



基于“中国制造 2025” 中数控加工技术的研究

——先进制造技术中的数控加工工艺

学部（院）	工学部智能制造与控制工程学院
专 业	机械电子工程
班 级	18 机工 A2
姓 名	郭晓峰
学 号	20201313214
时 间	2021 年 04 月 12 日

基于“中国制造 2025”中数控加工技术的研究

——先进制造技术中的数控加工工艺

姓名：郭晓峰 学号：20201313214

摘要：传统的机械制造过程是一个离散的生产过程，它是以制造技术为核心的一个狭义的制造过程。随着科学技术的发展，传统的机械制造技术与计算机技术、数控技术、微电子技术、传感技术等相互结合，形成了以系统性，设计与工艺一体化，精密加工技术，产品生命全过程制造和人、组织、技术三结合为特点的先进制造技术，而数控加工技术就是其中一个典型的代表。数控加工技术，是现代制造技术的基础，它的广泛应用使普通机械被数控机械所代替，使全球制造业发生了根本变化。数控加工技术的水准、拥有和普及程度已经成为衡量一个国家综合国力和工业现代化水平的重要标志之一。同常规加工相比，数控加工具有如下的特点：自动化程度高、加工精度高、加工质量稳定、生产效率高、易于建立计算机通信网络。基于“中国制造 2025”的背景下，本论文通过先进制造技术概论、数控加工技术产生背景、数控加工工艺流程、数控加工技术的相关设备、数控加工技术的适用范围、数控加工技术产出的典型产品、数控加工技术的优缺点、数控加工技术的国内外发展现状、数控加工技术的研究热点等方面全面阐述数控加工技术在先进制造技术中的创新与发展。

关键词：中国制造 2025；先进制造技术；数控加工技术；数控机床

目 录

1 先进制造技术概论	4
1.1 先进制造技术的内涵	4
1.2 先进制造技术的发展	4
2 数控加工技术产生背景	6
2.1 数控加工技术的产生背景	6
2.2 数控机床的产生背景	6
3 数控加工工艺流程	8
3.1 数控加工的工艺基础	8
3.2 数控车削加工工艺	8
3.3 数控铣削加工工艺	12
3.4 加工中心的加工工艺	17
3.5 数控线切割加工工艺	20
4 数控加工技术的相关设备	25
4.1 常见的数控车床	25
4.2 常见的数控铣床	26
4.3 常见的加工中心	27
4.4 常见的电火花线切割加工机床	29
5 数控加工技术的适用范围	30
5.1 适合采用数控加工技术的零件	30
5.2 多种数控机床的适用范围	30
6 数控加工技术产出的典型产品	32
6.1 数控加工在飞机制造中的典型应用	32
7 数控加工技术的优缺点	34
7.1 数控加工技术的优点	34
7.2 数控加工技术的缺点	34

8 数控加工技术的国内外发展现状	35
8.1 数控加工技术的国内发展现状	35
8.2 我国数控加工技术与国外的差异	36
9 数控加工技术的研究热点	37
9.1 高档数控机床成为数控加工技术的重要地位	37
参考文献	38

1 先进制造技术概论

1.1 先进制造技术的内涵

先进制造技术的概念是在 20 世纪 80 年代末被提出来的。一般来说，比较被人们接受的定义是：“先进制造技术是以人为主体的，以计算机为重要工具，不断吸收机械、光学、电子、信息（计算机和通信、控制理论、人工智能等）、材料、环保、生物以及现代系统等最新科技成果，涵盖产品生产的整个生命周期的各个环节的先进工程技术的总称。”它面向包括机械制造、电子产品制造、材料制造、石油、化工、冶金以及民用消费品制造等在内的“大制造业”，以提高对动态多变的产品市场的适应竞争能力为中心，以实现优质、灵活、高效、清洁生产 and 提供优质、快捷服务，取得理想经济效益为目标。

由此定义我们可以得出如下几个要点：

- （1）强调学科交叉和技术融合
- （2）与生物医学相结合
- （3）材料的转变是最根本的特征
- （4）先进制造技术的内涵扩大
- （5）先进制造技术是动态发展，不断更新的技术

1.2 先进制造技术的发展

先进制造技术，即以系统性，设计与工艺一体化，精密加工技术，产品生命全过程制造和人、组织、技术三结合为特点的技术。其涉及的领域可概括为与新技术、新工艺、新材料和新设备有关的单项制造技术和与生产类型有关的综合自动化技术两方面。主要有以下特点：

- （1）集成化 先进制造技术生产的产品将是多种技术的集成，技术含量高，涉及的领域广，包含的功能多。
- （2）高效化 运行速度快，能耗低，效率高。
- （3）个性化 产品真正面向市场，根据市场的不同要求，敏捷地生产出个性化的产品，日益满足不同用户的要求。
- （4）自动化 不需要人们过多的参与，能自动地完成已拟定的任务。
- （5）柔性化 当外界条件变化时，其自身变换灵活，适应性很强，能满足不

同要求。

(6) 智能化 具有一定的思维能力，自我分析、判断、学习，并能协调和处理发生的问题，对操作人员的要求较低。

(7) 网格化 能信息连网，资源共享，充分调动各自的积极因素，发挥群体作用。

(8) 小型化 在能实现同样功能条件下，小型化的产品具有重量轻，材料省，能耗低，节省资源，占有空间小，携带运输方便等优点。

(9) 绿色化 在产品的生产、使用阶段，以及寿命周期后的处理，都很安全、卫生、经济，具有较强的绿色环保意识，符合可持续发展的要求。

2 数控加工技术产生背景

2.1 数控加工技术的产生背景

随着科学技术的发展，机械产品结构越来越合理，其性能、精度和效率日趋提高，更新换代频繁，生产类型由大批量生产向多品种小批量生产转化。因此，对机械产品的加工相应地提出了高精度、高柔性 with 高度自动化的要求。

大批大量的产品，如汽车、拖拉机与家用电器的零件，为了解决高产、优质的为题，多采用专用的工艺设备、专用自动化机床或专用的自动化生产线和自动车间进行生产。但是应用这些专用生产设备进行生产，生产准备周期长，产品改型不易，因而使产品的开发周期增长。在机械产品中，单件与小批量产品占到70%~80%，这类产品一般都采用通用机床加工，当产品改变时，机床与工艺装备需作相应的变换和调整，而且通用机床的自动化程度不高，基本上由人工操作，难以提高生产效率和保证产品质量。特别是一些曲线、曲面轮廓组成的复杂零件，只能借助靠模和仿形机床，或者借助划线和样板用手工操作的方法来加工，加工精度和生产效率受到很大的限制。

由于数控机床综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型与新型机械结构等方面的技术成果，具有高柔性、高精度与高度自动化的特点，因此采用数控加工手段，解决了机械制造中常规加工技术难以解决甚至无法解决的单间、小批量、特别是复杂型面零件的加工。应用数控加工技术是机械制造业的一次技术革命，使机械制造业的发展进入了一个新的阶段，提高了机械制造业的制造水平，为社会提供了高质量、多品种及高可靠性的机械产品。目前应用数控加工技术的领域已从当初的航空工业 部门逐步扩大到汽车、造船、机床、建筑等民用机械制造业，并已取得巨大的经济效益。

2.2 数控机床的产生背景

20 世纪中叶数控技术和数控机床的诞生标志着生产和控制领域一个崭新时代的来到。

科学技术和社会生产力的迅速发展，对机械产品的质量和生产率提出了越来越高的要求。机械加工工艺过程的自动化成为实现上述要求的最重要措施之一。它不仅能够提高产品质量、提高生产率、降低生产成本，还能够极大地改善生产

