

# 高速铣削加工工艺

## 培训教程

仅供参考

不可公布

2004年3月

# 目 录

一、高速切削技术概述.....	1
1. 高速切削的基本概念.....	1
2. 高速铣削的特点.....	2
3. 高速切削的关键技术.....	4
二、高速切削机床.....	9
1. 高速切削机床的基本结构.....	9
2. 高速主轴.....	9
3. 高速进给机构.....	10
4. 高速 CNC 控制系统.....	10
5. 高速切削机床的安全防护与实时监控系统.....	10
6. 选购高速切削机床的方法.....	11
三、高速切削刀具.....	17
1. 刀具材料.....	17
2. 刀具结构.....	18
3. 刀杆结构.....	19
4. 刀具动平衡.....	21
四、高速数控编程.....	22
1. 高速数控编程的特点.....	22
2. 粗加工编程.....	25
3. 精加工编程.....	27
五、高速铣削工艺.....	32
1. 刀具选择.....	32
2. 切削参数选择.....	33
3. 加工实例.....	45

# 一 高速切削技术概述

## 1. 高速切削的基本概念

高速切削（HSM或HSC）是二十世纪九十年代迅速走向实际应用的先进加工技术，通常指高主轴转速和高进给速度下的立铣，国际上在航空航天制造业、模具加工业、汽车零件加工、以及精密零件加工等得到广泛的应用。高速铣削可用于铝合金、铜等易切削金属和淬火钢、钛合金、高温合金等难加工材料，以及碳纤维塑料等非金属材料。例如，在铝合金等飞机零件加工中，曲面和结构复杂，材料去除量达高达90%~95%，采用高速铣削可大大提高生产效率和加工精度；在模具加工中，高速铣削可加工淬火硬度大于HRC50 的钢件，因此许多情况下可省去电火花加工和手工修磨，在热处理后采用高速铣削达到零件尺寸、形状和表面粗糙度要求。

高速切削概念始于1931年德国所罗门博士的研究成果：“当以适当高的切削速度(约为常规速度的5~10倍)加工时，切削刃上的温度会降低，因此有可能通过高速切削提高加工生产率”。六十多年来，人们一直在探索有效、适用、可靠的高速切削技术，到二十世纪九十年代逐渐在工业实际中推广应用。

由于每种材料高速切削的速度范围不同，高速切削目前尚无统一的定义，高的实际切削线速度是基本条件，但还有其它一些要素。在工程实践中，高速切削的含义还包括：

- 除高切削速度外，高速切削还涉及非常特别的加工工艺和生产设备
- 适中的主轴转速和大的铣刀直径也可实现高速切削
- 以常规切削用量4~6倍的切削速度和进给速度精加工淬火钢也属于高速切削

小型零件的粗加工到精加工以及其它零件的精加工、高速切削均属于高生产率加工方法，对于形状复杂和精度要求高的零件，高速切削更为重要。图1.1为几种材料高速切削的速度范围。

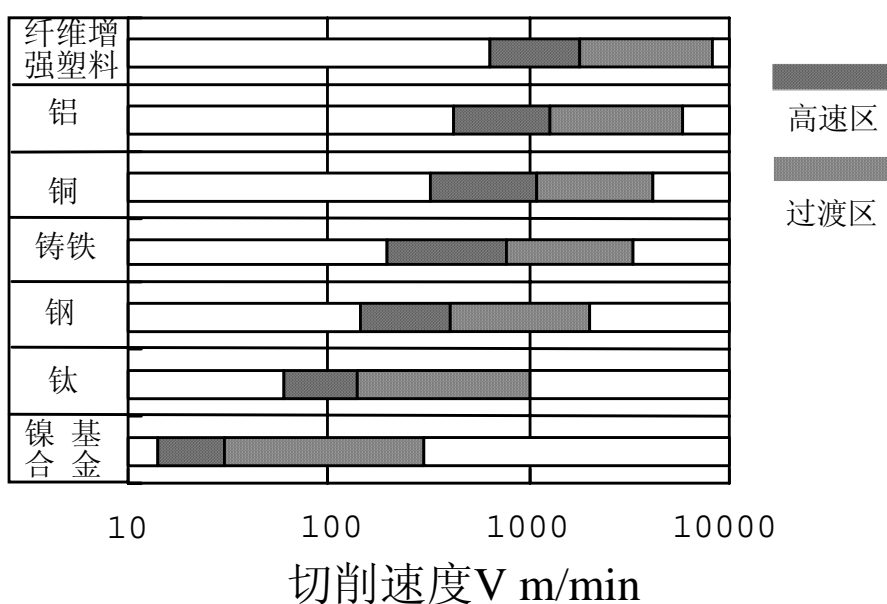


图 1.1 几种材料高速切削速度范围

高速切削的发展源于市场日益激烈的竞争，对时间和成本效率的要求越来越高。同时也提供了解决问题的新方案，包括解决新材料的加工问题；越来越高的加工质量要求和越来越复杂的三维曲面形状；减少装夹次数和搬运时间，减少和免除费时费钱的电火花加工；适应越来越快的设计开发速度；解决薄壁零件和精密零件的加工问题等等。高速切削是一项系统技术，从刀具材料、刀柄、机床、控制系统、加工工艺技术、CAD/CAM 等，均与常规加工有很大区别。

## 2. 高速铣削的特点

### 2.1 高速铣削的一般特征

高速铣削一般采用高的铣削速度，适当的进给量，小的径向和轴向铣削深度，铣削时，大量的铣削热被切屑带走，因此，工件的表面温度较低。随着铣削速度的提高，铣削力略有下降，表面质量提高，加工生产率随之增加。但在高速加工范围内，随铣削速度的提高会加剧刀具的磨损。由于主轴转速很高，切削液难以注入加工区，通常采用油雾冷却或水雾冷却方法。图 2.1.1 所示为铣削速度对加工性能的影响。

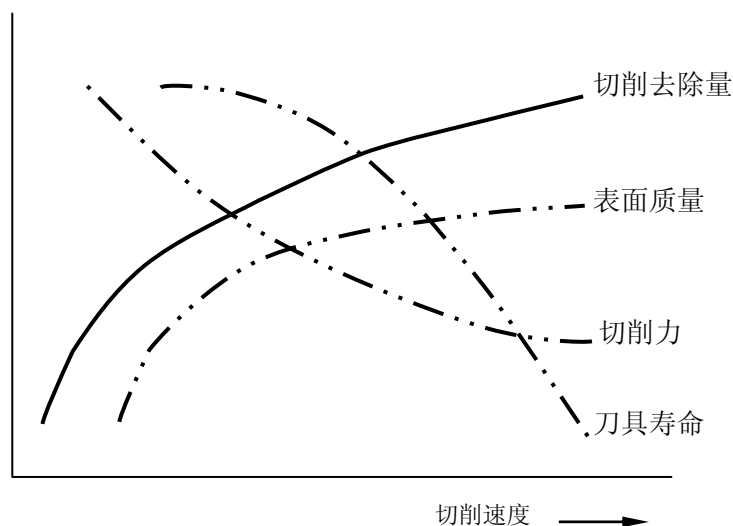


图 2.1.1 高速铣削的特点

### 2.2 高速铣削的优点

由于高速铣削的特性，高速铣削工艺相对常规加工具有以下一些优点：

#### 1. 提高生产率

铣削速度和进给速度的提高，可提高材料去除率。同时，高速铣削可加工淬硬零件，许多零件一次装夹可完成粗、半精和精加工等全部工序，对复杂型面加工也可直接达到零件表面质量要求，因此，高速铣削工艺往往可省却电加工、手工打磨等工序，缩短工艺路线，进而大大提高加工生产率。

#### 2. 改善工件的加工精度和表面质量

高速铣床必须具备高刚性和高精度等性能，同时由于铣削力低，工件热变形减少，高速铣削的加工精度很高。铣削深度较小，而进给较快，加工表面粗糙度很小，铣削铝合金时可达 Ra0.4~0.6，铣削钢件时可达 Ra0.2~0.4。

### 3. 实现整体结构零件加工

高速切削可使飞机大量采用整体结构零件，明显减轻部件重量，提高零件可靠性、减少装配工时。

#### 4. 有利于使用直径较小的刀具

高速铣削较小的铣削力适合使用小直径的刀具，可减少刀具规格，降低刀具费用。

#### 5. 有利于加工薄壁零件和高强度、高硬度脆性材料

高速铣削铣削力小，有较高的稳定性，可高质量地加工出薄壁零件，采用高速铣削可加工出壁厚 0.2 mm，壁高 20 mm 的薄壁零件。高强度和高硬度材料的加工也是高速铣削的一大特点，目前，高速铣削已可加工硬度达 HRC60 的零件，因此，高速铣削允许在热处理以后再进行切削加工，使模具制造工艺大大简化。

#### 6. 可部分替代其他某些工艺，如电加工、磨削加工等

由于加工质量高，可进行硬切削，在许多模具加工中，高速铣削可替代电加工和磨削加工。

#### 7. 经济效益显著提高

由于上述种种优点，综合效率提高、质量提高、工序简化、机床投资和刀具投资以及维护费用增加等，高速铣削工艺的综合经济效益仍有显著提高。

## 2.3 高速铣削的问题

高速铣削是一项新技术，尚存在许多不足值得改进，包括：

1. 高速铣削机床较昂贵，对刀具的切削性能、精度和动平衡等要求较高，固定资产投资较大，刀具费用也会提高；
2. 加减速度时，加速度较大，主轴的启动和停止加剧了导轨、滚珠丝杆和主轴轴承磨损，引起维修费用的增加；
3. 需要特别的工艺知识，专门的编程设备，快速数据传输接口；
4. 缺乏高级的操作人员；
5. 调试周期较长；
6. 紧急停止实际上不可能实现！人工错误、硬件或软件错误都会导致严重的后果；
7. 安全要求很高：机床必须使用具有防弹功能的防护板和防弹玻璃；必须控制刀具伸出量；不要使用“重的”刀具和刀杆。要定期检查刀具、刀杆和螺钉的疲劳裂缝。选择刀具时必须注意许用的最大主轴转速，不使用整体高速钢刀具。

## 2.4 高速铣削的应用

高速铣削具有很多优点，应用越来越广泛，但也存在一些不足，因此，必须选择适合高速铣削的领域应用该技术。表 2.4.1 列出了高速铣削一些应用范围。

高速铣削在许多领域取得了成功的应用，如：飞机的蜂窝结构件必须采用高速铣削技术才能保证加工质量、梁、框、壁板等零件加工余量特别大，高速铣削可提高生产率，发动机的叶片采用高速铣削可解决材料难加工问题，等等；绝大部分模具均可利用高速铣削技术加工，如锻模、压铸模、注塑与吹塑模等，锻模腔体较浅，刀具寿命较长；压铸模尺寸适中，

生产率较高，注塑与吹塑模一般尺寸较小，比较经济。加工模具的石墨电极和铜电极也非常适用高速铣削；高速铣削也适用于模具的快速原型制造；电子产品中的薄壁结构加工尤其需要高速加工。汽车发动机零件也是高速铣削的应用领域。此外，高速铣削也可用于原型制造。

表 2.4.1 高速铣削应用范围

技术优点	应用领域	事 例
高去除率	轻合金，钢和铸铁	航空航天产品，工具、模具制造
高表面质量	精密加工，特殊工件	光学零件，精细零件，旋转压缩机
小切削力	薄壁件	航空航天工业，汽车工业，家用设备
高激振频率	避开共振频率加工	精密机械和光学工业
切屑散热	热敏感工件	精密机械，镁合金加工

### 3. 高速铣削的关键技术

高速切削是制造技术中引人注目的一项新技术，其应用面广，对制造业的影响大。高速切削技术是新材料技术、计算机技术、控制技术和精密制造技术等多项新技术综合应用发展的结果。高速切削主要包括以下几方面的基础理论与关键技术：

- 1) 高速切削机理；
- 2) 高速切削刀具技术；
- 3) 高速切削机床技术；
- 4) 高速切削工艺技术；
- 5) 高速加工的测试技术等。

德国 Darmstadt 工业大学生产工程和机床研究所的舒尔兹教授(H. Schulz)对高速切削技术进行了多年的深入研究，他对高速切削所包含的技术提出了下面的框图（图 3.1）。

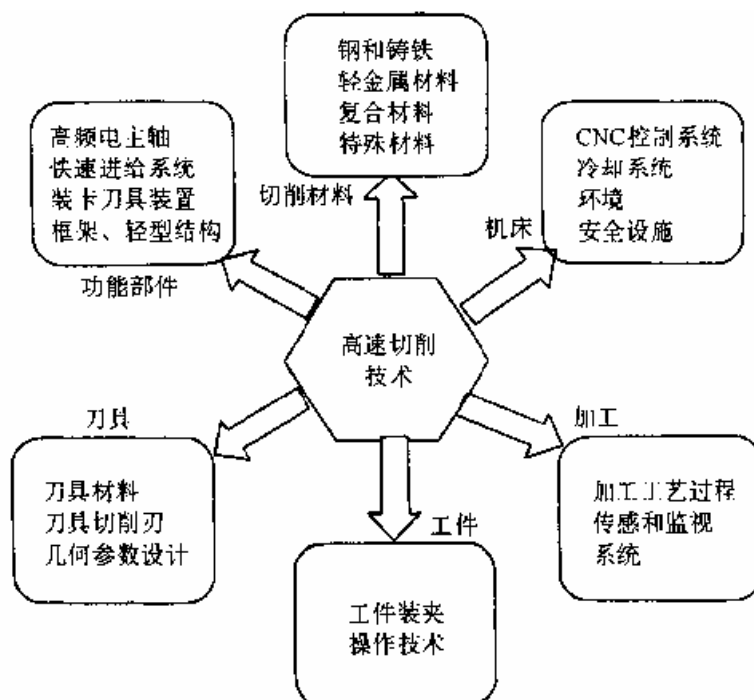


图 3.1 高速切削所包含的技术框图

### 3.1 高速切削机理的研究

高速切削技术的应用和发展是以高速切削机理为理论基础的。通过对高速加工中切屑形成机理、切削力、切削热、刀具磨损、表面质量等技术的研究，也为开发高速机床、高速加工刀具提供了理论指导。试想，如果没有萨洛蒙高速切削假设、没有德国、美国和日本等国的科学家、工程师不断的研究，去证实萨洛蒙的理论，去完善和修改高速切削理论，也不会有今天高速切削的快速发展和广泛应用。因此，在高速切削技术的发展中，高速切削机理的研究仍然占有重要的地位，而且高速切削机理和相关理论至今还远远没有完善，高速切削数据库尚未真正建立起来。

我国高速切削机理研究工作，和美国、德国、日本等先进工业国家比还有相当大的差距。基础理论的落后也极大地制约了高速切削技术在我国的发展和应用。

高速切削机理的研究主要有以下几个方面：

#### (1) 高速切削过程和切屑成形机理的研究

对高速切削加工中切屑成形机理、切削过程的动态模型、基本切削参数等反映切削过程原理的研究，采用科学实验和计算机模拟仿真两种方法。

#### (2) 高速加工基本规律的研究

对高速切削加工中的切削力、切削温度、刀具磨损、刀具耐用度和加工质量等现象及加工参数对这些现象的影响规律进行研究，提出反映其内在联系的数学模型。实验方案设计和试验数据处理也是研究工作中需要解决的问题。工艺参数应基于建立的数学模型及多目标优化的结果。

#### (3) 各种材料的高速切削机理研究

由于不同材料在高速切削中表现出不同的特性，所以，要研究各种工程材料在高速切削下的切削机理，包括轻金属材料、钢和铁、复合材料、难加工合金材料等。通过系统的实验研究和分析，建立高速切削数据库，以便指导生产。

#### (4) 高速切削虚拟技术研究

在试验研究的基础上，利用虚拟现实和仿真技术，虚拟高速加工过程中刀具和工件相对运动的作用过程，对切屑形成过程进行动态仿真，显示加工过程中的热流、相变、温度及应力分布等，预测被加工工件的加工质量，研究切削速度、进给量、刀具和材料以及其他切削参数对加工的影响等。

应该指出，虚拟现实技术是基于计算机技术和信息技术的发展而产生的一种信息处理技术。采用虚拟技术对高速切削的理论进行研究具有节约资源、加快研究进度的优越性，特别是对于一些试验条件不具备或试验很难做、且耗资耗力巨大的试验，用虚拟技术进行分析研究，虚拟仿真试验情况，是非常有价值的。但是虚拟仿真必须有试验数据作基础，同时还要检验虚拟仿真的真实性和可信性。虚拟现实技术的应用，无疑会给高速切削机理的研究工作提供一种崭新和有效的方法，必将大大加快高速切削理论研究工作的进程。

### 3.2 高速切削刀具

高速切削刀具技术是实现高速加工的关键技术之一。生产实践证明，阻碍切削速度提高的关键因素是切削刀具是否能承受越来越高的切削温度。在萨洛蒙高速切削假设中并没有把切削刀具作为一个重要因素。但是随着现代高速切削机理研究和高速切削试验的不断深入，

证明高速切削的最关键技术之一就是高速切削所用的刀具。舒尔兹教授在第一届德国—法国高速切削年会(1997年)上做的报告中指出,目前,在高速加工技术中,有两个基本的研究发展目标,一个是高速引起的刀具寿命问题,另一个是具有高精度的高速机床。

切削刀具的性能在很大程度上会制约高速切削技术的应用和推广。目前,高速切削刀具的国产化也是机械制造行业急需解决的问题。

高速切削刀具与普通加工的刀具有很大不同。目前,在高速切削中使用的刀具有硬质合金、聚晶金刚石(PCD)、聚晶立方氮化硼(PCBN)、陶瓷等材料。在我国,一些高校和研究单位也在进行这些新刀具材料的研究,但规模很小,距实用化还有相当大的距离。

### 3.3 高速切削机床技术

高速机床是实现高速加工的前提和基本条件。一个国家高速加工的技术水平、很大程度反映在高速机床的设计制造技术上。在现代机床制造中、机床的高速化是一个必然的发展趋势。在要求机床高速的同时,还要求机床具有高精度和高的静、动刚度。

高速机床技术主要包括高速单元技术(或称功能部件)和机床整机技术。单元技术包括高速主轴、高速进给系统、高速 CNC 控制系统等;机床整机技术包括机床床身、冷却系统、安全设施、加工环境等。分别简介如下:

#### (1) 高速主轴单元

高速主轴单元包括动力源、主轴、轴承和机架四个主要部分,是高速加工机床的核心部件。在很大程度上决定了机床所能达到的切削速度、加工精度和应用范围。高速主轴单元的性能取决于主轴的设计方法、材料、结构、轴承、润滑冷却、动平衡、噪声等多项相关技术,其中一些技术又是相互制约的,包括高转速和高刚度的矛盾、高速度和大转矩的矛盾等等。因此,提高主轴转速和精度是一项很困难的工作,设计和制造高速主轴必须综合考虑满足多方面的技术要求。

高速主轴一般做成电主轴的结构形式,其关键技术包括高速主轴轴承、无外壳主轴电动机及其控制模块、润滑冷却系统、主轴刀柄接口和刀具夹紧方式以及刀具动平衡等等。

#### (2) 高速进给系统

进给系统的高速性也是评价高速机床性能的重要指标之一,不仅对提高生产率有重要意义,而且也是维持高速加工刀具正常工作的必要条件。对高速进给系统的要求不仅仅能够达到高速运动,而且要求瞬时达到高速、瞬时准停等,所以要求具有很大的加速度以及很高的定位精度。

高速进给系统包括进给伺服驱动技术、滚动元件导向技术、高速测量与反馈控制技术和其他周边技术,如冷却和润滑、防尘、防切屑、降噪及安全技术等。

目前常用的高速进给系统有三种主要的驱动方式:高速滚珠丝杠、直线电动机和虚拟轴机构。和高速进给系统相关联的还有工作台(拖板)、导轨的设计制造技术等等。

#### (3) CNC 控制系统

相对而言,现有的控制系统对超高速机床所需的进给率来说是显得太慢了,超高速机床要求其 CNC 系统的数据处理时间要快得多,高的进给速率要求 CNC 系统有很高的内部数据处理速率,而且还应有较大的程序存储量。CNC 控制系统的关键技术主要包括快速处理刀具轨迹、预先前馈控制、反应的伺服系统等。



#### (4) 床身、立柱和工作台

高速机床设计的另一个关键点，是如何在降低运动部件惯量的同时，保持基础支承部件高的静刚度、动刚度和热刚度。通过计算机辅助工程的方法用有限元法和优化设计，能获得减轻重量、提高刚度的床身、立柱和工作台结构。为获得较好的动态性能，有些高速机床床身由聚合物混凝土材料制成。

#### (5) 切屑处理和冷却系统

高速切削过程会产生大量的切屑，单位时间内高的切屑切除量需要高效的切屑处理和清除装置。高压大流量的切削液不但可以冷却机床的加工区，而且也是一种行之有效的清理切屑的方法，但它会对环境造成严重的污染。切削液的使用并不是对高速切削的任何场合都适用。例如对抗热冲击性能差的刀具，在有些情况下，切削液反而会降低刀具的使用寿命，这时可采用干切削，并用吹气或吸气的方法进行清理切屑的工作。

