

## 摘要

随着机电一体化技术的不断完善，机器人技术已经在航空宇航制造、汽车制造、核工业等诸多劳动条件差、污染大、强度大的领域得到了越来越广泛的应用。但是工业机器人受自身重量的限制，制约了在一些限制重量的场合下的应用。因此，在保证负载和机器人基本性能的前提下，减轻机器人本体重量，是工业机器人需要解决的一个重要问题。本文结合 985 学科建设，对 6-DOF 轻型机器人进行研究。

根据机器人工作载荷大、重量轻的设计要求，结合其工作任务，设计了 6-DOF 垂直关节式机器人机构。为保证机器人具有良好的运动精度和控制性能，机器人采用了交流伺服电机驱动、13 位的绝对位置编码器以及 RV、谐波减速器和同步带传动相结合的传动方式。并且，在机构设计中，充分利用了 RV 减速器的结构特点来简化机器人的结构，减轻机体重量。同时还合理的配置了重心以减少转动惯量。之后，利用 Patran /Nastran 有限元分析软件来对该轻型工业机器人进行了静态有限元分析，利用分析结果对一些主要构件进行了相应改进。为了得到更精确的结果，引入柔性体模型对末端点进行了振动仿真。从仿真的结果看，机构末端的振动幅度不大，可以从机构上保证搬运和粗装配作业的顺利完成。

在机械本体设计基础上，建立了 D-H 坐标系，并基于此建立了机构的运动学模型。采用几何法和 D-H 方法，对基于工具坐标系下的机器人逆运动学模型进行了求解，并利用三次多项式法对机器人末端轨迹规划问题进行了初步探讨。

最后，构建了机器人的控制系统，编制了相应的控制软件。在考虑人机交互、系统安全的前提下，完成了初始化、运动控制、状态检测等功能，并在运行中对机器人设计指标进行了验证。

**关键词** 轻型；工业机器人；有限元分析

## Abstract

With the rapid development of mechatronic technology, industrial robots have been more and more widely used in astrogation, navigation, automobile, nuclear and other industries where there are poor working conditions, grave pollution and too much working load. Supported by 985 discipline construction program, this paper introduces how to design and manufacture a 6 DOF light industrial robot.

According to the requires of a light robot arm but a relative heavy load, A 6 DOF a vertical joint robot is designed to carry on some specified jobs. The robot is driven by AC servo-actuators, the RV reducers, harmonic reducers and synchronous belt are used in different joints according to their character to transfer motion, and the 13 bit absolute encoders are used for high precision position detection. Furthermore, such a design with excellent devices can ensure better motion precision and controllability and simplify robot arm's structure, which decreases the mass of robot and distribute the mass reasonably to reduce the moment of inertia. Then, some static finite element analysis of the light industrial are conducted using Patran /Nastran. Based on these results, some main components of the robot are improved. To get a more accurate outcome, flexible models are introduced to execute vibration experiment. From the experiment data, we can reach the conclusion that amplitude of vibration of the terminal part of robots is not too much, which can ensure that carry and assemble job can be accomplished fluently.

When mechanical design was finished, Denavit-Hartenberg coordinate systems are setup, based on which the system kinematics model is established. The inverse kinematics is solved utilizing the geometric and D-H methods, and the system inverse model based on the tool coordinate system is analyzed further. Via former work, a three-order polynomial method is discussed preliminarily for robot's trace planning.

At last, a robotic system was established using industrial computer, motion control card, actuator and motors. In the same time, corresponding software was also completed. Under the premise that friendly human machine interface and

system safety have be satisfied, functions of initialization, motion control and status detection were finished. Moreover, the design requirements, which are provided in the second chapter, are validated too.

**Key Words** Light, Industrial robot, Finite element analysis (FEA)

# 第1章 绪论

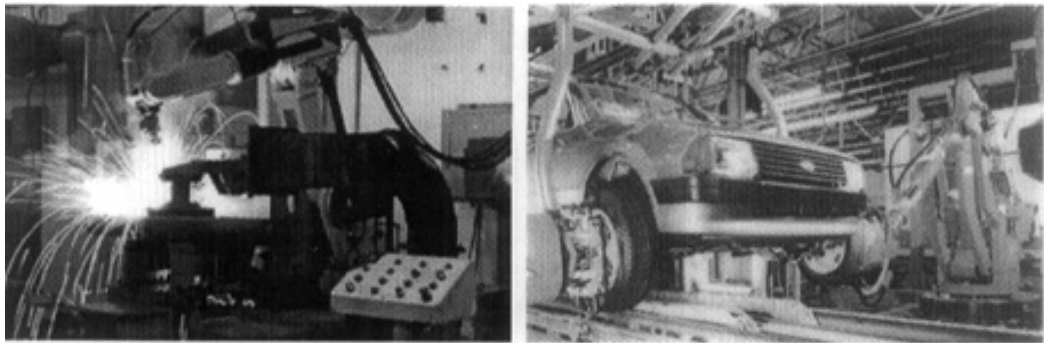
## 1.1 课题背景

自第一次世界大战以后，各国工业飞速发展，致使大量的劳动力在生产线上天天进行劳作，一方面浪费了大量的劳动力资源，加重了人类负担，尤其是高温、辐射、有毒的工作环境对劳动力的影响，另一方面产品的质量受到劳动力技术水平的影响，并增加了产品的成本，生产效率受到制约，直接影响人类社会的进步。当时人们在这种烦躁的体力劳动中就幻想有一种能替代人完成这样工作的机器。这是人类长期的一种愿望，也是机器人产生的一种客观的要求。而真正工业机器人的发展是在1947年美国橡树岭国家实验室在研究核燃料的时候<sup>[1]</sup>。众所周知，核燃料的X射线对人体伤害很大，必须有一台机器来完成核燃料搬运和处理等工作。因此在1947年产生了世界上第一台主从控制的机器人<sup>[2]</sup>。1947年以后，计算机电子技术发展迅速，各国开始利用当时的一些现代技术，进行机器人的研究。1962年美国研制成功PUMA通用示教再现型机器人。20世纪70年代，日本人将本国的汽车工业与机器人进行结合，将示教再现型的机器人实现了工业化，成功地用于汽车工业，使工业机器人正式的走向应用。

工业机器人是机器人学中的一个重要分支。工业机器人是集机械、电子、控制、计算机、信息和传感技术、人工智能及仿生学等多学科先进技术于一体的现代制造业重要的自动化装备，它由操作机（机械本体）、控制器、伺服驱动系统和检测传感装置构成，是一种仿人操作、自动控制、可重复编程、能在三维空间完成各种作业的机电一体化自动化生产设备。工业机器人是综合了人的特长和机器特长的一种拟人的电子机械装置，即有人对环境状态的快速反应和分析判断能力，又有机器可长时间持续工作、精度高、抗恶劣环境的能力，特别适合多品种、变批量的柔性生产。它对稳定、提高产品质量，提高生产效率，改善劳动条件和产品的快速更新换代起着十分重要的作用。工业机器人已经广泛的应用于各种自动化的生产线上，大部分在汽车制造、电子、机械、物流等行业从事焊接、油漆、包装、装配、零件加工、搬运、包装、码垛等专业性工作，如图1-1所示<sup>[3]</sup>。机器人的应用情况，是一个国家工业自动化水平的重要标志，其对提高产品质量、降低劳动强度、持续工作时间、提高生产效率、

降低劳动成本和提高企业竞争实力具有重要的作用。

工业机器人的种类很多，可有着不同的分类方法。按功能用途分类有：专用机器人——以固定程序在固定地点工作的机器人，其动作少、工作对象单一、结构简单、造价低，适用于在大量生产系统中工作。通用机器人——具有独立的控制系统，动作灵活多样，通过改变控制程序能完成多种作业的机器人。它的工作范围大，定位精度高、通用性能强，但结构复杂，适用于柔性制造系统。按控制方式分类可分为分散空置与集中控制两种类型。按控制的运动轨迹来分可分为：点位控制——以这种方式仅性空置的机器人，其运动为空间为点到点的直线运动，在作业过程中只控制几个特定工作点的位置，不对点与点之间的运动过程进行控制。目前相当一部分工业机器人是点位控制的。连续轨迹控制——按着中方时空置的机器人，其运动轨迹可以是空间的任意连续曲线。机器人在空间的整个运动过程都位于控制之下，这对于焊接和喷漆等作业是十分理想的。若以驱动方式分类可分为：（1）气压传动机器人——具有高速度、成本低、环保而操作力小、体积大、相应慢、速度不易控制的特点。（2）电气传动机器人——具有电源方便、响应快、驱动力较大、信号传递运算容易的特点，但是这种驱动方式必须使用减速机构。（3）液压传动机器人——具有操作力大体积小、动作平稳、耐冲击耐振动而成本高的特点。



(a) 弧焊机器人

(b) 汽车装配机器人

图 1-1 工业机器人

Fig.1-1 Industrial Robot

实际应用的工业机器人通常为6自由度，包括腰转运动、大臂前后摆动、肘关节上下摆动以及腕部的偏摆、扭转和俯仰，如图1-2<sup>[4]</sup>。对工业机器人关节

的驱动方式越来越多的采用电动式，不仅因为电机品种多，为机器人设计提供了多种选择，也因为它们可以运用多种灵活的控制方式。目前工业机器人的驱动方式主要有电机与减速器配合驱动各关节，电机通过绳、带对机构进行经关节驱动以及使驱动电机与机构一体化的直接驱动方式，这种发展中的驱动方式由于其减少了减速机构传动与控制中的弊端而带来的机器人的高速高精度而使其越来越受到人们的重视。

随着制造工业和现代技术的进步，对工业机器人的客观需求越来越苛刻，机器人本体重量轻而承载能力强、工作空间足够大的工业机器人受到人们的青睐，在完成的前提下，设计者力求工业机器人本身的自重与负载之比尽可能小。目前实际应用的工业机器人自重负载比大约为10以上，在满足负荷的基础上，由于自身重量过重，极大的限制了机器人在一些要求重量的场合对的应用。因此轻型工业机器人是未来工业机器人的发展重点，本课题面向工业界的这种实际需求，对6DOF（Degree of Freedom）轻型工业机器人进行了研究。

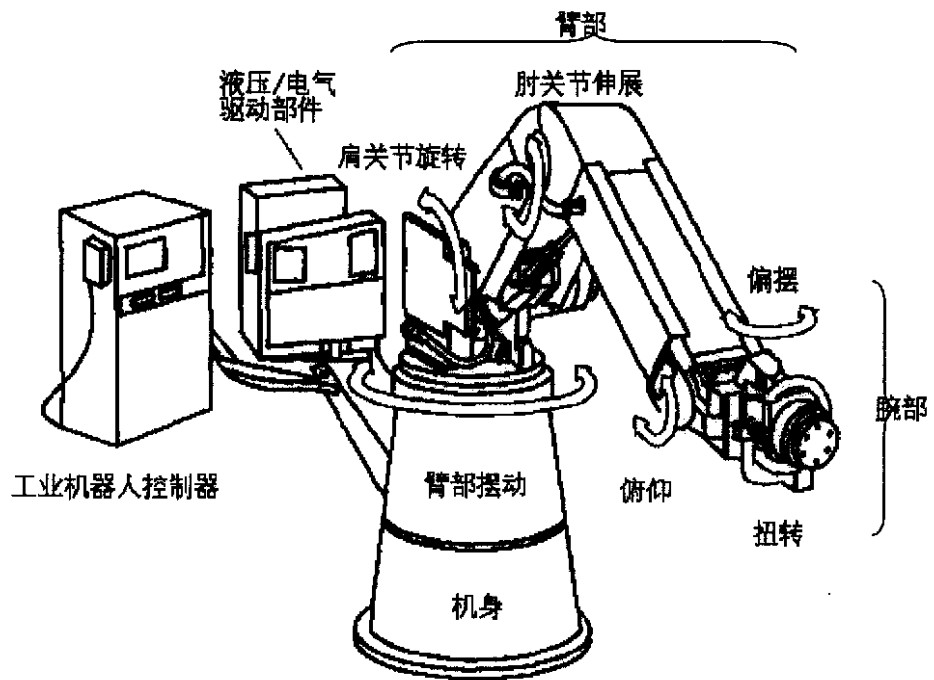


图1-2 工业机器人的基本结构

Fig.1-2 Structure of Industrial Robot

## 1.2 工业机器人的发展现状

1954年美国George Devol设计了世界上第一台可程序的工业机器人<sup>[5]</sup>，1962年美国Unimation公司研制出第一台生产用的工业机器人<sup>[6]</sup>，并在通用汽车公司投入使用。此后的10年时间里，工业机器人的进展比较缓慢。进入70年代之后，随着人工制能技术的发展，机器人技术也迎来了新的发展时期。在美国，1970-1980年间的工业机器人台数增加了20倍<sup>[7]</sup>，至2003年末，在美国运行的工业机器人总量为112400套，比2002年增长7%<sup>[8]</sup>。日本在1970-1980年间增加了25倍，其总量占全球总数的50%以上，位居第一。日本的工业机器人是在几家原本就具备机器人相关技术的企业基础上发展起来的，例如FANUC原本是生产数控设备的，YASKAWA原本是制造伺服电机的，PANASONIC原本就是著名的电器厂商。他们与高校结合，很快就能形成工业机器人的规模生产能力。英国在1998年安装的机器人总数是1282台，其中非汽车行业的安装台数达到792台。德国引进机器人的事件虽然比英国大约晚了五六年，但战争所导致的劳动力短缺和国民的高级技术水平却为工业机器人的发展、应用提供了有利条件。在德国，工业机器人最大的应用领域是焊接，截至2003年底，运行的焊接机器人约有34700台，占德国工业机器人总量的31%。据联合国欧洲经济委员会和国际机器人联合会的统计，预计到2007年底，运行的机器人数量将达到145000套。就每万雇员拥有工业机器人数量进行统计，至2003年末，德国制造业中，每1万雇员拥有148个工业机器人，拥有的机器密度全球最高。详见图1-3<sup>[9]</sup>。

