

校企合作双元开发“互联网+”创新型教材
高等职业本科教育智能制造技术“十四五”新形态教材

数控车铣加工工艺与编程

(智 媒 体 版)

主 编 魏 梅 安惠玲 刘 星



校企合作



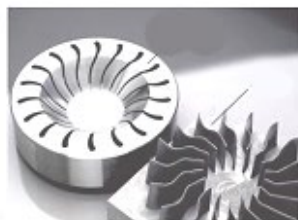
新形态一体化教材



微课



课件



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

数控车铣加工工艺与编程：智媒体版 / 魏梅，安惠玲，刘星主编。—成都：西南交通大学出版社，2021.8
ISBN 978-7-5643-8189-9

数... 魏... 安... 刘... 数控机
床 - 车床 - 加工工艺 - 高等职业教育 - 教材 数控机床 -
铣床 - 加工工艺 - 高等职业教育 - 教材 . TG519.1
TG547

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 159421 号

Shukong Chexi Jiagong Gongyi yu Biancheng (Zhimeiti Ban)

数控车铣加工工艺与编程 (智媒体版)

主编 魏梅 安惠玲 刘星

责任编辑 李华宇

封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都中永印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 13.25

字数 328 千

版次 2021 年 8 月第 1 版

印次 2021 年 8 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-8189-9

定价 38.00 元

课件咨询电话：028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562



前言 PREFACE

随着我国装备制造业的迅猛发展,数控技术及装备得到广泛应用,企业对数控技能人才提出了更高的要求。本书在编写过程中,遵从“淡化理论,够用为度,培养技能,贴合实际”的编写原则,从高等职业教育的实际出发,以培养高端技能型人才为目的,在理论上以“必需、够用”为度,加强职业培养的针对性和技术的实用性,突出人才创新素质和创新能力的培养,着重介绍数控加工工艺、数控加工定位安装及数控刀具、数控程序编制和仿真软件运用等相关知识。为了培养学生的创新精神,提高技能训练力度,本书的实例大部分来源于生产实际和技能鉴定考题,同时还介绍了与实训车间同步的仿真加工软件,让同学们边学边练。本书注重理论与实践相结合,对培养学生数控加工技术方面的能力有极大的促进作用。本书遵循职业教育的规律,以就业为导向,以培养技能型人才为根本,依据国家职业资格鉴定要求,力求在通用性、实用性、创新性和开放性的基础上,以模块化教学为引领,再配上大量的企业实际案例作为技能训练的“蓝本”。本书还结合了多年从事高职学生数控车、铣中/高级考证教师的经验,以企业实际产品作为案例进行工艺分析和编制加工程序,有利于实践“学做一体、工学结合、理实一体化”的教学模式。

本书的编者均具有数控车、铣技师及以上专业技术职务,有丰富的实操经验。本书由重庆机电职业技术大学魏梅、安惠玲、刘星担任主编。具体编写分工如下:魏梅编写第1、4、6章,安惠玲编写第2、3、5章,刘星编写第6章。本书在编写过程中得到了学院领导及从事数控专业教学部分老师的关心和大力支持,同时还参阅了大量国内外同行的教材资料与文献,在此一并表示感谢。限于编者水平有限,加上技术发展迅速,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2021年6月

数字资源索引

序号	资源名称	资源类型	页码
1	数控加工	视频	2
2	数控机床结构简介	微课	6
3	图形交互式自动编程	微课	12
4	刀具补偿相关的机床界面	微课	87
5	开机和回零操作	微课	88
6	程序的导入	微课	90
7	机床基本设置操作	微课	93
8	外圆车刀对刀	微课	94
9	例 4-4 仿真加工	微课	100
10	切槽刀对刀	微课	100
11	螺纹刀对刀	微课	107
12	例 4-9 仿真加工	微课	116
13	例 5-6 五孔加工	微课	177
14	例 5-8 铣槽	微课	180
15	例 5-9 粗精轮廓加工	微课	181
16	仿真加工 1	微课	189
17	仿真加工 2	微课	192
18	仿真加工 3	微课	197
19	VNUC 加工中心仿真软件对刀操作教程	微课	201
20	仿真加工 4	微课	201



目录

CONTENTS

第1章 概 论	001
1.1 数控加工技术概况	001
1.2 数控加工的特点	004
1.3 数控机床的加工原理	005
1.4 数控加工技术的主要应用对象	007
1.5 数控编程技术	008
1.6 数控技术的发展趋势	014
复习思考题	017
第2章 数控加工工艺基础	020
2.1 数控加工工艺概述	020
2.2 数控加工工艺分析与工艺设计	022
2.3 数控机床的工具系统	040
2.4 数控加工工艺文件的编制	044
复习思考题	048
第3章 数控编程基础	051
3.1 程序的格式	051
3.2 数控程序的指令代码	055
3.3 数控机床的坐标系统	056
3.4 程序编制中的数学处理	063
复习思考题	065

第 4 章 数控车床加工及其程序编制	068
4.1 数控车床加工工艺与刀具	068
4.2 数控车常用功能介绍	081
4.3 数控车床基本操作	087
4.4 数控车床编程	094
4.5 数控车削综合实例	126
复习思考题	129
第 5 章 数控铣削加工及程序编制	132
5.1 数控铣削加工工艺基础	132
5.2 数控铣床和加工中心编程	149
复习思考题	182
第 6 章 数控车铣加工实操综合实例	186
6.1 数控车床安全操作规程	186
6.2 综合实例	188
参考文献	203