#### (6) 安全装置

机床运动部件的高速运动、大量高速流出的切屑以及高压喷洒的切削液等等，都要求高速机床要有一个足够大的密封工作空间。刀具破损时的安全防护尤为重要，工作室的仓壁一定要能吸收喷射部分的能量。此外防护装置必须有灵活的控制系統，以保证操作人员在不直接接触切削区的情况下的操作安全。

### 3.4 高速切削的工艺技术

高速切削的工艺技术也是成功进行高速加工的关键技术之一。切削方法选择不当，会使刀具加剧磨损，完全达不到高速加工的目的。高速切削的工艺技术包括切削方法和切削参数的选择优化，对各种不同材料的切削方法、刀具材料和刀具几何参数的选择等。

#### (1) 切削方法和切削参数的选择与优化

在高速切削中，必须对切削方法和切削参数进行优化选择。其中包括优化切削刀具控制，如刀具接近工件的方向、接近的角度、移动的方向和切削过程(顺铣还是逆铣)等。

#### (2) 对各种不同材料的切削方法

切削铝、铜等轻合金，与切削钢和铸铁以及切削难加工合金钢，由于切削机理不同，除了刀具材料和刀具几何参数的选择外，在切削过程中还要采取不同的切削策略才能得到较好的切削效果。根据不同加工材料来研究高速切削工艺方法，也是高速切削工艺技术研究的重要内容之一。

#### (3) 刀具材料和刀具几何参数的选择

在研究高速切削工艺技术中，切削方法和技术必须紧密结合刀具材料和刀具几何参数的选择综合进行。高速切削工艺技术研究是一项很有意义的工作。实践证明，如果只有高速机床和刀具而没有良好的工艺技术作指导，昂贵的高速加工设备也不能充分发挥作用。高速切削的工艺技术和传统的工艺方法有很大差别，至今还远不如传统工艺方法那样成熟和普及。这一点是高速机床应用中要特别加以注意的问题。

### 3.5 高速加工的测试技术

高速加工是在密封的机床工作区间里进行的，在零件加工过程中，操作人员很难直接进行观察、操作和控制，因此机床本身有必要对加工情况、刀具的磨损状态等进行监控、实时

地对加工过程在线监测，这样才能保证产品质量，提高加工效率，延长刀具使用寿命，确保人员和设备的安全。

高速加工测试技术包括传感技术、信号分析和处理等技术。近年来，在线测试技术在高速机床中使用得越来越多。现在已经在机床使用的有：主轴发热情况测试、滚珠丝杠发热测试、刀具磨损状态测试、工件加工状态监测等。测量传感器有热传感器、测试刀具的声发射传感器、工件加工可视监视器等。智能技术已经应用于测试信号的分析处理。例如，神经网络技术被应用于刀具磨损状态的识别。

## 二 高速切削机床

### (一) 如何有效地选择高速切削机床

高速切削加工是最重要的现代制造技术，而实现高速切削的最关键技术是研究开发性能优良的高速切削机床。自 20 世纪 80 年代中期以来，开发高速切削机床便成为国际机床工业技术发展的主流。一般来说，一个完整的高速机床系统主要包括：高的静/动刚度支承构件（机床的基本结构）；高精度、高转速的高速主轴；高控制精度、高进给速度和高进给加速度的进给系统；高速、高精度 CNC 系统；高效的冷却系统（干切削机床除外）；安全防护与实时监控系统等。

#### 1、高速切削机床基本结构

机床的基本结构有床身、底座和立柱等，高速切削会产生很大的附加惯性力，因而机床床身、立柱等必须具有足够的强度、刚度和高水平的阻尼特性。很多高速机床的床身和立柱材料采用聚合物混凝土(或人造花岗岩)，这种材料阻尼特性为铸铁的 7~10 倍，比重只有铸铁的 1/3。提高机床刚性的另一个措施是改革床体结构，如将立柱和底座合为一个整体，使得机床可以依靠自身的刚性来保持机床精度。

#### 2、高速主轴

高速主轴是实现高速切削最关键的技术之一。随着工业上对主轴转速要求不断提高，高速主轴技术近年来得到了迅猛发展，在理论与实验研究的基础上研制开发出实用的高速主轴单元已商品化。目前主轴转速在 10000~20000r/min 的加工中心越来越普及，转速高达 100000r/min，200000r/min，250000r/min 的实用高速主轴也正在研制开发中。高速主轴由于转速极高，主轴零件在离心力作用下产生振动和变形，高速运转摩擦和大功率内装电机产生的热会引起高温和变形，所以必须严格控制。为此对高速主轴提出如下性能要求：

- (1) 高转速和高转速范围；
- (2) 足够的刚性和较高的回转精度；
- (3) 良好的热稳定性；
- (4) 大功率；
- (5) 可靠的工具装卡性能；
- (6) 先进的润滑和冷却系统；
- (7) 可靠的主轴监测系统。

轴承作为高速主轴技术中的关键，它直接决定了主轴的负荷容量、工作性能（高速、高刚度、高运动精度）、工作寿命及主轴的动、静态性能。为了适应高速切削加工，高速切削机床的主轴设计采用了先进的主轴轴承和润滑、散热等新技术。目前高速主轴主要采用 3 种特殊轴承：(1) 陶瓷轴承；(2) 磁力轴承；(3) 空气轴承。主轴轴承润滑对主轴转速的提高起着重要作用，高速主轴一般采用油雾润滑或喷油润滑。

### 3、高速进给机构

高速切削时，为了保持刀具每齿进给量基本不变，随着主轴转速的提高，进给速度也必须大幅度地提高。目前高速切削进给速度已高达 50~120m/min，要实现并准确控制这样高的进给速度，对机床导轨、滚珠丝杠、伺服系统、工作台结构等提出了新的要求。而且，由于机床上直线运动行程一般较短，高速加工机床必须实现较高的进给加减速才有意义。为了适应进给运动高速化的要求，在高速加工机床上主要采用如下措施：

- (1) 采用新型直线滚动导轨，直线滚动导轨中球轴承与钢导轨之间接触面积很小，其摩擦系数仅为槽式导轨的 1/20 左右，而且，使用直线滚动导轨后，“爬行”现象可大大减少；
- (2) 高速进给机构采用小螺距大尺寸高质量滚珠丝杠，或粗螺距多头滚珠丝杠，其目的是在不降低精度的前提下获得较高的进给速度和进给加减速；
- (3) 高速进给伺服系统已发展为数字化、智能化和软件化。高速切削机床已开始采用全数字交流伺服电机和控制技术；
- (4) 为了尽量减少工作台重量但又不损失刚度，高速进给机构通常采用碳纤维增强复合材料；
- (5) 为提高进给速度，更先进、更高速的直线电机已经发展起来。直线电机消除了机械传动系统的间隙、弹性变形等问题，减少了传动摩擦力，几乎没有反向间隙。直线电机具有高加、减速特性，加速度可达 2g，为传统驱动装置的 10~20 倍，进给速度为传统的 4~5 倍，采用直线电机驱动，具有单位面积推力大、易产生高速运动、机械结构不需维护等明显优点。

### 4、高速 CNC 控制系统

数控高速切削加工要求 CNC 控制系统具有快速数据处理能力和高的功能化特性，以保证在高速切削时（特别是在 4~5 轴坐标联动加工复杂曲面时）仍具有良好的加工性能。高速 CNC 数控系统的数据处理能力有两个重要指标：一是单个程序段处理时间，为了适应高速，要求单个程序段处理时间要短，为此，需使用 32 位 CPU 和 64 位 CPU，并采用多处理器；二是插补精度，为了确保高速下的插补精度，要有前馈和大数目超前程序段处理功能。此外，还可采用 NURBS(非线性 B 样条)插补、回冲加速、平滑插补、钟形加减速等轮廓控制技术。

高速切削加工 CNC 系统的功能特征包括：

- (1) 加减预插补；
- (2) 前馈控制；
- (3) 精确矢量补偿；
- (4) 最佳拐角减速度。

### 5、高速切削机床安全防护与实时监控系統

高速切削的速度相当高，当主轴转速达 40000r/min 时，若有刀片崩裂，掉下来的刀具碎片就像出膛的子弹。因此，对高速切削引起的安全问题必须充分重视。从总体上讲，高速切削的安全保障包括以下诸方面：机床操作者及机床周围现场人员的安全保障；避免机床、刀具、工件及有关设施的损伤；识别和避免可能引起重大事故的工况。在机床结构方面，机床设有安全保护墙和门窗。刀片，特别是抗变强度低材料制成的机夹刀片，除结构上防止由于离心力作用产生飞离外，还要进行极限转速的测定。刀具夹紧、工件夹紧必须绝对安全可靠，故工况监测系统的可靠性就变得非常重要。机床及切削过程的监测包括：切削力监测，机床主轴功率监测，主轴转速监测，刀具破损监测，主轴轴承状况监测，电器控制系统过程稳定性监测等。

## 6、选购高速切削机床的方法

高速切削机床是实现高速切削加工的前提和关键。但是，如何有选择地购买高速切削机床，怎样将高速切削机床融入现有的加工机制中，还有诸多的不确定性，该方面的技术知识还很片面。应用合理、可靠的结构化程序，可以比较安全、稳妥地去选择高速切削机床。下面将介绍一种有组织、有步骤地购买高速切削机床并将其应用到现有的生产环境中去的方法，该方法包括五个阶段(如图6.1)。

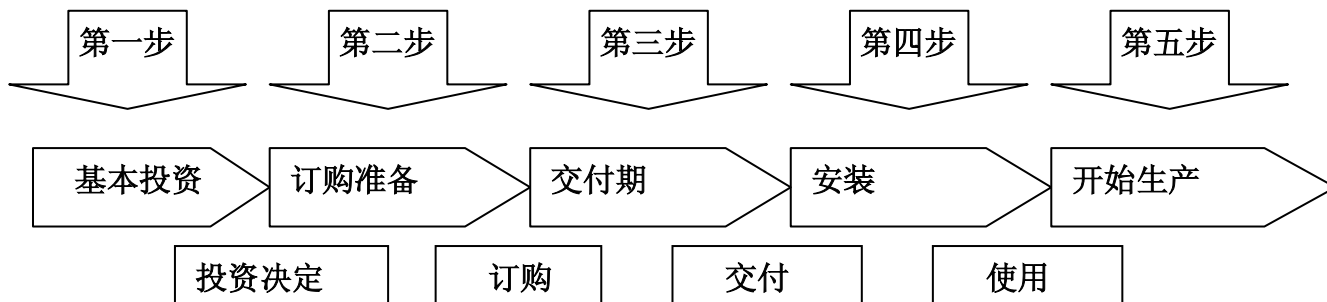


图6.1 选购高速切削机床的步骤

### 6.1 基本调研

购买高速切削机床，类似与购买其它的 CNC 机床。如图 6.2，首先从公司中抽调出部分员工组成“项目小组”，其职能应该包括：工作计划、生产、购买、控制等，该“项目小组”由

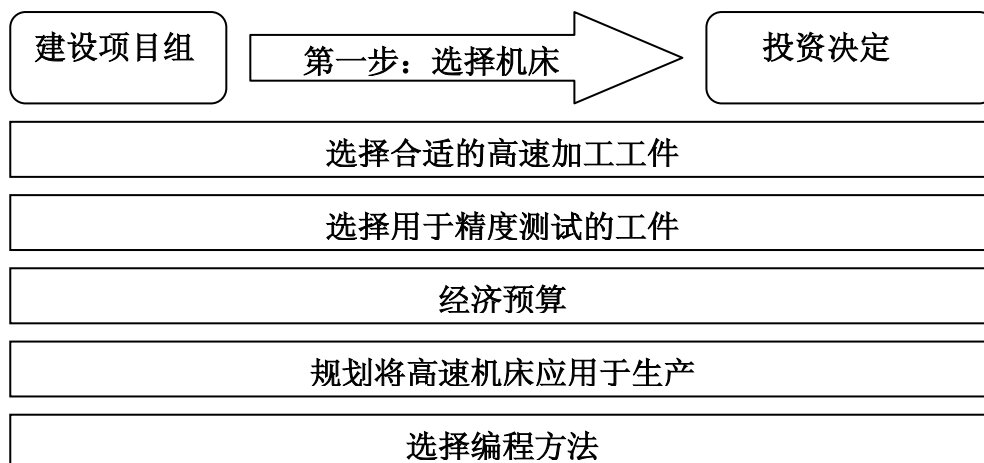
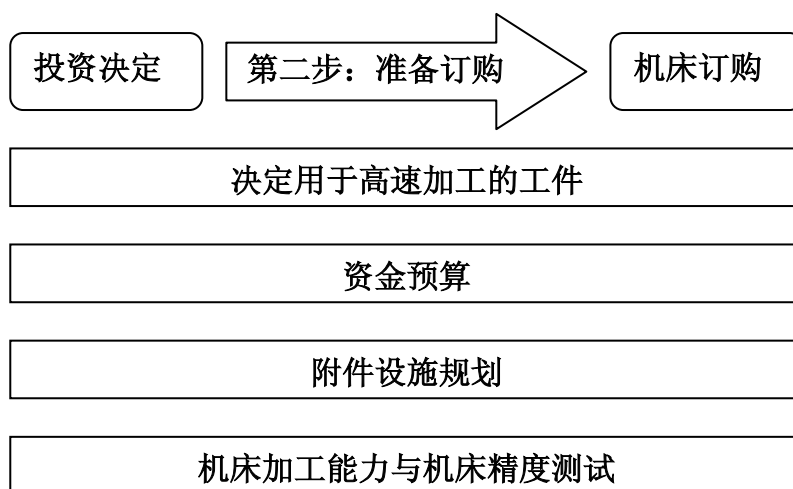


图 6.2 购买高速机床第一步

一位项目经理领导。首先是选择基本上适合于高速加工机床加工的工件，并选择一两个将来用于新机床验收测试的工件，尤其是有关精确性和时间方面的测试。选择两三个代表性工件用于加工时间的计算，以之作为后来收益评价的依据。除此之外，初步计划将新的高速机床应用于生产需要加工的相关工作，并分析评估现有的编程过程能否用于新的工件，是否需要采用新的工艺措施。这些信息对于决定全部的投资数目非常重要。

## 6.2 订购准备工作

当对购买高速切削机床的基本决定做出积极的评估之后,第 2 步工作即来决定购买哪一种机床 (如图 6.3)。



如图 6.3 购买高速机床第三步

第 2 步中有关工作是整个购买过程中最关键的部分。首先从那些可以由高速切削机床加工的系列工件中选出部分工件，用于在该机床上试切。以此考虑机床功率、精确度以及可能的加工极限能否满足要求。为了精确预算总投资花费，在本阶段必须对相关附件设备及任何可能需要的资金从细节上进行精密计划。

不过，在本阶段最重要的一个环节就是要对机床的性能和精度方面进行测试，该测试当然也针对那些在考虑范围内的机床。当然，由于高速切削机床的速度范围与常规切削机床有较大的区别，有必要对这一方面进行细致的测试。对单一轴向精度，应该依照 VDI/DGQ2331 (如图 6.4) 来测试。

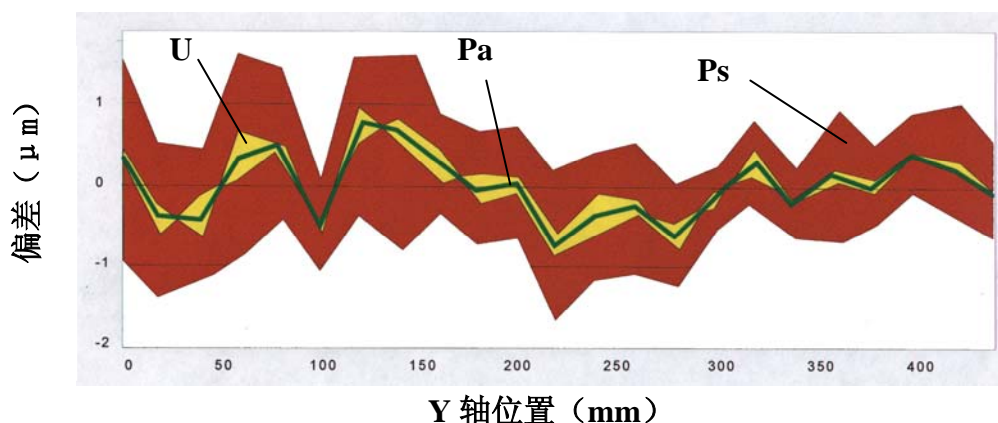


图 6.4 单轴位置精度

在图 6.4 中，位置偏差(图中绿色)  $P_a=1.550 \mu\text{m}$ ，最大位置偏差范围(图中红色)  $P_{s,\text{max}}=2.811 \mu\text{m}$ ，最大反向间隙宽度(图中黄色)  $U_{\text{max}}=0.600 \mu\text{m}$ ，平均位置偏差范围(图中红色)  $P_{s,\text{mean}}=1.356 \mu\text{m}$ ，平均反向间隙宽度(图中黄色)  $U_{\text{mean}}=0.277 \mu\text{m}$ 。

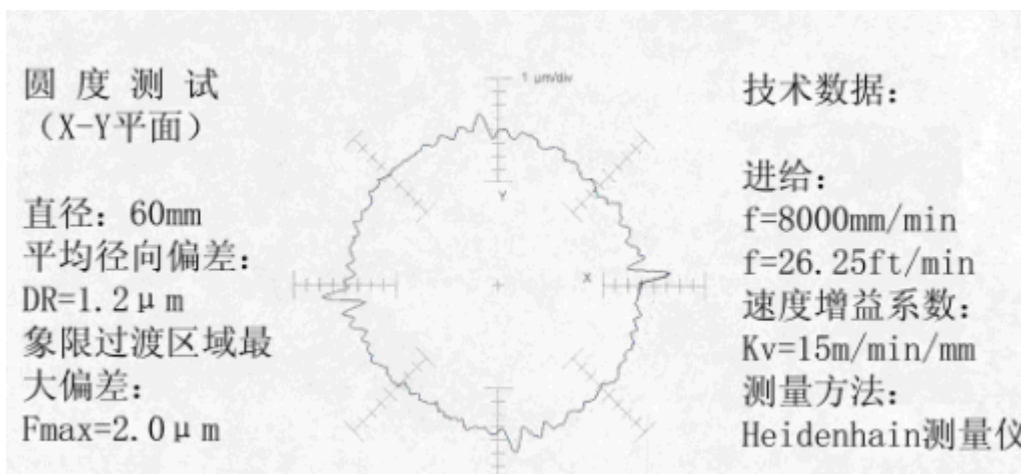


图 6.5 圆度测试

然而，只有圆形的轮廓测试将会提供关于多轴联动的相关信息(如图 6.5)。这将有可能发现各种不同机床在质量上有实质的区别(如图 6.6)。

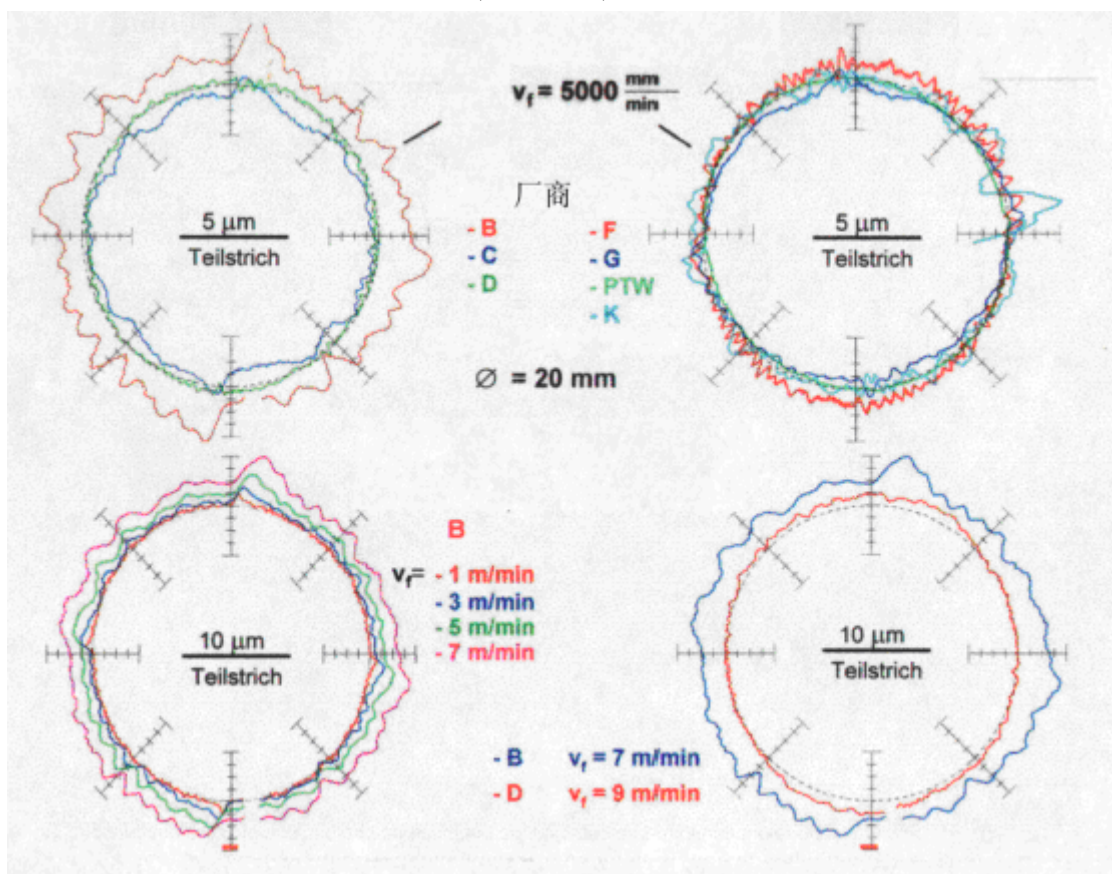


图 6.6 不同机床的圆度测试

不过，对于效益至关重要的一点，就是工件在该机床上可以被加工出的精度。虽然上述

的测试将会提供非常有价值的的数据，但是这与机床的实际加工运行情况并不完全相符。因此，可以选用德国数控加工界推荐的一些典型的工件样品（如图 6.7）进行加工测试。图 6.8 表明了在不同的高速切削机床上进行这些测试的不同结果。