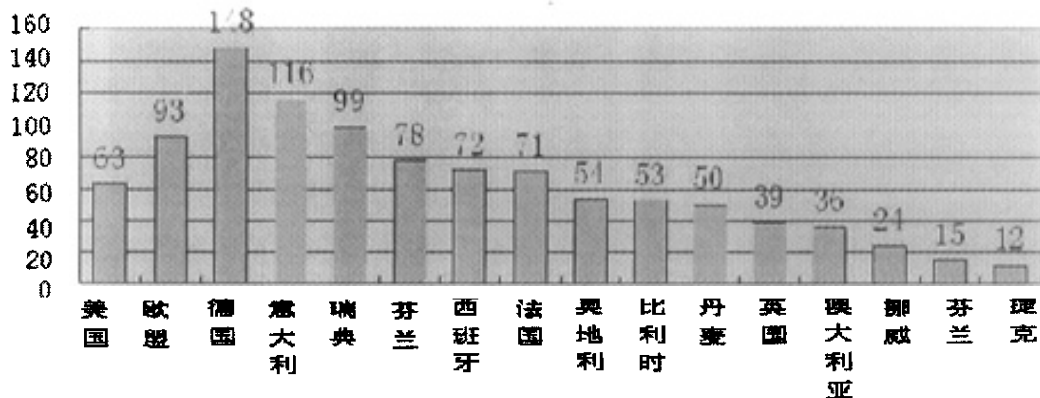


图1-3 2003年制造业中每1万名雇员拥有工业机器人的数量

Fig1-3 industrial robot amount per 10000 worker in manufacturing in 2003

我国工业机器人起步于70年代初期。1972年我国开始研制自己的工业机器人，进入80年代后，我国完成了示教再现式工业机器人成套技术的开发，研制出了喷涂、点焊、弧焊和搬运机器人<sup>[10]</sup>。从90年代初期起，我国的工业机器人又在实践中迈进一大步，先后研制出了点焊、弧焊、装配、喷漆、切割、搬运、包装码垛等各种用途的工业机器人，并实施了一批机器人应用工程。由哈尔滨工业大学和沈阳自动化所1996年共同设计、制造的HT-120A点焊机器人如图1-4<sup>[11]</sup>，1998年2月第一台上线应用于解放牌卡车的后风窗点焊，1998年5月第二台上线应用于红旗轿车焊接线上。该机器人具有工作空间大、运动速度快和负载能力强等特点。机器人设计结构紧凑，外观宜人，运动平稳快捷，大大提高了点焊作业的生产率。同为哈尔滨工业大学机器人研究所研制的便携式机器人，如图1-5<sup>[12]</sup>，可实现六自由度弧焊机器人的全部功能，同时可作为通用机器人完成其它工作，可任意位置安装，机器人本体自重30kg，便于拆装携带，可以作为一个流动的焊接机器人到不同的场所进行作业，特别是在一些工作空间狭小，周围环境恶劣，工人无法作业的地方。

如图1-6所示的5kg搬运机器人采用五轴伺服电机驱动空置，实现五轴空间联动，配置不同工具包可实现搬运、码垛、焊接、装配等工作，据有较高的柔性自动化水平。如图1-7是沈阳新松公司为嘉陵集团摩托车车生产线设计制造的轻型弧焊机器人。



图1-4 120kg点焊机器人

Fig.1-4 120kg Spot Welding Robot

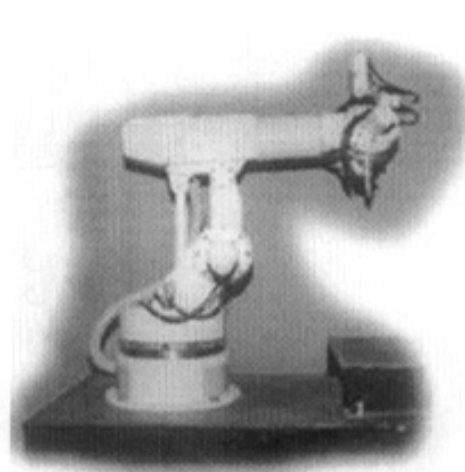


图1-5 便携式机器人

Fig.1-5 Portable Robot





图1-6 5kg搬运机器人

Fig. 1-6 5kg Portage Robot



图1-7 轻型弧焊机器人

Fig. 1-7 Light Arc Welding Robot

虽然我国从上世纪80年代开始在高校和科研单位全面开展工业机器人的研究。近20年来取得了一定的成果。但是由于国内薄弱的工业基础以及缺乏与企业间的联合，长期没能形成有规模的产业。目前国内除了几家以组装、代理为主的合资的机器人公司外，具有自主知识产权的工业机器人主要由高校或科研单位组织生产，只能完成小批量生产，未形成大规模的产业转化。随着我国由农业大国向制造业大国的转型，对机器人这样的机电自动化装备的需要日益迫切，单纯依赖进口不可能从根本上解决问题，因此，研究具有自主知识产权的高性能工业机器人，从而刺激工业机器人的发展和应用，是国内机器人领域的责任和研究重点。

### 1.3 课题来源、主要研究内容以及预期达到的技术指标

本课题面向工业需求，结合 985 学科建设进行，目的是设计一款轻型的六自由度作业用工业机器人。本文研究内容如下：

(1) **机构设计研究** 根据设计指标，对 6 自由度机器人的构型和各关节机构进行设计，确定机器人的本体结构。

(2) **有限元分析** 由于受重量的限制，机器人本体采用铝质材料，需要对关键部件进行有限元分析，此外，还引入柔性体模型对机构末端进行了振动仿真分析，并根据分析结果对这些部件进行了相应改进，保证系统的安全性和

刚度性能。

(3) **运动学研究** 运动学是机器人的重要理论,采用 D-H 坐标的方法对该机器人进行正运动学和逆运动学分析,并对基于工具坐标系的逆解方程进行求解,同时对机器人末端的轨迹规划进行初步探讨,为机器人控制奠定理论基础。

(4) **控制系统设计** 在机构设计和理论分析的基础上,设计机器人控制系统的硬件组成和软件方案。并在实际运行中对设计指标进行验证。

## 第 2 章 轻型工业机器人的机构设计

### 2.1 机器人机构设计要求

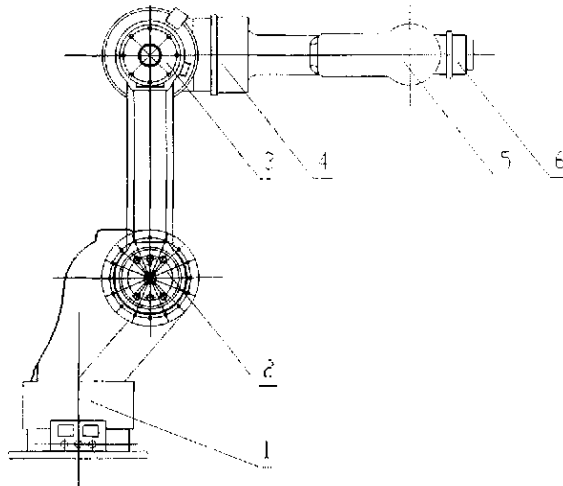
根据应用需求, 该机器人主要用于装配作业, 采用点位控制, 要求具有较大的末端工作载荷, 同时对机器人本体的重量有严格的限制。通过比较可以看到国内外同类型的工业用机器人在 15Kg 负载下机器人本体重量一般在 150kg 以上, 而本机器人要求重量小于 120kg。所以具有较大的设计难度。根据工作需要, 机器人采用垂直关节形式, 以交流伺服电机驱动。机器人用于空中装配作业, 要求具有较大的灵活性和可靠性。采用 6 自由度结构能够满足操作空间要求, 根据分析确定机器人的具体要求如表 2-1。

表 2-1 机器人的设计要求

Table 2-1 The design requirement of robot

参数名称	数值
末端载荷	15Kg (距 5 轴 200mm 处)
自由度数	6 个
驱动方式	交流伺服电动机
检测方式	绝对位置码盘
1 轴 腰部回转范围	$\pm 170^\circ$
2 轴 大臂倾动范围	$+155^\circ, -70^\circ$
3 轴 小臂倾动范围	$+80^\circ, -210^\circ$
4 轴 小臂旋转范围	$\pm 180^\circ$
5 轴 手腕俯仰范围	$\pm 120^\circ$
6 轴 手腕回转范围	$\pm 360^\circ$
机器人展开长度	不小于 1000mm
重量	小于 120Kg

工业用机器人发展已经比较成熟, 应用也比较广泛。对于垂直关节型机器人, PUMA、Motoman 结构为大多机器人所采用。本机器人采用的也是典型的串联工业机器人结构形式, 各个关节的布置如图 2-1 所示。



1 腰部转动；2 大臂摆动；3 肘关节摆动；4 腕部偏摆；5 腕部扭转；6 腕部俯仰

图 2-1 机器人 6 个关节位置

Fig. 2-1 The 6 joint positions of robot

## 2.2 总体方案设计

根据机器人各个关节的工作范围要求，采用大臂、小臂偏置式结构形式，整体结构见图 2-2。大臂处所受的载荷较大，采用相对于腰部的偏置方式使大臂相当于悬臂支撑，受力条件较差，因而在先前的设计中曾考虑在大臂处采用相对于腰部的双侧对称支撑，改善大臂的受力条件。但是在对该方案的重量评估时发现重量过大，因而改为当前的布置方法，并通过有限元分析，更合理地确定了大臂的结构尺寸，在保证大臂强度和刚度的前提下减轻了机器人整体的重量。

机器人的设计按照以下几个原则进行：（1）是最小运动惯量原则。除了根据机器人的重量限制，尽可能地降低总体质量以外，还要注意运动部件对转轴的质心配置，尽量减小运动惯量，以便增加手臂的运动平稳性，减少冲击和振动，提高动力学特性。（2）尺度优化原则。在满足工作空间要求情况下，通过尺度优化选定最小的臂杆尺寸，这样也可以提高刚度并进一步降低运动惯量。

（3）刚度设计。在刚性手臂设计中刚度比强度更为重要，本文通过运用有限元进行变形和位移分析，不断地修改杆件剖面形状和尺寸，提高支撑刚度和接触刚度，合理地安排作用在手臂各部分的力和力矩，尽量减少弯曲变形。

（4）可靠性设计。为了提高整机的可靠性，根据元器件的可靠性要高于部件

的可靠性，部件的可靠性要高于整机可靠性的原则，选择高可靠性的元器件，并对部件整体的可靠性进行优化。(5) 工艺性原则，由于机器人是高精度、高集成度的自动化机械系统，所以在设计中考虑良好的加工和装配工艺，在降低成本的同时保证机器人的良好性能。

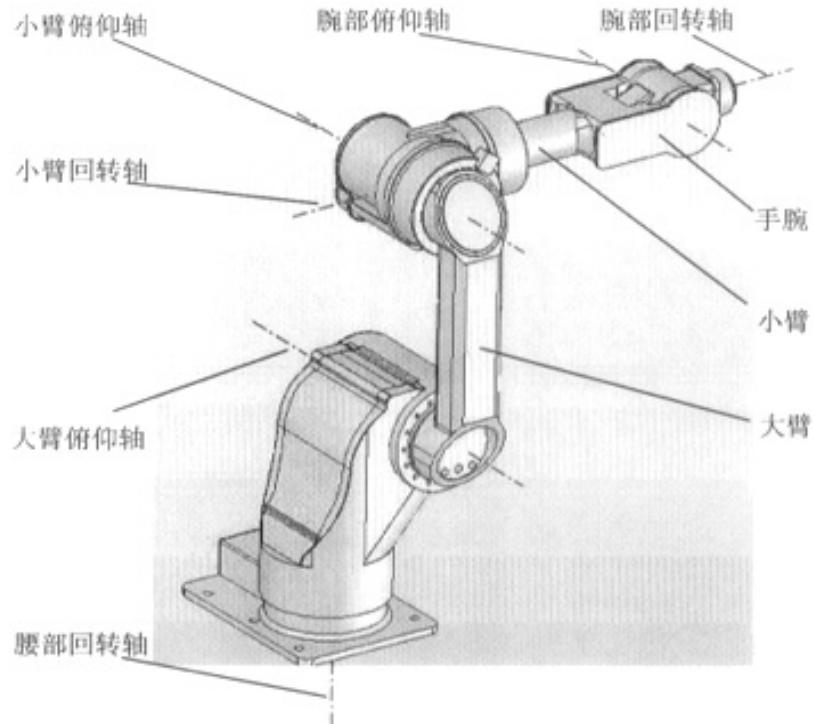


图 2-2 机器人三维结构

Fig. 2-2 The 3D structure of robot

由于机器人主要执行装配任务，对机器人的速度稳定性和位置姿态精度都有较高的要求，所以在元器件的选择上也尽可能保证元器件有较高的精度和控制性能，例如选择高刚度、高精度的 RV 减速器。选择 13 位的绝对编码器等。为了增加运动的灵活性和提高控制性能，机器人的各个关节都设计成运动解耦形式，即驱动电机直接安装在各关节处。

在机械设计方面，为了减轻重量从以下几个方向入手：(1) 在设计上打破常规工业机器人设计理念，按特种机器人非标设计；(2) 从材料上，选用质量较小的超硬铝材料；(3) 对各个零件结构进行优化设计，合理降低各个零部件的质量；(4) 对机器人模型进行运动和动力学仿真计算，从整体上进行优化设

计。在结构设计中同时考虑野外作业所需要的密封性，防止灰尘、雨水渗入机器人内部，在各个活动关节处设计了密封圈密封结构。

由于机器人各个关节的运动速度较低，所以各关节都装配了大减速比的减速器。机器人上常用的减速器有行星轮减速器、谐波减速器和 RV 减速器。行星轮减速器的运动回差比较大，一般不用在精密运动的结构中；谐波减速器的优点是重量较轻，外形尺寸较小，减速比范围大，精度高。从谐波传动的工作原理可知，它是通过柔轮的弹性变形实现运动传递的，其弹性变形大。由于弹性变形引起的弹性回差也大，这就不可避免地会影响机器人运动的准确性。RV 减速器具有长期使用不需再加润滑剂、寿命长、刚度好、减速比大、低振动、高精度、保养便利等优点，适用于在机器人上使用。它的传动效率可达 0.8，相对于同样减速比的齿轮组，这样的效率是很高的。它的缺点是重量大，外形尺寸较大。根据这些减速器的特点，在机器人工作载荷较大的 1、2、3、4 轴选用 RV 减速器，提高这些关节的刚度和运动精度，5 轴和 6 轴采用谐波减速器，以减轻末端的重量。另外部分 RV 减速器的中空结构又有利于在机器人内部布线。各关节选用的减速器见表 2-2。

表 2-2 机器人各个关节的电机、减速器和编码器

Table 2-2 The motors, reducers and encoders in the robot

关节号	电机（安川）	减速器	编码器
1 轴	SGMAH04AAA4E	REV40E, 减速比 152	13 比特绝对式编码器
2 轴	SGMGH09AAA4E	REV40E, 减速比 120	13 比特绝对式编码器
3 轴	SGMAH08AAA4E	REV20E, 减速比 136	13 比特绝对式编码器
4 轴	SGMAH01AAA4E	RV-10C, 减速比 120	13 比特绝对式编码器
5 轴	SGMAHA5AAA4E	两级减速：皮带减速比 2.5； 谐波减速器减速比 160	13 比特绝对式编码器
6 轴	SGMAHA5AAA4S	谐波减速器，减速比 60	13 比特绝对式编码器

