复周期结束之后才切断变频器的电源。如遇紧急情况，则按 ST1，使整台刨床停止运行。

### (三) 电动机的选择

#### 1. 原刨台电动机的数据

$$P_{MN} = 60\text{kW}, n_{MN} = 1800\text{r/min}$$

#### 2. 异步电动机容量的确定

由于负载的高速段具有恒功率特性，而电动机在额定频率以上也具有恒功率特性，因此，为了充分发挥电动机的潜力，电动机的工作频率应适当提高至额定频率以上，使其有效转矩线如图 7-23 中的曲线②所示。图中，曲线①是负载的机械特性。由图可以看出，所需电动机的容量与面积 OIKK' 成正比，和负载实际所需功率十分接近。上述 A 系列龙门刨床的主运动在采用变频调速后，电动机的容量可减小为原用直流电动机的 3/4，即 45kW 就已经足够。但考虑到异步电动机在额定频率以上时，尽管从发热的角度看，其有效转矩具有恒功率的特点，但在高频时其过载能力有所下降，为留有余地，选择 55kW 的电动机，其最高工作频率定为 75Hz，如图 7-23 所示。

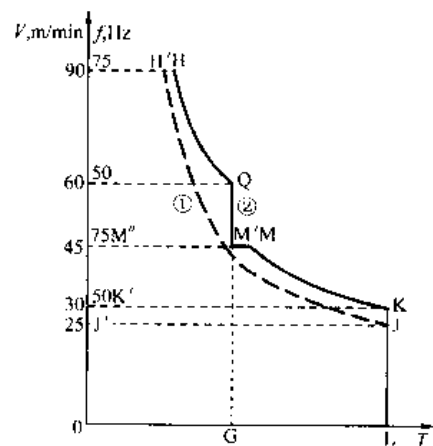


图 7-23 变频后有效转矩线

#### 3. 异步电动机的选型

一般来说，以选用变频调速专用电动机为宜。

今选用 YVP250M-4 型异步电动机，主要额定数据如下： $P_{MN} = 55\text{kW}$ ， $I_{MN} = 105\text{A}$ ， $T_{MN} = 350.1\text{N}\cdot\text{m}$ 。

#### (四) 变频器的选型

##### 1. 变频器的型号

考虑到：龙门刨床本身对机械特性的硬度和动态响应能力的要求较高；近年来，龙门刨床常常与铣削或磨削兼用，而铣削和磨削时的进刀速度约只有刨削时的百分之一，故要求拖动系统具有良好的低速运行性能。

今选用日本安川公司生产的 CIMR-G7A 系列变频器，其逆变电路由于采用了三电平控制方式，因而具有如下主要优点：

- (1) 减小了对电动机绝缘材料的冲击；
- (2) 减少了由载波频率引起的干扰；
- (3) 减小了漏电流。

除此以外，即使在无反馈矢量控制的情况下，也能在 0.3Hz 时，输出转矩达到额定转矩的 150%。

所以，选用“无反馈矢量控制”的控制方式也已经足够。当然，如选择“有反馈矢量控制”的控制方式，将更加完美。

##### 2. 变频器的容量

变频器的容量只需和配用电动机容量相符即可。如电动机为 55kW，则变频器选 98kVA，额定电流为 128A。

#### (五) 变频器的功能预置

##### 1. 频率给定功能

b1 - 01 = 1——控制输入端 A1 和 A3 均输入电压给定信号。

H3 - 05 = 2——当 S5 断开时，由输入端 A1 的给定信号决定变频器的输出频率；当 S5 闭合时，由输入端 A3 的给定信号决定变频器的输出频率。

H1 - 03 = 3——使 S5 成为多挡速 1 的输入端，并实现上述功能。

H1 - 06 = 6——使 S8 成为点动信号输入端。

d1 - 17 = 10Hz——点动频率预置为 10Hz。

##### 2. 运行指令

b1 - 02 = 1——由控制端子输入运行指令。

b1 - 03 = 0——按预置的降速时间减速并停止。

b2 - 1 = 0.5Hz——电动机转速降至 0.5Hz 起开始“零速控制”（无速度反馈时，则开始直流制动）。

b2 - 2 = 100%——直流制动电流等于电动机的额定电流（无速度反馈时）。

F2 - 03 = 30A——直流励磁电流（有速度反馈时）。

b2 - 04 = 0.5s——直流制动时间为 0.5s。

L3 - 05 = 1——运行中的自处理功能有效。

L3 - 06 = 160%——运行中自处理的电流限值为电动机额定电流的 160%。

##### 3. 升降速特性

###### (1) 升降速时间：

C1 - 01 = 5s——升速时间预置为 5s。

C1 - 02 = 5s——降速时间预置为 5s。

###### (2) 升降速方式：

C2 - 01 = 0.5s——升速开始时的 S 字时间。

C2 - 02 = 0.5s——升速完了时的 S 字时间。

C2 - 03 = 0.5s——降速开始时的 S 字时间。

C2 - 04 = 0.5s——降速完了时的 S 字时间。

(3) 升降速自处理:

L3 - 01 = 1——升速中的自处理功能有效。

L3 - 04 = 1——降速中的自处理功能有效。

4. 转矩限制功能

L7 - 01 = 200%——正转时转矩限制为电动机额定转矩的 200%。

L7 - 02 = 200%——反转时转矩限制为电动机额定转矩的 200%。

L7 - 03 = 200%——正转再生状态时的转矩限制为电动机额定转矩的 200%。

L7 - 04 = 200%——反转再生状态时的转矩限制为电动机额定转矩的 200%。

5. 过载保护功能

E2 - 01 = 105A——电动机的额定电流为 105A。

L1 - 01 = 2——适用于变频专用电动机。

(六) 主电路其他电器的选择

1. 空气开关

$$I_{QN} \geq (1.3 \sim 1.4) \times 128 = 166.4 \sim 179.2(A)$$

选

$$I_{QN} = 170A$$

2. 接触器

$$I_{KN} \geq 128A$$

选

$$I_{KN} = 160A$$

3. 制动电阻与制动单元

如前述,刨台在工作过程中,处于频繁地往复运行的状态。为了提高工作效率、缩短辅助时间,刨台的升、降速时间应尽量短。因此,直流回路中的制动电阻与制动单元是必不可少的。

(1) 制动电阻的值,根据说明书选

$$R_B = 10\Omega$$

(2) 制动电阻的容量。说明书提供的参考容量是 12kW,但考虑到刨台的往复十分频繁,故制动电阻的容量应比一般情况下的容量加大 1~2 挡。选

$$P_B = 30kW$$

## 第七节 刀架与横梁的控制

一、刀架的控制

(一) 刀架的运动

1. 龙门刨床的刀架

(1) 垂直刀架。有两个,装在横梁上,由同一台电动机拖动,只能左右移动。

(2) 侧刀架。有两个，左右各一个，装在立柱上，各自有一台电动机拖动，只能上下移动。

## 2. 对刀架运动的基本要求

(1) 刀架既可以自动进给，也可以快速移动，由进刀箱上的机械手柄的位置来决定。快速移动与自动进给不能同时进行。

(2) 自动进给在每次刨台后退结束时进行，进刀量的多少由机械机构控制。

(3) 在刨台自动循环时，刀架不能快速移动。

(4) 刀架的移动都有限位控制。

(5) 刀架在切削完毕、返回之前，必须“抬刀”，以免刨刀在返回过程中在工件上留下划痕，影响光洁度。抬刀动作由抬刀电磁铁来完成。

## (二) 进刀量的控制

### 1. 进刀量控制的一般方法

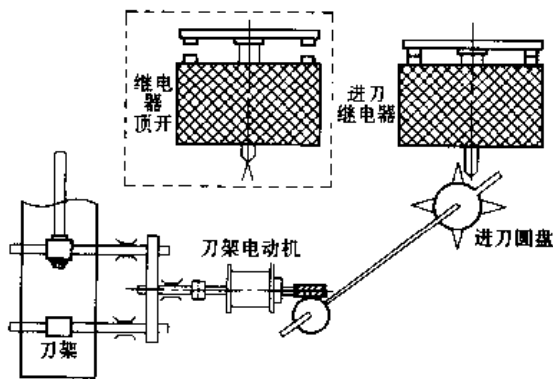


图 7-24 进刀继电器

刨台在往复运动过程中，每次从刨台返回转为刨台前进时，刀架应进行一次进刀运动，进刀量通常通过机电结合的方式进行控制。这里介绍一种“进刀继电器”，如图 7-24 所示。

当刨台返回完了、准备反向时，给出进刀信号，刀架电动机开始旋转，刀架进刀。与此同时，进刀圆盘也开始转动，如图中虚线框内所示，当圆盘上的齿顶开继电器时，电动机断电，停止进刀，不同的进刀量将通过不同的圆盘来控制。

也有的刀架是采用较精密的电子时间继电器，通过控制进刀的时间来控制进刀量的。

### 2. 刀架的变频调速

由于变频器能够十分准确地控制运行频率和升、降速时间，而 PLC 又能够准确地计时。因此，采用 PLC 配合变频调速来控制进刀量，非但机械结构简单了许多，还能提高控制进刀量的精度。

刀架变频调速的基本电路如图 7-25 所示。说明如下：

(1) UF2 是左、右刀架共用的变频器，UF3 是垂直刀架用变频器；可以用一个三位切换开关 SAN2 来控制，SAN2 的三个位置分别是：左刀架、右刀架和左右刀架同时移动。

(2) SBV1 和 SBV2 是控制变频器 UF3 的按钮开关，SBN1 和 SBN2 是控制变频器 UF2 的按钮开关，SAV 和 SAN1 是用于切换移动方向的旋钮开关。

(3) KF2 和 KF3 分别是变频器 UF2 和变频器 UF3 的故障信号。

(4) SBV、SBR、SBL 分别是垂直刀架、左刀架和右刀架的快速移动按钮。

### 3. 刀架变频器的选择

(1) 刀架电动机的容量。三台刀架电动机的容量都是 1.5kW。

(2) 刀架电动机的负荷特点。刀架的移动都是在不切削时进行的，因此，刀架电动机的负荷大小是比较恒定的。如果更换了刨刀，则更换前后，负荷的大小将有所变化，但变化也极小。此外，刀架电动机的负载属于短时负载，在工作期间，电动机的发热将达不到稳定温

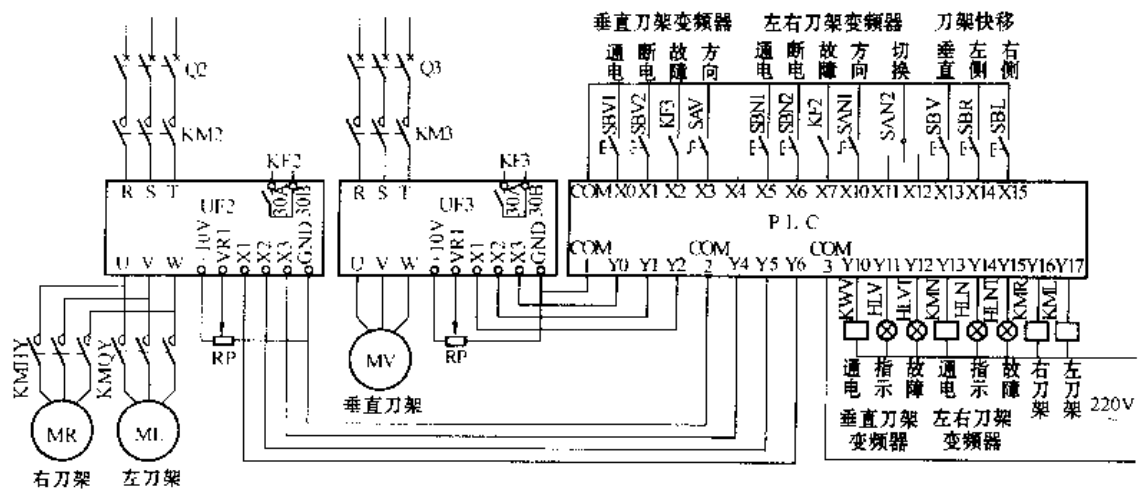


图 7-25 刀架的变频调速

升，因此，电动机可能是在过载状态下运行。

(3) 变频器型号的选择。由于刀架电动机的负荷变化不大，故即使是 V/F 控制方式也能满足要求，选择变频器时应主要考虑经济因素。今选国产的森兰 SB60 系列变频器。

(4) 变频器容量的选择。考虑到刀架电动机可能工作在过载状态下，故变频器的容量适当加大：垂直刀架用变频器选 3.6kVA（配 2.2kW 电动机）、5.5A 的变频器；而左右刀架用变频器则选 6.4kVA、9.7A（配 3.7kW 电动机）。

#### 4. 变频器的功能预置

##### (1) 频率给定功能：

F001 = 0——只用主给定信号或辅助给定信号。

F002 = 2——从 VR1 端输入给定信号。

##### (2) 运行控制功能：

F004 = 1——由外接端子控制变频器的运行。

F005 = 2——变频器面板上的停止按钮有效。

F006 = 0——正、反转由电位控制（二线控制）。

F007 = 2——停机时首先按预置的降速时间降速，然后实行直流制动。

##### (3) 升、降速功能：

F009 = 5s——升速时间预置为 5s。

F010 = 5s——降速时间预置为 5s。

##### (4) 电动机的过载保护：

F011 = 2——变频器的电子热保护功能有效。

F012 = 60%——当电动机的电流超过 3.3A 时，过载保护开始起作用。

##### (5) 控制方式：

F013 = 0——选择 V/F 开环控制方式。

F100 = 0——U/f 线为直线。

F101 = 50Hz——基本频率为 50Hz。

F102 = 380V——最大输出电压为 380V。

F103 = 15——转矩补偿选择第 15 挡。

(6) 输入端子功能：

F500 = 13——端子 X1 为正转功能。

F501 = 14——端子 X2 为反转功能。

F502 = 10——端子 X3 为点动功能。

5. 其他电器的选择

(1) 空气断路器：

Q2  $I_{QN} \geq (1.3 \sim 1.4) \times 9.7 = 12.61 \sim 13.58(A)$

选  $I_{QN} = 15A$

Q3  $I_{QN} \geq (1.3 \sim 1.4) \times 5.5 = 7.15 \sim 7.7(A)$

选  $I_{QN} = 15A$

(2) 接触器：

KM2  $I_{KN} \geq 9.7A$

选  $I_{KN} = 10A$

KM3  $I_{KN} \geq 5.5A$

选  $I_{KN} = 10A$

(3) 制动电阻和制动单元。因为自动进刀时速度很低，停止时可直接采用直流制动方式；快速移动时则因为属于辅助操作，次数又不多，对制动时间无严格要求，故不必配置制动电阻和制动单元。

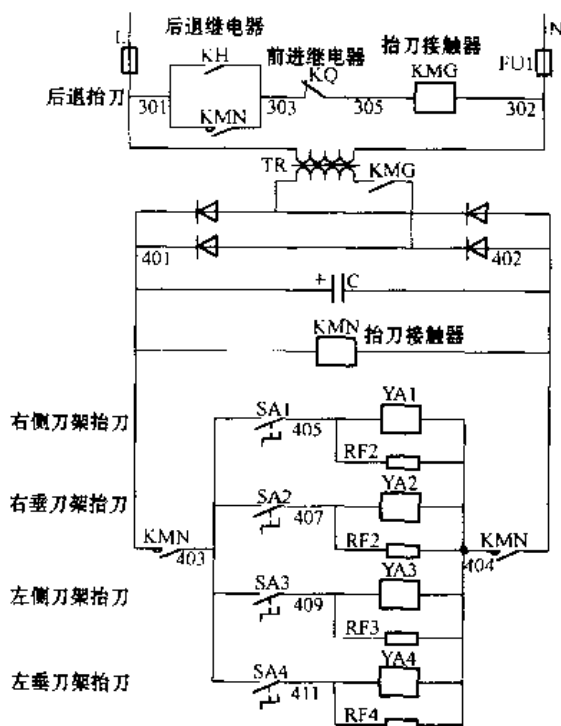


图 7-26 拾刀控制电路

### (三) 拾刀控制

由于拾刀动作在刨削过程中十分频繁，如采用交流接触器和交流电磁铁，则因为开始吸合时的冲击电流很大，频繁动作易导致线圈烧坏，故仍以采用直流接触器和直流电磁铁为宜。

因此，拾刀控制电路的电源是经全波整流后得到的，如图 7-26 所示。由于一般交流接触器的触点不宜使用在直流电路中，故控制接触器 KMG 的触点接在整流桥之前。

图 7-26 中，KMN 是拾刀接触器，它的作用和 KMG 完全相同，只是换成了直流接触器，实施对拾刀电磁铁 YA1 ~ YA4 的控制。具体哪个刀架需要拾刀，则由选择开关 SA1 ~ SA4 来决定。

由于拾刀电磁铁的电感量很大，当接触器 KMN 的触点断开时，将产生很大的自感电动势，故线圈两端应并联放电电阻 RF1 ~



RF4。

## 二、横梁的控制

### (一) 横梁的运动

#### 1. 对横梁控制的要求

(1) 横梁升降必须在刨台不工作时才能进行。

(2) 横梁上升和下降时都有限位控制：上限位防止与龙门顶相撞；下限位防止与左、右侧刀架相撞。

(3) 横梁下降到所需位置时，应有极短时间的反转，以消除横梁的丝杆与横梁滑块螺母之间的间隙，防止横梁歪斜。

(4) 横梁在移动完后都要夹紧，夹紧必须适度。

#### 2. 横梁的拖动系统

横梁控制有两台电动机：

(1) 横梁移动电动机。用于控制横梁的上、下移动。

(2) 横梁夹紧电动机。用于将横梁夹紧在立柱上，横梁夹紧的程度由电流继电器来控制：横梁在夹紧过程中，电动机的电流将逐渐增大，当电流增大到一定程度时，电流继电器动作，夹紧运动停止。

### (二) 横梁移动的控制

#### 1. 横梁移动的控制过程

在刨台运动停止的前提下，按“横梁上升”（或“横梁下降”）按钮，则：

→横梁夹紧电动机反转，开始放松；

→放松完毕后，由行程开关发出信号，横梁移动电动机启动，开始移动；

→到达所需位置后，松开“横梁上升”（或“横梁下降”）按钮；

→如果横梁是向下移动的，则在松开按钮后，横梁移动电动机将短时间反转，反转时间由时间继电器控制（如采用 PLC，则由 PLC 内的计时器控制）；

→与此同时，横梁夹紧电动机正转，开始夹紧；

→当横梁已经夹紧时，电流继电器动作，夹紧电动机停止，横梁移动完毕。

可见，横梁的控制电路是比较复杂的。

#### 2. 横梁移动的 PLC 控制

由于横梁移动的电动机容量较大，且横梁移动对调速的要求不高，故一般情况下，从降低改造成本考虑，可不采用变频调速。但如果采用 PLC 控制，则控制电路可以大为简化，如图 7-27 所示。图中，继电器 KE 是反映刨台移动状态的，只有当刨台停止工作的情况下，KE 才导通，允许横梁移动。电流继电器 KAP 用于控制横梁的夹紧程度；行程开关 SQS 用于反映横梁的放松状态，当横梁放松完毕后，SQS 闭合，允许横梁移动。

### (三) 其他辅助运动

#### 1. 磨头（或铣头）电动机

当代龙门刨床常常也可以进行磨削或铣削，因此而配有专门的拖动砂轮（或铣刀）旋转的电动机。

#### 2. 油泵电动机

为刨台提供润滑油之用。其控制方式可以有“自动”和“手动”两种：在“自动”方式下，将在刨台进行自动循环运行时自动地为刨台提供润滑油；“手动”方式则主要用于检查

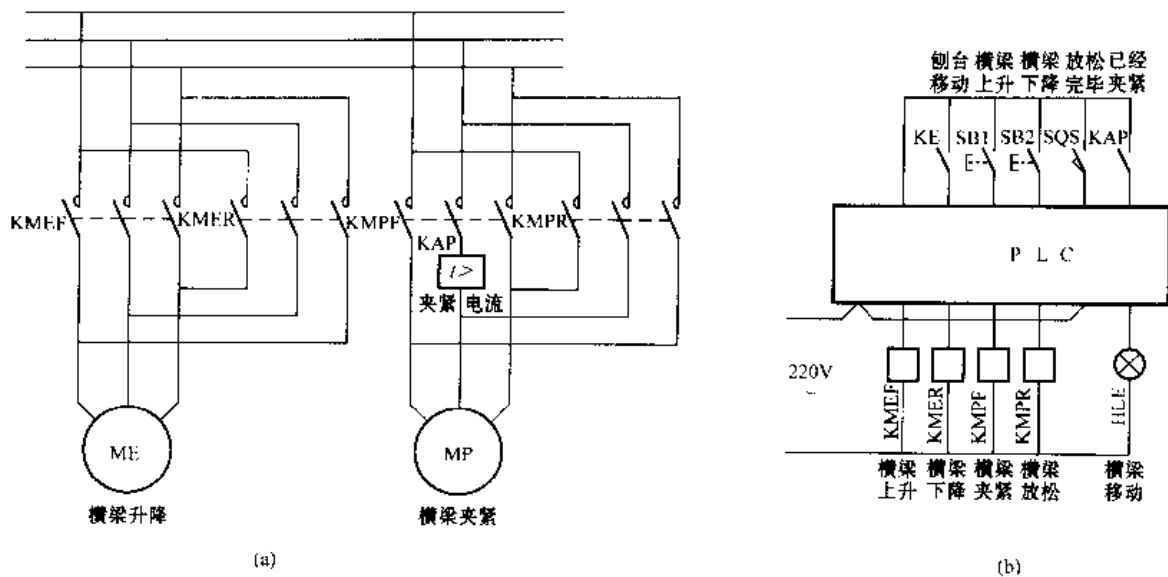


图 7-27 横梁移动的 PLC 控制电路

(a) 主电路; (b) 控制电路

油泵的工作情况或润滑油的质量。

### 3. 通风电动机

用于对主运动电动机及控制柜等提供通风。

## 第八节 龙门刨床控制电路

### 一、主电路

龙门刨床的主电路如图 7-28 所示。

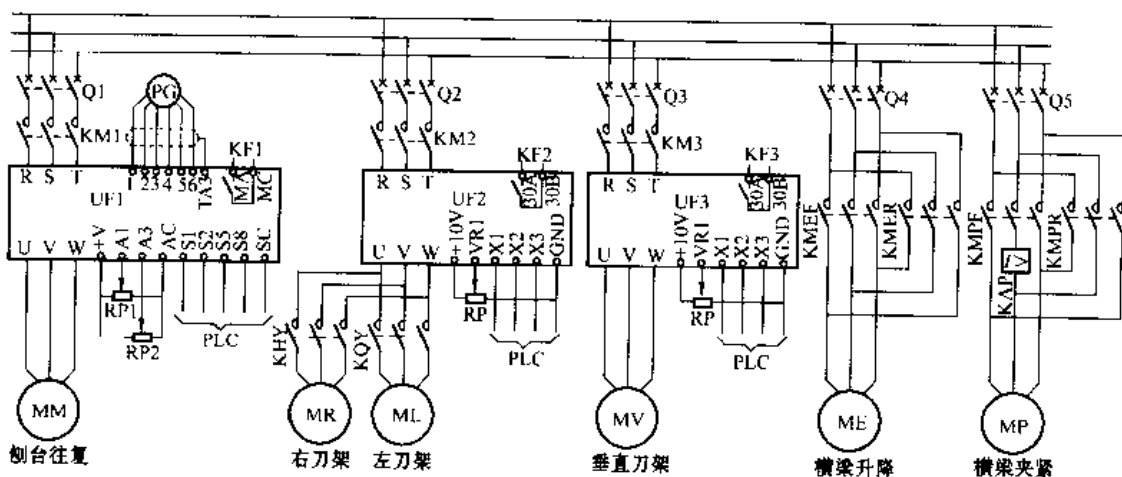


图 7-28 龙门刨床的主电路

#### 1. 刨台往复电动机 (MM)

由变频器 UF1 控制，变频器的通电和断电由空气断路器 Q1 和接触器 KM1 控制；刨台前进和后退的转速大小分别由电位器 RP1 和 RP2 控制，正、反转及点动（刨台步进和步退）

则由 PLC 控制。

### 2. 垂直刀架电动机 (MV)

由变频器 UF2 控制, 变频器的通电和断电由空气断路器 Q2 和接触器 KM2 控制; 转速大小直接由电位器控制, 正、反转及点动 (刀架的快速移动) 则由 PLC 控制。

### 3. 左、右刀架电动机 (ML 和 MR)

由同一台变频器 UF3 控制, 变频器的通电和断电由空气断路器 Q3 和接触器 KM3 控制; 与垂直刀架电动机一样, 其转速大小直接由电位器控制, 正、反转及点动 (刀架的快速移动) 则由 PLC 控制。

### 4. 横梁升降电动机 (ME) 和横梁夹紧电动机 (MP)

由于横梁的移动不需要调速, 故并不通过变频器来控制。但其工作过程也由 PLC 控制。

## 二、控制电路

所有的控制动作都由 PLC 来完成, 其框图如图 7-29 所示。

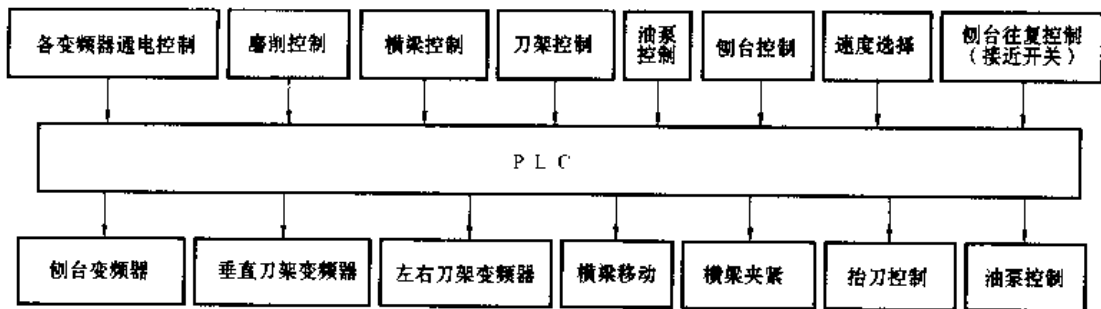


图 7-29 PLC 控制框图

### (一) PLC 的输入信号

#### 1. 各变频器通电控制信号

包括:

- (1) 各变频器的通电和断电按钮;
- (2) 刀架电动机的方向选择开关;
- (3) 变频器的故障信号。

#### 2. 磨头的控制信号

来自于左、右磨头的运行和停止按钮。

#### 3. 横梁控制信号

- (1) 横梁上升和下降按钮;
- (2) 横梁放松完毕时的行程开关;
- (3) 横梁夹紧后的电流继电器;
- (4) 横梁上下的限位开关。

#### 4. 刀架快移信号

来自于各刀架的快速移动按钮; 刀架的自动进刀将在刨台往复运动中自动完成, 不再有专门的信号。

#### 5. 油泵控制信号

- (1) 油泵工作的旋钮开关;

(2) 油泵异常的信号。

#### 6. 刨台的手动控制信号

- (1) 刨台的步进和步退按钮；
- (2) 刨台的前进和后退按钮（用于控制刨台往复运动的按钮）；
- (3) 刨台的停止按钮。

#### 7. 总停按钮

也叫“紧急停机”按钮，用于处理紧急事故。刨床在工作过程中，一旦发生异常情况，必须停机时，按此按钮。

### (二) PLC 的输出信号

#### 1. 到各变频器的控制信号

控制信号的电源由各变频器自行提供，故外部不再提供电源。

#### 2. 控制各变频器的接触器信号

包括各变频器的通电接触器、通电指示灯以及变频器发生故障时的故障指示灯。

#### 3. 横梁控制接触器

包括横梁上升、横梁下降、横梁夹紧和横梁放松用接触器。

#### 4. 抬刀控制继电器

即控制抬刀用继电器。

#### 5. 油泵继电器

即控制油泵用继电器。

### (三) 接触器控制电路

PLC内部的继电器触点的容量较小，当使用于交流 220V 电路中时，其触点容量为 80VA，最大允许电流为 360mA。

另一方面，触点电流较大的接触器的线圈电流也达 100 ~ 500mA，并且在刚开始吸合时，还有较大的冲击电流。因此，PLC 不常用来直接控制较大容量的接触器，而是通过中间继电器来过渡的，在图 7-30 所示电路中，KU1、KU2、KU3、KEF、KER、KPF、KPR、KG、KP 等

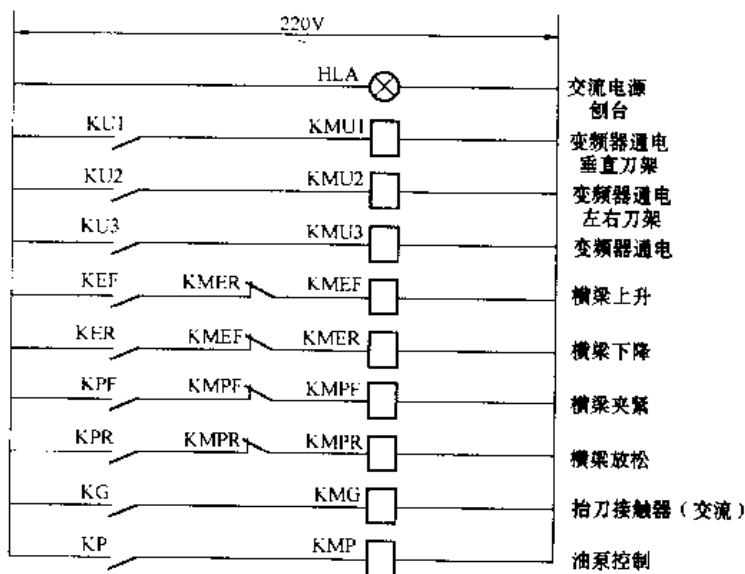


图 7-30 龙门刨床的接触器控制电路

都是过渡用的中间继电器，它们接受 PLC 内部继电器的控制，又来控制各对应的接触器。

### 三、操作系统的布置

龙门刨床的操作系统有悬挂式控制盒和控制柜操作系统两个部分。

#### 1. 悬挂式控制盒

在刨床上，可以转动，主要用于操作人员进行具体操作，如图 7-31 (a) 所示。

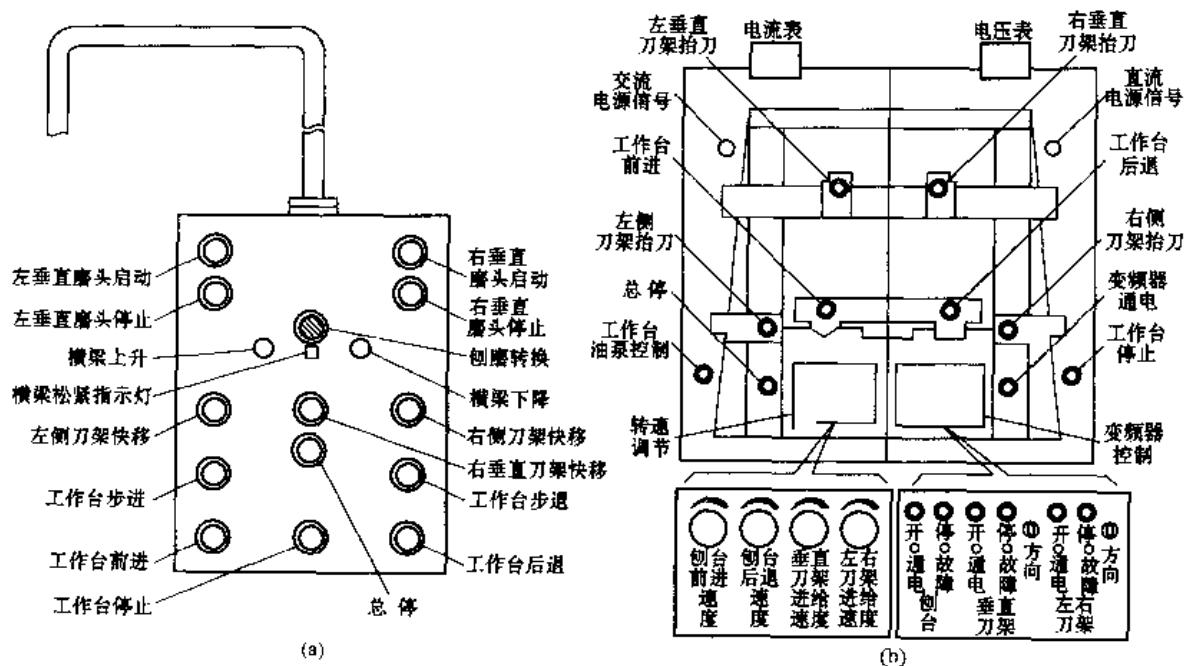


图 7-31 龙门刨床的操作系统

(a) 悬挂式操作盒; (b) 控制柜操作系统

#### 2. 控制柜操作系统

在控制柜上，主要是一些操作人员不常操作的按钮，如图 7-31 (b) 所示。

## 水泵、风机的变频调速

## 第一节 水泵的基本特性和节能原理

## 一、水泵供水的基本模型与主要参数

## (一) 基本模型

如图 8-1 (b) 所示, 是一个生活小区供水系统的基本模型。水泵将水池中的水抽出, 并上扬至所需高度, 以便向生活小区供水。

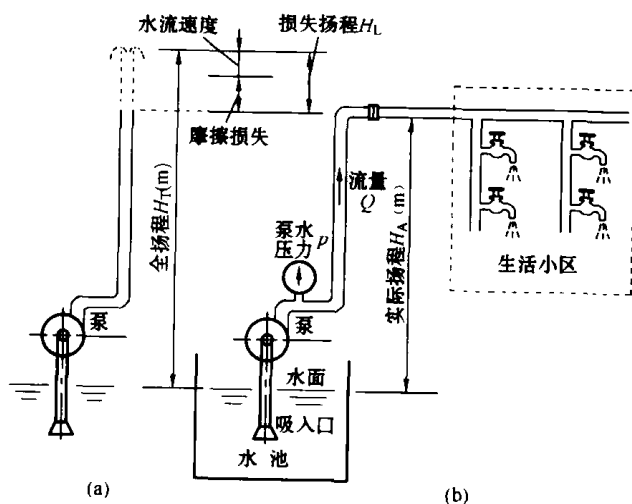


图 8-1 水泵供水的基本模型  
(a) 全扬程的概念; (b) 基本模型

## (二) 供水系统的主要参数

## 1. 流量

是单位时间内流过管道内某一截面的水量, 符号是  $Q$ , 常用单位是  $\text{m}^3/\text{s}$ 、 $\text{m}^3/\text{min}$ 、 $\text{m}^3/\text{h}$  等。供水系统的基本任务, 就是要满足用户对流量的需求。

## 2. 扬程

是单位质量的水被水泵上扬时所获得的能量, 称为扬程。符号是  $H$ , 常用单位是  $\text{m}$ 。扬程主要包括三个方面:

- (1) 提高水位所需的能量;
- (2) 克服水在管路中的流动阻力 (管阻) 所需的能量;
- (3) 使水流具有一定的流速所需的

能量。

由于在同一个管路中, 上述的 (2) 和 (3) 是基本不变的, 在数值上也相对较小。可以认为, 提高水位所需的能量是扬程的主体部分。因此, 在同一管路内进行分析时, 常简略地把水从一个位置“上扬”到另一位置时, 水位的变化量 (即对应的水位差), 用来代表扬程。

## 3. 全扬程

也叫总扬程, 或水泵的扬程。是说明水泵的泵水能力的物理量。包括把水从水池的水面上扬到最高水位所需的能量, 以及克服管阻所需的能量和保持流速所需的能量, 符号是  $H_T$ 。在数值上等于: 在管路没有阻力, 也不计流速的情况下, 水泵能够上扬水的最大高度, 如图 8-1 (a) 所示。

## 4. 实际扬程

即通过水泵实际提高的水位所需的能量, 符号是  $H_A$ 。在不计损失和流速的情况下, 其主体部分正比于实际的最高水位与水池水面之间的水位差, 如图 8-1 (b) 所示。

### 5. 损失扬程

全扬程与实际扬程之差，即为损失扬程，符号是  $H_L$ 。

$H_A$ 、 $H_T$  和  $H_L$  之间的关系是

$$H_T = H_A + H_L \quad (8-1)$$

### 6. 管阻

表示管道系统（包括水管、阀门等）对水流阻力的物理量，符号是  $R$ 。因为不是常数，难以简单地用公式来定量地计算，通常用扬程与流量间的关系曲线来描述，故对其单位常不提及。

### 7. 压力

是表明供水系统中某个位置（某一点）水压的物理量，符号是  $p$ 。其大小在静态时主要取决于管路的结构和所处的位置，而在动态情况下，还与供水流量和用水流量之间的平衡情况有关。

## 二、供水系统的特性与工作点

### （一）供水系统的特性

#### 1. 扬程特性

在管路中阀门完全打开的情况下，表明全扬程  $H_T$  随流量  $Q_U$  变化的曲线  $H_T = f(Q_U)$ ，称为扬程特性曲线，如图 8-2 所示。图中，A1 点是流量较小（等于  $Q_1$ ）时的情形，这时，全扬程较大，为  $H_{T1}$ ；A2 点是流量较大（等于  $Q_2$ ）时的情形，这时，全扬程较小，为  $H_{T2}$ 。

在供水系统中：水泵是供水的“源”，因此，扬程特性可以看成是“水源特性”，或者说，是“水源”（即水泵）的外特性。意思是说，用户用水越多（流量越大），管道中的摩擦损失以及保持一定的流速所需的能量也越大，故供水系统的全扬程就越小。

在这里，流量的大小取决于用户，因此，扬程特性反映了用户的用水需求对全扬程的影响。这里所说的流量，可以称为“用水流量”，用  $Q_U$  表示。

#### 2. 管阻特性

也叫管路特性，是反映为了维持一定的流量而必须克服管阻所需的能量，它和阀门的开度有关。实际上是表明当阀门开度一定时，为了提供一定流量的水所需要的扬程，因此，这里的流量，可以理解为“供水流量”，用  $Q_G$  表示。所以，管阻特性的函数关系是  $H_T = f(Q_G)$ ，如图 8-3 所示。

显然，当全扬程不大于实际扬程（ $H_T \leq H_A$ ）时，是不可能供水（ $Q_G = 0$ ）的。因此，实际扬程也是能够供水的“基本扬程”。

在实际的供水管道中，流量具有连续性，并不存在“供水流量”与“用水流量”的差别。这里的  $Q_G$  和  $Q_U$  是为了便于说明供水能力和用水需求之间的关系而假设的

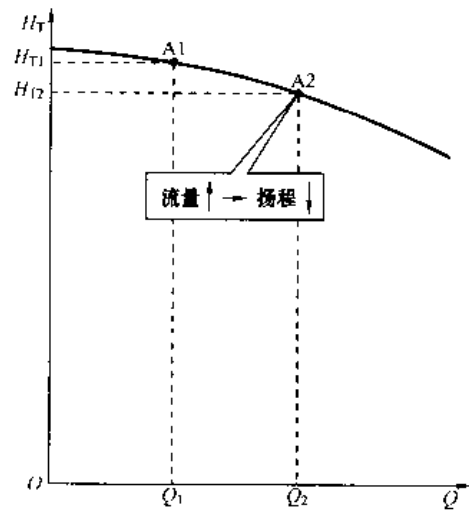


图 8-2 扬程特性

量。

图 8-3 表明，在供水流量较小 ( $Q_C = Q_1$ ) 时，所需扬程也较小 ( $H_T = H_{T1}$ )，如 B1 点；反之，在供水流量较大 ( $Q_C = Q_2$ ) 时，所需扬程也较大 ( $H_T = H_{T2}$ )，如 B2 点。

## (二) 供水系统的工作点

### 1. 工作点

扬程特性曲线和管阻特性曲线的交点，称为供水系统的工作点，如图 8-4 中的 A 点所示。在这一点：供水系统既满足了扬程特性①，也符合了管阻特性②。供水系统处于平衡状态，系统稳定运行。

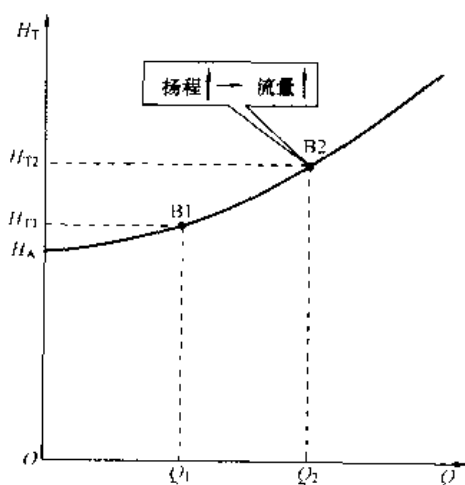


图 8-3 管阻特性

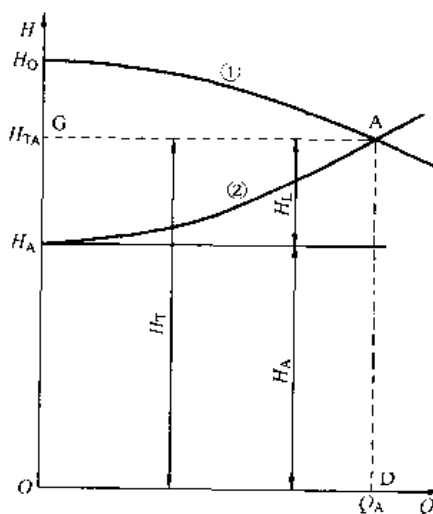


图 8-4 供水系统的工作点

如阀门开度为 100%、转速也为 100% (与额定转速之比)，则系统处于额定状态，这时的工作点称为额定工作点，或自然工作点。

### 2. 供水功率

供水系统向用户供水时所消耗的功率  $P_G$  (kW) 称为供水功率，供水功率与流量  $Q$  和扬程  $H_T$  的乘积成正比，即

$$P_G = C_p H_T Q \quad (8-2)$$

式中  $C_p$ ——比例常数。

由图 8-4 可以看出：供水系统的额定功率与面积  $ODAG$  成正比。

## 三、供水系统的节能原理

### (一) 调节流量的方法

如前述，在供水系统中，最根本的控制对象是流量。因此，要讨论节能问题，必须从考察调节流量的方法入手。常见的方法有阀门控制法和转速控制法两种。

#### 1. 阀门控制法

即通过关小或开大阀门来调节流量，而转速则保持不变 (通常为额定转速)。

阀门控制法的实质是：水泵本身的供水能力不变，而是通过改变水路中的阻力大小来改变供水的能力 (反映为供水流量)，以适应用户对流量的需求。这时，管阻特性将随阀门开度的改变而改变，但扬程特性则不变。



如图 8-5 所示, 设用户所需流量从  $Q_A$  减小为  $Q_B$ , 当通过关小阀门来实现时, 管阻特性将改变为曲线③, 而扬程特性则仍为曲线①, 故供水系统的工作点由 A 点移至 B 点。这时: 流量减小了, 但扬程却从  $H_{TA}$  增大为  $H_{TB}$ ; 由式 (8-2) 可知, 供水功率  $P_G$  与面积  $OEBF$  成正比。

## 2. 转速控制法

即通过改变水泵的转速来调节流量, 而阀门开度则保持不变 (通常为最大开度)。

转速控制法的实质是通过改变水泵的全扬程来适应用户对流量的需求。当水泵的转速改变时, 扬程特性将随之改变, 而管阻特性则不变。

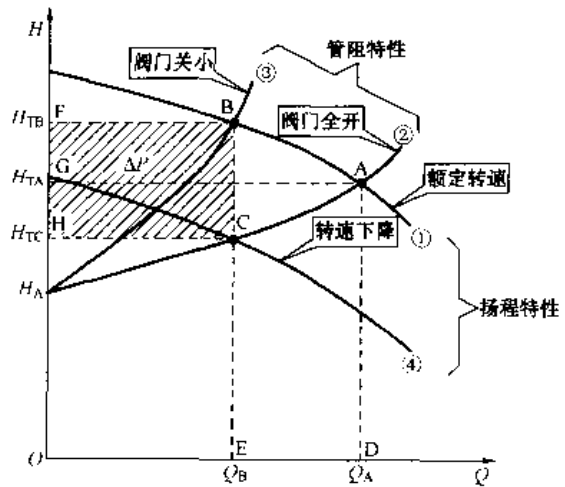


图 8-5 调节流量的方法与比较

仍以用户所需流量从  $Q_A$  减小为  $Q_B$  为例, 当转速下降时, 扬程特性下降为曲线④, 管阻特性则仍为曲线②, 故工作点移至 C 点。可见: 在流量减小为  $Q_B$  的同时, 扬程减小为  $H_{TC}$ ; 供水功率  $P_G$  与面积  $OECH$  成正比。

## (二) 转速控制法节能的几个方面

### 1. 供水功率的比较

比较上述两种调节流量的方法, 可以看出: 在所需流量小于额定流量的情况下, 转速控制时的扬程比阀门控制时的小得多, 所以转速控制方式所需的供水功率也比阀门控制方式小得多。两者之差  $\Delta P$  便是转速控制方式节约的供水功率, 它与面积  $HCBF$  (图中的阴影部分) 成正比。这是变频调速供水系统具有节能效果的最基本的方面。

### 2. 从水泵的工作效率看节能

(1) 工作效率的定义。水泵的供水功率  $P_G$  与轴功率  $P_P$  之比, 即为水泵的工作效率  $\eta_P$ , 即

$$\eta_P = \frac{P_G}{P_P} \quad (8-3)$$

这里, 水泵的轴功率  $P_P$  是指水泵轴上的输入功率 (即电动机的输出功率), 或者说, 是水泵取用的功率。而水泵的供水功率  $P_G$  是根据实际供水的扬程和流量算得的功率, 是供水系统的输出功率。

因此, 这里所说的水泵工作效率, 实际上包含了水泵本身的效率和供水系统的效率。

(2) 水泵工作效率的近似计算公式。据有关资料介绍, 水泵工作效率相对值  $\eta^*$  的近似计算公式如下:

$$\eta^* = C_1 \left( \frac{Q^*}{n^*} \right) - C_2 \left( \frac{Q^*}{n^*} \right)^2 \quad (8-4)$$

式中  $\eta^*$ 、 $Q^*$ 、 $n^*$  ——效率、流量和转速的相对值 (即实际值与额定值之比的百分数);  
 $C_1$ 、 $C_2$  ——常数, 由制造厂家提供。

$C_1$  与  $C_2$  之间, 通常遵循如下规律:

$$C_1 - C_2 = 1$$

式 (8-4) 表明, 水泵的工作效率主要取决于流量与转速之比。

(3) 不同控制方式下的工作效率。由式 (8-4) 可知, 当通过关小阀门来减小流量时, 由于转速不变,  $n^* = 1$ , 比值  $Q^*/n^* = Q^*$ , 其效率曲线如图 8-6 中的曲线①所示。当流量  $Q^* = 60\%$  时, 其效率将降至 B 点。可见, 随着流量的减小, 水泵工作效率的降低是十分显著的。

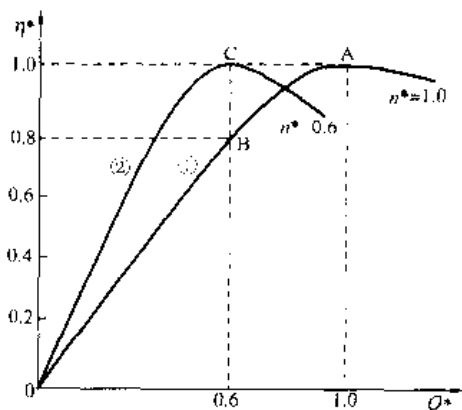


图 8-6 水泵的效率曲线

而在转速控制方式下, 由于在阀门开度不变的情况下, 流量  $Q^*$  和转速  $n^*$  是成正比的, 比值  $Q^*/n^*$  不变。其效率曲线因转速而变化, 在  $60\%$   $n_N$  时的效率曲线如图中的曲线②所示。当流量  $Q^*$

$= 60\%$  时, 效率由 C 点决定, 它和  $Q^* = 100\%$  时的效率 (A 点) 是相等的。就是说, 采用转速控制方式时, 水泵的工作效率总是处于最佳状态。