## NCG 高速加工测试样品

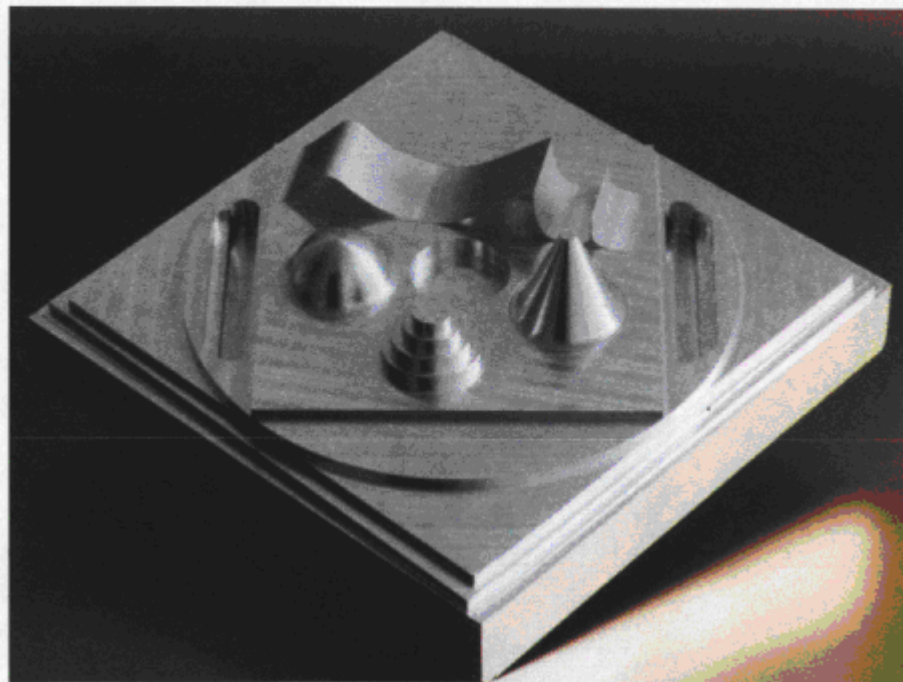


图 6.7 NCG 高速加工测试样品

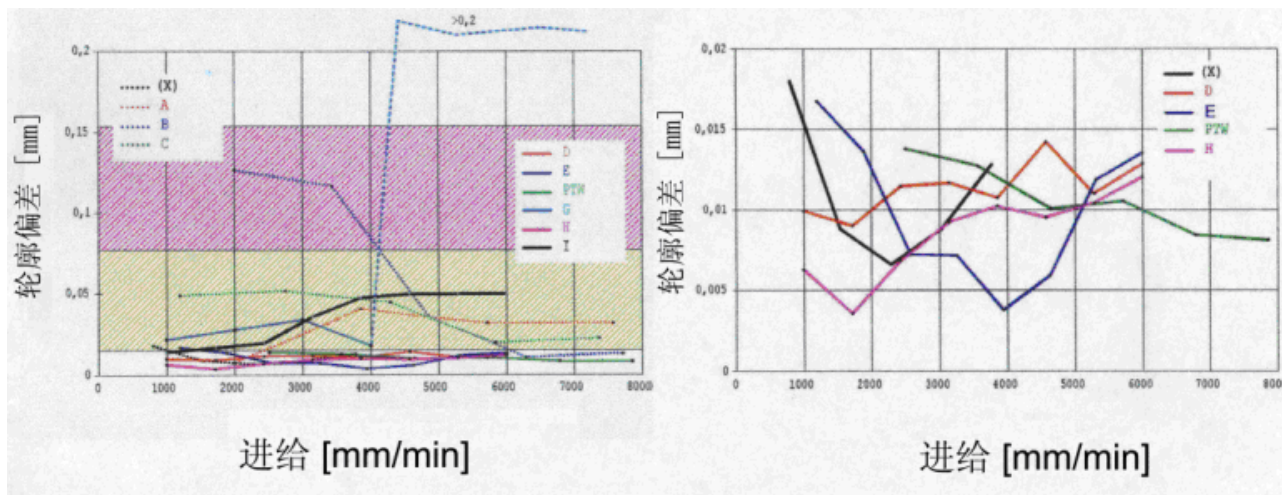


图 6.8 不同高速机床上的精度测量结果

是否有必要从自己本身所拥有的产品选择一个测试工件进行加工，则必须由各自的特殊情况决定。基于所有的这些生产测试结果，将会很容易做出适当的技术评估。

### 6.3 交货期间的工作

在递交定货单和交货这段时间内，必须完成所有的准备工作，使得在机床交接工作完成之后可立刻按照预定计划开始生产实验工作，而没有任何的拖延。第 3 步骤具体细节可参考



图 6.9。

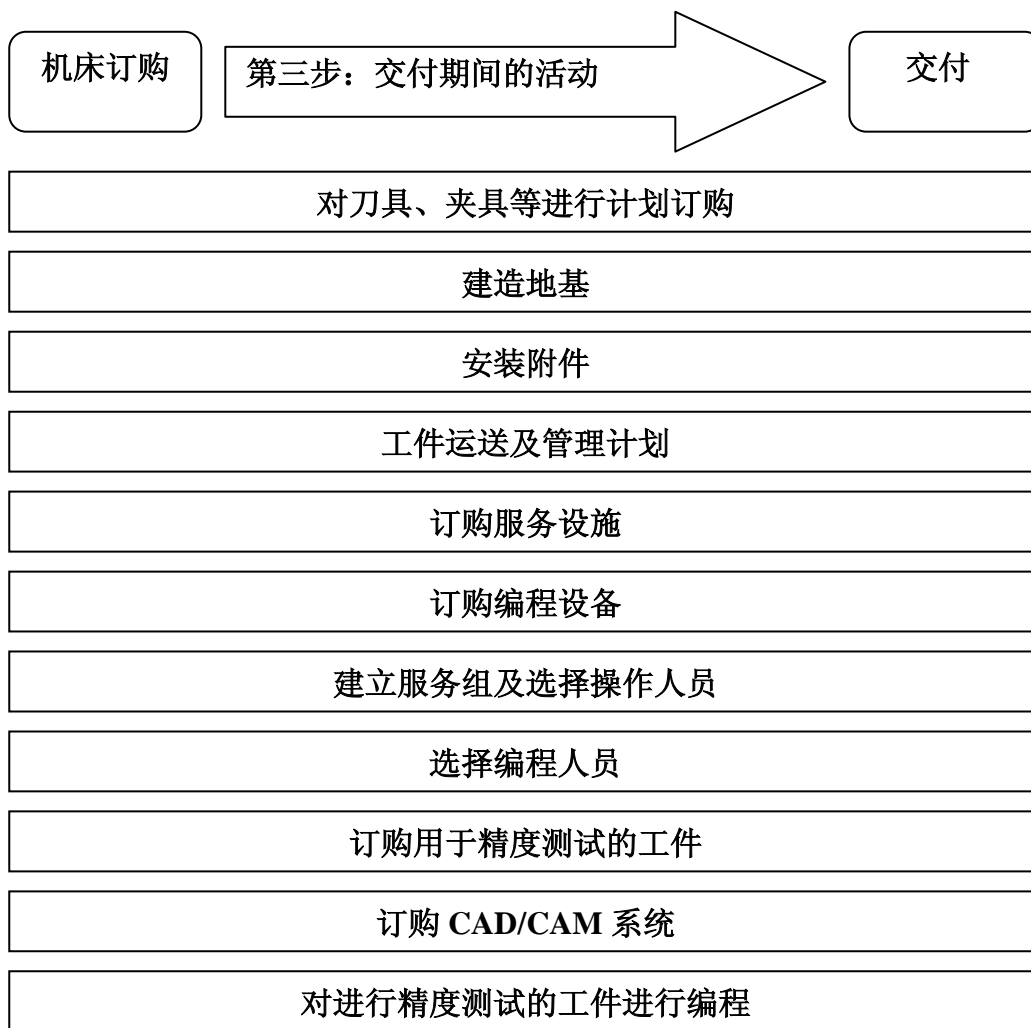


图 6.9 购买高速机床第三步

### 6.4 安装和生产启动

当上述的工作被预期完成以后,余下的工作可以在安装阶段来做。然而,对于比较小的机床来说,如果该阶段非常短暂,则有必要尽可能地实施如图 6.10 所示的工作,这已经在第 3 步中提及。

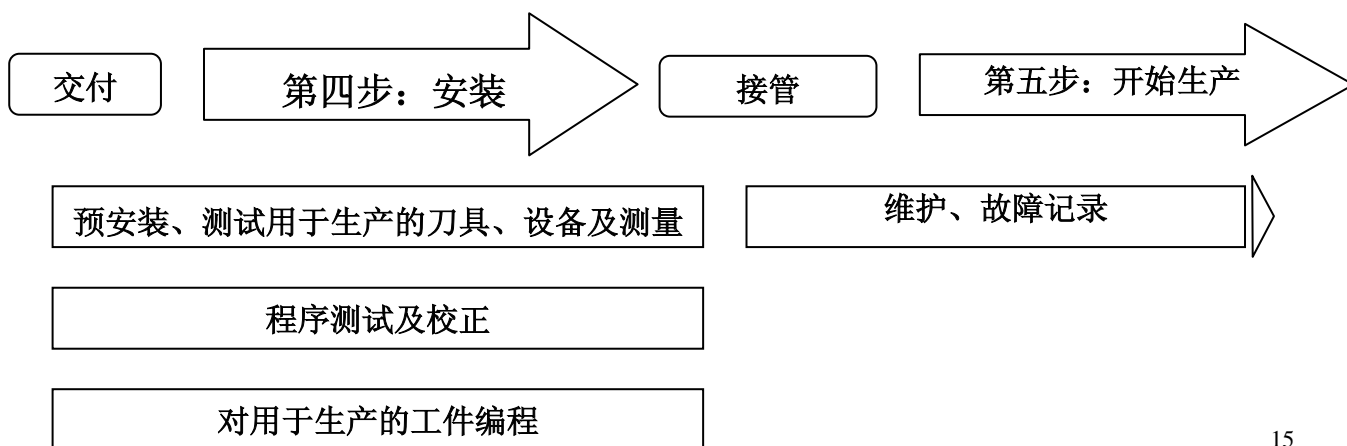


图 6.10 购买机床的第四、第五步

在机床被最终接受以后，就可以开始生产工作。不过，在大多数情况下，在验收阶段还应包括许多反复的测试工作，以之作为机床选择的依据。从一开始的时候，机床维护和故障记录就应该被保留，为新机床的技术可行性方面的确切定论创建一种依据。然而，根据在高速切削机床方面存在的广泛实际经验，最好是等待大约三到六个月的测试之后，再考虑后来的去评估机床的真正可行性的工作。最好能把该阶段作为一种故障担保期，尽可能的写进订购契约。

通过以上所提及的理论指导，在选购高速切削机床方面，应当不会再有问题。所提及的各种不同的验收测试将会确保所购买新机床的实际性能，提供不同货源之间的技术对比。当然，在高速切削机床上节约的时间也可以获得显著的利润。总之，全面的了解、认识高速切削加工所具有的特殊切削条件将非常重要。

## 三、 高速切削刀具

高速切削刀具技术是实现高速加工的关键技术之一。高速切削刀具必须具备可靠的安全性和高的耐用度。

高速切削刀具的安全性必须考虑：

- 刀具强度
- 刀具夹持
- 刀片压紧
- 刀具动平衡

高速切削刀具的耐用度与下列因素有关：

- 刀具材料
- 刀尖结构
- 切削用量
- 走刀方式
- 冷却条件
- 刀具工件材料匹配

### 1. 刀具材料

高速切削刀具材料主要有硬质合金、涂层刀具、金属陶瓷、陶瓷、立方氮化硼（CBN）和金刚石刀具。

**硬质合金** 高速铣刀通常采用细晶粒或超细晶粒硬质合金（晶粒尺寸 $0.2\sim 1\mu\text{m}$ ），根据被加工材料选钨钴类或钨钛钴类硬质合金，但含钴量一般不超过6%。

**涂层刀具** 高速铣削大量采用的是涂层刀具，基体有高速钢、硬质合金和陶瓷，但以硬质合金为主。涂层材料有TiCN、TiAlN、TiAlCN、CBN、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CN}_x$ 等，通常采用多层复合涂层，如： $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ ， $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3$ ， $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{HfN}$ ， $\text{TiN}+\text{Al}_2\text{O}_3$ ，TiCN， $\text{TiB}_2$ ，TiAlN/TiN和TiAlN等。采用物理气相沉积的TiAlN涂层硬质合金在高速铣削时具有良好的切削性能。最新发展的TiN/AlN纳米涂层刀具也适合用于高速切削。

**金属陶瓷** 主要有高耐磨性的TiC基金属陶瓷（TiC+Ni or Mo），高韧性TiC基金属陶瓷（TiC+TaC+WC+Co），增强型TiCN基金属陶瓷（TiCN+NbC），相比硬质合金改善了刀具的高温性能，适合高速加工合金钢和铸铁。

**陶瓷刀具** 陶瓷刀具分为氧化铝陶瓷、氮化硅陶瓷和复合陶瓷三类，具有高硬度、高耐磨性、热稳定性，其中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基陶瓷约占2/3，化学活性低，不易粘结和扩散磨损，强度、断裂韧性、导热性和耐热冲击性较低，适合加工钢件。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 基陶瓷约占1/3，比 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷有较高的强度、断裂韧性和耐热冲击性，但化学稳定性不如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷，适于高速铣削铸铁。 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合陶瓷(Sialon)具有较高的强度和断裂韧性，高的抗氧化性和抗高温蠕变性，高

的抗热冲击性，但不适合加工钢件，可用于高速粗加工铸铁和镍基合金。

**CBN** CBN刀具具有高硬度、高耐热性、高化学稳定性和导热性，但强度稍低。按重量比，低含量CBN（50%~65%）可用于淬硬钢的精加工。高含量CBN（80%~90%）可用于高速铣削铸铁，淬硬钢的粗加工和半精加工。

**金刚石** 分天然金刚石和聚晶金刚石，高速铣削主要采用聚晶金刚石，具有非常高的硬度、导热性，低的热膨胀系数，通常用于高速加工有色金属和非金属材料。晶粒越细越好，高速切削含Si量小于12%的铝合金可用晶粒尺寸10~25 $\mu\text{m}$ 的聚晶金刚石，高速切削含Si量大于12%的铝合金和非金属材料可用晶粒尺寸8~9 $\mu\text{m}$ 的聚晶金刚石。

目前在高速铣削加工中，应用最多的是整体硬质合金刀具，其次是机夹硬质合金刀具。在高转速下应用机夹刀具加工时，应注意刀具的动平衡等级以及最高许用转速。

## 2. 刀具结构

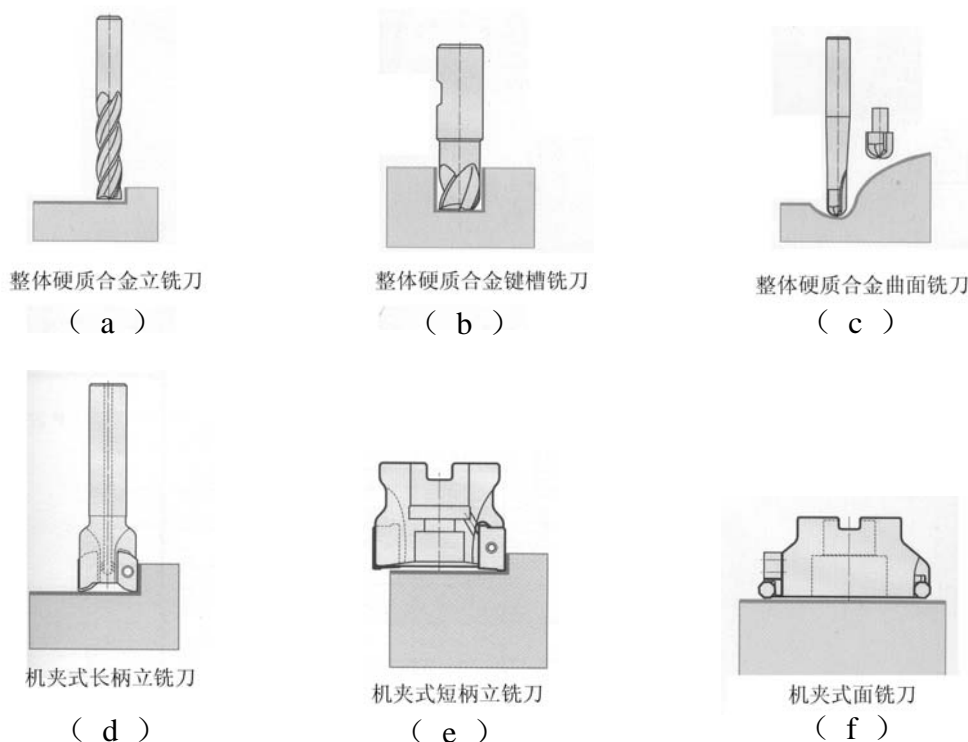


图 2.1 典型的高速铣削刀具

图2.1列出几种典型的高速铣削刀具，分为整体式和机夹式量类。小直径铣刀一般采用整体式，大直径铣刀采用机夹式。高转速机床对刀具直径有一定限制，整体式高速铣刀在出厂时经过动平衡检验，使用时比较方便，而机夹式需要在每次装夹刀片后进行动平衡，所以整体式比较常用。机床在转速比较低、能提供较大扭矩时可采用机夹式铣刀。

铣刀节距定义为相邻两个刀齿间的周向距离，受铣刀刀齿数影响。短节距意味着较多的刀齿和中等的容屑空间，允许高的金属去除率。一般用于铸铁铣削和中等负荷铣削钢件，通常作为高速铣刀首选。大节距铣刀齿数较少，容屑空间大，常用于钢的粗加工和精加工，以及容易发生振动的场合。超密节距的容屑空间小，可承受非常高的进给速度，适合铸铁断续

表面加工，铸铁的粗加工和钢件的小切深加工。

### 3. 刀杆结构

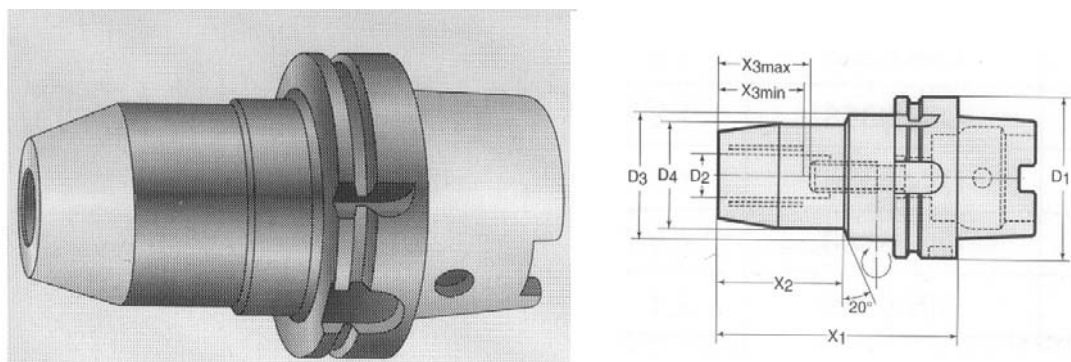


图 3.1 HSK 刀杆示意图

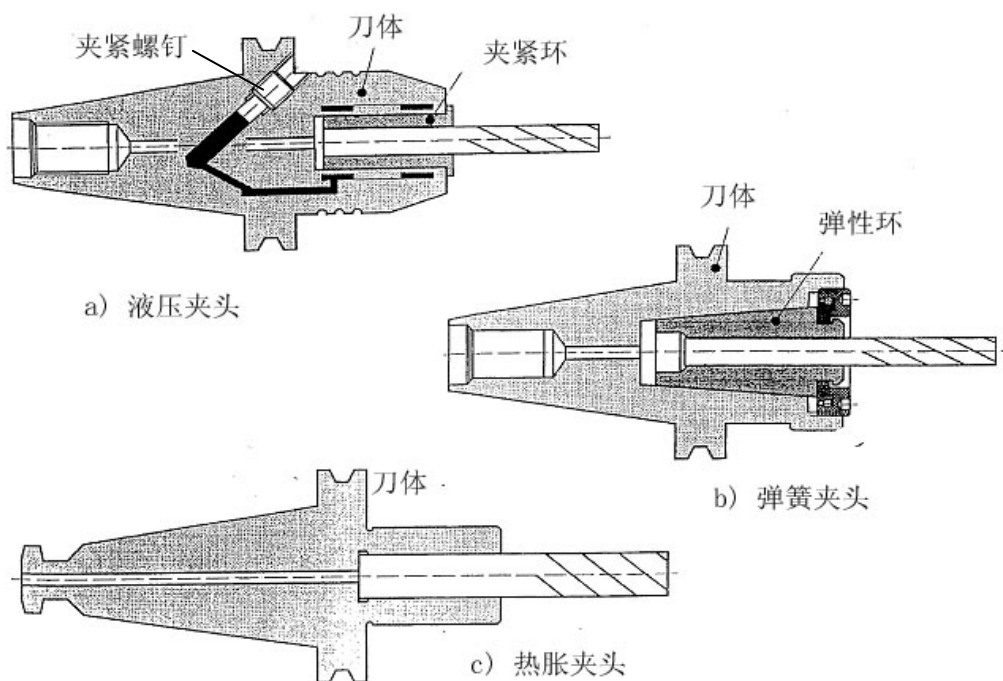


图 3.2 刀杆夹头形式

当机床最高转速达到 15000 转/分时，通常需要采用 HSK 高速铣刀刀杆(图 3.1)，或其他种类的短柄刀杆。HSK 刀杆为过定位结构，提供与机床标准联结，在机床拉力作用下，保证刀杆短锥和端面与机床紧密配合。