者的劳动条件。

为了解决能够实现多品种、小批量产品零件的自动化生产，一种用计算机以数字指令方式控制的数字控制机床便应运而生，而且以惊人的速度向前发展，成为一种灵活的、通用的、能够适应产品频繁改型的“柔性”自动化机床。数字控制（Numerical Control），简称数控（NC），近 20 年来已发展为计算机数控（Computer Numerical Control，简称 CNC）。

数控机床的工作过程是将加工零件的集合信息和工艺信息进行数字化处理，即对所有的操作步骤（如机床的启动或停止、主轴的变速、工件的夹紧或夹松，刀具的选择和交换、切削液的开或关等）和刀具与工件之间的相对位移，以及进给速度等都用数字化的代码表示。

数控机床的诞生在对复杂曲线、型面的加工以及对我国航空工业和军事工业的发展起到了重要的作用。

3 数控加工工艺流程

3.1 数控加工的工艺基础

改变生产对象的形状、尺寸、相对位置和性质等，使其变成成品或半成品的过程，称为工艺过程。工艺过程是生产过程中的主体。

在机械加工工艺过程中，针对零件的结构特点和技术要求，采用不同的加工方法和装备，按照一定的顺序依次进行才能完成由毛坯到零件的转变过程。因此机械加工工艺过程是由一个或若干个顺序排列的工序组成的，而工序又由安装、工位、工步和进给组成。

在数控机床上加工的零件，一般按工序集中原则划分工序。由此，数控加工工序的划分方法有下列几种：

- (1) 按所用刀具划分
- (2) 按安装次数划分
- (3) 按粗、精加工划分
- (4) 按加工部位划分

3.2 数控车削加工工艺

一、数控车削的主要加工对象

数控车削是数控加工中用的最多的加工方法之一。由于数控车床具有加工精度高、能作直线和圆弧插补以及在加工过程中能自动变速的特点，因此，其工艺范围较普通机床宽得多。凡是能在数控车床上装夹的回转体零件都能在数控车床上加工。针对数控车床的特点，下列几种零件最适合数控车削加工：

- (1) 精度要求高的回转体零件
- (2) 要求表面粗糙度值低的重转体零件
- (3) 表面形状复杂的回转体零件
- (4) 带特殊螺纹的回转体零件

二、数控车削加工工艺的制订

制订工艺是数控车削加工的前期工艺准备工作。工艺制订得合理与否，对程序编制、机床的加工效率和零件的加工精度都有重要影响。因此应遵循一般的工艺原则并结合数控车床的特点认真而详细地制订好零件的数控车削加工工艺。其

主要内容有：分析零件图样、确定工件在车床上的装夹方式、各表面的加工顺序和刀具的进给路线以及刀具、夹具和切削用量的选择等。

1. 零件图工艺分析

分析零件图是工艺制订中的首要工作，它主要包括以下内容：

(1) 结构工艺性分析 零件的结构工艺性是指零件对加工方法的适应性，即所设计的零件结构应便于加工成形。

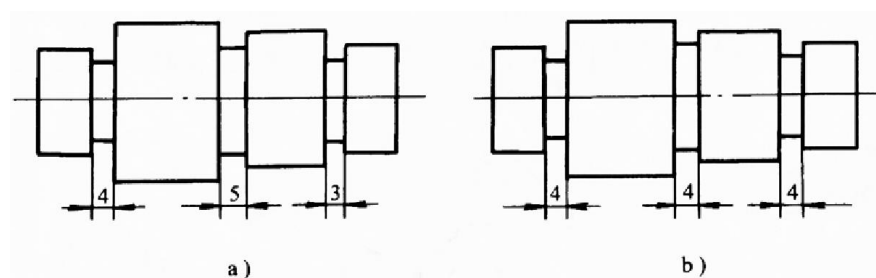


图 3-1 结构工艺性示例

(2) 轮廓集合要素分析 在手工编程时，要计算每个基点坐标，在自动编程时，要对构成零件轮廓的所有几何元素进行定义，因此在分析零件图时，要分析几何元素的给定条件是否充分。