由于机器人的各个关节的转动范围都小于 360 度，所以选择绝对位置编码器更合理，能够准确确定零位，便于寻零回位。

电机的选择。根据工作要求，机器人选用交流伺服电机作为各关节的驱动设备。通过对松下、安川、三菱公司生产的交流伺服电机的电机特性、使用环境进行对比，选择了安川电机。安川电机可以实现高速、高精度驱动、可在线

自动调整，能平滑运转，设定简单、维护方便，具有多合一控制，具有高的可靠性，使用环境满足机器人的工作要求。

根据机器人末端的最大负载为 15kg，作用点距第 5 轴 200mm，工具为近似对称结构的工作状态，结合每个轴所受的外力力矩以及自身的等效惯量来估算出各个关节电机所需要的扭矩和电机功率，以此来选择电机型号。机器人在一些特殊的姿态下，绕某一个驱动轴的转动惯量达到最大值，在计算中使用的转动惯量为该姿态下的值。

根据机器人工作空间的要求，经过结构尺寸的优化后得到的机器人的主要结构尺寸如表 2-3 所示。根据所选用的电机和传动设备，确定的机器人各个关节的最大运动速度如表 2-4 所示。

表 2-3 机器人的主要结构尺寸

Table 2-3 The main size of the robot

1 轴与 2 轴的偏置距离	155.0mm
1 轴与大臂的偏置距离	209mm
2 轴距离底座高度	390mm
2 轴与 3 轴距离	480mm
3 轴与 5 轴距离	560mm
5 轴与手臂末端距离	136.5mm

表 2-4 机器人各个关节的最大运动速度

Table 2-4 The maximum rotation speed of each joint

腰部回转(1 轴)	70° /s
大臂倾动(2 轴)	75° /s
小臂倾动(3 轴)	80° /s
小臂旋转(4 轴)	120° /s
手腕俯仰(5 轴)	45° /s
手腕回转(6 轴)	160° /s

## 2.3 主要关节的结构设计

机器人的 6 个关节都采用了驱动电机直接安装在关节处的结构方式。为了减轻质量，减少绕各个轴的转动惯量，对关节处元器件的布置方式、关节处结构质量的分布都进行了优化。在保证刚度、强度和工艺性的前提下，通过有限元的仿真实现了结构上的优化。下面介绍机器人各个关节的结构形式。

### 2.3.1 关节 1 和关节 2 的结构设计

关节 1 和关节 2 的连接结构如图 2-3 所示。由于 RV 减速器有较大的刚度，内部的角接触球轴承使它可以承受较大的轴向力，所以在关节 1 的结构中直接将 RV 减速器的输出端与大底座相连接，而将减速器的外壳作为输出端与回转座固定，电机同样固定在回转座上。这样一来关节 1 回转座的转动直接利用了 RV 减速器内的轴承，从而简化了结构。

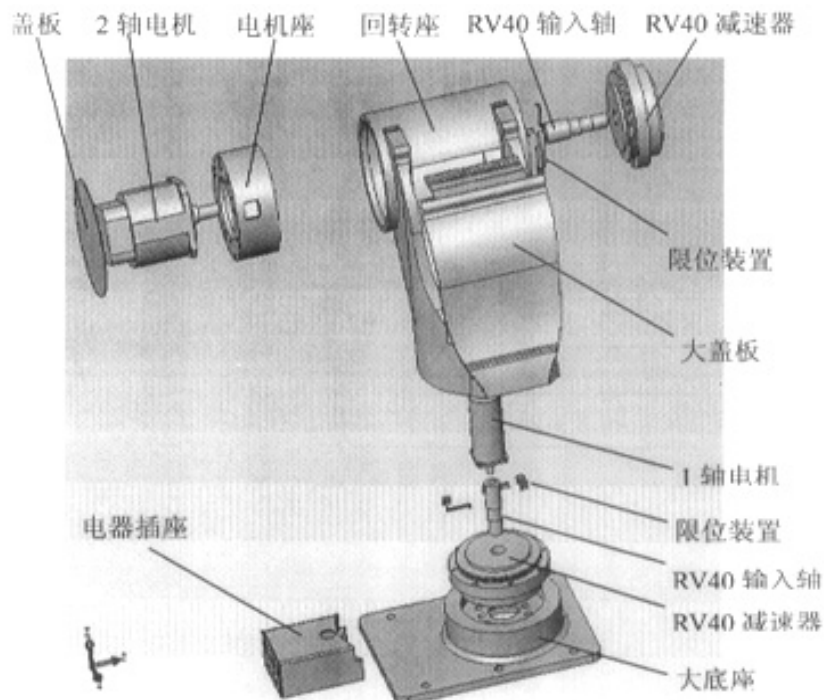


图 2-3 关节 1 和关节 2 的结构

Fig. 2-3 Structure of joint1 and joint2



采用电机在上部，减速器在下方的布置方法也使该关节的重心下移。在关节 2 的设计中也利用了 RV 减速器高刚度和可以承受较大径向力的特性，将大臂直接连接到 RV 减速器端上，而将减速器的壳体与回转座固定，简化了大臂与腰部的连接结构。

### 2.3.2 关节 3 和关节 4 的连接结构

关节 3 和关节 4 具有类似的安装结构。在这两个关节中使用了 C 系列的 RV 减速器，减速器的输入轴偏置，而中心留有孔道方便布线。减速器的输出端与大臂固定，电机和减速器的外壳都固定在 3 轴和 4 轴的连接座上，以减速器的外壳作为输出带动小臂运动。关节 3 的结构如图 2-4 所示。

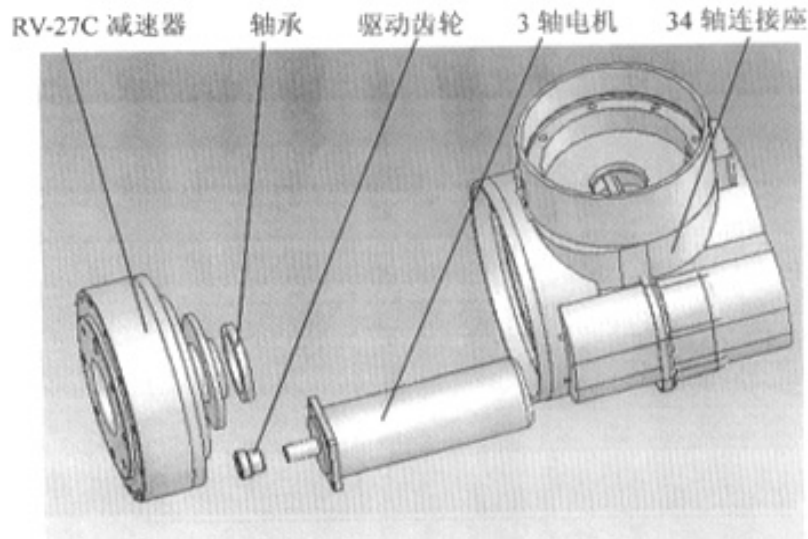


图 2-4 关节 3 的连接结构

Fig. 2-4 Structure of Joint3

### 2.3.3 小臂及腕部的结构设计

小臂的结构如图 2-5 所示。为了充分利用小臂的空间尺寸，将关节 5 的电机隐藏到小臂内，增加了一级同步带传动。将谐波减速器隐藏在腕座内，大带轮与谐波减速器的动刚轮连接，把运动传递给谐波减速器。5 轴谐波减速器的安装结构如图 2-6 所示。由于谐波减速器不像 RV 减速器那样具有很高的刚

度，所以这里采用两个深沟球轴承支撑腕座回转运动。腕部回转关节 6 的结构如图 2-7 所示。

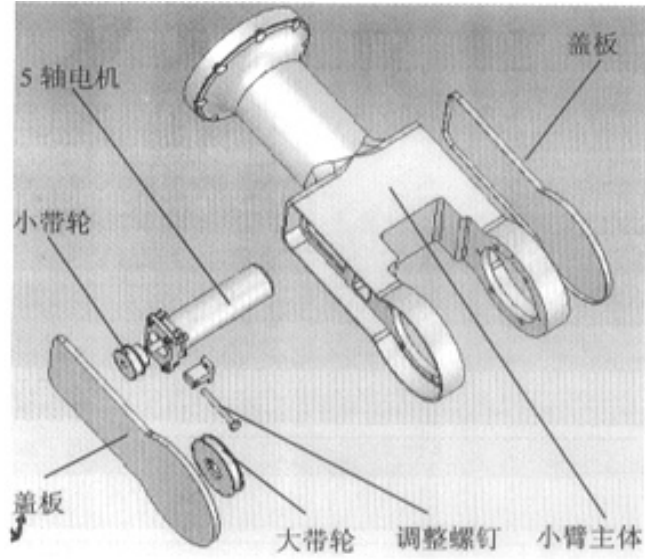


图 2-5 小臂结构

Fig. 2-5 Structure of forearm

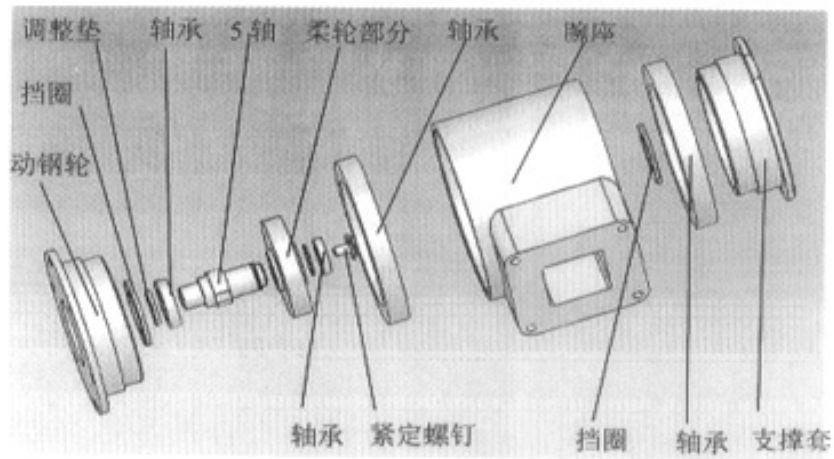


图 2-6 谐波减速器及 5 轴的安装结构

Fig. 2-6 The installation structure of axis 5 and harmonic reducer

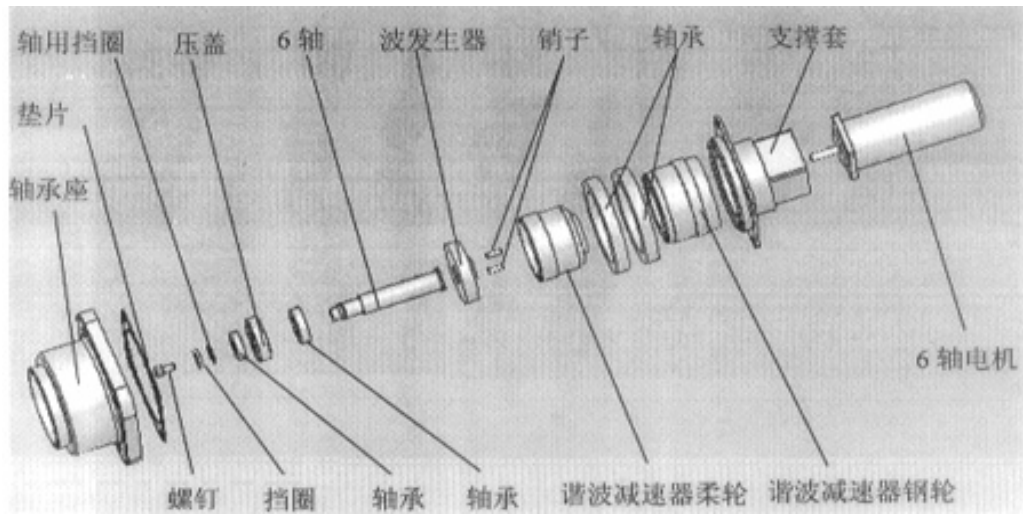


图 2-7 关节 6 结构图

Fig. 2-7 Structure of Joint 6

## 2.4 小结

本章根据机器人工作要求确定了具体的设计目标，采用 6 自由度垂直关节结构形式，以交流伺服电机为驱动力，采用 RV 减速器和谐波减速器和同步带传动相结合的传动方式，有效地简化了机器人结构，在保证强度、刚度条件下有效地降低了重量。在机构设计中以减轻质量和转动惯量、优化结构尺寸、保证工作空间兼顾加工的工艺性为目标，完成了整个机器人机构的设计，可以满足工作要求。

## 第3章 轻型工业机器人的有限元分析

### 3.1 引言

借助有限元分析软件可以在机构设计过程中了解机构内部组织的应力分布、应力大小和结构体的位移形变，为机构的改进提供方向性的指导<sup>[13]</sup>。本章利用 Patran /Nastran 有限元分析软件对该轻型工业机器人进行了静态有限元分析，利用分析结果对一些主要构件进行了相应改进。本章还引入柔性体模型对末端点进行了振动仿真。

### 3.2 有限元仿真分析

有限元仿真分析之前需要知道施加在构件上的最大力和最大转矩，本文首先对机器人进行了相应的动力学分析。

美国 MDI 公司研制的复杂机械系统仿真软件——adams 已经在汽车、航天以及机器人等领域得到了广泛的应用，但对于复杂的机械系统其建模很不方便，因此本文采用美国 PTC 公司的 CAD 软件 Proe 来对机械零件实体建模，然后通过二者之间的有缝连接 Mechanism/Pro 将机构模型导入到 adams 环境下。用户可以在 M/pro 环境下建立刚体然后加入约束或力，这样在 adams 下只需对 motion 输入位置逆解方程即可获得自己所需要运动轨迹的动力学输出曲线，即达到完全和实际运动情况相匹配。在实际操作过程中要注意两点，第一单位要统一、密度要视具体零件而定，Proe 默认长度单位是 inch，如果觉得不方便，可以在导入 adams 后再修改成国际单位或其他单位。另一个要注意在 Proe 中用 automatic 自动建刚体将视子装配为一个刚体，这样便可以将许多没有运动关系的零件结合到一起建立子装配，从而简化机构模型。如果装配体的零件之间或零件与子装配之间名称相同，在自动定义刚体的情况下导入 adams 时，他们将被系统默认的共同编辑，给用户造成不便。为避免造成这一状况，用户可以在 Mechanism/Pro 中手动定义刚体，并为它们赋予不同的名称。如果子装配内部的零件之间存在相对运动，用户就必须采用手动定义刚体的形式。