所以, 转速控制方式与阀门控制方式相比, 水泵的工作效率要大得多。这是变频调速供水系统具有节能效果的第二个方面。

### 3. 从电动机的效率看节能

水泵厂在生产水泵时, 由于:

- (1) 对用户的管路情况无法预测;
- (2) 管阻特性难以准确计算;
- (3) 必须对用户的需求留有足够的余地。

因此, 在决定额定扬程和额定流量时, 通常裕量较大, 所选电动机的裕量也较大。

所以, 在实际的运行过程中, 即使在用水流量的高峰期, 电动机也常常并不处于满载状态, 其效率和功率因数都较低。

采用了转速控制方式后, 可将排水阀完全打开而适当降低转速。由于电动机在低频运行时, 变频器的输出电压也将下降, 从而提高了电动机的工作效率。

这是变频调速供水系统具有节能效果的第三个方面。

综合起来, 水泵的轴功率与流量间的关系如图 8-7 所示。图中, 曲线①是调节阀门开度时的功率曲线, 当流量  $Q^* = 60\%$  时, 所消耗的功率由 B 点决定; 曲线②是调节转速时的功率曲线, 当  $Q^* = 60\%$  时, 所消耗的功率由 C 点决定。由图可知, 与调节阀门开度相比, 调节转速时所节约的功率  $\Delta P$  是相当可观的。

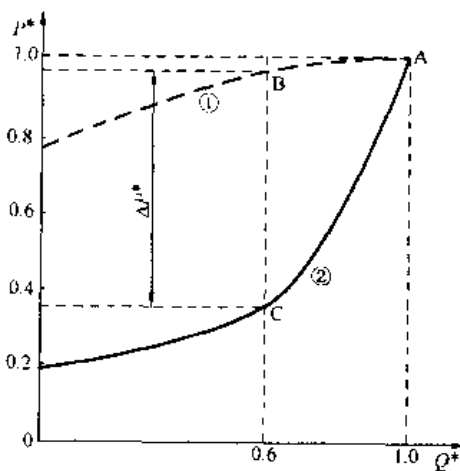


图 8-7 水泵的轴功率曲线

#### 四、水锤效应与水泵的寿命

##### (一) 水锤效应及其破坏作用

###### 1. 水锤效应

有关资料表明，异步电动机在全压启动时，从静止状态加速到额定转速，所需时间只有0.25s。这意味着：在0.25s的时间里，水的流量从零猛增到额定流量。由于流体具有动量和一定程度的可压缩性，因此，在极短时间内流量的巨大变化将引起对管道的压强过高或过低的冲击，并产生空化现象。压力冲击将使管壁受力而产生噪声，犹如锤子敲击管子一样，称为水锤效应。

###### 2. 水锤效应的破坏作用

水锤效应具有极大的破坏性：压强过高，将引起管子的破裂；反之，压强过低又会导致管子的瘪塌。此外，水锤效应也可能损坏阀门和其他固定件。

在直接停机时，供水系统的水头将克服电动机的惯性而使系统急剧地停止。这也同样会引起压力冲击和水锤效应。

##### (二) 产生水锤效应的原因及消除

###### 1. 产生水锤效应的原因

在拖动系统中，决定加速或减速过程的是动态转矩  $T_J$ ，即

$$T_J = T_M - T_L \quad (8-5)$$

式中  $T_M$ ——电动机的转矩， $N \cdot m$ ；

$T_L$ ——负载（此处是水泵）转矩， $N \cdot m$ 。

异步电动机和水泵的机械特性如图8-8(a)所示。图中，曲线①是异步电动机的自然机械特性；曲线②是水泵的机械特性。

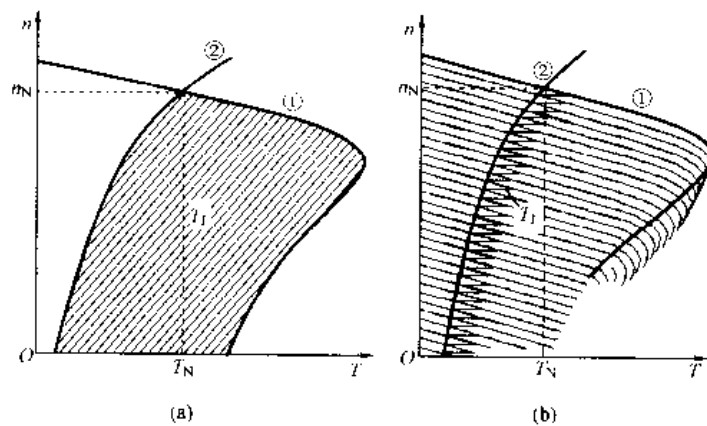


图 8-8 水泵的全压启动和变频启动

(a) 全压启动；(b) 变频启动

直接启动时，在启动过程中的动态转矩  $T_J$  是很大的，如图中的阴影部分所示。从而使加速过程十分急剧，这是产生水锤效应的根本原因。

###### 2. 变频调速时的动态转矩

采用了变频调速后，可以通过对升速时间的预置来延长启动过程，使动态转矩大为减小，如图8-8(b)所示。图中，曲线簇①是异步电动机在不同频率下的机械特性；曲线②是

水泵的机械特性；中间的锯齿状线是升速过程中的动态转矩（即不同频率时的电动机机械特性与水泵机械特性之差）。

在停机过程中，同样可以通过对降速时间的预置来延长停机过程，使动态转矩大为减小，从而彻底消除水锤效应。

### 3. 延长水泵寿命的其他因素

水锤效应的消除，无疑可大大延长水泵及管道系统的寿命。除此以外，由于水泵平均转速下降、工作过程中平均转矩的减小等原因，使：

- (1) 叶片承受的应力大为减小；
- (2) 轴承的磨损也大为减小。

所以，采用了变频调速以后，水泵的工作寿命将大大延长。

## 第二节 变频调速恒压供水系统

### 一、恒压供水的目的

对供水系统进行的控制，归根结底，是为了满足用户对流量的需求。所以，流量是供水系统的基本控制对象。而如上述，流量的大小又取决于扬程，但扬程难以进行具体测量和控制。考虑到在动态情况下，管道中水压的大小与供水能力（由供水流量  $Q_G$  表示）和用水需求（由用水流量  $Q_U$  表示）之间的平衡情况有关：

如供水能力  $Q_G >$  用水需求  $Q_U$ ，则压力上升（ $p \uparrow$ ）；

如供水能力  $Q_G <$  用水需求  $Q_U$ ，则压力下降（ $p \downarrow$ ）；

如供水能力  $Q_G =$  用水需求  $Q_U$ ，则压力不变（ $p = \text{const}$ ）。

可见，供水能力与用水需求之间的矛盾具体地反映在流体压力的变化上。

从而，压力就成为了用来作为控制流量大小的参变量。就是说，保持供水系统中某处压力的恒定，也就保证了该处的供水能力和用水流量处于平衡状态，恰到好处地满足了用户所需的用水流量，这就是恒压供水所要达到的目的。

### 二、恒压供水系统的构成与工作过程

#### 1. 恒压供水系统框图

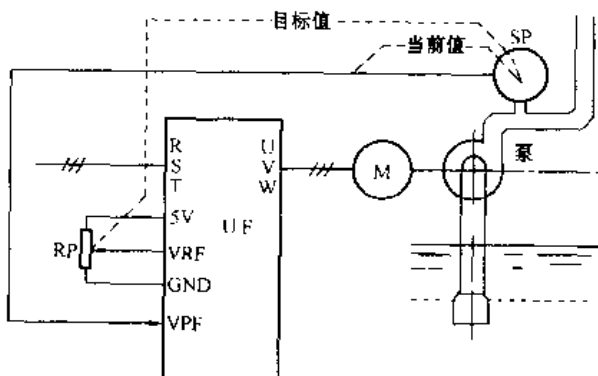


图 8-9 恒压供水系统框图

恒压供水系统框图如图 8-9 所示。由图可知，变频器有两个控制信号：

(1) 目标信号  $X_T$ 。即给定端 VRF 上得到的信号，该信号是一个与压力的控制目标相对应的值，通常用百分数表示。目标信号也可以由键盘直接给定，而不必通过外接电路来给定。

(2) 反馈信号  $X_F$ 。是压力变送器 SP 反馈回来的信号，该信号是一个反映实际压力的信号。

#### 2. 系统的工作过程

现代的变频器一般都具有 PID 调节功能，其内部框图如图 8-10 中的虚线框所示。由图 8-10 可知， $X_T$  和  $X_F$  两者是相减的，其合成信号  $X_D = (X_T - X_F)$  经过 PID 调节处理后得到

频率给定信号，决定变频器的输出频率  $f_X$ 。

当用水流量减小时，供水能力  $Q_G$  大于用水流量  $Q_U$ ，则压力上升， $X_F \uparrow \rightarrow$  合成信号  $(X_T - X_F) \downarrow \rightarrow$  变频器输出频率  $f_X \downarrow \rightarrow$  电动机转速  $n_X \downarrow \rightarrow$  供水能力  $Q_G \downarrow \rightarrow$  直至压力大小回复到目标值、供水能力与用水流量重又平衡 ( $Q_G = Q_U$ ) 时为止；反之，当用水流量增加，使  $Q_G < Q_U$  时，则  $X_F \downarrow \rightarrow (X_T - X_F) \uparrow \rightarrow f_X \uparrow \rightarrow n_X \uparrow \rightarrow Q_G \uparrow \rightarrow Q_G = Q_U$ ，又达到新的平衡。

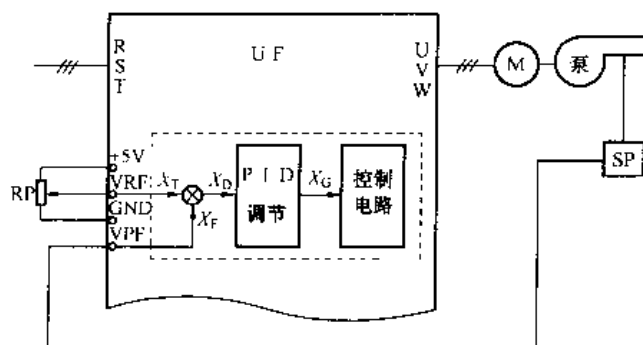


图 8-10 变频器内部的控制框图

### 三、变频器的选型及功能预置

#### (一) 变频器的选型与控制方式

##### 1. 变频器的选型

大部分制造厂都专门生产了“风机、水泵专用型”的变频器系列，一般情况下可直接选用。但对于用在杂质或泥沙较多场合的水泵，应根据其对过载能力的要求，考虑选用通用型变频器。

此外，齿轮泵属于恒转矩负载，应选用通用型变频器。

##### 2. 控制方式与 $U/f$ 设定

以选用 V/F 控制方式为宜。大部分变频器都给出两条“负补偿”的  $U/f$  线，如图 3-42 所示。对于水泵来说，宜选用负补偿程度较轻的  $U/f$  线（图 3-42 中的曲线 01）。

对于具有恒转矩特性的齿轮泵以及应用在特殊场合的水泵，则应以带得动为原则，根据具体工况进行设定。

#### (二) 变频器的功能预置

##### 1. 最高频率

水泵属于二次方律负载，当转速超过其额定转速时，转矩将按平方规律增加。例如，当转速超过额定转速 10% ( $n_X = 1.1n_N$ ) 时，转矩将超过额定转矩 21% ( $T_X = 1.21T_N$ )。导致电动机严重过载。因此，变频器的工作频率是不允许超过额定频率的，其最高频率只能与额定频率相等，即

$$f_{\max} = f_N = 50\text{Hz}$$

##### 2. 上限频率

一般来说，上限频率也以等于额定频率为宜。但有时也可预置得略低一些，原因有如下两个：

(1) 由于变频器内部往往具有转差补偿功能，因此，同是在 50Hz 的情况下，水泵在变频运行时的实际转速高于工频运行时的转速，从而增大了水泵和电动机的负载。

(2) 也有人认为：变频调速系统在 50Hz 下运行时，还不如直接在工频下运行为好，可以减少变频器本身的损失。

所以，将上限频率预置为 49Hz 或 49.5Hz 是适宜的。

##### 3. 下限频率

在供水系统中，转速过低，会出现水泵的全扬程小于基本扬程（实际扬程），形成水泵“空转”的现象。所以，在多数情况下，下限频率应定为 30~35Hz。在其他场合，根据具体

情况，也有定得更低的。

#### 4. 启动频率

水泵在启动前，其叶轮全部在水中，启动时，存在着一定的阻力，在从 0Hz 开始启动的一段频率内，实际上转不起来。因此，应适当预置启动频率，使其在启动瞬间有一点冲力。

#### 5. 升速与降速时间

一般来说，水泵不属于频繁地启动与制动的负载，其升速时间与降速时间的长短并不涉及生产效率的问题。因此，升速时间和降速时间可以适当地预置得长一些。通常，决定升速时间的原则是：在启动过程中，其最大启动电流接近或略大于电动机的额定电流。降速时间只需和升速时间相等即可。

#### 6. 暂停（睡眠与苏醒）功能

在生活供水系统中，夜间的用水量常常是很少的，即使水泵在下限频率下运行，供水压力仍可能超过目标值，这时，可使主水泵暂停运行。如图 8-11 所示，今以森兰 BT12S 系列变频器为例说明其功能。

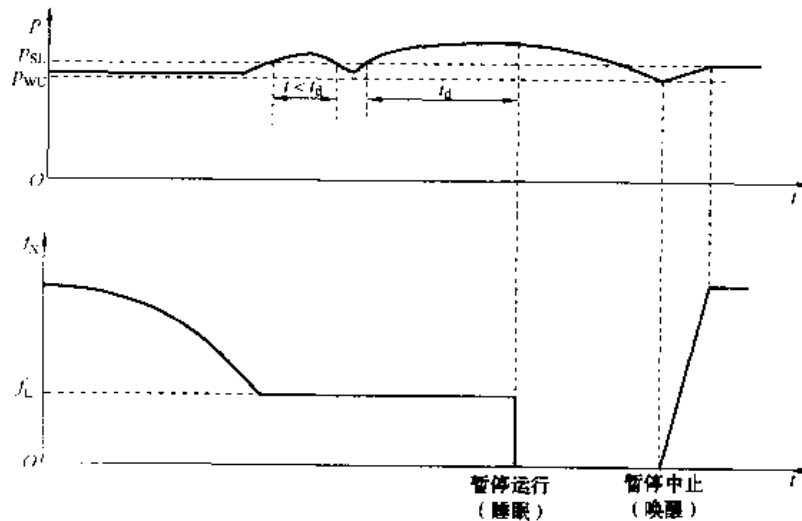


图 8-11 暂停运行功能

(1) 暂停运行（睡眠）功能。在恒压供水系统中，当由于用水流量太小而使压力超过某预置值（如图中的  $p_{sl}$  所示）时，便开始计时，如在预置的时间  $t_d$  内压力又低于预置值  $p_{sl}$  时，则不必暂停；但如压力大于预置值的时间超过了  $t_d$  时，则令主水泵暂停（睡眠）。

在主水泵停机期间，为了不影响个别用户的用水，应启动附加的小泵，以保证供水。也有采用气压罐来保持一定的供水压力的。

(2) 暂停中止（唤醒）功能。当由于用水流量增大，使供水压力低于压力下限值  $p_{wu}$  时，暂停中止（唤醒）。重又进入正常的恒压供水运行状态。

## 第三节 多台水泵变频调速时的切换控制

### 一、多台水泵的切换

当有若干台水泵同时供水时，由于在不同时间（如白天和夜晚）、不同季节（如冬季和

夏季), 用水流量的变化是很大的, 为了节约能源, 本着多用多开、少用少开的原则, 常常需要进行切换。

### 1. “1 控 X” 的切换 (X 为水泵台数)

由于变频器的价格偏高, 故许多用户常采用由一台变频器控制多台水泵的方案, 即所谓的 1 拖 X 方案。其工作过程如下:

首先, 由“1 号泵”在变频控制的情况下工作。

当用水量增大, “1 号泵”已经到达额定频率而水压仍不足时, 经过短暂的延时后, 将“1 号泵”切换为工频工作, 同时变频器的输出频率迅速降为 0Hz, 然后使“2 号泵”投入变频运行。

当“2 号泵”也到达额定频率而水压仍不足时, 又使“2 号泵”切换为工频工作, 而“3 号泵”投入变频运行。

反之, 当用水量减少时, 则先从 1 号泵开始, 然后 2 号泵依次退出工作, 完成一次加减泵的循环。

此方案所需设备费用较少, 但因只有一台水泵实行变频调速, 故节能效果较差。

### 2. “1 控 1” 的切换

即每台水泵都由一台变频器来控制。这时, 须指定一台作为主泵, 系统的工作过程如下:

首先启动“1 号泵”(主泵), 进行变频控制。

当“1 号泵”变频器的输出频率已经上升到 50Hz, 而水压仍不足时, “2 号泵”启动并升速, 使“1 号泵”、“2 号泵”同时进行变频控制。

当“1 号泵”变频器的输出频率又上升到 50Hz, 水压还不足时, “3 号泵”启动并升速, 使 3 台泵同时进行变频控制。

当“1 号泵”变频器的输出频率下降到下限频率(如 30Hz), 而水压仍偏高时, “2 号泵”减速并停止, 进入“1 号泵”、“3 号泵”同时进行变频控制的状态。

当“1 号泵”变频器的输出频率再次下降到下限频率, 而水压仍偏高时, “3 号泵”也减速并停止, 又进入“1 号泵”单独工作的状态。

为了均衡三台泵的工作情况, 可以进行切换, 使三台泵轮流担任主泵, 但主控变频器则不变。

此方案的一次性投入费用较高, 但节能效果十分显著, 可以很快回收设备费用。

我国在初期大多采用“1 控 X”方案, 经济较发达地区采用“1 控 1”方案的也不少。但总的趋势是采用“2 控 3”、“2 控 4”、“3 控 5”方案。

## 二、变频与工频切换时必须注意的问题

### (一) 电动机切断电源后, 定子绕组内的电动势

变频运行的电动机切换成工频运行的主电路如图 8-12 所示。切换的第一步, 是先把将电动机接到变频器的接触器 KM2 断开。KM2 断开后的短时间内, 电动机的定子绕组中将会产生感应电动势。今分析如下:

#### 1. 定子绕组的自感电动势将立即消失

由于磁场能量取决于电流, 所以, 当图 8-12 中的 KM2 断开后, 定子绕组的电流和磁场都将立即消失, 自感电动

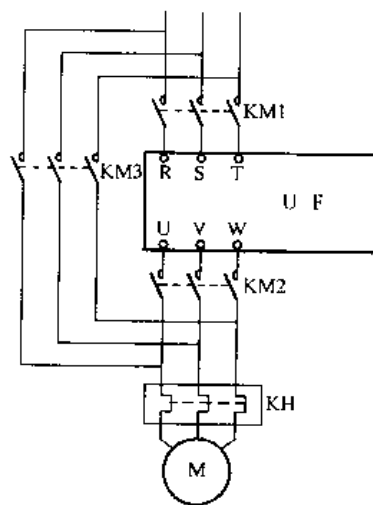


图 8-12 切换控制的主电路

势（即反电动势）也就立即消失。

### 2. 转子电流和磁场并不立即消失

KM2 断开后，由于电动机的转子绕组是自成回路的，所以，根据“楞次定律”，转子绕组的自感电动势将阻止电流的消失。这是一个逐渐衰减的不交变电流，其起始值取决于接触器 KM2 断开瞬间的转子电流值。这个电流将产生一个逐渐衰减的磁场，在转子尚未完全停住时，将被定子绕组所切割，且在定子绕组中产生互感电动势。

如果在定子绕组中的互感电动势尚未消失的情况下，接通工频电源（KM3 闭合），则互感电动势与外加的工频电压相迭加，有可能产生较大的过电流。

因此，在进行切换控制时，应参照第五章第九节所阐述的方法。

## 三、“1 控 X”举例

### 1. 主电路

以 1 控 3 为例，其主电路如图 8-13 所示。图中，接触器 1KM2、2KM2、3KM2 分别用于将各台水泵电动机接至变频器，接触器 1KM3、2KM3、3KM3 分别用于将各台水泵电动机直接接至工频电源。

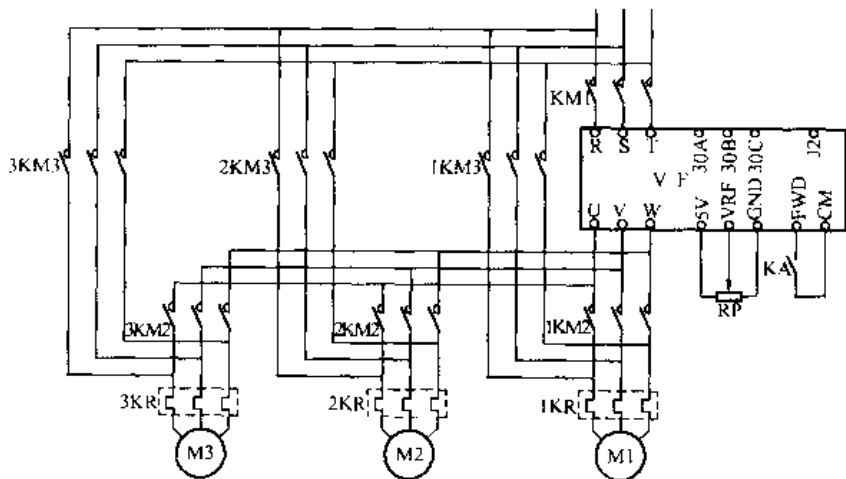


图 8-13 1 控 3 主电路

### 2. 控制电路

一般来说，在多台水泵供水系统中，应用 PLC 进行控制是十分灵活而方便的。但近年来，由于变频器在恒压供水领域的广泛应用，各变频器制造厂纷纷推出了具有内置“1 控 X”功能的新系列变频器，简化了控制系统，提高了可靠性和通用性。

今以国产的森兰 B12S 系列变频器为例，说明其配置及使用方法如下：

森兰 B12S 系列变频器在进行多台切换控制时，须附加一块继电器扩展板，以便控制线圈电压为交流 220V 的接触器。具体接线方法如图 8-14 所示。

在进行功能预置时，须设定如下功能：

- (1) 电动机台数（功能码：F53）。本例中，预置为“3”（1 控 3 模式）。
- (2) 启动顺序（功能码：F54）。本例中，预置为“0”（1 号机首先启动）。
- (3) 附属电动机（功能码：F55）。本例中，预置为“0”（无附属电动机）。
- (4) 换机间隙时间（功能码：F56）。如前述，预置为 100ms。



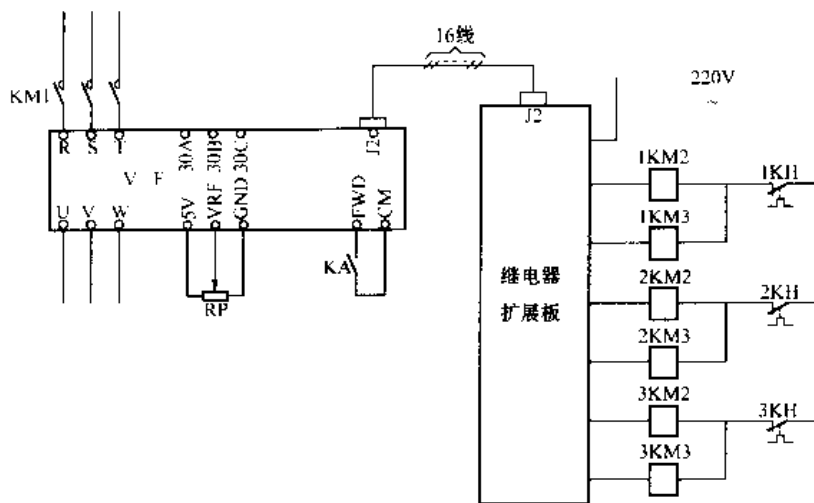


图 8-14 1 控 X 的扩展控制电路

(5) 切换频率上限 (功能码: F57)。通常, 以 49 ~ 50Hz 为宜。

(6) 切换频率下限 (功能码: F58)。在多数情况下, 以 30 ~ 35Hz 为宜。

只要预置准确, 在运行过程中, 就可以自动完成上述切换过程了。可见, 采用了变频器内置的切换功能后, 切换控制变得十分方便了。

## 第四节 水位控制的变频调速系统

### 一、水位控制的特点与节能效果

#### (一) 水位控制的特点

顾名思义, 所谓水位控制, 就是将水面 (或液面) 的位置限制在一定范围内的控制。其应用范围较广, 例如, 部分供水系统的供水方式是: 先用水泵将水“泵”入一个位置较高的储水器中 (水池、水箱等), 然后向低水位的用户供水。这时, 须对储水器中的水位进行控制。在排水系统中, 也常常有类似的控制; 在锅炉及许多其他的工业设备中, 也常常需要对水位或其他液位进行控制。本文以水塔供水为例进行说明。

#### 1. 水塔供水的基本工作方式

通常, 在储水器 (水塔) 中设定一个上限水位  $L_H$  和一个下限水位  $L_L$ 。当水位低于下限水位  $L_L$  时, 启动水泵, 向储水器内供水; 当水位达到上限水位  $L_H$  时则关闭水泵, 停止供水。因此, 水泵每次启动后的任务便是向储水器内提供一定容积 (下限水位与上限水位之间) 的水, 如图 8-15 所示。

#### 2. 工作特点

水位控制时, 供水管路与用水管路 (从而供水流量  $Q_C$  与用水流量  $Q_U$ ) 之间并无直接联系。用水流量  $Q_U$  的大小只能间接地影响泵水系统的工作时间, 而不影响供水流量  $Q_C$  的大小。此外, 在水位

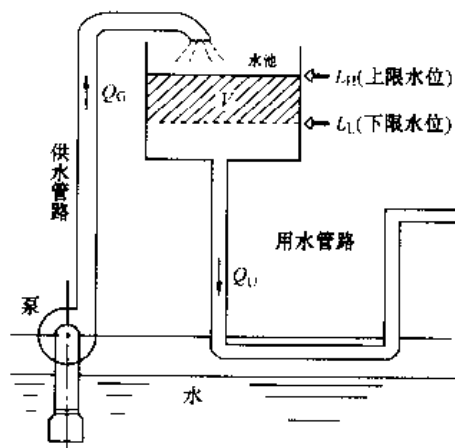


图 8-15 水位控制示意

控制的供水系统中，阀门通常是完全打开的。所以，不存在调节阀门开度的问题。

## (二) 采用变频调速的节能分析

### 1. 节能分析的依据

如上所述，可以看出：在分析变频调速水位控制的节能问题时，应该以在不同转速下提供相同容积的水作为比较的基础。

设： $V$  为下限水位与上限水位之间水的容积（图中的阴影部分）， $Q_1$  为转速等于  $n_1$  时的流量， $t_1$  为以流量  $Q_1$  供满容积  $V$  的水所需的时间； $Q_2$  为转速等于  $n_2$  时的流量， $t_2$  为以流量  $Q_2$  供满容积  $V$  的水所需的时间。则

$$V = Q_1 t_1 = Q_2 t_2 \quad (8-6)$$

### 2. 节能计算举例

设：电动机在额定转速（ $n_1 = n_N$ ）时，有：供水流量为额定流量（ $Q_1 = Q_N$ ）；供满容积  $V$  的水所需的时间为  $t_1 = 1\text{h}$ ；供水过程中消耗的电功率为额定功率  $P_{1N}$ ；供满容积  $V$  的水消耗的电能为  $W_1 = P_1 \times t_1$ 。

如果：将电动机的转速下降为  $n_2 = 0.8n_N$ ，则：供水流量为  $Q_2 = 0.8Q_1$ ；供满容积  $V$  的水所需的时间为  $t_2 = 1/0.8 = 1.25\text{h}$ ；供水过程中消耗的电功率为  $P_2 = 0.8^3 P_{1N} = 0.512 P_{1N}$ ；供满容积  $V$  的水消耗的电能为  $W_2 = 0.512 P_{1N} \times 1.25 = 0.64 W_1$ 。

两者相比较，可节约电能  $\Delta W = W_1 - W_2 = 0.36 W_1$ ，即可节能 36%。

除此以外，还有全速运行时由于启动比较频繁、启动电流大而引起的功率损失以及对设备的冲击等，在变频调速时均可避免。

可见，水位控制采用变频调速后，节能效果也是相当可观的。

## 二、水位的检测

### (一) 电极式水位传感器

#### 1. 基本构成

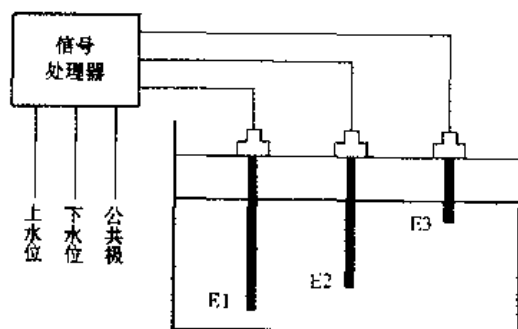


图 8-16 电极式水位传感器

电极式水位传感器，也叫杆式水位传感器。它由若干根杆式电极所构成，如图 8-16 所示。E1 杆是公共极，E2 杆的末端与下限水位对齐，E3 杆的末端与上限水位对齐。

由于所控制的水一般都不是纯水，有一定的导电率。因此，当水位高于下限水位时，E2 杆与 E1 杆之间将处于导通状态，当水位达到上限水位时，E3 杆与 E1 杆之间也处于导通状态。

#### 2. 信号处理器

为了安全起见，检测电路的电压应采用直流低压（通常不大于 24V），而水的电阻又较大，故信号电流很小，如直接用来作为控制信号，可靠性较差。通常要用一个信号处理器来进行处理。信号处理器有放大和进行逻辑变换两个作用。

(1) 放大。把电极所得到的信号放大后转换成可靠的开关信号（如继电器触点的通、断信号）。

(2) 进行逻辑变换。如把上限水位的到达信号（相当于动合信号）变换成动断信号，或把下限水位的缺水信号（相当于动断信号）变换成动合信号等。

杆式水位传感器的一个明显的缺点，是测试深度受到限制。此外，由于每根杆的长度通

常为 1m，因此，测试深度难以任意取值。

### (二) 液位变送器

直接把液面的位置变换成电流或电压信号的装置，称为液位变送器。过去，由于液位变送器的价格常较昂贵，影响了它的普及应用。最近，我国生产的 DS□□□□-QS 系列液位变送器，其性能价格比有了较明显的提高，颇受用户欢迎。

#### 1. 外形及安装特点

液位变送器外形如图 8-17 所示。安装时，只需将液位变送器放入一钢管中，钢管的底端装一防护网，以防止较大的颗粒状杂物侵入。钢管的上端露出液面。

变送器可以输出与液位成正比的电压信号或电流信号。购买时应说明被测水池的深度，以便使输出信号与所要求的水位量程相对应。

DS□□□□-QS 系列液位变送器最大可以测量 0~100m 的深度，这是杆式传感器所难以做到的。

#### 2. 信号处理

信号处理的方法很多，目的是把输入信号（如为电流信号，则通常先转换成电压信号）和若干个与所要求的水位对应的标准信号相比较，得到各水位的开关信号。

这里介绍一种利用 LM3914 点/条显示集成电路进行转换的电路，如图 8-18 所示。



图 8-17 液位变送器外形

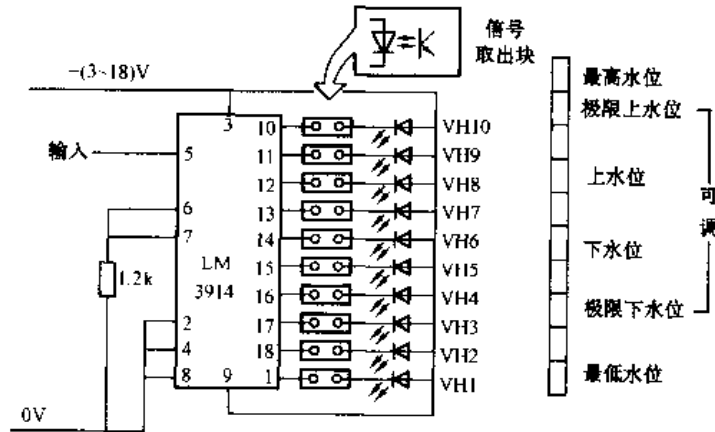


图 8-18 水位变送器的转换电路

(a) 转换电路；(b) 显示

LM3914 有十个输出端，可对应于十个液位。其输出信号可以用若干个由光电耦合管构成的“信号取出块”任意连接。未被选中者只需将相关端子短接即可。

在十个液位处还可以接入十个发光二极管，以便进行液位显示，如图 8-18 (b) 所示。

LM3914 还可以将  $n$  个芯片“串接”起来，将被测液位细分为  $n \times 10$  个液位。因此，其测试深度可以任意取值。

### 三、水位控制的变频调速系统

#### 1. 利用多挡速功能进行控制

将水池水位分成四挡：下极限水位、下限水位、上限水位、上极限水位。经信号处理器

处理后，其对应点 KLL（与下极限水位对应）接至变频器的 X1 端（即 X1 与 CM 之间，下同）；KL（与下限水位对应）接至变频器的 X2 端；KH（与上限水位对应）接至变频器的 X3 端；KHH（与上极限水位对应）变换成动断触点后接至变频器的 FWD 端，如图 8-19 所示。

在预置变频器各挡转速的工作频率时，其速度挡如下：当水位在下极限水位与下限水位之间时，为第 1 挡转速（X3、X2、X1 的状态为 001），因水位偏低，工作频率应预置为最高频率，通常为 50Hz；当水位在下限水位与上限水位之间时，为第 3 挡转速；（X3、X2、X1 的状态为 011），这时的水位属于正常水位，为了节能，工作频率可略低些，如 40Hz；当水位在上限水位与上极限水位之间时，为第 7 挡转速；（X3、X2、X1 的状态为 111），因水位偏高，工作频率应再低一些，如 30~35Hz；当水位超过上极限水位时，KHH 的常闭触点使 FWD 和 CM 之间断开，变频器暂停输出，水泵暂停供水。

## 2. 利用升、降速功能进行控制

利用升、降速功能进行水位控制的电路如图 8-20 所示。这里，与下限水位对应的触点 KL 为动断触点，接在变频器的 X4 与 CM 之间。当水位低于下限水位时，X4 与 CM 之间闭合，频率上升，水泵加速，增大供水流量；直至水位高于下限水位时，触点 KL 断开，频率停止上升，保持当前流量。

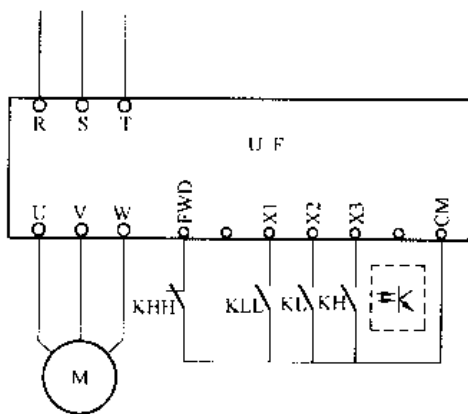


图 8-19 多挡速控制的接法

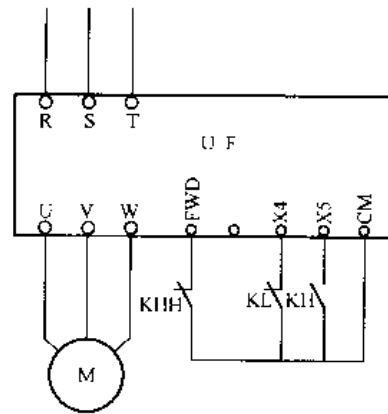


图 8-20 升、降速控制端

当水位高于上限水位时，触点 KH 闭合，变频器的 X5-CM 接通，频率下降，水泵减速，减小供水流量；当水位低于上限水位时，触点 KH 断开，频率停止下降，保持当前流量。

如果由于用水量的急剧下降而使水位高于上极限水位，则触点 KHH 断开，变频器停止工作，水泵暂停供水。

这里，与下极限水位对应的触点 KLL 并不起调频的作用，但可用来进行报警。

## 四、水源水位变化时的控制

许多自来水厂是以大江大河为水源的，而大江大河的水位是随季节而变化的。以长江为例，冬季的水位与夏季水位之间，相差达 20 余米。

此外，自来水厂因为需要进行水处理，所以，必须首先把大江大河的水抽到一个水池里，然后再一步步地进行处理，如图 8-21 所示。每逢夏季，由于水位高，进水的流量大，同时，用户的用水量也大，故进水泵启动频繁，非但耗能大，且因每次启动时，对水泵的冲击大，影响水泵的使用寿命。在实际工作中，常常需要把阀门关小。所以，其节能分析与恒压供水时的情形类似。

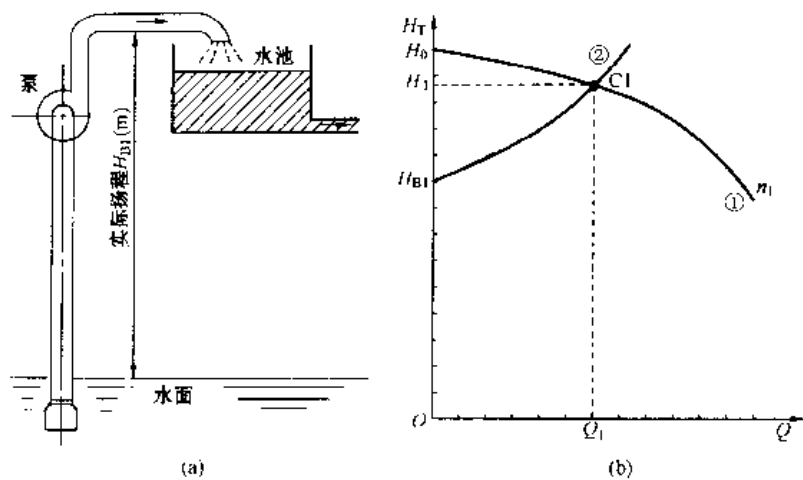


图 8-21 冬季的进水特点  
(a) 进水示意; (b) 工作点

(一) 基本分析

1. 冬季的进水特点

冬季江面的水位低，故实际扬程  $H_{B1}$  大，如图 8-21 (a) 所示。其管阻特性如图 8-21 (b) 中的曲线②所示。

假设水泵以额定转速  $n_1$  旋转，则扬程特性为曲线①，故进水泵的工作点为 C1 点。这时：全扬程为  $H_1$ ；进水流量为  $Q_1$ ；进水功率与乘积  $H_1 Q_1$  成正比。

2. 夏季的进水特点

夏季江面的水位高，故实际扬程  $H_{B2}$  小，如图 8-22 (a) 所示。其管阻特性如图 8-22 (b) 中的曲线④所示。假设水泵仍以额定转速  $n_1$  旋转，扬程特性仍为曲线①，则进水泵的工作点为 C2 点。这时：全扬程为  $H_2$ ；进水流量为  $Q_2$ ，比冬季时的进水流量  $Q_1$  大很多；进水功率与乘积  $H_2 Q_2$  成正比。

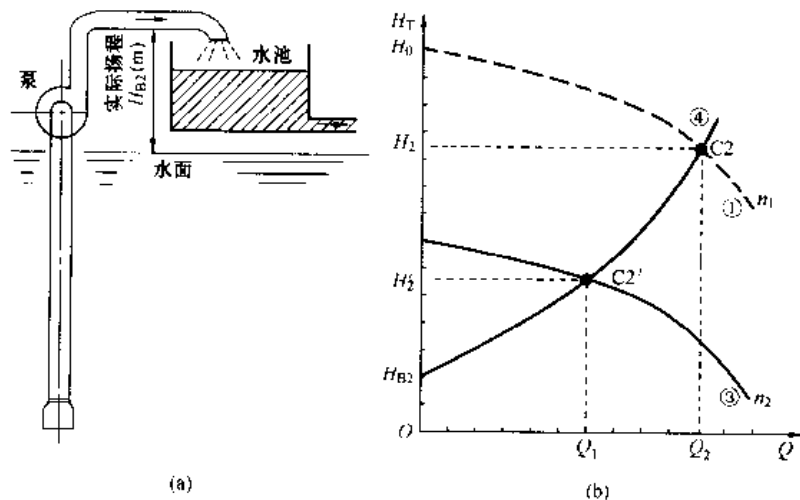


图 8-22 夏季的进水特点  
(a) 进水示意; (b) 工作点

如果通过变频调速，把转速下降为  $n_2$ ，则扬程特性为曲线③，工作点为  $C_2'$  点。这时：全扬程为  $H_2'$ ；进水流量与冬季时相同，也是  $Q_1$ ；进水功率与乘积  $H_2'Q_1$  成正比。

与降速前相比，节约功率：

$$\Delta P = k(H_2Q_2 - H_2'Q_1) \quad (8-7)$$

式中  $k$ ——比例常数。

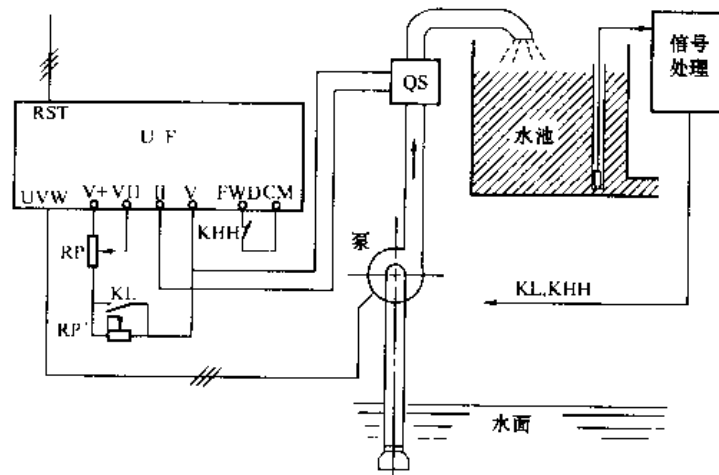


图 8-23 水源水位变化时的控制方案

式 (8-7) 表明，采用变频调速后的节能效果是相当可观的。

## (二) 控制方案

### 1. 主体控制

比较图 8-21 和图 8-22，可以看出，如果冬季的进水流量  $Q_1$  已经能够满足要求，那么，在其他季节，只需通过变频调速，使进水流量保持为  $Q_1$ ，进行恒流量控制就可以了，如图 8-23 所示。图中，QS 为流量计，其输出信号接至变频器的反馈量输入端 (II)，就可以进行恒流量的 PID 控制了。流量控制的目标值由电位器 RP 和附加电位器 RP' 来进行设定。

### 2. 辅助控制

考虑到：

(1) 应照顾到水池水位的限制。

(2) 夏季用水量大，如流量与冬季流量相同，保持为  $Q_1$ ，有可能出现供水不足的现象。故一旦供水不足时，必须立即加大流量。

为此，在水池处，加入了水位变送器控制及其信号处理电路，用于调整流量的目标值。其具体工作情况如下：正常水位时，与下限水位对应的触点 KL 是闭合的，电位器 RP' 被短路，流量的目标值由 RP 决定，设为  $Q_1$ ；当由于用水量增大，导致水位下降、并降低到低于下限水位时，触点 KL 断开，附加电位器 RP' 接入电路，流量的目标值增大，增加供水流量；当水位上升、并上升到高于下限水位时，触点 KL 重又闭合，供水流量又恢复为  $Q_1$ 。

上极限水位触点 KHH 的作用：KHH 接至变频器的 FWD 与 CM 之间。当未达到上极限水位时，KHH 闭合，变频器处于运行状态；当水位达到上极限水位时，KHH 断开，变频器将停止运行，水泵停止进水。

## 第五节 中央空调的变频调速

### 一、中央空调系统的大致构成

如图 8-24 所示，中央空调系统主要由以下几个部分组成。

#### (一) 冷冻主机与冷却水塔

##### 1. 冷冻主机

也叫制冷装置，是中央空调的“制冷源”，通往各个房间的循环水由冷冻主机进行“内部热交换”，降温为“冷冻水”。

近年来，冷冻主机也有采用变频调速的，是由生产厂原配的，不必再改造。

##### 2. 冷却水塔

冷冻主机在制冷过程中，必然会释放热量，使机组发热。冷却水塔用于为冷冻主机提供“冷却水”。冷却水在盘旋流过冷冻主机后，将带走冷冻主机所产生的热量，使冷冻主机降温。

#### (二) “外部热交换”系统

由以下几个系统组成：

##### 1. 冷冻水循环系统

由冷冻泵及冷冻水管道组成。从冷冻主机流出的冷冻水由冷冻泵加压送入冷冻水管道，通过各房间的盘管，带走房间内的热量，使房间内的温度下降。同时，房间内的热量被冷冻水吸收，使冷冻水的温度升高。温度升高了的循环水经冷冻主机后又成为冷冻水，如此循环不已。

从冷冻主机流出（进入房间）的冷冻水简称为“出水”；流经所有的房间后回到冷冻主机的冷冻水简称为“回水”。无疑，回水的温度将高于出水的温度，形成温差。

##### 2. 冷却水循环系统

冷却泵、冷却水管道及冷却塔组成了冷却水循环系统。冷冻主机在进行热交换、使水温冷却的同时，必将释放大量的热量。该热量被冷却水吸收，使冷却水温度升高。冷却泵将升了温的冷却水压入冷却塔，使之在冷却塔中与大气进行热交换，然后再将降温了的冷却水，送回到冷冻机组。如此不断循环，带走了冷冻主机释放的热量。

流进冷冻主机的冷却水简称为“进水”；从冷冻主机流回冷却塔的冷却水简称为“回水”。同样，回水的温度将高于进水的温度，形成温差。

##### 3. 冷却风机

有两种情况：

(1) 盘管风机。安装于所有需要降温的房间内，用于将由冷冻水盘管冷却了的冷空气吹入房间，加速房间内的热交换。

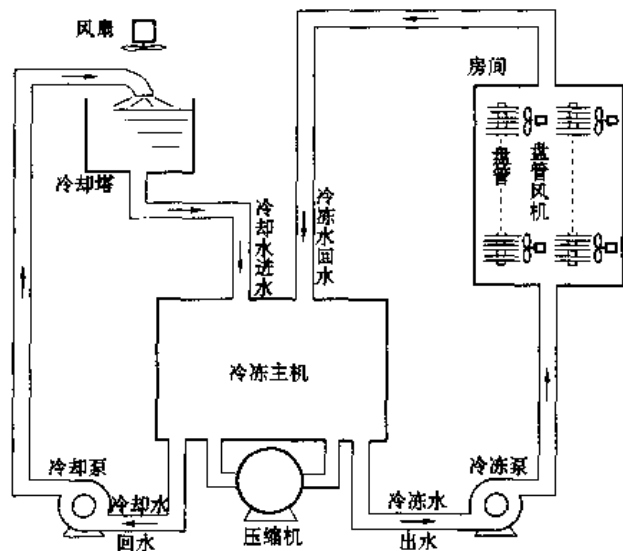


图 8-24 中央空调系统的大致构成

(2) 冷却塔风机。用于降低冷却塔中的水温，加速将“回水”带回的热量散发到大气中去。

可以看出，中央空调系统的工作过程是一个不断地进行热交换的能量转换过程。在这里，冷冻水和冷却水循环系统是能量的主要传递者。因此，对冷冻水和冷却水循环系统的控制便是中央空调控制系统的重要组成部分。

## 二、循环水系统的特点

一般来说，水泵属于二次方律负载，工作过程中消耗的功率与转速的三次方成正比。这是因为，水泵的主要用途是供水，而对于一般供水系统来说，上述结论无疑是正确的。然而，水泵的用途是多方面的，在某些非供水系统中，上述结论却未必是正确的。