(3) 精度及技术要求分析 对被加工零件的精度及技术要求进行分析，是零件工艺性分析的重要内容。

2. 工序和装夹方式的确定

在数控车床上加工零件，应按工序集中的原则划分工序，在一次安装下尽可能完成大部分甚至全部表面的加工。在批量生产中，常用下列两种方法划分工序：

- (1) 按零件加工表面划分
- (2) 按粗、精加工划分

3. 加工顺序的确定

在分析了零件图样和确定了工序、装夹方式之后，接下来即要确定零件的加工顺序。制订零件车削加工顺序一般遵循下列原则：

- (1) 先粗后精
- (2) 先近后远
- (3) 内外交叉

4. 进给路线的确定

确定进给路线的工作重点，主要用于确定粗加工及空行程的进给路线，因精加工切削过程的进给路线基本上都是沿其零件轮廓顺序进行的。

5. 夹具的选择

为了充分发挥数控机床的高速度、高精度和自动化的效能，还应有相应的夹具进行配合。常用的夹具主要有以下几种：

(1) 三爪自定心卡盘

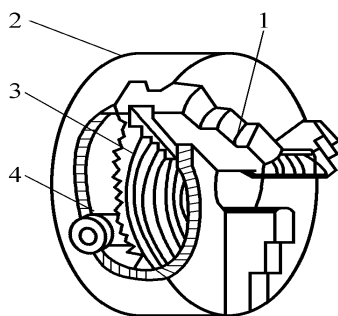


图 3-2 三爪自定心卡盘示例

(2) 四爪单动卡盘

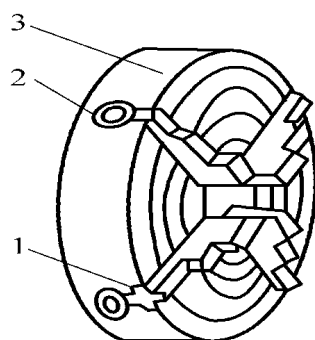


图 3-3 四爪单动卡盘示例

(3) 软三爪卡盘

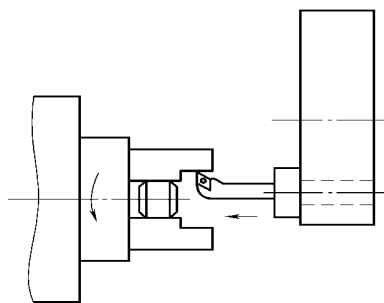


图 3-4 软三爪卡盘示例

(4) 自动夹紧拨动卡盘

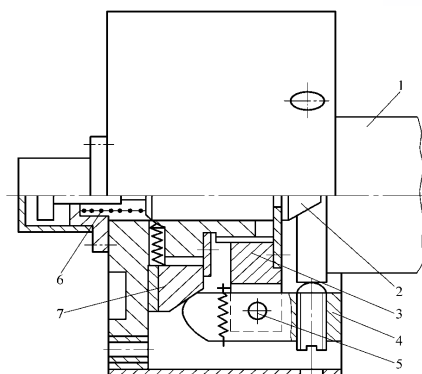


图 3-5 自动夹紧拨动卡盘示例

(5) 动力卡盘

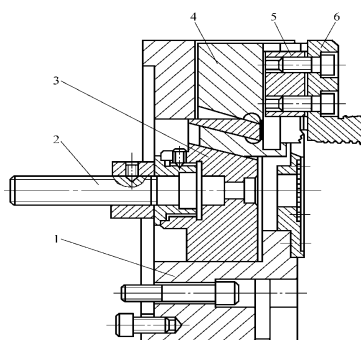


图 3-6 动力卡盘示例

(6) 高速卡盘

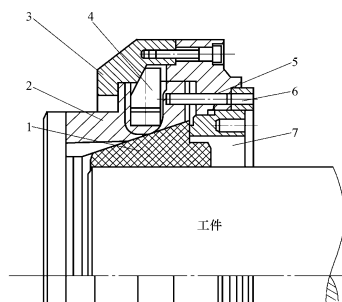


图 3-7 高速卡盘示例

(7) 弹性自定心夹具

6. 刀具的选择

刀具的选择是数控加工工艺设计中的重要内容之一。刀具选择合理与否不仅影响机床的加工效率，而且还直接影响加工质量。

由于工件材料、生产批量、加工精度以及机床类型、工艺方案的不同，车刀

的种类也异常繁多。根据刀体联接固定方式的不同,车刀主要可分为焊接式与机械夹固式两大类。

7. 切削用量的选择

数控车床加工中的切削用量包括:背吃刀量、主轴转速或切削速度(用于恒线速切削)、进给速度或进给量。上述切削用量应在机床说明书给定的允许范围内选取。

3.3 数控铣削加工工艺

一、数控铣削的主要加工对象

数控铣削是机械加工中最常用和最主要的数控加工方法之一,它除了能铣削普通铣床所能铣削的各种零件表面外,还能铣削普通铣床不能铣削的需2~5坐标联动的各种平面轮廓和立体轮廓。根据数控铣床的特点,从铣削加工角度来考虑,适合数控铣削的主要加工对象有以下几类:

(1) 平面类零件

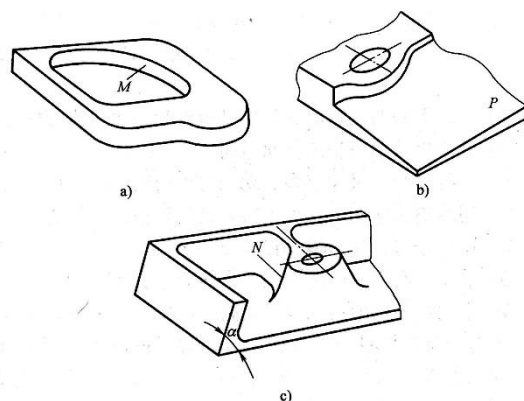


图 3-8 平面类零件

(2) 变斜角类零件

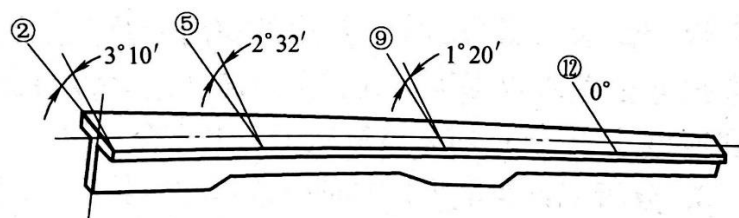


图 3-9 变斜角零件

(3) 曲面类零件

二、数控铣削加工工艺的制订

制订零件的数控铣削加工工艺是数控铣削加工的一项首要工作。数控铣削加工工艺制订的合理与否，直接影响到零件的加工质量、生产率和加工成本。根据数控加工实践，制订数控铣削加工工艺要解决的主要问题有以下几个方面：

1. 零件图的工艺性分析

制订零件的数控铣削加工工艺时，首先要对零件图进行工艺分析，其主要内容包括：

- (1) 数控铣床加工内容的选择
- (2) 零件结构工艺性分析
- (3) 零件毛胚的工艺性分析
- (4) 加工方案分析

2. 装夹方案的确定

(1) 定位基准的选择

选择定位基准时，应注意减少装夹次数，尽量做到在一次安装中能把零件上所有要加工的表面都加工出来。

(2) 夹具的选择

数控铣床可以加工形状复杂的零件，但数控铣床上共建装夹方法与普通铣床一样，所使用的夹具往往并不很复杂，只要求有简单的定位、夹紧机构就可以了。但要将加工部分敞开，不能因装夹工件而影响进给和切削加工。常用的夹具主要有以下几种：