刀杆夹紧刀具的方式主要有侧固式、弹性夹紧式、液压夹紧式和热膨胀式等。侧固式难以保证刀具动平衡，在高速铣削式不宜采用，图 3.2 为弹性夹紧式、液压夹紧式和热膨胀式刀杆示意图，其中热膨胀式结构简单，夹紧可靠、同心度高，传递扭矩和径向力大，刚性足，

动平衡性好，是目前最具发展潜力刀杆结构。

热膨胀式刀杆夹头的刀孔与刀柄为过盈配合，须采用专用热膨胀装置装卸刀具，一般使用电感加热或热空气加热刀杆，使刀孔直径膨胀，然后将刀柄插入刀，冷却后孔径收缩将刀柄紧紧夹住。

在以上三种刀具装夹方式中，以热膨胀装夹的刀具安装精度最高，同时能提供更大的扭矩。特别是在应用小直径刀具进行高速加工时，热膨胀装夹更具优势。

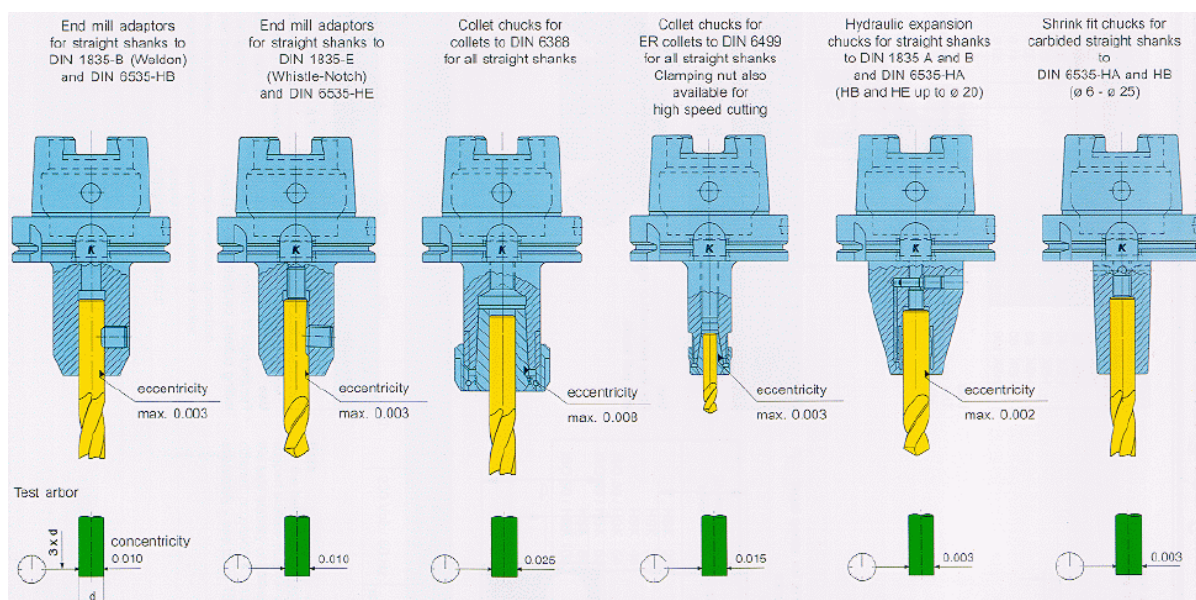


图 3.3 几种装夹方式的刀具定位精度对比

高转速情况下会产生很大的离心力，会造成两种危险，一是普通弹簧夹头夹紧力会下降，二是大直径刀具可能会破坏，同时，飞溅的切屑和崩刃具有很高的动能，对可能会造成人身伤害。因此，工艺系统必须有高标准防护措施。根据试验，不同直径的刀具对应一个破坏转速，因此，在一定的转速范围，使用刀具的最大直径受到安全性的限制，如图 3.4 所示。

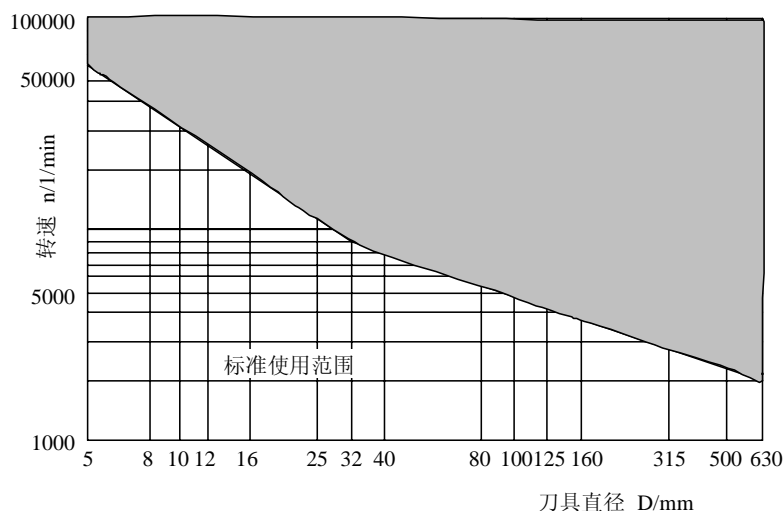


图 3.4 高速旋转刀具安全操作标准(DIN 6589-1)

## 4. 刀具动平衡

当主轴转速超过  $12000 \text{ min}^{-1}$  后，必须考虑刀具动平衡问题，过大的动不平衡将影响加工表面质量，刀具寿命和机床精度。首先应选用经过动平衡的高质量刀杆与刀具，应尽量选用短而轻刀具，定期检查刀具与刀杆的疲劳裂纹和变形征兆。

刀具动平衡分机外动平衡和机上动平衡两种。机外动平衡需专用机外动平衡机，由动力装置提供旋转运动，测量出动不平衡的质量和相位，再通过调整平衡环或在特定位置去掉部分材料，使刀具系统达到动平衡标准的要求。机上动平衡机则用机床主轴提供旋转运动，其余与机外动平衡机相同。动平衡过程通常须经过几次反复，调整到最佳平衡量。

带侧夹平台或柄部削平的刀具，通常动平衡等级较低，不适合用于高速铣削加工。多齿刀具可以采用侧铣试切的方式，根据铣削表面是否出现振纹来估算刀具的动平衡。

## 四、高速数控编程

### 1. 高速数控编程的特点

由于高速切削的特殊性和控制的复杂性,在高速切削条件下,传统的 NC 程序已不能适应要求。因此,必须认真考虑加工过程中的每一个细节,深入研究高速切削状态下的数控编程。

#### 1. 1 现有的 CAD/CAM/CNC 集成化系统

CAD/CAM/CNC 集成化是目前机械制造业发展的主流。一方面, CAD 软件开发公司正在努力扩充其软件的 CAM 功能,另一方面,数控系统生产厂家也在积极实现 CAM/CNC 的集成。但是由于高速切削本身的特殊性和曲面 CAD 模型的复杂性, CAD/CAM/CNC 集成远未达到实际应用水平。目前国内外已有的 CAD/CAM/CNC 系统仅属于一种简单的集成系统: CAD、CAM、CNC 等环节串行工作,信息以顺序方式传递。在这种体系结构中,由于各环节相互分离,独立工作,不可避免地造成某些设计与加工脱节。这种传统的串行 CAD/CAM/CNC 的体系结构没有将当前设计的可制造信息反馈给设计者,加工过程的决策监控、自动信息处理、产品数据模型转换仍需要较多的用户干预,而且加工周期长、效率低、容易出错。不过, CAM 技术研究人员正注意到这种挑战,也正在提供适合高速切削环境的新方法。

CAD/CAM/CNC 集成化与高速切削技术相结合,形成高速切削 CAD/CAM/CNC 集成系统。其不是将传统的 CNC 系统简单地引入到高速切削机床中,这种结合应包括对原有 CAD/CAM/CNC 体系的改造,先进制造技术和新方法的引入,与高速切削技术的协调与配合。这里提出的高速切削 CAD/CAM/CNC 集成系统,是结合了众多先进技术的新体系,它的实现将达到减少人工干预、缩短 NC 编程时间、提高产品加工质量和效率的目标。该系统中引入并行工程的思想,通过增加各种设计、制造活动的并行性缩短产品开发周期,改变过去那种设计、制造人员各管一块的局面,在 CAD 阶段,与产品开发有关的设计人员、决策人员、工艺人员及制造人员充分交流,建立能准确完整地描述产品的“具有设计/制造特征的产品信息模型”,这一信息模型将贯穿设计制造的全过程。在商品化软件平台上,结合面向对象技术、特征技术及 DFM 技术完成产品的初步设计,运用 CAE 进行分析改进,优化设计。

当然高速切削 CAD/CAM/CNC 新体系的实现不仅需要改造传统的集成系统,还需引入许多的先进技术,其中的几项主要关键技术如下:(1)具有设计/制造特征的产品信息模型的建立;(2)基于并行工程的智能化 CAPP 系统;(3)数控加工图形仿真技术;(4)OMAT 技术(该技术是以色列 OMAT 公司的切削力 Optimal 技术的简称);(5)等负载/等距切削模型的建立;(6)具有空间任意曲线曲面插补功能的 CNC 技术;(7)CNC 系统中的自适应控制技术。

#### 1. 2 高速切削对数控编程的具体要求

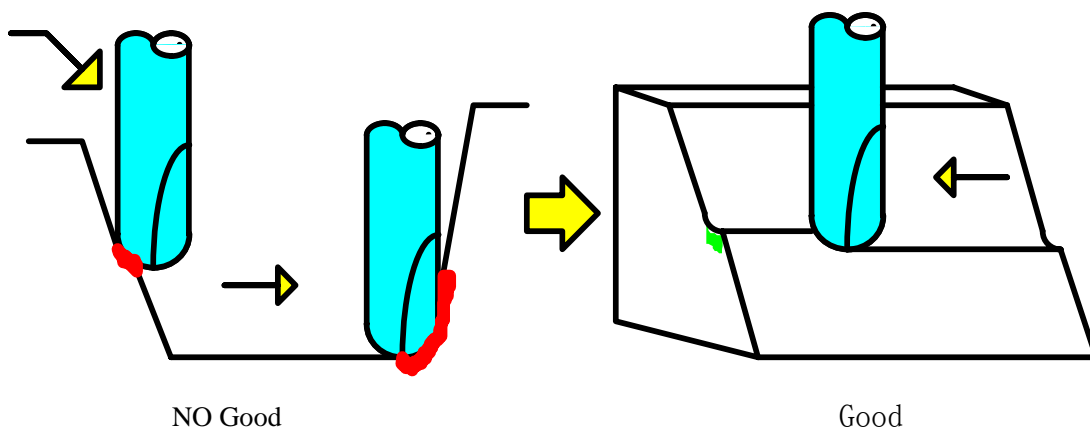
高速切削中的 NC 编程代码并不仅仅局限于切削速度、切削深度和进给量的不同数值。NC 编程人员必须改变他们的全部加工策略,以创建有效、精确、安全的刀具路径,从而得到预期的表面精度。高速切削对数控编程的具体要求如下:

- (1) 保持恒定的切削载荷



随着高速加工的进行，保持恒定的切削载荷非常重要。而保持恒定的切削载荷则必须注意以下几个方面：

首先保持金属去除量的恒定。如图 1.2.1 所示，在高速切削过程中，分层切削要优于仿形加工。

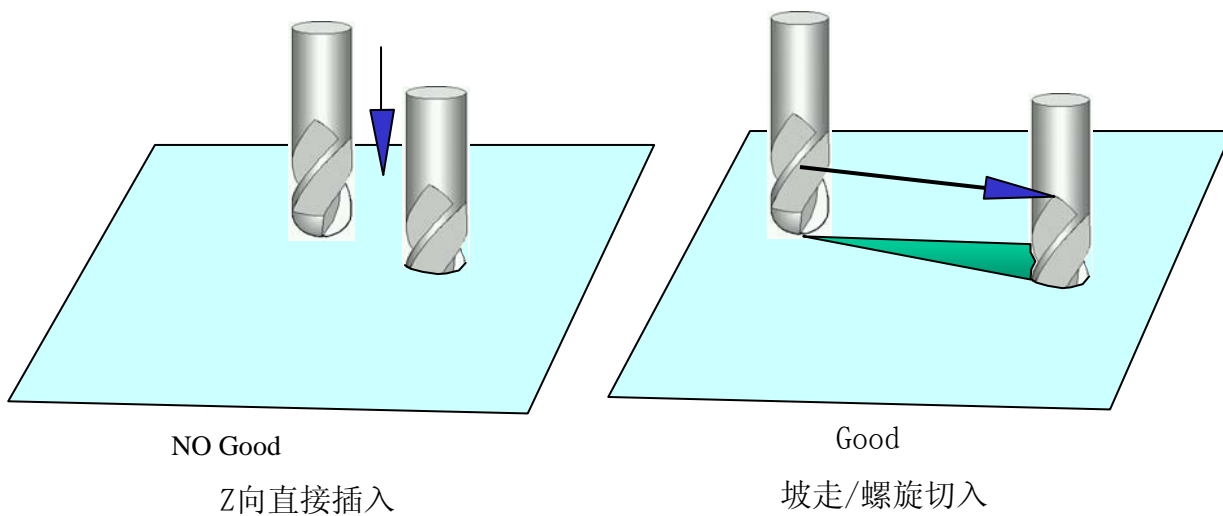


(a) 仿形加工

(b) 分层切削

图 1.2.1 仿形加工与分层切削对比示意图

其次，刀具要平滑地切入工件。如图 1.2.2 所示，在高速切削过程中，让刀具沿一定坡度或螺旋线方向切入工件要优于让刀具直接沿 Z 向直接插入。



NO Good

Good

Z向直接插入

坡走/螺旋切入

图 1.2.2 Z 向直接插入与坡走/螺旋切入对比示意图

第三，保证刀具轨迹的平滑过渡。刀具轨迹的平滑是保证切削负载恒定的重要条件。如图 1.2.3 所示，螺旋曲线走刀是高速切削加工中一种较为有效的走刀方式。

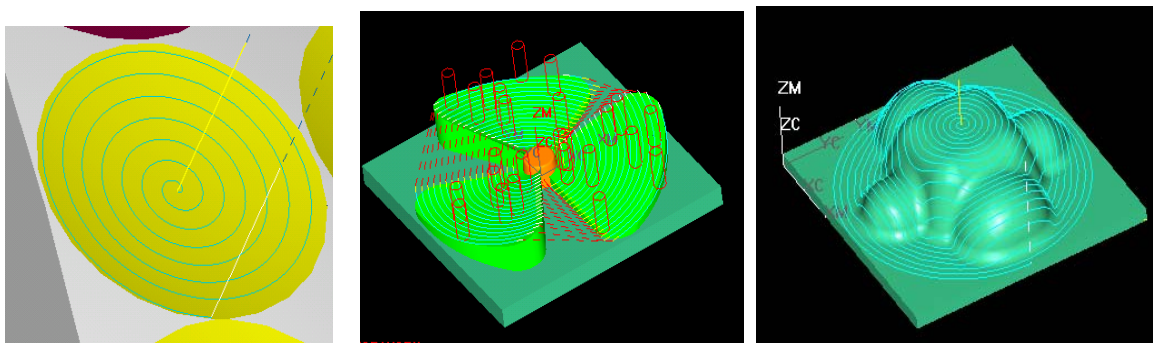


图 1.2.3 螺旋曲线走刀方式示意图

第四,在尖角处要有平滑的走刀轨迹。如图 1.2.4 所示,C 图所示的刀具轨迹最好。图 1.2.5 则是消除尖角示意图。

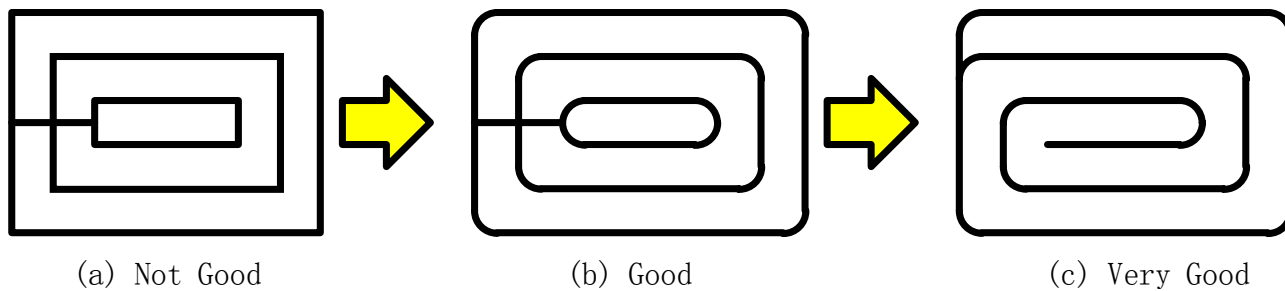


图 1.2.4 尖角处刀具轨迹对比示意图

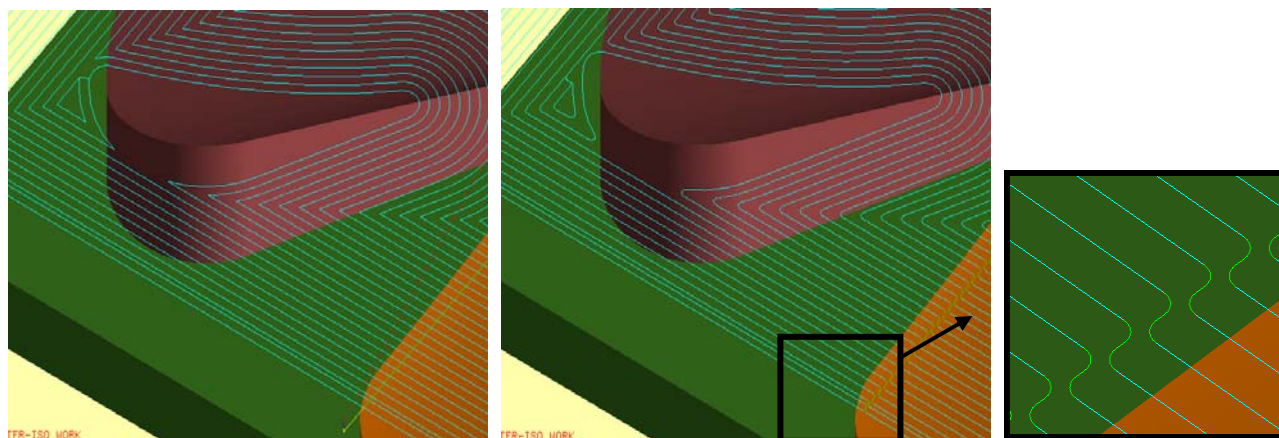
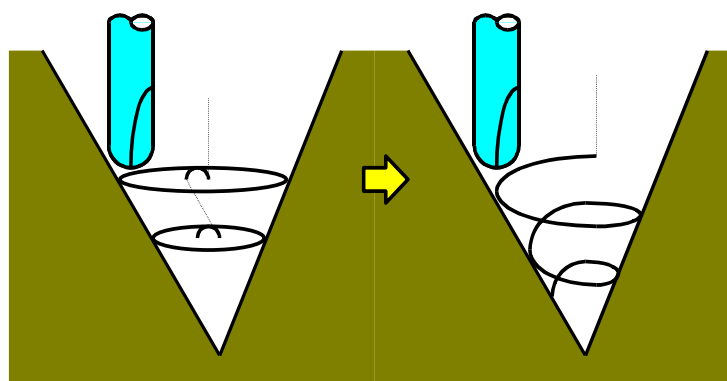