第1章 概论

本章导学

1. 了解数控加工技术发展概况。
2. 了解数控加工的特点。
3. 了解数控机床的工作原理。
4. 了解数控加工技术的主要应用对象。
5. 了解数控编程技术发展概况。
6. 了解数控技术发展趋势。

1.1 数控加工技术概况

1. 数控概念

数字控制 (numerical control, NC) 简称“数控”,是用数字化信息进行控制的自动控制技术。数控是近代发展起来的一种自动控制技术,是用数字化信息实现机械设备控制的一种方法,在数控加工技术方面得到了广泛的应用。

数控加工 (numerical control machining),是指由控制系统发出指令使刀具做符合要求的各种运动,以数字、字母形式表示工件的形状、尺寸等技术要求和加工工艺要求进行的加工。它泛指在数控机床上进行零件加工的工艺过程。

随着科学技术的不断发展,社会对产品多样化的要求日益强烈,产品更新换代越来越快,多品种、中小批量生产的比重明显增加,复杂形状的零件越来越多,精度要求也越来越高。此外,激烈的市场竞争要求产品研制生产周期越来越短,传统的加工设备和制造方法已难以适应这种多样化、柔性化与复杂形状零件的高效、高质量的加工要求。因此,近几十年来,能有效解决复杂、精密、小批多变零件加工问题的数控加工技术得到了迅速发展和广泛应用,使制造技术发生了根本性的变化。图 1-1 所示为数控加工零件。

2. 数控机床的出现和发展史

数控加工是根据被加工零件的图样和工艺要求,编制成以数码表示的程序输入机床的数控装置或控制计算机中,以控制工件和工具的相对运动,使之加工出合格零件的方法。

该项技术是 20 世纪 40 年代后期为适应加工复杂外形零件而发展起来的一种自动化加工技术。1948 年，美国帕森斯公司接受美国空军委托，研制飞机螺旋桨叶片轮廓样板的加工设备。由于样板形状复杂多样，精度要求高，一般加工设备难以适应，于是提出使用计算机控制机床的设想。1949 年，该公司在美国麻省理工学院伺服机构研究室的协助下，开始数控机床的研究，并于 1952 年试制成功第一台三坐标数控铣床（见图 1-2），揭开了数控加工技术研究的序幕。

翻转课堂：学生自己搜索查阅中国第一台数控机床的诞生并阐述。



数控加工



图 1-1 数控加工零件

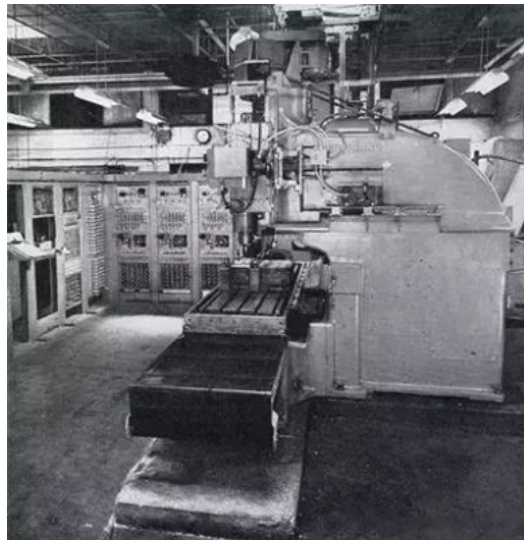


图 1-2 世界上第一台数控铣床

半个多世纪以来，数控系统经历了两个阶段和六代的发展，见表 1-1。

表 1-1 数控技术的发展

阶段	时代	开始时间	数控系统	主要特点
第 1 阶段： 硬件数控	第 1 代	1952 年	电子管、继电器等元件构成模拟电路	体积庞大，价格昂贵
	第 2 代	1959 年	晶体管和印刷电路	相比于第 1 代体积缩小，成本有所下降
	第 3 代	1965 年	中小规模集成电路	相比于前两代不仅体积小，功率消耗少，且可靠性得到进一步的提高，价格进一步下降
第 2 阶段： 计算机数控	第 4 代	1970 年	小型计算机	小型计算机功能强大，但不经济
	第 5 代	1974 年	微处理器	数控系统的软件功能加强，可靠性也得到极大的提高，进一步推动了数控机床的普及应用和大力发展
	第 6 代	1990 年	基于 PC	开放性、低成本、高可靠性、软硬件资源丰富，即 CNC (computer numerical control)

目前，为满足用户的不同需求，世界主要数控系统生产厂商可提供低、中、高端领域的全套解决方案，常用的有法兰克、西门子、海德汉、广州数控、华中数控等数控系统。

3. 重要性

数控技术是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础；数控技术的应用是提高制造业的产品质量和劳动生产率必不可少的重要手段；数控机床是国防工业现代化的重要战略装备，是关系到国家战略地位和体现国家综合国力水平的重要标志。

翻转课堂：同学们搜索“东芝事件”并阐述自我观点。

当今的数控机床已经在装备制造企业占有非常重要的地位，是柔性制造系统 (flexible manufacturing system, FMS)、计算机集成制造系统 (computer integrated manufacturing system, CIMS)、自动化工厂 (factory automation, FA) 的基本构成单位。努力发展数控加工技术，并向更高层次的自动化、柔性化、敏捷化、网络化和数字化制造方向推进，是当前装备制造业发展的方向。

4. 社会需求

曾有专家预言：21 世纪机械制造业的竞争，其实质是数控技术的竞争。

自加入世贸组织后，我国正在逐步变成“世界制造中心”。为了增强竞争能力，我国制造业开始广泛使用先进的数控技术。同时，劳动力市场出现数控技术应用型人才的严重短缺，媒体不断呼吁“高薪难聘高素质的数控技工”。数控人才的严重短缺成为全社会普遍关注的热点问题。