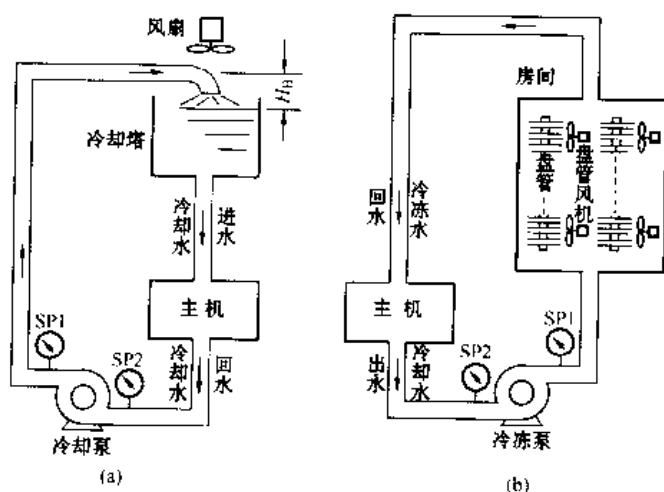


图 8-25 循环水系统

(a) 冷却水系统；(b) 冷冻水系统

等的。因此，水泵的转速只是改变水的流量，而与扬程无关。所以，在循环水系统中，用扬程来描绘水泵的做功情形是不够准确的。

### 3. 压差的概念

循环水系统的工作情形与电路十分类似，水泵的做功情形也可通过水泵出水与回水的压力差  $p_D$  来描绘，即

$$p_D = p_1 - p_2 \quad (8-8)$$

式中  $p_1$ ——出水压力；

$p_2$ ——回水压力。

### 4. 功率计算

与电路的工作情形相类似，循环水系统中的流量  $Q$  的大小与压差  $p_D$  成正比，即

$$Q = \frac{p_D}{R} \quad (8-9)$$

式中  $R$ ——循环水路的管阻。

而水泵做功的功率  $P$  可计算如下：

$$P = p_D Q = Q^2 R \quad (8-10)$$

由于流量和转速成正比，所以，在循环水系统里，水泵的功率与转速的二次方成正比，即

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (8-11)$$



可见，在循环水系统中，当通过改变转速来调节流量时，其节能效果与供水系统相比，是略有逊色的。

### 三、冷却水系统的变频调速

冷却水系统虽然并不如冷冻水系统那样是一个完全的闭合回路，但在计算节能效果方面，和闭合回路是基本一致的。

#### (一) 控制的主要依据

##### 1. 基本情况

冷却水的进水温度也就是冷却水塔内水的温度，它取决于环境温度和冷却风机的工作情况；回水温度主要取决于冷冻主机的发热情况，但还和进水温度有关。

##### 2. 温度控制

在进行控制时，需要注意以下两点：

(1) 如果回水温度太高，将影响冷冻主机的冷却效果。为了保护冷冻主机，当回水的温度超过一定值后，整个空调系统必须进行保护性跳闸。一般规定，回水温度不得超过  $37^{\circ}\text{C}$ 。因此，根据回水温度来决定冷却水的流量是可取的。

(2) 即使进水和回水的温度很低，也不允许冷却水断流。因此，在实行变频调速时，应预置一个下限工作频率。

综合起来，便是：当回水温度较低时，冷却泵以下限转速运行；当回水温度渐高时，冷却泵的转速也逐渐升高，而当回水温度升高到某一设定值（如  $35^{\circ}\text{C}$ ）时，应该采取进一步措施：或增加冷却泵的运行台数，或增加水塔冷却风机的运行台数。

##### 3. 温差控制

最能反映冷冻主机的发热情况、体现冷却效果的是回水温度  $t_r$  与进水温度  $t_i$  之间的“温差”  $\Delta t$ ，因为温差的大小反映了冷却水从冷冻主机带走的热量。所以，把温差  $\Delta t$  作为控制

的主要依据，通过变频调速实现恒温差控制是可取的，如图 8-26 所示。即：温差大，说明主机产生的热量多，应提高冷却泵的转速、加快冷却水的循环；反之，温差小，说明主机产生的热量少，可以适当降低冷却泵的转速、减缓冷却水的循环。

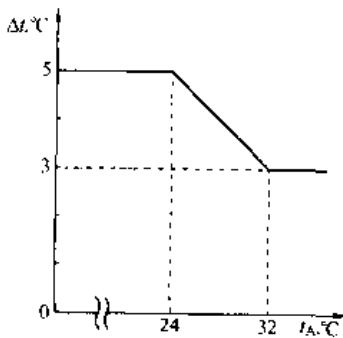


图 8-27 目标值范围

实际运行表明，把温差值控制在  $3 \sim 5^{\circ}\text{C}$  的范围内是比较适宜的，如图 8-27 所示。

##### 4. 温差与进水温度的综合控制

由于进水温度是随环境温度而改变的，因此，把温差恒定为某值并非上策。因为，当采用变频调速系统时，所考虑的不仅仅是冷却效果，还必须考虑节能效果。具体地说，则：温差值定低了，水泵的平均转速上升，影响节能效果；温差值定高了，在进水温度偏高时，又会影响冷却效果。实践表

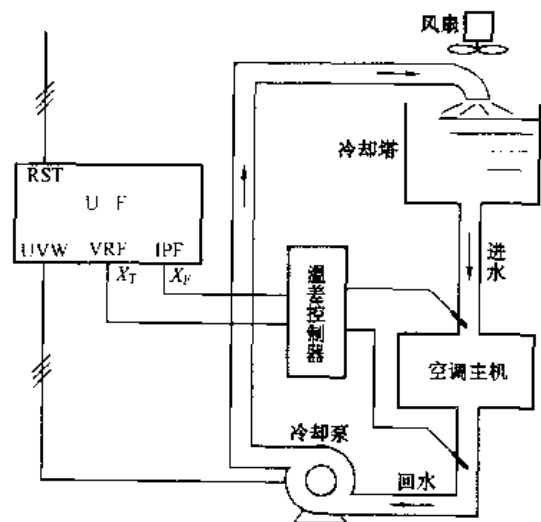


图 8-26 冷却水的温差控制

明, 根据进水温度来随时调整温差的大小是可取的。即: 进水温度低时, 应主要着眼于节能效果, 温差的目标值可适当地高一点; 而在进水温度高时, 则必须保证冷却效果, 温差的目标值应低一些。

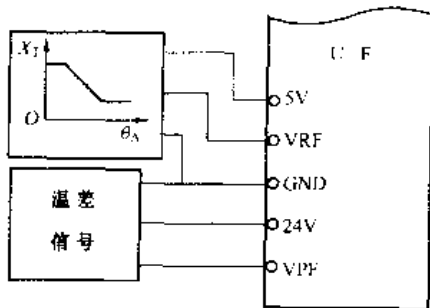


图 8-28 控制方案

## (二) 控制方案

根据以上介绍的情况, 冷却泵采用变频调速的控制方案可以有多种。这里介绍的是利用变频器内置的 PID 调节功能、兼顾节能效果和冷却效果的控制方案。

### 1. 反馈信号

是由温差控制器得到的与温差  $\Delta\theta$  成正比的电流或电压信号。

### 2. 目标信号

是一个与进水温度  $\theta_A$  有关的, 并与目标温差成正比的值, 如图 8-28 所示。其基本考虑是: 当进水温度高于  $32^\circ\text{C}$  时, 温差的目标值定为  $3^\circ\text{C}$ ; 当进水温度低于  $24^\circ\text{C}$  时, 温差的目标值定为  $5^\circ\text{C}$ 。当进水温度在  $24 \sim 32^\circ\text{C}$  之间变化时, 温差的目标值将按此曲线自动调整。

## 四、冷冻水系统的变频调速

### (一) 控制的主要依据

在冷冻水系统的变频调速方案中, 提出的控制依据主要有两种。

#### 1. 压差控制

即以出水压力和回水压力之间的压差作为控制依据, 其基本考虑是: 使最高楼层的冷冻水能够保持足够的压力, 如图 8-29 中的虚线所示。

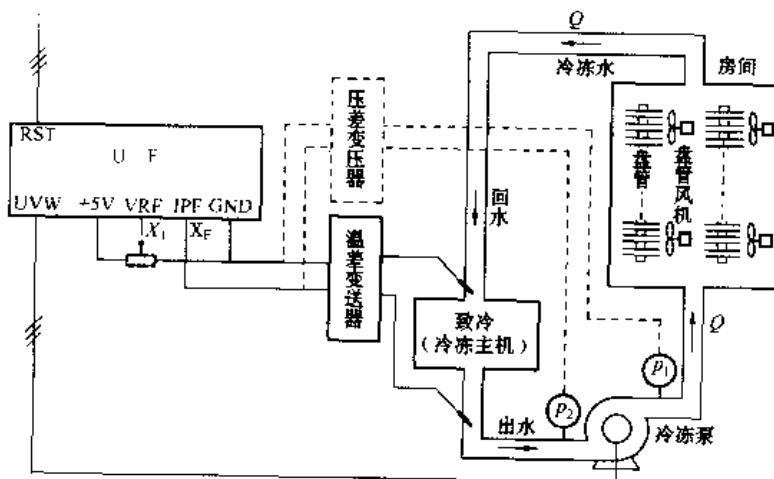


图 8-29 冷冻水的控制

这种方案存在着两个问题:

(1) 没有把环境温度变化的因素考虑进去, 就是说, 冷冻水所带走的热量与房间温度无关, 这明显地不大合理。

(2) 在式 (8-9) 中, 由于压差  $p_D$  不变, 循环水消耗功率的计算公式是

$$P = p_D Q = K'' p n \quad (8-12)$$

式中  $K_p$ ——比例常数。

式 (8-12) 表明, 功率  $P$  的大小将只和流量  $Q$  和转速  $n$  的一次方成正比。在平均转速低于额定转速的情况下, 其节能效果与供水系统相比, 将更为逊色。

### 2. 温度或温差控制

严格地说, 冷冻主机的回水温度和出水温度之差表明了冷冻水从房间带走的热量, 应该作为控制依据, 如图 8-29 所示。但由于冷冻主机的出水温度一般较为稳定, 故实际上, 只需根据回水温度进行控制就可以了。

为了确保最高楼层具有足够的压力, 在回水管上接一个压力表, 如果回水压力低于规定值, 电动机的转速将不再下降。

### (二) 控制方案

综合上述分析, 可以改进的控制方案有两种:

#### 1. 压差为主、温度为辅的控制

以压差信号为反馈信号, 进行恒压差控制。而压差的目标值可以在一定范围内根据回水温度进行适当调整。就是说, 当房间温度较低时, 使压差的目标值适当下降一些, 减小冷冻泵的平均转速, 提高节能效果。这样一来, 既考虑到了环境温度的因素, 又改善了节能效果。

#### 2. 温度(差)为主、压差为辅的控制

以温度(或温差)信号为反馈信号, 进行恒温(差)控制, 而目标信号可以根据压差大小作适当调整。也就是说, 当压差偏高时, 说明负荷较重, 应适当提高目标信号, 增加冷冻泵的平均转速, 确保最高楼层具有足够的压力。

## 第六节 风机的变频调速

### 一、风机的机械特性

风机是一种压缩和输送气体的机械。通过风机后排出风的压力较小者为通风机, 较大者为鼓风机, 统称风机。

#### 1. 二次方律风机

其机械特性具有二次方律负载的特点, 如图 8-30 所示。属于这种类型的有: 离心式风机、混流式风机、轴流式风机等。其中, 以离心式风机应用得最为普遍, 其特性也最典型。

风机的机械特性和水泵十分类似, 但其空载转矩比水泵小得多, 因而在低速运行时, 其节能效果也比水泵更加显著。

#### 2. 恒转矩风机

主要是罗茨风机, 其基本结构如图 8-31 (a) 所示。

由图可知, 在机壳内有两个形状相同的叶轮, 安装在互相平行的两根轴上, 两轴上装有完全相同, 且互相啮合的一对齿轮, 一为主动轮, 一为从动轮。在主动轮的带动下, 两个叶轮同步反向旋转, 使低压腔的容积逐渐增大, 气体经进气口进入低压腔, 并随着叶轮的旋转而进入高压腔。在高压腔内, 又由于容积

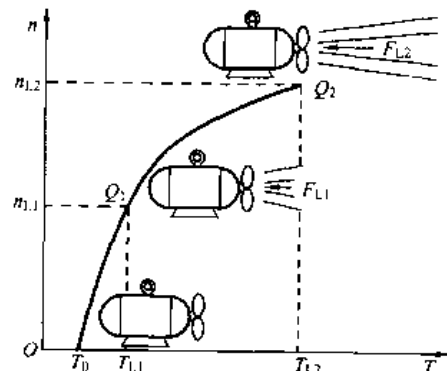


图 8-30 风机的机械特性

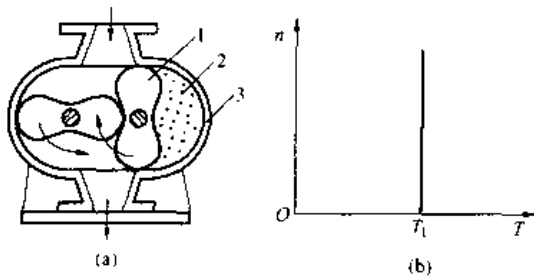


图 8-31 罗茨风机

(a) 构造; (b) 机械特性

1—叶轮; 2—气体容积; 3—机壳

的逐渐减小而压缩气体, 使气体从排气口排出。罗茨风机主要用于要求气压较高的场合。

一般认为, 罗茨风机的机械特性具有恒转矩的特点, 如图 8-31 (b) 所示。

下面, 将以离心式风机为代表, 对二次方律负载进行分析。

## 二、风机的主要参数和特性

### 1. 主要参数

(1) 风压。是管路中, 单位面积上风的压力, 用  $p_F$  表示。

(2) 风量。即空气的流量, 指单位时间内排出气体的量, 用  $Q_F$  表示。

如图 8-32 所示。

### 2. 风压特性

在转速不变的情况下, 风压  $p_F$  和风量  $Q_F$  之间的关系曲线, 称为风压特性曲线, 如图 8-33 (a) 和 (b) 中的曲线①所示。风压特性与水泵的扬程特性相当, 但在风量很小时, 风压也较小。随着风量的增大, 风压也逐渐增大。增大到一定程度后, 风量再增大, 风压又开始减小。故风压特性呈中间高、两边低的形状。



图 8-32 风机运行的示意

### 3. 风阻特性

在风门开度不变的情况下, 表示风量与风压关系的曲线, 如图 8-33 (a) 和 (b) 中的曲线②所示。风阻特性与供水系统的管阻特性相当, 形状也类似。

### 4. 通风系统的工作点

风压特性与风阻特性的交点, 即为通风系统的工作点, 如图 8-33 中的 A1 点所示。

## 三、风量的调节方法与比较

调节风量大小的方法也有两种。

### 1. 调节风门的开度

这时: 转速不变, 故风压特性也不变; 风阻特性则随风门开度的改变而改变, 如图 8-33 (a) 中的曲线③和④所示。

由于风机消耗的功率与风压和风量的乘积成正比, 在通过关小风门来减小风量时, 消耗的电功率虽然也有所减少, 但减少得不多, 如图 8-33 (c) 的曲线①所示;

### 2. 调节转速

这时: 风门开度不变, 故风阻特性也不变; 风压特性则随转速的改变而改变, 如图 8-33 (b) 中的曲线⑤和⑥所示。

由于风机属于二次方律负载, 消耗的电功率与转速的三次方成比例, 如图 8-33 (c) 中的曲线②所示。

### 3. 两种方法的比较

由图 8-33 (c) 可知: 在所需风量相同的情况下, 调节转速的方法所消耗的功率要小得多。因此, 其节能效果是十分显著的。

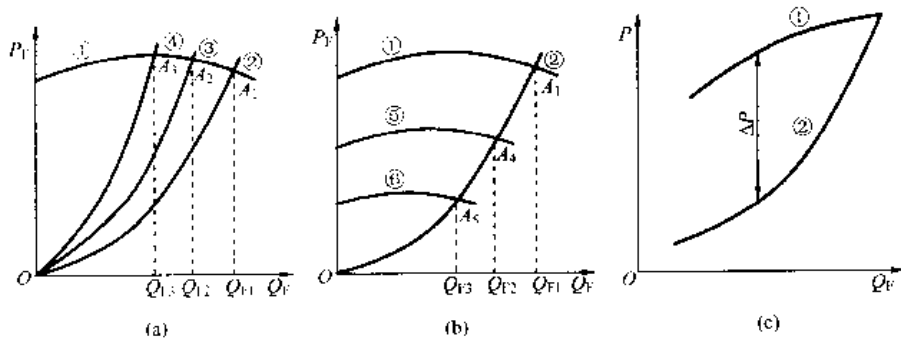


图 8-33 风机的工作特性  
(a) 改变风门; (b) 改变转速; (c) 节能效果

#### 四、风机变频调速实例

##### (一) 燃烧炉鼓风机的变频调速

某厂燃烧炉鼓风机，电动机容量为 55kW，原来是通过调节风门来调节风量的，现改为采用变频调速。风速大小要求由司炉工操作，因炉前温度较高，故要求变频器放在较远处的配电柜内。

##### 1. 控制电路

如图 8-34 所示。图中，按钮开关 SB1 和 SB2 用于控制接触器 KM，从而控制变频器的通电与断电。

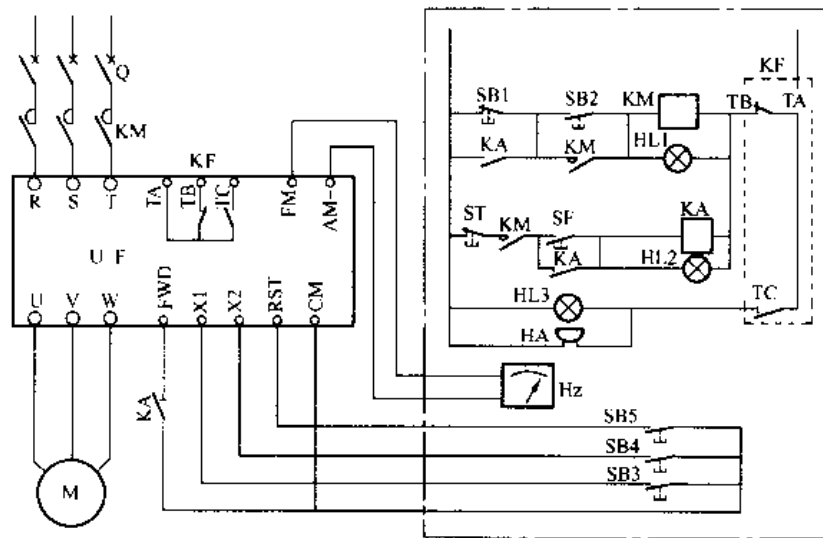


图 8-34 风机的远程控制电路

SF 和 ST 用于控制继电器 KA，从而控制变频器的运行与停止。

KM 和 KA 之间具有连锁关系：一方面，KM 未接通之前，KA 不能通电；另一方面，KA 未断开时，KM 也不能断电。

SB3 为升速按钮；SB4 为降速按钮；SB5 为复位按钮。HL1 是变频器通电指示；HL2 是变频器运行指示；HL3 和 HA 是变频器发生故障时的声光报警。Hz 是频率指示。

##### 2. 主要器件的选择

(1) 变频器选型。根据厂方要求, 选用康沃 CVF-P1-4T0055 型变频器, 额定容量为 73.7kVA, 额定电流为 112A。

(2) 空气开关。由式 (4-1) 可得

$$I_{QN} = (1.3 \sim 1.4) \times 112 = 145.6 \sim 156.8 \text{ (A)}$$

选  $I_{QN} = 200\text{A}$

(3) 接触器。由式 (4-3) 可得

$$I_{KN} = 112\text{A}$$

选  $I_{KN} = 150\text{A}$

### 3. 变频器的主要功能预置

(1)  $U/f$  曲线类型选择。选择递减转矩曲线 2, 如图 8-35 (a) 所示。同时, 经实验, 低频时的转矩补偿量预置为 “3”, 如图 8-35 (b) 所示。

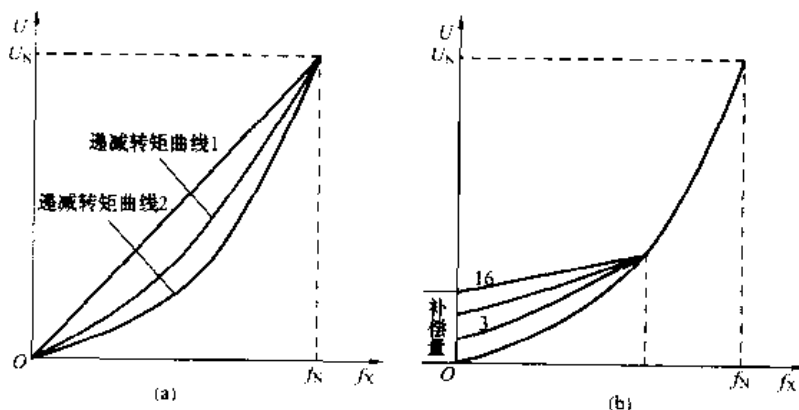


图 8-35 风机的  $U/f$  线  
(a) 曲线类型; (b) 补偿量

(2) 升速和降速时间的预置。风机的转动惯量很大, 但启动和停止的次数极少, 故升速和降速时间可尽量加长, 使启动电流限制在额定电流以内。根据实验, 选升速时间  $t_r = 30\text{s}$ , 降速时间  $t_d = 60\text{s}$ 。

(3) 上限频率。因为风机一旦转速超过额定转速, 阻转矩将增大很多, 容易使电动机和变频器处于过载状态。因此, 上限频率  $f_H$  不应超过额定频率  $f_N$ , 即

$$f_H \leq f_N$$

(4) 下限频率。从特性或工况来说, 风机对下限频率  $f_L$  没有要求。但转速太低时, 风量太小, 并无实际意义。根据实验, 预置为

$$f_L \geq 20\text{Hz}$$

(5) 输入端子 X1 的功能选择。预置为 “10”, 是频率递增功能。

(6) 输入端子 X2 的功能选择。预置为 “11”, 是频率递减功能。

### (二) 中央空调冷却塔风机的变频调速

#### 1. 基本要求

中央空调中冷却塔风机的作用, 在第五节中已经说明, 其具体要求如下:

$\theta_A \leq 30^\circ\text{C} \rightarrow$  风机不必启动,  $f_X = 0\text{Hz}$  ( $\theta_A$  是冷却水的温度)。

$30^\circ\text{C} < \theta_A < 35^\circ\text{C} \rightarrow$  风机运行, 其工作频率随温度的升高而上升。

$\theta_A \geq 35^\circ\text{C} \rightarrow$  工作频率为  $f_X = 50\text{Hz}$ 。

## 2. 存在的问题

针对上述要求，控制中存在两个问题：

(1) 变频器的运行频率对应的温度区间为  $30 \sim 35^\circ\text{C}$ ，因此， $f_X$  并不和  $\theta_A$  相对应，而是和  $\Delta\theta_A$  相对应。 $\Delta\theta_A$  的定义是

$$\Delta\theta_A = \theta_A - 30$$

(2) 必须防止系统的振荡。即当水温达到  $30^\circ\text{C}$  时，风机开始工作，而由于风机的工作，水温又下降为低于  $30^\circ\text{C}$ ，使风机停止。形成风机在  $30^\circ\text{C}$  处忽开忽停地振荡。

## 3. 解决的方法

解决上述问题的途径是：

(1) 采用温差控制的方法。如图 8-36 所示，电位器 RP1 提供一个与  $30^\circ\text{C}$  相对应的信号，信号大小根据所选的温度变送器而定。这样，温差变送器输出的将是和  $\Delta\theta_A$  相对应的信号，使变频器的输出频率按照  $f_X = f(\Delta\theta_A)$  的规律变化。

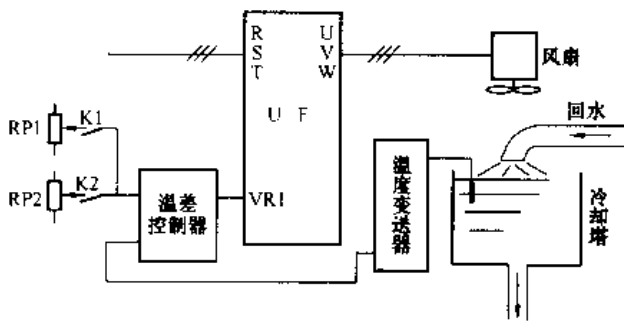


图 8-36 冷却塔风机的变频调速

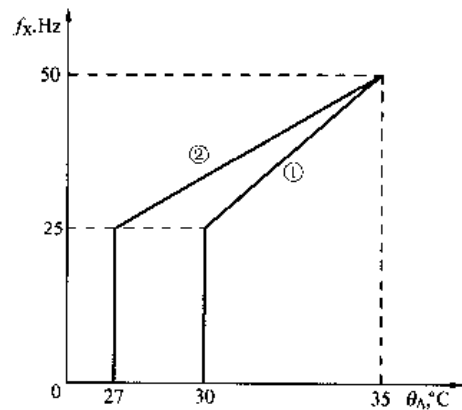


图 8-37 频率与温度的关系

(2) 令上升时的  $f_X = f(\Delta\theta_A)$  曲线和下降时的曲线不一致，如图 8-37 所示。图中，曲线①是上升时的曲线；曲线②是下降时的曲线。就是说，当风机已经启动之后，只有在水温低于  $27^\circ\text{C}$  时才停机。为此，图 8-36 中用了两个电位器 RP1 和 RP2，分别对应于  $30^\circ\text{C}$  与  $27^\circ\text{C}$  相对应的信号。

# 变频调速系统的调试与维护

## 第一节 变频调速系统的调试

### 一、通电和功能预置

#### 1. 通电

变频器通电后，须注意观察以下状况：

(1) 显示。变频器一旦通电，显示屏必将开始显示。显示内容及变化情形因变频器的品牌而异，应对照说明书，观察其通电后的显示过程是否正常。

(2) 内部风机的工况。变频器内部都有冷却风机向外鼓风，应注意观察。一是听，即听其声音是否正常；二是用手在出风口试探其风量。有的变频器的风机是在内部达到一定温度后才启动的，应注意阅读说明书。

(3) 测量电压。主要是三相进线电压是否正常。如有条件，也可测量直流电压。

#### 2. 熟悉键盘

各种变频器的键盘配置差异较大，应注意熟悉。

(1) 了解各键的功能；

(2) 可以对照说明书进行一些简单的操作，如启动、升速、降速、停止、点动等。

#### 3. 熟悉显示内容的切换

各种变频器都可以通过切换显示内容来了解变频器的工作情况，如运行频率、电压、电流等。用户应掌握其基本操作，并通过各项显示内容来检查变频器的状况。

#### 4. 进行功能预置

这是十分重要的一步。每台变频器在使用前，都必须根据生产机械的具体要求，调整变频器内各功能的设定（称为功能预置）。否则，往往不能使变频调速系统在最佳状态下运行。

(1) 对照说明书，了解并熟悉进行功能预置的步骤；

(2) 针对生产机械的具体情况进行功能预置。

进行功能预置时，最好能和机械工程师以及工艺工程师或操作人员协同进行，使变频调速系统能够最大限度地满足生产工艺的要求，提高产品的质量和产量。

### 二、电动机的空载试验

将变频器的输出端与电动机相接，电动机脱开负载。

#### 1. 进行基本的运行观察

例如，旋转方向是否正确，升、降速时间是否与预置的时间相符，电动机的运行是否正常等。

#### 2. 电动机参数的自动检测

具有矢量控制功能的变频器都需要通过电动机的空转，来自动测定电动机的参数。新系列变频器也可在静止状态下进行部分参数的自动检测（一般来说，静止状态只能测量静态参



数，如电阻、电抗等；而如空载电流等动态参数，则必须通过空转来测定)。

### 3. 进一步熟悉变频器的基本操作

如启动、停止、升速、降速、点动等。

### 三、带载试验

将电动机与负载连接起来进行试车。这时，须特别注意观察以下几个方面。

#### 1. 电动机的启动

(1) 将频率缓慢上升至一个较低的数值，观察机械的运行状况是否正常，同时注意观察电动机的转速是否从一开始就随频率的上升而上升。如果在频率很低时，电动机不能很快旋转起来，说明启动困难，应适当增大  $U/f$ ，或增大启动频率。

(2) 显示内容切换至电流显示，将频率给定调至最大值，使电动机按预置的升速时间启动到最高转速。观察在启动过程中的电流变化。如因电流过大而跳闸，应适当延长升速时间；如机械对启动时间并无要求，则最好将启动电流限制在电动机的额定电流以内。

(3) 观察整个启动过程是否平稳。对于惯性较大的负载，应考虑是否需要预置 S 形升速方式，或在低速时是否需要预置暂停升速功能。

(4) 对于风机，应注意观察在停机状态下风叶是否因自然风而反转，如有反转现象，则应预置启动前的直流制动功能。

#### 2. 停机试验

在停机试验过程中，应把显示内容切换至直流电压显示，并注意观察以下内容：

(1) 观察在降速过程中直流电压是否过高，如因电压过高而跳闸，应适当延长降速时间；如降速时间不宜延长，则应考虑接入制动电阻和制动单元。

(2) 观察当频率降至 0Hz 时，机械是否有“蠕动”现象，并了解该机械是否允许蠕动。如需要制止蠕动时，应考虑预置直流制动功能。

#### 3. 带载能力试验

(1) 在负载所要求的最低转速时带额定负载，并长时间运行，观察电动机的发热情况。如发热严重，应考虑增加电动机的外部通风问题。

(2) 如在负载所要求的最高转速下，变频器的工作频率超过额定频率，则应进行负载试验，观察电动机能否带动该转速下的额定负载。

如果上述高、低频运行状况不够理想，还可考虑通过适当增大传动比，以减轻电动机负担的可能性。

## 第二节 变频器的维护

### 一、变频器维护的一般注意事项

#### 1. 周围环境

应满足第四章第七节中对安装环境的要求。

#### 2. 电源状况

(1) 电源电压。变频器所在车间的电压波动是否在允许范围内？如波动范围过大，应设法稳压。

(2) 变电所。向变频器供电的变压器容量与变频器容量之比与变频器输入电流的波形有

关, 应该了解清楚, 以决定变频器的输入侧是否必须接交流电抗器。

此外, 还应了解变电所是否有补偿电容, 补偿电容的接入和退出是否频繁。因为补偿电容在接入和退出时, 容易对变频器形成干扰, 使变频器跳闸。

### 3. 周围设备

(1) 由同一台变压器供电的设备中, 是否有大电动机? 该大电动机的启动状况如何? 以及变压器的容量大小如何? 应注意当大电动机启动时, 电源电压的波动状况。

(2) 附近是否有较大的晶闸管控制设备? 大型晶闸管控制设备可能使电源电压的波形发生畸变, 并对变频器形成干扰。

## 二、注意变频器的易损件

变频器内主要的易损件有如下两个。

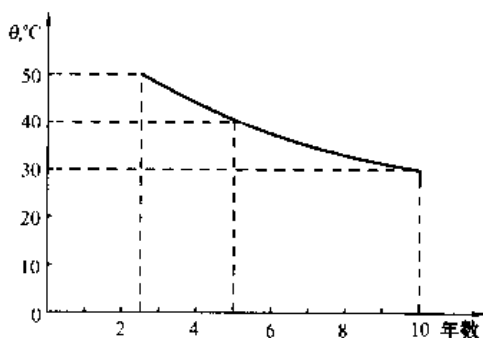


图 9-1 电解电容器的寿命

### 1. 电解电容器

变频器内的电解电容器有两类: 高压滤波电容器和控制板上的低压滤波电容器。它们的寿命与环境温度有关, 如图 9-1 所示。控制板上低压电解电容器的寿命比高压滤波电容器的寿命要长一些。

一般来说, 高压滤波电容器每隔五年应更换一次; 控制板上的电解电容器每隔七年应更换一次。

此外, 电解电容器如长期不用, 也容易损坏。

因此, 对于长期不用的变频器, 也应定期地 (如每隔一年) 通电一定时间。

### 2. 冷却风扇

变频器内部冷却风扇的轴承寿命通常为 1~3.5 万 h, 在一般情况下, 大约每隔三年应更换一次。

## 第三节 过电流、过载与过热

### 一、过电流及其原因分析

这里所说的过电流, 是指除电动机过载以外引起的过电流。当变频器因过电流而跳闸时, 判断其原因的大致过程如图 9-2 所示。

变频器的过电流跳闸分运行过程中跳闸和升、降速过程中跳闸两种情况。

#### (一) 运行中过电流

对于运行过程中出现的过电流, 主要有如下几个原因。

##### 1. 变频器输出侧短路或接地

(1) 故障特点。具有很大的冲击电流, 但大多数变频器已经能够进行保护跳闸, 而不会损坏。由于保护跳闸十分迅速, 难以观察其电流的大小。

(2) 判断与处理。如果经过检查, 确认变频器本身并未损坏, 则可以重新启动。为了便于判断, 应在输入侧接入一个电压表, 如图 9-3 所示。重新启动时, 电位器从零开始缓慢旋转, 同时, 注意观察电压表。如果变频器的输出频率刚上升就立即跳闸, 且电压表的指针有瞬间回“0”的迹象, 则说明变频器的输出端已经短路或接地。这时, 应立即将变频器输出端的接线脱

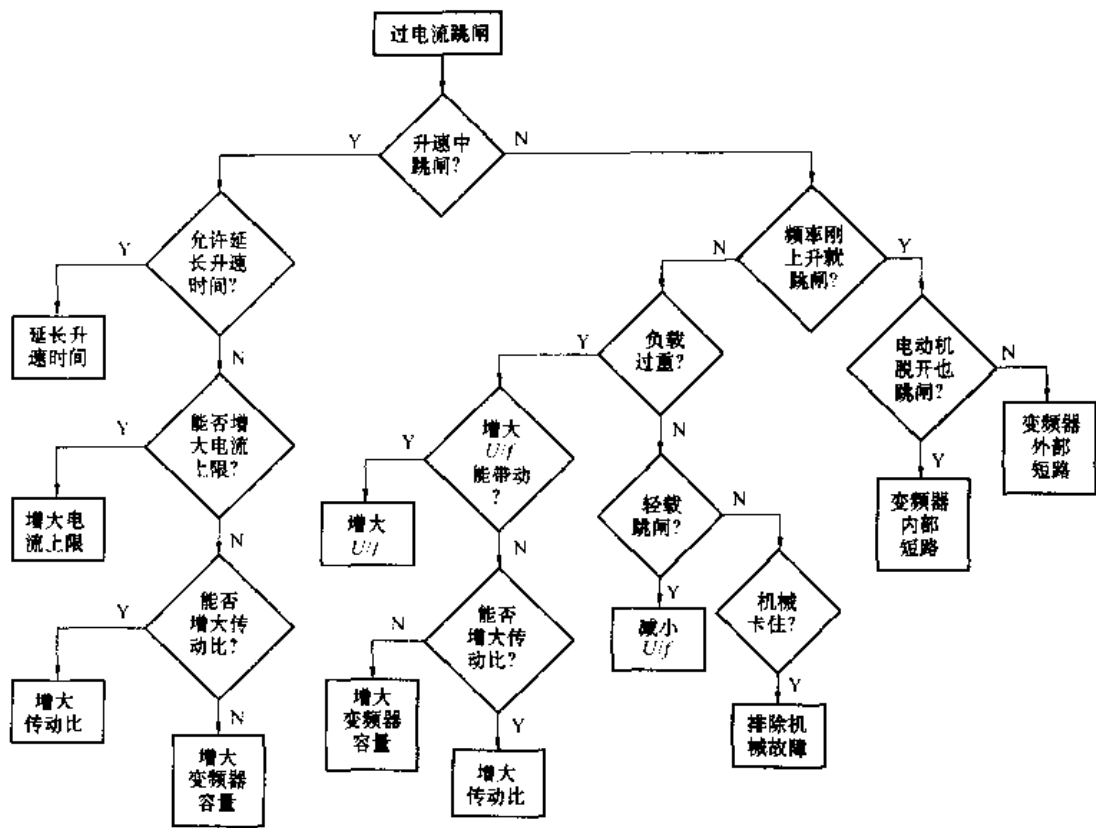


图 9-2 过电流跳闸的原因判断

开，再旋动电位器，使频率上升，如仍跳闸，说明变频器内部短路；如不再跳闸，则应检查从变频器到电动机之间的线路，以及电动机本身。

### 2. 负载过重

(1) 故障特点。频率上升到一定数值就因过流而跳闸，电动机基本不动。

(2) 判断与处理。在这种情况下，应通过转动机械部分来判断是否是因为机械故障而卡住，如果是，则应处理机械故障。

如果机械并无故障，则电动机因负载过重而带不动。这时，首先考虑通过增大  $U/f$  来增大电动机的转矩。如果电动机仍带不动，则可以通过增大传动比以减轻电动机的负荷。如果不能增大传动比，则只有增大电动机的容量了。

### 3. 轻载跳闸

(1) 负载波动较大。对于负载波动较大的负载，常常发生这样的情形：为了能在重载时电动机能带得动，必须增大  $U/f$ 。但在轻载或空载时，电动机的磁路将严重饱和，因出现尖峰励磁电流而跳闸。

对于这类负载，最好采用矢量控制方式。如无矢量控制功能，则力争将  $U/f$  调到既能带动重负载、轻载时又不跳闸的状态。如不可能，则应加大变频器的容量。

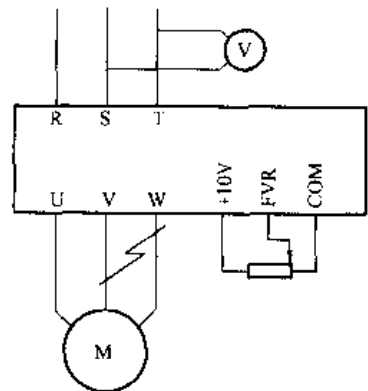


图 9-3 电动机短路

(2)  $U/f$  的预置与负载不匹配。如电动机拖动二次方律负载时, 将  $U/f$  预置得过高。适当调低  $U/f$ , 就可以避免跳闸。

### (二) 升速或降速中过电流

这是由于升速或降速过快引起的, 可采取的措施有如下几个。

#### 1. 延长升(降)速时间

首先了解根据生产工艺要求是否允许延长升速或降速时间, 如允许, 则可延长升(降)速时间。

#### 2. 增大电流上限值

如不允许延长升(降)速时间, 则了解在升(降)速自处理(防失速)功能中原来预置的上限电流是否允许增大, 如允许, 则可增大上限电流。

#### 3. 其他措施

如果既不允许延长升速或降速时间, 又不能增大升(降)速的上限电流, 则:

(1) 考虑适当加大传动比, 以减小拖动系统的飞轮力矩, 使电动机容易启动及升速;

(2) 如果不能加大传动比, 则只能考虑加大变频器的容量了。

## 二、过载跳闸

电动机能够旋转, 但运行电流超过了额定值, 称为过载。如第一章第九节所述, 只要温升不超过额定温升, 电动机是允许短时间过载的。

过载的基本反映是: 电流虽然超过了额定值, 但超过的幅度不大, 一般也不形成较大的冲击电流。这种特点, 除了机械负荷过重外, 如果三相电压不平衡, 也会引起运行电流过大, 导致过载跳闸。除此以外, 也有因变频器内部的电流检测部分的故障而造成的误动作。

如图 9-4 所示, 当电动机因过载而跳闸时, 主要可从以下两个方面着手检查。

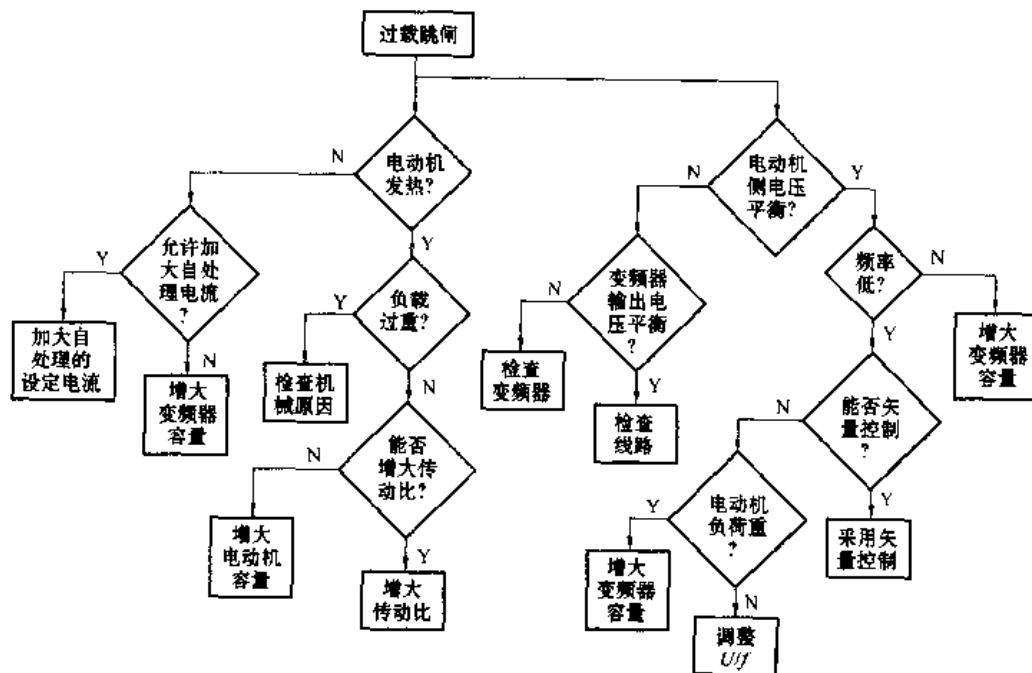


图 9-4 过载跳闸的原因判断

### 1. 检查电动机是否发热

(1) 电动机的温升不高。首先检查变频器的过载保护预置得是否合理，如变频器尚有余量，则应放宽过载保护的预置值；如变频器的允许电流已经没有余量，不能再放宽过载保护的预置值，且根据生产工艺，所出现的过载属于正常过载，则说明变频器的选择不当，应加大变频器的容量，更换变频器。

(2) 电动机的温升过高。如果所出现的过载又属于正常过载，则说明是电动机的负荷过重。这时，应首先考虑能否加大传动比，以减轻电动机轴上的负荷。如能够加大，则加大传动比。如果传动比无法加大，则应加大电动机的容量。

### 2. 检查电动机侧三相电压是否平衡

(1) 电动机侧的三相电压不平衡。再检查变频器输出端的三相电压是否平衡，如不平衡，则问题在变频器内部，应检查变频器的逆变模块及其驱动电路；如变频器输出端的电压平衡，则问题在从变频器到电动机的线路上，应检查所有接线端的螺钉是否都已拧紧，如果在变频器和电动机之间有接触器，则还应检查接触器的接线端是否拧紧，以及触点的接触状况等。

(2) 三相电压平衡。这时应了解跳闸时的工作频率；如工作频率较低，又未用矢量控制（或无矢量控制），则首先降低  $U/f$ ，如降低后仍能带动负载，则说明原来预置的  $U/f$  过高，可通过降低  $U/f$  来减小电流；如果降低后带不动负载了，则应考虑加大变频器的容量；如果变频器具有矢量控制功能，则应采用矢量控制方式。必要时，还应加入速度反馈。

### 3. 误动作

在经过以上检查，均未找到原因时，应检查是不是误动作。如图 9-5 所示，判断的方法是在轻载或空载的情况下，用电流表测量变频器的输出电流，与显示屏上显示的运行电流值是否基本相符，如果显示屏显示的电流读数比实际测量的电流大得较多，则说明变频器内部的电流测量部分误差较大，“过载”跳闸有可能是误动作。

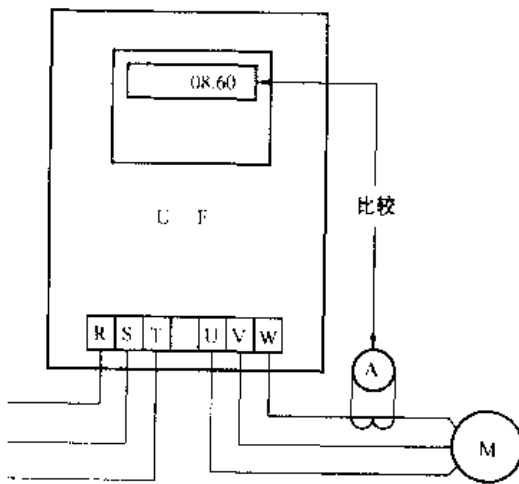


图 9-5 误动作的判断

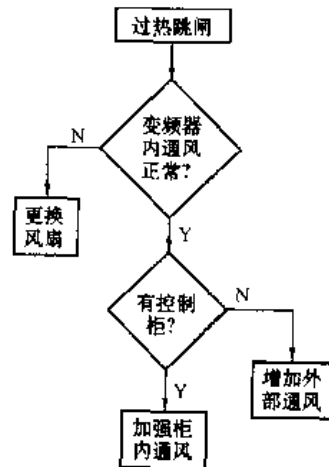


图 9-6 过热跳闸的判断

## 三、过热跳闸

变频器内部的温度传感器通常是用来测量逆变模块的温度的。如果变频器的运行电流在正常范围内，在通风良好的情况下，其逆变模块是不应当过热的。因此，当变频器的跳闸原因显示“过热”时，应该从通风方面查找原因。其判断和处理过程如图 9-6 所示。首先检查

变频器内部冷却风扇的风量。

1. 风量太小

说明冷却风扇的容量过小，或已经发生故障，应更换冷却风扇。

2. 风量正常

(1) 变频器在控制柜内，应增强控制柜的通风。

(2) 变频器不在控制柜内，则应在变频器外部增加一个冷却风扇。

## 第四节 过电压与欠电压

### 一、过电压跳闸

变频器的过电压跳闸也分运行中跳闸和降速过程中跳闸两种情况。因此，在分析原因时，首先要判断的是在什么状态下出现的过电压，具体判断流程如图 9-7 所示。

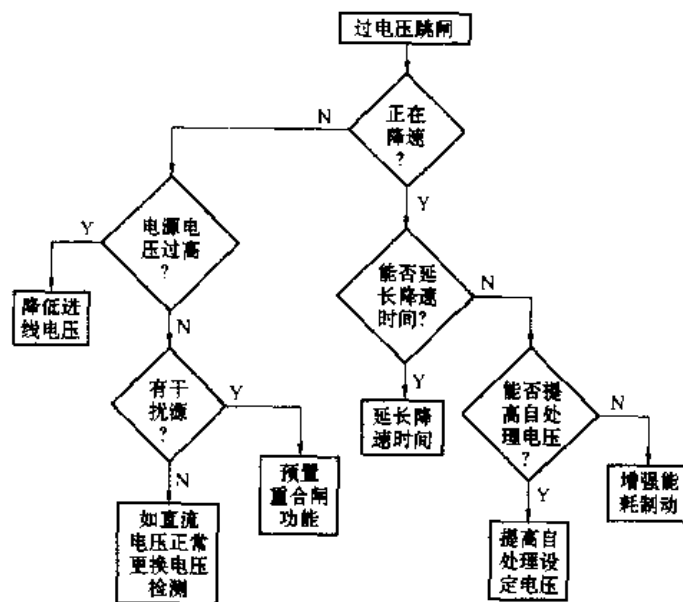


图 9-7 过电压跳闸的原因判断

#### (一) 运行过程中跳闸

可能的原因如下。

1. 电源电压过高

如经检查，确认电源电压过高，则应设法降低变频器输入侧的电压。

2. 干扰过电压

如变电所内补偿电容投入或切出时，都有可能产生瞬间的过电压，此外还有雷电过电压等。这类过电压通常时间极短，且一般不重复。因此，可利用变频器的重合闸功能来解决。

3. 误动作

即变频器内部的电压检测部分发生故障。这可以通过测量变频器的直流电压来判断，如果直流电压是正常的，则说明“过电压跳闸”是误动作，应检查变频器的电压检测部分。

#### (二) 降速过电压

如果在降速过程中因过电压而跳闸，可采取的措施有如下几个。

### 1. 延长降速时间

这是在生产工艺允许的情况下，应首先考虑的措施。

### 2. 增大电压上限值

增大电压上限值即增大在降速自处理（防失速）功能中预置的上限电压。但直流电压的上限值一般不宜超过 700V。

### 3. 加强能耗制动环节

如果既不允许延长降速时间，又不能增大上限电压，则考虑适当加大能耗制动电流。如原来未配制动电阻及制动单元，则应加配；如原来已经配有制动电阻及制动单元，则应减小制动电阻值，并加大制动单元的档次。