图 1.2.5 消除尖角示意图

(2) 保证工件的高精度

为了保证工件的高精度,最重要的一点就是尽量减少刀具的切入次数。如图 1.2.6 所示,该图显示了如何尽可能地减少刀具切入次数的有效方法。



多	切入行程	没有
多	定位	没有
很多	空行程	很少

图 1.2.6 减少刀具切入次数示意图

(3) 保证工件的优质表面

在高速切削过程中，过小的步进（进给量）会影响实际的进给速率，其往往会造成切削力的不稳定，产生切削振动。从而影响工件表面的完整性。如图 1.2.7 所示，即为采用不同步进对工件加工表面质量的影响示意图。从该图可以看出，在高速切削条件下，采用较大的进给量，则会产生较好的表面加工质量。

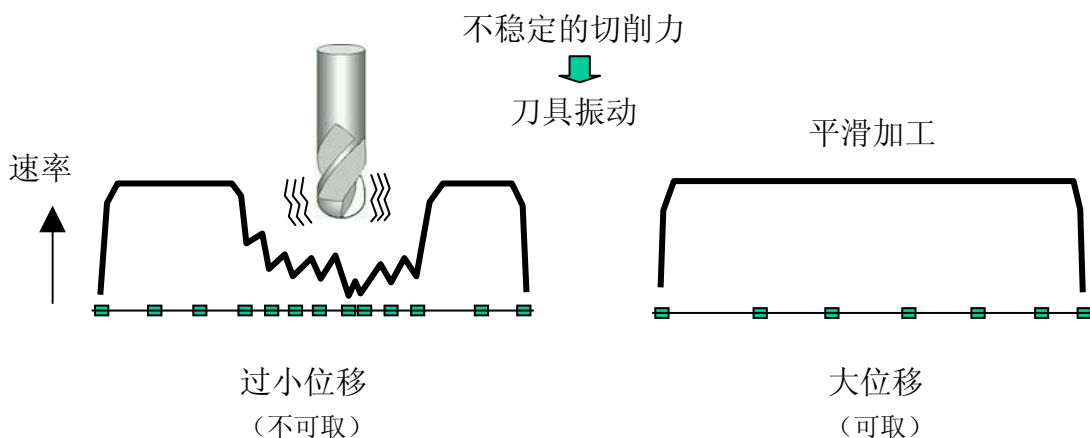


图 1.2.7 不同进给量对工件加工表面的影响

## 2. 粗加工数控编程

粗加工在高速加工中所占的比例要比在传统加工中的多。在高速加工中，粗加工的作用就是要比传统加工为半精加工、精加工留有更均衡的余量。粗加工的结果直接决定了精加工过程的难易和工件的加工质量。如 Open Mind 软件技术开发主管 Dr. Josef Koch 所说，“高速加工改变了 CAM 策略，要更加努力、严密地进行粗加工…预精加工阶段的作用更加重要”。因此，在高速粗加工过程中，要着重考虑以下几个方面：

### (1) 恒定的切削条件

为保持恒定的切削条件，一般主要采用顺铣（爬生切削）方式，或采用在实际加工点计算加工条件等方式进行粗加工（如图 2.1 所示）。在高速切削过程中采用顺铣方式，可以产生较少的切削热，降低刀具的负载，降低甚至消除了工件的加工硬化，以及获得较好的表面质量等。

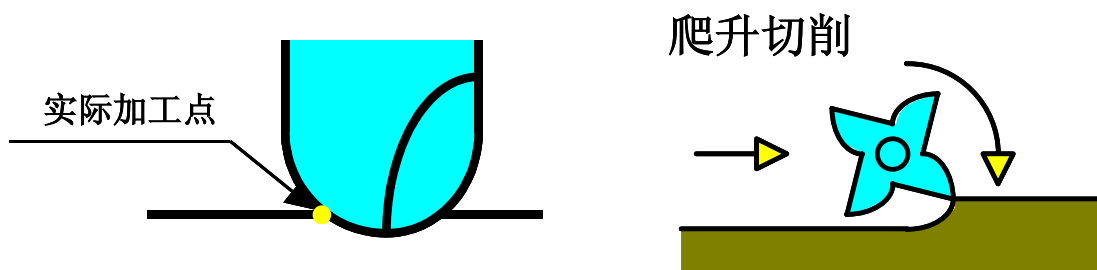


图 2.1 粗加工方式示意图

### (2) 恒定的金属去除率

在高速切削的粗加工过程中，保持恒定的金属去除率，可以获得以下的加工效果：(1) 保持的恒定切削负载；(2) 保持切屑尺寸的恒定；(3) 较好的热转移；(4) 刀具和工件均保持在较冷的状态；(5) 没有必要去熟练操作进给量和主轴转速；(6) 延长刀具的寿命；(7) 较好的加工质量等。

### (3) 走刀方式的选择。

对于带有敞口型腔的区域，尽量从材料的外面走刀，以实时分析材料的切削状况。而对于没有型腔的封闭区域，采用螺旋进刀，在局部区域切入（如图 2.2 所示）。

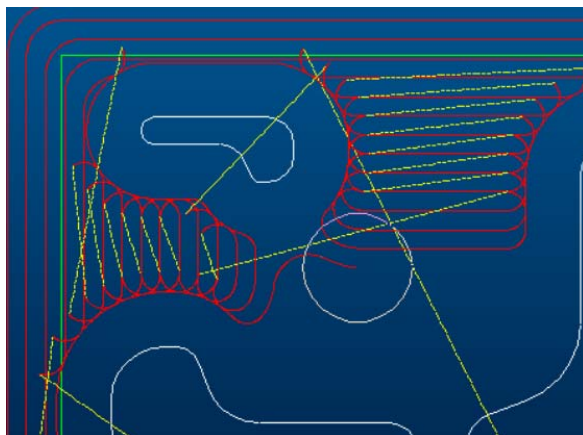


图 2.2 走刀轨迹示意图

### (4) 尽量减少刀具的切入次数

由于之字形模式主要应用于传统加工，因此许多人在高速加工中选择回路或单一路径切削。这是因为在换向时 NC 机床必须立即停止（紧急降速）然后再执行下一步操作。由于机床的加速局限性，而容易造成时间的浪费。因此，许多人将选择单一路径切削模式来进行顺铣，尽可能地不中断切削过程和刀具路径，尽量减少刀具的切入切出次数，以获得相对稳定的切削过程（如图 2.3）。

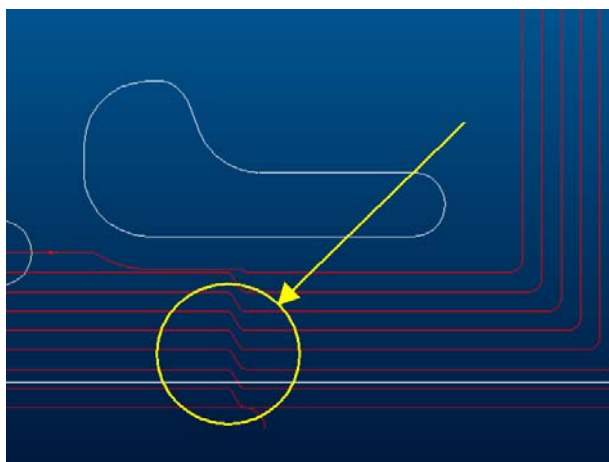


图 2.3 走刀轨迹示意图

### (5) 尽量减少刀具的急速换向

由于进给量和切削速度非常的高，编程人员必须预测刀具是如何切削材料的。除了降低步距和切削深度以外，还要避免可能的加工方向的急剧改变。急速换向的地方要减慢速度，急停或急动则会破坏表面精度，且有可能因为过切而产生拉刀或在外拐角处咬边。尤其在 3D 型面的加工过程中，要注意一些复杂细节或拐角处切削形貌的产生，而不是仅仅设法采用平行之字形切削、单向切削或其他普通切削等方式来生成所有的形貌。

此外，编程人员还应该了解，不论 HSM 控制器中的前馈功能有多好，它仍然不知道在一个 3D 结构中的加工步长是多少。前馈功能只能知道沿着刀具轨迹和它的拐角处的切除，其并不知道 3D 精加工路径中的步长，也不知道金属去除率是多少。

通常，切削过程越简单越好。这是因为简单的切削过程可以允许最大的进给量，而不必因为数据点的密集或方向的急剧改变而降低速度。从一种切削层等变率地降到另一层要好于直接跃迁，采用类似于圈状的路线将每一条连续的刀具路径连接起来，可以尽可能地减小加速度的加减速突变（如图 2.4 所示）。

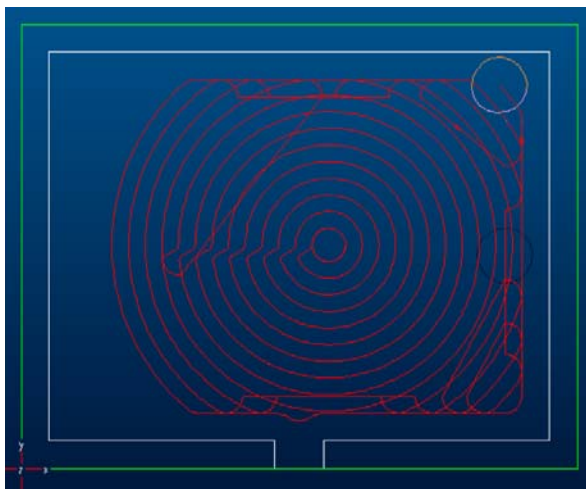


图 2.4 走刀轨迹示意图

#### (6) 在 Z 方向切削连续的平面

粗加工所采用的方法，通常是在“Z”方向切削连续的平面。这种切削遵循了高速加工理论，采用了比常规切削更小的步距，从而降低每齿切削去除量。当采用这种粗加工方式时，根据所使用刀具的正常的圆角几何形状，利用 CAM 软件计算它的 Z 水平路径是很重要的。如果使用一把非平头刀具进行粗加工，则需要考虑加工余量的三维偏差。根据精加工余量的不同，三维偏差和二维偏差也不相同。如图 2.5 所示，为 Z 方向切削连续平面示意图。

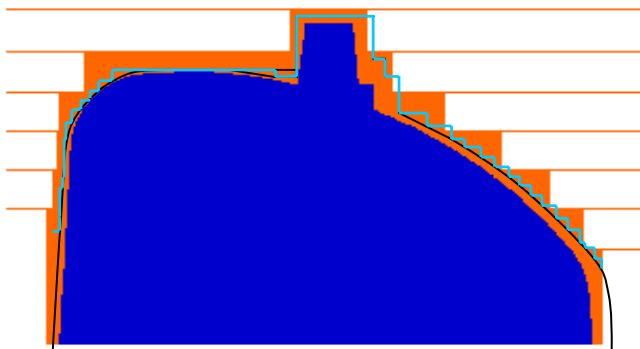


图 2.5 在 Z 方向切削连续的平面示意图

### 3. 精加工数控编程

在高速切削的精加工过程中，保证精加工余量的恒定至关重要。为保证精加工余量的恒定，主要注意以下几个方面：

#### 1) 笔式加工（清根）

在半精加工之前为了清理拐角（如图 3.1a），在过去典型的方法就是选择组成拐角的两个表面，沿着两表面的交界处走刀。采用该方法，可以处理一些小型的或简单的工件，也可

以在有充足时间编程的情况下处理复杂结构。但是，由于需要手工选择不同尺寸的刀具和切削所有的拐角，许多人选择预先进行这步工作，因此，在高速加工中可能会产生危险。

笔式铣削采用的策略为，首先找到先前大尺寸刀具加工后留下的拐角和凹槽，然后自动沿着这些拐角走刀。其允许用户采用越来越小的刀具，直到刀具的半径与三维拐角或凹槽的半径相一致。理想的情况下，可以通过一种优化的方式跟踪多种表面，以减少路径重复。

笔式铣削的这种功能，在期望保持切屑去除率为常量的高速加工中是非常重要的。缺少了笔式切削，当精加工这些带有侧壁和腹板的部件时，刀具走到拐角处将会产生较大的金属去除率。采用笔式切削，拐角处的切削难度被降低，降低了让刀量和噪音的产生。该方法即可用于顺铣又可用于逆铣。

由于笔式铣削能够清除拐角处的多余量，当去除量较大的时候，通常在 3D 精加工之前进行笔式铣削。机床操作人员和 NC 编程人员可以根据增大的金属去除率来适当地降低笔式铣削的进给量，也可以增加沿角头的清根轨迹以去除多余余量（如图 3.1b, c）。

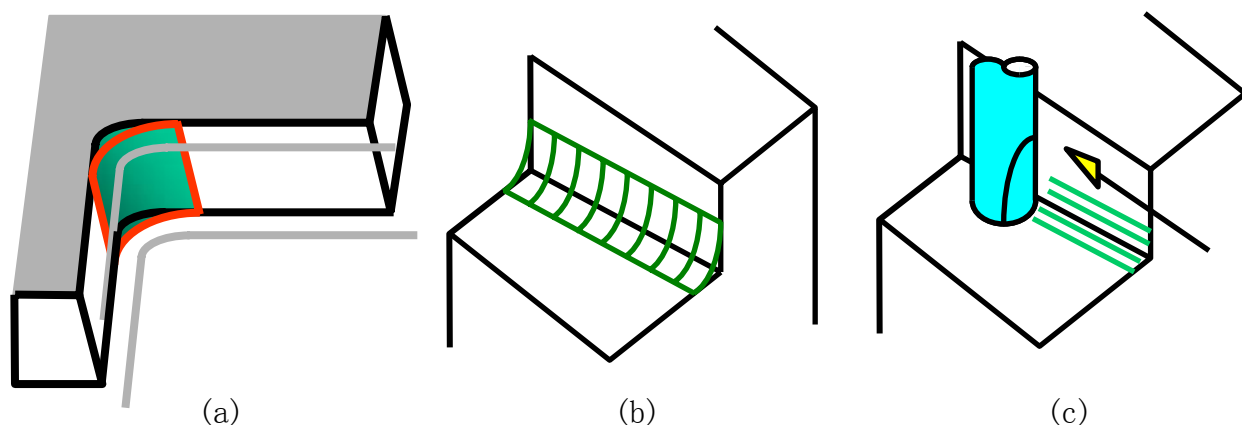


图 3.1 笔式铣削示意图

## 2) 余量加工（清根）

余量铣削类似于笔式铣削，但是其又可以应用于精加工操作。其采用的加工思想与笔式铣削相同，余量铣削能够发现并非同一把刀具加工出的三维工件所有的区域，并能采用一把较小的刀具加工所有的这些区域。余量铣削与笔式铣削的不同之处在于，余量铣削加工的是大尺寸铣刀加工之后的整个区域，而笔式铣削仅仅针对拐角处的加工。

HSM 的一个重要选择就是，其能够计算垂直或平行于切削区域的切削余量。法向选择是在剩余切削区域内来回走刀进行切削，而平行选择则将遵从剩余切削区域的加工流理（U-V 线）方向进行切削。HSM 用户可以适当地应用平行选择，其可以将成百上千的步长数减少到很少的量，从而使加工过程更加有效。而且，如同 Dr. Koch 所说，“通过由外向内计算一个腔体，恒采用顺铣模式，并应用软件在表面上生成的加工步长，可以很好地进行精加工。”

## 3) 控制残余高度

在切削 3D 外形的时候，计算 NC 精加工步长的方法主要是根据残余高度，而不是使用等量步长。这种计算步长的算法以不同的形式被封装在不同的 CAM 软件包中。过去采用这种功能的优势就是进行一致性表面精加工。特别表现在，打磨和手工精加工任务的需求将越来越少。在 HSM 中采用对自定义的残余高度进行编程还有另外的好处。根据 NC 精加工路径动态地

改变加工步长，该软件可以帮助保持切屑去除率在一个常量水平。这有助于切削力保持恒定，从而将不期望的切削振动控制在最小值。

可以通过两种方法来实现残余高度的控制：

**实际残余高度加工** 主要根据表面的法向而不是刀具矢量的法向来计算步长。其可以不管工件表面的曲率而保持每一次走刀之间的等距离切削，并且保持刀具上恒定的切削负载，特别是在工件表面的曲率急剧变化的时候——从垂直方向变为水平方向或者相反，其优势更为明显(如图 3.1.2 所示)。

**XY 优化** 自动地在最初切削的局部范围内再加工残余材料，以修整所有的残留高度。这种选择性的刀具路径创建，精简了再加工整个工件或者必须在 CAM 中手工设置分界线以便加工出光滑表面的一系列工序。如何根据残余高度进行切削，主要在于软件对 3D 形貌中的斜坡部分的计算(如图 3.2)。软件能够根据刀具的尺寸和几何形状来调整加工步长以保持恒定的残余高度。这就意味着坡度越陡峭，所需精加工操作中的加工步长越密。自然，用户可以获得一个光滑、精度一致的工件。

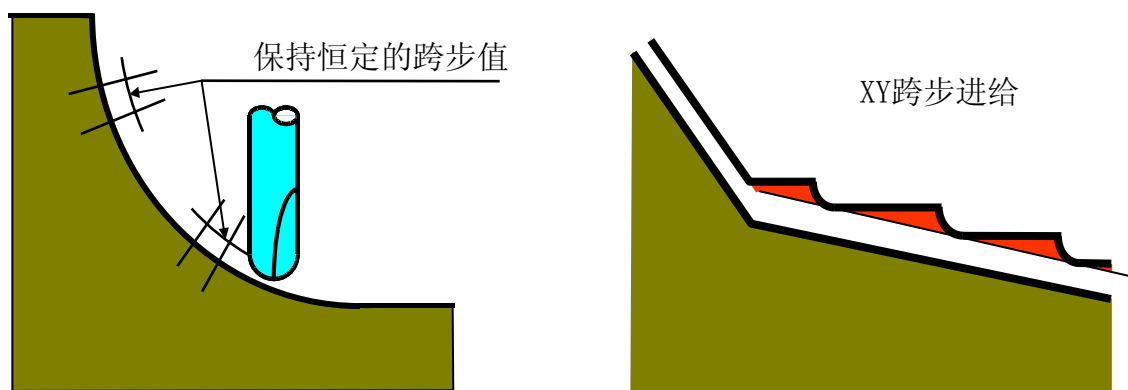


图 3.2 根据法向计算步长及斜坡 XY 优化示意图

4) 采用  $f_p$  工艺来达到高速高精度工件表面

在高速铣削过程中，最好采用  $f=P$  的铣削方式。(如图 3.3 所示)

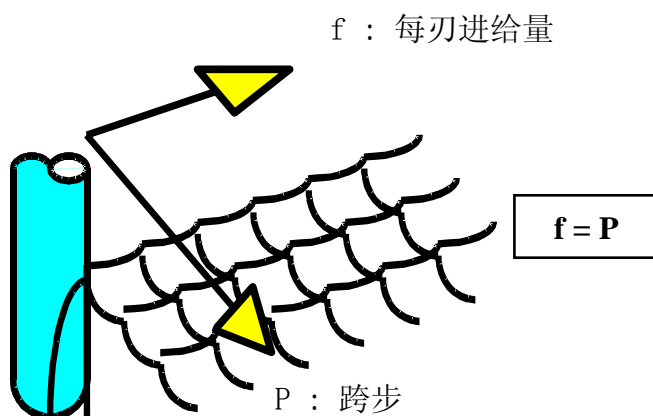


图 3.3  $f_p$  铣削工艺

5) 退刀时采用进给速率 (如图 3.4 所示)

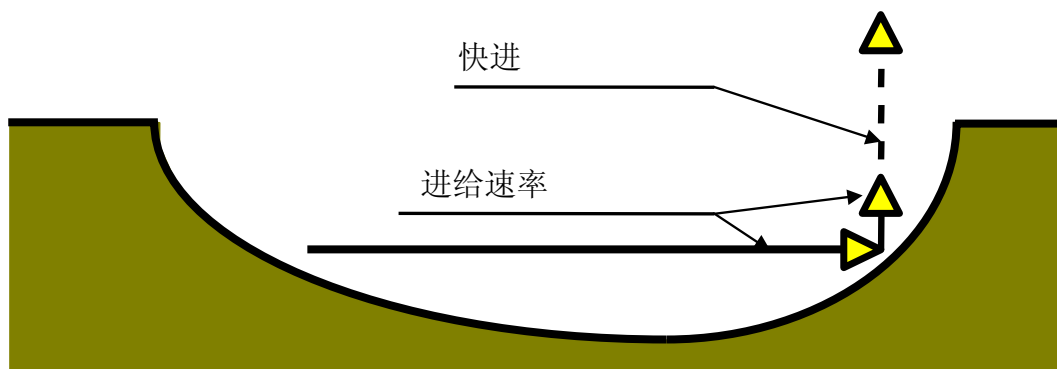


图 3.4 退刀过程示意图

6) 采用不同的加工方法 (如图 3.5 所示)