在发达国家中，数控机床已经大量普遍使用。我国制造业与国际先进工业国家相比存在着很大的差距，机床数控化率还不到 2%。对于目前我国现有的有限数量的数控机床（大部分为进口产品）也未能充分利用，原因是多方面的，数控人才的匮乏无疑是主要原因之一，由于数控技术是最典型的、应用最广泛的机电光一体化综合技术，我国迫切需要大量的从研究开发到使用维修的各个层次的技术人才。

1.2 数控加工的特点

与普通机床加工相比，数控加工具有以下特点：

1. 自动化程度高

在数控机床上加工零件时，除了手工装卸工件外，全部加工过程都可由机床自动完成。在柔性制造系统上，上/下料、检测、诊断、对刀、传输、调度、管理等也都可由机床自动完成，这样大大减轻了操作者的劳动强度，改善了劳动条件。

2. 具有加工复杂形状零件的能力

复杂形状零件在飞机、汽车、造船、模具、动力设备和国防工业等制造领域的产品中具有十分重要地位，其加工质量直接影响整机产品的性能。数控加工运动的任意可控性使其能完成普通加工方法难以完成或者无法进行的复杂型面的加工。

3. 生产准备周期短

在数控机床上加工新的零件，大部分准备工作是根据零件图样编制数控程序，而不是去准备靠模、专用夹具等工艺装备，而且编程工作可以离线进行，这样大大缩短了生产的准备时间。因此，应用数控机床十分有利于产品的升级换代和新产品的开发。

4. 加工精度高，质量稳定

目前，普通数控加工的尺寸精度通常可达 $\pm 0.005\text{ mm}$ ，最高尺寸精度可达 $\pm 0.01\ \mu\text{m}$ 。数控机床是按预先编制好的加工程序进行工作的，加工过程中无须人的参与或调整，因此不受操作工人技术水平和情绪的影响，加工精度稳定。另外，数控机床可以通过采用在线自动补偿（实时补偿）技术来消除或减少热变形、力变形、重量变形和刀具磨损等因素的影响，使加工精度的一致性得到保证，这在传统机床上则是无法做到的。因此，采用数控加工技术可以提高零件的加工精度和产品质量。

5. 生产效率高

数控机床的加工效率一般比普通机床高2~3倍，尤其是在加工复杂零件时，生产率可提高十几倍甚至几十倍。一方面，因为其自动化程度高，具有自动换刀和其他自动化辅助操作等功能，而且工序集中，在一次装夹中能完成较多表面的加工，省去了画线、多次装夹、检测等工序；另一方面，加工中可采用较大的切削用量，有效地减少了加工中的切削工时。数控在配有适当的刀库、工件毛坯库、上下料装置和多种传感器的条件下，不仅具有全自动的加工功能，而且具有对加工过程进行自动监控、检测、报警及修正误差等功能。因此，数控机床可以实现白班有人看管和做好各种准备工作后，二、三班则可以在“无人看管”的条件下进行24 h乃至72 h的连续加工，国外称为“熄灯生产”(lights out manufacturing)。这不仅改善了劳动条件，解决了晚上和节假日（含周六、周日）连续工作的问题，也大大提高了劳

动生产率、设备利用率，缩短了生产周期，增加了企业的经济效益。

6. 易于建立计算机通信网络

由于数控机床使用数字信息，易于与计算机辅助设计和制造（CAD/CAM）系统连接，形成计算机辅助设计和制造与数控机床紧密结合的一体化系统。另外，现在的数控机床通过因特网（Internet）、内联网（Intranet）、外联网（Extranet）已可实现远程故障诊断及维修，已初步具备远程控制和调度，进行异地分散网络化生产的可能。从而为今后进一步实现制造过程网络化、智能化提供必备的基础条件。

当然，数控加工在某些方面也有不足之处：数控机床价格昂贵，加工成本高，技术复杂，对工艺和编程要求较高，加工中难以调整，维修困难等。

1.3 数控机床的加工原理

数控机床的加工原理如图 1-3 所示。在数控机床上加工工件时，要事先根据零件加工图样的要求确定零件加工的工艺过程、工艺参数和刀具参数，再按规定编写零件数控加工程序，然后通过手动数据输入（manual data input, MDI）方式或与计算机通信等方式将数控加工程序送到数控系统，在数控系统控制软件的支持下，经过分析处理与计算后发出相应的指令，通过伺服系统使机床按预定的轨迹运动，从而控制机床进行零件的自动加工。

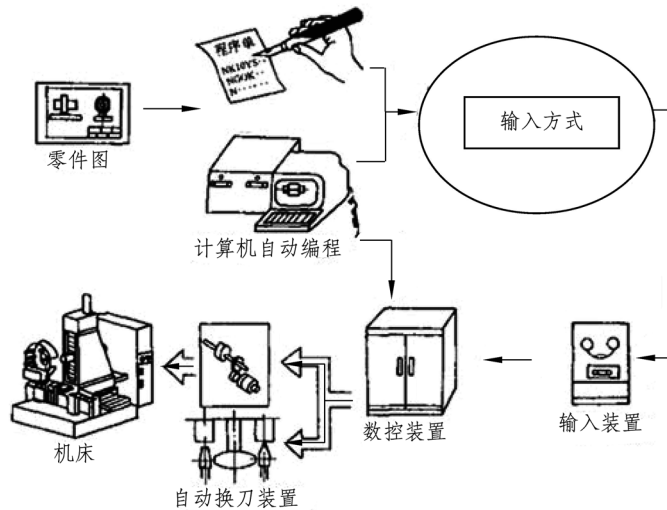


图 1-3 数控机床的加工原理

1. 工艺与程序编制

数控程序是数控机床自动加工零件的工作指令。在对加工零件进行工艺分析的基础上确定零件坐标系在机床坐标系上的相对位置，即零件在机床上的装夹位置、刀具与零件相对运动的尺寸参数、零件加工的工艺路线或加工顺序、切削加工的工艺参数以及辅助装置的动作等。这样得到零件的所有运动、尺寸、工艺参数等加工信息，然后按数控机床规定采用的代