## 二、欠电压跳闸

当变频器的跳闸原因显示“欠电压”时，判断过程如图 9-8 所示。

### 1. 电源欠电压

如经检查，确认电源电压过低，则应设法提高变频器输入侧的电压。

### 2. 限流环节故障

即整流桥与滤波电容之间的限流电阻与晶闸管（或继电器）发生故障，有两种情形：

（1）限流电阻断路。如图 9-9（a）所示。在这种情况下，通电后滤波电容器上不能充电，造成欠压保护。

（2）晶闸管不导通。如图 9-9（b）所示。在这种情况下，限流电阻将一直串联在电路中，使直流电压  $U_D$  下降，导致欠电压保护动作。

### 3. 电源缺相

电源缺相后，整流后的直流电压将降低，导致欠电压跳闸。有的变频器在显示跳闸原因时还能直接显示“电源缺相”。对于电源缺相，一般电工都能处理，这里不再赘述。

电动机侧缺相的原因多半是线路上的问题。个别情况下，也有因变频器内部故障形成的缺相。对于因变频器内部原因形成的缺相，检查方法如下：首先检查逆变模块，如逆变模块并未损坏，则检查其驱动块的输入及输出端。在这种情况下，最好用示波器进行观察。

### 4. 干扰欠电压

例如同一电网内有大电动机启动，或有容量较大的晶闸管控制设备在工作等，都有可能使电网瞬间欠电压。这类欠电压一般维持时间不长，可利用变频器的重合闸功能来解决。

### 5. 误动作

即变频器内部的电压检测发生故障，可以通过测量直流电压来进行判断。如果直流电压正常，则说明“欠电压跳闸”是误动作，应检查变频器的电压检测部分。

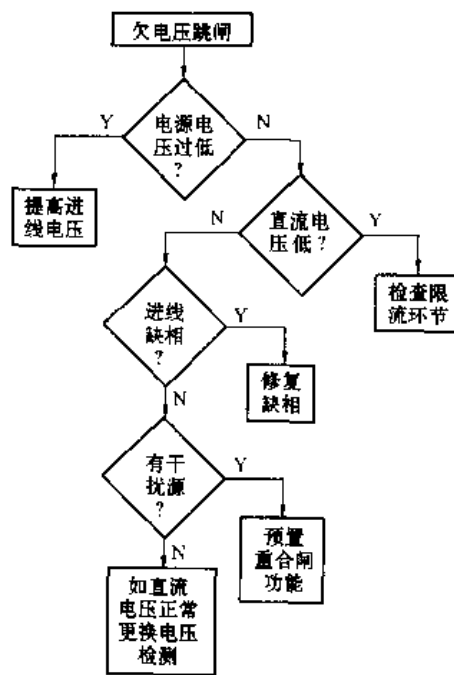


图 9-8 欠压原因判断

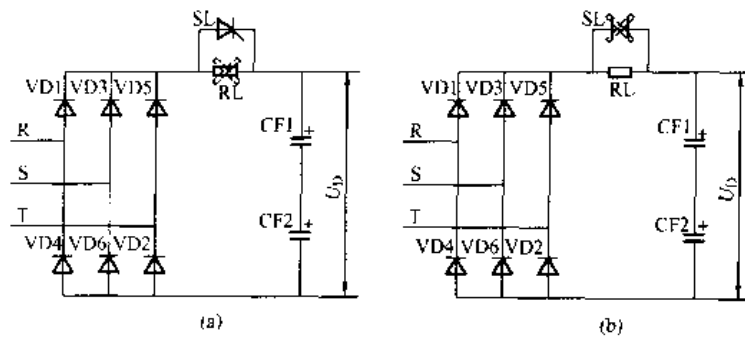


图 9-9 限流环节故障  
(a) 限流电阻断路; (b) 晶闸管不导通

## 第五节 外部故障

### 一、外部状态异常

变频器的输入控制端中,有一个输入“外部故障”的端子。当该端子得到信号时,变频器将立即跳闸。这些外部故障信号主要有如下两种。

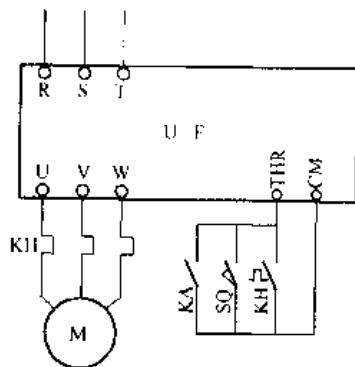


图 9-10 外部故障

#### 1. 变频器或电动机相关器件的保护动作

(1) 电动机电路内的热继电器动作,如图 9-10 中的触点 KH 所示。

(2) 制动电阻的热继电器动作等。

#### 2. 其他方面的保护动作

生产机械任何部位发生异常,要求拖动系统立即停机的异常信号,都可以连接到变频器的“外部故障”端子。例如:起重机械或其他机械的限位开关动作,如图 9-10 中的 SQ 所示;龙门刨床润滑系统的供油异常,如图 9-10 中的继电器触点 KA 所示等。

### 二、空气断路器跳闸

导致空气断路器跳闸的原因主要有如下两种。

#### 1. 变频器接通电源时跳闸

变频器第一次通电时,空气断路器跳闸,但第二次或第三次通电时又不跳闸了,这实际上是一种误动作。

因为,在主电路接通的瞬间,在变频器长时间不通电的情况下,直流电压为 0V,如图 9-11 所示。因此,在第一次通电瞬间,向滤波电容充电时的冲击电流较大。而空气断路器具有过电流的保护功能,有可能跳闸。

但每次通电,都能使直流电压上

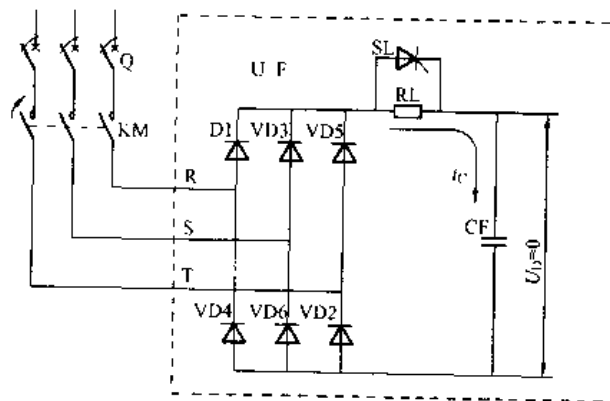


图 9-11 主电路的接通瞬间



升一些，故第二次或第三次通电时，充电电流就减小了。针对这种情况，解决的方法有：

- (1) 多数空气断路器对过电流保护的灵敏度是可以调节的，可将灵敏度适当调低；
- (2) 加大变频器内部限流电阻的电阻值；
- (3) 加大空气断路器。

#### 2. 变频器故障引起的跳闸

如果变频调速系统在运行过程中跳闸，或每次合闸时都跳闸，则分析和检查的大致流程如图 9-12 所示。

(1) 变频器内的整流模块或滤波电容损坏。如空气断路器的额定电流已经足够大，不可能产生误动作时，空气断路器仍跳闸，则应注意检查整流模块和滤波电容是否正常。

(2) 变频调速系统短路或过电流。当变频调速系统发生短路时，空气断路器有可能和变频器同时动作。遇到这种情况，必须首先检查变频调速系统。

个别情况下，如果空气断路器选得太小，当变频调速系统过电流时，也有变频器未动作，而空气断路器先动作的情形。这时，应衡量减小变频器允许电流和增大空气断路器的利弊，进行处理。

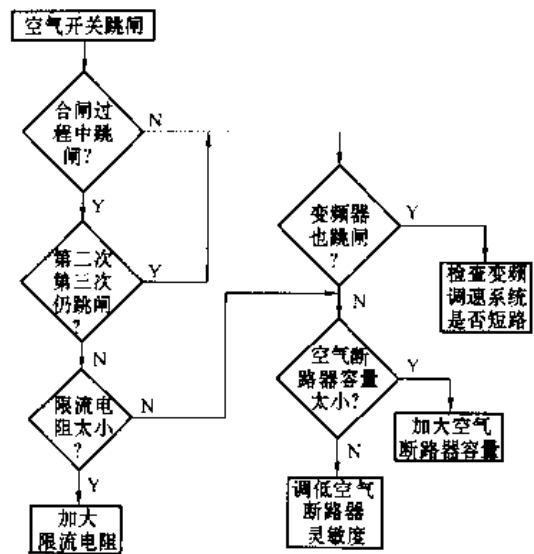


图 9-12 空气断路器跳闸的检查流程

## 第六节 机械振动故障

变频调速系统在运行过程中，拖动系统或整个机械部分发生振动，其检查和处理的过程以及可能的原因大致如图 9-13 所示。

### 一、机械谐振的处理

机械谐振的特点是：振动只是在某一个转速或某几个转速下发生。

当发生机械谐振时，首先应设法改变机械本身的固有振荡频率。例如，对机械各部分的紧固件（如螺丝等）进行加固等。如果机械方面已经不能再采取措施了，则应预置变频器的回避频率，使拖动系统不在发生谐振的转速下运行。

### 二、变频调速系统的处理

如果生产机械在整个速度范围内都有振动现象，则应将电动机与机械之间的连接件脱开，使电动机单独运行。

如果在电动机单独运行时并无振动现象，则说明问题在机械本身或连接件上，应对生产机械及连接件进行检查。

如果在电动机单独运行时也振动，则可能的原因有：

- (1) 电动机与变频器之间的距离太远。这时，应在变频器的输出电路内接入滤波器。
- (2) 变频器的输出电压不平衡。说明变频器的逆变电路或其控制部分有故障，应检查变频器的内部故障。

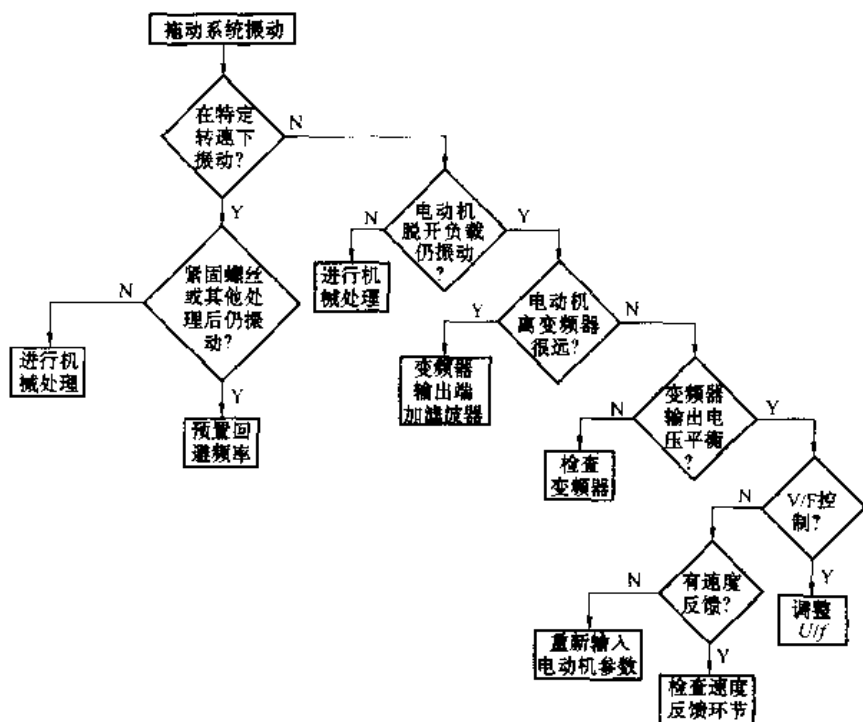


图 9-13 机械振动的检查与分析

(3) 在 V/F 控制方式下，如  $U/f$  太大，也可能导致电动机发生振动，应适当减小  $U/f$ 。

(4) 在矢量控制方式下，如果电动机的参数预置不准确，也可能使电动机在运转时发生振动，应重新预置电动机的所有参数，或重新进行自测定。

(5) 在有反馈矢量控制方式下，如果转速反馈环节工作不正常，或所预置的反馈参数与实际的反馈装置（如编码器）不符，或对转速反馈环节的 PID 功能预置不当，也都可能导致电动机在运行时发生振动，应对上述各环节进行检查。

## 第七节 变频器内部故障的检查

变频器内部的故障有软件故障和硬件故障。对于前者，用户一般难以处理，本书将不作讨论。本节仅对几个较大方面的硬件故障进行讨论。

### 一、整流模块的故障

#### 1. 测试电路

整流模块的基本电路如图 9-14 (a) 所示，内部的二极管是否损坏，可用万用表的电阻挡来进行测试。但应注意，当万用表在电阻挡时，其“-”表笔（通常是黑笔）是表内电池的正极；而“+”表笔（通常是红笔）是表内电池的负极。因此，当黑笔接二极管正极、红笔接二极管负极时，二极管将处于导通状态，反之，二极管处于截止状态。

#### 2. 完好模块的测量结果

在测量变频器内的整流模块时，没有必要把模块拆下后再测，而可以直接在变频器上进行测量。如果模块完好无损，则测量结果如表 9-1 所示。

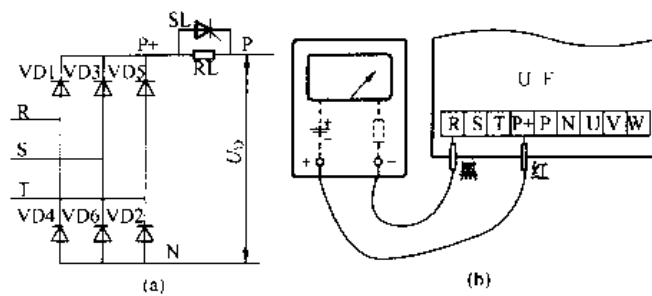


图 9-14 整流桥的测量  
(a) 整流桥电路; (b) 测量方法

表 9-1 完好整流模块的测量结果

二极管符号	万用表表笔		测量结果	二极管符号	万用表表笔		测量结果
	红表笔	黑表笔			红表笔	黑表笔	
VD1	R	P+	×	VD4	R	N	○
	P+	R	○		N	R	×
VD3	S	P+	×	VD6	S	N	○
	P+	S	○		N	S	×
VD5	T	P+	×	VD2	T	N	○
	P+	T	○		N	T	×

注 ○表示导通, ×表示不通。

## 二、逆变模块的故障

### 1. 测试电路

逆变模块的内部电路如图 9-15 (a) 所示。

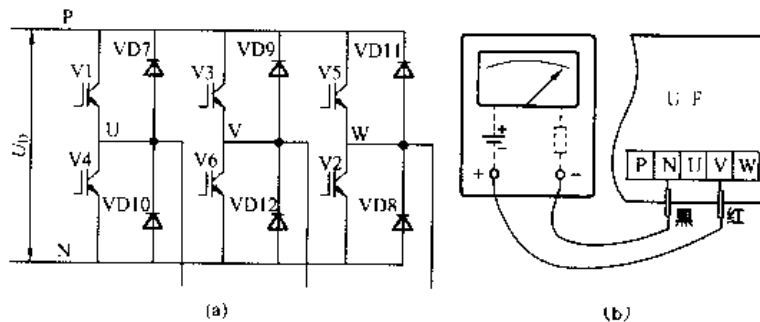


图 9-15 逆变模块的电路  
(a) 逆变电路; (b) 测量方法

一般情况下, 逆变管 (IGBT 管) 损坏的原因, 不外是击穿和因电流过大而“烧坏”两种情形。在绝大多数情况下, 损坏后都呈正、反向都导通的现象, 因此, 也能用万用表来进行判断。

一般来说, IGBT 管损坏后, 其正、反向的电阻值要小于二极管正向导通时的电阻值。

### 2. 测试结果

逆变模块在完好状态下的测试结果如表 9-2 所示。

表 9-2 完好逆变模块的测量结果

逆变管符号	万用表表笔		测量结果	逆变管符号	万用表表笔		测量结果
	红表笔	黑表笔			红表笔	黑表笔	
V1	U	P	×	V4	U	N	○
	P	U	○		N	U	×
V3	V	P	×	V6	V	N	○
	P	V	○		N	V	×
V5	W	P	×	V2	W	N	○
	P	W	○		N	W	×

但在测量时，应注意：在逆变管的旁边，还常常有缓冲电路，内有电容。因此，刚开始测量时，表针有可能短时间地向导通方向偏转。

此外，数字式万用表的表笔极性，常常和指针式万用表相反。

### 三、其他部分的故障判断

#### 1. 驱动模块

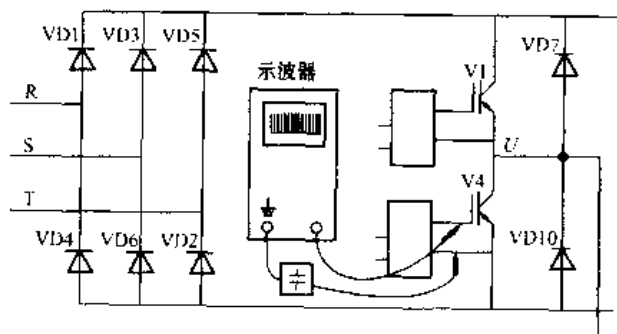


图 9-16 示波器的隔离

检查驱动模块的最好方法是用示波器测量其输入端和输出端的波形。但在测量时必须注意：由于驱动模块的输出端是和直流高压相连的，而直流高压又是和三相电源相连的，如图 9-16 所示。图中，当三相电源中任意一相（R、S、T）为“-”时示波器的地端都将通过二极管和电源的相线相连接，形成短路。因此，示波器和驱动模块的输出端之间应通过隔离器隔离。如无隔离器，则至少

也应应将示波器的地端用电容器隔离。

#### 2. 控制电源

如第二章第六节所述，变频器内部的控制电源通常有三种，其故障现象大致如下：

- (1) 主控电源。如发生故障，则变频器完全不能工作。
- (2) 给定电源。如发生故障，则外接给定将无法工作。
- (3) 输入控制电源。如发生故障，则各输入控制端将不起作用。

控制电源是比较容易检查的部分，可以直接用万用表量其电压。

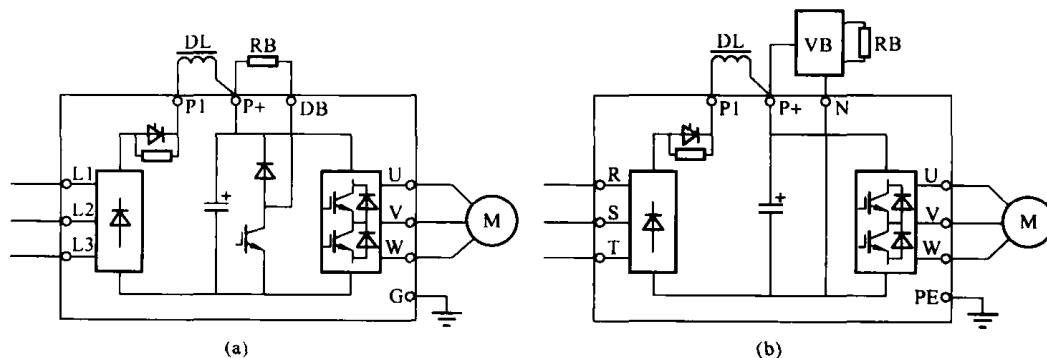
# 常见变频器简介

## 附录1 森兰 SB61 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 1-1 所示。



附图 1-1 森兰 SB61 的主电路

(a) 15kW 以下; (b) 18.5kW 以上

#### 1. 输入端

输入端的标志为 R、S、T，接电源进线。

#### 2. 输出端

输出端的标志为 U、V、W，接电动机。

#### 3. 制动电阻接线端

15kW 以下的 SB61 系列变频器，内部已经配置了制动单元，只需在 P+ 和 DB 之间配接制动电阻 RB 即可；18.5kW 以上的变频器，则制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接。两者相连后接至 P+（直流正端）和 N（直流负端）之间。

#### 4. 直流电抗器

直流电抗器 DL 接至 P1（整流桥输出端）与 P+（直流正端）之间。出厂时 P1 与 P+ 之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。

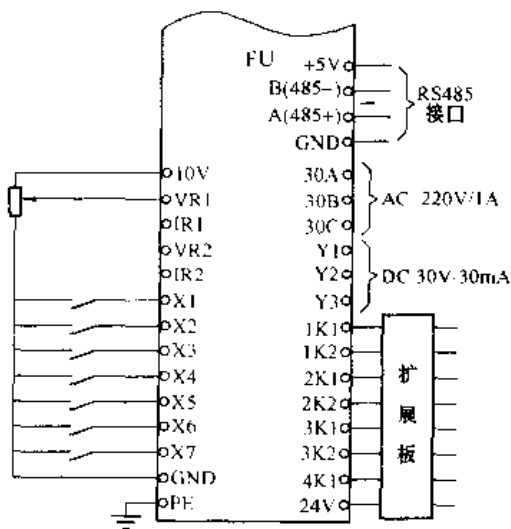
### (二) 控制电路

如附图 1-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

变频器为外接频率给定提供 10V 电源（负端为 GND），信号输入端分别为 VR1（电压信号）、IR1（电流信号）、VR2（电压信号）、IR2（电流信号）。

其中，VR1 和 IR1 可预置为主给定信号端；VR1、IR1、VR2、IR2 均可预置为辅助给定信号端。



附图 1-2 森兰 SB61 的控制电路

接至 30V 以下的直流电路中。

#### 6. 扩展输出端

配接专用的扩展板，用于由一台变频器控制多台水泵的切换控制中。

## 二、面板配置及操作

### (一) 面板配置

面板配置如附图 1-3 所示。

#### 1. 显示

LED 显示屏可以显示运行频率、运行电流和电压、同步转速和线速度以及负荷率等。

显示内容可由单位指示来判断：

左侧灯亮——显示频率，Hz；

中间灯亮——显示运行电流，A；

右侧灯亮——显示运行电压，V；

左侧与中间灯亮——显示同步转速，r/min；

中间与右侧灯亮——显示线速度，m/min；

左侧与右侧灯亮——在运行状态下，显示负荷率，在预置 PID 控制功能时，显示目标值的百分数，%。

通过功能预置，显示屏还可以显示输出功率、模块温度、累计消耗电能、累计运行时间等。

除此以外，变频器还有两个状态指示灯：

“功能/数据”指示灯——显示变频器的工作模式（运行模式或编程模式）；

“运行”指示灯——显示变频器的工作状态（运行或停止）。

#### 2. 键盘

键盘中各键的功能如下：

**功能/数据**键——用于切换工作模式（运行模式或编程模式）、读出功能码中的原有数据和写入新数据。

#### 2. 输入控制端

由 X1 ~ X7 组成，均为开关量输入。每个控制端的具体功能通过功能预置确定，其出厂设定是：X1—正转输入端；X2—反转输入端；X3、X4—多挡转速控制端；X5、X6—多挡升、降速时间控制端；X7—外部故障输入端。

#### 3. 微机输入接口

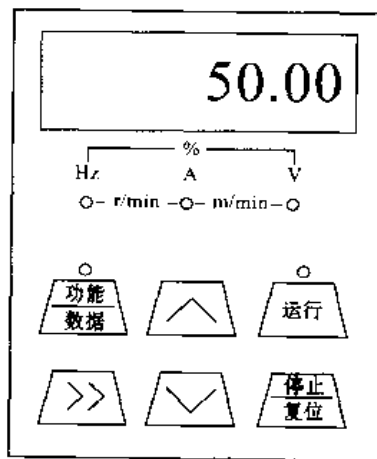
由变频器提供的 5V 电源（负端为 GND）和 A（485+）、B（485-）组成。

#### 4. 故障信号输出端

由 30A、30B、30C 组成，为继电器输出，可接至 AC 220V 电路中。

#### 5. 运行信号输出端

由 Y1、Y2、Y3 组成，为晶体管输出，只能



附图 1-3 森兰 SB61 变频器面板

**△**键和**V**键——在运行模式下，用于增、减给定频率；在编程模式下，用于更改功能码或数据码。

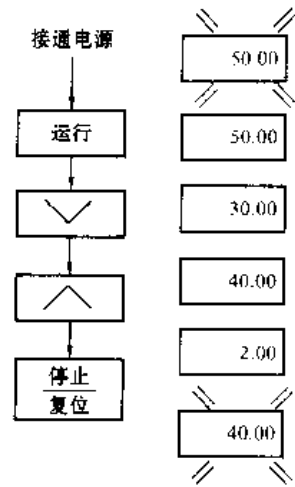
**>>**键——在运行模式下，用于切换显示内容；在编程模式下，用于移动数据的更改位。

**运行**键——向变频器发出运行指令，仅在运行模式下有效。

**停止/复位**键——在运行状态下，用于发出停机指令；在发生故障并修复后，用于使变频器复位。

### (二) 键盘控制

所谓键盘控制，就是直接通过键盘来控制变频器的启动和停止、升速和降速等。森兰 SB61 系列变频器的键盘控制过程如附图 1-4 所示。



附图 1-4 SB61 的键盘控制

#### 1. 接通电源

合上电源后，显示屏首先显示“8.8.8.8.”；若干秒后，5个指示灯一起亮；又若干秒后显示屏显示给定频率（如 50Hz），并闪烁。

#### 2. 运行

按**运行**键，变频器的输出频率即开始上升，一直上升到上次停机前的频率（50Hz）。上升的快慢由预置的升速时间决定。运行时，频率显示不再闪烁。

#### 3. 升速及降速

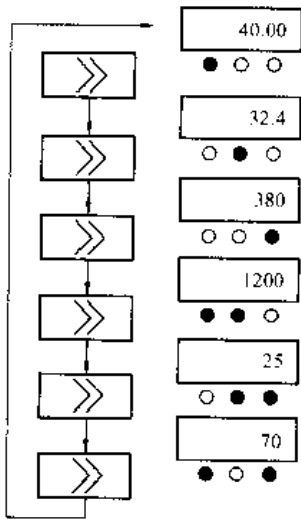
按**V**键，频率下降（如下降至 30Hz），下降的快慢由预置的降速时间决定；按**△**键，频率上升（如上升至 40Hz），上升的快慢由预置的升速时间决定。

#### 4. 停止

按**停止/复位**键，输出频率即按预置的降速时间下降直至停止。显示屏的显示则先下降至 2Hz 后又转为停机前的给定频率（40Hz），并闪烁。

#### 5. 显示内容的切换

附图 1-5 显示内容的切换



森兰 SB61 系列变频器在运行状态下，显示屏显示的内容可通过按**>>**键来更改。每按一次**>>**键，当“F800”预置为“0”时，其显示内容依次为输出频率→输出电流→输出电压→同步转速→线速度→负荷率→输出频率，如附图 1-5 所示。

### 三、功能结构及预置流程

#### (一) 功能结构

森兰 SB61 系列变频器在说明书中，虽然把各种功能分成了许多功能区，但并未分成若干个等级。这些功能区的名称如附表 1-1 所示。

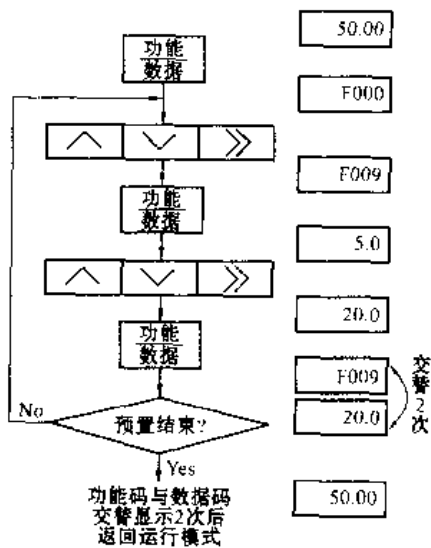
#### (二) 功能预置流程

因为 SB61 系列变频器并未把所有功能分级，所以在进行功能预置时，不需要搜索功能

附表 1-1

森兰 SB61 系列变频器的功能结构

序号	功能区名称	功能码范围	序号	功能区名称	功能码范围
1	基本功能	F000 ~ F013	8	简易 PLC 功能	F700 ~ F732
2	V/F 控制功能	F100 ~ F125	9	过程 PID 功能	F800 ~ F832
3	矢量控制功能	F200 ~ F211	10	通信功能	F900 ~ F902
4	模拟给定功能	F300 ~ F311	11	显示功能	FA00 ~ FA15
5	辅助功能	F400 ~ F417	12	厂家保留功能	FB00 ~ FB01
6	端子功能	F500 ~ F517	13	计算机显示功能	FC00 ~ FC11
7	辅助频率功能	F600 ~ F644			



附图 1-6 森兰 SB61 的功能预置流程

级别, 其预置流程如附图 1-6 左侧所示。以把升速时间(功能码为 F009) 从 5s 增加为 20s 为例, 其显示屏的状态如附图 1-6 的右侧所示。

(1) 按 **功能/数据** 键, 使变频器进入编程模式, 显示屏显示第 1 个功能码 “F000”;

(2) 按 **△**、**▽** 或 **>>** 键, 找出所需预置的功能码 “F009”;

(3) 按 **功能/数据** 键, 读出该功能码中的原有数据码 “5.0”;

(4) 按 **△**、**▽** 或 **>>** 键, 将数据码调整为 “20.0”;

(5) 按 **功能/数据** 键, 写入新数据码, 此时, 功能码 F009 与数据码 “20.0” 开始交替显示;

(6) 如功能预置未结束, 则转入第 2 步, 如功能预置已经结束, 则等待功能码 “F009” 和数据码 “20.0” 交替显示 2 次后, 自动转为运行模式。

## 附录 2 时代 TVF2000 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

主电路与控制模式无关, 如附图 2-1 所示。

#### 1. 输入端

输入端的标志为 R、S、T, 接电源进线。

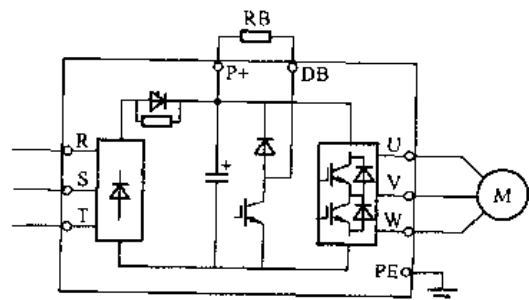
#### 2. 输出端

输出端的标志为 U、V、W, 接电动机。

#### 3. 制动电阻接线端

其标志为 P+、DB, 接制动电阻。

时代 TVF2000 系列变频器内部全都配置了制动单元, 外部不必另行配置。



附图 2-1 TVF2000 主电路



## (二) 控制电路

如附图 2-2 所示。

### 1. 外接频率给定端

A11、A12 均为给定信号输入端。给定信号是电压信号或电流信号由内部控制板上的跳线环 J1 的跳线状态决定的。REF 是变频器内部的 +10V 给定电源。

### 2. 输入控制端

由 DI1 (端子 10) ~ DI6 (端子 15) 组成, 均为开关量输入。每个控制端的具体功能通过预置确定, 其出厂设定是:

- DI1——运行;
- DI2——正、反转选择;
- DI3——升、降速时间选择;
- DI4、DI5、DI6——多挡转速选择;
- DGND——公共端。

### 3. 运行状态输出信号端

RO1A (端子 18)、RO1B (端子 19)、RO1C (端子 17) ——变频器故障信号, 为继电器输出, 可接至 AC220V 电路中。

RO2A (端子 21)、RO2B (端子 22)、RO2C (端子 20) ——运行状态信号, 继电器输出, 可接至 AC220V 电路中。

AO (端子 6) ——频率测量信号, 模拟量输出。0~20mA 对应 0~50Hz。

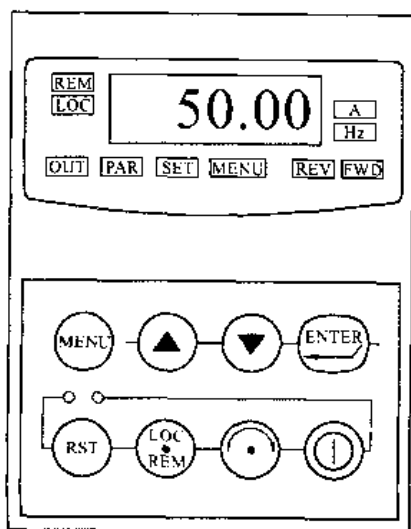
FO (端子 7) ——频率测量信号, 数字量输出。0~2kHz 对应 0~50Hz。

B、A、AGND——为 RS485 通信端子。

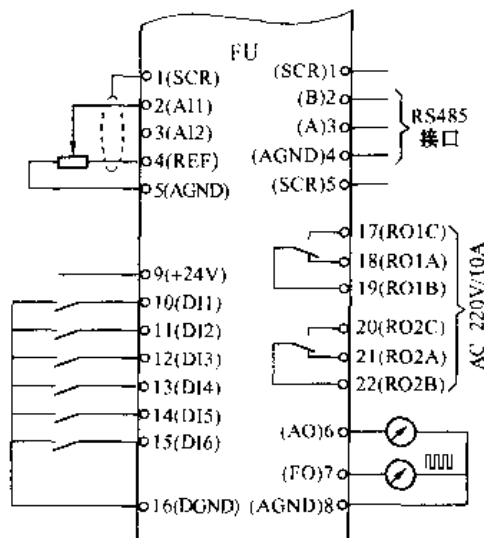
## 二、面板配置及操作

### (一) 面板配置

面板配置如附图 2-3 所示。



附图 2-3 TVF2000 面板



附图 2-2 TVF2000 控制电路

### 1. 显示

TVF2000 系列变频器的显示屏只显示运行频率和电流。在显示屏周围, 有十个状态指示灯:

REM——外接端子控制时亮;

LOC——面板控制时亮;

OUT——显示屏显示“运行频率”或“运行电流”时亮;

PAR——编程模式下, 显示数据码时亮;

SET——编程模式下, 显示读出或写入数据时亮;

MENU——编程模式下, 显示功能码时亮;

REV——反向运行时持续发光, 反向升速时快速闪动, 反向停机时慢速闪动;

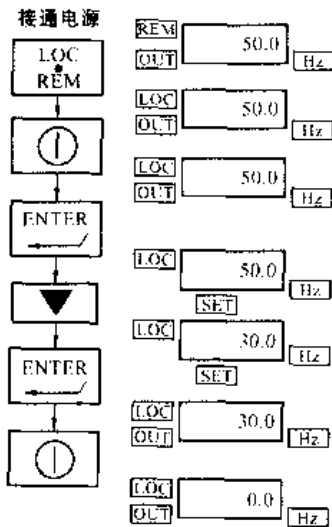
FWD——正向运行时持续发光, 正向升速时快速闪

动，正向停机时慢速闪动；

A——显示输出电流的单位；

Hz——显示输出频率的单位；

A 和 Hz——同时亮时，显示百分数。



附图 2-4 键盘控制

## 2. 键盘

**MENU**——模式转换键；

**▲**和**▼**——升、降键；

**ENTER**——读出和写入键；

**RESET**——复位键；

**LOC/REM**——控制方式切换键；

**↶**——更改方向键；

**⊙**——启动、停止键。

### (二) 键盘控制

时代 TVF2000 系列变频器的键盘控制方法如附图 2-4 所示。

#### 1. 接通电源

合上电源后，变频器处于“外接端子控制”方式，**REM**灯亮。按**LOC/REM**键，变频器即切换为“键盘控制”方式，**LOC**灯亮。这时，显示屏显示的是停机状态 0.0Hz。

#### 2. 运行 **⊙**

按**⊙**键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升，一直上升到上次停机前的频率或新预置的频率（50.0Hz）。

#### 3. 降速（或升速）

按**ENTER**键，使变频器处于设定状态，“SET”灯亮；

按**▼**键，使频率设定下降，设为 30.0Hz；

按**ENTER**键，下降了的频率被确认，频率按预置的降速时间下降。

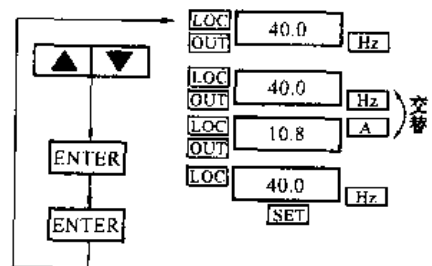
#### 4. 停止

按**⊙**键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

#### 5. 显示内容的切换

时代 TVF2000 系列变频器在运行状态下，按**▲**键或**▼**键，在显示屏上将交替显示频率和电流，如附图 2-5 所示。

除此以外，当功能码为“99——”时，为变频器运行参数的动态显示功能组，显示内容包括：转速、功率、直流母线电压、输出电压、目标值、输入控制端子的状态、模拟量输入的大小、模拟量输出的大小、PLD 的反馈量、故障信号等。可按后述“功能预置流程”的



附图 2-5 更改显示内容

步骤，在显示屏上进行显示。

按 **ENTER** 键，变频器将转为频率设定状态。再按 **ENTER** 键，回复到运行状态。

### 三、功能结构及预置流程

#### (一) 功能结构

时代 TVF2000 系列变频器把各种功能分成了许多功能组。这些功能组的名称和功能码范围如附表 2-1 所示。

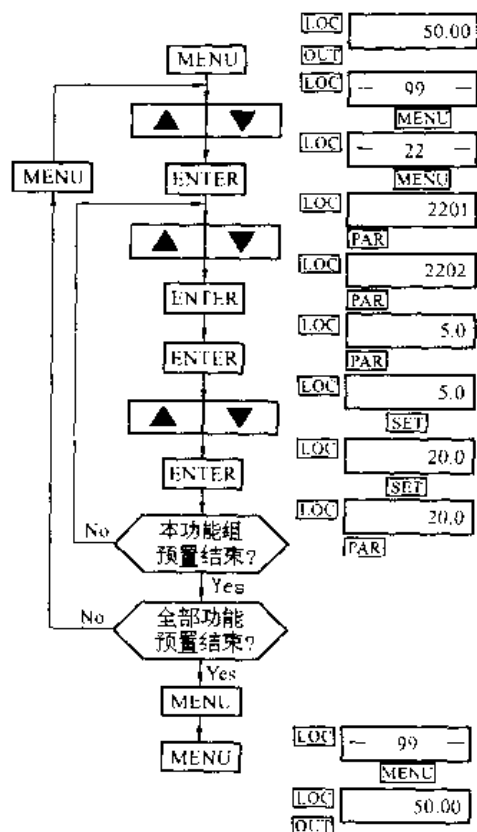
附表 2-1 时代 TVF2000 系列变频器的功能结构

序 号	功 能 组 名 称	功 能 码 范 围
1	显示功能组	0102 ~ 0137
2	指令功能组	1001 ~ 1003
3	给定功能组	1101 ~ 1108
4	多挡速功能组	1201 ~ 1208
5	给定范围组 (包括滤波时间)	1301 ~ 1306
6	继电器输出功能组	1401 ~ 1406
7	模拟量输出功能组	1501 ~ 1506, 1550 ~ 1555
8	系统控制功能组	1601 ~ 1607
9	保护功能组	2003 ~ 2008
10	启、停功能组	2101 ~ 2104, 2150
11	升、降速功能组	2201 ~ 2206
12	回避频率功能组	2501 ~ 2505
13	控制功能组	2603 ~ 2607
14	保护功能组	3001 ~ 3015, 3017, 3022 ~ 3023
15	重合闸功能组	3101 ~ 3107
16	监视功能组	3201 ~ 3206
17	软件功能组	3301 ~ 3302
18	PID 控制功能组	4001 ~ 4020, 4101 ~ 4120
19	通信功能组	5003 ~ 5005, 5201 ~ 5215
20	风机、水泵控制功能组	8103, 8109, 8112, 8115 ~ 8122
21	控制模式选择及电动机参数功能组	9902, 9905 ~ 9910, 9950, 9952

#### (二) 功能预置流程

为了便于用户掌握，根据各类负载不同的控制要求，时代 TVF2000 系列变频器设置了 7 种基本控制的“应用示例”（说明书中称为“应用宏”）：标准控制应用示例、自锁控制应用示例、正/反转控制应用示例、升/降速控制应用示例、手动/自动控制应用示例、PID 控制应用示例和风机、水泵控制应用示例。

变频器在出厂时，针对不同的应用示例，已经对部分功能进行了设定。因此，用户在进行功能预置时，应首先根据需要设定一种“应用示例”，在说明书中找出该“应用示例”下的出厂设定值，然后确定需要修改哪些功能。其预置流程如附图 2-6 左侧所示，以把升速时间（功能码为 2202）从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 2-6 右侧所示。



附图 2-6 TVF2000 预置流程

(1) 按 **MENU** 键，使变频器进入编程模式，首先进入“99”功能组，显示屏显示“—99—”；

(2) 按 **▲** 或 **▼** 键，找出需要修改的功能组“—22—”；

(3) 按 **ENTER** 键，进入该功能组，显示屏显示其第一个功能码“2201”；

(4) 按 **▲** 或 **▼** 键，找出需要修改的功能码“2202”；

(5) 按 **ENTER** 键，读出该功能码中的原有数据“5.0”，但显示屏下方显示“PAR”，不允许修改数据；

(6) 再按 **ENTER** 键，显示屏下方显示“SET”，允许修改数据；

(7) 按 **▲** 或 **▼** 键，将数据修改为“20.0”；

(8) 按 **ENTER** 键，写入新修改的数据；

(9) 如本组功能的预置工作尚未结束，则再按 **▲** 或 **▼** 键，找出下一个需要修改的功能码，重复上述修改程序；

(10) 如本组功能的预置工作已经结束，需要预置下一级别的功能时，则按 **MENU** 键，返回至第 2 步，再重复上述修改程序；

(11) 如预置工作全部结束，则按 **MENU** 键 2 次，返回至运行状态。

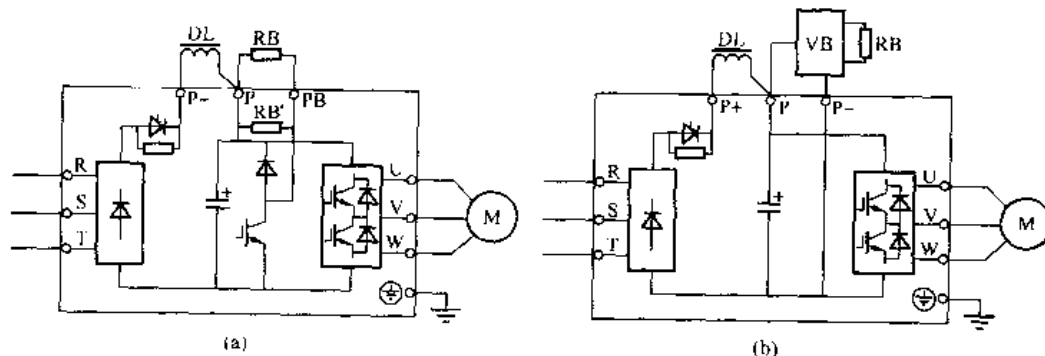
### 附录 3 康沃 CVF-G1 系列变频器

#### 一、基本接线

##### (一) 主电路

如附图 3-1 所示。

##### 1. 输入端



附图 3-1 CVF-G1 变频器主电路

(a) 11kW 以下；(b) 15kW 以上

其标志为 R、S、T、接电源进线。

## 2. 输出端

其标志为 U、V、W、接电动机。

## 3. 制动电阻接线端

容量小于 11kW 以下的变频器，内部配有制动单元及制动电阻  $RB'$ ，可以提供 10% ~ 20% 的制动转矩，如需 100% 制动转矩，外部再配接适当的制动电阻  $RB$  即可，如附图 3-1 (a) 所示；容量等于 11kW 的变频器，无内部制动电阻  $RB'$ ；容量在 15kW 以上的变频器，制动电阻  $RB$  与外接制动单元  $VB$  均需外接，如附图 3-1 (b) 所示。

## 4. 直流电抗器

直流电抗器  $DL$  接至 P（整流桥输出端）与  $P+$ （直流正端）之间。出厂时 P 与  $P+$  之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。

### (二) 控制电路

如附图 3-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

VII、VI2 为电压信号给定端；II 为电流信号给定端。V+ 和 V- 分别是变频器内部给定电源的“+”端和“-”端。

当各信号给定端都有信号时，它们的迭加关系可通过功能预置来决定。

#### 2. 输入控制端

CVF-G1 系列变频器配置了如下的输入控制端：

FWD——正转控制端；

REV——反转控制端；

RST——复位信号输入端；

X1 ~ X7——功能可预置控制端，其中，X7 还

可以输入脉冲信号。

#### 3. 运行状态输出信号端

TA、TB、TC——变频器故障信号，为继电器输出，可接至 AC220V 电路中；

OC1、OC2——运行状态信号，外部可接 24V 以下的直流继电器；

AM——输出电压测量信号，可接 0 ~ 10V 电压表 (< 1mA)；

FM——输出频率测量信号，可接数字频率计（信号频率为 1 ~ 100kHz）；

A、B——为 RS485 通信端子。

## 二、面板配置及操作

### (一) 面板配置

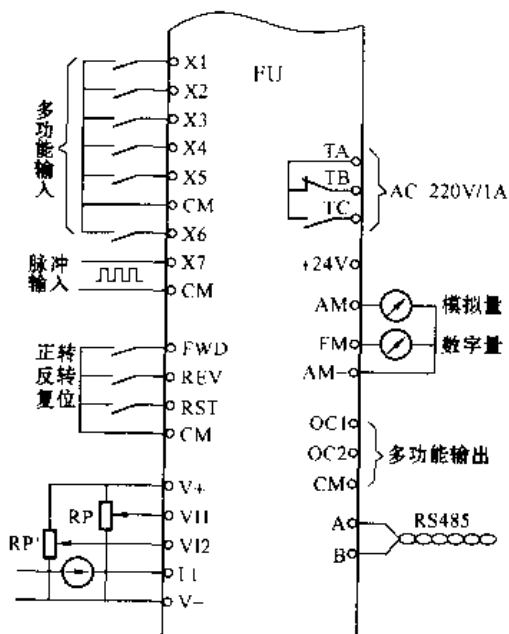
面板配置如附图 3-3 所示。

#### 1. 显示

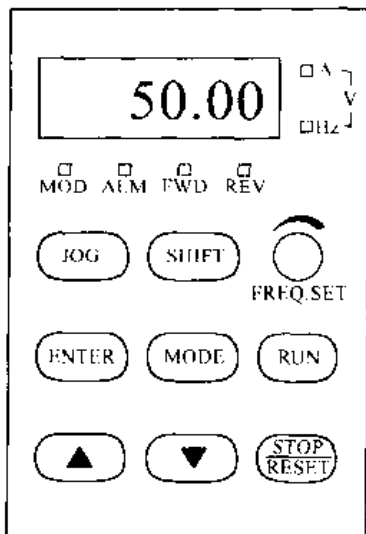
CVF-G1 系列变频器的显示屏可显示运行频率、电流和电压。

在显示屏下方，有四个状态指示灯：

MOD——显示变频器的工作模式；



附图 3-2 康沃 CVF-G1 控制电路



附图 3-3 VVF-G1 面板

ALM——显示变频器处于过电流或过电流警示状态；

FWD——显示正转；

REV——显示反转。

### 2. 模拟给定旋钮

VVF-G1 系列 KP1、KP2、KP6、KP7 型变频器在面板上配置了一个可以进行模拟给定的旋钮。使用前，须进行相关的功能预置，其给定信号方能有效。

### 3. 键盘

VVF-G1 系列 KP2、KP3、KP7、KP8 型变频器配置的键盘有：

**JOG**——点动键。

**SHIFT**——移位键，修改数据时，将光标移至需要修改的位置。

**ENTER**——读出和写入键。在编程模式下，当已经找到相关的功能码时，按此键，可读出该功能码内的原有数据；当数据进行修改后，按此键，则将修改后的数据写入，以确认修改后的数据有效。

**MODE**——模式转换键。

**RUN**——运行键。当功能预置为面板操作有效时，按此键，变频器的输出频率即按预置的升速时间上升至上次停机前的运行频率，或新预置的频率。

**▲**和**▼**——频率的升、降键。

**STOP/RESET**——停止、复位键。在运行过程中，按此键，则变频器的输出频率将按预置的降速时间下降至 0Hz；当变频器发生故障又修复后，在重新开机前，须按此键，使变频器复位。

## (二) 键盘控制

### 1. 开机

合上电源后，显示屏首先显示“P.oFF”，稍后显示“0”，将面板电位器逆时针旋至 0 位。

### 2. 运行

按**RUN**键，变频器先输出出厂启动频率 0.5Hz 后转为输出 0.0Hz。

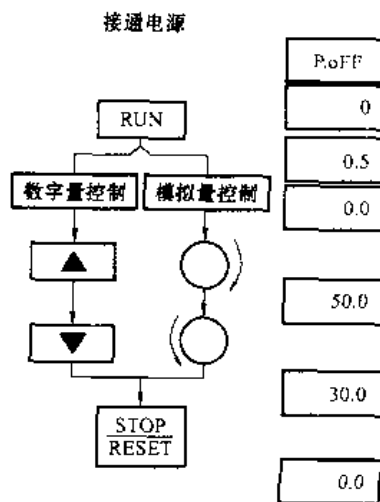
### 3. 升速

(1) 如预置为模拟量控制（即面板电位器操作，功能码 b-2 预置为“0”），则顺时针旋转电位器，使频率上升至 50.0Hz；

(2) 如预置为数字量控制（功能码 b-2 预置为“1”），则按**▲**键，使频率上升至 50.0Hz。

### 4. 降速

(1) 如预置为模拟量控制，则逆时针旋转电位器，使



附图 3-4 VVF-G1 键盘控制

频率下降至 30.0Hz;