利用动力学分析得到最大关节力矩，最大关节加速度，从而确定在 Nastran 软件中为模型施加的边界条件（力约束：包括关节力和惯性力系）。

### 3.2.1 小臂分析

由于小臂是一个杆状零件，其根部承受的弯矩较大，故对其进行相应的有限元分析。将动力学仿真得到的关节力和惯性力施加到模型上，利用第四强度理论得到设计过程中小臂的 von mises 应力（冯式应力）分布如图 3-1 所示，剪切应力分布如图 3-2 所示。



图 3-1 小臂冯式应力分布图  
Fig.3-1 Distributing of von mises in the small arm



图 3-1 小臂剪切应力分布图  
Fig.3-1 Distributing of shear mises in the small arm

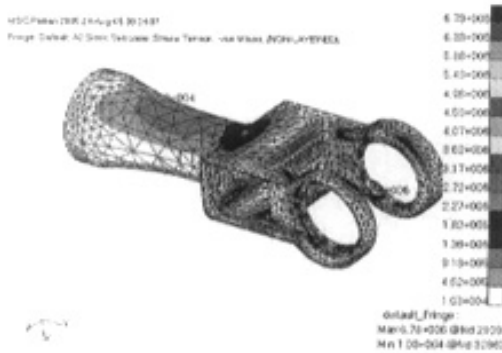


图 3-3 改进后小臂冯式应力分布图  
Fig.3-3 Distributing of von mises in the redesigned small arm



图 3-4 改进后小臂剪切应力分布图  
Fig.3-4 Distributing of shear mises in the redesigned small arm

由图 3-1 可以看出，大应力集中在根部、圆柱棱柱过渡处和棱柱与圆盘的过渡处和圆盘的螺孔处。最大冯式应力为 12.3Mpa，最大剪切应力为 6.5Mpa。为了使应力分布区域均化，并减小最大应力值，将小臂结构进一步改进。具体

如下：将小臂根部圆盘与中部空心筒之间引入平滑的圆弧过渡；增加前部圆盘的壁厚。改进后的小臂体的应力分布如图 3-3、3-4 所示。可以看到，小臂根部应力集中的现象消除了，过渡部分应力的数值也明显减小，最大冯式应力和最大剪切应力仍发生在前部圆盘的螺孔处，其数值分别减小至 6.78Mpa 和 3.46Mpa。

### 3.2.2 大臂分析

同理得到设计过程中大臂的 von mises 应力分布如图 3-5 所示，主应力分布如图 3-6 所示。

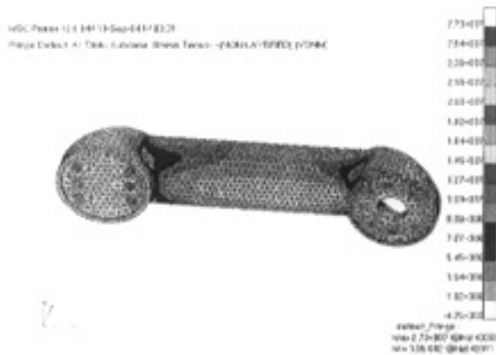


图 3-5 大臂杆冯式应力分布图  
Fig.3-5 Distributing of von mises in the big arm

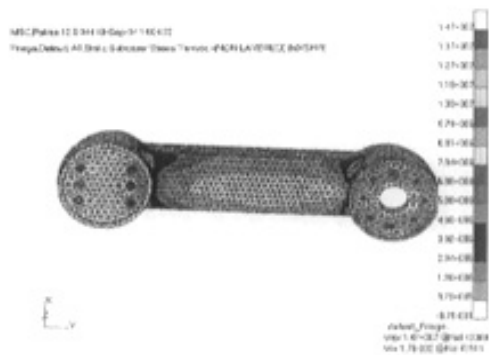


图 3-6 大臂杆剪切应力分布图  
Fig.3-6 Distributing of shear mises in the small arm

由图 3-5、3-6 可以观察到最大冯式应力发生在大臂的两个根部和螺孔处，其值分别为 27.3Mpa 和 14.7Mpa，在大臂杆的中部应力很小。因此对大臂体的结构做了如下改进：1、增大过渡部分的厚度。2、减小杆件中部的壁厚。3、将螺纹孔改为沉孔。改进后的大臂体的应力分布如图 3-7、3-8 所示。可以看到，大臂体的中部的应力明显增加，螺纹孔处的应力明显减小，两侧根部的应力依然比较集中，但数值有所减小。最大冯式应力和最大剪切应力分别减小至 12.4Mpa 和 6.84Mpa。

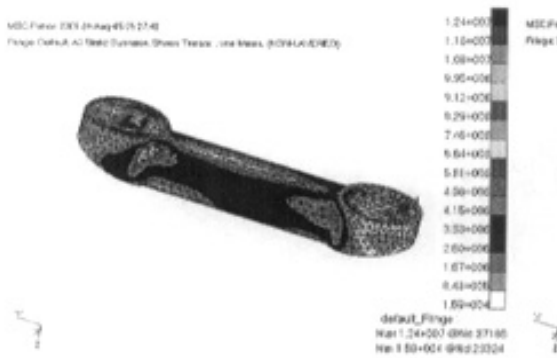


图 3-7 改进的大臂杆冯式应力分布图  
Fig.3-7 Distributing of von mises  
in the redesigned big arm



图 3-8 改进的大臂杆剪切应力分布图  
Fig.3-8 Distributing of shear mises  
in the redesigned big arm

### 3.2.3 转座分析

同理得到设计过程中转座的 von mises 应力分布如图 3-9 所示，剪切应力分布如图 3-10 所示。



图 3-9 转座冯式应力分布图  
Fig.3-9 Distributing of von  
mises in the rotated base



图 3-10 转座剪切应力分布图  
Fig.3-10 Distributing of shear  
mises in the rotated base

由图 3-9、3-10 可以观察到最大应力发生在大臂回转套筒的两个底面边缘部分和与端盖联接的螺纹孔处，其值分别为 59.9Mpa 和 30.4Mpa。对转座的结构做如下改进：1、增大两个拉耳的宽度。2、减小圆筒开口的宽度。3、在不改变整体外形尺寸的前提下，将圆筒端盖改为嵌入式，从而增大了圆筒的长

度。改进后的转座的应力分布如图 3-11、3-12 所示。可以看到，部分应力转移到了圆筒的侧面，端盖螺纹孔处的应力明显减小。最大冯式应力和最大剪切应力分别减小至 17.9Mpa 和 9.24Mpa。

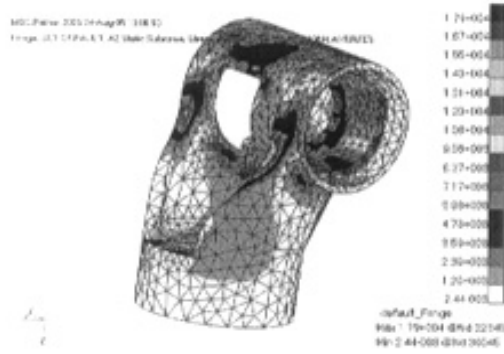


图 3-11 改进的转座冯式应力分布图  
Fig.3-11 Distributing of von mises  
in the redesigned rotated base

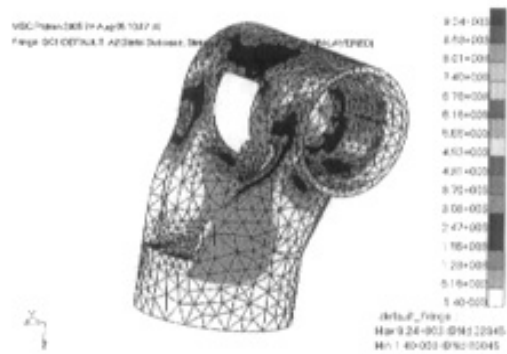


图 3-12 改进的转座剪切应力分布图  
Fig.3-12 Distributing of shear mises  
in the redesigned rotated base

### 3.2.4 底座分析

同理得到设计过程中底座的 von mises 应力分布如图 3-13 所示，主应力分布如图 3-14 所示。

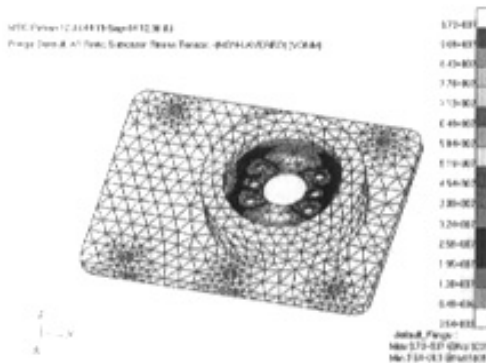


图 3-13 底座冯式应力分布图  
Fig.3-13 Distributing of von mises in the base

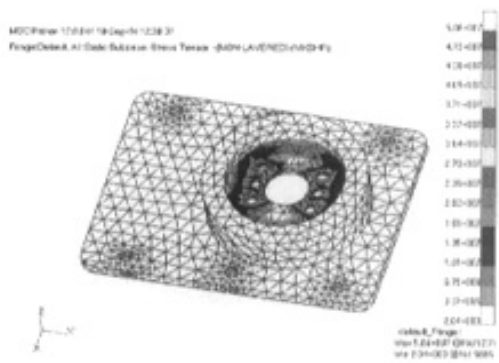


图 3-14 底座剪切应力分布图  
Fig.3-14 Distributing of shear mises in the base

由图 3-13、3-14 可以观察到最大应力发生在底座沉孔的螺纹孔处，最大冯



式应力达到 97.3Mpa，最大剪切应力达到 50.6Mpa，而其它地方的应力几乎可以忽略。对转座的结构做如下改进：1、增大沉孔底部的厚度。2、在沉孔底壁与侧壁之间倒圆角。3、将底板尺寸改为正方形。改进后的转座的应力分布如图 3-15、3-16 所示。可以看到，部分应力转移到了沉孔外侧，最大冯式应力和最大剪切应力分别减小至 20.2Mpa 和 10.7Mpa。

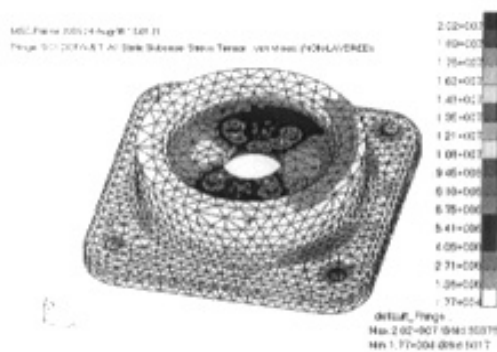


图 3-15 改进后底座剪切应力分布图

Fig.3-15 Distributing of von mises in the base

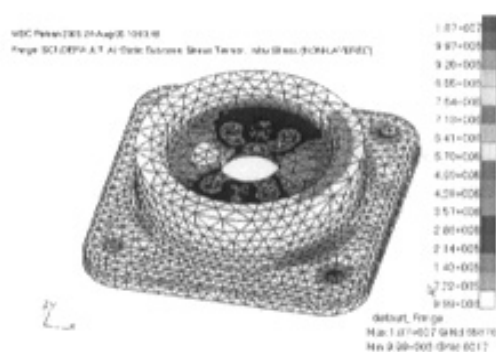


图 3-16 改进后底座形变分布图

Fig.3-16 Distributing of shear mises in the base

### 3.3 机构的振动分析

实现振动仿真的过程可以分为如下几步：（1）利用 Patran /Nastran 有限元分析软件将主要零部件的柔体建立信息生成.mnf 文件。（2）、将该文件传入到 ADAMS 机器人装配图中。（3）实现柔性体对刚性体的替换。（4）调整柔性体的位置， 做好柔性体与相邻刚性体的连接。（5）定义零部件的密度。（6）施加相应的负载。完成上述过程便可以开始仿真，观察机构的振动或输出柔性体的位移曲线。

为方便刚体模型和柔体模型仿真结果的比较，将刚性体模型和柔性体模型集中在一起仿真。如果将所有零部件均定义成柔性体，模型将过于复杂，影响仿真的速度和精度。从实际情况来看，有些零部件的变形很小，也没有替换成柔性体的必要。因此，本文只将小臂、大臂和转座替换成了柔性体。

当小臂和转座为柔性体时，在 2 轴和 3 轴加匀速转动的 motion，运动时间为 2 秒。末端 x 方向位移仿真曲线如图 3-17 所示。末端 z 方向位移仿真曲线如图 3-18 所示。图中红线为刚体模型位移输出，蓝线为柔性体模型位移输出。

将刚性体位移曲线同柔性体位移曲线作差得到机构末端的振动曲线，分别

如图 3-17、3-18 所示。

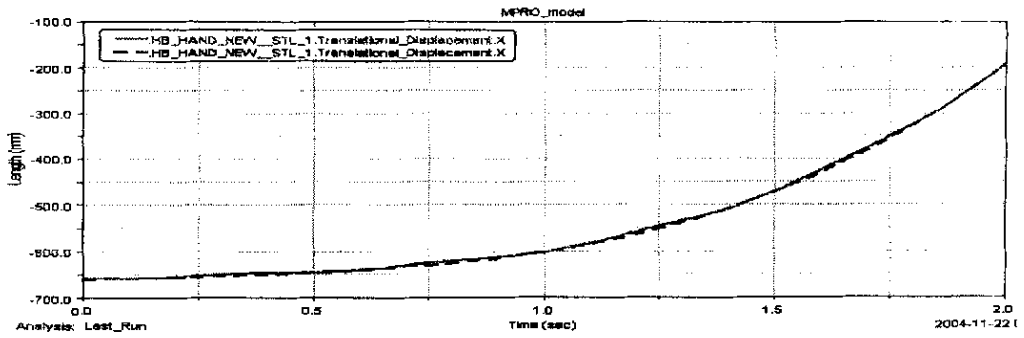


图 3-17 小臂和转座为柔性体时末端 x 向位移曲线

Fig.3-17 Displacement along x orientation with flexible small arm and rotated

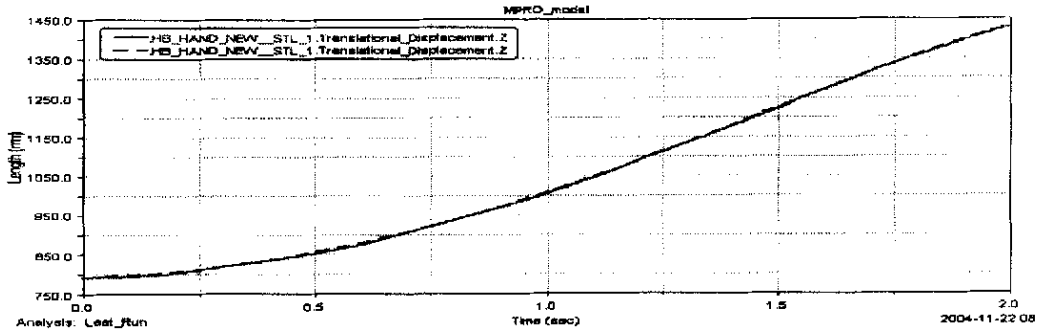


图 3-18 小臂和转座为柔性体时末端 z 向位移曲线

Fig.3-18 Displacement along z orientation with flexible small arm and rotated base