码和程序格式，将工件的尺寸、刀具运动中心轨迹、位移量、切削参数（切削速度、进给量、背吃力量等）以及辅助功能（换刀、主轴的正转与反转、切削液的开与关等）编制成数控加工程序。编制程序的工作可人工进行，或者在数控机床以外用自动编程计算机系统来完成，比较先进的数控机床可以在其数控装置上直接编程。

2. 输入/输出装置

数控机床在进行加工前，必须接收由操作人员输入的零件加工程序，然后才能根据输入的程序进行加工。在加工过程中，操作人员要向机床数控装置输入操作命令，数控装置要为操作人员显示必要的信息，如坐标值、报警信号等。此外，输入的程序并非全部正确，有时需要编辑、修改和调试。以上工作都是机床数控系统和操作人员进行信息交流的过程，要进行信息交流必须具备输入/输出装置。

将数控程序输入数控装置，可采用以下几种方式：

1) 控制介质输入

控制介质输入方法主要有两种。一种方法是通过纸带输入，即在特制的纸带上穿孔，用孔的不同位置的组合构成不同的数控代码，通过纸带阅读机将指令输入。穿孔纸带使用 ISO（国际标准化组织）标准和 EIA（美国电子工业协会）制定的两种标准信息代码，现在的数控系统两种代码都可以识别应用。另一种方法是对于配置有计算机软驱动器的数控机床，可以将存储在磁盘上的程序通过软驱输入系统，尽管穿孔纸带已被淘汰，但是规定的标准信息代码仍然是数控程序编制、制备控制介质所遵守的标准。

2) 手动输入

操作者可以利用机床上的显示屏及键盘输入加工程序指令，控制机床的运动。一种是手动输入（MDI），它适用于一些比较短的程序，只能使用一次，另一种是在控制装置的编辑（EDIT）状态下，用按键输入加工程序，存入控制装置的内存中。用这种方式可以对程序进行编辑，程序可重复使用。除此之外，在具有会话编程功能的数控装置上，可以按照显示屏上提示的问题，选择不同的菜单，将图样上指定的有关尺寸数字等输入，就可自动生成加工程序。

3) 直接输入存储器

利用这种方式可以使用数控装置的串行口，通过对有关参数的设定和相关软件，直接读入在自动编程机上或其他计算机上编制好的程序。

3. 数控装置及辅助控制装置

数控装置是数控机床的核心，它接收输入装置送来的脉冲信号，经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、插补运算和逻辑处理后，输出各种信号和指令控制机床的各个部分，进行规定的、有序的动作。其中最基本的控制信号是：由插补运算决定的各坐标轴的进给位移量、进给方向和速度的指令，经伺服驱动系统驱动执行部件做进给运动。其他还有主运动部件的变速、换向和启/停信号，刀具选择和交换的指令信号，冷却液、润滑液的启停，工件和机床部件松开、夹紧，分



数控机床
结构简介

度工作台转位等辅助指令信号。

辅助控制装置是连接数控装置和机床机械、液压部件的控制系统，其主要作用是接收数控输出的主运动变速、换刀、辅助装置动作等指令信号，经过编译、逻辑判断、功率放大后驱动相应的电气、液压、气动和机械部件，以完成指令所规定的动作。此外，行程开关和监控检测等开关信号也要经过辅助控制装置送到数控装置进行处理。

4. 伺服驱动系统及位置检测装置

伺服驱动系统由伺服驱动电路和伺服驱动电动机组成，并与机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统。它根据数控装置发来的速度和位移指令控制执行部件的进给速度、方向和位移。每个做进给运动的执行部件，都配有一套伺服驱动系统。伺服驱动系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服驱动系统中，还有位置检测装置，间接或直接地测量执行部件的实际位移和速度并发送反馈信号与指令信号进行比较，按闭环原理，将其误差转换放大后控制执行部件的运动，以提高系统精度。

5. 机械部件

数控机床的机械部件包括主运动部件、进给运动执行部件（如工作台、拖板）传动部件和床身立柱等支承部件，此外还有冷却、润滑、排屑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的机床，还有自动刀具交换装置、自动交换工作台装置等部件。数控机床机械部件的组成与普通机床相似，但传动结构要求更为简单，在精度、刚度、抗振性、耐磨性、耐热性等方面要求更高，而且其传动和变速系统要便于实现自动化控制。

1.4 数控加工技术的主要应用对象

数控加工是一种可编程的柔性加工方法，但其设备费用相对较高，故目前数控加工主要应用于加工零件形状比较复杂、精度要求较高，以及产品更换频繁、生产周期要求短的场所。具体地说，下面这些类型的零件最适宜于数控加工：

- (1) 形状复杂、加工精度要求高或用数学方法定义的复杂曲线、曲面轮廓。
- (2) 公差带小、互换性高、要求精确复制的零件。
- (3) 用通用机床加工时，要求设计制造复杂的专用工装或需很长调整时间的零件。
- (4) 价值高的零件。
- (5) 小批量生产的零件。
- (6) 钻、镗、铰、攻螺纹及铣削联合进行加工的零件。