1) 机床用平口虎钳

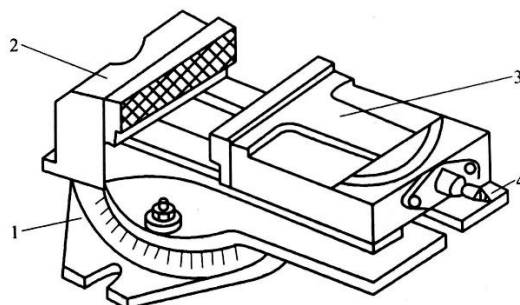


图 3-10 平口钳

2) 万能分度头

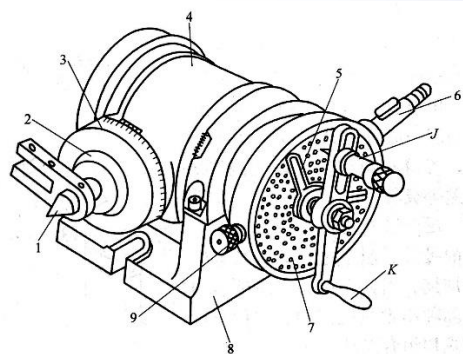


图 3-11 万能分度头

3) 压板

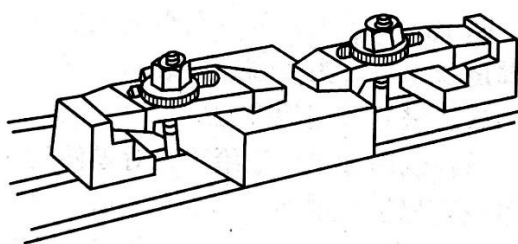


图 3-12 用压板装夹工作

4) 组合夹具

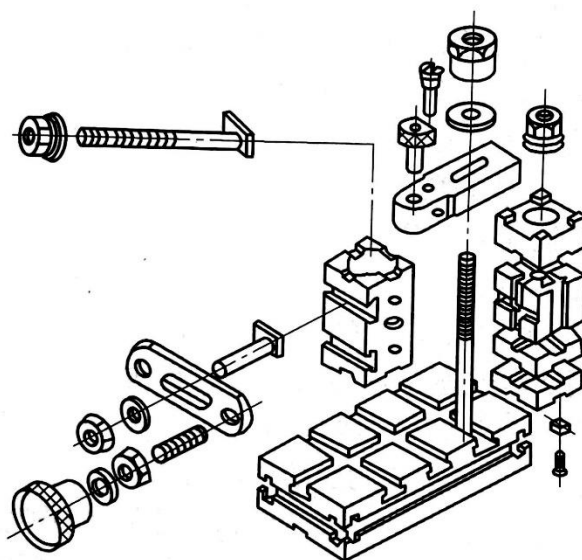


图 3-13 槽系组合夹具

5) 真空夹具

3. 进给路线的确定

数控铣削加工中进给路线对零件的加工精度和表面质量有直接的影响, 因此, 确定好进给路线是保证铣削加工精度和表面质量的工艺措施之一。进给路线的确

定与工件表面状况、要求的零件表面质量、机床进给机构的间隙、刀具寿命以及零件轮廓形状等有关。以下是针对铣削方式和常见的几种轮廓形状进给路线的确定问题：

- (1) 顺铣和逆铣的选择
- (2) 铣削外轮廓的进给路线
- (3) 铣削内轮廓的进给路线
- (4) 铣削内槽的进给路线
- (5) 铣削曲面的进给路线

4. 刀具的选择

- (1) 对刀具的基本要求

- 1) 铣刀刚性要好
- 2) 铣刀的寿命要高

- (2) 常用铣刀的种类

- 1) 面铣刀 圆周表面和端面上都有切削刃，端部切削刃为副切削刃。

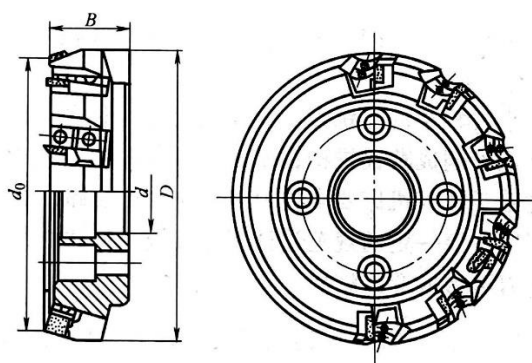


图 3-14 硬质合金面铣刀

- 2) 立铣刀 圆柱表面和端面上都有切削刃，它们可同时进行切削，也可单独进行切削。

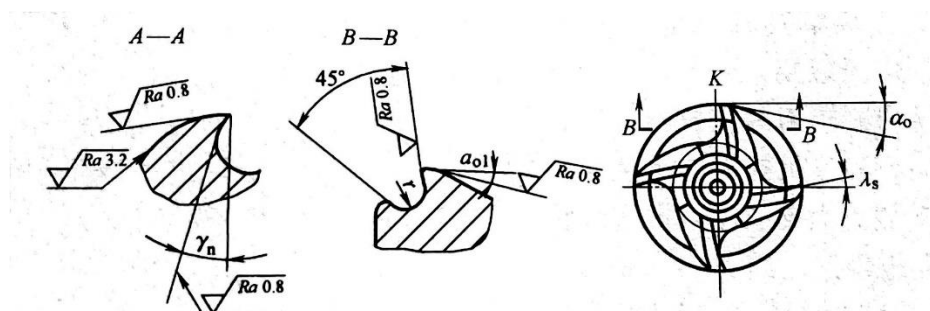


图 3-15 立铣刀

3) 模具铣刀 由立铣刀发展而成,可分为圆锥形立铣刀、圆柱形球头立铣刀和圆锥形球头立铣刀三种,其柄部有直柄、削平型直柄和莫氏锥柄。

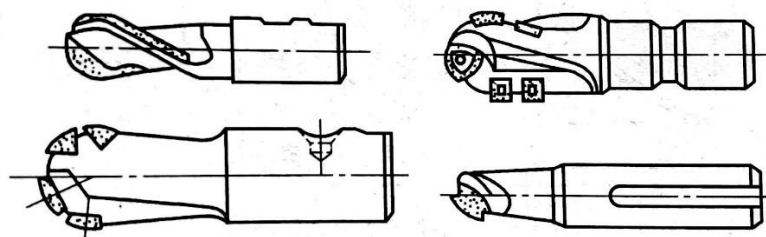


图 3-16 硬质合金模具铣刀

4) 键槽铣刀 有两个刀齿,圆柱面和端面都有切削刃,端面刃延至中心,既像立铣刀,又像钻头。

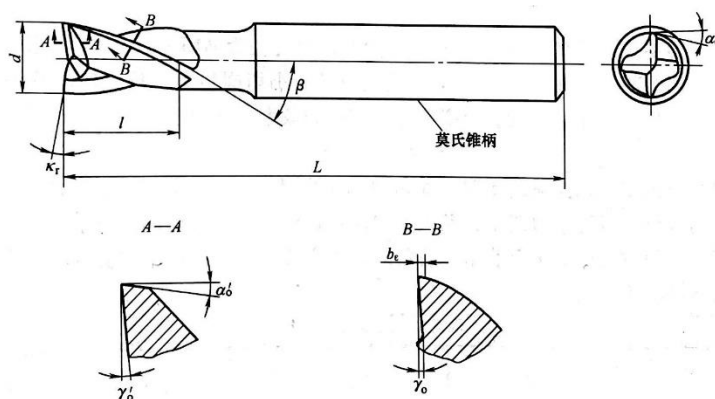


图 3-17 键槽铣刀

5) 鼓形铣刀 切削刃分布在半径为 R 的圆弧面上,端面无切削刃。

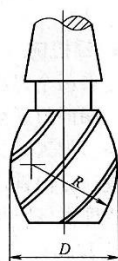


图 3-18 鼓形铣刀

(3) 铣刀的选择

- 1) 铣刀类型的选择
- 2) 铣刀参数的选择
5. 切削用量的选择

切削用量包括:切削速度、进给速度、背吃刀量和侧吃刀量。

从刀具寿命出发，切削用量的选择方法是：先选取背吃刀量或侧吃刀量，其次确定进给速度，最后确定切削速度。

3.4 加工中心的加工工艺

一、加工中心的工艺特点

加工中心是一种功能较全的数控机床，它集铣削、钻削、铰削、镗削、攻螺纹和切螺纹于一身，使其具有多种工艺手段，与普通机床加工相比，加工中心具有许多显著的工艺特点。

- (1) 加工精度高
- (2) 精度稳定
- (3) 效率高
- (4) 表面质量好
- (5) 软件适应性大

二、加工中心的主要加工对象

针对加工中心的工艺特点，加工中心适宜于加工形状复杂、加工内容多、要求较高、需用多种类型的普通机床和众多的工艺装备，且经多次装夹和调整才能完成加工的零件。其主要的加工对象有以下几种。