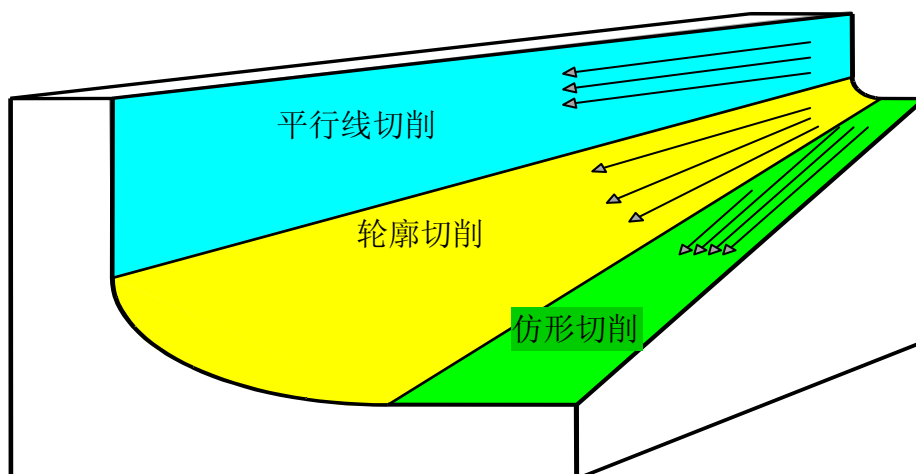


图 3.5 不同铣削加工方法示意图

7) 应用边界识别功能 (如图 3.6 所示)

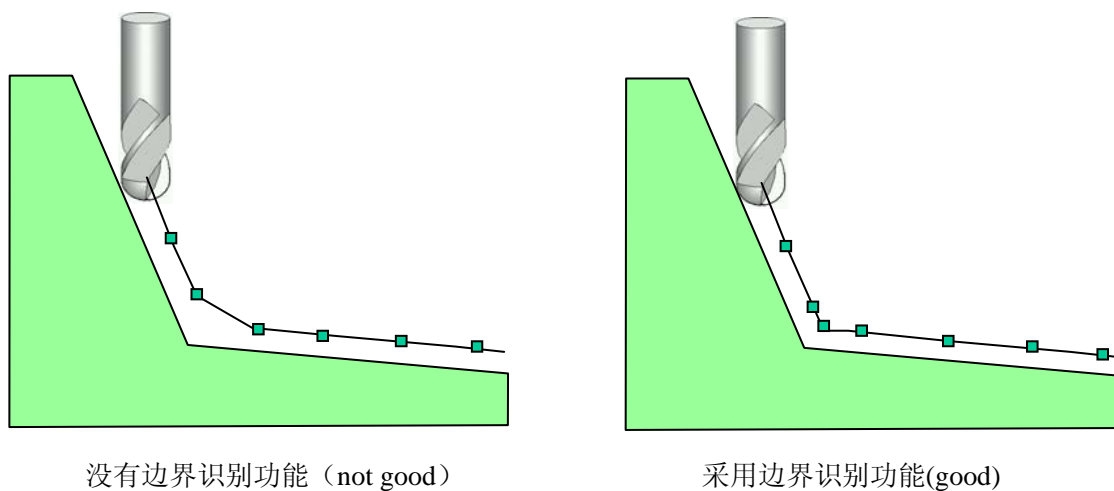
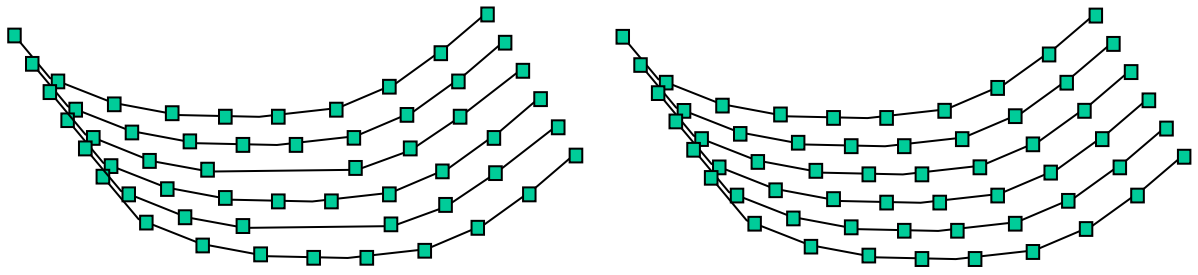


图 3.6 没有边界识别与采用边界识别对比示意图



8) 保证加工轨迹的一致性保证加工轨迹的一致性能够获得优质的加工表面。如图 3.1.7 所示，不配合的加工轨迹则使型面产生偏差，而保证加工轨迹的一致性时，型面的质量较高。



(a) 不配合的加工轨迹使型面产生偏差

(b) 优质的型面

图 3.7 加工轨迹一致性与不一致性的对比

## 五、 高速铣削工艺

传统意义上的高速切削是以切削速度的高低来进行分类的，而铣削机床则是以转速的高低进行分类。如果从切削变形的机理来看高速切削，则前一种分类比较合适；但是若从切削工艺的角度出发，则后一种更恰当。

这是因为随着主轴转速的提高，机床的结构、刀具结构、刀具装夹和机床特性都有本质上的改变。高转速意味着高离心力，传统的 7:24 锥柄，弹簧夹头、液压夹头在离心力的作用下，难以提供足够的夹持力；同时为避免切削振动要求刀具系统具有更高的动平衡精度。

高速切削的最大优势并不在于速度、进给速度提高所导致的效率提高；而是由于采用了更高的切削速度和进给速度，允许采用较小的切削用量进行切削加工。由于切削用量的降低，切削力和切削热随之下降，工艺系统变形减小，可以避免铣削颤振。利用这一特性可以通过高速铣削工艺加工薄壁结构零件。

### 1、 刀具的选择

通常选用图 1.1 所示的 3 种立铣刀进行铣削加工，在高速铣削中一般不推荐使用平底立铣刀。平底立铣刀在切削时刀尖部位由于流屑干涉，切屑变形大，同时有效切削刃长度最短，导致刀尖受力大、切削温度高，导致快速磨损。在工艺允许的条件下，尽量采用刀尖圆弧半径较大的刀具进行高速铣削。



图 1.1 立铣刀示意图

随着立铣刀刀尖圆弧半径的增加，平均切削厚度和主偏角均下降，同时刀具轴向受力增加可以充分利用机床的轴向刚度，减小刀具变形和切削振动（图 1.2）

图 1.3 为高速铣削铝合金时，等铣削面积时两种刀具的铣削力对比。刀具为直径  $\phi 10\text{mm}$  的 2 齿整体硬质合金立铣刀，螺旋角 30 度。刀尖圆弧半径为 1.5mm 和无刀尖圆弧的两种刀具。

铣削面积固定为  $a_p \cdot a_e = 2.0\text{mm}^2$ 。当轴向铣削深度减小时，则增大径向铣削深度。对应的主轴转速为 18000rpm，进给速度 3600mm/min。

从图中可以看出，在圆角立铣刀的铣削力明显小于平底立铣刀，同时在轴向切深较小时铣削力迅速下降。

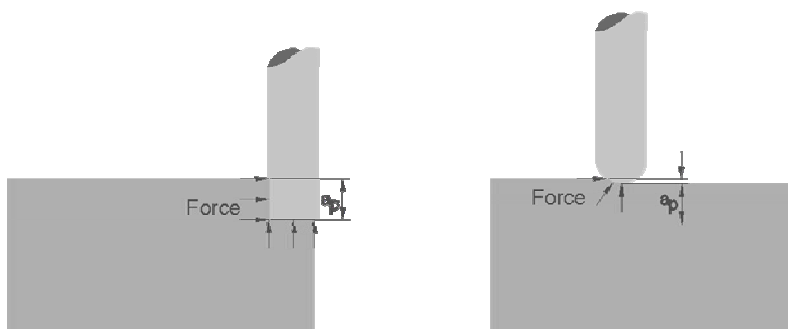


图 1.2 立铣刀受力示意图

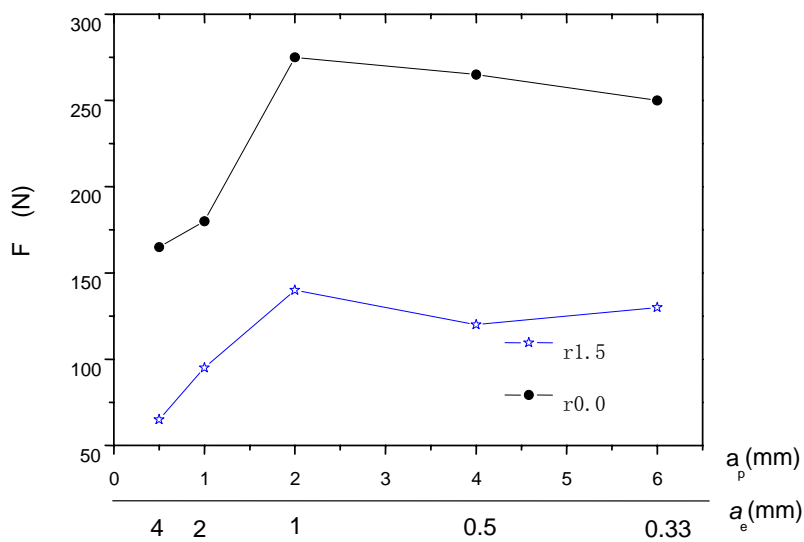


图 1.3 刀尖圆弧半径对铣削力的影响

因此，在高速铣削加工时通常采用刀尖圆弧半径较大的立铣刀，且轴向切深一般不宜超过刀尖圆弧半径；径向切削深度的选择和加工材料有关，对于铝合金之类的轻合金为提高加工效率可以采用较大的径向铣削深度，对于钢及其他加工性稍差的材料宜选择较小的径向铣削深度，减缓刀具磨损。

## 2、切削参数选择

由于球头铣刀的实际参与切削部分的直径和加工方式有关，在选择切削用量时必须考虑其有效直径和有效线速度（参见图 2.1）。球头铣刀的有效直径计算公式：

$$D_{eff} = 2 \times \sqrt{D \times a_p - a_p^2} \quad \beta = 0 \quad (2-1)$$

$$D_{eff} = D \times \sin[\beta \pm \arccos(\frac{D - 2 \times a_p}{D})] \quad \beta \neq 0$$

铣刀实际参与切削部分的最大线速度定义为有效线速度。球头铣刀的有效线速度为：

$$D_{eff} = \frac{2 \times \pi \times n}{1000} \sqrt{D \times a_p - a_p^2} \quad \beta = 0 \quad (2-2)$$

$$D_{eff} = \frac{\pi \times n \times D}{1000} \sin[\beta \pm \arccos(\frac{D - 2 \times a_p}{D})] \quad \beta \neq 0$$

采用球头铣刀加工时，如果轴向铣削深度小于刀具半径，则有效直径将小于铣刀名义直径，有效速度也将小于名义速度，当采用圆弧铣刀浅切深时也会出现上述情况。在优化加工参数时应按有效铣削速度选择。图 2.2 根据公式 (2-1) 给出不同名义直径刀具在各种切深条件下的有效直径，例如，当  $\phi 12$  刀具轴向铣削深度  $a_p = 1.5 \text{ mm}$  时，由图 2.2 在  $a_p = 1.5 \text{ mm}$  处画水平线，与  $\phi 12$  的曲线相交，横坐标为  $8 \text{ mm}$  即为有效直径。由有效直径可根据图 2.3 按有效切削速度可确定实际转速。例如，当有效直径为  $\phi 8$ ，有效切削速度选择为  $v = 300 \text{ m/min}$ ，则要求转速为  $n = 12000 \text{ min}^{-1}$ 。

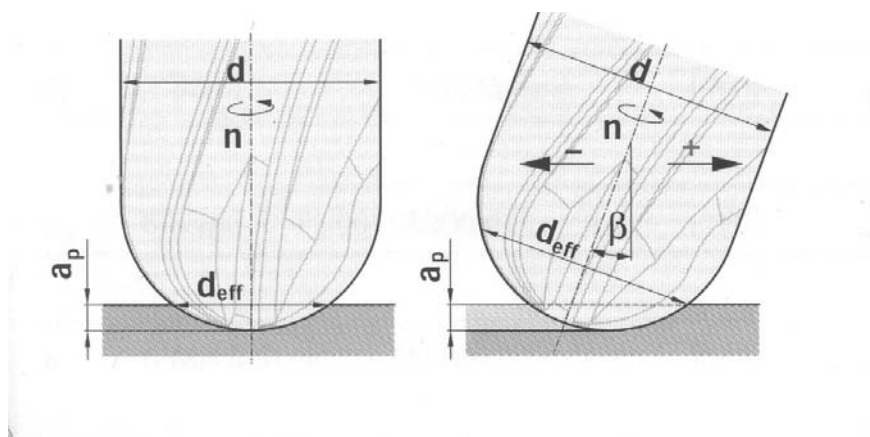


图 2.1 铣刀的有效直径计算

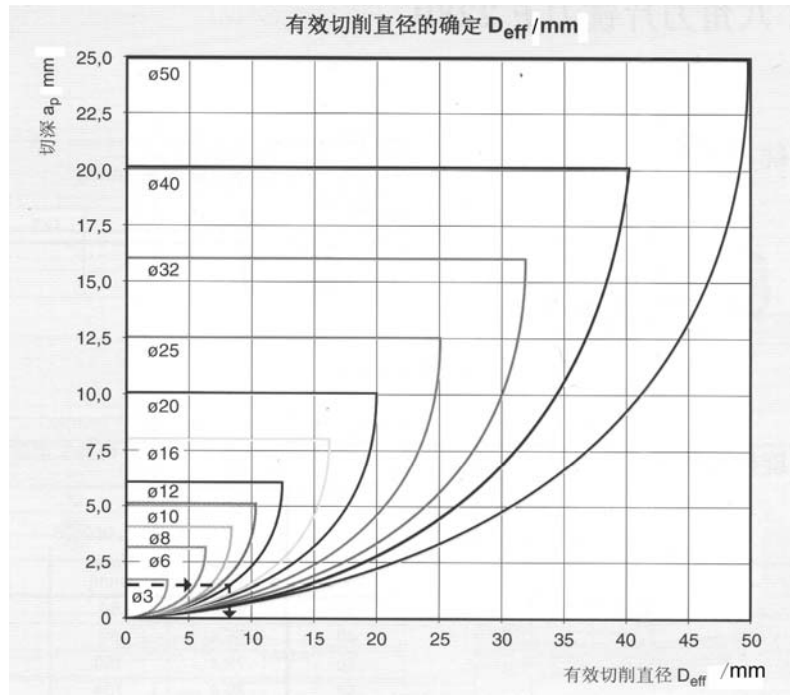


图 2.2 有效直径选择曲线

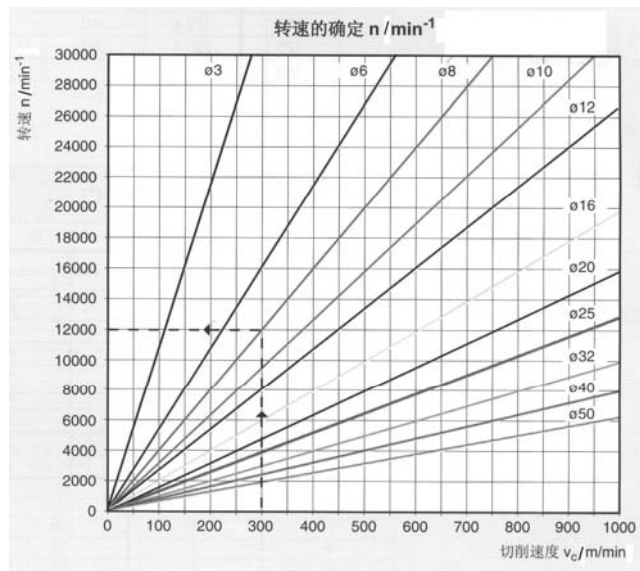


图 2.3 按有效直径与有效切削速度确定转速

在应用球头铣刀进行精加工曲面时，为获得较好的表面粗糙度减少或省去手工抛光，径向铣削深度最好和每齿进给量相等，在这种参数下加工出的表面纹理比较均匀，而且表面质量很高（图 2.4-2.5）。

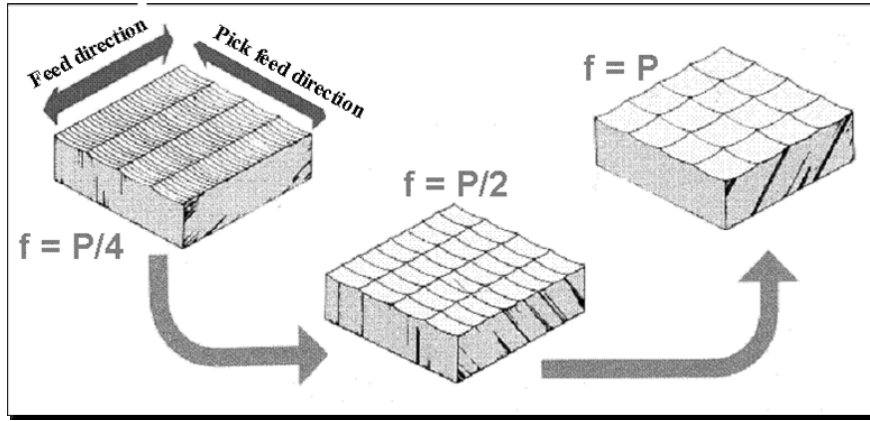


图 2.4 径向铣削深度对表面纹理的影响

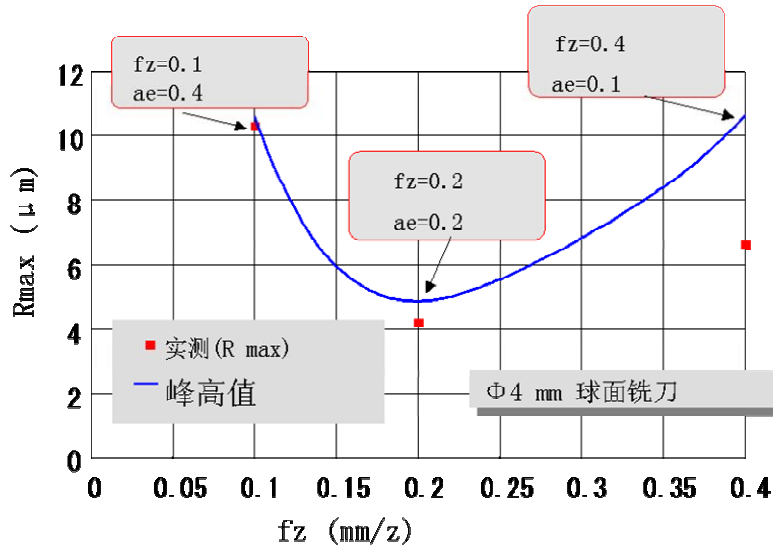
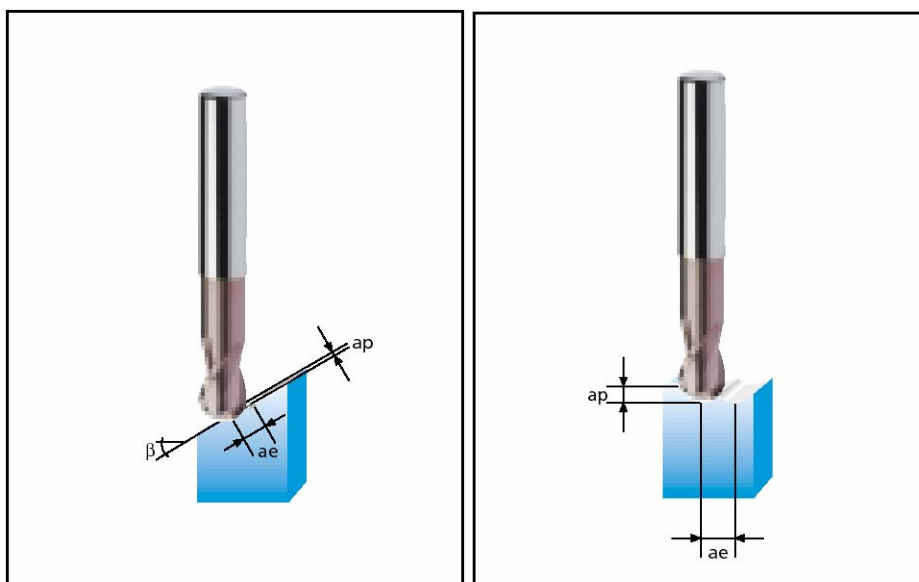


图 2.5 径向铣削深度/每齿进给量对表面粗糙度的影响

高速铣削加工用量的确定主要考虑加工效率、加工表面质量、刀具磨损以及加工成本。不同刀具加工不同工件材料时，加工用量会有很大差异，目前尚无完整的加工数据，可根据实际选用的刀具和加工对象参考刀具厂商提供的加工用量选择。一般的选择原则是中等的每齿进给量  $f_z$ ，较小的轴向切深  $a_p$ ，适当大的径向切深  $a_e$ ，高的切削速度。例如，加工 HRC48~58 淬硬钢时，粗加工选  $v=100$  m/min,  $a_p=6-8\% D$ ,  $a_e=35-40\%$ ,  $f_z=0,05-0,1$  mm/z，半精加工选  $v=150-200$  m/min,  $a_p=3-4\% D$ ,  $a_e=20-40\% D$ ,  $f_z=0,05-0,15$  mm/z，精加选  $v=200-250$  m/min,  $a_p=0,1-0,2$  mm,  $a_e=0,1-0,2$  mm,  $f_z=0,02-0,2$  mm/z。