由于现代工业生产的需要，目前应用数控机床进行加工的部分典型行业及典型复杂零件如下：

- (1) 航空航天工业——高压泵体、导弹仓、喷气叶片、框架、机翼、大梁等。
- (2) 造船业——螺旋桨。
- (3) 电器、塑料制造业和汽车制造业等——模具型面。
- (4) 动力工业——叶片、叶轮、机座、壳体等。

(5) 机床工具业——箱体、盘轴类零件、凸轮、非圆齿轮、复杂形状刀具与工具。

(6) 兵器工业——炮架件体、瞄准陀螺仪壳体、恒速器壳体。

另外，20 世纪 60—80 年代，以数控机床应用为基础的柔性制造技术在汽车、飞机及一些行业中得到发展，其应用结果表明：柔性制造适于多品种、变化批量产品的生产。当前，柔性制造技术发展了以数控加工中心、数控加工模块及多轴加工模块组成的柔性自动线，使自动线柔性化，给单一品种的大量生产方式带来了转机。这种技术已广泛应用于汽车制造业发动机等零件的制造中，目前世界上许多汽车制造厂，包括我国上海通用汽车公司等企业，已经采用以高速加工中心组成的生产线部分替代组合机床。

可见，目前的数控加工主要应用于以下两个方面：

(1) 常规零件加工，如二维车削、箱体类镗铣等，其目的在于：提高加工效率，避免人为误差，保证产品质量；以柔性加工方式取代高成本的工装设备，缩短产品制造周期，适应市场需求。这类零件一般形状较简单。实现上述目的的关键：一方面在于提高机床的柔性自动化程度、高速高精加工能力、加工过程的可靠性与设备的操作性能；另一方面在于合理的生产组织、计划调度、工艺过程安排。

(2) 复杂形状零件加工，如涡轮叶片、叶轮、手机模具等（见图 1-4）在众多的制造行业中具有重要的地位，其加工质量直接影响以至决定着整机产品的质量。这类零件型面复杂，常规加工方法难以实现，它不仅促使了数控加工技术的产生，而且也一直是数控加工技术的主要研究及应用对象。由于零件型面复杂，在加工技术方面，除要求数控机床具有较强的运动控制能力（如多轴联动）外，更重要的是如何有效地获得高效、优质的数控加工程序，并从加工过程整体上提高生产率。



图 1-4 数控机床加工的复杂形状零件

1.5 数控编程技术

在数控机床上加工零件，首先要编制零件的加工程序，然后才能加工。

程序编制，就是将零件的工艺过程、工艺参数、刀具位移量与方向以及其他辅助动作（换刀、冷却、夹紧等），按运动顺序和所用数控机床规定的指令代码及程序格式编成加工程序单（相当于普通机床加工的工艺过程卡），再将程序单中的全部内容记录在控制介质上，然后输

给数控装置，从而指挥数控机床加工。这种从零件图纸到制成控制介质的过程为数控加工的程序编制。

1.5.1 数控编程的内容

数控编程的主要内容包括：

1. 分析零件图样，确定工艺过程

要分析零件的材料、形状、尺寸、精度及毛坯形状和热处理要求等，以便确定该零件是否适宜在数控机床上加工，或适宜在哪台数控机床上加工。有时还要确定在某台数控机床上加工该零件的哪些工序或哪几个表面。

2. 确定工艺过程

在认真分析图纸的基础上，确定零件的加工方法、工装夹具、定位夹紧方法和走刀路线、对刀点、换刀点，并合理选定机床、刀具及切削用量等。

3. 数值计算

根据零件形状和加工路线设定坐标系，算出零件轮廓相邻几何元素的交点或切点坐标值。当用直线或圆弧逼近零件轮廓时，需要计算出其节点的坐标值，以及数控机床需要输入的其他数据。

4. 编写程序单

根据计算出的运动轨迹坐标值和已确定的运动顺序、刀号、切削参数以及辅助动作，按照数控装置规定使用的功能指令代码及程序段格式，逐段编写加工程序单。在程序段之前加上程序的顺序号，在其后加上程序段结束标志符号。此外，还应附上必要的加工示意图、刀具布置图、机床调正卡、工序卡以及必要的说明（如零件名称与图号、零件程序号、机床类型以及日期等）。

5. 制备控制介质

程序单只是程序设计完成后的文字记录，还必须将程序单的内容记录在控制数控机床的控制介质上，作为数控装置的输入信息。最初数控机床常用穿孔纸带、磁盘、磁带等作为控制介质，随着计算机技术的发展，目前常用的控制介质有 CF 卡、移动硬盘等，也可以直接将程序通过键盘输入带数控装置的程序存储器中。另外，随着 CAD/CAM 技术的发展，有些数控设备利用 CAD/CAM 软件在其他计算机上自动编程，然后通过计算机与数控系统通信（如局域网），将程序和数据直接传送到数控装置中。

6. 程序检校和首件试切

程序单和所制备的控制介质必须经过检校和试切削才能正式使用。一般的方法是将控制介质上的内容直接输入 CNC 装置进行机床的空运转检查，即在机床上用笔代替刀具，坐标纸代替工件进行空运转画图，检查机床运动轨迹的正确性。在具有 CRT（阴极射线管）屏幕

图形显示的数控机床上，用图形模拟刀具相对工件的运动，则更为方便。但这些方法只能检查运动是否正确，不能检查出由于刀具调整不当或编程计算不准而造成工件误差的大小。因此，必须用首件试切的方法进行实际切削检查。它不仅可查出程序单和控制介质的错误，还可以知道加工精度是否符合要求。当发现尺寸有误差时，应分析错误的性质，或者修改程序单，或者进行尺寸补偿，或调整刀具补偿参数，直到加工出合格的零件。程序编制的一般过程如图 1-5 所示。