- (1) 既有平面又有孔系的零件

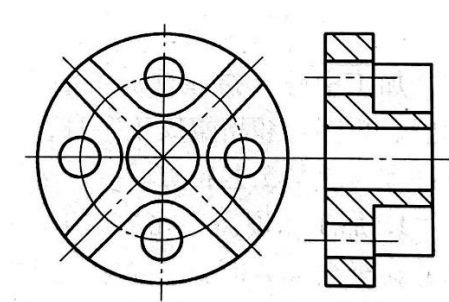


图 3-19 十字盘

- (2) 结构形状复杂、普通机床难加工的零件

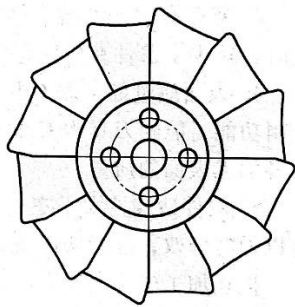


图 3-20 轴向压缩机涡轮

(3) 外形不规则的异形零件

(4) 周期性投产的零件

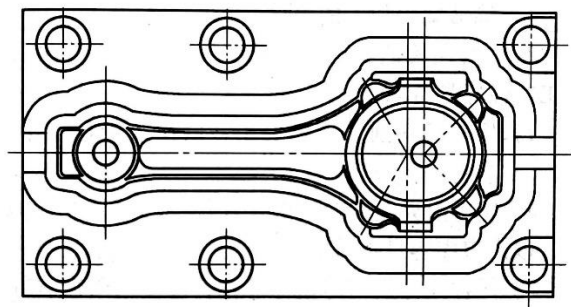


图 3-21 连杆锻压模简图

(5) 加工精度要求较高的中小批量零件

(6) 新产品试制中的零件

三、加工中心加工工艺方案的制订

制订加工中心加工工艺方案是数控加工中的一项重要工作，其主要内容包括：分析零件的工艺性、选择加工中心及设计零件的加工工艺等。

1. 零件的工艺分析

零件的工艺分析是制订加工中心加工工艺的首要工作。其任务是分析零件图的完整性、正确性和技术要求、选择加工内容、分析零件的结构工艺性和定位基准等。

(1) 加工中心加工内容的选择

(2) 零件结构的工艺性分析

(3) 定位基准分析

2. 加工中心的选用

任何一台加工中心都有一定规格、精度、加工范围和适用范围。卧式加工中

心适用于需多工位加工和位置精度要求较高的零件。立式加工中心适用于需单工位加工的零件。

（1）加工中心规格的选择

选择加工中心的规格主要考虑：工作台的大小、坐标行程、坐标数量和主电动机功率等。

（2）加工中心精度的选择

根据零件关键部位的加工精度选择加工中心的精度等级。

（3）加工中心功能的选择

选择加工中心的功能主要考虑以下几项功能：

- 1) 数控系统功能
- 2) 坐标轴控制功能
- 3) 工作台自动分度功能

（4）刀库容量的选择

通常根据零件的工艺分析，算出工件一次安装所需刀具数、来确定刀库容量。

（5）刀柄的选择

1) 刀柄 刀柄是机床主轴与刀具置渐的连接工具。

2) 工具系统 由于在加工中心上要适应多种形式零件不同部位的加工，故刀具装夹部分的结构、形式、尺寸也是多种多样的。

3. 零件的加工工艺设计

设计加工中心加工的零件的工艺主要从精度和效率两方面考虑。在保证零件质量的前提下，要充分发挥机床的机工效率。工艺设计的内容主要包括以下几个方面：

（1）加工方法的选择

加工中心加工零件的髒满不外乎平面、平面轮廓、曲面、孔和螺纹等。

（2）加工阶段的划分

在加工中心上加工的零件，其加工阶段的划分主要根据零件是否已经过粗加工、加工质量要求的高低、毛坯质量的高低以及零件批量的大小等因素确定。

（3）加工顺序的安排

在加工中心上加工零件，一般有多个工步，使用多把刀具，因此加工顺序安

排得是否合理，直接影响到加工精度、加工效率、刀具数量和经济效益。在安排加工顺序时同样要遵循“基面先行”、“先粗后精”、“先主后次”及“先面后孔”的一般工艺原则。

（4）装夹方案的确定和夹具的选择

在零件的工艺中，已确定了零件在加工中心上加工的部位和加工时用的定位基准，因此在确定装夹方案时，只需根据已选定的加工表面和定位基准确定工件的定位夹紧方式，并选择合适的夹具。

（5）刀具的选择

加工中心使用的刀具由刀具和刀柄两部分组成。刃具有面加工用的各种铣刀和孔加工用的钻头、扩孔钻、镗刀、铰刀及丝锥等。刀柄要满足机床主轴的自动松开和拉紧定位，并能准确地安装各种切削刀具和适应换刀机械手的夹持等。

（6）进给路线的确定

加工中心上刀具的进给路线可分为孔加工进给路线和铣削加工进给路线。

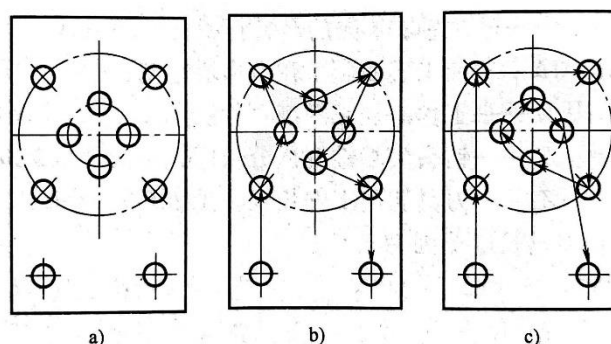


图 3-22 最短进给路线设计示例

3.5 数控线切割加工工艺

数控线切割加工也称数控电火花线切割加工，它是在电火花成形加工基础上发展起来的，因其由数控装置控制机床的运动，采用线状电极通过火花放电对工件进行切割，故称为数控电火花线切割加工，简称数控线切割加工。

一、数控线切割加工原理、特点及应用

1. 数控线切割加工原理

数控线切割加工的基本原理是利用移动的细金属导线（铜丝或钼丝等）作负电极对导电或半导电材料的工件（作为正电极）进行脉冲火花放电而进行所要求

的尺寸加工。

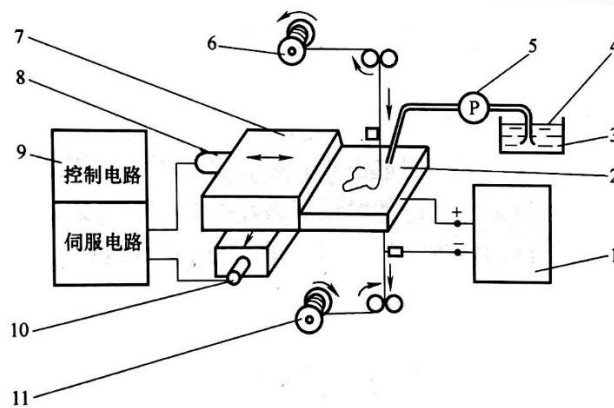


图 3-23 数控线切割加工原理图

2. 数控线切割加工的特点

- 1) 它是以金属线为工具电极，大大降低了成形工具电极的设计和制造费用，缩短了生产准备时间，加工周期短
- 2) 适合于小批量零件和试制品的加工
- 3) 适宜于加工低刚度工件及细小零件
- 4) 材料的利用率很高，能有效地节约
- 5) 对加工精度的影响比较小
- 6) 依靠数控系统的线径偏移补偿功能，使冲模加工的凹凸模间隙可以任意调节
- 7) 采用乳化液或去离子水的工作液，不必担心发生火灾，可以昼夜无人值守连续加工
- 8) 采用四轴联动控制时，可加工上、下面异形体，形状扭曲的曲面体，变锥度和球形体等零件

3. 数控线切割加工的应用

数控线切割加工为新产品试制、精密零件及模具加工开辟了一条新的途径，主要应用于以下几个方面：

- (1) 加工模具
- (2) 加工电火花成形加工用的电极
- (3) 加工零件

二、数控线切割加工工艺的制订

数控线切割加工，一般作为工件加工的最后一道工序，使工件达到图样规定的尺寸、形位精度和表面粗糙度。以下是数控线切割加工中的有关工艺技术：

1. 零件图的工艺分析

主要分析零件的凹角和尖角是否符合线切割加工的工艺条件，零件的加工精度、表面粗糙度是否在线切割加工所能达到的经济精度范围内。

(1) 凹角和尖角的尺寸分析

(2) 表面粗糙度及加工精度分析

2. 工艺准备

工艺准备主要包括线电极准备、工件准备和工作液配制。

(1) 线电极准备

1) 线电极材料的准备

2) 线电极直径的选择

(2) 工件准备

1) 工件材料的选定和处理

2) 工件加工基准的选择

3) 穿丝孔的确定 切割凸模类零件，切割凹模、孔类零件，穿丝孔大小

4) 切割路线的确定

线切割加工工艺中，切割起始点和切割路线的确定合理与否，将影响工件变形的大小，从而影响加工精度。

切割孔类零件时，为了减少变形，可采用二次切割法。第一次粗加工型孔，各边留余量 $0.1 \sim 0.5\text{mm}$ ，以补偿材料被切割后由于内应力重新分布而产生的变形。第二次切割为精加工。这样可以达到比较满意的效果。