高速铣削参数与工件和刀具材料关系密切，不同刀具牌号的铣削用量有一定的差异，以下整体硬质合金刀具为例，列出几种典型材料高速铣削的加工参数供参考。图 2.5 为对应参数表的加工示意图，表 2.1 列出各符号名称与单位。



a) 平面铣削

b) 斜面铣削

图 2.6 铣削方式示意图

表 2.1 参数表符号名称与单位

符 号	名 称	单 位	
<b>D</b>	刀具直径	mm	
$v$	切削速度	m/min	
$Z$	刀具齿数	--	
$\beta$	加工表面斜度	deg.	
$f_z$	每齿进给量	mm	
$a_p$	轴向切深	mm	
$a_e$	径向切深	mm	
$D_{eff}$	刀具有效直径	mm	
$n$	主轴转速	$\text{min}^{-1}$	
$v_f$	进给速度	mm/min	
$Q$	金属去除率	$\text{mm}^3/\text{min}$	

## 1. 钢的高速铣削参数

### (1) 粗加工

工件材料：淬硬工具钢，弹簧钢

材料硬度：HRC48~52

刀具材料：90%WC/TiC/TaC+10%Co 或 88%WC/TiC/TaC+12%Co

高速铣削参数参见表 2.2~表 2.5。

表 2-2 低硬度淬硬钢粗加工高速铣削参数（一）

$D$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$	$Q$
mm	m/min	mm	mm	mm	mm	$\text{min}^{-1}$	mm/min	$\text{mm}^3/\text{min}$
<b>2</b>	<b>113</b>	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>	<b>0.10</b>	<b>0.6</b>	<b>60000</b>	<b>8400</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>151</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>0.20</b>	<b>0.8</b>	<b>60000</b>	<b>9600</b>	<b>96</b>
<b>4</b>	<b>210</b>	<b>0.08</b>	<b>0.10</b>	<b>0.25</b>	<b>1.2</b>	<b>55710</b>	<b>8915</b>	<b>223</b>

5	210	0.10	0.10	0.30	1.4	47750	9550	287
6	210	0.11	0.10	0.35	1.5	44560	9805	343
8	210	0.13	0.15	0.45	2.2	30390	7900	533
10	210	0.17	0.15	0.60	2.4	27850	9470	852
12	210	0.20	0.20	0.70	3.1	21560	8625	1208
16	210	0.25	0.25	0.95	4.0	16710	8355	1984
20	210	0.28	0.30	1.15	4.9	13640	7640	2636

表 2.3 低硬度淬硬钢粗加工高速铣削参数（二）

D	Z	v	f <sub>z</sub>	a <sub>p</sub>	a <sub>e</sub>	n	v <sub>f</sub>	Q
mm	--	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min	mm <sup>3</sup> /min
6	4	150	0.10	0.60	0.80	7960	3185	1529
8	4	150	0.10	0.80	0.90	5970	2390	1721
10	4	150	0.10	1.00	1.00	4770	1910	1910
12	4	150	0.12	1.20	1.10	3980	1910	2521
16	4	150	0.14	1.50	1.20	2980	1670	3006

(2) 高硬材料粗加工

工件材料：淬硬工具钢，弹簧钢

材料硬度：HRC52~56

高硬度材料高速铣削参数参见表 2.4~表 2.5

表 2.4 高硬度淬硬钢粗加工高速铣削参数（一）

D	v	f <sub>z</sub>	a <sub>p</sub>	a <sub>e</sub>	D <sub>eff</sub>	n	v <sub>f</sub>	Q
mm	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min	mm <sup>3</sup> /min
2	113	0.07	0.05	0.10	0.6	60000	8400	42
3	151	0.08	0.05	0.20	0.8	60000	9600	96
4	180	0.08	0.10	0.25	1.2	47750	7640	191
5	180	0.10	0.10	0.30	1.4	40930	8185	246
6	180	0.11	0.10	0.35	1.5	38200	8405	294
8	180	0.13	0.15	0.45	2.2	26040	6770	457
10	180	0.17	0.15	0.60	2.4	23870	8115	730
12	180	0.20	0.20	0.70	3.1	18480	7390	1035
16	180	0.25	0.25	0.95	4.0	14320	7160	1701
20	180	0.28	0.30	1.15	4.9	11690	6545	2258

表 2.5 高硬度淬硬钢粗加工高速铣削参数（二）

D	Z	v	f <sub>z</sub>	a <sub>p</sub>	a <sub>e</sub>	n	v <sub>f</sub>	Q
mm	--	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min	mm <sup>3</sup> /min
6	4	120	0.10	0.60	0.80	6370	2550	1224
8	4	120	0.10	0.80	0.90	4770	1910	1375
10	4	120	0.10	1.00	1.00	3820	1530	1530
12	4	120	0.12	1.20	1.10	3180	1525	2013
16	4	120	0.14	1.50	1.20	2390	1340	2412



(3) 硬材料精加工

工件材料：淬硬工具钢，弹簧钢

材料硬度：HRC48~52

刀具材料：90%WC/TiC/TaC+10%Co 或 88%WC/TiC/TaC+12%Co

高速铣削参数参见表 2.6~表 2.9。

表 2.6 低硬度淬硬钢精加工高速铣削参数（一）

$D$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$
mm	deg.	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
2	0	132	0.04	0.06	0.04	0.7	60000	4800
3	0	188	0.05	0.08	0.05	1.0	60000	6000
4	0	226	0.05	0.10	0.05	1.2	60000	6000
5	0	283	0.05	0.12	0.05	1.5	60000	6000
6	0	339	0.06	0.14	0.06	1.8	60000	7200
8	0	380	0.07	0.16	0.07	2.2	54000	7560
10	0	380	0.08	0.18	0.08	2.7	45490	7278
12	0	380	0.09	0.20	0.09	3.1	39370	7087
16	0	380	0.10	0.25	0.10	4.0	30480	6096
20	0	380	0.10	0.30	0.10	4.9	24880	4976

表 2.7 低硬度淬硬钢精加工高速铣削参数（二）

$D$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$
mm	deg.	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
2	60	377	0.04	0.06	0.04	2.0	60000	4800
3	60	380	0.05	0.08	0.05	2.9	41100	4110
4	60	380	0.05	0.10	0.05	3.9	30890	3089
5	60	380	0.05	0.12	0.05	4.9	24750	2475
6	60	380	0.06	0.14	0.06	5.9	20640	2477
8	60	380	0.07	0.16	0.07	7.8	15570	2180
10	60	380	0.08	0.18	0.08	9.7	12500	2000
12	60	380	0.09	0.20	0.09	11.6	10440	1879
16	60	380	0.10	0.25	0.10	15.4	7850	1570
20	60	380	0.10	0.30	0.10	19.2	6290	1258

表 2.8 低硬度淬硬钢精加工高速铣削参数（三）

$D$	$Z$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$
mm	--	deg.	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
3	4	0	170	0.08	0.10	0.65	18040	5775
4	4	0	170	0.09	0.10	0.70	13530	4870
5	4	0	170	0.10	0.15	0.75	10820	4330
6	6	0	170	0.11	0.15	0.80	9020	5955
8	6	0	170	0.11	0.20	0.90	6760	4460
10	6	0	170	0.12	0.20	1.00	5410	3895
12	6	0	170	0.13	0.20	1.05	4510	3520

表 2.9 低硬度淬硬钢精加工高速铣削参数（四）

$D$	$Z$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$
mm	--	deg.	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
<b>3</b>	<b>4</b>	<b>≠0</b>	<b>380</b>	<b>0.08</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>40320</b>	<b>12900</b>
<b>4</b>	<b>4</b>	<b>≠0</b>	<b>380</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>30240</b>	<b>10885</b>
<b>5</b>	<b>4</b>	<b>≠0</b>	<b>380</b>	<b>0.10</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>24190</b>	<b>9675</b>
<b>6</b>	<b>6</b>	<b>≠0</b>	<b>380</b>	<b>0.11</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>20160</b>	<b>13305</b>
<b>8</b>	<b>6</b>	<b>≠0</b>	<b>380</b>	<b>0.11</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>15120</b>	<b>9980</b>
<b>10</b>	<b>6</b>	<b>≠0</b>	<b>380</b>	<b>0.12</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>12100</b>	<b>8710</b>
<b>12</b>	<b>6</b>	<b>≠0</b>	<b>380</b>	<b>0.13</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>10080</b>	<b>7860</b>

(4) 高硬材料精加工

工件材料：淬硬工具钢，弹簧钢

材料硬度：HRC52~56

刀具材料：90%WC/TiC/TaC+10%Co 或 88%WC/TiC/TaC+12%Co

高速铣削参数参见表 2.10~表 2.13。

表 2.10 高硬度淬硬钢精加工高速铣削参数（一）

$D$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$
mm	deg.	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
<b>2</b>	<b>0</b>	<b>132</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	<b>0.7</b>	<b>60000</b>	<b>4800</b>
<b>3</b>	<b>0</b>	<b>188</b>	<b>0.05</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>1.0</b>	<b>60000</b>	<b>6000</b>
<b>4</b>	<b>0</b>	<b>226</b>	<b>0.05</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>1.2</b>	<b>60000</b>	<b>6000</b>
<b>5</b>	<b>0</b>	<b>283</b>	<b>0.05</b>	<b>0.12</b>	<b>0.05</b>	<b>1.5</b>	<b>60000</b>	<b>6000</b>
<b>6</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>0.06</b>	<b>0.14</b>	<b>0.06</b>	<b>1.8</b>	<b>52720</b>	<b>6326</b>
<b>8</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>0.07</b>	<b>0.16</b>	<b>0.07</b>	<b>2.2</b>	<b>42630</b>	<b>5968</b>
<b>10</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>0.08</b>	<b>0.18</b>	<b>0.08</b>	<b>2.7</b>	<b>35910</b>	<b>5746</b>
<b>12</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>0.09</b>	<b>0.20</b>	<b>0.09</b>	<b>3.1</b>	<b>31080</b>	<b>5594</b>
<b>16</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>0.10</b>	<b>0.25</b>	<b>0.10</b>	<b>4.0</b>	<b>24060</b>	<b>4812</b>
<b>20</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>0.10</b>	<b>0.30</b>	<b>0.10</b>	<b>4.9</b>	<b>19640</b>	<b>3928</b>

表2.11 高硬度淬硬钢精加工高速铣削参数（二）

$D$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$
mm	deg.	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
<b>2</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	<b>2.0</b>	<b>48490</b>	<b>3879</b>
<b>3</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.05</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>2.9</b>	<b>32450</b>	<b>3245</b>
<b>4</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.05</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>3.9</b>	<b>24390</b>	<b>2439</b>
<b>5</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.05</b>	<b>0.12</b>	<b>0.05</b>	<b>4.9</b>	<b>19540</b>	<b>1954</b>
<b>6</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.06</b>	<b>0.14</b>	<b>0.06</b>	<b>5.9</b>	<b>16300</b>	<b>1956</b>
<b>8</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.07</b>	<b>0.16</b>	<b>0.07</b>	<b>7.8</b>	<b>12290</b>	<b>1721</b>
<b>10</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.08</b>	<b>0.18</b>	<b>0.08</b>	<b>9.7</b>	<b>9870</b>	<b>1579</b>
<b>12</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.09</b>	<b>0.20</b>	<b>0.09</b>	<b>11.6</b>	<b>8250</b>	<b>1485</b>
<b>16</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.10</b>	<b>0.25</b>	<b>0.10</b>	<b>15.4</b>	<b>6200</b>	<b>1240</b>
<b>20</b>	<b>60</b>	<b>300</b>	<b>0.10</b>	<b>0.30</b>	<b>0.10</b>	<b>19.2</b>	<b>4970</b>	<b>994</b>

表 2.12 高硬度淬硬钢精加工高速铣削参数（三）

$D$	$Z$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$
mm	--	deg.	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
<b>3</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>0.08</b>	<b>0.10</b>	<b>0.65</b>	<b>15920</b>	<b>5095</b>
<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	<b>0.70</b>	<b>11940</b>	<b>4300</b>
<b>5</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>0.10</b>	<b>0.15</b>	<b>0.75</b>	<b>9550</b>	<b>3820</b>
<b>6</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>0.11</b>	<b>0.15</b>	<b>0.80</b>	<b>7960</b>	<b>5255</b>
<b>8</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>0.11</b>	<b>0.20</b>	<b>0.90</b>	<b>5970</b>	<b>3940</b>
<b>10</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>0.12</b>	<b>0.20</b>	<b>1.00</b>	<b>4770</b>	<b>3435</b>
<b>12</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>0.13</b>	<b>0.20</b>	<b>1.05</b>	<b>3980</b>	<b>3105</b>

表 2.13 高硬度淬硬钢精加工高速铣削参数（四）

$D$	$Z$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$
mm	--	deg.	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
<b>3</b>	<b>4</b>	<b>≠0</b>	<b>300</b>	<b>0.08</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>31830</b>	<b>10185</b>
<b>4</b>	<b>4</b>	<b>≠0</b>	<b>300</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>23870</b>	<b>8595</b>
<b>5</b>	<b>4</b>	<b>≠0</b>	<b>300</b>	<b>0.10</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>19100</b>	<b>7640</b>
<b>6</b>	<b>6</b>	<b>≠0</b>	<b>300</b>	<b>0.11</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>15920</b>	<b>10505</b>
<b>8</b>	<b>6</b>	<b>≠0</b>	<b>300</b>	<b>0.11</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>11940</b>	<b>7880</b>
<b>10</b>	<b>6</b>	<b>≠0</b>	<b>300</b>	<b>0.12</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>9550</b>	<b>6875</b>
<b>12</b>	<b>6</b>	<b>≠0</b>	<b>300</b>	<b>0.13</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>7960</b>	<b>6210</b>

2. 铸铁的高速铣削参数

工件材料：铸铁

材料硬度：< HB180

高速铣削参数参见表 2.14~表 2.15。

表 2.14 铸铁高速铣削参数（一）

$D$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$	$Q$
mm	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min	mm <sup>3</sup> /min
<b>1</b>	<b>75</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.4</b>	<b>60000</b>	<b>7200</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>170</b>	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>	<b>0.15</b>	<b>0.9</b>	<b>60000</b>	<b>8400</b>	<b>126</b>
<b>3</b>	<b>207</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>0.20</b>	<b>1.1</b>	<b>60000</b>	<b>12000</b>	<b>240</b>
<b>4</b>	<b>226</b>	<b>0.11</b>	<b>0.10</b>	<b>0.25</b>	<b>1.2</b>	<b>60000</b>	<b>13200</b>	<b>330</b>
<b>5</b>	<b>310</b>	<b>0.12</b>	<b>0.15</b>	<b>0.35</b>	<b>1.7</b>	<b>58050</b>	<b>13930</b>	<b>731</b>
<b>6</b>	<b>310</b>	<b>0.14</b>	<b>0.15</b>	<b>0.40</b>	<b>1.9</b>	<b>51940</b>	<b>14545</b>	<b>873</b>
<b>8</b>	<b>310</b>	<b>0.18</b>	<b>0.25</b>	<b>0.50</b>	<b>2.8</b>	<b>35240</b>	<b>12685</b>	<b>1586</b>
<b>10</b>	<b>310</b>	<b>0.20</b>	<b>0.20</b>	<b>0.65</b>	<b>2.8</b>	<b>35240</b>	<b>14095</b>	<b>1832</b>
<b>12</b>	<b>310</b>	<b>0.24</b>	<b>0.25</b>	<b>0.80</b>	<b>3.4</b>	<b>29020</b>	<b>13930</b>	<b>2786</b>
<b>16</b>	<b>310</b>	<b>0.30</b>	<b>0.30</b>	<b>1.05</b>	<b>4.3</b>	<b>22950</b>	<b>13770</b>	<b>4338</b>

表2.15 铸铁高速铣削参数（二）

$D$	$Z$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$	$Q$
mm	--	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min	mm <sup>3</sup> /min
<b>6</b>	<b>4</b>	<b>250</b>	<b>0.13</b>	<b>0.40</b>	<b>2.00</b>	<b>13260</b>	<b>6895</b>	<b>5516</b>
<b>8</b>	<b>4</b>	<b>250</b>	<b>0.17</b>	<b>0.55</b>	<b>2.65</b>	<b>9950</b>	<b>6765</b>	<b>9860</b>
<b>10</b>	<b>4</b>	<b>250</b>	<b>0.15</b>	<b>0.65</b>	<b>3.35</b>	<b>7960</b>	<b>4775</b>	<b>10398</b>
<b>12</b>	<b>4</b>	<b>250</b>	<b>0.19</b>	<b>0.80</b>	<b>4.00</b>	<b>6630</b>	<b>5040</b>	<b>16128</b>
<b>16</b>	<b>4</b>	<b>250</b>	<b>0.23</b>	<b>1.00</b>	<b>5.35</b>	<b>4970</b>	<b>4570</b>	<b>24450</b>

3. 轻合金的高速铣削参数

(1) 粗加工

粗加工锻造铝合金，铝合金（〈6%Si），镁合金高速铣削参数参见表2.16。

表 2.16 粗加工锻造铝合金，铝合金（〈6%Si），镁合金高速铣削参数

$D$	$Z$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$	$Q$
mm	--	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min	cm <sup>3</sup> /min
<b>3</b>	<b>2</b>	<b>450</b>	<b>0.10</b>	<b>0.75</b>	<b>1.50</b>	<b>60000</b>	<b>12000</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>2</b>	<b>600</b>	<b>0.12</b>	<b>1.00</b>	<b>2.00</b>	<b>60000</b>	<b>14400</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>2</b>	<b>750</b>	<b>0.15</b>	<b>1.25</b>	<b>2.50</b>	<b>60000</b>	<b>18000</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>2</b>	<b>900</b>	<b>0.18</b>	<b>1.50</b>	<b>3.00</b>	<b>60000</b>	<b>21600</b>	<b>97</b>
<b>8</b>	<b>2</b>	<b>1200</b>	<b>0.20</b>	<b>2.00</b>	<b>4.00</b>	<b>47750</b>	<b>19100</b>	<b>153</b>
<b>10</b>	<b>2</b>	<b>1200</b>	<b>0.22</b>	<b>2.50</b>	<b>5.00</b>	<b>38200</b>	<b>16810</b>	<b>210</b>
<b>12</b>	<b>2</b>	<b>1200</b>	<b>0.25</b>	<b>3.00</b>	<b>6.00</b>	<b>31830</b>	<b>15915</b>	<b>286</b>
<b>16</b>	<b>2</b>	<b>1200</b>	<b>0.28</b>	<b>4.00</b>	<b>8.00</b>	<b>23870</b>	<b>13365</b>	<b>428</b>
<b>20</b>	<b>2</b>	<b>1200</b>	<b>0.30</b>	<b>5.00</b>	<b>10.0</b>	<b>19100</b>	<b>11460</b>	<b>573</b>

(2) 精加工

精加工锻造铝合金，铝合金（〈6%Si），镁合金高速铣削参数参见表2.17~表2.20。

表 2.17 精加工锻造铝合金，铝合金（〈6%Si），镁合金高速铣削参数（一）

$D$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$
mm	deg.	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
<b>2</b>	<b>0</b>	<b>132</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	<b>0.7</b>	<b>60000</b>	<b>4800</b>
<b>3</b>	<b>0</b>	<b>188</b>	<b>0.05</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>1.0</b>	<b>60000</b>	<b>6000</b>
<b>4</b>	<b>0</b>	<b>226</b>	<b>0.05</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>1.2</b>	<b>60000</b>	<b>6000</b>
<b>5</b>	<b>0</b>	<b>283</b>	<b>0.05</b>	<b>0.12</b>	<b>0.05</b>	<b>1.5</b>	<b>60000</b>	<b>6000</b>
<b>6</b>	<b>0</b>	<b>339</b>	<b>0.06</b>	<b>0.14</b>	<b>0.06</b>	<b>1.8</b>	<b>60000</b>	<b>7200</b>
<b>8</b>	<b>0</b>	<b>415</b>	<b>0.07</b>	<b>0.16</b>	<b>0.07</b>	<b>2.2</b>	<b>60000</b>	<b>8400</b>
<b>10</b>	<b>0</b>	<b>509</b>	<b>0.08</b>	<b>0.18</b>	<b>0.08</b>	<b>2.7</b>	<b>60000</b>	<b>9600</b>
<b>12</b>	<b>0</b>	<b>584</b>	<b>0.09</b>	<b>0.20</b>	<b>0.09</b>	<b>3.1</b>	<b>60000</b>	<b>10800</b>
<b>16</b>	<b>0</b>	<b>754</b>	<b>0.10</b>	<b>0.25</b>	<b>0.10</b>	<b>4.0</b>	<b>60000</b>	<b>12000</b>
<b>20</b>	<b>0</b>	<b>924</b>	<b>0.10</b>	<b>0.30</b>	<b>0.10</b>	<b>4.9</b>	<b>60000</b>	<b>12000</b>