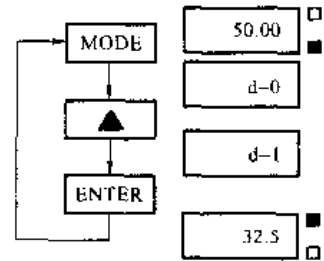
(2) 如预置为数字量控制, 则按  $\blacktriangledown$  键, 使频率下降至 30.0Hz。

### 5. 停止

按  $\text{STOP/RESET}$  键, 输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

### 6. 显示内容的切换

康沃 CVF-G1 系列变频器共有 24 种显示功能, 其中, 前 10 种为运行状态的参数显示, 后 8 种则是故障状态的原因及参数显示, 中间 6 种为故障记录。其显示内容须通过更改显示功能的功能码进行切换, 如附图 3-5 所示。切换方法如下:



附图 3-5 切换显示内容

(1) 假设正在显示的是输出频率;

(2) 按  $\text{MODE}$  键, 显示当前的功能码 “d-0”;

(3) 按  $\blacktriangle$  键, 选择希望了解的显示内容的功能码, 设为 d-1 (输出电流);

(4) 按  $\text{ENTER}$  键, 确认后即显示输出电流的值。

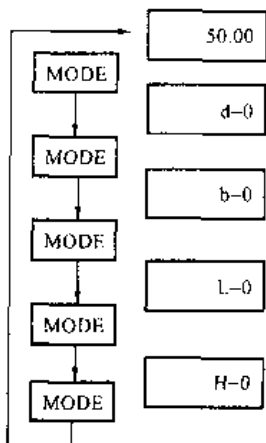
## 三、功能结构及预置流程

### (一) 功能结构

康沃 CVF-G1 系列变频器把显示功能块单独列出, 而运行功能又分为三个功能块, 如附表 3-1 所示。

附表 3-1 康沃 CVF-G1 系列变频器的功能结构

序号	功能块名称	功能码范围	序号	功能块名称	功能码范围
0	显示功能 (d 级别)	d-0 ~ d-23	2	中级功能 (L 级别)	L-0 ~ L-42
1	基本功能 (b 级别)	b-0 ~ b-9	3	高级功能 (H 级别)	H-0 ~ H-76



附图 3-6 模式的切换

### (二) 功能预置流程

#### 1. 模式的切换

康沃 CVF-G1 系列变频器对模式的定义与本书所用术语的对应关系如下:

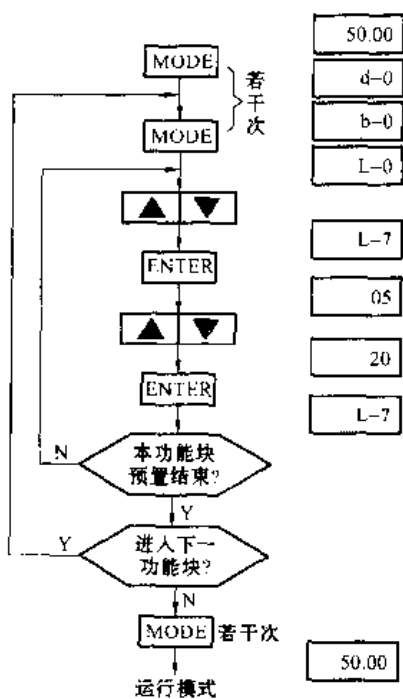
- (1) 状态监控模式——运行模式。
- (2) 状态参数查询模式——显示功能块。
- (3) 基本运行参数设置模式——基本功能块。
- (4) 中级运行参数设置模式——中级功能块。
- (5) 高级运行参数设置模式——高级功能块。

运行模式与各功能块之间, 通过  $\text{MODE}$  键来进行切换, 切换的顺序如附图 3-6 所示。

当切换到某一功能块时, 显示屏将显示该功能块的第一个功能码, 如图 3-6 的右侧所示。

#### 2. 功能的预置

康沃 CVF-G1 系列变频器在进行功能预置时, 必须首先找出该功能所在的功能块, 然后再找出其功能码。其预置流程如附图 3-7 左侧所示, 以把升速时间 (功能码为 L-7) 从 5s



附图 3-7 CVF 变频器预置流程  
直至返回至运行状态。

增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 3-7 右侧所示。

(1) 按 **MODE** 键，找出该功能所在的功能块 L (可以重复按，直至找到为止)，显示屏显示“L-0”。

(2) 按 **▲** 或 **▼** 键，找出功能码“L-7”。

(3) 按 **ENTER** 键，读出该功能码中的原有数据“5.0”(s)。

(4) 按 **▲** 或 **▼** 键，将数据修改为所希望的“20”(s)。

(5) 按 **ENTER** 键，写入新修改的数据 (20s)，写入后，又显示“L-7”，说明该功能已被写入。

(6) 如本功能块的预置工作尚未结束，则再按 **▲** 或 **▼** 键，找出下一个需要修改的功能码，重复上述修改程序。

(7) 如本功能块的预置工作已经结束，需要预置下一级别的功能时，则按 **MODE** 键，找出所需要的功能块，再重复上述修改程序。

(8) 如预置工作全部结束，则反复按 **MODE** 键，直

## 附录 4 惠丰 HF-G 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 4-1 所示。

##### 1. 输入端

其标志为 R、S、T，接电源进线。

##### 2. 输出端

其标志为 U、V、W，接电动机。

##### 3. 制动电阻接线端

制动电阻 RB 与外接制动单元 VB 相连后接至 P (直流正端) 和 N (直流负端) 之间。

#### (二) 控制电路

如附图 4-2 所示。

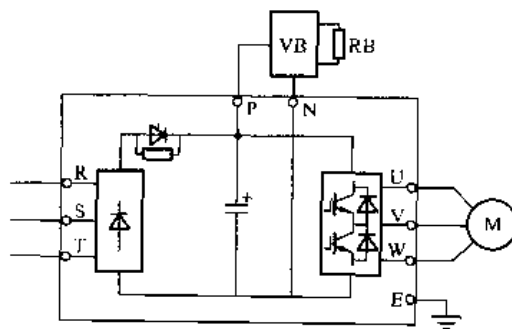
##### 1. 外接频率给定端

V2 为电压信号给定端；I2 为电流信号给定端。V1 和 V3 分别是变频器内部给定电源的“+”端和“-”端。

此外，变频器还配置了一个备用的电压信号给定端 V'。

##### 2. 输入控制端

HF-G 系列变频器配置了如下的输入控制端：



附图 4-1 惠丰 HF-G 变频器主电路



- SF——正转控制端；
- SR——反转控制端；
- BX——自由制动控制端；
- OP1——点动控制端；
- OP2、OP3、OP4——多挡转速控制端；
- RST——复位信号输入端。

### 3. 运行状态输出信号端

TA、TB、TC——变频器故障信号，为继电器输出；

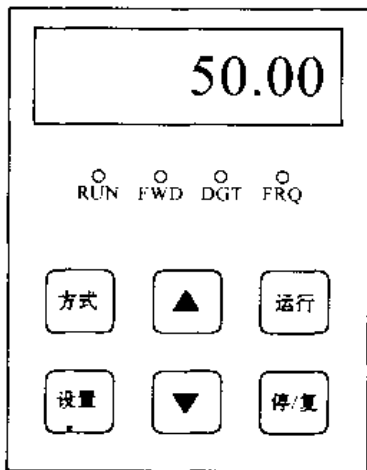
OUT——运行状态信号，外部可接 12V 继电器；

FM——输入频率测量信号，可接 0~5V 或 0~10V 电压表。

此外，变频器还为用户提供了一组 10V 或 24V 的直流备用电源。

## 二、面板配置及操作

### (一) 面板配置



附图 4-3 HF-G 变频器面板

面板配置如附图 4-3 所示。

1. 显示

HF-G 系列变频器的显示屏只显示运行频率、同步转速、电流、电压等。

在显示屏下方，有四个状态指示灯：

- RUN——显示“正在运行”或“停止”；
- FWD——显示正转或反转；
- DGT——显示“键盘操作”控制或“端子输入”控制；
- FRQ——显示频率或同步转速。

### 2. 键盘

“方式”键——用于切换变频器的工作模式。

“设置”键——用于读出和写入数据。

“▲”键和“▼”键——在运行模式下，用于增、减给定频率；在编程模式下，用于更改功能码或数据码。

“运行”键——向变频器发出运行指令，仅在运行模式下有效。

“停/复”键——在运行状态下，用于发出停机指令；在发生故障并修复后，用于使变频器复位；在编程模式中搜索功能码时，可使“▲”键和“▼”键按“10”递增或递减。

### (二) 键盘控制

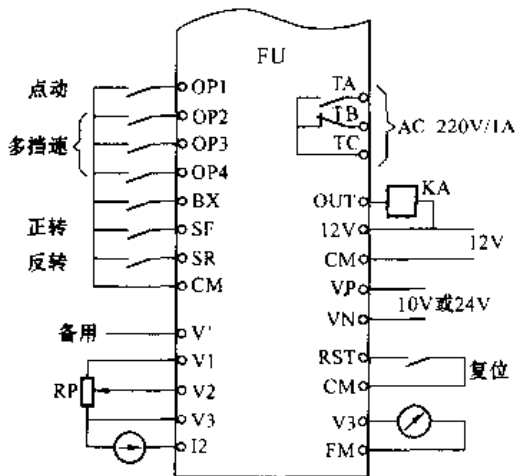
惠丰 HF-G 系列变频器的键盘控制过程如附图 4-4 所示。

#### 1. 接通电源

合上电源后，显示屏首先显示“—HF—”；2s 后，系统初始化完成，显示屏显示为“0”。

#### 2. 运行

按“运行”键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升到预置频率或上次停机



附图 4-2 惠丰 HF-G 变频器控制电路

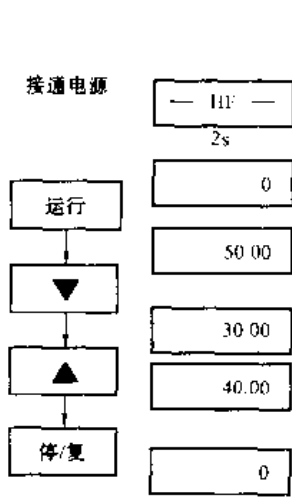
前的频率。

### 3. 升速及降速

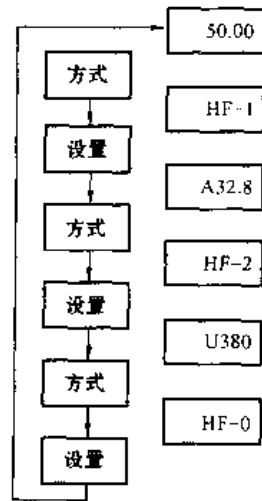
按“▼”键，频率按预置的降速时间下降；按“▲”键，频率按预置的升速时间上升。

### 4. 停止

按“停/复”键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。



附图 4-4 HF-G 的键盘控制



附图 4-5 显示内容的切换

### 5. 显示内容的切换

惠丰 HF-G 系列变频器显示屏的显示内容只有输出频率、输出电流和输出电压三种，在运行状态下的切换过程如附图 4-5 所示。

在一般情况下，首先显示的是输出频率，如 50.00Hz；

按[方式]键，显示“HF—1”；

按[设置]键，显示输出电流，如 A32.8，即为 32.8A；

按[方式]键，显示“HF—2”；

按[设置]键，显示输出电压，如 U380，即为 380V；

按[方式]键，显示“HF—0”；

按[设置]键，恢复为显示输出频率 50.00Hz。

## 三、功能结构及预置流程

### (一) 功能结构

惠丰 HF-G 变频器和森兰变频器一样，也并未把所有功能分级，只是划分成若干个功能区，如附表 4-1 所示。

附表 4-1

惠丰 HF-G 变频器的功能结构

序号	功能区名称	功能码范围
1	基本功能	F0 - F5、F47、F49、F66、F72 - F77、F81、F85、F86、F90、F91
2	点动功能	F46
3	多挡速功能	F6 - F41

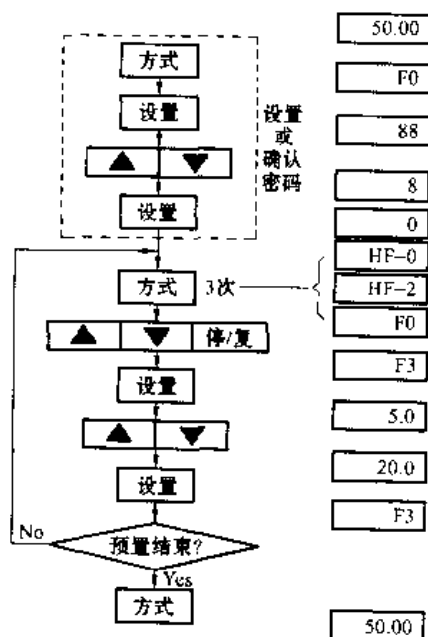
续表

序号	功能区名称	功能码范围
4	直流制动功能	F42 ~ F45
5	自处理功能	F50 ~ F55
6	过载保护功能	F60 ~ F65
7	停机功能	F68 ~ F69, F84
8	FM 模拟输出功能	F78 ~ F80
9	控制端子功能	F70 ~ F71, F82 ~ F83, F89
10	键盘控制功能	F97 ~ F98
11	共同控制功能	F91 ~ F92
12	控制方式选择功能	F58 ~ F59, F67, F87 ~ F88, F93, F95 ~ F96
13	恢复出厂值功能	F99

### (二) 功能预置流程

HF-G 系列变频器在功能预置方面的特殊之处，是必须先设置或确认密码。也就是说，只有在正确输入密码后，才能修改各功能的参数。其预置流程如附图 4-6 左侧所示，以把升速时间（功能码为 F3）从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 4-6 右侧所示。

- (1) 按 **方式** 键，使显示屏显示“F0”；
- (2) 按 **设置** 键，使显示屏显示“88”；
- (3) 按 **▲** 或 **▼** 键，将数据改为“8”（出厂密码）或由用户另行设置的密码；
- (4) 按 **设置** 键，如显示屏显示“0”，表示密码已经正确输入，可以进行功能预置了；
- (5) 按 **方式** 键，显示屏显示“F0”；
- (6) 按 **▲** 或 **▼** 键，选择需要进行修改的功能码；
- (7) 按 **设置** 键，读出该功能码的原有数据（5s）；
- (8) 按 **▲** 或 **▼** 键，修改数据（修改为 20s）；
- (9) 按 **设置** 键，将修改后的新数据（20s）写入；
- (10) 预置尚未结束，则返回至第 5 步；
- (11) 如预置已经结束，则按 **方式** 键，返回至运行状态。



附图 4-6 惠丰 HF-G 的预置流程

## 附录 5 英威腾 INVT 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 5-1 所示。

### 1. 输入端

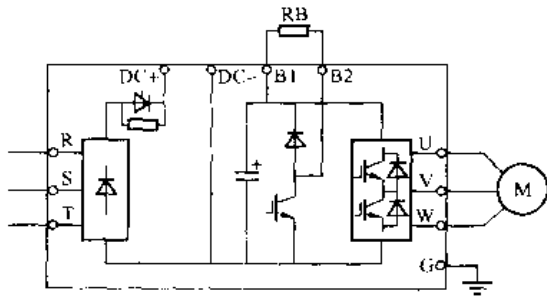
输入端的标志为 R、S、T，接电源进线。

### 2. 输出端

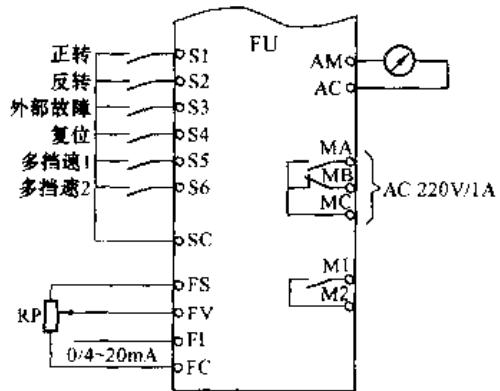
输出端的标志为 U、V、W，接电动机。

### 3. 制动电阻接线端

INVT 系列变频器内部都有制动单元，故必要时，只需将制动电阻 RB 接至 B1（直流正端）和 B2（内部制动单元接线端）之间即可。



附图 5-1 英威腾 INVT 的主电路



附图 5-2 英威腾 INVT 控制电路

## (二) 控制电路

如附图 5-2 所示。

### 1. 外接频率给定端

英威腾 INVT 变频器的给定信号输入端分别为 FV（电压信号）和 FI（电流信号）。

当使用外接电位器时，可将电位器的两个固定端接至 FS（给定电源正端）与 FC（公共端）之间，滑动端得到的电压信号接至 FV 端。

### 2. 输入控制端

由 S1 ~ S6 组成，均为开关量输入。其出厂设定是：

S1——正转输入端；

S2——反转输入端；

S3——外部故障输入端；

S4——复位输入端；

S5、S6——多挡转速控制端。

### 3. 故障信号输出端

由 MA、MB 和 MC 组成，为继电器输出，可接至 AC220V 电路中。

### 4. 运行信号输出端

由 M1、M2 引出，也是继电器输出。

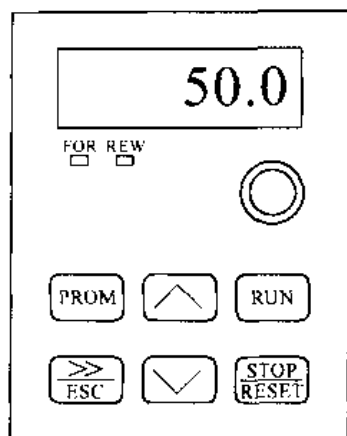
### 5. 测量信号输出端

由 AM、AC 引出，为模拟量输出。

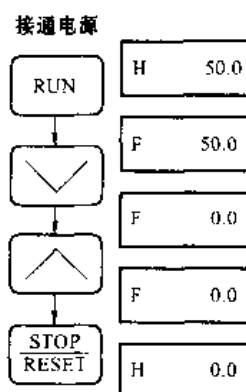
## 二、面板配置及操作

### (一) 面板配置

面板配置如附图 5-3 所示。



附图 5-3 英威腾 INVT 面板



附图 5-4 INVT 的面板控制

### 1. 显示

显示屏可以显示运行频率、运行电流和电压、同步转速等。

### 2. 键盘

键盘中各键的功能如下：

**PROM** 键——用于切换工作模式（运行模式或编程模式）、读出原有数据和写入新数据。

**▲** 键和 **▼** 键——在运行模式下，用于增、减给定频率；在编程模式下，用于更改功能码或数据码。

**>>/ESC** 键——在运行模式下，用于切换显示内容；在编程模式下，用于返回至上一模式。

**RUN** 键——向变频器发出运行指令，仅在运行模式下有效。

**STOP/RESET** 键——在运行模式下，用于发出停机指令；在发生故障并修复后，用于使变频器复位。

### (二) 键盘控制

英威腾 INVT 系列变频器的键盘控制过程如附图 5-4 所示。

#### 1. 接通电源

合上电源后，显示屏首先显示运行频率“H.50.0”。

#### 2. 运行

按 **RUN** 键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升，一直上升到显示屏显示的频率（50Hz）。

#### 3. 升速及降速

按 **▼** 键，频率按预置的降速时间下降（如下降至 30Hz）；按 **▲** 键，频率按预置的升速时间上升（如上升至 40Hz）。

#### 4. 停止

按 **STOP/RESET** 键，输出频率即按预置的降速时间下降直至停止。

#### 5. 显示内容的切换

英威腾 INVT 系列变频器在运行状态下，显示屏显示的内容可通过按  $\boxed{>>/ESC}$  键来更改。每按一次  $\boxed{>>/ESC}$  键，其显示内容依次为：输出频率→给定频率→电动机转速→直流电压→输出电流的百分数→输出电流→FOR→输出频率，如附图 5-5 所示。

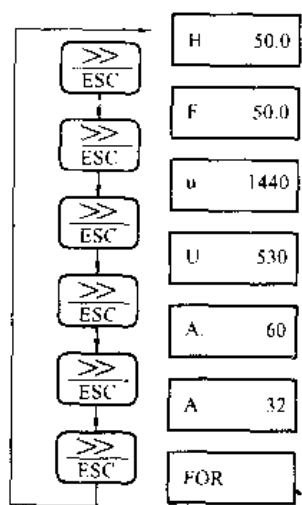
### 三、功能结构及预置流程

#### (一) 功能结构

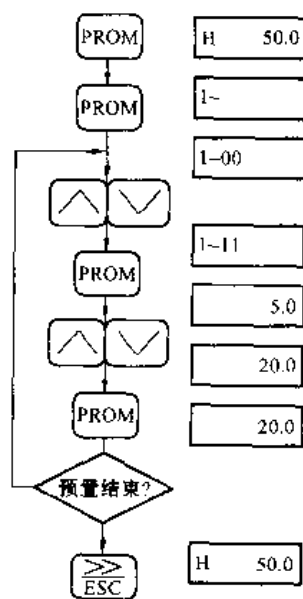
英威腾 INVT 系列变频器把各种功能分成了若干功能组，如附表 5-1 所示。

附表 5-1 英威腾 INVT 系列变频器的功能结构

序号	功能区名称	功能码范围	序号	功能区名称	功能码范围
1	功能组 0	0-00~0-03	7	功能组 6	6-00~6-18
2	功能组 1	1-00~1-19	8	功能组 7	7-00~7-21
3	功能组 2	2-00~2-10	9	功能组 8	8-00~8-04
4	功能组 3	3-00~3-09	10	功能组 9	9-00~9-06
5	功能组 4	4-00~4-17	11	功能组 A	A-00~A-02
6	功能组 5	5-00~5-16	12	功能组 B	B-00~B-02



附图 5-5 显示内容的切换



附图 5-6 英威腾 INVT 的功能预置流程

#### (二) 功能预置流程

因为英威腾 INVT 系列变频器并未把所有功能分级，所以在进行功能预置时，不需要搜索功能级别，其预置流程如附图 5-6 左侧所示。以把升速时间（功能码为 1—11）从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 5-6 右侧所示。

- (1) 按  $\boxed{PROM}$  键，使变频器进入编程模式，显示屏显示第 1 个功能组号“1-”。
- (2) 再按  $\boxed{PROM}$  键，进入第 1 功能组的第 1 个功能码“1-00”。
- (3) 按  $\boxed{\wedge}$ 、 $\boxed{V}$  键，找出所需预置的功能码“1-11”。
- (4) 按  $\boxed{PROM}$  键，读出该功能码中的原有数据码“5.0”。
- (5) 按  $\boxed{\wedge}$ 、 $\boxed{V}$  键，将数据码调整为“20.0”。

(6) 按 **PROM** 键，写入新数据码。

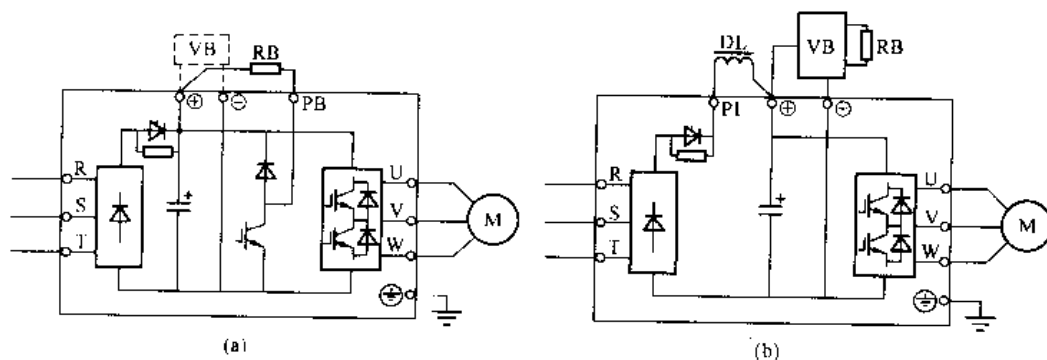
(7) 如功能预置未结束，则新数据“20.0”闪烁 3s 后转入第 3 步；如功能预置已经结束，则按 **>>/ESC** 键，直至转为运行模式。

## 附录 6 安邦信 AMB-G7 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 6-1 所示。



附图 6-1 安邦信 AMB-G7 的主电路

(a) 11kW 以下; (b) 15kW 以上

#### 1. 输入端

输入端的标志为 R、S、T，接电源进线。

#### 2. 输出端

输出端的标志为 U、V、W，接电动机。

#### 3. 制动电阻接线端

11kW 以下的变频器，内部有制动单元，只需将制动电阻接至  $\oplus$ （直流正端）和 PB（制动单元的集电极端）之间即可。15kW 以上的变频器，内部无制动单元，故制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接。两者相连后接至  $\oplus$ （直流正端）和  $\ominus$ （直流负端）之间。

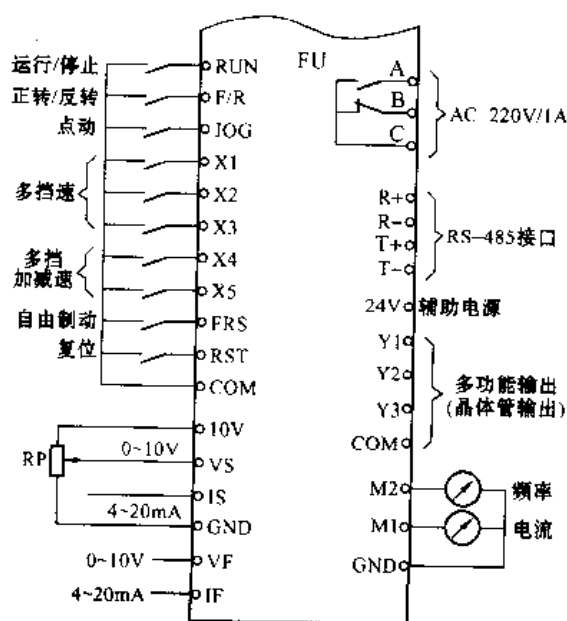
#### 4. 直流电抗器

15kW 以上的变频器，直流电抗器 DL 接至 P1（整流桥输出端）与  $\oplus$ （直流正端）之间。出厂时 P1 与  $\oplus$  之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除；11kW 以下的变频器则不接直流电抗器。

### (二) 控制电路

如附图 6-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端



附图 6-2 安邦信 AMB-G7 的控制电路

变频器为外接频率给定提供 10V 电源（负端为 GND），信号输入端分别为 VS（电压信号）和 IS（电流信号）。

此外，安邦信 AMB-G7 变频器还配置了两个反馈信号输入端，分别为 VF（电压信号）和 IF（电流信号）。

## 2. 输入控制端

如附图 6-2 所示，输入控制端有：

RUN——运行控制端。

F/R 端——正转、反转控制端。

JOG——点动控制端。

X1 ~ X5——可编程多功能输入端。其中，X1 ~ X3 出厂时为多挡转速控制端；X4 ~ X5 出厂时为多挡加减速控制端。

FRS——自由制动控制端。

RST——复位控制端。

## 3. 微机输入接口

由端子 R+、R-、T+、T- 构成。

## 4. 故障信号输出端

由 A、B、C 组成，为继电器输出，可接至 AC220V 电路中。

## 5. 运行信号输出端

由 Y1 ~ Y3 组成，为晶体管输出，只能接至 30V 以下的直流电路中。

## 6. 测量信号端

M1——出厂时为输出电流测量端；

M2——出厂时为输出频率测量端。

## 二、面板配置及操作

### （一）键盘配置

安邦信 AMB-G7 系列变频器的控制面板分 11kW 以下和 15kW 以上两种，后者也可作为遥控操作器配置给 11kW 以下的变频器。这里只介绍 15kW 以上的操作面板，如附图 6-3 所示。

#### 1. 显示

（1）LED 显示屏。可以显示输出频率、给定频率、输出电流的相对值（和额定电流之比的百分数）、输出电流的实际值等 10 种数据。

（2）LED 指示灯。显示屏上方显示的是变频器的状态：

RUN——运行指示，运行时亮；

F/R——正转/反转指示，正转时亮；

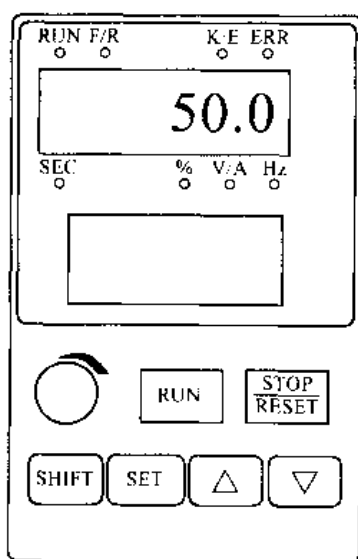
K/E——键盘控制端子控制，键盘控制时亮；

ERR——故障指示，变频器发生故障时亮。

显示屏下方显示的是显示屏显示数据的单位：

SEC——秒；

%——百分数；



附图 6-3 安邦信 AMB-G7 系列变频器面板



V/A——伏/安；

Hz——赫兹。

(3) LCD 显示屏。显示变频器的状态、参数及参数范围等。

## 2. 键盘

键盘中各键的功能如下：

**RUN** 键——向变频器发出运行指令，仅在运行模式下有效。

**STOP/RESET** 键——在运行状态下，用于发出停机指令；在发生故障并修复后，用于使变频器复位。

**SHIFT** 键——用于模式切换和读出功能码内的原有数据。

**SET** 键——用于写入新数据和切换显示内容。

**▲** 键和 **▼** 键——在运行模式下，用于增、减给定频率；在编程模式下，用于更改功能码或数据码。

### (二) 键盘控制

安邦信 AMB-G7 系列变频器的键盘控制过程如附图 6-4 所示。

#### 1. 接通电源

合上电源后，显示屏显示上次停机前的给定频率（如 50Hz）。

#### 2. 运行

按 **RUN** 键，变频器的输出频率即开始上升至给定频率（50Hz）。上升的快慢由预置的升速时间决定。

#### 3. 升速及降速

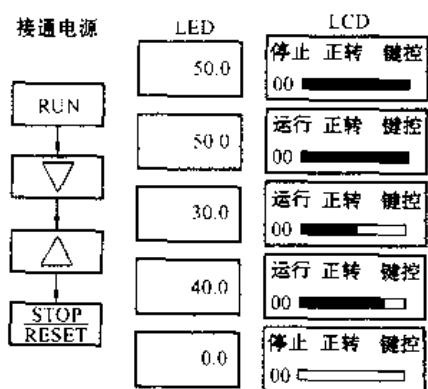
按 **▼** 键，频率下降（如下降至 30Hz），下降的快慢由预置的降速时间决定；按 **▲** 键，频率上升（如上升至 40Hz），上升的快慢由预置的升速时间决定。

#### 4. 停止

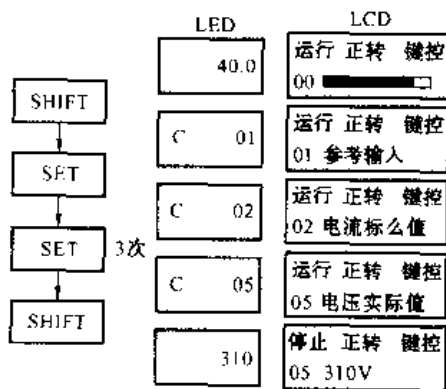
按 **STOP/RESET** 键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

#### 5. 显示内容的切换

假设当前显示的是输出频率（显示功能码是 C00），今以切换为显示实际电压（显示功能码是 C05）为例，如附图 6-5 所示。



附图 6-4 AMB-G7 的键盘控制



附图 6-5 显示内容的切换

- (1) 先按 **[SHIFT]** 键，进入显示模式，显示屏显示下一个功能码“C01”；
- (2) 按 **[SET]** 键，功能码增至“C02”；
- (3) 连续按 **[SET]** 键 3 次，将功能码切换为“C05”；
- (4) 按 **[SHIFT]** 键，显示屏显示实际电压值。

每按一次 **[SET]** 键，其显示内容依次为：输出频率/PID 的反馈值→给定频率/PID 的目标值→输出电流的相对值→输出电流的实际值→输出电压的相对值→输出电压的实际值→同步转速→过载次数计数→模块温度/程序控制的段数→直流电压/程序控制段的时间。

### 三、功能结构及预置流程

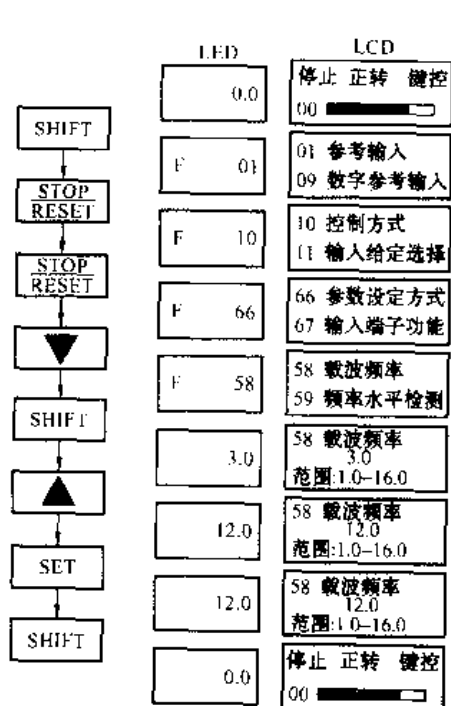
#### (一) 功能结构及功能码的切换

##### 1. 功能结构

安邦信 AMB-G7 系列变频器共有 89 种功能，但并未把各种功能分区或分等。其功能码的顺序是：F01，F09 ~ F97。

##### 2. 功能码与数据码的切换

安邦信 AMB-G7 系列变频器在编程模式下，更改功能码和数据码时，具有快速切换功能：



附图 6-6 AMB-G7 的功能预置流程

- (5) 按 **[SHIFT]** 键，读出该功能码中的原有数据码“3.0”；
- (6) 按 **[▲]** 键，将数据码调整为“12.0”；
- (7) 按 **[SET]** 键，写入新数据码；
- (8) 按 **[SHIFT]** 键，返回运行模式。

(1) 如将 **[▲]** 键或 **[▼]** 键按住不放，则开始时功能码或数据码的递增数为“1”；当增至“10”以后，每次的递增数为“10”。

(2) 当功能码小于“F10”时，如按 **[STOP/RESET]** 键，则功能码将增至“F10”，再按 **[STOP/RESET]** 键，功能码将跳至“F66”。

#### (二) 功能预置流程

AMB-G7 系列变频器因为功能并未分级，所以在进行功能预置时，不需要搜索功能级别，其预置流程如附图 6-6 左侧所示。以把载波频率（功能码为 F58）从 3kHz 增加为 12kHz 为例，其显示屏的状态如附图 6-6 的右侧所示。

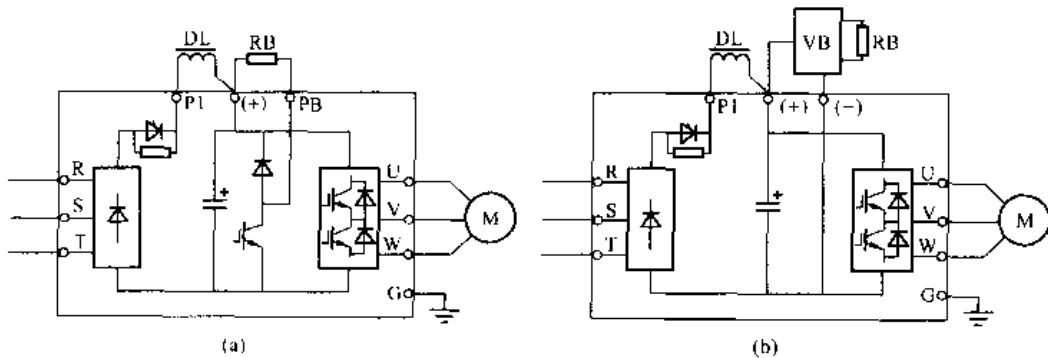
- (1) 按 **[SHIFT]** 键，使变频器进入编程模式，显示屏显示第 1 个功能码“F01”；
- (2) 按 **[STOP/RESET]** 键，功能码跳至“F10”；
- (3) 再按 **[STOP/RESET]** 键，功能码跳至“F66”；
- (4) 按 **[▼]** 键，将功能码减为“F58”；

## 附录7 艾默生 TD3000 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 7-1 所示。



附图 7-1 TD3000 主电路  
(a) 22kW 以下; (b) 30kW 以上

#### 1. 输入端

输入端的标志为 R、S、T，接电源进线。

#### 2. 输出端

输出端的标志为 U、V、W，接电动机。

#### 3. 制动电阻接线端

容量小于 22kW 以下的变频器，内部配有制动单元，外部只需配接适当的制动电阻即可，如附图 7-1 (a) 所示；容量大于 30kW 的变频器，内部无制动单元，故制动电阻 RB 与外接制动单元 VB 均需外接，如附图 7-1 (b) 所示。

#### 4. 直流电抗器

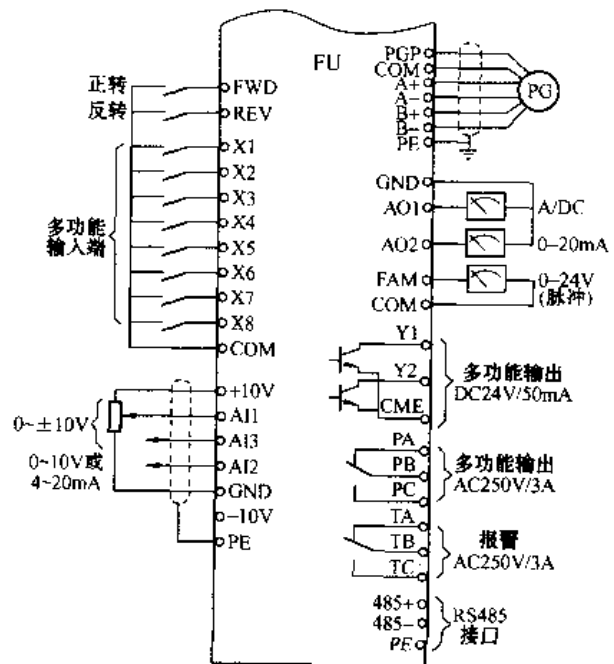
直流电抗器 DL 接至 P1 (整流桥输出端) 与 (+) (直流正端) 之间。出厂时 P1 与 (+) 之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。

#### (二) 控制电路

如附图 7-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

AI1、AI3 为  $0 \sim \pm 10V$  电压信号给定端；AI2 为  $0 \sim 10V$  电压信号或  $0 \sim 20mA$  电流信号给定端。 $+10V$  和 GND 分别是变频



附图 7-2 TD3000 控制电路

器内部给定电源的“+”端和“-”端。

## 2. 输入控制端

TD3000 系列变频器配置了如下输入控制端：

FWD——正转控制端；

REV——反转控制端；

X1 ~ X8——可编程多功能输入控制端。

## 3. 运行状态输出信号端

TA、TB、TC——变频器故障信号，为继电器输出，可接至 AC220V 电路中；

PA、PB、PC——可编程多功能输出控制端，继电器输出，可接至 AC220V 电路中；

Y1、Y2——可编程多功能输出控制端，晶体管输出，可接至 DC24V 直流电路；

AO1、AO2——可编程模拟量输出（0~20mA）；

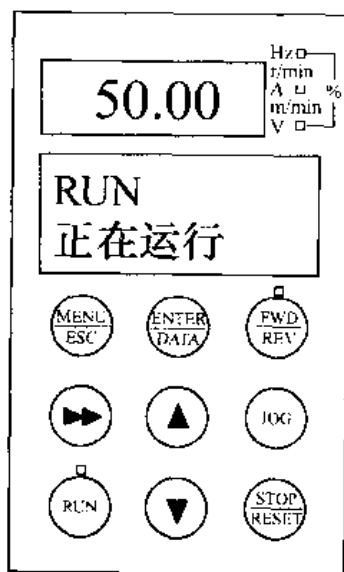
FAM——数字量输出，为频率测量信号，可接数字频率计或 PLC；

PGP、A+、A-、B+、B-——编码器输入端；

485+、485-——RS485 通信端子。

## 二、面板配置及操作

### (一) 面板配置



附图 7-3 TD3000 面板

面板配置如附图 7-3 所示。

### 1. LED 显示

TD3000 系列变频器的 LED 显示屏可显示运行频率、转速、线速度、百分数、电流和电压。显示内容可通过 LCD 的显示内容与 LED 显示屏旁的单位指示灯来判别。

在键盘处，有两个状态指示灯：

正、反转指示——在 **FWD/REV** 键上方；

运行指示——在 **RUN** 键上方。

### 2. LCD 显示

在运行过程中，显示运行状态；在功能预置过程中，显示功能码和数据码。

### 3. 键盘配置

**MENU/ESC**——模式转换键。

**ENTER/DATA**——读出与写入键，在编程模式下，当已经找到相关的功能码时，按此键，可读出该功能码内的原有数据；当数据进行修改后，按此键，则将修改后的数据写入，以确认修改后的数据有效。

**▶▶**——移位键。

**▲**和**▼**——频率的升、降键。

**JOG**——点动键。

**RUN**——运行键。当功能预置为面板操作有效时，按此键，变频器的输出频率即按预置的升速时间上升至上次停机前的运行频率，或新预置的频率。

**STOP/RESET**——停止、复位键。在运行过程中，按此键，则变频器的输出频率将按预置的降速时间下降至 0Hz；当变频器发生故障又修复后，在重新运行前，须按此键，使变频器复位。

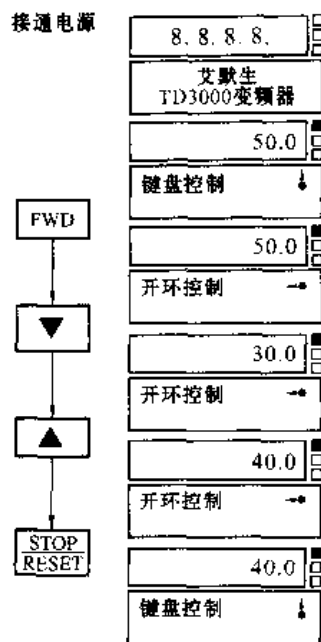
### (二) 键盘控制

艾默生 TD3000 系列变频器的面板控制过程如附图 7-4 所示。

#### 1. 接通电源

艾默生 TD3000 系列变频器在接通电源后，有 5s 的初始化时间，在初始化时间内，LCD 显示屏显示“艾默生 TD3000 变频器”，LED 显示屏显示“8.8.8.8.”。

初始化完成后，LED 显示屏的数码管将闪烁，并显示停机状态的参数；LCD 显示屏则显示变频器的运行方式，如键盘控制（即面板控制）、端子控制或通信控制等，图中为键盘控制方式。向上的箭头表示处于停止状态。



附图 7-4 键盘控制

#### 2. 运行

按 **RUN** 键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升，一直上升到上次停机前的频率或新预置的频率，LCD 上的箭头旋转，表示电动机正在运行。

#### 3. 升速及降速

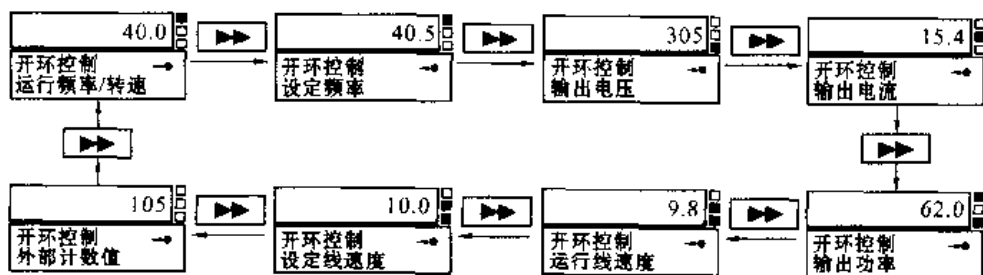
按 **▼** 键，频率按预置的降速时间下降，设降为 30.0Hz；按 **▲** 键，频率按预置的升速时间上升，设升为 40.0Hz。

#### 4. 停止

按 **STOP/RESET** 键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

#### 5. 更改显示内容

艾默生 TD3000 系列变频器在运行状态下，通过按 **◻◻** 键，可依次更改 8 种显示内容，8 种显示内容的顺序是：运行频率/转速、给定频率、输出电压、负荷率、运行线速度、给定线速度、外部计数值，如附图 7-5 所示。



附图 7-5 TD3000 更改显示内容的顺序

## 三、功能结构及预置流程

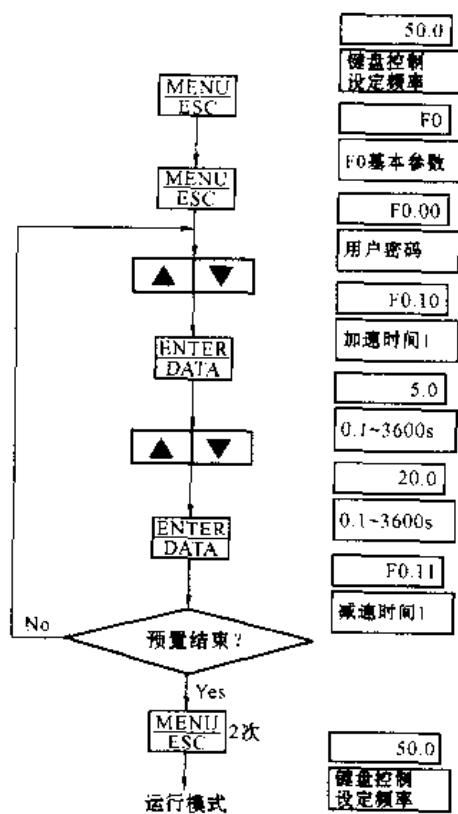
### (一) 功能结构

艾默生 TD3000 系列变频器共分 16 个功能组，如附表 7-1 所示。

附表 7-1

艾默生 TD3000 系列变频器的功能结构

序号	功能组名称	功能码范围
1	基本功能组 (F0)	F0.00 ~ F0.12
2	电动机参数功能组 (F1)	F1.00 ~ F1.16
3	辅助参数功能组 (F2)	F2.00 ~ F2.44
4	矢量控制参数功能组 (F3)	F3.00 ~ F3.12
5	V/F 控制参数功能组 (F4)	F4.00 ~ F4.05
6	开关量输入及输出端子功能组 (F5)	F5.00 ~ F5.19
7	模拟量输入及输出端子功能组 (F6)	F6.00 ~ F6.13
8	PID 控制功能组 (F7)	F7.00 ~ F7.11
9	简易 PLC 控制功能组 (F8)	F8.00 ~ F8.15
10	通信及总线功能组 (F9)	F9.00 ~ F0.12
11	增强功能组 (FA)	FA.00 ~ FA.16
12	编码器功能组 (FB)	FB.00 ~ FB.04
13	保留功能组 (FC)	FC.00 ~ FC.12
14	显示及检查功能组 (FD)	FD.00 ~ FD.15
15	厂家保留功能组 (FE)	FE.00
16	通信参数功能组 (FF)	FF.00 ~ FF.20