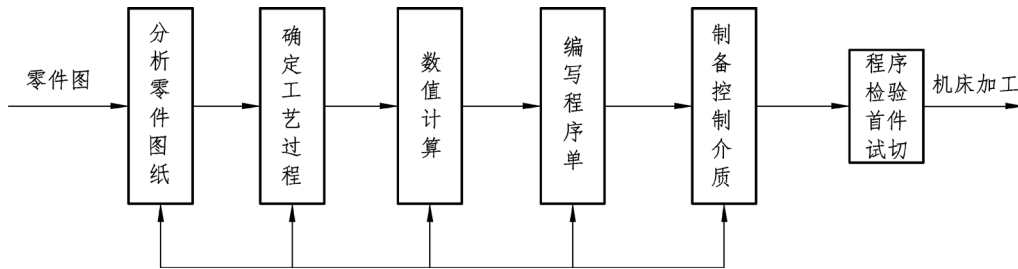


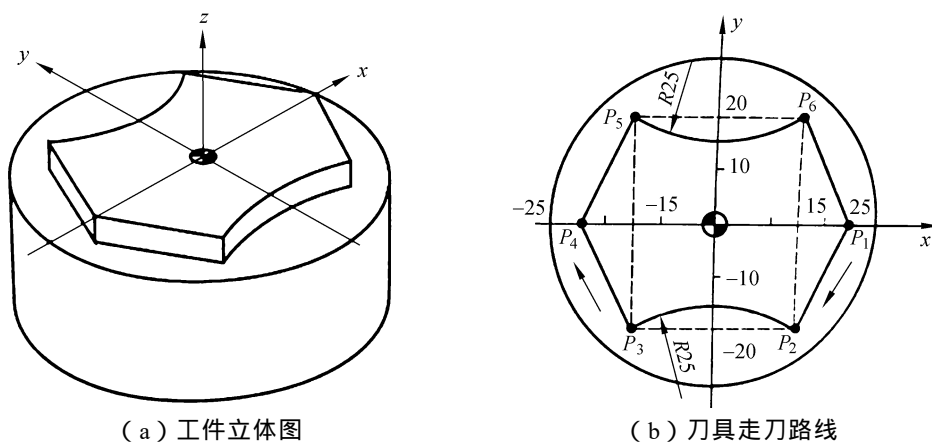
图 1-5 程序编制的一般过程

1.5.2 数控编程的方法

根据问题复杂程度的不同，数控加工程序可通过手工编程或自动编程来获得。

1. 手工编程

手工编程是指零件图样分析、工艺处理、数值计算、书写程序单、纸带制作和检验等均由人工来完成。它要求编程人员不仅要熟悉数控指令及编程规则，而且还要具备数控加工工艺知识和数值计算能力。例如在加工中心上用立铣刀加工如图 1-6 所示形状的工件，因该零件轮廓由直线和简单的圆弧轮廓组成，可以手工计算坐标值（见表 1-2）并确定刀具路径来完成数控编程，使刀具沿 $P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 P_1$ 的轨迹运动加工。



(a) 工件立体图

(b) 刀具走刀路线

图 1-6 手工编程零件实例

表 1-2 计算坐标值

单位：mm

坐标	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
x	25	15	- 15	- 25	- 15	15
y	0	- 20	- 20	0	20	20

手工编制的加工程序如下（为简化，此处没有考虑铣刀半径）：

```

O1001 ;           (程序号)
G90 G00 G54 X25 Y0 ;   (建立工件坐标系，刀具快速运动到  $P_1$  点)
G43 Z100 H01 ;       (建立刀具长度补偿，快速移动到 Z100 位置)
S1000 M03 ;         (主轴以 1 000 r/min 的转速正转)
G00 Z3             (刀具快速移动到 Z = 3 位置)
G01 Z-2 F150 ;      (刀具以 150 mm/min 的进给速度沿直线切入 Z = - 2 位置)
X15 Y-20 ;         (刀具沿直线运动到  $P_2$  点)
G03 X-15 R25 ;      (刀具沿逆时针圆弧运动到  $P_3$  点)
G01 X-25 Y0 ;      (刀具沿直线运动到  $P_4$  点)
X-15 Y20 ;         (刀具沿直线运动到  $P_5$  点)
G03 X15 R25 ;       (刀具沿逆时针圆弧运动到  $P_6$  点)
G01 X25 Y0 ;       (刀具沿直线运动到  $P_1$  点)
G00 Z10 M05 ;      (刀具沿 Z 轴方向快速退刀至 Z = 10 位置，主轴停止)
G91 G28 Z0 ;       (Z 轴回机床参考点)
G28 X0 Y0 ;        (X、Y 轴回机床参考点)
M30 ;             (程序结束)

```

在机械制造行业中，均有大量仅由直线、圆弧等几何元素构成的形状并不复杂的零件需要加工。这些零件的数值计算较为简单，程序段数不多，程序检验也容易实现，因而可采用手工编程方式完成编程工作。由于手工编程不需要特别配置专门的编程软硬件，易于掌握和运用，因此在国内外，手工编程仍然是一种运用十分普遍的编程方法。然而它也有以下缺点：

- (1) 人工完成各个阶段的工作，效率低，易出错；
 - (2) 每个点的坐标都需要计算，工作量大、难检查；
 - (3) 对复杂形状的零件，如螺旋桨的叶片形状，不但计算复杂，有时也难以实现。
- 但上述问题若由计算机进行处理，难题就迎刃而解了。