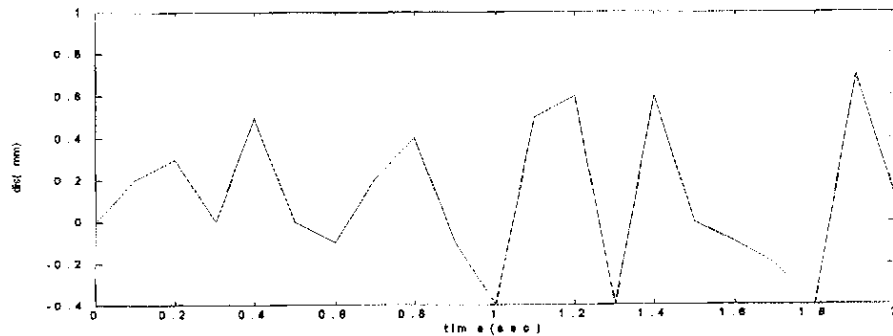


图 3-19 小臂和转座为柔性体时末端 x 向振动曲线

Fig. 3-19 Oscillation along x orientation with flexible small arm and rotated base

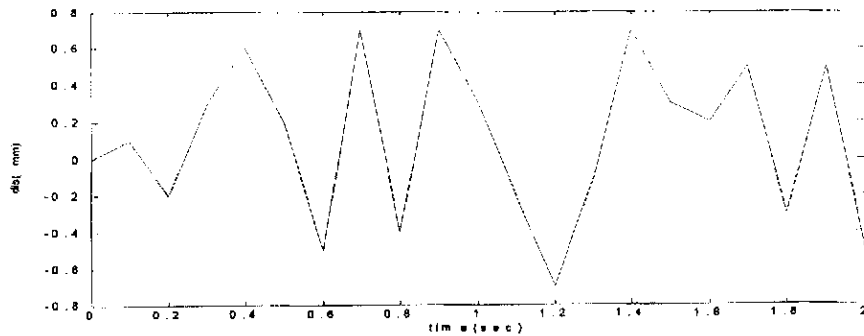


图 3-20 小臂和转座为柔性体时末端 z 向振动曲线

Fig. 3-19 Oscillation along z orientation with flexible small arm and rotated

由图 3-19、3-20 可知，末端振动幅度在 1mm 以内，满足设计要求。

当大臂为柔性体时，施加与上述相同的运动，末端 x 方向位移仿真曲线如图 3-21 所示。末端 z 方向位移仿真曲线如图 3-22 所示。图中红线为刚体模型的位移输出，蓝线为柔性体模型的位移输出。

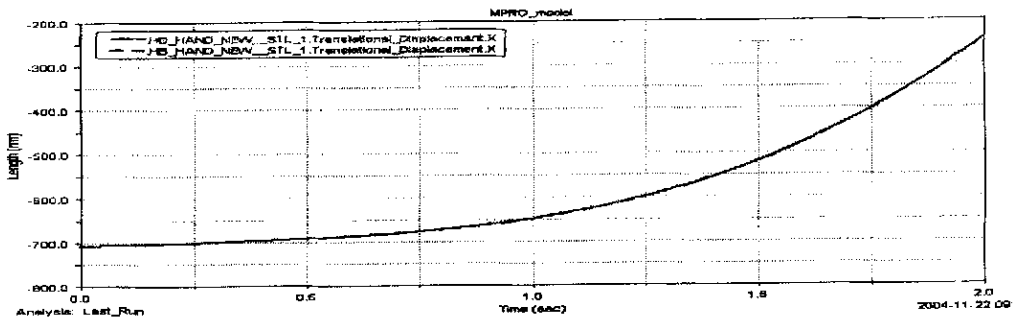


图 3-21 大臂为柔性体时末端 x 向位移曲线

Fig.3-21 Displacement along x orientation with flexible big arm rotated

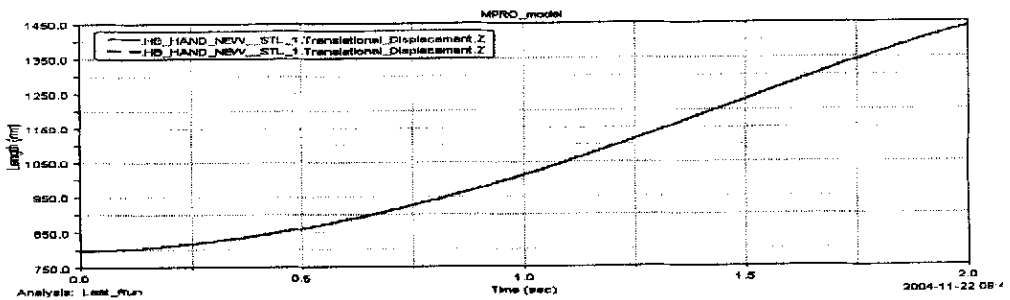


图 3-22 大臂为柔性体时末端 z 向位移曲线

Fig.3-22 Displacement along z orientation with flexible big arm rotated

将刚性体位移曲线同柔性体位移曲线作差得到机构末端的振动曲线，分别如图 3-23、3-24 所示。

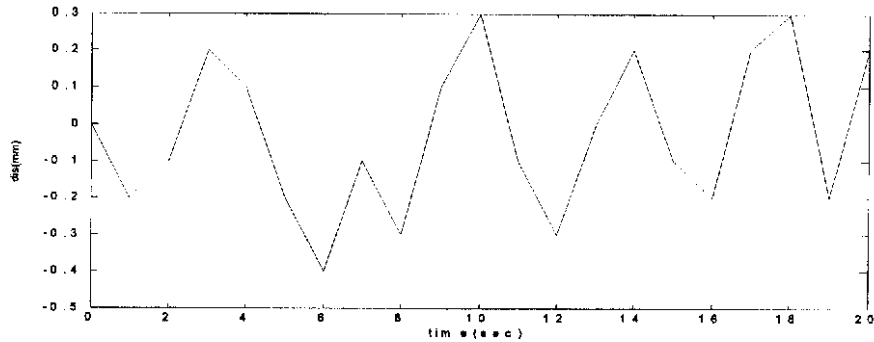


图 3-23 大臂为柔性体时末端 x 向振动曲线

Fig.3-23 Oscillation along x orientation with flexible big arm rotated

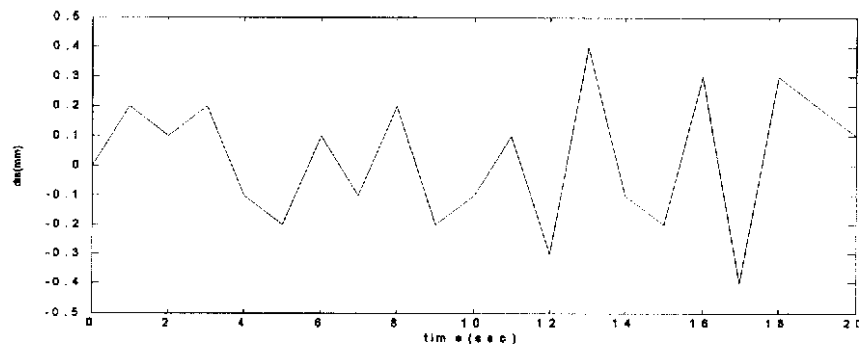


图 3-24 大臂为柔性体时末端 z 向振动曲线

Fig.3-24 Oscillation along z orientation with flexible big arm rotated

由图 3-23、3-24 可知，末端振动幅度在 0.5mm 以内，满足设计要求。

### 3.4 本章小结

本章通过对有限元分析的结果，为小臂、大臂、转座和底座的结构改进提供了指导。改进后的结构较原来的结构在应力分布和应力大小方面都有明显的改善。

本章还通过柔性体模型对机构末端进行了振动仿真。从仿真的结果看，机构末端的振幅在 1mm 以内，振动幅度不大，不会影响搬运和粗装配作业。

## 第 4 章 轻型工业机器人的运动学分析

### 4.1 引言

机器人运动学是在不考虑产生运动的力或力矩的前提下, 研究机器人的位置、速度、加速度的时间变化历程。目前, 由于六自由度串联机器人在工业领域的大量应用, 对六自由度机器人的运动学建模已经讨论的相当深入了。但机器人的运动学建模关系到机器人是否能够正常运行, 以及轨迹规划甚至动力学问题能否合理解决等问题。故建立准确的运动学模型, 并采用简洁的求解方法得到运动学解, 对机器人系统的构建是十分必要的。

本章首先建立了 D-H (Denavit-Hartenberg) 坐标系, 在此基础之上, 建立了运动学正解模型, 以及运动学逆解模型, 并考虑了求解快捷、方便, 混合采用了几何法和 D-H 坐标方法, 对运动学逆解进行求解, 最后, 对轨迹规划问题进行了初步探讨。

### 4.2 D-H (Denavit-Hartenberg) 表示法

为描述相邻杆件间平移和转动的关系, Denavit 和 Hartenberg 提出了一种为关节链中的每一杆件建立附体坐标系的矩阵方法。D-H 方法是为每个关节处的杆件坐标系建立  $4 \times 4$  的齐次变换矩阵, 表示它与前一个坐标系的关系。这样, 通过逐次变化, 用“手部坐标”表示的末端执行器可被变换并用“机座坐标”表示。

对每个杆件在关节轴处可建立一个正规的笛卡尔坐标系  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 再加上机座坐标。机座坐标定义为第 0 号坐标  $(x_0, y_0, z_0)$ , 它是机器人的惯性坐标系, 这样一来, 对于我们设计的机器人, 我们有七个坐标系, 即  $(x_0, y_0, z_0)$ ,  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $\dots$ ,  $(x_6, y_6, z_6)$ 。

确定和建立每个坐标系应根据下面三条规则:

- 1、 $z_{i-1}$  轴沿着第  $i$  关节的运动轴;
- 2、 $x_i$  轴垂直  $z_{i-1}$  轴并指向离开  $z_{i-1}$  轴的方向;
- 3、 $y_i$  轴按右手坐标系的要求建立。

按着上面的原则, 我们建立了如图 3-1 所示的系统杆件坐标系。

刚性杆件的 D-H 表示法取决于此杆件的四个几何参数。这四个参数可完全描述任何转动或移动关节。它们的定义如下：

$\theta_i$  是绕  $z_{i-1}$  轴（按右手规则）由  $x_{i-1}$  轴转向  $x_i$  轴 的关节角；

$d_i$  是从第  $i-1$  坐标系的原点到  $z_{i-1}$  轴和  $x_i$  轴的交点沿  $z_{i-1}$  轴 的距离；

$a_i$  是从  $z_{i-1}$  和  $x_i$  的交点到第  $i$  坐标系原点沿  $x_i$  轴 的偏置距离（或者说，是  $z_{i-1}$  和  $z_i$  两轴间的最小距离）；

$\alpha_i$  是绕  $x_i$  轴（按右手规则）由  $z_{i-1}$  轴转向  $z_i$  轴 的偏角。

根据这四个参数的定义，我们建立的 D-H 系统中的各个杆件的坐标参数设置如表 3-1 所示：

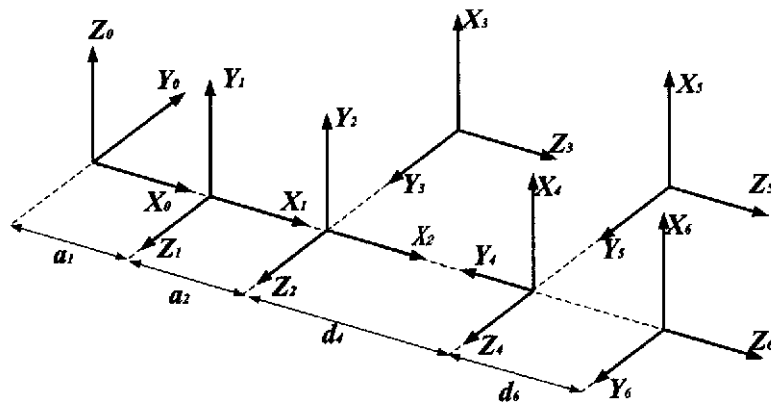


图 4-1 机器人杆件坐标系简图

Fig. 4-1 Sketch of the robot's links coordinate system

正确建立 D-H 模型是接下来运动学正逆问题求解、轨迹规划甚至是动力学的求解提供了基础。

表 4-1 机器人杆件坐标系参数表

Tab. 4-1 Parameters of the robot's links coordinate system

关节 $i$	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	关节变量范围
1	$0^\circ$	$90^\circ$	105 mm	0 mm	$-170^\circ \sim 170^\circ$
2	$0^\circ$	$0^\circ$	480 mm	0 mm	$-155^\circ \sim 70^\circ$
3	$90^\circ$	$90^\circ$	0 mm	0 mm	$-70^\circ \sim 210^\circ$
4	$0^\circ$	$-90^\circ$	0 mm	560 mm	$-180^\circ \sim 180^\circ$
5	$0^\circ$	$90^\circ$	0 mm	0 mm	$-115^\circ \sim 115^\circ$
6	$0^\circ$	$0^\circ$	0 mm	125+190 mm	$-180^\circ \sim 180^\circ$

### 4.3 运动学正解模型

一般而言，运动学正解是当给定串联机器人的各个关节的转角时，研究末端执行器相对于机座坐标系的位姿的问题。而研究串联机器人的正解，我们只须利用转换矩阵的乘积即可得到运动学正解的求解，即利用式（4-1）

$$T = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6 \quad (4-1)$$

其中，

$$\begin{aligned}
 {}^0A_1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & a_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & a_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^1A_2 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2A_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^3A_4 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4A_5 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & \sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & -\cos\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & {}^5A_6 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

当我们给出机器人各关节的转角值，并代入到上式中，我们就会得到机器人末端相对于机座坐标系的确切的位姿，这便是串联机器人的运动学正解问题。

### 4.4 运动学逆解模型

#### 4.4.1 串联机器人逆运动学模型

一般而言，运动学逆解是当给定串联机器人的末端执行器相对于机座坐标系的位姿时，研究各个关节的转角的问题。抛开机器人的运动轨迹规划不谈，即便是点对点运动也离不开运动学逆解求解的应用，可见，机器人运动学逆解问题是运动学研究的最为基本的问题，也是机器人能够应用的最基本的研究环节。

串联机器人的逆运动学求解一般可以采用几何法和 D-H 坐标法等方法，本文考虑到逆解求解的快捷性、并易于理解运动学逆解的取舍，采用了几何法与 D-H 法相结合的求解方法。