附图 7-6 TD3000 预置流程

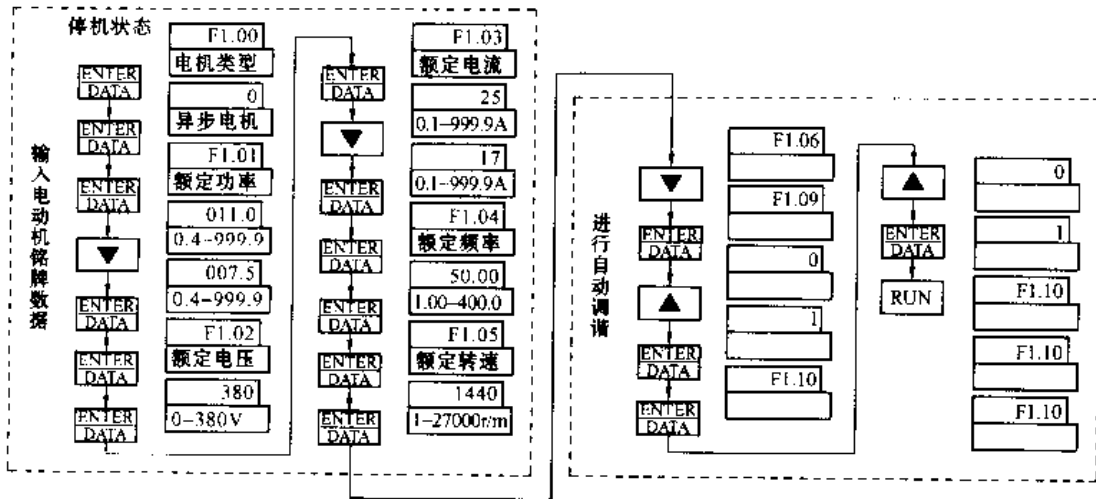
## (二) 功能预置流程

艾默生 TD3000 系列变频器的功能预置流程如附图 7-4 左侧所示, 以把升速时间 (功能码为 F0.10) 从 5s 增加为 20s 为例, 其显示屏的状态如附图 7-4 右侧所示。

- (1) 按 **MENU/ESC** 键, 进入编程模式, 首先进入 F0 (基本参数) 功能组 (一级菜单);
- (2) 再按 **MENU/ESC** 键, 进入 F0 功能组的第 1 个功能码 “F0.00”
- (3) 按 **▲** 或 **▼** 键, 找出需要修改的功能码 “F0.10”;
- (4) 按 **ENTER/DATA** 键, 读出该功能的原有数据码 “5.0”;
- (5) 按 **▲** 或 **▼** 键, 将数据码修改为 “20.0”;
- (6) 按 **ENTER/DATA** 键, 写入新数据, 显示屏将显示下一个功能码 “F0.11”;
- (7) 如预置工作尚未结束, 则返回至第 3 步, 寻找下一个需要修改的功能码;
- (8) 如预置工作已经结束, 则按两次 **MENU/ESC** 键, 即进入运行模式。

### (三) 自动检测

在采用矢量控制方式时，艾默生 TD3000 系列变频器具有自动辨识电动机参数的功能（说明书中称为“自动调谐”）。自动检测分两步进行：第一步，先把被控电动机的铭牌数据输入给变频器；第二步，进行自动检测。检测流程如附图 7-7 所示。



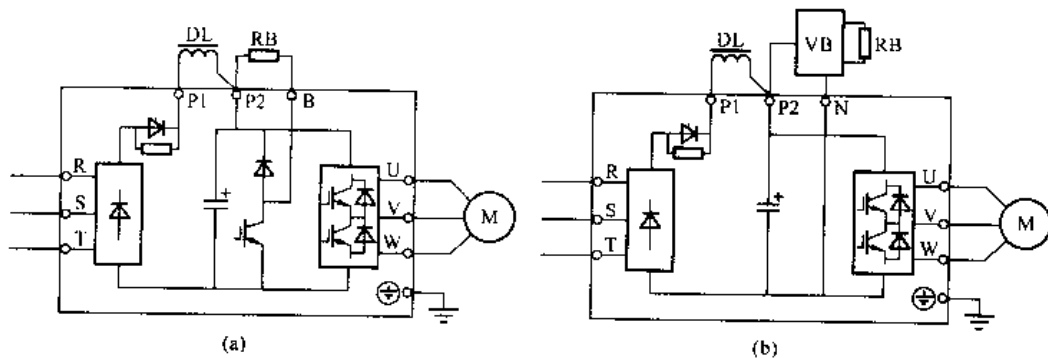
附图 7-7 自动检测流程

## 附录 8 台达 VFD-B 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 8-1 所示。



附图 8-1 VFD-B 主电路

(a) 11kW 以下；(b) 15kW 以上

#### 1. 输入端

其标志为 R、S、T，接电源进线。

#### 2. 输出端

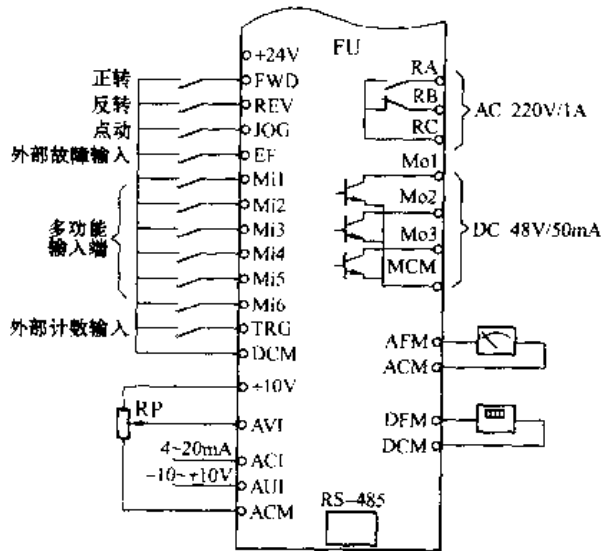
其标志为 U、V、W，接电动机。

### 3. 制动电阻接线端

容量小于 11kW 以下的变频器，内部配有制动单元，外部只需配接适当的制动电阻即可，如附图 8-1 (a) 所示；容量大于 15kW 的变频器，内部无制动单元，故制动电阻 RB 与外接制动单元 VB 均需外接，如附图 8-1 (b) 所示。

### 4. 直流电抗器

直流电抗器 DL 接至 P1 (整流桥输出端) 与 P2 (直流正端) 之间。出厂时 P1 与 P2 之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。



附图 8-2 VFD-B 的控制电路

Mi1 ~ Mi6——可编程多功能输入控制端；

TRG——外部计数输入端。

### 3. 运行状态输出信号端

RA、RB、RC——变频器故障信号，为继电器输出，可接至 AC220V 电路中。

Mo1 ~ Mo3——可编程多功能输出控制端，晶体管输出，可接至 DC48V 电路中。

AFM——运行参数测量信号，可测量变频器的输出频率、输入电流、输出电压等。

DFM——输出频率测量信号，可接数字频率计。

## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

面板配置如附图 8-3 所示。

#### 1. LED 显示屏

在运行过程中，可显示频率、输出电流、输出电压等。

显示内容通过两种方式表示：

(1) 频率及相关量由显示屏外部的指示灯来区分：

F——显示给定频率；

H——显示实际输出频率；

U——显示用户定义的物理量 ( $U = F \times \text{倍率}$ ，倍率大小

### (二) 控制电路

如附图 8-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

AVI 为 0 ~ 10V 电压信号给定端；ACI 为 4 ~ 20mA 电流信号给定端；AUI 是 -10V ~ +10V 电压信号给定端。

+10V 和 ACM 分别是变频器内部给定电源的“+”端和“-”端。

#### 2. 输入控制端

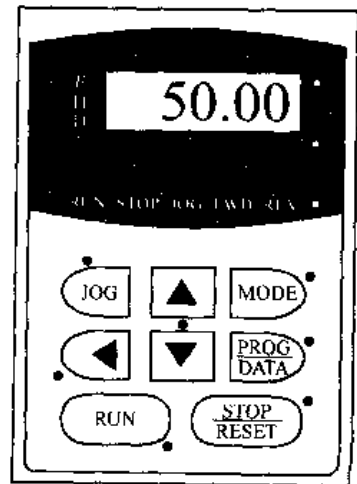
VFD-B 系列变频器配置了如下的输入控制端：

FWD——正转控制端；

REV——反转控制端；

JOG——点动控制端；

EF——外部故障信号输入端；



附图 8-3 VFD-B 的面板



通过预置功能码 00—05 决定)。

(2) 其他物理量由显示屏指示:

A 5.0——显示输出电流;

—Frd———显示正转;

—rEu———显示反转;

c 20——显示计数值。

在编程模式下, 显示功能码与数据码。

## 2. 状态指示灯

RUN——运行指示;

STOP——停止指示;

JOG——点动指示;

FWD——正转指示;

REV——反转指示。

## 3. 键盘配置

MODE——模式转换键。

PROG/DATA——读出与写入键, 在编程模式下, 当已经找到相关的功能码时, 按此键, 可读出该功能码内的原有数据; 当数据进行修改后, 按此键, 则将修改后的数据写入, 以确认修改后的数据。

JOG——点动键。

◀——移位键。

▲和 ▼——频率的升、降键。

RUN——运行键。当功能预置为面板操作有效时, 按此键, 变频器的输出频率即按预置的升速时间上升至上次停机前的运行频率, 或新预置的频率。

STOP/RESET——停止、复位键。在运行过程中, 按此键, 则变频器的输出频率将按预置的降速时间下降至 0Hz; 当变频器发生故障又修复后, 在重新开机前, 须按此键, 使变频器复位。

## (二) 键盘控制

### 1. 运行

在键盘控制方式下, 按 RUN 键, 变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升, 一直上升到上次停机前的频率或新预置的频率。

再按 STOP/RESET 键, 输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

### 2. 升速及降速

按 ▲ 键, 频率按预置的升速时间上升; 按 ▼ 键, 频率按预置的降速时间下降。

### 3. 点动

按 JOG 键, 电动机的输出频率即按升速时间升速至预置的点动频率; 松开 JOG 键, 电动机的输出频率即按降速时间降速至 0Hz。

## 三、功能结构及预置流程

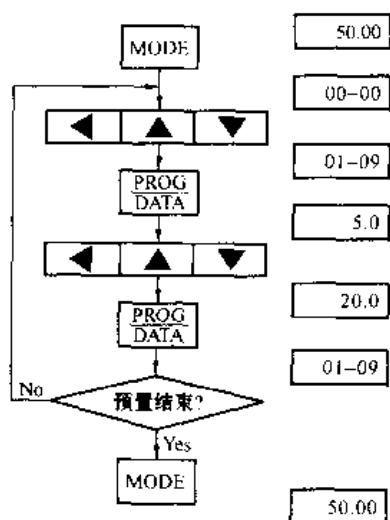
### (一) 功能结构

台达 VFD-B 系列变频器共分 11 个功能组, 如附表 8-1 所示。

附表 8-1

台达 VFD-B 系列变频器的功能结构

序号	功能组名称	功能码范围	序号	功能组名称	功能码范围
00	用户参数功能组	00-00~00-09	06	保护功能组	06-00~06-11
01	基本功能组	01-00~01-21	07	电动机参数功能组	07-00~07-10
02	操作方式功能组	02-00~02-07	08	特殊功能组	08-00~08-19
03	输出端子功能组	03-00~03-10	09	通信功能组	09-00~09-04
04	输入端子功能组	04-00~04-10	10	PID 控制功能组	10-00~10-15
05	多挡速及程序控制功能组	05-00~05-31	11	多台电动机控制功能组	11-00~11-04



附图 8-4 VFD 预置流程

已经结束，则按 **MODE** 键，即转为运行模式。

## (二) 功能预置流程

VFD-B 变频器的预置流程如附图 8-4 左侧所示，以把升速时间（功能码为 01—09）从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 8-4 右侧所示。

(1) 按 **MODE** 键，使变频器进入编程模式，显示屏显示第 1 个功能码“00—00”；

(2) 按 **▲**、**▼** 或 **◀** 键，找出所需预置的功能码“01—09”；

(3) 按 **PROG/DATA** 键，读出该功能码中的原有数据码“5.0”；

(4) 按 **▲**、**▼** 或 **◀** 键，把数据码调整为“20.0”；

(5) 按 **PROG/DATA** 键，写入新数据码；

(6) 如功能预置未结束，则转入第 2 步，如功能预置

## 附录 9 超能士 SMX 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 9-1 所示。

#### 1. 输入端

其标志为 R、S、T，接电源进线。

#### 2. 输出端

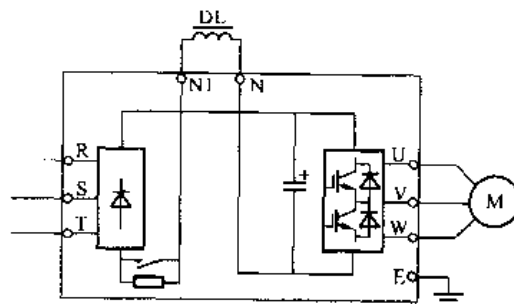
其标志为 U、V、W，接电动机。

#### 3. 直流电抗器

与其他变频器不同，SMX 系列变频器的直流电抗器 DL 是接在直流电路的负端的。具体来说，接至 NI（整流桥输出端）与 N（直流负端）

之间。出厂时 NI 与 N 之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。

由于一般情况下，风机及水泵的控制系统是不需要接制动电阻的，而 SMX 变频器主要用于风机和水泵，故 SMX 变频器并未配置接入制动电阻的接线端。



附图 9-1 SMX 变频器主电路

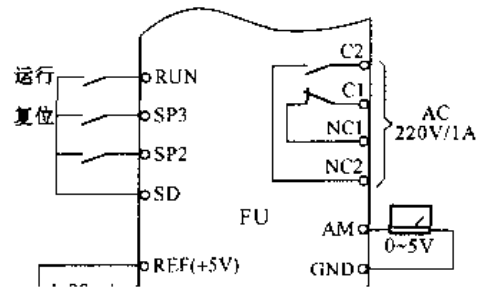
## (二) 控制电路

如附图 9-2 所示。

### 1. 外接频率给定端

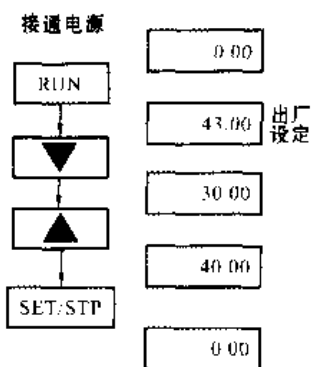
变频器为外接频率给定提供 +5V 电源（负端为 SD），信号输入端分别为 VCR（电压信号）和 ICR（电流信号）。

### 2. 输入控制端



## (二) 键盘控制

超能士 SMX 系列变频器在键盘控制方式下，其具体操作方法如附图 9-4 所示。



附图 9-4 SMX 的键盘控制

1. 接通电源  
合上电源后，显示屏显示运行状态的数据“0.0”，同时，LED“MODE”熄灭。

2. 运行

按 **RUN** 键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升，一直上升到上次停机前的频率或新预置的频率（出厂设定为 43Hz）。

3. 升速及降速

按 **V** 键，频率按预置的降速时间下降（假设下降至 30Hz）；按 **^** 键，频率按预置的升速时间上升（假设上升至 40Hz）。

4. 停止

按 **SET/STP** 键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

5. 更改显示数据

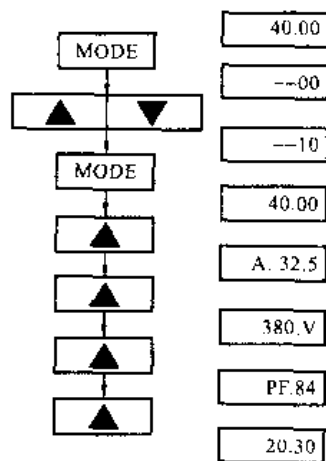
超能士 SMX 系列变频器在运行过程中，需要查看各项运行参数时，须在 10 号功能中进行，如附图 9-5 所示。

设变频器正在以 40Hz 的输出频率运行。

(1) 按 **MODE** 键，使变频器进入编程模式。

(2) 按 **^** 键，使功能码增至“10”。

(3) 再按 **MODE** 键，读出 10 号功能中的第 1 个数据，即为“40Hz”。



附图 9-5 SMX 更改显示内容

(4) 再按 **^** 键，即可切换显示内容。每按一次，即切换一次，切换顺序依次为：输出

电流（图中显示为 **A.32.5**，即运行电流为 32.5A）；输出电压（图中显示为 **304V**，即运行电压为 304V）；功率因数（图中显示为 **PF.84**，即功率因数为 0.84）；当前时间（图中显示为 **20.30**，即当前时间为 20 时 30 分）。

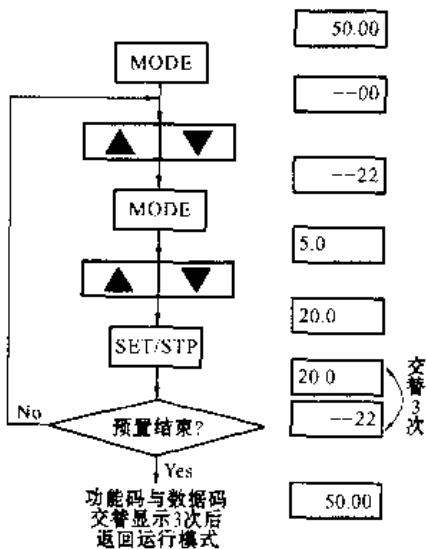
## 三、功能结构及预置流程

(一) 功能结构

超能士 SMX 系列变频器共有 70 种功能，并未分成若干个功能块或功能等级。

(二) 功能预置流程

SMX 系列变频器因为功能未分级，所以在进行功能预置时，不需要搜索功能级别，其预置流程如附图 9-6 左侧所示。以把升速时间（功能码为 22）从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 9-6 右侧所示。



附图 9-6 SMX 的预置流程

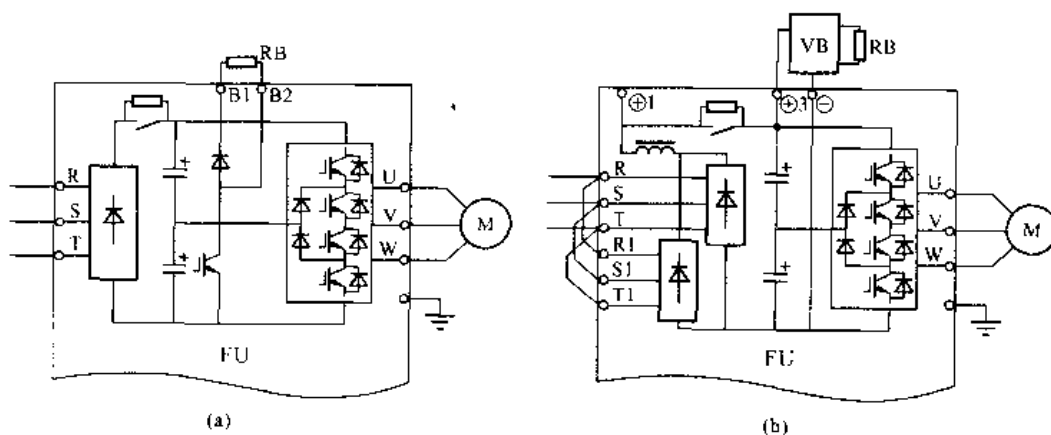
- (1) 按 **[MODE]** 键, 使变频器进入编程模式, 显示屏显示第 1 个功能码 “— —00”。
- (2) 按 **[ $\Delta$ ]**、**[ $\nabla$ ]** 键, 找出所需预置的功能码 “— —22”。
- (3) 按 **[MODE]** 键, 读出该功能码中的原有数据码 “5.0”。
- (4) 按 **[ $\Delta$ ]**、**[ $\nabla$ ]** 键, 将数据码调整为 “20.0”。
- (5) 按 **[SET/STP]** 键, 写入新数据码, 此时, 功能码 “— —22” 与数据码 “20.0” 开始交替显示。
- (6) 如功能预置未结束, 则转入第 2 步。如功能预置已经结束, 则等待功能码 “— —22” 和数据码 “20.0” 交替显示 3 次后, 自动转为运行模式。

## 附录 10 安川 G7 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 10-1 所示。



附图 10-1 安川 G7 的主电路

(a) 15kW 以下; (b) 18.5kW 以上

#### 1. 输入端

容量小于 31kVA (配用 15kW 电动机) 的变频器和其他变频器相同, 输入线的标志为 R、S、T, 接电源进线。容量大于 31kVA (配用 18.5kW 电动机) 的变频器可以配接三绕组变压器, 进行 12 相整流, 内部并配置了直流电抗器, 大幅度减小了输入电流中的高次谐波成分, 提高了抗干扰能力。

#### 2. 输出端

外部的接法和其他变频器相同, 输出端的标志也是 U、V、W, 接电动机。但在内部, 则是由 12 个功率器件 (IGBT) 构成的三电平逆变电路。

#### 3. 制动电阻与制动单元接线端

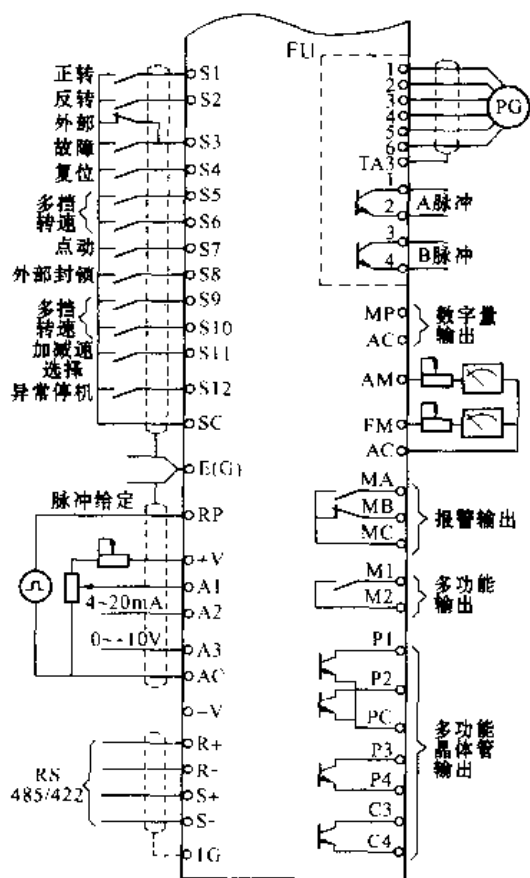
15kW 以下的 G7 系列变频器内部已经配置了制动单元, 如附图 10-1 (a) 所示; 18.5kW 以上变频器的制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接, 如附图 10-1 (b) 所示。

### (二) 控制电路

如附图 10-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

变频器为外接频率给定提供 10V 电源 (正端为 “+V”, 负端为 “AC”), 信号输入端分



附图 10-2 G7 的控制电路

别为 A1、A3 (电压信号) 和 A2 (电流信号)。

2. 输入控制端

S1 ~ S12 为多功能输入控制端, 具体功能均可通过功能预置来设定。各端子功能的出厂设定如下:

- S1——正转控制端;
- S2——反转控制端;
- S3——外部故障输入端;
- S4——复位端;
- S5、S6、S9、S10——多挡速控制端;
- S7——点动控制端;
- S8——封锁外部信号控制端;
- S11——加、减速时间选择控制端;
- S12——异常停机控制端。

3. 通信接口输入端

从 R+、R-、S+、S- 输入。

4. 故障信号输出端

由 MA、MB、MC 组成, 为继电器输出, 可接至 AC 250V (1A 以下) 或 DC 30V (1A 以下) 电路中。

5. 多功能运行信号输出端

- (1) M1、M2——继电器输出端;
- (2) P1 ~ P4——晶体管输出端。

6. 多功能测量信号输出端

- (1) AM、FM——模拟量输出端;
- (2) MP——数字量输出端。

7. 编码器输入端

从插件 PG—B2 输入。

二、操作面板及键盘控制

(一) 面板配置

面板配置如附图 10-3 所示。

1. 显示

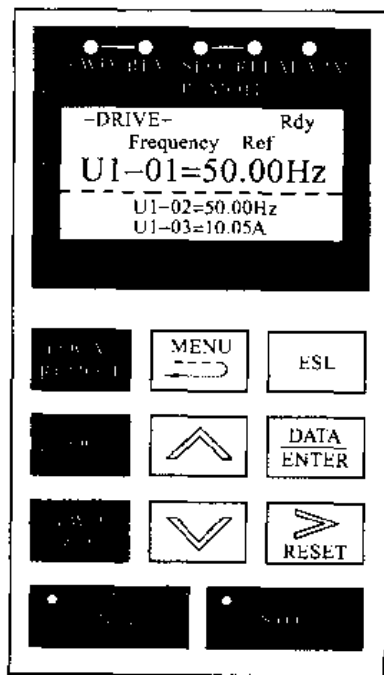
(1) LCD 显示屏。G7 系列变频器配置了一个 LCD 显示屏。

在运行模式下, 显示屏的显示内容如下:

- 第 1 行——说明变频器正处于运行模式下;
- 第 2、3 行——说明给定频率是 50Hz;
- 第 4 行(虚线下方)——说明实际运行频率也是 50Hz;
- 第 5 行——说明运行电流是 10.05A。

(2) 指示灯。在显示屏上方, 有 5 个状态指示灯:

- FWD——正转运行;
- REV——反转运行;



附图 10-3 G7 的面板

SEQ——外接端子程序运行；

REF——外接端子控制运行；

ALARM——变频器报警。

此外，在键盘上，还有两个状态指示灯：

RUN——表示运行；

STOP——表示停止。

## 2. 键盘

键盘中各键的功能如下：

**LOCAL/REMOTE** 键——用于切换控制方式（面板控制或外接端子控制）。

**MENU** 键——模式切换键。

**ESC** 键——返回键，返回至前一种状态。

**JOG** 键——点动运行键。

**FWD/REV** 键——正、反转切换键。

**>/RESET** 键——在编程模式下用于移动数据码的更改位，当变频器发生故障并修复后用于复位。

**▲** 键和 **▼** 键——在运行模式时，用于增、减给定频率；在编程模式下，用于更改功能码或数据码。

**DATA/ENTER** 键——读出/写入键。

**RUN** 键——运行键，向变频器发出运行指令，仅在键盘运行方式下有效。

**STOP** 键——停止键，向变频器发出停止指令，仅在键盘运行方式下有效。

### (二) 键盘控制

#### 1. 接通电源

合上电源后，LED 显示屏的显示如附图 10-4 所示。

如果变频器正处于外接控制方式，则首先按 **LOCAL/REMOTE** 键，使变频器处于面板控制方式，这时，指示灯 SEQ 和 REF 熄灭。

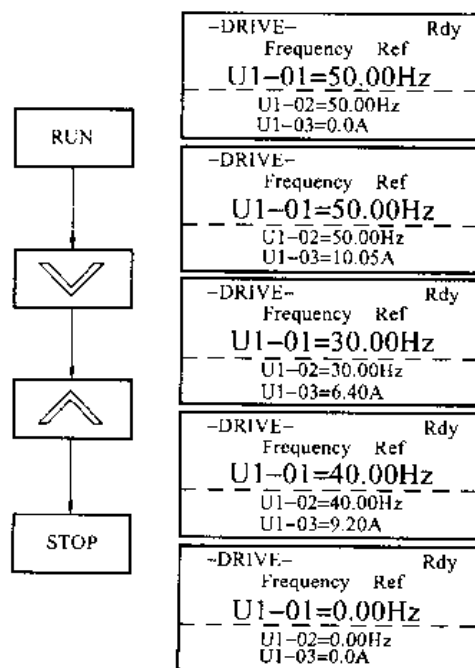
#### 2. 运行

按 **RUN** 键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升到给定频率（设为 50Hz），电动机的运行方向由 **FWD/REV** 键决定。

#### 3. 升速及降速

在运行过程中，按 **▼** 键，频率按预置的降速时间下降（设为 30Hz）；按 **▲** 键，频率按预置的升速时间上升（设为 40Hz）。

#### 4. 停止



附图 10-4 616G7 的键盘控制

按 **STOP** 键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

### 三、功能结构及预置流程

#### (一) 功能结构

安川 G7 系列变频器把所有功能分成 12 个功能块，每个功能块中又有若干个功能组，如附表 10-1 所示。

附表 10-1 安川 G7 系列变频器的功能结构

序号	功能块	功能组	功能码范围
1	环境设定功能块 (A 功能块)	基本设定功能组	A1-00 ~ A1-05
		用户参数功能组	A2-01 ~ A2-32
2	运行选择功能块 (B 功能块)	运行方式功能组	b1-01 ~ b1-08
		直流制动功能组	b2-01 ~ b2-08
		速度搜索功能组	b3-01 ~ b3-05
		延时功能组	b4-01 ~ b4-02
		PID 控制功能组	b5-01 ~ b5-17
		暂停变化功能组	b6-01 ~ b6-04
		转差控制功能组	b7-01 ~ b7-02
		节能控制功能组	b8-01 ~ b8-06
		零伺服控制功能组	b9-01 ~ b9-02
		3	调整功能块 (C 功能块)
升降速方式功能组	C2-01 ~ C2-04		
转差补偿功能组	C3-01 ~ C3-05		
转矩补偿功能组	C4-01 ~ C4-05		
转速控制功能组	C5-01 ~ C5-08		
载波频率功能组	C6-01 ~ C6-11		
4	给定功能块 (D 功能块)		
		频率上下限功能组	d2-01 ~ d2-03
		回避频率功能组	d3-01 ~ d3-04
		频率记忆功能组	d4-01 ~ d4-02
		转矩控制功能组	d5-01 ~ d5-06
		励磁控制功能组	d6-01 ~ d6-05
5	电动机参数功能块 (E 功能块)	V/F 功能组	E1-01 ~ E1-13
		电动机数据功能组	E2-01 ~ E2-11
		V/F2 功能组	E3-01 ~ E3-08
		电动机数据 2 功能组	E4-01 ~ E4-07
6	选择件功能块 (F 功能块)	PC 控制卡功能组	F1-01 ~ F1-14
		模拟量给定卡功能组	F2-01
		数字量给定卡功能组	F3-01
		模拟量显示卡功能组	F4-01 ~ F4-08
		数字量输出卡功能组	F5-01 ~ F5-09
		传递选择卡功能组	F6-01 ~ F1-06
7	端子的选择功能 (H 功能块)	输入端子的选择功能组	H1-01 ~ H1-10
		输出端子的选择功能组	H2-01 ~ H2-05
		模拟量输入端子的选择功能组	H3-01 ~ H3-12
		模拟量输出端子的选择功能组	H4-01 ~ H4-08
		MEMOBUS 通信功能组	H5-01 ~ H5-07
		脉冲序列功能组	H6-01 ~ H6-07
8	保护功能块 (I 功能块)	电动机保护功能组	I1-01 ~ I1-05
		瞬时停电处理功能组	I2-01 ~ I2-08
		防止跳闸功能组	I3-01 ~ I3-06
		频率检测功能组	I4-01 ~ I4-05
		重合闸功能组	I5-01 ~ I5-02
		过载检测功能组	I6-01 ~ I6-06
		转矩极限功能组	I7-01 ~ I7-04
		硬件保护功能组	I8-01 ~ I8-18



续表

序号	功能块	功能组	功能码范围
9	特殊调整功能块 (N 功能块)	防止振荡功能组	N1-01 ~ N1-02
		速度反馈控制功能组	N2-01 ~ N2-03
		高转差制动功能组	N3-01 ~ N3-04
		速度推算功能组	N4-07 ~ N4-18
		前馈控制功能组	N5-01 ~ N5-03
10	操作器功能块 (O 功能块)	显示设定功能组	o1-01 ~ o1-05
		多功能选择功能组	o2-01 ~ o2-12
		拷贝功能组	o3-01 ~ o3-02
11	电动机参数的自测定功能块 (T 功能块)		T1-00 ~ T1-08
12	显示功能块 (U 功能块)	状态显示功能组	U1-01 ~ U1-45
		故障轨迹功能组	U2-01 ~ U2-14
		故障记录功能组	U3-01 ~ U3-08

## (二) 功能预置流程

### 1. 模式的选择

安川 G7 系列变频器有 5 种模式，分别是：

- (1) 运行模式；
- (2) 快速编程模式；
- (3) 全面编程模式；
- (4) 校验模式；
- (5) 电动机参数的自测定模式。

各模式之间通过按 **MENU** 键进行切换。

### 2. 编程模式下的功能预置流程

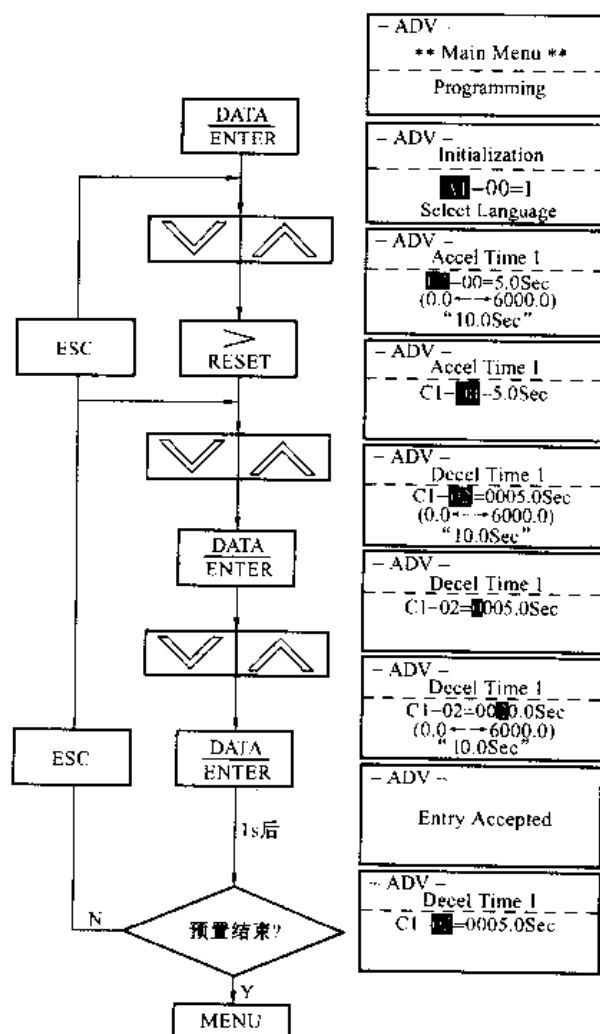
首先按 **MENU** 键多次，直至切换到编程模式 (LCD 显示屏左上方显示 ADV) 为止。在编程模式下，其预置流程如附图 10-5 左侧所示。以把减速时间 (功能码为 C1-02) 从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 10-5 右侧所示。

(1) 按 **DATA/ENTER** 键，使变频器进入编程模式。

(2) 按 **▲** 或 **▼** 键，找出所需预置的 C 功能组，显示屏的光标停留在功能组别 “C1” 上。

(3) 按 **>** 键，使光标移至功能码 “00” 处。

(4) 按 **▲**、**▼** 键，将功能码更改为 “C1-02”。



附图 10-5 G7 的预置流程

(5) 按 **DATA/ENTER** 键，读出该功能码中的原有数据码“0005.0Sec”。

(6) 按 **△**、**▽** 键，将数据码调整为“0020.0Sec”。

(7) 按 **DATA/ENTER** 键，写入新数据码，此时，显示屏显示“Entry Accepted”（新数据已被接受）；1s后显示当前的功能码及数据码。

(8) 如本功能组尚未预置完所有功能，则按 **ESC** 键，返回至本功能组的起始位置，重复第（4）步以后的流程。

(9) 如本功能组全部功能的预置工作都已结束，但其他功能组的预置尚未结束，则再按 **ESC** 键，返回至第（2）步，再重复上述流程。

(10) 如功能预置已经结束，则反复按 **MENU** 键，直至变频器转为运行模式为止。

### 3. 快速编程模式的功能预置流程

安川 G7 系列变频器对于 28 种最基本、最常用的功能，可以在快速编程模式下进行快速

预置。例如，A1 功能组中的 A2—02、b1 功能组中的 b1—01 ~ b1—03 等。

在快速编程模式下，可通过按 **△** 键和 **▽** 键，直接找到所需的函数码，而不必先找功能块等。

要实现快速预置，首先按 **MENU** 键多次，直至切换到快速编程模式（LCD 显示屏左上方显示 QUICK）为止，其预置流程如附图 10-6 所示。仍以把减速时间（函数码为 C1—02）从 5s 增加为 20s 为例。

(1) 按 **DATA/ENTER** 键，立即切换到快速编程模式下的第 1 个函数码“A1—02”。

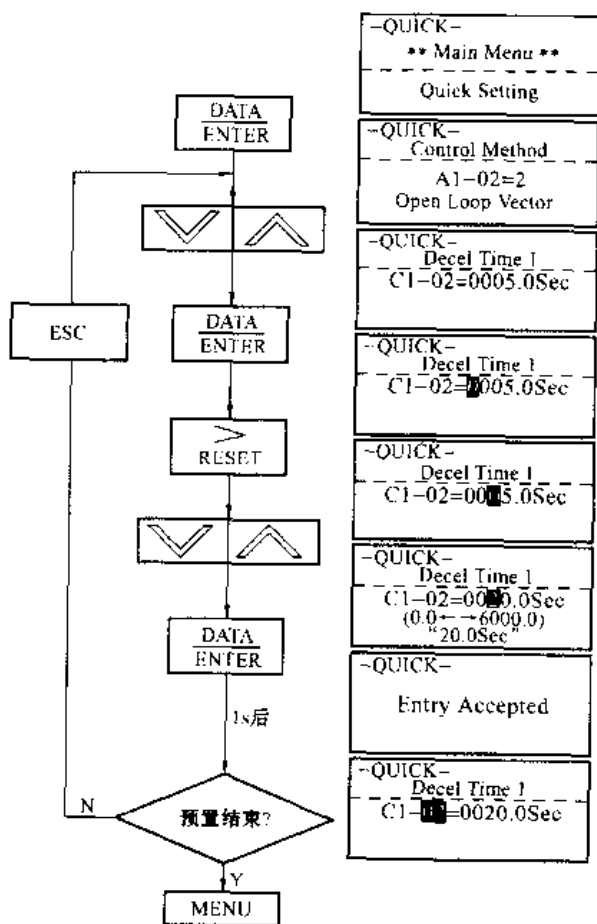
(2) 按 **△**、**▽** 键，找到所需修改的函数码“C1—02”。

(3) 按 **DATA/ENTER** 键，读出该函数码中的原有数据码“0005.0Sec”。

(4) 按 **>** 键，使光标移至修改位。

(5) 按 **△**、**▽** 键，将数据码调整为“0020.0Sec”。

(6) 按 **DATA/ENTER** 键，写入新数据码，此时，显示屏显示“Entry



附图 10-6 G7 快速预置流程

Accepted”（新数据已被接受）；1s后显示当前的函数码及数据码。

(7) 预置工作尚未结束，则按 **ESC** 键，返回至本功能组的起始位置，重复第（2）步以后的流程。

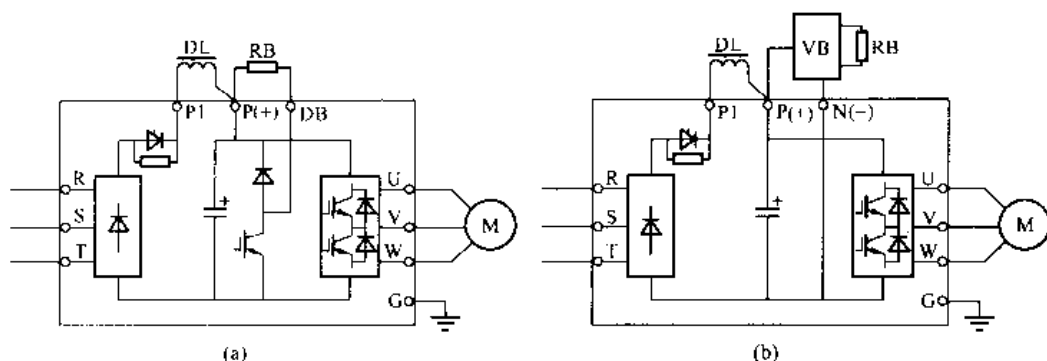
(8) 如全部功能的预置工作都已结束，则反复按 **MENU** 键，直至变频器转为运行模式为止。

## 附录 11 富士 G11S 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 11-1 所示。



附图 11-1 富士 G11S 的主电路

(a) 7.5kW 以下; (b) 11kW 以上

#### 1. 输入端

其标志为 R、S、T，接电源进线。

#### 2. 输出端

其标志为 U、V、W，接电动机。

#### 3. 制动电阻与制动单元接线端

7.5kW 以下的 G11 系列变频器内部已经配置了制动单元，如附图 11-1 (a) 所示；11kW 以上变频器的制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接，如附图 11-1 (b) 所示。

#### 4. 直流电抗器

直流电抗器接至 P1 (整流桥输出端) 与 P (+) (直流正端) 之间。出厂时 P1 与 P (+) 之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。

### (二) 控制电路

如附图 11-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

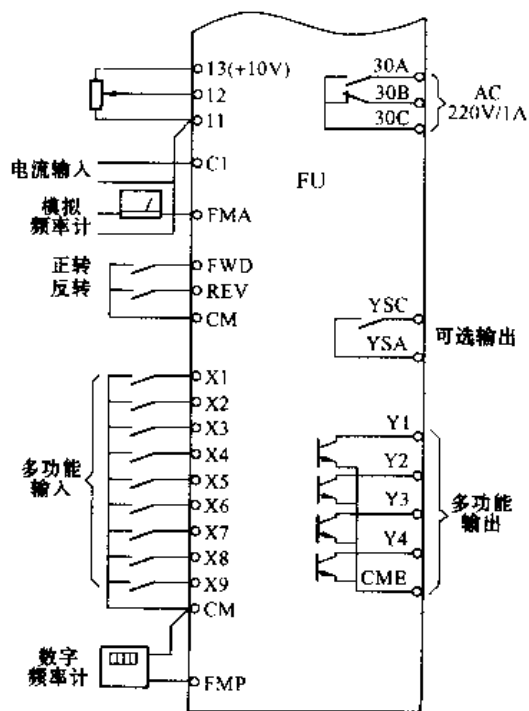
变频器为外接频率给定提供 10V 电源 (负端为 11)，信号输入端分别为 12 (电压信号) 和 C1 (电流信号)。

#### 2. 输入控制端

FWD——正转控制端；

REV——反转控制端；

X1 ~ X9——可编程多功能控制端。



附图 11-2 富士 G11S 的控制电路

### 3. 故障信号输出端

由 30A、30B、30C 组成，为继电器输出，可接至 AC 220V 电路中。

### 4. 功能可选输出端

G11S 系列变频器为用户提供了一个功能可选的继电器输出端 YSC—YSA。

### 5. 运行信号输出端

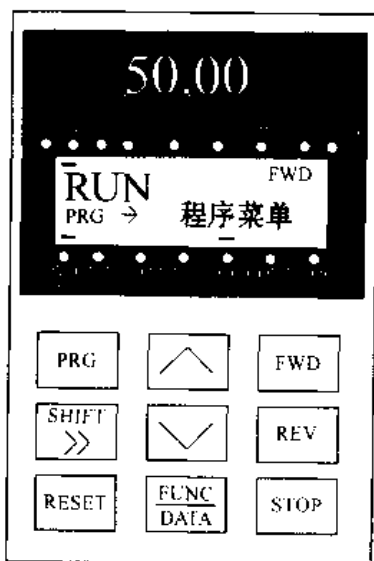
由 Y1 ~ Y4 组成，为晶体管输出，只能接至 30V 以下的直流电路中。

### 6. 频率测量输出端

G11S 系列变频器配置了两个测量频率的输出端：

FMA——模拟量输出，接 0 ~ 10V 电压表；

FMP——数字量输出，接数字频率计。



附图 11-3 G9S 的面板

## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

面板配置如附图 11-3 所示。

#### 1. 显示

G11S 系列变频器配置了两个显示屏：

(1) LED 显示屏。可以显示给定频率、运行电流和电压、同步转速和线速度以及负荷率等。

显示内容由显示屏下面的指示灯来识别：

Hz 灯亮——显示频率；

A 灯亮——显示运行电流；

V 灯亮——显示运行电压；

% 灯亮——显示负荷率；

r/min 灯亮——显示同步转速；

m/min 灯亮——显示线速度；

kW 灯亮——显示输入功率。

当数据超过 4 位数时，将舍去最低位，而由“×10”或“×100”来表示其位数。

(2) LCD 显示屏。在运行模式下，显示运行状态及有关数据；在编程模式下，显示功能码及数据码；在发生故障时，显示故障原因；其最下端则显示操作指导信息。

LCD 显示屏下方的指示灯显示运行状态及控制方式，各指示灯的含义如下：

FWD——正转运行；

REV——反转运行；

STOP——停止；

REM——外接端子控制方式；

LOC——键盘控制方式；

COMM——通信接口控制方式；

JOG——点动。

#### 2. 键盘

键盘中各键的功能如下：

**PRG** 键——用于切换工作模式（运行模式或编程模式）。

**△**键和**V**键——在运行模式下，用于增、减给定频率；在编程模式下，用于更改功能码或数据码。

**SHIFT**键——在编程模式下，用于移动数据的更改位；与**△**键和**V**键相配合，可直接切换功能组。

**FWD**键——向变频器发出正转指令，仅在键盘运行方式下有效。

**REV**键——向变频器发出反转指令，仅在键盘运行方式下有效。

**STOP**键——向变频器发出停机指令，仅在键盘运行方式下有效。

上述**FWD**键和**REV**键，在外接端子控制方式下，均不起作用；**STOP**键是否起作用，则通过功能预置来决定。

**RESET**键——当变频器发生故障并修复后，用于复位；在编程模式下，用于取消已经修改了的数据码。

**FUNC/DATA**键——在编程模式下，用于读出功能码中的原有数据和写入新数据。

## (二) 键盘控制

### 1. 接通电源

如附图 11-4 所示，合上电源后，LED 显示屏将显示“0.00” Hz，并闪烁。

### 2. 运行

首先按**△**键，使给定频率升至所需数值(图中假设为 50Hz)。

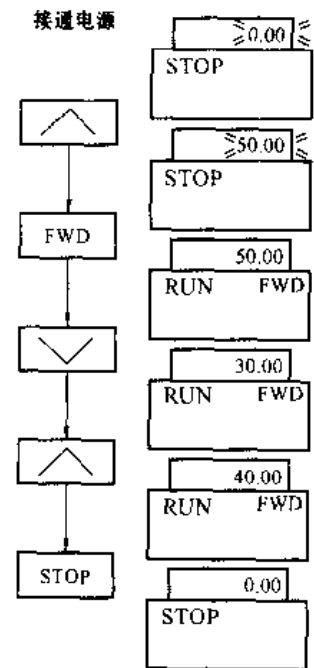
按**FWD**键或**REV**键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升到给定频率，电动机的运行方向由所按的键决定。

### 3. 升速及降速

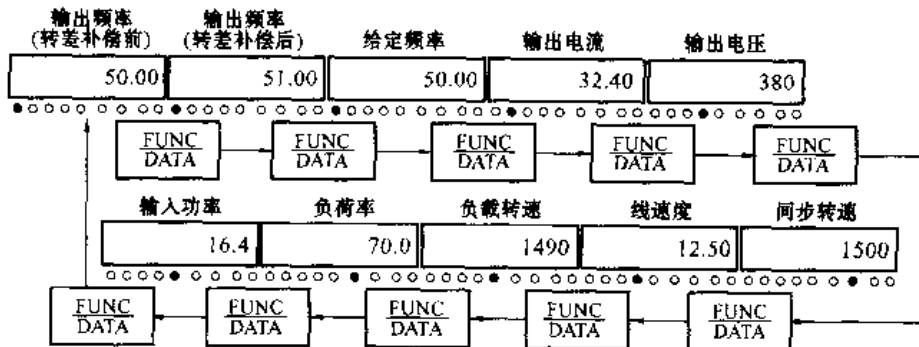
在运行过程中：按**V**键，频率按预置的降速时间下降(图中假设为 30Hz)；按**△**键，频率按预置的升速时间上升(图中假设为 40Hz)。