表 2.18 精加工锻造铝合金，铝合金 (<6%Si)，镁合金高速铣削参数 (二)

$D$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$
mm	deg.	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
2	60	377	0.04	0.06	0.04	2.0	60000	4800
3	60	547	0.05	0.08	0.05	2.9	60000	6000
4	60	735	0.05	0.10	0.05	3.9	60000	6000
5	60	924	0.05	0.12	0.05	4.9	60000	6000
6	60	1112	0.06	0.14	0.06	5.9	60000	7200
8	60	1470	0.07	0.16	0.07	7.8	60000	8400
10	60	1500	0.08	0.18	0.08	9.7	49340	7894
12	60	1500	0.09	0.20	0.09	11.6	41230	7421
16	60	1500	0.10	0.25	0.10	15.4	30990	6198
20	60	1500	0.10	0.30	0.10	19.2	24830	4966

表 1.19 精加工锻造铝合金，铝合金 (<6%Si)，镁合金高速铣削参数 (三)

$D$	$Z$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$
mm	--	deg.	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
3	2	0	565	0.05	0.30	2.00	60000	6300
4	2	0	754	0.06	0.40	3.00	60000	7200
5	2	0	942	0.08	0.50	4.00	60000	9000
6	2	0	1131	0.09	0.60	4.00	60000	10800
8	2	0	1200	0.10	0.80	6.00	47750	9310
10	2	0	1200	0.11	1.00	7.00	38200	8595
12	2	0	1200	0.13	1.20	9.00	31830	8115
16	2	0	1200	0.14	1.60	12.00	23870	6805
20	2	0	1200	0.15	2.00	16.00	19100	5730

表2.20 精加工锻造铝合金，铝合金 (<6%Si)，镁合金高速铣削参数 (四)

$D$	$Z$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$
mm	--	deg.	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
3	2	≠0	565	0.05	0.10	0.10	60000	6300
4	2	≠0	754	0.06	0.10	0.10	60000	7200
5	2	≠0	942	0.08	0.15	0.15	60000	9000
6	2	≠0	1131	0.09	0.15	0.15	60000	10800
8	2	≠0	1500	0.10	0.20	0.20	59680	11640
10	2	≠0	1500	0.11	0.20	0.20	47750	10745
12	2	≠0	1500	0.13	0.20	0.20	39790	10145
16	2	≠0	1500	0.14	0.25	0.25	29840	8505
20	2	≠0	1500	0.15	0.25	0.25	23870	7160

#### 4. 不锈钢的高速铣削参数

不锈钢、钛合金高速铣削参数参见表 2.21~表 2.24。

表 2.21 不锈钢、钛合金高速铣削参数 (一)

$D$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$
mm	deg.	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
2	0	132	0.04	0.06	0.04	0.7	60000	4800

3	0	188	0.05	0.08	0.05	1.0	60000	6000
4	0	226	0.05	0.10	0.05	1.2	60000	6000
5	0	240	0.05	0.12	0.05	1.5	49920	4992
6	0	240	0.06	0.14	0.06	1.8	42170	5060
8	0	240	0.07	0.16	0.07	2.2	34110	4775
10	0	240	0.08	0.18	0.08	2.7	28730	4597
12	0	240	0.09	0.20	0.09	3.1	24860	4475
16	0	240	0.10	0.25	0.10	4.0	19250	3850
20	0	240	0.10	0.30	0.10	4.9	15710	3142

表2.22 不锈钢、钛合金高速铣削参数（二）

$D$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$D_{eff}$	$n$	$v_f$
mm	deg.	m/min	mm	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
2	60	240	0.04	0.06	0.04	2.0	38790	3103
3	60	240	0.05	0.08	0.05	2.9	25960	2596
4	60	240	0.05	0.10	0.05	3.9	19510	1951
5	60	240	0.05	0.12	0.05	4.9	15630	1563
6	60	240	0.06	0.14	0.06	5.9	13040	1565
8	60	240	0.07	0.16	0.07	7.8	9830	1376
10	60	240	0.08	0.18	0.08	9.7	7890	1262
12	60	240	0.09	0.20	0.09	11.6	6600	1188
16	60	240	0.10	0.25	0.10	15.4	4960	992
20	60	240	0.10	0.30	0.10	19.2	3970	794

表 2.23 不锈钢、钛合金高速铣削参数（三）

$D$	$Z$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$
mm	--	deg.	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
3	4	0	120	0.08	0.10	0.65	12730	4075
4	4	0	120	0.09	0.10	0.70	9550	3440
5	4	0	120	0.10	0.15	0.75	7640	3055
6	6	0	120	0.11	0.15	0.80	6370	4205
8	6	0	120	0.11	0.20	0.90	4770	3150
10	6	0	120	0.12	0.20	1.00	3820	2750
12	6	0	120	0.13	0.20	1.05	3180	2480

表 2.24 不锈钢、钛合金高速铣削参数（四）

$D$	$Z$	$\beta$	$v$	$f_z$	$a_p$	$a_e$	$n$	$v_f$
mm	--	deg.	m/min	mm	mm	mm	min <sup>-1</sup>	mm/min
3	4	≠0	240	0.08	0.10	0.10	25470	8150
4	4	≠0	240	0.09	0.10	0.10	19100	6875
5	4	≠0	240	0.10	0.15	0.15	15280	6110
6	6	≠0	240	0.11	0.15	0.15	12730	8400
8	6	≠0	240	0.11	0.20	0.20	9550	6305
10	6	≠0	240	0.12	0.20	0.20	7640	5500
12	6	≠0	240	0.13	0.20	0.20	6370	4970

### 3. 加工实例

图 1 硬币模具加工

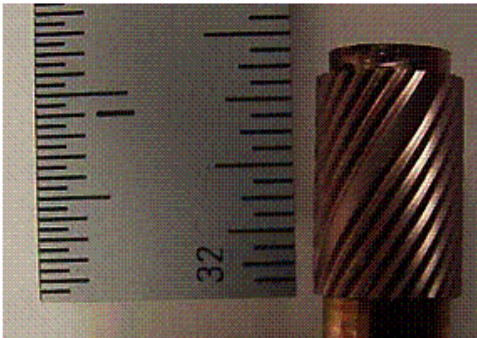
#### 应用示例 – 硬币模具(工具钢)



- 传统工艺：  
生成注塑模造型并传送到NC程序中
- 工艺存在的问题：  
NC程序 > 400MB,  
**加工时间 > 40小时,**  
刀具磨损 ( $\varnothing = 0.075\text{mm}$  雕刻刀具, 20,000 转分)
- 解决方案：  
通过CAD/CAM将3维轮廓、文字和  
背景及平面分开加工  
NC程序  $\approx$  30MB,  
**加工时间 < 20h**

图 2 螺旋型电极加工

#### 应用示例- 螺旋型电极(钨化铜)



- 传统工艺：  
通过特殊的高速刚模具加工专用刀具进行2  
维铣削工艺
- 工艺存在的问题：  
几何形状的一致性差，专用刀具成本高，低  
转速使得加工时间较长、刀具的工作寿命短
- 解决方案：  
使用  $\varnothing = 0.3\text{mm}$  标准球头铣刀，主轴速度  
40,000转/分进行3维铣削

图 3 Bezel 下表壳模具加工



图 4 Bezel 电极加工



图 5 模腔加工

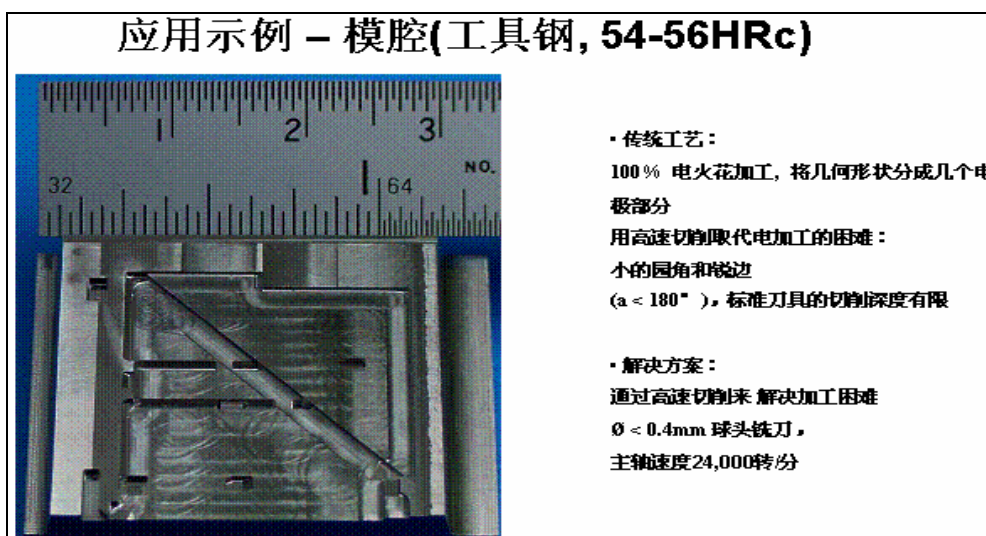


图 6 铝制吹塑模加工



## 应用示例-铝制吹塑模(AIMgSi0.5)



- 饮料瓶的吹塑模
- 3+2 轴加工

工步	刀具	Diameter in mm	Corner-radius (mm)	tooth number	speed (rpm)	working feed (mm/min)	processing time
		D	R	z	n	v <sub>f</sub>	t
粗加工	Aluspeed toric end mill	10	1,5	2	38'000	10'000	5'
精加工	Sphericut alu ball nose	6	3	2	38'000	7'000	10'
精加工	Sphericut alu ball nose	6	3	2	38'000	6'000	50'
磨削	60 grade	2	1	1	20'000	1'200	10'
<b>总加工时间</b>							75'

图 7 手机石墨电极加工

## 应用示例- 手机石墨电极

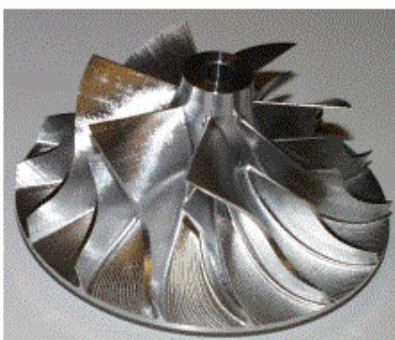


- 手机机壳石墨电极
- 3 轴加工

工步	刀具	Diameter in mm	Corner-radius (mm)	tooth number	speed (rpm)	working feed (mm/min)	processing time
		D	R	z	n	v <sub>f</sub>	t
粗加工	Toric end mills	8	0.5	3	30000	2850	
预精加工	Toric end mills	4	0.5	2	30000	2500	
精加工	Toric end mills	2	0.15	2	30000	2200	
精加工	Ball nose end mills	2	1	2	30000	2200	
精加工	Ball nose end mills	1	0.5	2	30000	1600	
精加工	Toric end mills	1	0.1	2	30000	1850	
精加工	Ball nose end mills	0.4	0.2	2	30000	650	
<b>Processing time (total)</b>							203'

图 8 铝制叶轮加工

## 应用示例 - 铝制叶轮

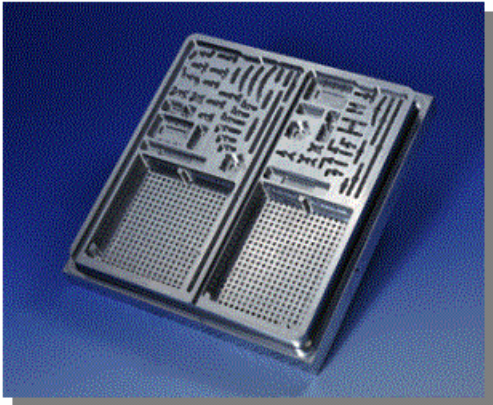


- 叶轮
- 5轴联动加工

工步	刀具	speed (rpm)	working feed (mm/min)	processing time
		n	v <sub>f</sub>	t
schruppen	Formfräser (Kunde)	28'000	5'000	3'55"
schlichten Lamellen	Formfräser (Kunde)	17'000	8'000	2'40"
schlichten Boden	Formfräser (Kunde)	36'000	8'000	5'10"
<b>Processing time (total)</b>				11'45"

图 9 生产医用铝盒的模具加工

### 生产医用铝盒



尺寸: 300 x 300 mm

**粗铣整体厚铝板**  
n = 36000 min<sup>-1</sup> f = 20 m/min 8 min

**精铣去毛口**  
n = 40000 min<sup>-1</sup> f = 7 m/min 18 min

**钻680个Ø3毫米孔**  
n = 40000 min<sup>-1</sup> f = 8 m/min 6 min

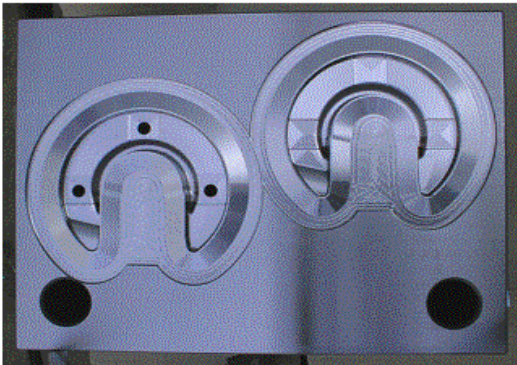
**总加工时间** **32 min**

- 在最短时间内完成切削加工
- 仅一次装卡便可完成全部切削加工

图 10 耐磨环加工

### 耐磨环

**材料: 1.2343 50 HRC**

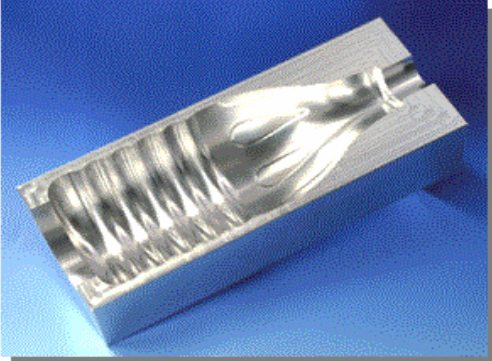


尺寸 420 x 310 x 100  
最大进给: 8'000mm/min 最大转速: 35'000U/min

- 传统工艺的加工时间
  - 包括非生产时间 **2215min**
  - 铣削 **155min**
  - 抛光 **90min**
  - 总耗时 **2460 min = 41 小时**
- 高速加工的时间
  - 粗加工和半精加工 **96min**
  - 精加工 **120min**
  - 无需手工修模
  - 总耗时 **216 = 3 小时 36 分钟**

图 11 生产饮料瓶用的模具加工

### 生产饮料瓶用的模具



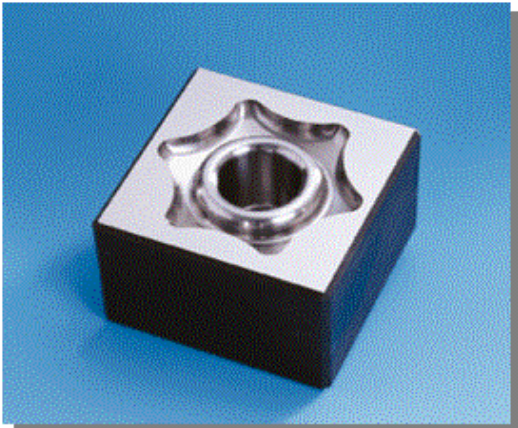
尺寸: 200 x 80 x 80 mm

- 技术数据:
 

粗铣: 35000 rpm 12000 mm/min	9 min
精铣: 42000 rpm 10000 mm/min	49 min
<b>总加工时间: 58 min</b>	
- 最佳的表面质量
- 不再需要不能保证尺寸准确性的钳工工序
- 由于机械加工工时短, 降低了成本

图 12 旋钮加工

### 旋钮 - 淬硬钢




尺寸: 60 x 60 x 50 mm

- 参数:
 

材料 1.2343 56 HRC	
粗加工: 20'000 rpm 4'000 mm/min	
精加工: 30'000 rpm 3'000 mm/min	
最小半径: R 1; R 1.5	
表面光洁度: $Ra \approx 0,6 \mu m$	
时间: 78 Minuten	

图 13 生产磁通补偿器加工

### 生产铝制磁通补偿器



尺寸: 80 x 100 x 40mm

技术数据:

粗铣:	8 min
精铣:	11 min
铣方孔:	3 min
刚性攻丝:	1 min
<b>总加工时间:</b>	<b>23 min</b>
<b>总费用:</b>	<b>约 60 US\$</b>

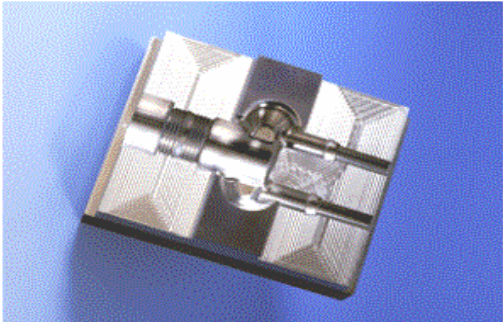
在铝制品生产中采用铸模法的预算

<b>铸模费用:</b>	<b>≈5000 US\$</b>
<b>铸造费用:</b>	<b>≈20 US\$</b>
<b>加工费用:</b>	<b>≈10 US\$</b>

图 14 生产管接头用的复杂模具加工

### 生产管接头用的复杂模具

- 材料: 硬度为HRC 60的Stavax材料



尺寸: 120 x 150 x 50 mm

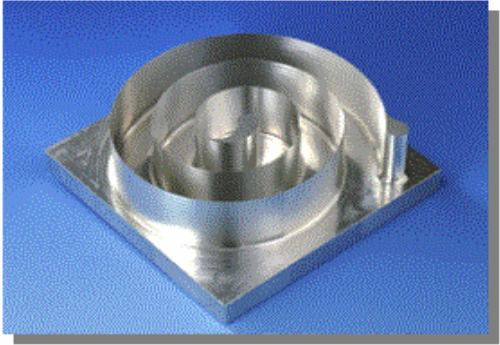
- 技术数据:
 

粗铣:	23000 rpm 7000 mm/min
精铣:	36000 rpm 5000 mm/min
加工时间:	157 min
- 用 $\varnothing 1\text{mm}$ 铣刀铣切螺纹轮廓
- 表面质量最佳
- 不再需要钳工工序
  - 机加工费用  $\approx 500\text{ US\$}$
  - 刀具费用  $\approx 450\text{ US\$}$

总费用低于 950 美元

图 15 铝制螺旋片的加工

### 加工铝制螺旋片



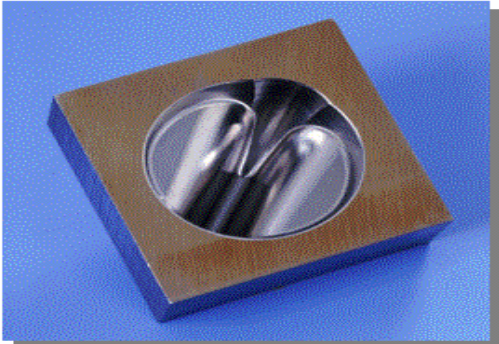
尺寸: 80 x 80 x 40 mm

- 技术数据:
 

粗铣:	42000 rpm 15000 mm/min
壁厚:	最小可薄至0.05mm
壁高:	20mm
加工时间:	7.5 min
- 在最短时间内生产出薄壁螺旋片
- 能进行采用常规方法所无法实现的生产

图 16 生产旋钮开关用的模具加工

### 生产旋钮开关用的模具



尺寸: 50 x 50 x 30 mm

- 技术数据:
 

粗铣:	24000 rpm 7500 mm/min
精铣:	35000 rpm 7000 mm/min
加工时间:	39 min
- 表面粗糙度达  $Ra\ 0.4\ \mu\text{m}$
- 不再需要钳工工序
- 缩短加工时间

图 17 不锈钢加工


<b>Material</b>	<b>400 Series Stainless Steel</b>	
<b>Surface Footage (rough)</b>	<b>1500 sfm</b>	
<b>Programmable Feed (finish)</b>	<b>200 ipm</b>	
<b>Spindle Speed</b>	<b>8-10,000 rpm</b>	
<b>Finish Tools</b>	<b>1.000" (4 flute, TiCN .250" ball end .125" mill)</b>	
<b>Total Time - 14 hours reduced to 1.5 hours or 900% faster</b>		

图 18 淬硬钢加工

**加工50HRc材料**

	<b>Number of Programs</b>	<b>24</b>
	<b>Program Size, Total</b>	<b>4 Mbytes</b>
	<b>Program Statistics (Finishing)</b>	
	<b>Minimum Move</b>	<b>0.008"</b>
	<b>Step Over</b>	<b>0.006"</b>
	<b>Cordal Deviation</b>	<b>0.0001"</b>
	<b>Program Feedrate</b>	<b>80 to 100 ipm</b>
	<b>Spindle Speed</b>	<b>12,500 rpm</b>
	<b>Machine</b>	<b>MC98</b>
	<b>Spindle</b>	<b>50 Taper Jet 15,000 rpm</b>

**3 Hrs, 27 min**

**Reduce setups from 8 to 1, and lead time by 600%.**