#### 4.4.2 逆运动学模型及其求解

可以将六自由度串联机器人的逆解求解分为两个过程：位置逆解求解和姿态逆解求解。由于串联机器人末端位置由前三个关节确定，而末端姿态是由后三个关节确定的，所以基本上可以分为上述两个过程。

**4.4.2.1 位置逆解的求解** 位置逆解的求解，即前三个关节  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  的求解，基本上采用了几何方法，该方法具有求解直观等优点。

##### 1、第一关节 $\theta_1$ 的求解

在求解前必须已知腕关节节点（即后 3 个坐标系交点）在肩部坐标系  $(x_0, y_0, z_0)$  中的位置矢量  $p$ 。将  $p$  投影至  $x_0y_0$  平面，得到相应的投影值： $p_{x1}$ 、 $p_{y1}$ ，如图 4-2 所示。

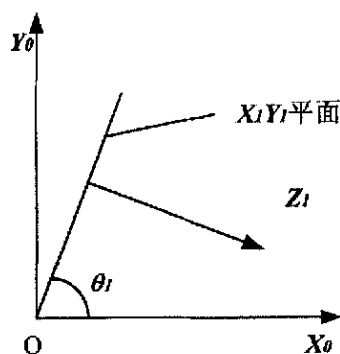


图 4-2 机器人关节 2 的解

Fig. 4-2 The solution of the joint 2 of the robot's system

由几何关系可以可得下列关于  $\theta_1$  的方程式： $r_1 = \sqrt{p_{x1}^2 + p_{y1}^2}$ ， $\sin\theta_1 = \frac{p_{y1}}{r_1}$ ，

$$\cos\theta_1 = \frac{p_{x1}}{r_1}, \quad \theta_1 = \arctan\left(\frac{\sin\theta_1}{\cos\theta_1}\right) \quad -\pi \leq \theta_1 \leq \pi$$

##### 2、第二关节 $\theta_2$ 的求解

为求关节二的解，把位置矢量  $p$  投影到  $x_1y_1$  平面，得到新的投影值： $p_{x2}$ 、 $p_{y2}$ ，如图 4-3 所示。



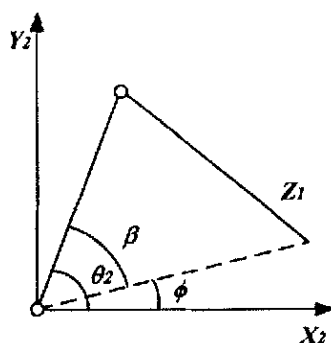


图 4-3 机器人关节 2 的解

Fig. 4-3 The solution of the joint 3 of the robot's system

在机器人学中串联机器人的研究必须要考虑手臂形态，一般有四种不同的手臂形态，即如下表所示。

我们可以以右臂（高臂）为例，进行接下来的研究。

$$r_2 = \sqrt{p_{x2}^2 + p_{y2}^2}, \quad \sin \phi = \frac{p_{y2}}{r_2}, \quad \cos \phi = \frac{p_{x2}}{r_2}, \quad \cos \beta = \frac{a_2^2 + r_2^2 - d_4^2}{2 \cdot a_2 \cdot r_2},$$

$$\sin \beta = \sqrt{1 - \cos^2 \beta}, \quad \sin \theta_2 = \sin \phi \cdot \cos \beta + \cos \phi \cdot \sin \beta,$$

$$\cos \theta_2 = \cos \phi \cdot \cos \beta - \sin \phi \cdot \sin \beta, \quad \theta_2 = \arctan\left(\frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2}\right) \quad -\pi \leq \theta_2 \leq \pi$$

### 3、第三关节 $\theta_3$ 的求解

由于我们所设计的 PUMA 机器人特殊结构，求解关节三时采用了 D-H 法， $\theta_3$  的求解要用到  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  的信息。

$$\cos(\theta_2 + \theta_3) = \frac{\cos \theta_1 \cdot p_{x1} + \sin \theta_1 \cdot p_{y1} - a_1 - a_2 \cdot \cos \theta_2}{d_4}$$

$$\sin(\theta_2 + \theta_3) = \frac{p_{z1} - a_2 \cdot \sin \theta_2}{d_4}, \quad \theta_3 = \arctan\left(\frac{\sin(\theta_2 + \theta_3)}{\cos(\theta_2 + \theta_3)}\right) - \theta_2$$

至此，关于串联机器人的位置确定的三个关节  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  都已求解，这三个参数在后面的求解还会用到。

**4.4.2.2 姿态逆解的求解** 首先将式 (4-1) 改写为如下的形式：

$${}^3R_4 \cdot {}^4R_5 \cdot {}^5R_6 = {}^2R_3^{-1} \cdot {}^1R_2^{-1} \cdot {}^0R_1^{-1} \cdot T = t = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

另外, 对 ${}^4R_5$ 和 ${}^5R_6$ 还有如下关系:

$${}^4R_5 \cdot {}^5R_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 \cdot \cos\theta_6 & -\cos\theta_5 \cdot \sin\theta_6 & \sin\theta_5 \\ \sin\theta_5 \cdot \cos\theta_6 & -\sin\theta_5 \cdot \sin\theta_6 & -\cos\theta_5 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

同时,

$${}^4R_5 \cdot {}^5R_6 = \begin{bmatrix} t_{11} \cdot \cos\theta_4 + t_{21} \cdot \sin\theta_4 & t_{12} \cdot \cos\theta_4 + t_{22} \cdot \sin\theta_4 & t_{13} \cdot \cos\theta_4 + t_{23} \cdot \sin\theta_4 \\ -t_{31} & -t_{32} & -t_{33} \\ -t_{11} \cdot \sin\theta_4 + t_{21} \cdot \cos\theta_4 & -t_{12} \cdot \sin\theta_4 + t_{22} \cdot \cos\theta_4 & -t_{13} \cdot \sin\theta_4 + t_{23} \cdot \cos\theta_4 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

根据上面的式子, 我们可以直接得到 $\theta_4$ 、 $\theta_5$ 和 $\theta_6$ 。

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{t_{32}}{-t_{31}}\right), \quad \theta_5 = \arctan\left(\frac{-t_{31}}{\cos\theta_6}\right), \quad \theta_4 = \arctan\left(\frac{t_{23}}{t_{13}}\right)$$

至此, 我们求取了全部的六个关节转角, 利用本节建立的逆运动模型, 并结合下面进行的运动学轨迹规划, 可以对机器人进行实时的控制。

**4.4.2.3 基于工具坐标系下的运动学逆解** 在某些特定的情况下, 机器人系统的运动要求在相对于工具坐标系进行一定的运动, 这是与相对于机座坐标系下的运动的要求完全不一样的, 但这种运动在工具进行微小范围内调整的操作却十分的实用, 也是机器人逆运动学研究的主要问题之一。

基于工具坐标系下的逆运动学模型可以通过下面的方法得到转化, 方法简单, 并且利用了上面的逆运动学模型, 有利于利用控制系统编程的继承性。

在工具坐标系下再附加一个坐标系, 其相对于工具坐标系的转换矩阵设为 $A_{\text{附}}$ , 这样附加坐标系相对于机座坐标系的相互关系可以由下面式子表示:

$$T_{\text{new}} = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6 \cdot A_{\text{附}} \quad (4-5)$$

如果我们希望机器人末端相对于当前的工具坐标系有一定的位姿变化, 变化的数值可以由 $A_{\text{附}}$ 进行设定。

$$A_{\text{附}} = \begin{bmatrix} n_{x\text{附}} & o_{x\text{附}} & a_{x\text{附}} & p_{x\text{附}} \\ n_{y\text{附}} & o_{y\text{附}} & a_{y\text{附}} & p_{y\text{附}} \\ n_{z\text{附}} & o_{z\text{附}} & a_{z\text{附}} & p_{z\text{附}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

此时，我们得到转换矩阵  $T_{new}$ ，为工具期望目标相对于机座坐标系的新的位姿。这样，我们就可以利用 4.4.2.2 一节的模型，进行求解来得到基于工具坐标系下的各关节的转动角度。

## 4.5 运动学轨迹规划

运动学轨迹规划问题是指使机器人末端跟踪预定路径的控制问题。本文利用受控参数在关节空间中规划机器人的运动，采用三次多项式实现了机器人末端轨迹的规划。

假设机器人的初始位姿是已知的，通过求解逆运动学方程可求得机器人期望末端位姿对应的关节角。若考虑其中某一关节在运动开始时刻  $t_i$  的角度为  $\theta_i$ ，希望该关节在时刻  $t_f$  运动到新的角度  $\theta_f$ 。规划轨迹的一种基本方法是使用多项式函数以使得初始和末端的边界条件与已知条件相匹配，这些已知条件为  $\theta_i$  和  $\theta_f$  及机器人在运动开始和结束时的速度，这些速度通常为 0 或其他已知数值。这四个已知信息用来求解下列三次多项式方程中的四个未知量。

$$\theta(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3$$

这里初始和末端条件是：

$$\theta(t_i) = \theta_i, \quad \theta(t_f) = \theta_f, \quad \dot{\theta}(t_i) = 0, \quad \dot{\theta}(t_f) = 0$$

对上面的多项式求一阶导数，得到

$$\dot{\theta}(t) = c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2$$

将初始和末端条件代入上面两式，得到

$$\theta(t_i) = c_0 = \theta_i, \quad \theta(t_f) = c_0 + c_1 t_f + c_2 t_f^2 + c_3 t_f^3, \quad \dot{\theta}(t_i) = c_1 = 0, \quad \dot{\theta}(t_f) = c_1 + 2c_2 t_f + 3c_3 t_f^2 = 0。$$

通过联立求解上面 4 个方程，得到方程中四个未知的数值。这样便可算出任意时刻的关节位置，控制器则据此驱动关节到达所需的位置。尽管每一关节使用同样步骤分别进行轨迹规划的，但所有关节自始至终都是同步驱动。如果机器人初始和末端的速率不为零，同样可以通过给定数据得到的未知的数值。

六自由度串联机器人系统使用三项多项式轨迹规划可以基本的实现比较平稳的空间轨迹运动，能够基本满足该系统在实际工作中的应用要求。

## 4.6 本章小结

建立机器人运动学模型并采用合理的方法进行求解，是机器人系统能够正常运行的最基本的要求。本章首先建立了 D-H (Denavit-Hartenberg) 坐标系，并基于此，建立了运动学模型（包括正解和逆解）。并考虑了求解快捷、方便，混合采用了几何法和 D-H 坐标方法，对运动学逆解求解的方案进行了讨论。并更进一步的讨论了基于工具坐标系下的机器人逆运动模型。最后，采用了三次多项式法对机器人末端轨迹规划问题进行了初步探讨。

## 第 5 章 轻型工业机器人的控制系统研制

### 5.1 机器人控制系统的总体结构

该机器人的控制系统由工控机、运动控制卡、驱动器、电机等构成。工控机的任务是根据给定的机器人位姿，由控制软件计算各关节电机所需转动的角度，并向运动控制卡发出相应的控制指令。控制卡内部的规划器将工控机送来的位置进行轨迹规划，并用 PID 算法完成位置的闭环跟踪。控制卡将位置环内的速度信息以电压的形式送给驱动器，驱动器完成速度闭环并将速度环内的力矩信息以电流的形式送给伺服电机。位置环和速度环的反馈均由伺服电机的编码器来实现。两台机器人采用完全独立的控制系统，其总体结构如图 5-1 所示。

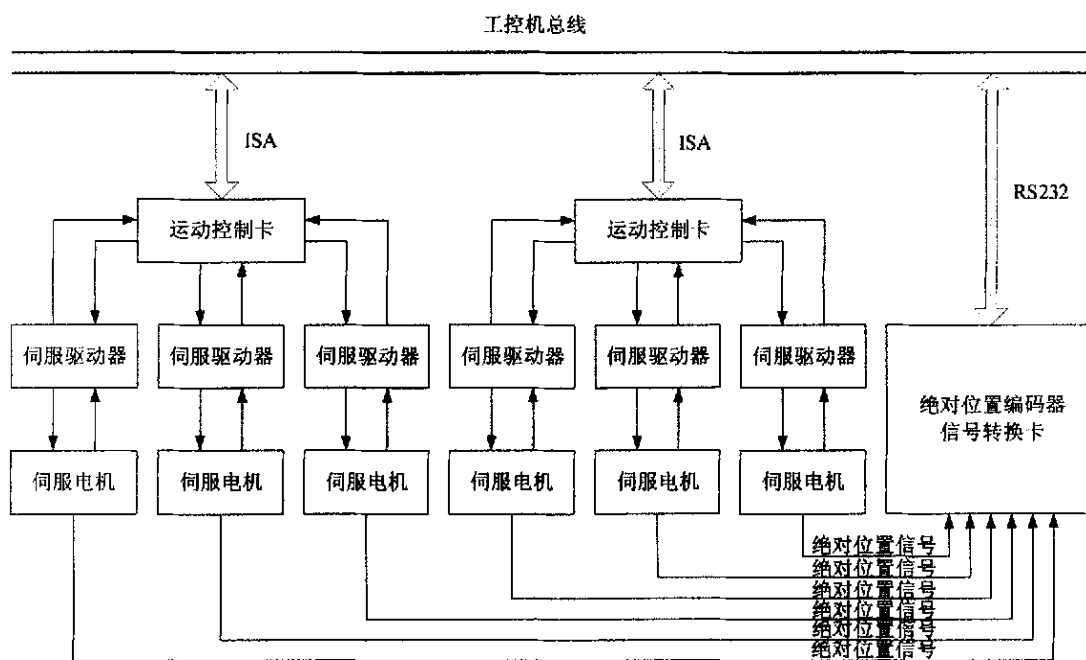


图 5-1 控制系统总体结构图

Fig. 5-1 The diagram of the servo system's structure

## 5.2 机器人控制系统硬件组成

系统由一台工控机、一块数字 IO 卡、一块绝对位置编码器信号转换卡、两块 HIT6501 控制卡和 6 个安川交流伺服电机及其驱动器组成。

1. 工控机：为尽量减小系统的重量，采用研华 IPC-6806S 紧凑型机箱，除计算机主板以外内部可差接 4 块 ISA 卡（其中两块 HIT6501 运动控制卡、一块数字 IO 卡和一块绝对编码器信号接收卡）。

2. **HIT6501 运动控制卡**：HIT6501 运动控制卡是基于计算机 ISA 总线的 3 轴高精度伺服运动控制卡。它可以接受计算机发送的控制命令和控制参数，并完成轨迹规划和位置跟踪。此外还可以通过光隔离接口接受系统的零位开关和限位开关传来的开关量信号。

3. **PCL-733 数字 I/O 卡**：PCL-733 数字 I/O 卡是基于计算机 ISA 总线 32 路隔离数字量的输入/输出卡，主要用于起停控制系统的伺服功能。