5) 接合突尖的去掉方法

由于线电极的直径和放电间隙的关系，在工件切割面的交界处，会出现一个高出加工表面的高线条，称之为突尖。以下是几种去除突尖的方法：利用拐角的方法、切缝中插金属板的方法、用多次切割的方法

(3) 工作液的准备

根据线切割机床的类型和加工对象，选择工作液的种类、浓度及导电率等。

3. 工件的装夹和位置校正

(1) 对工件装夹的基本要求

- 1) 工件的装夹基准面应清洁无毛刺
- 2) 夹具精度要高
- 3) 装夹工件的位置要有利于工件的找正

(2) 工件的装夹方式

1) 悬臂支撑方式

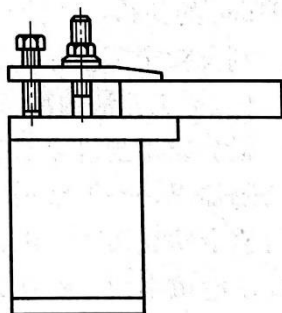


图 3-24 悬臂支撑方式

2) 两端支撑方式

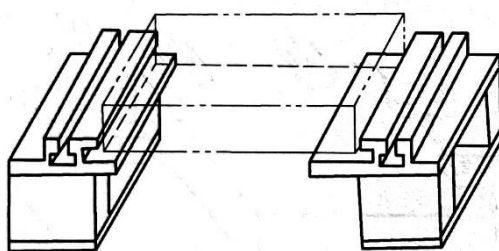


图 3-25 两端支撑方式

3) 桥式支撑方式

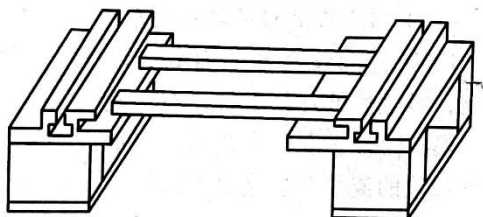


图 3-26 桥式支撑方式

4) 板式支撑方式

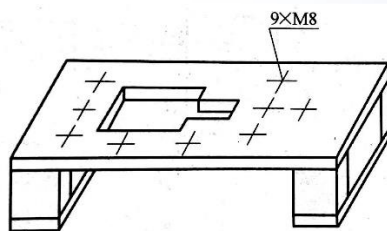


图 3-27 板式支撑方式

5) 复式支撑方式

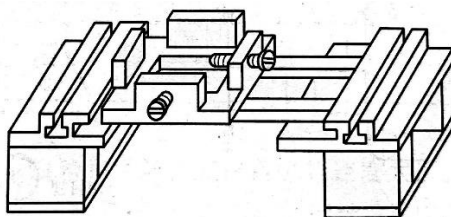


图 3-28 复式支撑方式

(3) 工件位置的校正方法

拉表法，划线法，固定基面靠定法

(4) 线电极的位置找正

在线切割前，应确定线电极相对于工件基准面或基准孔的坐标位置。

4. 加工参数的选择

(1) 脉冲电源参数的选择

空载电压，放电电容，脉冲宽度，脉冲间隔，峰值电流

(2) 速度参数的选择

进给速度，走丝速度

(3) 工作液参数的选择

工作液的电阻率，工作液喷嘴的流量和压力

(4) 线径偏移量的确定

正式加工前，按照确定的加工条件，切一个与工件相同材料、相同厚度的正方形，测量尺寸，确定线径偏移量。

(5) 多次线切割加工参数的选择

多次切割也叫做二次切割加工，它是在对工件进行第一次切割之后，利用适当的偏移量或更精的加工规准，使线电极沿原切割轨迹逆向或顺向再次对工件进行精修的切割加工。

4 数控加工技术的相关设备

4.1 常见的数控车床

一、按数控系统的功能分类

1. 经济型数控车床
2. 全功能型数控车床 一般采用闭环或半闭环控制系统，具有高强度、高精度和高效率等特点。

3. 车削中心

4. FMC 车床

二、按主轴的配置形式分类

1. 卧式数控车床 主轴轴线处于水平位置的数控车床



图 4-1 卧式数控车床

2. 立式数控车床 主轴轴线处于垂直位置的数控车床



图 4-2 立式数控车床

三、按数控系统控制的轴数分类

1. 两轴控制的数控车床 机床上只有一个回转刀架，可实现两坐标轴控制

2. 四轴控制的数控车床 机床上有两个独立的回转刀架,可实现四坐标控制

4.2 常见的数控铣床

一、立式数控铣床 8.10



图 4-3 立式数控铣床

二、卧式数控铣床



图 4-4 卧式数控铣床

三、立、卧两用数控铣床



图 4-5 立、卧两用数控铣床

4.3 常见的加工中心

一、按照加工中心布局方式分类

1. 立式加工中心



图 4-6 立式加工中心

2. 卧式加工中心

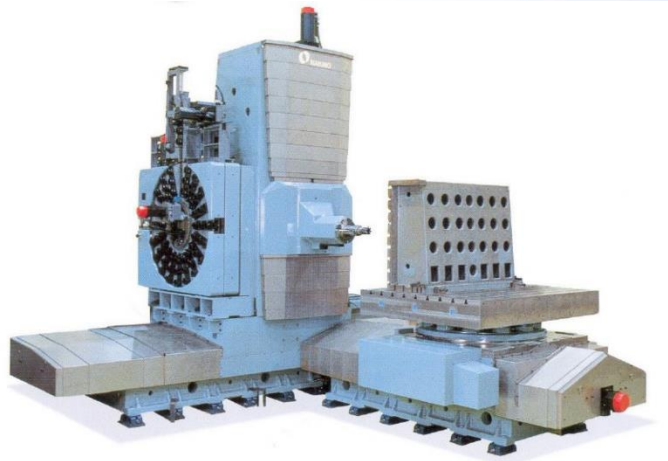


图 4-7 卧式加工中心

3. 龙门式加工中心

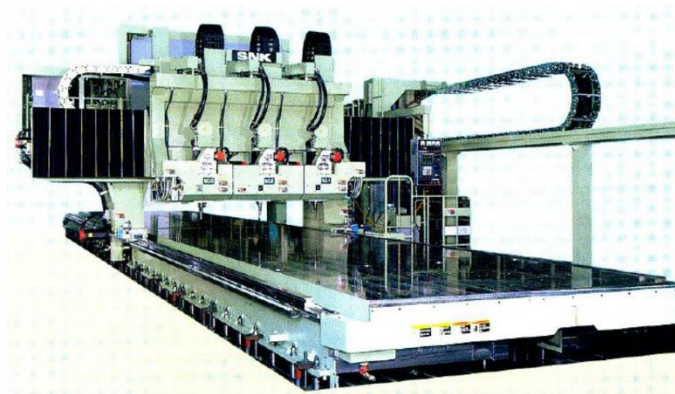


图 4-8 龙门式加工中心

4. 万能加工中心（复合加工中心）

二、按换刀形式分类

1. 带刀库、机械手的加工中心
2. 无机械手的加工中心
3. 转塔刀库式加工中心

三、按加工中心机床的功用分类

1. 镗铣加工中心机床
2. 钻削加工中心机床
3. 车削加工中心机床

四、按数控系统分类

有 2 坐标加工中心、3 坐标加工中心和多坐标加工中心；有半闭环加工中心

和全闭环加工中心

五、按精度分类

可分为普通加工中心和精密加工中心

4.4 常见的电火花线切割加工机床

一、高速走丝电火花线切割机床

(WEDM-HS)这类机床的电极丝进行高速往复运动,一般走丝速度为 $8\sim 12\text{m/s}$ 。



5

图 4-9 立柱式快走丝电火花线切割机床

二、低速走丝电火花线切割机床

(WEDM-LS)这类机床的电极丝进行低速单项运动,一般走丝速度为 0.2m/s 。



图 4-10 立式慢走丝电火花线切割机床

5 数控加工技术的适用范围

5.1 适合采用数控加工技术的零件

一般来说，数控机床特别适用于加工零件较复杂、精度要求高、产品更新频繁、生产周期要求短的场所。

不同类型的数控机床有着不同的用途，在选用数控机床之前应对其类型、规格、性能、特点、用途和应用范围有所了解，才能选择最适合加工零件的数控机床，根据数控加工的特点，和国内外大量应用实践，数控机床通常最适合加工具有以下特点的零件。