### 4. 停止

按**STOP**键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。



附图 11-4 键盘控制



附图 11-5 G11S 变频器更改显示内容

### 5. LED 显示内容的切换

在运行过程中，可以通过按 **FUNC/DATA** 键来更改 LED 的显示内容，以便查看变频器的各项运行参数，依次更改的显示内容如附图 11-5 所示。

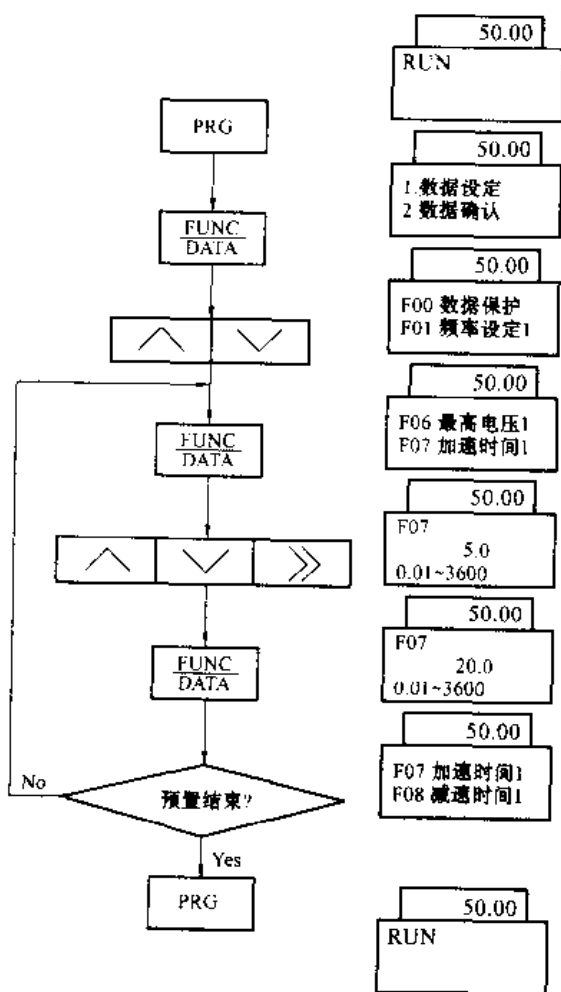
### 三、功能结构及预置流程

#### (一) 功能结构

富士 G11S 系列变频器把各种功能划分成 6 个功能块，如附表 11-1 所示。

附表 11-1 富士 G11S 系列变频器的功能结构

序号	功能组名称	功能码范围
1	基本功能组 (F 功能组)	F00 ~ F42
2	输入、输出端子扩展功能组 (E 功能组)	E01 ~ E47
3	频率控制功能组 (C 功能组)	C01 ~ C33
4	电动机 1 参数设定功能组 (P 功能组)	P01 ~ P09
5	高级功能组 (H 功能组)	H03 ~ H39
6	电动机 2 参数设定功能组 (A 功能组)	A01 ~ A18



附图 11-6 富士 G11S 的功能预置流程

#### (二) 功能预置流程

富士 G11S 系列变频器在进行功能预置时，其功能码及数据码的变化只反映在 LCD 显示屏上，而 LED 显示屏的数据将不发生变化。其预置流程如附图 11-6 左侧所示。以把升速时间（功能码为 F07）从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 11-6 右侧所示。

(1) 按 **PRG** 键，LCD 显示屏将发出询问：是要打算进行功能预置，还是确认有关数据？

(2) 将光标移至“1. 数据设定”处，按 **FUNC/DATA** 键，使变频器进入编程模式。

(3) 按 **△** 或 **▽** 键，找出所需预置的功能码“F07”。按 **FUNC/DATA** 键，读出该功能码中的原有数据码“5.0”。

(4) 按 **△**、**▽** 或 **>>** 键，将数据码调整为“20.0”。

(5) 按 **FUNC/DATA** 键，写入新数据码，此时，功能码将下移。

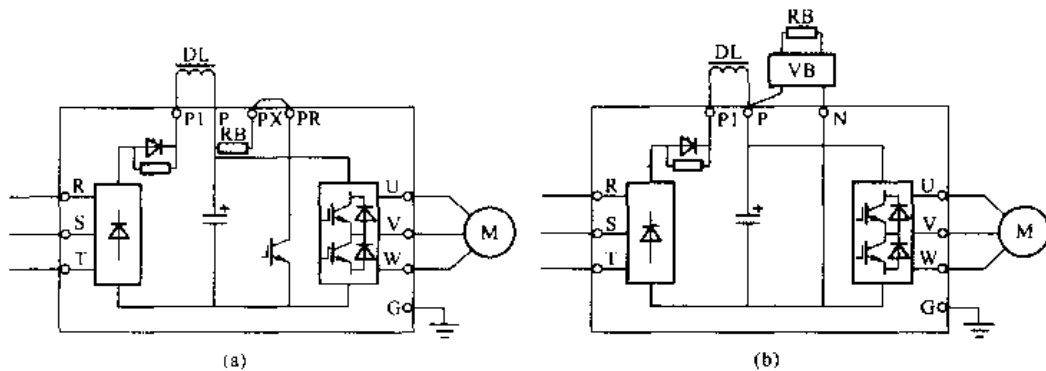
(6) 如功能预置未结束，则转入第 4 步，如功能预置已经结束，则按 **PRG** 键，使变频器转为运行模式。

## 附录 12 三菱 FR-A540 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 12-1 所示。



附图 12-1 FR-A540 主电路

(a) 7.5kW 以下; (b) 11kW 以上

#### 1. 输入端

其标志为 R、S、T，接电源进线。

#### 2. 输出端

其标志为 U、V、W，接电动机。

#### 3. 直流电抗器

直流电抗器接至 P1（整流桥输出端）与 P（直流正端）之间。出厂时 P1 与 P 之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。

#### 4. 制动电阻与制动单元接线端

7.5kW 以下的 FR-A540 系列变频器在 P 和 PX 之间，有内接制动电阻，而在 PR 和 N（直流负极）之间，有内接制动单元，出厂时 PX 与 PR 之间有一短路片相连，如附图 12-1 (a) 所示；11kW 以上变频器的制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接，如附图 12-1 (b) 所示。

### (二) 控制电路

如附图 12-2 所示。

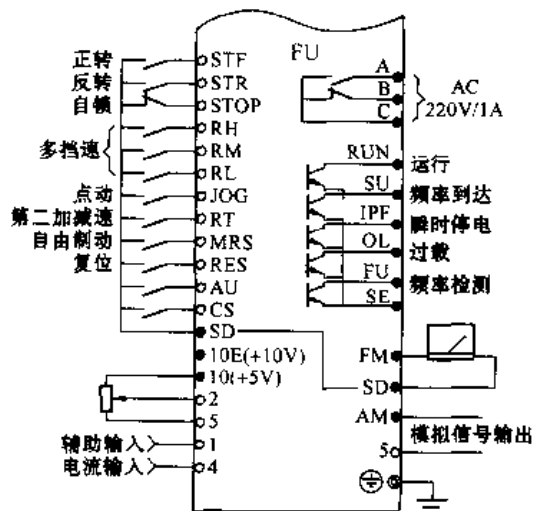
#### 1. 外接频率给定端

变频器为外接频率给定提供 +5V 电源（端子 10，负端为端子 5），信号输入端分别为端子 2（电压信号）、端子 4（电流信号）和端子 1（辅助给定信号）。

#### 2. 输入控制端

STF——正转控制端；

STR——反控制端；



附图 12-2 FR-A540 的控制电路

RH、RM、RL——多挡转速控制端；

JOG——点动控制端；

RT——第二加减速控制端；

MRS——自由制动控制端；

RES——复位控制端；

AU——电流信号选择端；

CS——重合闸选择。

### 3. 故障信号输出端

由 A、B、C 组成，为继电器输出，可接至 AC 220V 电路中。

### 4. 运行状态信号输出端

FR-A540 系列变频器配置了一些可表示运行状态的信号输出端，为晶体管输出，只能接至 30V 以下的直流电路中。运行状态信号有：

RUN——运行信号，变频器运行时有信号输出；

SU——频率到达信号，当变频器的输出频率达到某一设定值时，有信号输出；

IPF——瞬时停电信号；

OL——过载信号；

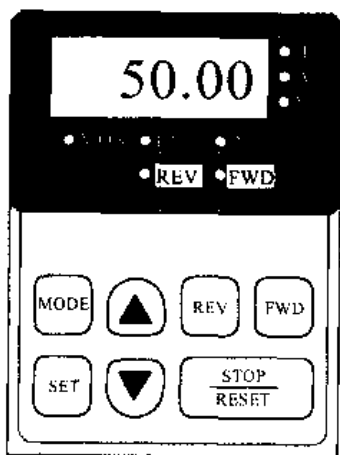
FU——频率检测信号，当变频器的输出频率在设定的频率范围内时，有信号输出。

### 5. 频率测量输出端

FR-A540 系列变频器配置了两个测量运行参数的输出端，通过预置，可输出 16 种运行参数的测量信号。其中：

FM——数字量输出，接数字频率计等数字式仪表；

AM——模拟量输出，接 0~10V 电压表。



附图 12-3 FR-A540 面板

FWD——正转运行；

REV——反转运行。

### 2. 键盘

键盘中各键的功能如下：

## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

面板配置如附图 12-3 所示。

#### 1. 显示

FR-A540 系列变频器的 LED 显示屏可以显示给定频率、运行电流和电压等参数。显示屏旁边有单位指示灯：

Hz 灯亮——显示频率；

A 灯亮——显示运行电流；

V 灯亮——显示运行电压。

显示屏下方有 5 个状态指示灯：

MODE——模式指示，在运行状态下指示灯亮；

EXT——外接端子控制时亮；

PU——键盘控制时亮；



**[MODE]** 键——用于切换工作模式（运行模式或编程模式）。

**▲** 键和 **▼** 键——在运行模式下，用于增、减给定频率；在编程模式下，用于更改功能码或数据码。

**[SET]** 键——用于读出和写入各功能码中的数据码。

**[FWD]** 键——向变频器发出正转指令，仅在键盘运行方式下有效。

**[REV]** 键——向变频器发出反转指令，仅在键盘运行方式下有效。

**[STOP/RESET]** 键——当变频器正在运行时，向变频器发出停机指令；当变频器发生故障并修复后，用于使变频器复位。

### (二) 键盘控制

#### 1. 接通电源

合上电源后，LED 显示屏将显示“0.00” Hz。

#### 2. 运行

(1) 按 **[MODE]** 键，切换到频率给定模式；

(2) 按 **▲** 键，使给定频率升至所需数值，设为 50Hz；

(3) 按 **[SET]** 键，写入给定频率；

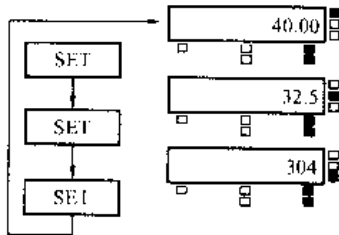
(4) 按 **[FWD]** 键或 **[REV]** 键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升到给定频率，电动机的运行方向由所按的键决定。

#### 3. 升速及降速

在运行过程中：按 **▼** 键，频率按预置的降速时间下降，设下降为 30Hz；按 **▲** 键，频率按预置的升速时间上升，设上升为 40Hz。

#### 4. 停止

按 **[STOP/RESET]** 键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。



附图 12-5 更改显示内容

#### 5. 查看运行参数

在运行状态下，可以通过按 **[SET]** 键，更改 LED 显示屏的显示内容，以便查看在运行过程中变频器的输出电流或输出电压，如附图 12-5 所示。每次按 **[SET]** 键，显示内容依次是：频率→电流→电压→频率。

### 三、功能结构及预置流程

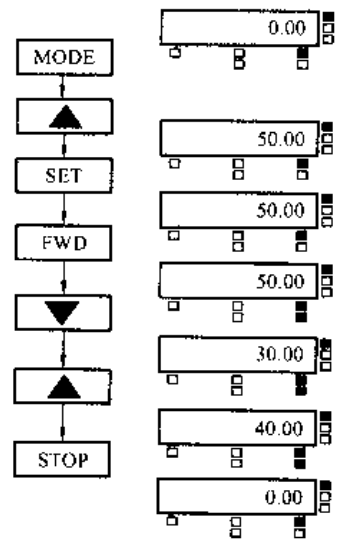
#### (一) 功能结构

FR-A540 系列变频器在说明书中，虽然把各种功能分成了许多功能组，但并未分成等级。这些功能组的名称及功能码范围如附表 12-1 所示。

附表 12-1

三菱 FR-A540 系列变频器的功能结构

序号	功能组名称	功能码范围	序号	功能组名称	功能码范围
1	基本功能组	Pr.0 ~ Pr.9	4	第二功能组	Pr.44 ~ Pr.50
2	标准运行功能组	Pr.10 ~ Pr.37	5	显示功能组	Pr.52 ~ Pr.56
3	输出端子功能组	Pr.41 ~ Pr.43	6	自动重合闸功能组	Pr.57 ~ Pr.58



附图 12-4 面板操作

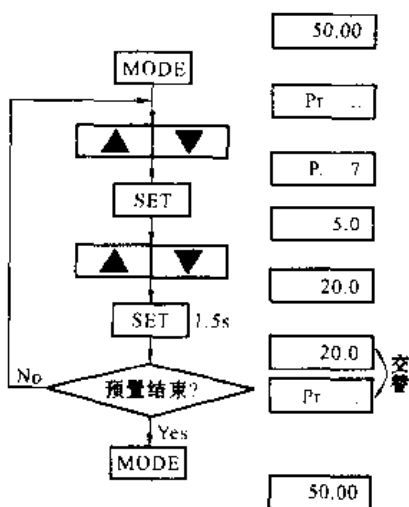
续表

序号	功能组名称	功能码范围	序号	功能组名称	功能码范围
7	附加功能	Pr.59	22	累计初始化功能组	Pr.170 ~ Pr.171
8	运行选择功能组	Pr.60 ~ Pr.79	23	用户功能组	Pr.173 ~ Pr.176
9	电机参数输入功能组	Pr.80 ~ Pr.96	24	端子安排功能组	Pr.180 ~ Pr.195
10	V/F调整功能组	Pr.100 ~ Pr.109	25	附加功能	Pr.199
11	第三功能组	Pr.110 ~ Pr.116	26	程序运行功能组	Pr.200 ~ Pr.231
12	通信功能组	Pr.117 ~ Pr.124	27	多挡速功能组	Pr.232 ~ Pr.239
13	PID控制功能组	Pr.128 ~ Pr.134	28	子功能组	Pr.240 ~ Pr.244
14	与工频的切换功能组	Pr.135 ~ Pr.139	29	停止方式选择功能	Pr.250
15	暂停升、降速功能组	Pr.140 ~ Pr.143	30	掉电停机方式选择功能组	Pr.261 ~ Pr.266
16	速度显示功能	Pr.144	31	极限定位控制功能	Pr.270
17	附加功能	Pr.148 ~ Pr.149	32	高速控制功能组	Pr.271 ~ Pr.274
18	电流检测功能组	Pr.150 ~ Pr.153	33	极限定位功能组	Pr.275 ~ Pr.276
19	子功能组	Pr.154 ~ Pr.158	34	顺序制动控制功能组	Pr.278 ~ Pr.287
20	附加功能	Pr.160	35	校准功能组	Pr.900 ~ Pr.905
21	重合闸功能组	Pr.162 ~ Pr.165	36	附加功能	Pr.990

## (二) 功能预置流程

FR-A540 系列变频器的预置流程如附图 12-6 左侧所示。以把升速时间（功能码为 Pr.7）

从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 12-6 的右侧所示。



附图 12-6 FR-A540 的流程

(1) 按 **MODE** 键，使变频器进入编程模式，显示屏显示“Pr. .”；

(2) 按 **▲** 或 **▼** 键，找出所需预置的功能码“Pr.7”；

(3) 按 **SET** 键，读出该功能码中的原有数据码“5.0”；

(4) 按 **▲** 或 **▼** 键，将数据码调整为“20.0”；

(5) 按 **SET** 键，写入新数据码，此时，新数据码与“Pr. .”将交替显示；

(6) 如功能预置未结束，则转入第 2 步，如功能预置已经结束，则按 **MODE** 键，使变频器转为运行模式。

## 附录 13 日立 SJ300 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

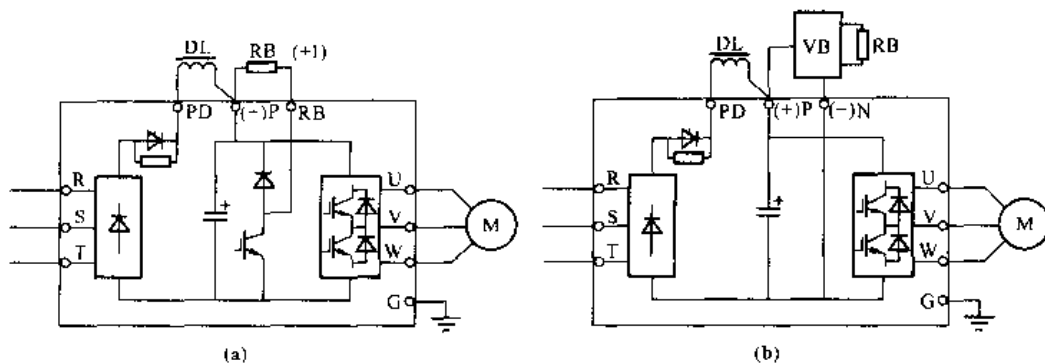
如附图 13-1 所示。

##### 1. 输入端

其标志为 R、S、T，接电源进线。

##### 2. 输出端

其标志为 U、V、W，接电动机。



附图 13-1 SJ300 主电路  
(a) 11kW 以下; (b) 15kW 以上

### 3. 直流电抗器

直流电抗器接至 PD (整流桥输出端) 与 P (直流正端) 之间。出厂时 PD 与 P 之间有一短路片相连, 需要接电抗器时应将短路片拆除。

### 4. 制动电阻与制动单元

11kW 以下的 SJ300 系列变频器内部, 具有内接制动单元, 如附图 13-1 (a) 所示; 15kW 以上变频器的制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接, 如附图 13-1 (b) 所示。

## (二) 控制电路

如附图 13-2 所示。

### 1. 外接频率给定端

变频器为外接频率给定提供 +10V 电源 (端子 H, 负端为端子 L), 信号输入端分别为端子 0 (0 ~ 10V)、端子 O2 (-10V ~ +10V) 和端子 O1 (4 ~ 20mA)。

### 2. 输入控制端

FSW——正转控制端;

1~8——可编程多功能控制端;

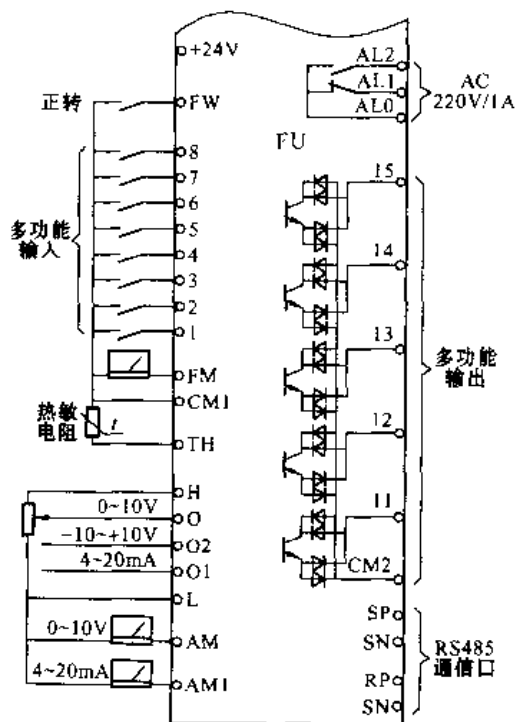
TH——过热信号输入端。

### 3. 故障信号输出端

由 AL0、AL1、AL2 组成, 为继电器输出, 可接至 AC 220V 电路中。

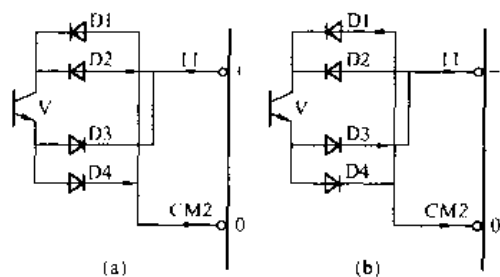
### 4. 多功能信号输出端

SJ300 系列变频器配置了 5 个晶体管输出的多功能信号输出端, 只能接至 30V 以下的直流电路中。



附图 13-2 SJ300 的控制电路

SJ300 系列变频器的晶体管输出电路比较特殊, 外电路加到控制端上的电压可“+”可“-”。如附图 13-3 所示, 当外电路加到端子 11 的电压为“+”时, 电流从端子 11 经二极管 D2 和 D4 流至公共端 CM2, 如附图 13-3 (a) 所示; 当外电路加到端子 11 的电压为“-”时, 电流从公共端 CM2 经二极管 D1 和 D3 流至端子 11, 如附图 13-3 (b) 所示。



附图 13-3 SJ300 的晶体管输出电路  
(a) 外电路为“+”；(b) 外电路为“-”

## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

面板配置如附图 13-4 所示。

#### 1. 显示

SJ300 系列变频器的 LED 显示屏可以显示给定频率、运行电流和电压等参数。显示屏旁边有单位指示灯：

- Hz 灯亮——显示频率；
- A 灯亮——显示运行电流；
- V 灯亮——显示运行电压；
- A、V 同时亮——显示运行功率；
- %——显示负荷率。

此外，还有 5 个状态指示灯：

- POWER——电源指示，变频器通电时灯亮；
- ALARM——报警指示，变频器跳闸时亮；
- RUN——运行模式指示；
- PRG——编程模式指示。

还有一个指示灯在运行键 **RUN** 的上方，当变频器处于运行状态时亮。

#### 2. 键盘

键盘中各键的功能如下：

**FUNC** 键——用于切换工作模式（运行模式或编程模式）。

**▲** 键和 **▼** 键——在运行模式时，用于增、减给定频率；在编程模式下，用于更改功能码或数据码。

**STR** 键——用于读出和写入各功能码中的数据码。

**RUN** 键——向变频器发出运行指令，仅在键盘运行方式下有效。

**STOP/RESET** 键——当变频器正在运行时，向变频器发出停机指令；当变频器发生故障并修复后，用于使变频器复位。

### (二) 键盘控制

#### 1. 接通电源

合上电源后，LED 显示屏将显示“0.00” Hz。

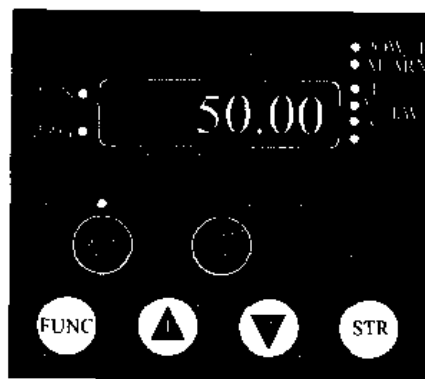
#### 5. 测量信号输出端

SJ300 系列变频器配置了三个测量运行参数的输出端：

AM——模拟量电压输出，通过预置，可测量输出频率、电流、电压等运行参数。


AMI——模拟量电流输出，测量功能与 AM 相同。


FM——除上述测量功能外，还可以用数字量输出频率信号。




附图 13-4 SJ300 的面板



## 2. 运行

首先按  键，使给定频率升至所需数值。

按  键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升到给定频率，电动机的运行方向由所按的键决定。

按  键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

## 3. 升速及降速

在运行过程中，按  键，频率按预置的升速时间上升；按  键，频率按预置的降速时间下降。

## 三、功能结构及预置流程

### (一) 功能结构

SJ300 系列变频器的功能分成 7 个功能块，每个功能块中又分若干个功能组，如附表 13-1 所示。

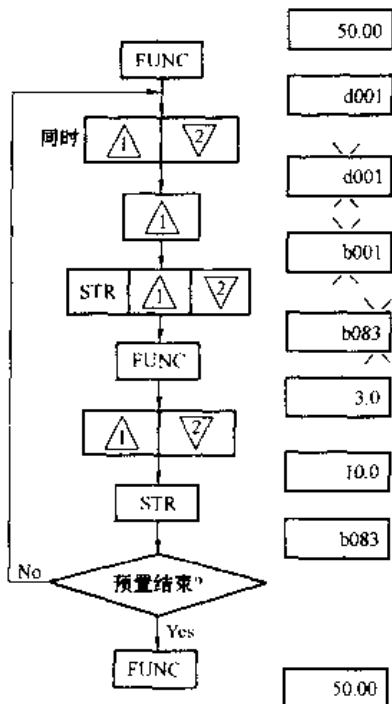
附表 13-1

日立 SJ300 系列变频器的功能结构

序号	功能块	功能组	功能码范围
1	显示与标准设定功能块	显示功能	d001 ~ d090
		标准设定功能	F001 ~ F303
2	A 扩展功能块	基本设定功能	A001 ~ A204
		模拟输入功能	A005 ~ A016
		多挡速及点动功能	A019 ~ A039
		V/F 调整功能	A041 ~ A045
		直流制动功能	A051 ~ A059
		上、下限与回避频率功能	A061 ~ A070
		PID 控制功能	A071 ~ A076
		AVR 控制功能	A081 ~ A082
		操作方式与加减速功能	A085 ~ A098
		外部频率调整功能	A101 ~ A114
		加减速方式功能	A131 ~ A132
3	B 扩展功能块	重合闸功能	b001 ~ b007
		电子热保护功能	b012 ~ b020
		过载限制功能	b021 ~ b026
		软件锁定功能	b031
		其他功能	b034 ~ b099
		V/F 自由设定功能	b100 ~ b126
4	C 扩展功能块	多功能输入端子设定功能	C001 ~ C008
		多功能输入端子状态设定功能	C011 ~ C019
		多功能输出端子设定功能	C021 ~ C029
		V/F 自由设定功能	C031 ~ C063
		串行通信功能	C070 ~ C078
		模拟测量信号输出功能	C081 ~ C088
		其他功能	C091 ~ C123
5	H 扩展功能块	电动机参数及增益设定功能	H001 ~ H072
6	P 扩展功能块	选件设定功能	P001 ~ P031
7	U 扩展功能块	用户选择功能	U001 ~ U020

### (二) 功能预置流程

SJ300 系列变频器的预置流程如附图 13-5 左侧所示。以把载波频率（功能码为 b083）从



附图 13-5 SJ300 的预置流程

3kHz 增加为 10kHz 为例, 其显示屏的状态如附图 13-5 的右侧所示。

(1) 按 **FUNC** 键, 使变频器进入编程模式, 显示屏显示 “d001”。

(2) 同时按 **▲** 和 **▼** 键, 进入编程 (功能预置) 状态, 功能块代号 “d” 闪烁。

(3) 按 **▲** 或 **▼** 键, 找出所需预置的 “b” 功能块, 显示 “b001”, “b” 闪烁。

(4) 按 **STR** 键 (光标移位) 和 **▲** 或 **▼** 键, 找出所需预置的功能码 “b083”。

(5) 按 **FUNC** 键, 读出该功能码中的原有数据码 “3.0”。

(6) 按 **▲** 或 **▼** 键, 将数据码修改为 “10.0”。

(7) 按 **SST** 键, 写入新数据码。此时, 显示屏显示功能码 “b083”。

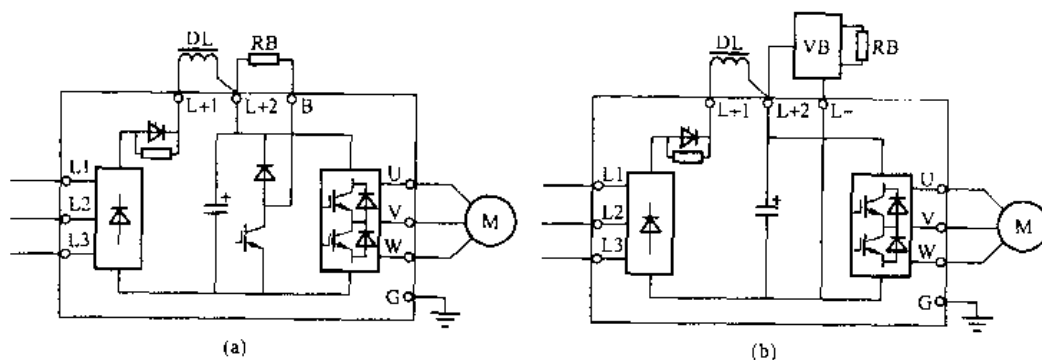
(8) 如功能预置未结束, 则转入第 2 步; 如功能预置已经结束, 则按 **FUNC** 键, 使变频器转为运行模式。

## 附录 14 明电 VT230S 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 14-1 所示。



附图 14-1 VT230S 的主电路

(a) 7.5kW 以下; (b) 11kW 以上

#### 1. 输入端

其标志为 L1、L2、L3, 接电源进线。

#### 2. 输出端

其标志为 U、V、W, 接电动机。

#### 3. 直流电抗器

直流电抗器接至 L+1 (整流桥输出端) 与 L+2 (直流正端) 之间。出厂时 L+1 与 L+

2 之间有一短路片相连, 需要接入电抗器时应将短路片拆除。

#### 4. 制动电阻与制动单元接线端

7.5kW 以下的 VT230S 系列变频器内部, 具有内接制动单元, 如附图 14-1 (a) 所示; 11kW 以上变频器的制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接, 如附图 14-1 (b) 所示。

### (二) 控制电路

如附图 14-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

变频器为外接频率给定提供 +10V 电源 (端子 P10, 负端为端子 COM), 信号输入端分别为端子 FSV (0~10V) 和端子 FSI (4~20mA)。

此外, 有一个辅助给定端 AUX, 其输入信号与主给定信号相迭加, 可以十分方便地进行各单元之间的连锁控制。

#### 2. 输入控制端

RESET——复位端;

EMS——紧急停机控制端;

RUN——运行控制端;

PSI1~PSI5——可编程多功能控制端。

#### 3. 多功能继电器信号输出端

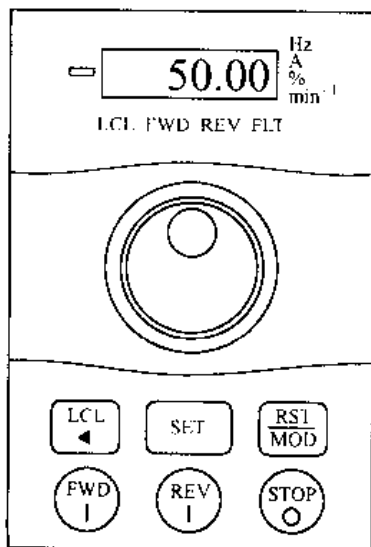
由 RA、FA、FB 组成, RA 可接至 AC 220V 电路中; FA 和 FB 则只能接至 AC 125V 电路中。

#### 4. 多功能晶体管信号输出端

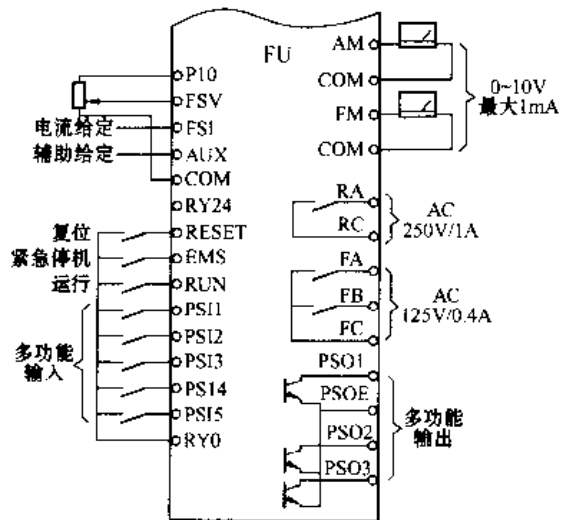
VT230S 系列变频器配置了 3 个晶体管输出的多功能信号输出端, 分别为 PSO1、PSO2 和 PSO3, 只能接至 30V 以下的直流电路中。

#### 5. 测量信号输出端

VT230S 系列变频器配置了 2 个测量信号的输出端: AM 和 FM, 都可以接 0~10V 的直流电压表, 其测量内容和量程都可以灵活预置。



附图 14-3 VT230S 的面板



附图 14-2 VT230S 的控制电路

## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

面板配置如附图 14-3 所示。

#### 1. 显示

VT230S 系列变频器的 LED 显示屏可以显示给定频率、运行电流、负荷率等参数。显示屏周围的指示灯有:

单位指示灯 (显示屏右侧):

Hz——显示频率;

A——显示运行电流;

%——显示负荷率;

min<sup>-1</sup>——显示转速。

负号指示灯 (显示屏左侧):

-——如显示屏上的物理量为负值, 则该指示灯亮。

状态指示灯（显示屏下方）：

LCL——键盘控制时亮；

FWD——正转运行时亮；

REV——反转运行时亮；

FLT——报警指示，变频器跳闸时亮。

## 2. 旋钮

在操作器的中部，用于调节转速。

## 3. 键盘

键盘中各键的功能如下：

**LCL/·**键——用于切换控制方式（键盘控制或外接端子控制）。

**SET**键——用于读出和写入各功能码中的数据码。

**RST/MOD**键——在正常情况下，用于模式切换；当变频器发生故障并修复后，用于使变频器复位。

**FWD**键——向变频器发出正转运行指令，仅在键盘运行方式下有效。

**REV**键——向变频器发出反转运行指令，仅在键盘运行方式下有效。

**STOP**键——当变频器正在运行时，向变频器发出停机指令。

### （二）键盘控制

#### 1. 接通电源

合上电源后，LED显示屏将显示“0.00”Hz。

#### 2. 运行

向顺时针方向旋转旋钮，使给定频率升至所需数值。

按**FWD**键或**REV**键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升到给定频率，电动机的运行方向由所按的键决定。

按**STOP**键，输出频率即按预置的降速时间下降至0Hz。

#### 3. 升速及降速

在运行过程中，顺时针方向旋转旋钮，频率按预置的升速时间上升；逆时针方向旋转旋钮，频率按预置的降速时间下降。

## 三、功能结构及预置流程

### （一）功能结构

VT230S系列变频器的功能分成5个功能组，每个功能组包含许多主功能，每个主功能又有若干个子功能，如附表14-1所示。

附表 14-1

VT230S系列变频器的功能结构

序号	功能组名称	主 功 能 码 范 围
1	显示功能组	D00 ~ D07, D11 ~ D12, D20 ~ D22, D30
2	A 功能组	A00 ~ A05, A10 ~ A11, A20
3	B 功能组	B00 ~ B03, B05 ~ B06, B10 ~ B11, B13 ~ B15, B17 ~ B25, B30 ~ B36, B40 ~ B45, B50 ~ B59
4	C 功能组	C00 ~ C15, C20 ~ C26, C30 ~ C35, C50 ~ C51
5	U 功能组	U00



## (二) 功能预置流程

VT230S 系列变频器的预置流程如附图 14-4 左侧所示。以把载波频率（功能码为 B01—7）从 15kHz 减小为 12kHz 为例，其显示屏的状态如附图 14-4 的右侧所示。

(1) 按 **RST/MOD** 键，使变频器进入编程模式，显示屏显示“A00—0”。

(2) 再按 **RST/MOD** 键，找出所需修改的功能组“B00—0”。

(3) 按 **LCL/◀** 键，找出所需修改的主功能码“B01—0”。

(4) 顺时针旋转旋钮，找出所需预置的功能码“B01—7”。

(5) 按 **SET** 键，读出该功能码中的原有数据码“15.0”，这时，显示屏将交替显示“B01—7”和“15.0”，并且最后位“0”将闪烁，表示可修改。

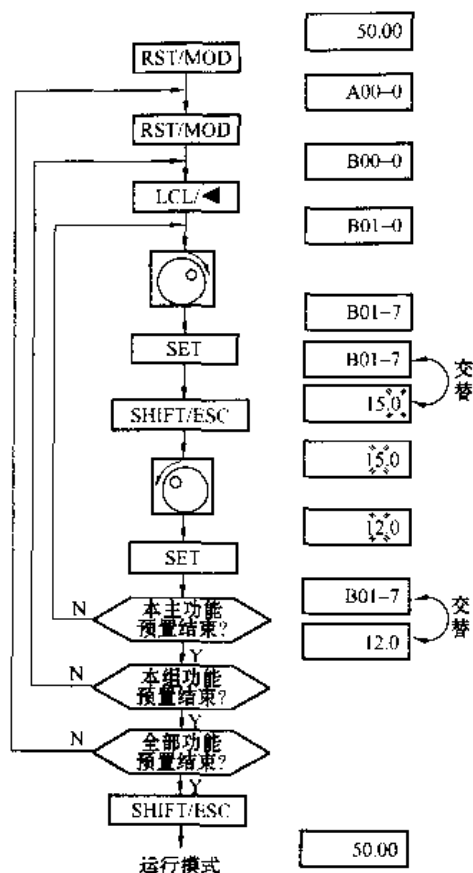
(6) 按 **SHIFT/ESC** 键，将可修改位移至“5”。

(7) 逆时针旋转旋钮，将“5”修改为“2”。

(8) 按 **SET** 键，写入新数据码，此时，新数据码“12.0”与“B01—7”将交替显示。

(9) 如本主功能预置尚未结束，则转入第 4 步，预置 B01 中的其他子功能；如本主功能的预置已经结束，但本功能组预置尚未结束，则转入第 3 步，预置 B02 以后的其他主功能；如本功能组的预置已经结束，但预置尚未全部结束，则转入第 2 步，预置其他功能组。

(10) 如预置全部结束，则按 **SHIFT/ESC** 键，使变频器转为运行模式。



附图 14-4 VT230S 的预置流程

## 附录 15 东芝 VF-A7 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 15-1 所示。

##### 1. 输入端

其标志为 L1、L2、L3，接电源进线。

##### 2. 输出端

其标志为 U、V、W，接电动机。

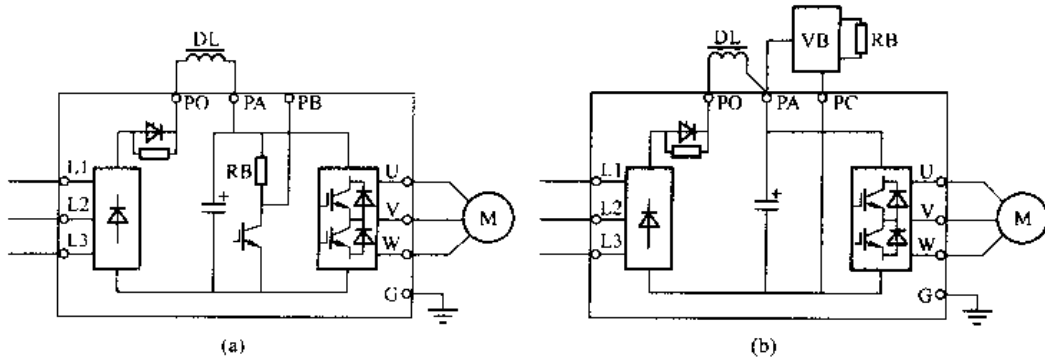
##### 3. 直流电抗器

直流电抗器接至 PO（整流桥输出端）与 PA（直流正端）之间。出厂时 PO 与 PA 之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。

##### 4. 制动电阻与制动单元接线端

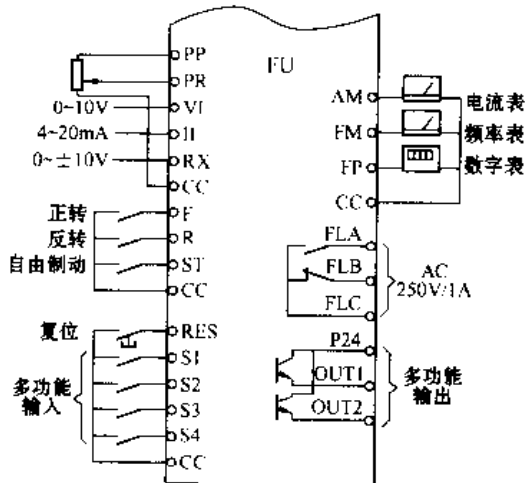
22kW 以下的 VF-A7 系列变频器，具有内接制动电阻和制动单元，如附图 15-1 (a) 所

示；30kW 以上变频器的制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接，如附图 15-1 (b) 所示。



附图 15-1 VF-A7 主电路  
(a) 22kW 以下；(b) 30kW 以上

## (二) 控制电路



附图 15-2 VF-A7 的控制电路

由 FLA、FLB、FLC 组成，为继电器输出，可接至 AC 220V 电路中。

### 4. 多功能晶体管信号输出端

VF-A7 系列变频器配置了 2 个晶体管输出的多功能信号输出端，分别为 OUT1 和 OUT2，只能接至 30V 以下的直流电路中。

### 5. 测量信号输出端

VF-A7 系列变频器配置了 3 个测量运行参数的输出端：

AM——模拟量输出，测量变频器的输出电流；

FM——模拟量输出，测量变频器的输出频率；

FP——数字量输出，测量变频器的输出频率。

## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

面板配置如附图 15-3 所示。

#### 1. 显示

VF-A7 系列变频器的 LED 显示屏可以显示给定频率、运

如附图 15-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

变频器为外接频率给定提供给定电源（端子 PP，负端为端子 CC），信号输入端分别为端子 PR、VI（0~10V），端子 II（4~20mA）和端子 RX（0~±10V）。

#### 2. 输入控制端

F——正转控制端；

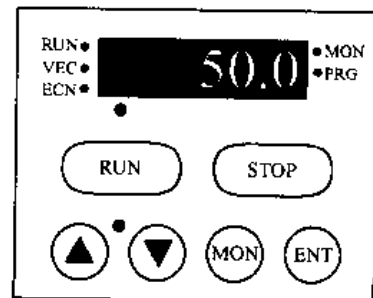
R——反转控制端；

ST——自由制动控制端；

RES——复位端；

S1~S4——可编程多功能控制端。

#### 3. 故障信号输出端



附图 15-3 VF-A7 的面板

行电流、输入电压、输出电压等参数。显示屏周围的指示灯有：

- MON——显示变频器处于运行模式；
- PRG——显示变频器处于编程模式；
- RUN——显示变频器正在运行；
- VEC——显示变频器正在以矢量控制方式运行；
- ECN——显示变频器正在以节能方式运行；
- RUN 键上方的指示灯——显示 RUN 键有效；

▲键和▼键上方的指示灯——显示用这两个键控制频率的升降。

## 2. 键盘

键盘中各键的功能如下：

**RUN** 键——在键盘控制方式下，用于控制变频器的运行。

**STOP** 键——在键盘控制方式下，用于控制变频器的停止。

▲键和▼键——在键盘控制方式下，用于控制变频器的给定频率。

**MON** 键——用于模式切换。

**ENT** 键——用于读出和写入各功能码中的数据码。

### (二) 键盘控制

如附图 15-4 所示。

#### 1. 接通电源

合上电源后，LED 显示屏将显示“0.0”Hz。

#### 2. 进行频率给定

按▲键，使给定频率升至所需数值，按 ENT 键，确认由▲键给定的频率。

#### 3. 运行

按 RUN 键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升到给定频率。

#### 4. 升速及降速

按▼键，频率按预置的降速时间下降；按▲键，频率按预置的升速时间上升。

#### 5. 停止

按 STOP 键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

#### 6. 查看运行数据

如附图 15-5，在运行状态下，显示屏显示运行频率，设为“50.0”；

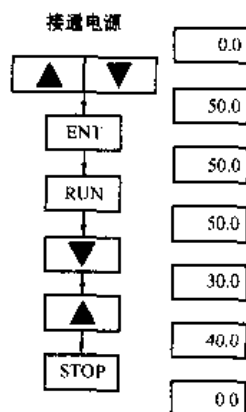
按 MON 键 2 次，显示屏将显示运行方向“Fr.F”；

按▲键，显示内容切换为给定频率值“50.0”；

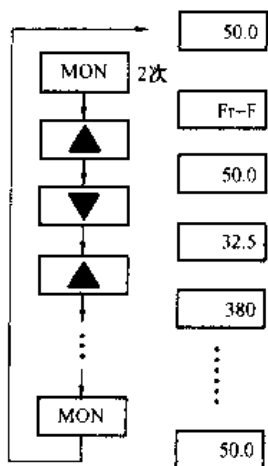
再按▲键，显示内容切换为输出电流，设为“32.5”；

又按▲键，显示内容切换为输入电压，设为“380”；

又按▲键，显示内容切换为输出电压，设为“380”；



附图 15-4 VF-A7 键盘控制



附图 15-5 更改显示内容

如此，每按一次▲键，就切换一个显示内容，共可查看 24 个内容（包括故障显示内容）。

当需要查看的内容都查看完了时，可按 MON 键，变频器即切换为初始状态，即显示运行频率。

### 三、功能结构及预置流程

#### （一）功能结构

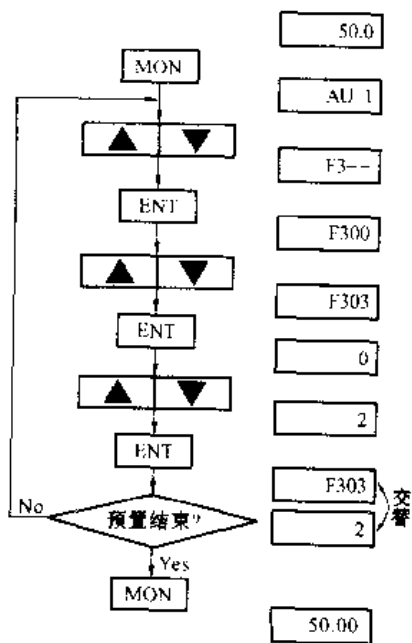
VF-A7 系列变频器分基本功能和扩展功能两大功能块，扩展功能中又有 36 个功能组，各功能组的名称及功能码范围如附表 15-1 所示。

附表 15-1 东芝 VF-A7 系列变频器的功能结构

序号	功能组名称	功能码范围	序号	功能组名称	功能码范围
1	输出频率信号功能组	F100 ~ F102	17	切换功能	F354 ~ F358
2	输入信号选择功能组	F103 ~ F107	18	PID 控制功能	F360 ~ F366
3	输入端子功能选择	F110 ~ F136	19	位移控制功能	F367 ~ F373
4	端子响应时间设定功能组	F140 ~ F166	20	矢量控制功能	F374 ~ F377
5	基本功能 2 功能组	F170 ~ F181	21	多挡速运行功能	F380 ~ F395
6	V/F 设定功能组	F190 ~ F199	22	电动机参数设定功能	F400 ~ F414
7	外接频率给定信号设定功能组	F200 ~ F237	23	转矩控制功能	F420 ~ F433
8	运行频率设定功能	F240 ~ F243	24	转矩限制功能	F440 ~ F450
9	直流制动功能	F250 ~ F254	25	第 2 加减速功能	F500 ~ F517
10	点动功能	F260 ~ F261	26	程序控制功能	F520 ~ F599
11	回避频率设定功能	F270 ~ F275	27	保护功能	F600 ~ F630
12	多挡速设定功能	F287 ~ F294	28	特殊模拟输入功能	F650 ~ F654
13	载波频率设定功能	F300	29	辅助给定功能	F660 ~ F661
14	异常情况自处理功能	F301 ~ F311	30	测量信号输出功能	F670 ~ F677
15	负荷分配设定功能	F320 ~ F324	31	面板参数设定功能	F700 ~ F730
16	升降机控制功能	F330 ~ F341	32	通信功能	F800 ~ F857

#### （二）功能预置流程

VF-A7 系列变频器的预置流程如附图 15-6 左侧所示。以把跳闸后的再试次数（功能码为 F303）从 0 次增加为 2 次为例，其显示屏的状态如附图 15-6 右侧所示。