2. 自动编程

自动编程是借助数控自动编程系统由计算机来辅助生成加工程序。此时，编程人员一般只需借助数控编程系统提供的各种功能对加工零件的几何参数、工艺参数及加工过程进行简单的描述后，即可由计算机自动完成程序编制的全过程。自动编程解决了手工编程难以解决的复杂零件的编程问题，既减轻了编程的劳动强度，又提高了效率和准确性，在数控加工中的应用日益广泛。

对几何形状不复杂，加工程序不长、计算不烦琐的零件，如点位加工或几何形状不复杂的轮廓加工，一般选用手工编程。

1.5.3 数控编程技术的发展概况

为解决复杂型面零件在数控机床上加工的编程问题，随着微电子技术和 CAD 技术的发展，为降低编程难度、提高效率，减少和避免程序错误，自动编程技术不断发展，大约经历了以下几个阶段：

20 世纪 50 年代：出现第一台数控机床，美国麻省理工学院（MIT）开发 APT 语言。

20 世纪 60 年代：诞生交互式图像显示设备，MIT 组织美国各大飞机公司共同开发 APT、APT。

20 世纪 70 年代：兴起工作站（Workstation）和造型技术（Wireframe Modeling、Solid Modeling、Surface Modeling），出现基于 APT 的 APT-、APT-AC，APT 衍生出其他语言，如 ADAPT、EXAPT、HAPT、FAPT、IF-APT 等。

20 世纪 80 年代：产生智能机器人及专家系统，CAD/CAM 历经形成、发展、提高和集成各个阶段。

应用 CAD/CAM 集成系统设计加工的流程如图 1-7 所示。

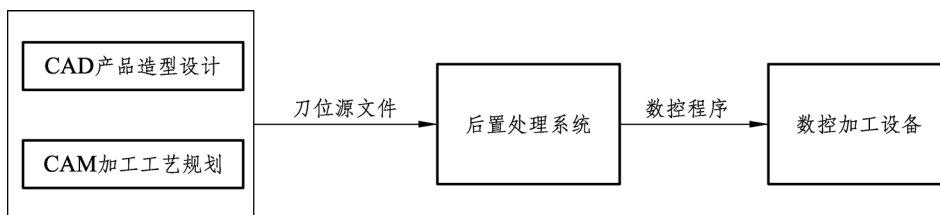


图 1-7 应用 CAD/CAM 集成系统设计加工的流程

现代图形交互式自动编程建立在 CAD 和 CAM 系统的基础上，图形交互自动编程是计算机配备了图形终端和三维绘图软件后进行编程的一种方法，它以人-机对话的形式，在图形显示终端上绘制出加工零件及毛坯，选择机床和刀具并制定加工工艺，计算机便按预先存储的图形自动编程系统计算刀具轨迹，然后由相应机床的后处理器自动生成 NC 代码。典型的图形交互式自动编程系统都采用 CAD/CAM 集成数控编程系统模式。与早期的语言型的自动编程系统相比，它有如下特点：

(1) 输入工件图形并采用人机对话方式，而不需要使用数控语言编制源程序；

(2) 从加工工件的图形再现、进给轨迹的生成、加工过程的动态模拟，到生成数控加工程序，都是通过屏幕菜单驱动，因而速度快、精度高、直观性好、使用简便、便于检查；

(3) 可以通过软件的数据接口共享已有的 CAD 设计结果，实现 CAD/CAM 集成一体化，实现无图纸设计制造；

(4) 为提高生产率、缩短新产品研制周期、保证产品产量、降低成本创造了有利的条件，尤其是对三维复杂曲面零件，只要作适当的修改就能产生新的 NC 代码，因而它具有相当大的柔性。

近年来，随着计算机技术、空间几何造型技术、工程数据库技术和系统集成技术的不断



发展进步，已出现了一批功能强大的 CAD/CAM 软件，如法国达索飞机制造公司的 CATIA、美国麦道航空公司的 UG- 和美国参数技术公司的 Pro/E、我国北航海尔的制造工程师 (CAXA-ME) 等，这些软件都具有空间异型曲面的数控加工程序编制功能，且具有智能型后置处理环境，可以面向众多的数控机床和大多数数控系统。

高速数控加工的出现不仅对机床结构和数控系统提出了新的要求，对于加工工艺的策划、工艺参数的设置和加工约束的设置也提出了新的要求。各种数控系统在曲面加工时，所用的曲面拟合模型不尽相同，有的用 Nurbs 拟合模型，有的用 Bezier 拟合模型，有的用 Polymial 拟合模型，还有的用 Spline 拟合模型，后置处理器就面临支持相应的多种曲面拟合模型的问题。

因此，要使所生成的数控程序不经手工修改，直接应用于数控机床加工，则必须针对每一台数控机床定制专用的后置处理器。特别是对于多轴数控加工机床，各大 CAD/ CAM 软件厂家提供的多轴后置处理器还有很大的局限性，通用性不好，有的软件仅提供了三轴后置处理器。而针对五轴数控机床，目前只有一些经过改良的后置处理器，五轴数控机床的后置处理器还有待进一步开发。

因此，能够处理不同类型格式的刀具路径文件，并做优化处理，以适应不同类型的机床、不同类型的系统、不同类型的零件的加工需求，生成的 NC 程序不需人工做二次修改，而直接应用于机床是后置处理器技术的发展方向。