1. 多品种、小批量生产的零件或新产品试制中的零件。
2. 形状复杂，加工精度要求高，制造精度高，对刀精确，能方便的进行尺寸补偿。
3. 表面粗糙度值小的零件。
4. 轮廓形状复杂的零件。
5. 具有难测量、难控制进给、难控制尺寸的不开敞内腔的壳体或盒型零件。
6. 必须在一次装夹中完成铣、镗、铹、铰或攻丝等多工序的零件。
7. 价格昂贵，加工中不允许报废的关键零件。
8. 需要最短生产周期的急需操作

5.2 多种数控机床的适用范围

一、数控车床

数控车床主要用来加工轴类零件的内外圆柱面、圆锥面、螺纹表面、成形回转体面等。对于盘类零件可以进行钻孔、扩孔、铰孔、镗孔等。机床还可以完成车端面、切槽、倒角等加工。

二、数控铣床

适用于加工三维复杂曲面，在汽车、航空航天、模具等行业被广泛采用。可分为数控立式铣床、数控卧式铣床、数控仿形铣床等。

三、加工中心

一般认为带有自动刀具交换装置（ATC）的数控铣床，称为加工中心。可以进行铣、镗、钻、扩、铰、攻丝等多种工序的加工。不能包括磨削功能，因为微

细的磨粒可能进入机床导轨，从而破坏机床的精度。而磨床上有特殊的保护措施。加工中心可分为立式加工中心、卧式加工中心。立式的主轴是垂直方向的，卧式的主轴是水平方向的。

四、数控电火花成形机床

特种加工方法，利用两个不同极性的电极在绝缘体中产生放电现象，去除材料进而完成加工，适用于形状复杂的模具、难加工材料。

五、数控线切割机床

原理与电火花成形机床一样，就是电极是电极丝，加工一般是去离子水。

6 数控加工技术产出的典型产品

6.1 数控加工在飞机制造中的典型应用

一、飞机零件的结构特点

典型的飞机零件的结构特点是薄壁结构，形状复杂，外形变斜角变化大，外形多为双曲面，要求成形精确。为了减轻飞机重量，增加飞机的机动性和增加有效载荷和航程，进行轻量化设计，广泛采用新型轻质材料。

为了提高零件强度和工作可靠性，主要采用整体毛坯件和整体薄壁结构。现在大量采用铝合金、钛合金、耐高温合金、高强度钢、复合材料等。结构复杂的薄壁件、蜂窝件不仅形状复杂，而且孔、空穴、沟槽、加强筋等多，工艺刚性较差。

加工飞机机身典型零件所需主要设备：

- (1) 三坐标加工中心，如大型龙门立式加工中心；
- (2) 五轴联动加工中心，如大型龙门立式加工中心，应配备 A/B 摆角铣头或 A/C 摆角铣头；
- (3) 从发展考虑，需要大型龙门式双主轴五坐标加工中心，工作台尺寸 $5\text{m} \times 20\text{m}$ ，用于加工梁类零件；
- (4) 由于整体铝合金件切削加工去除量大，为便于排屑，最好需要工作台可以翻转 90° 的卧式加工中心，目前，国内尚无这种卧式加工中心；

二、飞机制造中需要用机床加工的典型零件

主要有飞机机身结构件和发动机的关键零件两部分：

1. 机身结构件典型零件

飞机机身结构件的典型零件有梁、筋、肋板、框、壁板、接头、滑轨等类零件。以扁平件、细长件、多腔件和超薄壁隔框结构件为主。毛坯为板材、锻件和铝合金挤压型材。材料利用率仅为 5%-10% 左右，原材料去除量大。目前，国内飞机零件，90% 以上为铝合金件，少量为不锈钢和钛合金钢，且整体结构件越来越多，应用复合材料是今后的发展方向。

2. 飞机发动机的关键件

飞机发动机的关键件有机匣、各类叶片和整体叶盘：

(1) 机匣加工

机匣材料是一种难加工的耐高温的高强度钛合金材料。机匣又是薄壁、弱刚性结构,型面复杂,精度要求高,加工难度大。机匣是大型零件,一台推力为 15000 公斤航空发动机机匣直径为 $\phi 800\text{mm}$ 。大飞机的大型风扇机匣外形尺寸 $\phi 1823.5\text{mm} \times 546\text{mm}$,最薄处壁厚 3mm。所以,机匣加工需要中、大型多功能、高精度数控机床。如加工直径为 $\phi 2000\text{mm}$ 的数控立车和精密数控立车;工作台尺寸为 $2400\text{mm} \times 5000\text{mm}$ 的龙门式五轴联动加工中心,需具备双工位、在线测量和仿真功能,刀库容量 60 把刀左右,数控系统具有高级编程功能,工作台 $3000\text{mm} \times 5000\text{mm}$ 的龙门式数控镗铣床。

(2) 叶片加工

航空发动机的叶片材料为耐高温的钛合金材料,需用五轴联动加工中心,五轴高速龙门铣等加工叶片形面。叶根榫头的加工需用拉床和缓进给强力磨床,并希望缓进给强力磨床具有换砂轮功能和滚轮修砂轮装置,还需要有在线测量、程序调整和自动补偿功能。

叶片形面用电解加工可大大提高加工效率,还需用数控六轴砂带抛光设备抛光。希望有叶片形面检测设备。

(3) 整体叶盘加工

整体叶盘是薄壁盘类零件,叶盘圆周上有装叶片的榫槽。直槽可用拉削加工和磨削加工。圆弧形榫槽可用铣削和成形磨加工,但圆弧形榫槽的检测困难。叶环和叶盘的加工需要数控卧车、精密数控立车。

加工发动机关键零件所需的主要设备有:

- (1) 带 A/B 摆角铣头或 A/C 摆角铣头的五轴联动加工中心;
- (2) 五坐标叶片铣床;
- (3) 整体叶盘高效加工中心;
- (4) 工作台 $3000\text{mm} \times 5000\text{mm}$ 数控龙门镗铣床;
- (5) 精密数控立式车削中心;
- (6) 数控立式车床;
- (7) 精密数控车床;

7 数控加工技术的优缺点

7.1 数控加工技术的优点

数控加工技术的优点主要体现在以下几个方面：

第一、数控加工技术生产效率高。不仅可省去划线、中间检验等工作，而且由于其具有的自动换刀功能，通常还可以省去复杂的工装，减少对加工零件的安装、调整及多次对刀等相对复杂而繁琐的工作。加工中心能选用最佳工艺线路和切削用量，有效地减少加工中的辅助时间，从而提高生产效率。