4. **绝对编码器信号转换卡**：由于电机驱动器以串行信号的方式给出的绝对位置信号不能直接读入到工控机或者运动控制卡中，因此本文设计了一块绝对编码器信号转换卡。它读入绝对位置信息，并将其转化为 RS232 电平的串口信号。控制软件通过工控机的串口将转换后的绝对位置信号读入。

5. **安川交流伺服电机及驱动器**：根据负载的不同，机器人本体选择了 5 种不同型号的交流伺服电机，与之配套的电机驱动器也有 5 种。

电机驱动器工作在速度模式，其运动指令由运动控制卡以电压的形式发出，驱动器完成速度闭环。并将速度环内的力矩信息以电流的形式送给伺服电机。机械本体的实物及控制柜的实物照片分别如图 5-2、5-3 所示。

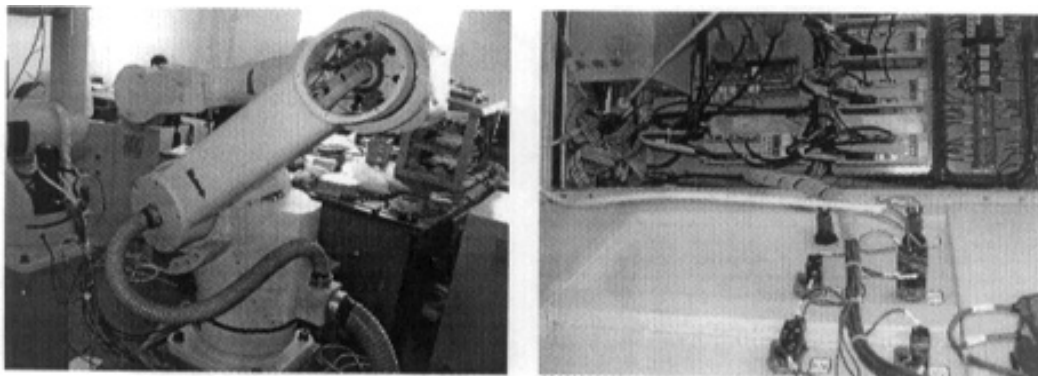


图 5-2 机器人本体及控制柜实物图

Fig. 5-2 The robot and its control box

### 5.3 控制系统的软件方案

控制系统软件是整个系统正常运行最重要的环节之一，它的质量直接关系到机器人系统功能的实现。开发平台采用 Windows2000，以面向对象的 VC++ 作为上位系统开发工具，它具有控制界面美观，使用简单方便等优点。目前我们使用的大部分操作系统都为 Microsoft 公司的 Windows 系列，采用同样是 Microsoft 公司产品的 Visual C++ 可以保证程序的兼容性和稳定性。

#### 5.3.1 控制系统的软件功能结构

软件系统按实现功能可以分为三个层次：人机交互层、运动规划层、计算及驱动控制层，构成如图 5-3 所示：

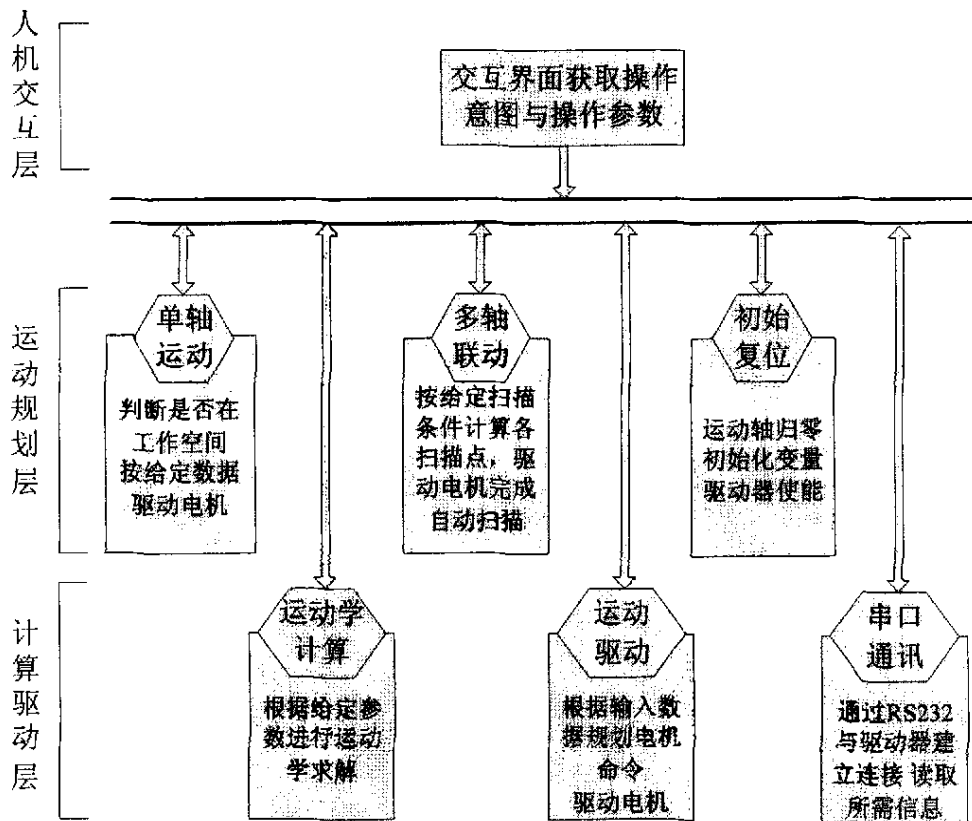


图 5-3 软件系统功能图

Fig.5-3 The diagram of the software's function

1. **人机交互层** 负责系统与操作者之间的数据交互，获得操作者的操作意图，转化为系统所需要的操作参数。机器人系统运动控制界面如图 5-4 所示，系统参数设置界面如图 5-5 所示。

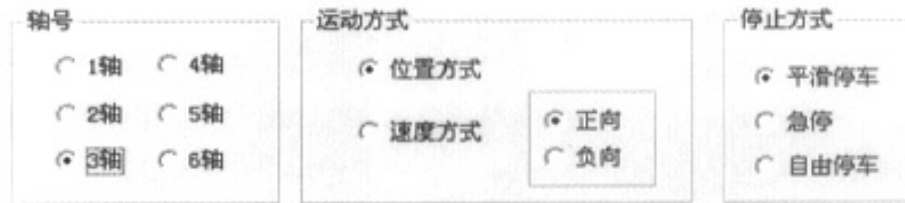


图 5-4 机器人系统运动控制界面

Fig.5-4 The motion control interface of robot

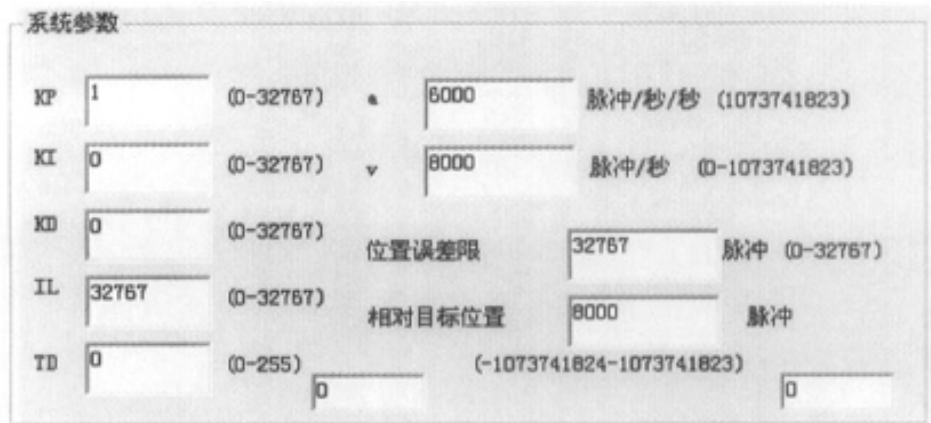


图 5-5 系统参数设置界面

Fig.5-5 The control interface of system parameters

2. **计算及驱动控制层** 包括运动学计算模块、运动控制器驱动模块、串口通讯模块。主要完成串连机器人运动所必需的运动学正、逆解运算，实现控制程序与伺服卡、伺服驱动器之间的交互，将运动命令转化为伺服卡可以识别的驱动命令输入驱动器，并从伺服卡读取所需信息。

3. **运动规划层** 连接人机交互层和计算驱动层的中间层，根据获得的操作者的操作意图，调用计算及驱动层的功能模块，进行运动规划，并转化成各轴的运动参数，主要完成单轴运动、多轴联动、系统初始化与复位等功能。

另外，考虑到系统的安全性。在系统各层内部功能实现及层间配合和数据交互上，系统还采取了较好的容错技术，尤其是在人机交互层，需要对操作者的误操作进行限制和处理，最大限度的避免误操作的产生。本文设计的软件系



统主要应用了以下方法，避免误操作的产生：

(1) 考虑系统操作的各个步骤及每步的相关性，对人机交互界面上的各个功能按钮定义各自的生命周期，在其生存周期内，按钮使能，相关操作可以实现。当系统运行到某一阶段，该按钮超出自身的生存周期，其相关操作不被允许，则操作者对按钮的操作不被响应。从而通过预先对操作过程的考虑，避免系统对误操作的响应。

(2) 串口通讯读取编码器的绝对位置信息，作为系统正常运行的基础，对每步运行操作实行软限位，从而保障系统在其工作空间内正常运行。

### 5.3.2 串口通讯设计

串口参数设置模块完成对端口号、波特率、停止位、数据位和奇偶校验位的设置，这些设置必须和下位机的设置一致，否则数据无法正常接收。一般来说，用 VC++ 实现串行通讯有三种方法：

方法一：使用 32 位 API 通信函数，Windows API 是所有 Windows 应用程序的根本所在，简单地说，API 就是一系列的例程，应用程序通过调用这些例程来请求操作系统完成一些服务。

方法二：使用 VC++ 提供的串行通信控件 MSComm，这是 Microsoft 公司提供的简化 Windows 下串行通信编程的 ActiveX 控件，为应用程序提供了通过串行接口收发数据的简便方法。

方法三：由第三方提供的 CSerialPort 类来编写串口通信函数，在这个界面中除能够进行与下位机相适应的设置外，还能够显示向下位机传送的参数。

本课题串行通信程序采用第三种方法。串口设置界面如图 5-6 所示。

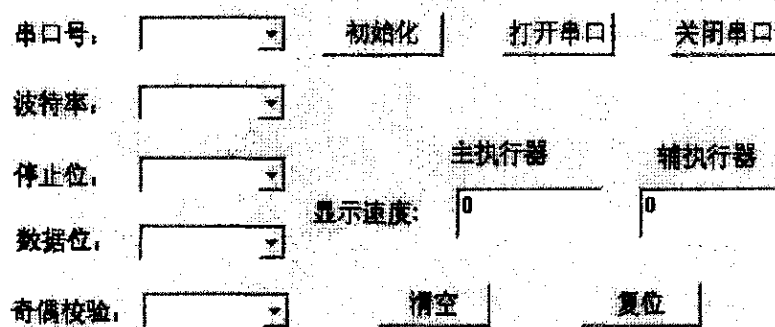


图 5-6 系统串口设置界面

Fig.5-6 The serial port setting interface

### 5.3.3 软件测试监控设计

为保证系统在工作时的可靠性，本软件提供了机器人的功能测试模块。在每次循环中，先按照设计最小速度，机器人各个关节依次由其最大位移运动到最小位移。待完成后，增加速度，再次运动，直至速度达到最高设计速度。这样便完成了一次测试，循环检测设置界面如图 5-7 所示。

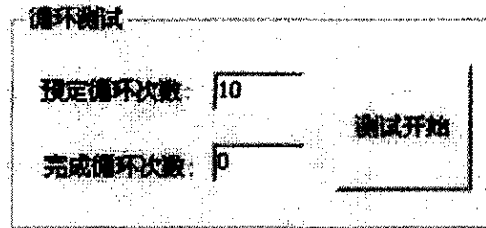


图 5-7 循环检测设置界面

Fig.5-7 The setting interface of circle detection

另外，测试部分还包括 I/O 测试、电机编码器测试，直流电机驱动器故障测试以及控制系统参数测试等等。

为保障工作过程中的安全性，软件提供了监控模块。实时从电机驱动器和光电编码器获得电机及末端执行器的位置、速度和工作状况。一旦发生意外，例如：超出工作范围，碰撞等等，立刻调用紧急程序，防止产生更大的损失。驱动器寄存器值反馈界面如图 5-8 所示。