附图 15-6 VF-A7 的预置流程

(1) 按 MON 键，使变频器进入编程模式，显示屏显示“AU 1”；

(2) 按▲键或▼键，使变频器进入扩展功能块的 F3 功能组，显示屏显示“F3——”；

(3) 按 ENT 键，进入该功能组，显示屏显示“F300”；

(4) 按▲键或▼键，找出所需修改的功能组“F303”；

(5) 按 ENT 键，读出原有数据码“0”；

(6) 按▲键或▼键，将数据码修改为“2”；

(7) 按 ENT 键，写入新数据码，这时，新数据码“2”与功能码“F303”交替显示；

(8) 如功能预置尚未结束，则转入第 2 步；

(9) 如预置全部结束，则按 MON 键，使变频器转为运行模式。

## 附录 16 LG-iS5 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 16-1 所示。

##### 1. 输入端

其标志为 R、S、T，接电源进线。

##### 2. 输出端

其标志为 U、V、W，接电动机。

##### 3. 制动电阻接线端

LG-iS5 系列变频器对于制动电阻 RB 与制动单元 VB 的安排如下：

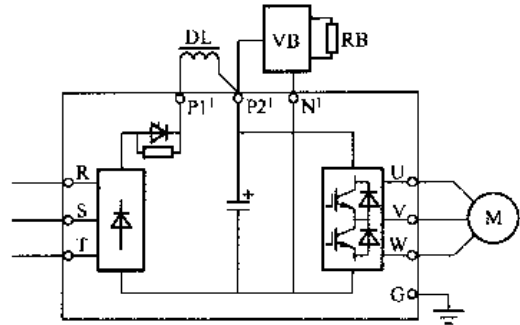
(1) 0.8 ~ 3.7kW——有内置制动电阻 RB 与制动单元 VB。

(2) 7.5kW——只有内置制动单元 VB，制动电阻 RB 须外配。

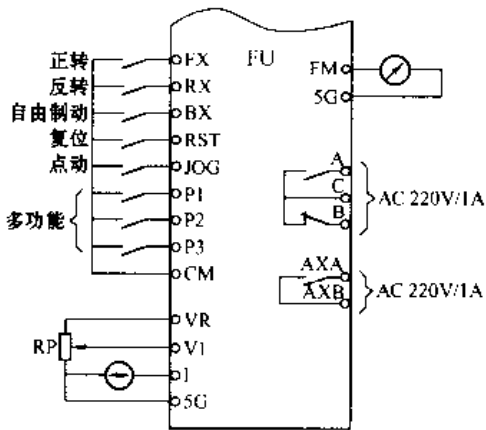
(3) 11 ~ 22kW——制动电阻 RB 与制动单元 VB 均需外接，如附图 16-1 所示。

##### 4. 直流电抗器

直流电抗器 DL 接至 P1<sup>1</sup>（整流桥输出端）与 P2<sup>1</sup>（直流正端）之间，如图 16-1 所示。出厂时 P1<sup>1</sup> 与 P2<sup>1</sup> 之间有一短路片相连，需要接电抗器时应将短路片拆除。



附图 16-1 LG-iS5 主电路



附图 16-2 LG-iS5 控制电路

RST——复位控制端；

JOG——点动控制端；

PI ~ P3——可编程多功能输入控制端。

#### 3. 运行状态输出信号端

A、B、C——变频器故障信号，为继电器输出，可接至 AC 220V 电路中；

AXA——多功能输出控制端，继电器输出，可接至 AC220V 电路中；

FM——测量信号输出端。

#### (二) 控制电路

如附图 16-2 所示。

##### 1. 外接频率给定端

V1 为 0 ~ 10V 电压信号给定端；I 为 4 ~ 20mA 电流信号给定端。

VR 和 5G 分别是变频器内部给定电源的“+”端和“-”端。

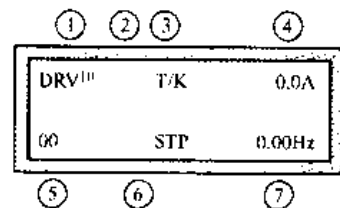
##### 2. 输入控制端

LG-iS5 系列变频器配置了如下的输入控制端：

FX——正转控制端；

RX——反转控制端；

BX——自由制动控制端；



附图 16-3 LG-iS5 显示屏

## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

#### 1. LCD 显示屏

其显示内容如附图 16-3 所示。

(1) 在运行模式下, 各符号的主要含义如附表 16-1 所示。

附表 16-1 运行状态下的显示

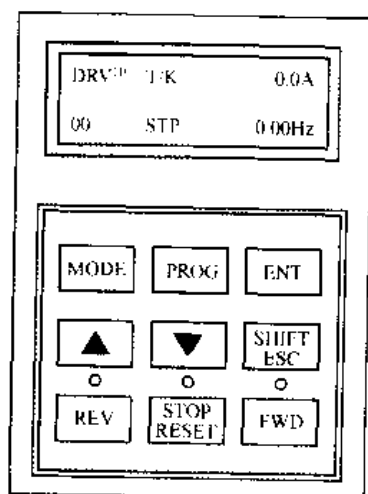
位置号	显示内容	符号含义
①	功能组的代号	
②	运行和停止的控制方式	K: 键盘控制 T: 输入端子控制 O: 扩展板控制
③	频率给定方式	K: 键盘给定 V: 输入端子电压给定 I: 输入端子电流给定 U: 升/降速端子的升速给定 D: 升/降速端子的降速给定 S: 升/降速端子停止运行 O: 扩展板给定 X: 子板给定 J: 点动给定 1—8: 步频给定
④	输出电流	
⑤	功能码	
⑥	运行状态	STP: 停止 FWD: 正转 REV: 反转 直流 B: 直流制动 LOP、LOR、LOV、LOI、LOS: 数据码丢失
⑦	频率	停止时: 显示给定频率 运行时: 显示实际输出频率

(2) 在编程模式下, 各符号的主要含义如下:

- ①——功能组的代号;
- ②——功能码;
- ③——功能的含义;
- ④——数据码。

#### 2. 键盘配置

如附图 16-4 所示:



附图 16-4 LG-IS5 的面板

**MODE**——功能组别切换键。

**PROG**——模式转换及读出键, 在编程模式下, 当已经找到相关的功能码时, 按此键, 可读出该功能码内的原有数据。

**ENT**——写入键, 当数据进行修改后, 按此键, 则将修改后的数据写入, 以确认修改后的数据。

▲和▼——在运行模式下，用于改变运行频率，在编程模式下用于切换功能码和修改数据码。

SHIFT/ESC——在编程模式下，用于移动修改位的光标；在编程结束时，用于返回至DRV00功能组。

FWD——正转运行键，仅在键盘控制时有效。

REV——反转运行键，仅在键盘控制时有效。

STOP/RESET——停止、复位键。在运行过程中，按此键，则变频器的输出频率将按预置的降速时间下降至0Hz；当变频器发生故障又修复后，在重新开机前，须按此键，使变频器复位。当变频器处于故障状态时，此键的LED闪烁。

### (二) 键盘控制

如附图 16-5 所示。

#### 1. 运行

(1) 接通电源后，LCD 显示屏显示变频器处于键盘控制方式下的停止状态；

(2) 按▲键，使给定频率上升至需要的值（图中为 50Hz）；

(3) 按RUN键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升，一直上升到上次停机前的频率或新预置的频率，电动机正转。

#### 2. 升速及降速

按▼键，频率按预置的降速时间下降，设下降为 30Hz；按▲键，频率按预置的升速时间上升，设上升至 40Hz。

#### 3. 停止

再按STOP/RESET键，输出频率即按预置的降速时间下降至0Hz。

### 三、功能结构及预置流程

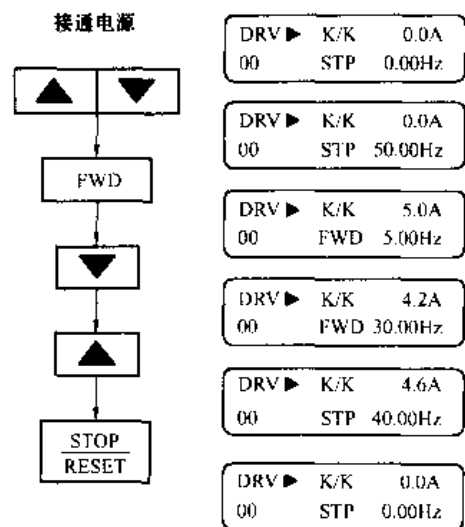
#### (一) 功能结构

LG-iS5 系列变频器的功能结构如附表 16-2 所示。

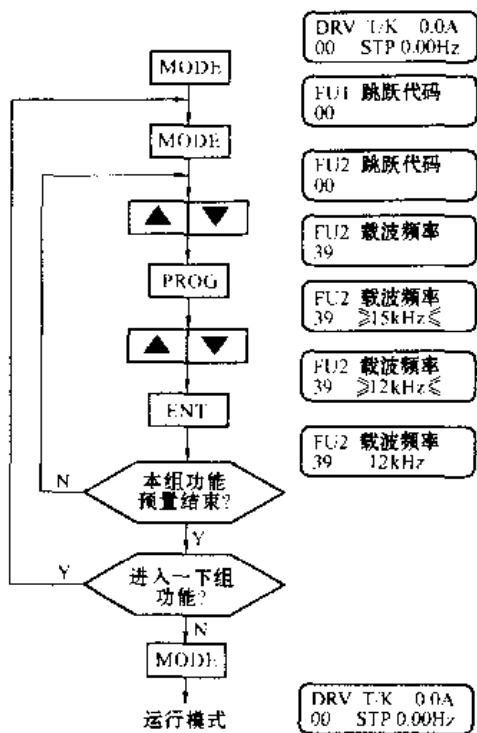
附表 16-2 LG-iS5 系列变频器的功能结构

序号	功能组名称	功能码范围
1	基本功能组 (DRV)	DRV—00 - DRV—25
2	扩展功能 1 组 (FU1)	FU1—00 ~ FU1—60, FU1—99
3	扩展功能 2 组 (FU2)	FU2—00 ~ FU2—94, FU2—99
4	输入/输出组 (I/O)	I/O—00 ~ I/O—97, I/O—99
5	外接端子功能组 (EXT)	EXT—00 ~ EXT—43, EXT—99
6	通信功能组 (COM)	COM—00 ~ COM—52, COM—99
7	应用功能组 (APP)	APP—00 ~ APP—34

功能组之间，通过按MODE键进行切换。每按一次，即按表中顺序切换一个功能组如下：DRV→FU1→FU2→I/O→EXT→COM→APP。



附图 16-5 LG 的键盘控制



附图 16-6 LG-iS5 的预置流程

功能预置已经结束，则按 **MODE** 键，即转为运行模式。

## (二) 功能预置流程

LG-iS5 系列变频器的预置流程如附图 16-6 左侧所示，以把载波频率（功能码为 FU2—39）从 15kHz 减小为 12kHz 为例，其显示屏的状态如附图 16-6 右侧所示。

(1) 按 **MODE** 键，使变频器进入编程模式，显示屏显示第 1 功能组“FU1—00”。

(2) 再按 **MODE** 键，使变频器进入第 2 功能组“FU2—00”。

(3) 按 **▲**、**▼** 或 **◀** 键，找出所需预置的功能码“FU2—39”。

(4) 按 **PROG** 键，读出该功能码中的原有数据码“15kHz”。

(5) 按 **▲**、**▼** 或 **◀** 键，把数据码调整为“12kHz”。这时，新数据“12kHz”将处于闪烁状态。

(6) 按 **ENT** 键，写入新数据码，“12kHz”不再闪烁。

(7) 如功能预置未结束，则转入第 2 步；如功能预置已经结束，则按 **MODE** 键，即转为运行模式。

## 附录 17 ABB-ACS 600 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

主电路与控制模式无关，如附图 17-1 所示。

#### 1. 输入端

其标志为 R、S、T，接电源进线。

#### 2. 输出端

其标志为 U、V、W，接电动机。

#### 3. 制动电阻接线端

标志为 UDC+、UDC-，接制动电阻。

ABB-ACS 600 系列变频器的制动单元作为选件，可内置于壁挂式单元内部。

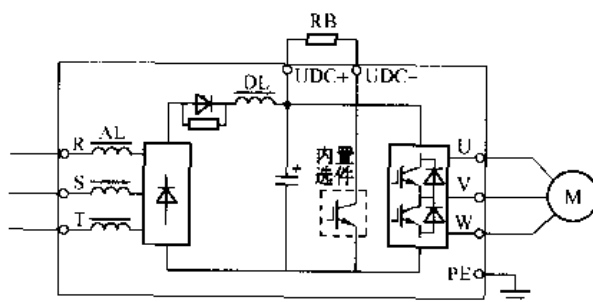
#### 4. 电抗器

ABB-ACS 600 系列变频器内部都配置了交流电抗器（容量较小者）或直流电抗器（容量较大者），外部不必再配。

#### (二) 控制电路

以工厂“应用示例（宏）”为例，如附图 17-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端



附图 17-1 ABB-ACS600 主电路



AI1、AI2、AI3 均为模拟给定信号输入端。

其中，“AI1 +”和“AI1 -”之间可输入电压给定信号（0~10V），一般作为转速给定信号；“AI2 +”和“AI2 -”之间，以及“AI3 +”和“AI3 -”之间是电流给定信号（0~20mA），一般输入过程反馈信号。

### 2. 数字输入控制端

由 DI1 ~ DI6 组成，均为开关量输入。每个控制端的具体功能通过调用不同的“应用示例（宏）”预置确定，其出厂设定是：

- DI1—启动/停止选择；
- DI2—正转/反转选择；
- DI4—加速/减速选择；
- DI5、DI6—多挡转速控制端。

### 3. 运行状态输出信号端

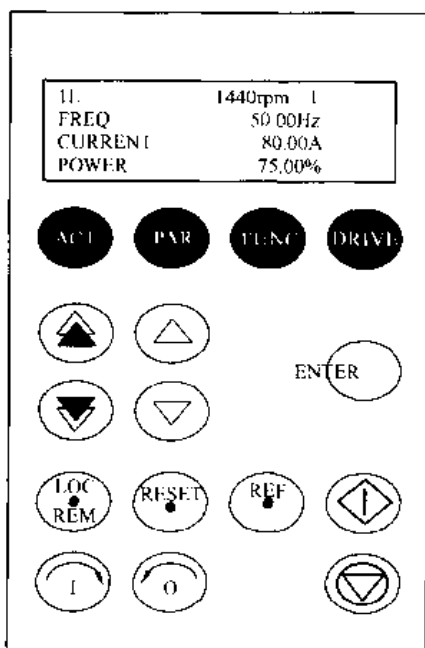
共有 3 组：RO11 ~ RO13、RO21 ~ RO23、RO31 ~ RO33，均为继电器输出。

### 4. 测量信号输出端

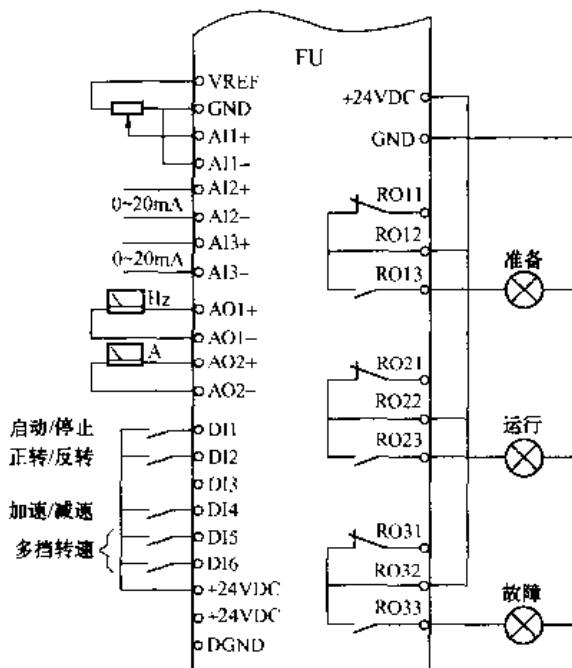
AO1——电动机转速测量信号，模拟量输出。0~20mA 对应 0~ $n_{MN}$ （ $n_{MN}$ 是电动机的额定转速）。

AO2——电动机电流测量信号，模拟量输出。0~20mA 对应 0~ $I_{MH}$ （ $I_{MH}$ 是变频器预置的上限电流）。

## 二、操作面板及键盘控制



附图 17-3 ABB-ACS600 面板



附图 17-2 ABB-ACS600 控制电路

### （一）面板配置

面板配置如附图 17-3 所示。

#### 1. 显示

ABB-ACS 600 系列变频器使用 LCD 显示，在运行状态下，可同时显示 4 行默认信息：

第 1 行——显示拖动系统的状态和给定的电动机转速；

第 2 行——显示变频器的输出频率；

第 3 行——显示实际运行电流；

第 4 行——显示实际负荷功率。

#### 2. 键盘

ACT——实际操作模式切换键；

PAR——编程模式切换键；

FUNC——特殊功能切换键；

DRIVE——单元选择切换键；

▲和▼——功能组别切换及数据码快速切换键；

△和▽——数据码或数值的切换键；

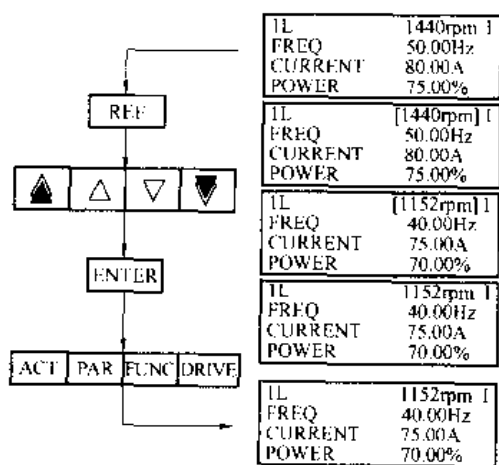
ENTER——确认数据操作和写入键；

LOC/REM——控制方式切换键；

RESET——故障的复位键；

REF——更改给定切换键；

<|>和(▽)——启动和停止键；



附图 17-4 改变给定频率的流程

ABB-ACS 600 系列变频器须通过 REF 键才能改变给定频率，其流程如附图 17-4 左侧所示；今以将给定频率从 50Hz 修改为 40Hz 为例，显示屏的状态如附图 17-4 右侧所示。

(1) 按 REF 键，使变频器进入频率给定修改模式，这时，转速给定两端出现 [ ]。

(2) 按 △ 和 ▽ 键，或快速更改键 ▲ 和 ▼，将给定频率修改为 40Hz。

(3) 按 ENTER 键，确认所修改的数据，转速显示两端的 [ ] 消失。

(4) 按 ACT、PAR、FUNC、DRIVE 键中的任意一个，即转为运行模式。

#### 4. 查看运行数据

ABB-ACS 600 系列变频器的 LCD 显示屏在运行状态下，同时显示 4 行数据：转速、频率、电流和功率。如需要更改其中某一项显示时，其流程如附图 17-5 所示。以把电流显示修改为转矩显示为例。

(1) 按 △ 和 ▽ 键，将光标移至 CURRENT 处；

○和○——更改旋转方向键。

#### (二) 键盘控制

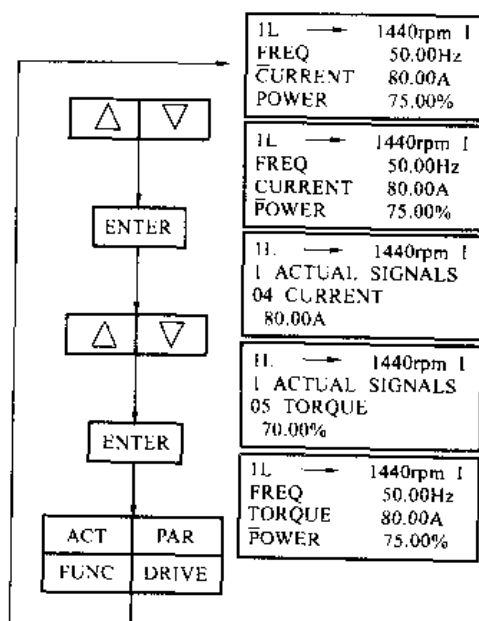
##### 1. 接通电源

合上电源后，如 LCD 显示屏的第 1 行显示“R”，则说明变频器处于“外接端子控制”方式；按 LOC/REM 键，显示屏的第 1 行显示“L”，变频器切换为“键盘控制”方式。

##### 2. 运行

按 <|> 键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升，一直上升到与给定频率相符时为止。按 (▽) 键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

##### 3. 改变给定频率



附图 17-5 查看运行数据

(2) 按 **ENTER** 键，进入显示信号选择功能。由附图 17-5 可知，电流信号的功能码是 104；

(3) 按 **△** 和 **▽** 键，将功能码更改为 105，即为显示转矩的功能；

(4) 按 **ENTER** 键，确认显示转矩，则显示屏上的“CURRENT”已被更改为“TORQUE”；

(5) 如欲恢复原来的显示项目，则按 **ACT**、**PAR**、**FUNC**、**DRIVE** 中的任意一个键即可。

### 三、功能结构及预置流程

#### (一) 功能结构

ABB-ACS600 系列变频器有 4 个功能块，分别由面板上的 **ACT**、**PAR**、**FUNC**、**DRIVE** 键进行切换，如附图 17-6 所示。

在信号显示模式下：

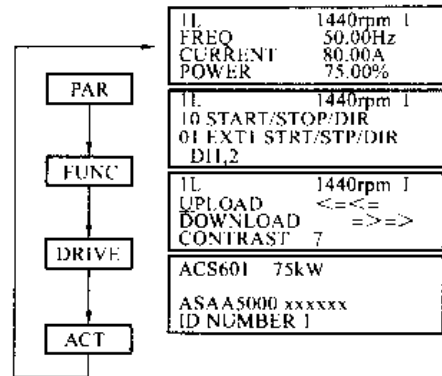
按 **PAR** 键——切换成预置编程模式；

按 **FUNC** 键——切换成特殊功能模式；

按 **DRIVE** 键——切换成拖动单元切换模式；

按 **ACT** 键——返回信号显示模式。

在预置编程模式下，其功能结构如附表 17-1 所示。



附图 17-6 切换功能块

附表 17-1

ABB-ACS600 系列变频器的功能结构

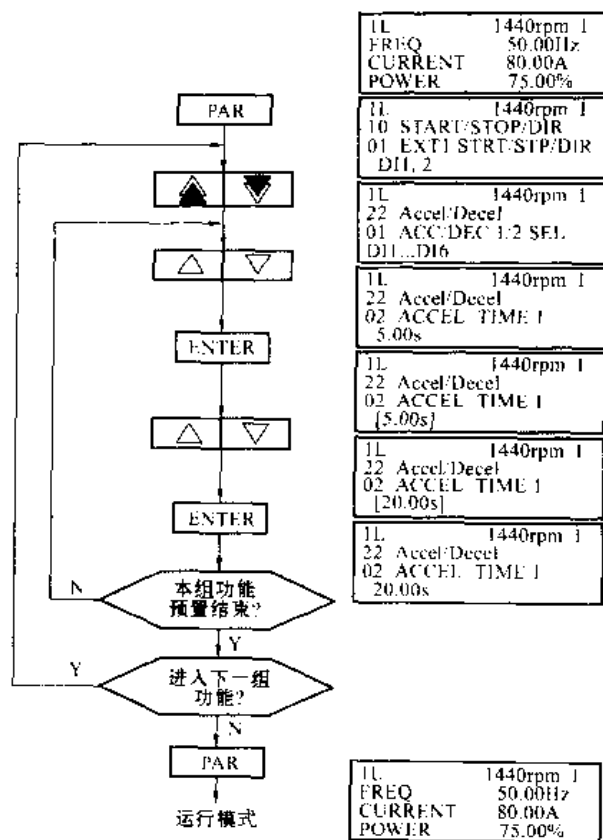
序号	功能组名称	功能码范围	序号	功能组名称	功能码范围
1	指令功能组	10.01 ~ 10.03	14	电动机控制功能组	26.03 ~ 26.03
2	给定功能组	11.01 ~ 11.08	15	故障保护功能组	30.01 ~ 30.20
3	多档速功能组	12.01 ~ 12.16	16	故障保护自动复位功能组	31.01 ~ 31.07
4	模拟给定范围组 (包括滤波时间)	13.01 ~ 13.15	17	状态监视功能组	32.01 ~ 32.18
5	继电器输出功能组	14.01 ~ 14.03	18	软件信息功能组	33.01 ~ 33.03
6	模拟量输出功能组	15.01 ~ 15.10	19	速度显示功能组	34.01 ~ 34.02
7	系统控制功能组	16.01 ~ 16.07	20	PID 控制功能组	40.01 ~ 40.12
8	运行极限功能组	20.03 ~ 20.08	21	通信功能组	50.01 ~ 50.05
9	启、停功能组	21.01 ~ 21.06	22	接口地址选择功能组	70.01 ~ 70.03
10	升速、降速功能组	22.01 ~ 22.07	23	现场总线给定功能组	90.01 ~ 90.03
11	速度控制功能组	23.01 ~ 23.06	24	现场总线数据功能组	92.01 ~ 92.06
12	转矩控制功能组	24.01 ~ 24.02	25	模块选择功能组	98.01 ~ 98.06
13	回避频率功能组	25.01 ~ 25.07			

为了便于用户掌握，ABB-ACS600 系列变频器根据常见的应用方式，设置了 5 种基本的“应用示例”（说明书中称为“应用宏”）：工厂应用示例、手动/自动切换控制应用示例、PID 控制应用示例、转矩控制应用示例和程序控制应用示例。

出厂时，针对不同的应用示例，已经对部分功能进行了设定。因此，用户在进行功能预置时，应首先选择一种“应用示例”，并分析是否有必要在变频器出厂设定的基础上进行修改。

#### (二) 功能预置流程

ABB-ACS600 系列变频器的预置流程如附图 17-7 左侧所示，以把升速时间（功能码为 22.02）从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 17-5 右侧所示。



附图 17-7 ABB-ACS600 预置流程

(1) 按 **PAR** 键, 使变频器进入编程模式, 首先进入“10”功能组, 显示屏显示“10.01”功能。

(2) 按 **▲** 或 **▼** 键, 找出需要修改的功能组“22”。

(3) 按 **△** 或 **▽** 键, 找出需要修改的功能码“22.02”, 显示屏同时显示出其数据码为“5.00”。

(4) 按 **ENTER** 键, 确认该数据需要修改, 数据码“5.00”变为“[5.00]”。

(5) 按 **△** 或 **▽** 键, 将数据码修改为“[20.00]”。

(6) 按 **ENTER** 键, 写入新修改的数据, 数据码“[20.00]”变为“20.00”。

(7) 如本组功能的预置工作尚未结束, 则转第3步。

(8) 如本组功能的预置工作已经结束, 需要预置下一功能组时, 则转第2步。

(9) 如预置工作全部结束, 则按 **PAR** 键, 返回至运行状态。

## 附录 18 VACON-CX 系列变频器

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 18-1 所示。

##### 1. 输入端

其标志为 L1、L2、L3, 接电源进线。

##### 2. 输出端

其标志为 U、V、W, 接电动机。

##### 3. 制动电阻接线端

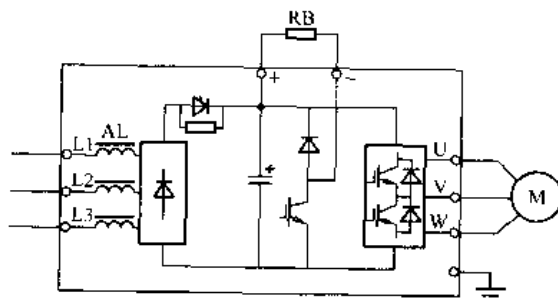
VACON-CX 系列变频器大部分都有内部制动单元, 只需在外部接入制动电阻 RB 即可。如附图 18-1 所示。

##### 4. 直流电抗器

VACON-CX 系列变频器内部接有交流电抗器, 对电源的波形干扰较小。因此, 在一般情况下, 外部已没有必要再装电抗器了。

#### (二) 控制电路

如附图 18-2 所示。



附图 18-1 VACON-CX 主电路

### 1. 外接频率给定端

Uin (2号端) 为 0~10V 电压信号给定端; lin+ (4号端) 和 lin- (5号端) 为 4~20mA 电流信号给定端。

+10V (1号端) 和 GND (3号端) 分别是变频器内部给定电源的“+”端和“-”端。

### 2. 输入控制端

VACON-CX 系列变频器配置了如下的输入控制端:

DIA1 (8号端) ——正转控制端;

DIA2 (9号端) ——反转控制端;

DIA3 (10号端) ——外部故障输入端;

DIA4 (14号端)、DIA5 (15号端) ——可编程多功能输入控制端;

DIA6 (16号端) ——复位控制端。

### 3. 运行状态输出信号端

RO1 ——多功能输出控制端, 继电器输出;

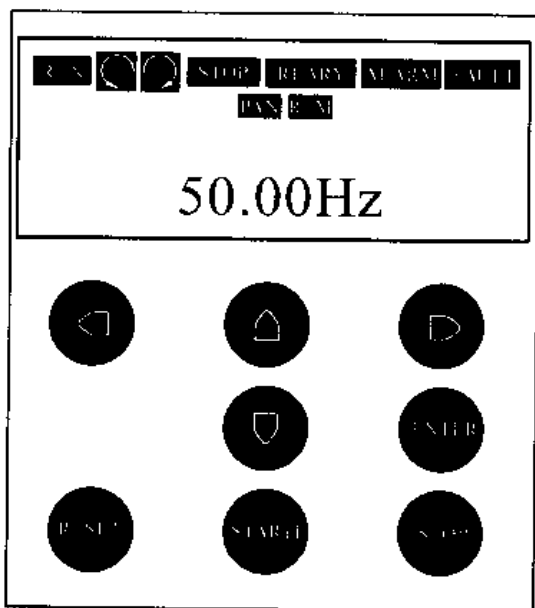
RO2 ——变频器故障信号输出端, 继电器输出, 可接至 AC 220V 电路中;

Iout ——测量信号输出端。

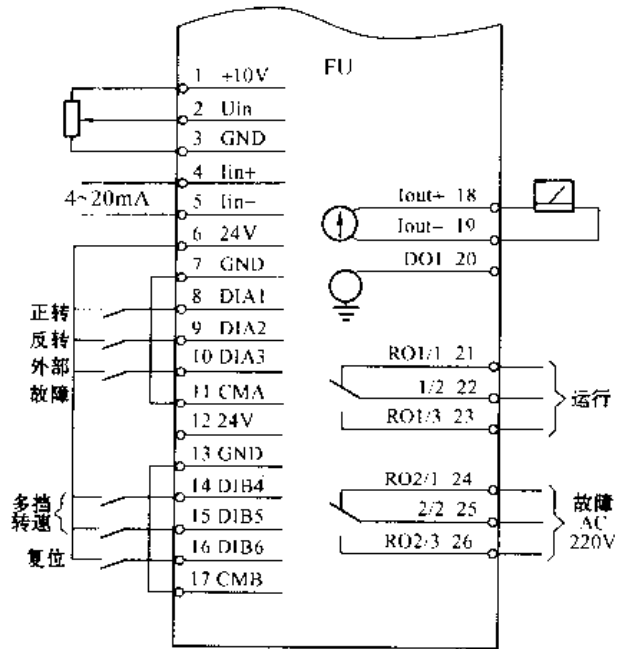
## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

面板配置如附图 18-3 所示。



附图 18-3 VACON-CX 面板



附图 18-2 VACON-CX 控制电路

### 1. LCD 显示屏

VACON-CX 系列变频器只配置了 LCD 显示屏, 显示内容十分丰富。就运行数据而言, 可显示频率、转速、输出电流、输出电压、电动机的转矩和功率等 20 项。上排的状态指示灯的指示内容有:

RUN ——显示正在运行;

⊙ ——显示旋转方向;

STOP ——显示停止状态;

REARM ——显示变频器已经接通电源, 准备好运行;

ALARM ——显示变频器运行异常, 正在报警;

FAULT ——显示变频器已经因故障而跳闸;

PAN ——显示键盘控制有效;

REM ——显示外接端子控制有效。

## 2. 键盘配置

◀键和▶键——功能组切换键。

△键和▽键——在运行状态下，是频率的升、降键；在编程状态下，是功能码和数据码的切换键。

START键——启动键。

STOP键——停止键。

ENTER键——写入键，在编程模式下，当数据进行修改后，按此键，则将修改后的数据写入，以确认修改后的数据。

RESET——复位键。

### (二) 键盘控制

#### 1. 运行

在键盘控制方式下，接START键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升，一直上升到上次停机前的频率或新预置的频率。

再按STOP键，输出频率即按预置的降速时间下降至0Hz。

#### 2. 升速及降速

按△键，频率按预置的升速时间上升；按▽键，频率按预置的降速时间下降。

## 三、功能结构及预置流程

### (一) 功能结构

VACON-CX 系列变频器的功能分为7个功能块，其功能结构如附表 18-1 所示。

附表 18-1 VACON-CX 系列变频器的功能结构

序号	功能块	功能组	功能码范围
1	显示功能块		V1 ~ V20
2	参数功能块	基本功能组	P1.1 ~ P1.17
		输入信号功能组	P2.1 ~ P2.7
		输出与监控功能组	P3.1 ~ P3.12
		手动控制功能组	P4.1 ~ P4.9
		禁止频率功能组	P5.1 ~ P5.2
		电动机控制功能组	P6.1 ~ P6.9
		保护功能组	P7.1 ~ P7.6
	自动重合闸功能组	P8.1 ~ P8.3	
	风机、水泵特殊功能组	P9.1 ~ P9.19	
3	参考频率功能块		R1
4	可编程按钮功能块		B1 ~ B4
5	故障代码功能块		F1 ~ F9
6	故障史功能块		F1 ~ F9
7	报警代码功能块		A15 ~ A47

### (二) 功能预置流程

VACON-CX 系列变频器的预置流程如附图 18-4 左侧所示，以把升速时间（功能码为 P4.3）从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 18-4 右侧所示。

(1) 按▶键，使变频器进入编程模式，显示屏显示第 1 功能块“M1”。

(2) 按  $\Delta$  键或  $\nabla$  键, 调整至“M2”功能块 (参数功能块)。

(3) 再按  $\triangleright$  键, 使变频器进入“M2”功能块的“G1”功能组 (基本功能组)。

(4) 按  $\Delta$  键或  $\nabla$  键, 找出所需预置的功能组“G4”。

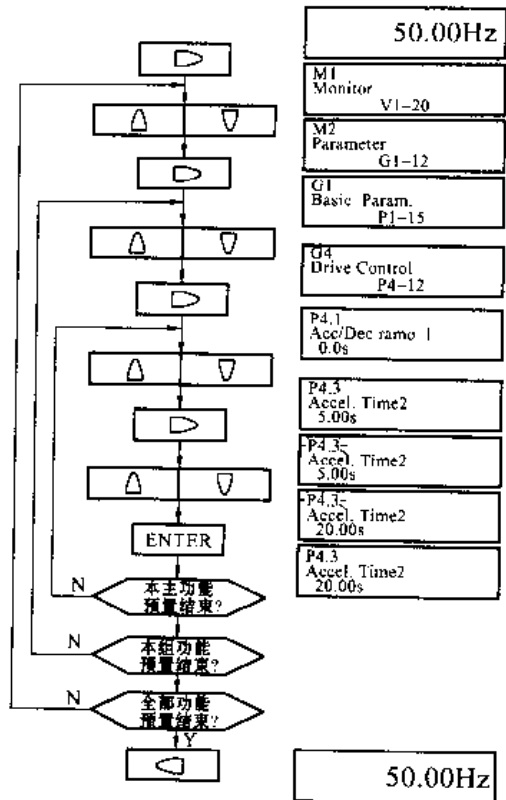
(5) 按  $\triangleright$  键, 进入“G4”功能组的第一个功能“P4.1”。

(6) 按  $\Delta$  键或  $\nabla$  键, 找出所需预置的功能码“P4.3”, 并显示其原数据码 (升速时间) 是“5.00s”。

(7) 按  $\triangleright$  键, 确认要修改此数据, 这时, 功能码“P4.3”闪烁。

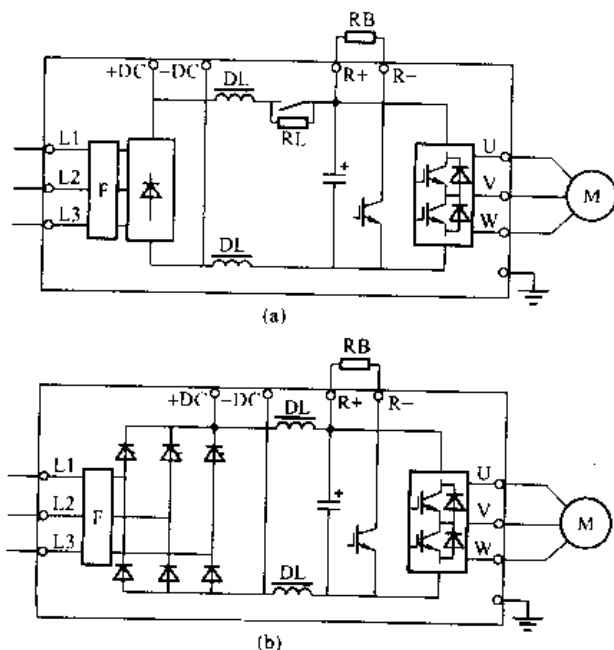
(8) 按  $\Delta$  键或  $\nabla$  键, 将数据码 (升速时间) 修改为“20.00s”, 这时, 功能码“P4.3”仍闪烁。

(9) 按  $\overline{\text{ENTER}}$  键, 写入新数据码, 功能码“P4.3”不再闪烁; 如“G4”功能组的预置尚未结束, 则转入第 6 步; 如“G4”功能组的预置已经结束, 但“M2”功能块预置尚未结束, 则转第 4 步; 如“M2”功能块的预置已经结束, 但其他功能块的预置尚未结束, 则转第 2 步; 如全部功能的预置都已结束, 则按  $\triangleleft$  键, 即转为运行模式。



附图 18-4 VACON-CX 的预置流程

## 附录 19 丹佛斯 VLT5000 系列变频器



附图 19-1 VLT5000 主电路

### 一、基本接线

#### (一) 主电路

如附图 19-1 所示。

#### 1. 输入端及整流电路

输入端的标志为 L1、L2、L3, 接电源进线。

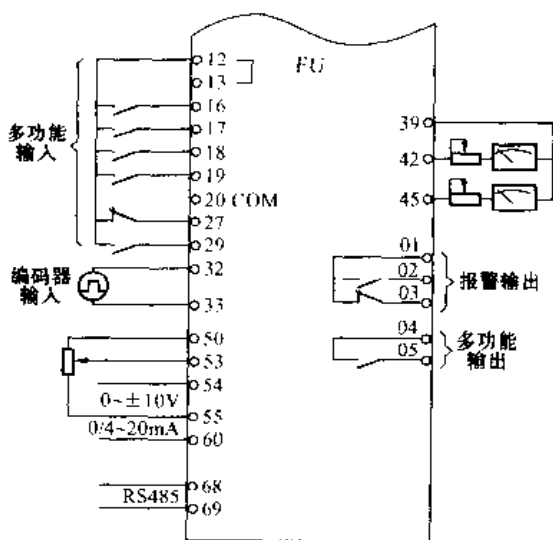
容量为 64.7kVA (配 45kW 电动机) 以下变频器的整流电路与其他变频器相同, 为 6 二极管三相全波整流电路; 容量大于 80.8kVA (配 55kW 电动机) 变频器的整流电路则为三相全波半控桥整流电路。在刚接通电源时, 对滤波电容器的冲击电流可以控制得较小。因而, 限流电阻 RL 被取消了。

#### 2. 输出端

输出端的标志为 U、V、W, 接电动机。

### 3. 制动电阻接线端

VLT5000 系列变频器在内部可配置制动单元, 这时, 只需在外部 (端子 R+ 和 R- 之间) 接入制动电阻 RB 即可。如附图 19-1 所示。



附图 19-2 VLT5000 控制电路

输入控制端 16~19、27、29、32、33 都是可编程多功能输入控制端, 它们的具体功能都由功能预置来决定; 端子 32、33 可接受脉冲信号 (包括编码器的转速反馈信号); 端子 68、69 则是 RS485 接口。

### 3. 运行状态输出信号端

端子 42、45——测量信号输出端;

端子 01~03——可编程继电器输出, 可接至 AC 240V (2A) 电路中;

端子 04、05——可编程继电器输出, 可接至 DC 30V (1A) 电路中。

## 二、操作面板及键盘控制

### (一) 面板配置

面板配置如附图 19-3 所示。

#### 1. LCD 显示屏

VLT 5000 系列变频器配置有 LCD 显示屏, 共有 4 行。

第 1 行除可以显示工作模式、内容提示外, 还可以显示运行数据, 如工艺参数给定、负荷率、以及工作电流等。

第 2 行主要显示工作频率。

第 3 行在编程模式下显示功能码及功能内容。

第 4 行在编程模式下显示数据码, 在运行模式下, 显示状态。

### 4. 直流电抗器和滤波器

VLT5000 系列变频器内接有两个直流电抗器, 分别接在整流桥的正、负两侧, 可使电流的高次谐波分量减少 40%。除此以外, 在电源进线和整流桥之间, 还接有较完善的滤波电路。因此, 对其他设备的干扰较小。

### (二) 控制电路

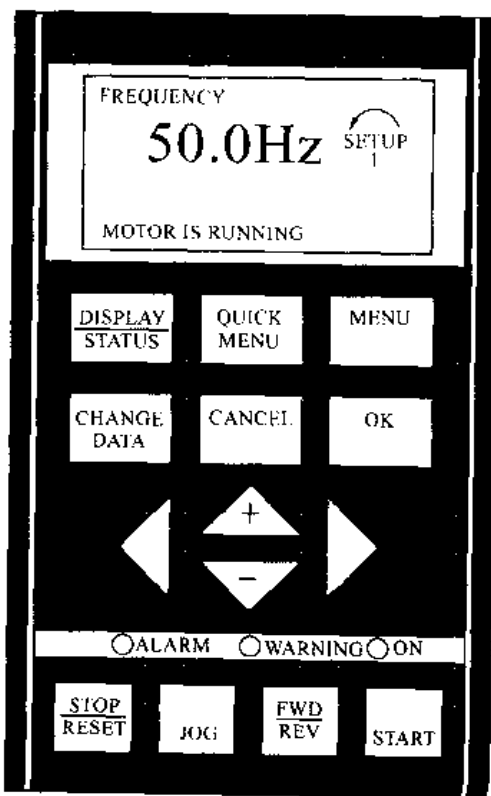
如附图 19-2 所示。

#### 1. 外接频率给定端

端子 53、54 都是 0~±10V 电压信号给定端; 端子 60 为 0~20mA 或 4~20mA 电流信号给定端。

端子 50 和 55 分别是变频器内部给定电源的“+”端和“-”端。

#### 2. 输入控制端



附图 19-3 VLT5000 面板



## 2. LED 指示灯

ALARM——显示变频器已经因故障而跳闸，正在报警。

WARNING——显示变频器运行异常。

ON——显示变频器已经接通电源。

## 3. 键盘配置

**DISPLAY/STATUS** 键——模式切换键。

**QICK MENU** 键——快速编程模式键。

**MENU** 键——编程模式键。

**CHANGE DATA** 键——确认修改数据键。

**CANCEL** 键——取消键，用于取消所修改的数据。

**OK** 键——写入键。

**△** 键和 **▽** 键——用于改变功能码和数据码。

**◀** 键和 **▶** 键——用于改变功能组或移动光标。

**STOP/RESET** 键——当变频器正在运行时，向变频器发出停机指令；当变频器发生故障并修复后，用于使变频器复位。

**JOG** 键——点动键。

**FWD/REV** 键——方向转换键。

**START** 键——开始运行键。

### (二) 键盘控制

#### 1. 运行

在键盘控制方式下，接 **START** 键，变频器的输出频率即按预置的升速时间开始上升，一直上升到上次停机前的频率或新预置的频率。

按 **STOP/RESET** 键，输出频率即按预置的降速时间下降至 0Hz。

#### 2. 升速及降速

按 **△** 键，频率按预置的升速时间上升；按 **▽** 键，频率按预置的降速时间下降。

## 三、功能结构及预置流程

### (一) 功能结构

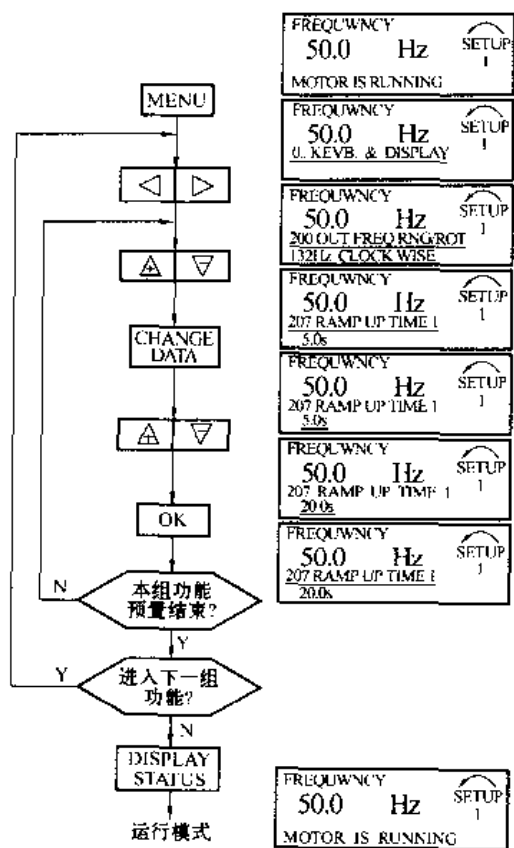
VLT5000 系列变频器的功能分为 7 个功能组，如附表 19-1 所示。

附表 19-1 VLT5000 系列变频器的功能结构

序号	功能组名称	功能码范围	序号	功能组名称	功能码范围
1	操作与显示功能组	001 ~ 019	5	特殊功能组	400 ~ 454
2	负载与电动机功能组	100 ~ 131	6	串行通信功能组	500 ~ 541
3	给定与极限功能组	200 ~ 234	7	技术功能组	600 ~ 631
4	输入与输出功能组	300 ~ 346			

### (二) 功能预置流程

VLT5000 系列变频器的预置流程如附图 19-4 左侧所示，以把升速时间（功能码为 207）



附图 19-4 VLT5000 预置流程

从 5s 增加为 20s 为例，其显示屏的状态如附图 19-4 右侧所示。

(1) 按 **MENU** 键，使变频器进入编程模式，显示屏显示第 1 功能组“0..”。

(2) 按 **△** 键或 **▽** 键，调整至第 3 功能组“200”（给定与极限功能组）。

(3) 按 **△** 键或 **▽** 键，找出所需的函数码“207”，显示数据码为 5.0s。

(4) 按 **CHANGE/DATA** 键，确认该数据码需要修改，数据码闪烁。

(5) 按 **△** 键或 **▽** 键，将数据码（升速时间）修改为“20.00s”，这时，数据码“20.00s”闪烁。

(6) 按 **OK** 键，写入新数据码，数据码“20.00s”不再闪烁；如第 3 功能组的预置尚未结束，则转入第 3 步；如第 3 功能组的预置已经结束，但全部功能预置尚未结束，则转第 2 步；如全部功能块的预置结束，则按 **DISPLAY/STATUS** 键，切换为运行模式。

## 参 考 文 献

- 1 韩安荣主编. 通用变频器及其应用. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- 2 冯焱生, 张森编著. 变频器的应用与维护. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- 3 杨兴瑶编著. 电动机调速的原理及系统. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- 4 曾毅等编著. 变频调速控制系统的设计与维护. 济南: 山东科学技术出版社, 1999.
- 5 [日] 安川电机编. インバータドライブ技術. 第2版. 東京: 日刊工新社, 1997.
- 6 [日] 久保岛毅监修. インバータ導入実践ガイド. 東京: 電氣書院, 1995.
- 7 [日] 鈴木茂雄編. 図解自動制御の基礎知識. 東京: 株式会社オーム社, 1987.
- 8 赵明、许翠编. 工厂电气控制设备. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- 9 余雷声主编. 电气控制与 PIC 应用. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- 10 赵秉衡. 工厂电气控制设备. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- 11 季合法主编. 小型三相异步电动机技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- 12 李恩林编著. 龙门刨床自动控制. 北京: 科学出版社, 1994.
- 13 《起重机械设计手册》编写组编. 起重机械设计手册. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- 14 广西机械工业学校主编. 金属切削机床. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- 15 张福恩等编著. 交流调速电梯原理、设计及安装维修. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- 16 张涵主编. 化工机器. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- 17 刘自放等编. 给水排水自动控制与仪表. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- 18 章名涛主编. 电机学. 北京: 科学出版社, 1977.
- 19 吴人榕. 电机学. 北京: 水利电力出版社, 1979.
- 20 郑忠杰、吴作海编. 电力电子变流技术. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 1999.