第二、数控加工技术加工精度高、加工质量稳定。加工中心具有的自动换刀功能，可以非常有效地减少工件的装夹次数，降低或消除因多次装夹带来的定位误差，提高加工精度。当零件各部位的位置精度要求高时，加工中心具有的自动换刀功能，可以非常方便而有效地减少定位与对刀误差，能在一次装夹与一次性对刀的过程中完成各个部位的加工，保证了各加工部位的位置精度要求。

第三、数控加工技术适应性强、灵活性好。加工中心上可方便地实现对箱体类零件进行钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、攻螺纹、铣端面 and 挖槽等多道不同的加工工序，因此能加工轮廓形状特别复杂或难以控制尺寸的零件，如风扇叶片、汽车发动机箱体等零件。能加工复杂曲线类零件以及非常复杂的三维空间曲面类零件。

第四、能提高经济效益，一台数控加工机床，集中了铣床、钻床、攻牙机等多种设备的功能，它可以减少企业机床的数量，因一人可同时操作多台加工中心，

减少了操作工人，人工成本相应减少；另外拥有数控加工中心，也是企业实力的具体表现，会促成更多业务量的增加，从而提高经济效益。

7.2 数控加工技术的缺点

任何事物都具有两面性，数控加工机床也存在不足之处，主要表现在：加工中心配套的夹具刚度、加工中心自身的刚度和精度保持性要求非常高；加工中心技术复杂，对使用、维修、管理要求较高；加工中心一次性投资大，需配置其他辅助装置，如数控刀具系统。

8 数控加工技术的国内外发展现状

8.1 数控加工技术的国内发展现状

近年来,我国数控加工技术发展迅速,国产数控车已完全能满足国内市场需要。高性能的卧式车削中心和车铣复合中心,通过合资、引进技术和自主开发,某些产品已能满足部分国内高端用户要求。但是,卧式车铣复合加工中心、带Y轴或C轴的卧式车削中心双主轴卧式车削中心和高精度卧式车削中心仍然主要依靠进口。

国产立式加工中心在技术上比较成熟,技术性能与国际水平接近,产家较多并具有一定批量,得到了国内用户认可。由于在性价比上具有优势,保质期过后维修服务费用较低,基本可以满足国内市场的需要。当前的关键是大力提高产品的质量和可靠性,加强售前和售后服务。

国产卧式加工中心虽能满足市场部分需要,但在精度和性能上与国外同产品相比还有一定差距。国外卧式加工中心大多都装有温度补偿系统,定位精度较高,且精度保持性好。因此,近年卧式加工中心进口较多。在高速加工中心、五轴加工中心面,国内各企业都开发出不少新产品。但是多数产品还没有经过严格的生产考验,难以取得用户的普遍认可,仅个别品种进入企业生产现场。关键在于需要经过不同类型用户的生产考核,并加以不断改进和完善。高精度(亚微米级和纳米级)加工中心我国基本上处于空白状态,绝大部分依赖国外进口。

国产数控齿轮机床的性能已与国际水平大体相当,除个别高精度数控齿轮加工机床(DIN 5~6级)和高精度数控齿轮磨床(DIN 2~3级)仍需进口外,已能大部分替代进口产品。

电加工机床,除精密电加工机床外,能满足市场需要。数控电加工机床在加工精度、加工表面粗糙度、加工方式、软件等方面还有差距。

国产数控磨床基本上可以满足国内市场需要。但是,数控磨床中某些高精度的、高效的、复合的数控磨床还要依赖进口,如近年来数控精密万能外圆磨床、数控精密成形平面磨床、数控曲轴磨床、数控凸轮轴磨床、大型数控外圆磨床和各种数控高效专用磨床等产品进口较多。

国产数控重型金切机床在价格上具有很大优势,售价仅为国外同类产品的一半左右,通过近几年的自主开发和实际生产应用和考核,除个别超重型的、多轴控

制的、精密的国内还没有商品外,多数已得到国内发电、冶金、矿山等设备制造企业的认可。

8.2 我国数控加工技术与国外的差异

1、经营理念的差距:国内某些企业的“市场导向”观念是短视的、狭隘的,仅仅局限于产品的销路好坏,简单地卖产品,所谓的售后服务就是修机床,以客户为中心、聚焦可和需求,提供解决的方案,为客户创造价值,从产品竞争转向服务竞争还没有成为企业的核心经营理念,特别是对高端客户的需求,国内机床往往所供非所需,所需不能供,目前情况虽有所改善,单仍然没有从根本上改变。

2、关键技术的差距:与机床制造强国相较,我国数控机床在结构、技术水平、创新和研发能力等方面都还存在明显的差距,基础技术和共性技术尚未完全掌握,聚焦客户需求,研发个性化的产品,开发专门化的数控机床,为用户提供全面解决方案的能力薄弱。

3、发展战略的差距:国内企业在制定发展战略是往往是以开发某种产品成为主线,大多数是一种跟随和模仿外国领先企业产品的策略,有竞争力的企业应该将视线越过竞争对手而转向客户的隐现和潜在需求,跨越现有的竞争边界,从既定市场结构下的定位选择向市场改变结构转型,引导市场是一种积极主动的战略,其特征是以自主原创的新技术,新产品引导并满足市场不断发展的需求,提升客户的技术水平,为客户追求利润最大化。为自身开拓新的利润空间,将改变市场的结构,向市场提供超前的新变化,使用新产品,受惠于新产品。

9 数控加工技术的研究热点

9.1 高档数控机床成为数控加工技术的重要地位

机床作为当前机械加工产业的主要设备，其技术发展已经成为国内机械加工产业的发展标志。数控机床是制造装备业的工作母机，是先进的生产技术和军工现代化的战略装备。

高档数控机床是指具有高速、精密、智能、复合、多轴联动、网络通信等功能的数字化数控机床系统。高档数控机床作为世界先进机床设备的代表，其发展象征着国家目前的机床制造业占全世界机床产业发展的先进阶段，因此国际上把五轴联动数控机床等高档机床技术作为一个国家工业化的重要标志。

高档数控机床在传统数控机床的基础上，能完成一个自动化生产线的工作效率，是科技速度发展的产物，而对于国家来讲这是机床制造行业本质上的一种进步。高档数控机床集多种高端技术于一体，应用于复杂的曲面和自动化加工，在航空航天、船舶、机械制造、高精密仪器、军工、医疗器械产业等多种领域的设备制造业有着非常紧密的关系。

《中国制造“2025”》将数控机床和基础制造装备列为“加快突破的战略必争领域”，其中提出要加强前瞻部署和关键技术突破，积极谋划抢占未来科技和产业竞争制造点，提高国际分工层次和话语权。

创新离不开人才，迈向机床强国更需要一代人的艰苦奋斗。高端人才多，尤其是缺少高端数控机床设计、数控系统和功能部件研发的领军人才，以及缺少高级技工和缺少具有国际化视野的复合型管理人才。高端人才不足，已成为制约我国数控机床产业快速、可持续发展的深层次原因。

参考文献

- [1] 李华, 等. 机械制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [2] 李云, 等. 机械制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [3] 卢存伟, 等. 电火花加工工艺学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994
- [4] 徐宏海, 等. 数控加工工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008
- [5] 周晓宏, 等. 数控加工工艺与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008
- [6] 于杰, 等. 数控加工工艺与编程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009
- [7] 田春霞, 等. 数控加工工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [8] 吴祖育, 秦鹏飞, 等. 数控机床(第二版). 上海: 上海科技出版社, 1990



Thanks For Your Watching

**基于“中国制造 2025”中
数控加工技术的研究**

——先进制造技术中的数控加工工艺