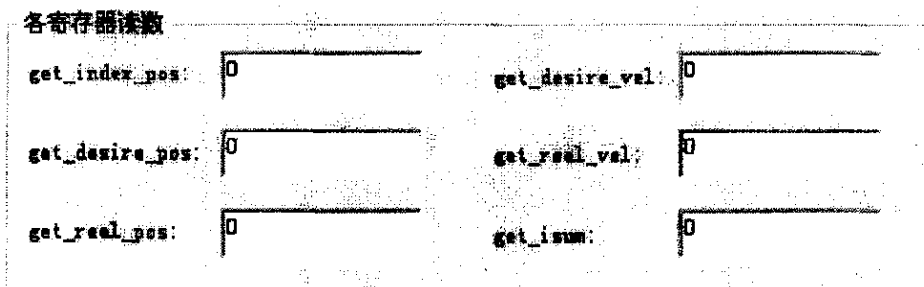


图 5-8 驱动器寄存器值反馈界面

Fig.5-8 The feedback interface of actuator registers

图 5-9 为系统程序流程图。其中的初始化部分包括机器人的 6 个运动轴归零、设置 PID 参数和光电码盘初始化等。在机器人运动阶段，程执行序是一个

不断循环检测的过程。按照设定的时间间隔，程序循环查询驱动器和光电码盘的值，来判断末端执行器是否超过工作空间，以及预定运动是否已经完成。

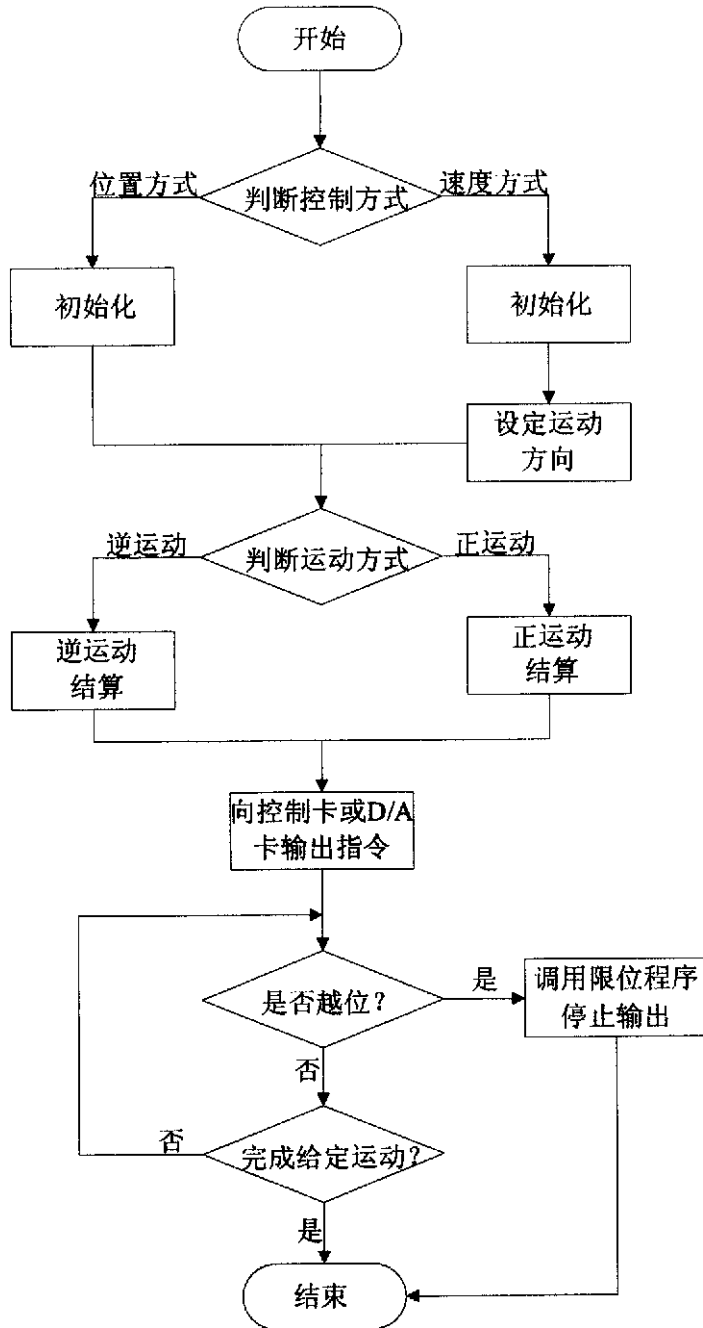


图 5-10 控制软件流程图

Fig.5-10 The flowing chart of the control software

使用上述软件对第二章提出的设计指标进行了验证，各关节转角范围均达到设计要求。机器人展开长度为 1176.5mm，重量为 112kg，达到了设计要求。

## 5.4 本章小结

本章设计并构建了该工业机器人的控制系统，在考虑人机交互、系统安全的前提下，完成了机器人的控制方案制定、软件编写，并在实际运行中验证了第二章提出的设计指标。

## 结论

在满足给定负载能力要求的前提下，尽量降低机器人本体的重量，不仅可以提高机器人的动态性能，而且可以节约材料、节约能源、降低成本，尤其对于移动机器人或面向空间作业的机器人来说，降低机器人的自重负载比会使得这一优势更加明显。本文结合 985 学科建设，研制了一款具有较小的自重负载比的 6-DOF 轻型工业机器人。

论文的主要研究工作及取得的成果如下：

1. 设计了一款轻型的面向高空作业的机器人，该机器人的自重负载比为 7.47，小于传统的工业机器人的这一指标。

2. 基于有限元分析的方法，重点分析了一些主要构件的冯式应力和剪切应力，为构件的进一步改进提供了方向上的指导。由于机器人承载较大，主体部件又采用铝材料，因此本文引入柔性体模型对机构末端进行了振动仿真分析。

3. 完成了该机器人的正、逆运动学分析，并求解了基于工具坐标系的逆解方程，从而更方便用户的使用。

4. 搭建了 6-DOF 轻型工业机器人的电控系统，编写了相关控制软件，完成了系统的实验调试，并验证了初始设计阶段提出的各项指标。

轻型臂逐渐成为研究的热点，但它的突破需要得益于材料、机械学、力学、控制、微电子技术等诸多学科的发展。本文主要针对机械系统设计方面进行了探讨，取得了一定的效果。作者从研究经验预计这方面的研究工作可以从以下几个方面进行：

1. 在关节驱动方面，研究机构、驱动一体化设计，进一步减小体积，降低重量。

2. 在系统控制方面，完善动力学控制，使系统由于材料等原因引起的刚性下降时，保证系统的控制精度。

3. 从基础部件研究入手，根本上解决重量和性能问题。

## 参考文献

- 1 徐国华, 谭民. 移动机器人的发展现状及趋势. 机器人技术与应用. 2001, 22(3) : 34~37
- 2 Kopacek P. Intelligent manufacturing : Current satuation and future trend . J of Intelligent and Robotic Systems . 1999 , 26(3) : 217~229
- 3 张永德, 张忠泰, 刘延荣. SSD-1 型搬运机器人的结构设计. 黑龙江自动化技术与应用. 1998, 13(2) : 55~57
- 4 常志斌, 单鸿波, 方炜镖. 长臂机械手结构的可靠性设计. 湖北汽车工业学院学报. 1997, 11(3) : 28~32
- 5 Hamilton J F , Cipra R J . Design and Analysis of Robot Manipulators , ME-597T , Purdue University . 2000,26(5): 66~68
- 6 李云江, 樊炳辉, 荣学文. 喷浆机器人手臂结构设计. 冶金矿山设计与建设. 1999, 31(5) : 35~38
- 7 潘沛霖, 杨宏, 高波, 吴伟光. 四自由度折叠式机械手的结构设计与分析. 哈尔滨工业大学学报. 1994, 26(4) : 45~49
- 8 Carmen Maria, Muller-Karger. Hyperbolic trajectories for pick-and-place operations to elude obstacles . IEEE Trans on Automatic Control . 1983 .AC-28
- 9 Dong S.K, Wayne J.B.An. Inverse Daynam ic Mechod Yielding Flixible Manipulators. Proc. of IEEE Conf. on Robotics and automation,1993:743~748
- 10 李洪波. 冗余七自由度串并联拟人手臂的设计研究. 河北工业大学工学硕士学位论文. 2003:10~38
- 11 杨春杰. 一种新型多关节式手臂传动机构. 黄石高等专科学校校报. 2000, 16(4) : 36~38
- 12 Ichico Kato, Kunisada.moto Mechanical Hands Inustrated. Washington: He misphere Publising Corporation, 1987: 52~53
- 13 吴为民. 航天机械手的运动特点和工作空间分析. 机械. 1997, 24(4) : 6~10
- 14 Pavlov V.V. Polychromatic Graph of Mathematics Simulation for Technical System. Proceedings of Scientific and Technical Conference (CAD-88), Plovdiv, Bulgaria, 1988:12~16
- 15 孙茂相, 周明, 王艳红, 尹朝万. 多移动机器人实时最优运动规划. 控制与

- 决策. 1998, 13(2):25~28
- 16 董立志, 孙茂相等. 基于实时障碍物的机器人运动规划. 机器人. 2000, 22(3):12~16
  - 17 刘宇. 七自由度冗余手臂多性能准则优化及运动控制的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 2004:1~57
  - 18 Albert V Zomaya. On the fastsimulation of Directand Inverse Jacobians for robot manipulators *Robotica and Autonomous Systems*,1992,23(10):43~61
  - 19 正大, 王小忠. 机器人碰撞路径规划方法研究及实现. 华中科技大学 (自然科学版). 2004, 32(10): 51~55
  - 20 孙茂相, 董立志, 朱枫, 董再励, 尹朝万. 基于实时障碍物预测的机器人运动规划. 机器人. 2000, 22(1):32~36
  - 21 Unong Zhang, Jun Wang, Youshen Xia. A Dual Neural Network for Redundancy Resolution of Kinematically Redundant Manipulators Subject to Joint Limits and Joint Velocity Limits. *Trans. IEEE on Neural Network*. 2003,14(3):658~667
  - 22 郭戈. 移动机器人路径规划与环境绘图. 机器人 2003 年 7 月第 25 卷第 4 期
  - 23 李贻斌, 周凤余, 李彩虹, 刘明. 移动机器人在线路径规划算法研究. 系统工程与电子技术. 2000, 22(2):15~18
  - 24 张育, 徐裕庚. 基于 V 距离势场的实时滚动路径规划. 机器人. 1997, 15(5):36~39
  - 25 Newton R Todd XuYangsheng. Neural network control of space manipulator. *IEEE Control Systems*, 1993, 23(12):21~24
  - 26 赵超, 黄凤歧, 周军. 变构型空间站的姿态动力学建模与控制. 北京航空航天大学学报. 2002, 28(2):21~23
  - 27 Thomas Hessburg, Masayoshi Tom izuka. Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance. *IEEE Control Systems*, 1994,24(4):42~48
  - 28 叶长龙. 工业机器人的运动学及动力学研究. 沈阳工业大学工学硕士学位论文. 2002:22~36
  - 29 王帮峰, 张瑞芳, 张国忠. 回转起重机吊重摆振的动力学模型与控制. 中国机械工程. 2001, 12(11):34~36
  - 30 李华忠, 洪炳熔, 杨维萍, 柳长安. 自由飞行空间机器人的动力学控制及仿真. 武汉汽车工业大学学报. 1999, 21(2):23~26
  - 31 Albus J S. A new approach to manipulator control: the cerebellar modelarticulation controller(CMAC). *Trans ASMEJ Dynamic Systems*

- Measurement and Control, 1975, 97:220-227
- 32 彭春江. 辐射检测机器人的机构设计及控制. 太原理工大学工学硕士学位论文. 2004:21~50
- 33 蔡自兴. 机器人学. 清华大学出版社. 2000:10~30
- 34 蒋新松. 国外机器人的发展及我们的对策研究. 机器人. 1987, 9(1):5~9
- 35 张永德. 机器人多指灵巧手的结构优化设计及抓取机理的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 1999:12~18
- 36 Zhang Wei. Research of the kernel techniques in the telligent tobot based on neural network: inverse kinematics, trajectory plan and motion control:[dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics&Astronautics, 1996,18(5):45~50
- 37 杨春杰. 多关节机械手设计与运动学研究. 武汉理工大学工学硕士学位论文. 2001:15~46
- 38 刘伟. 工业机械手概念设计中的关键技术研究. 西安交通大学工学硕士学位论文. 2003:23~30
- 39 孙立宁, 刘品宽, 吴善强, 刘涛. 管内微型移动机器人研究与发展现状. 光学精密工程. 2003, 11(4):14~18
- 40 Bruno Monsarrat, Clement M. Gosselin. Singularity Analysis of a Three-Leg Six-Degree-of-Freedom Parallel Platform Mechanism Based on Grassmans Line Geometry. The International Journal of Robotics Research. April 2001, 20(4):312~326
- 41 Tae-Wook Park, Hyun-Seok Yang. A Study on Singularity Avoidance and Robust Control of Redundant Robot. IEEE Int. Conf. on Intelligent Control and Automation, 2002,3:1687~1691
- 42 张凤, 谈大龙. 动态未知环境下基于相对坐标系的移动机器人实时运动规划. 机器人. 2004, 26(5):22~25
- 43 TASKEO Omichi, AKIHISA Okino. Study on multi fingered manipulation for real task[J].Advanced Robotics,1992,6(1):127-140
- 44 DELGADO K K, LONG M, H,Kine. Analysis of 7-DOF manipulators[J]. Int.J of Robotics Research.1992,11(5):469-481
- 45 时凯飞, 李瑞峰. 七自由度仿人手臂运动学研究. 哈尔滨工业大学学报. 2003, 35(7):26~29
- 46 Meirovitch L, Kwak M. Dynamics and control of spacecraft with retargeting



- flexible antennas[J]. *Journal of Guidance* , 1990,13(2):241~248
- 47 Chen Y H , Piontek E D . Decentralized adaptive robust control and its application to an uncertain flexible beam[J] . *Journal of Guidance and control* ,1992,15(3) : 692~699
- 48 刘辛军, 汪劲松, 高峰, 金振林. 一种串并联结构拟人七自由度冗余手臂的结构设计. *中国机械工程*. 2002, 13(2) :12~15
- 49 Miroslaw Galicki. Time-optimal controls of kinematically redundant manipulators with geometric constrains . *IEEE Trans on Robotics and Automation* . 2000,24(6):112~118
- 50 杨春杰, 胡海波. 新型多关节式机械手臂的结构设计. *黄石高等专科学校学报*. 2001, 17(1) :55~59
- 51 N.V.Q. Hung, H.D. Tuan, T. Narikiyo, P. Apkarian. Adaptive Controls for Nonlinearly Parameterized Uncertainties in Robot Manipulators. *Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control*, 2002,2:1727~1732

## 攻读学位期间发表的学术论文

- 1 谭雪松, 赵建文. 一种串联机器人逆解的简易解法. 机械设计. (2005年8月投稿)

## 致 谢

感谢恩师孙立宁教授在硕士课题中给与本人的悉心指导与教诲。孙老师严谨务实的工作作风、严格规范的教学态度、渊博深厚的专业知识以及敏锐深刻的学术洞察力给我留下极其深刻的印象。孙老师的信任与鼓励成为我继续求学的动力，在日常的学习生活中，孙老师正直积极的生活态度，严于律己的规范要求 and 诲人不倦的敬业精神一直是我学习的榜样。

本人的硕士论文工作得到了杜志江老师、富历新老师、吴冬梅老师的耐心细致的指导。他们认真负责、一丝不苟、刻苦钻研的学术作风使作者受益匪浅，他们提出的很多建设性建议对我启发很大，在此向各位老师致以深深的谢意。同时，非常感谢李丹老师、李佳老师在生活中给与本人的帮助。

感谢以赵建文博士、董为博士、何富军博士、张明挥博士、王伟东博士为代表的机器人机构与医疗机器人 206 实验室的全体同学对本人在硕士课题研究阶段的细致的帮助与鼓励。

感谢同窗好友张金超、罗育峰、于洪键、纪宏名、夏忠定、安振威等同学的帮助于鼓励。

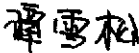
感谢父母对我默默地支持，没有他们的关怀和鼓励，我无法顺利地完课题。

最后，向所有关心、帮助我的导师、师兄、同窗好友、以及我的家人致以最最诚挚的谢意！

## 附件

### 哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《  
》，是本人  
在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得  
的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研  
究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方  
式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字 

日期：2015年11月3日

### 哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书

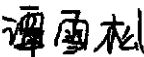
《  
》系本人在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间在  
导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，  
本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学  
关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印  
件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用  
影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

保密，在 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

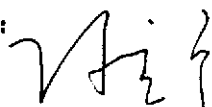
不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期：2015年11月3日

导师签名：



日期： 年 月 日