1997 年欧洲共同体提出了 STEP-NC 概念，将产品数据转换标准 STEP 扩展至 CNC 领域，重新定义了 CAD/CAM 与 CNC 之间的接口，它要求 CNC 系统直接使用符合 STEP 标准的 CAD 三维产品数据模型（包括几何数据、设计和制造特征），加上工艺的信息和刀具信息，直接产生加工程序来控制机床。STEP-NC 使产品模型数据库用作数控机床的直接输入文档，不存在单独的刀具路径文件，废弃了 G 代码和 M 代码，从而不再需要后直处理系统。

STEP-NC 提供了一种基于特征的面向对象的数控数据模型。其基本原理是基于四道特征进行编程，告诉 CNC 的是“加工什么”，而不是直接对刀具运动轨迹（路径）进行编程，以及告诉 CNC“如何加工”的具体动作。加工流程是以工步作为基本单位，将制造特征和工艺技术信息联系在一起，每个工步只定义一种操作（“干什么”“如何干”等，仅能用一种刀具和一种策略）。STEP-NC 通过任务描述（钻中心孔、钻孔，粗加工、精加工等）把工件的加工程序传到加工车间，在车间机床控制器根据机床知识产生刀具路径，也可以根据车间实际需要，对加工程序进行修改，修改后的加工过程信息可以保存并返回到设计制造部门，使经验和知识能更好地交换和保留，也实现产品生命周期数据的共享。

STEP-NC 是目前世界工业化国家研究的热点，其中代表性的研究项目有欧洲的 STEP-NC 项目、美国的 Super modal 项目、日本的 Digital Master 项目等。但 STEP-NC 的推广需更新或废弃现有数控系统和 CAM 系统，这不是短期内可以实现的事。

1.5.4 数控技术的现状

日益增多的复杂形状零件和高精、高效的加工对数控编程技术提出了越来越高的要求，面向复杂形状零件、多轴加工和加工过程优化的数控编程技术越来越重要。同时，为适应高

速加工、CIMS、并行工程和敏捷制造等先进制造技术的发展，缩短产品研制生产周期以柔性快速地响应市场需求，数控编程技术呈现出进一步向集成化、智能化、自动化、易使用化和面向车间编程等方向发展的趋势。

复杂形状零件的加工一直是数控编程技术的主要研究内容。对于三坐标加工，目前的编程系统一般能较好地完成，达到较高的稳定性。但由于多轴加工在加工复杂形状零件的能力、质量和效率等诸多方面的显著优势，多轴编程显得越来越重要。但多轴加工编程较复杂，特别是由于零件形状的复杂多变，要实现较通用的多坐标自动编程有较大难度。因此，目前编程系统中对多坐标加工的处理一般采取面向专用零件的方式。

数控加工的效率与质量极大地取决于加工方案与加工参数的合理选择，包含合适的机床、刀具形状与尺寸、刀具相对加工表面的姿态、走刀路线、主轴速度、背吃刀量和进给速度等。为了优化这些参数，必须知道在复杂的切削状态下这些参数与刀具受力、磨损、加工表面质量及机床颤振等众多因素之间的关系。在复杂形状零件的加工过程中，切削状态往往一直是变化的，其优化措施还必须具有动态自适应的特点。对于加工方案与参数的自动选择与优化是数控编程走向智能化与自动化的重要标志和要解决的关键问题，同时也是实现面向车间编程的重要前提。在建立工艺数据库的基础上，采取自动特征识别和基于特征与知识的编程是解决该问题的重要途径。

1.6 数控技术的发展趋势

1952年美国研制出世界上第一台数控铣床，开创了世界数控机床发展的先河。随后，德、日、苏等国于1956年分别研制出本国第一台数控机床。我国于1958年由清华大学和北京第一机床厂合作研制了第一台数控铣床。近年来，由于引进了国外的数控系统与伺服系统的制造技术，使我国数控机床在品种、数量和质量方面得到了迅速发展。在国外数控技术向高速、精密、多轴、复合发展的总趋势下，我国高速加工技术、精密加工技术、五轴联动及复合加工技术也取得了突破，打破了国外的长期垄断和封锁，自主创新开发了一大批新产品，并进入国民经济中的重要领域和国外市场。下面简单介绍数控系统和数控机床的发展趋势。

1.6.1 数控系统的发展趋势

从1952年美国麻省理工学院研制出第一台试验性数控系统，到现在已走过了60多年的历程。目前，国内外新一代数控系统的总体发展趋势是：

1. 数控系统采用开放式体系结构

20世纪90年代以来，受通用微机技术飞速发展的影响，数控系统正朝着以通用微机(PC)为基础、体系结构开放和智能化的方向发展。1994年基于PC的NC控制器在美国首先出现于市场，此后得到迅速发展。由于基于PC的开放式数控系统可充分利用通用微机丰富的软硬件资源和适用于通用微机的各种先进技术，已成为数控技术发展的潮流和趋势。世界上许

多数控系统生产厂家利用PC丰富的软硬件资源开发出了开放式体系结构的新一代数控系统。开放式体系结构的数控系统具有良好的通用性、柔性、适应性、扩展性，并向智能化、网络化方向发展。例如，Cincinnati-Milacron公司从1995年开始在其生产的加工中心、数控铣床、数控车床等产品中采用了开放式体系结构的A2100系统。开放式体系结构可以大量采用通用微机的先进技术，实现声控自动编程、图形扫描自动编程等。数控系统继续向高集成度方向发展，芯片上可以集成更多的晶体管，使系统更加小型化、微型化，可靠性大大提高。利用多CPU的优势，实现故障自动排除；增强通信功能，提高进线、联网能力。开放式体系结构的新一代数控系统，其硬件、软件和总线规范都是对外开放的，由于有充足的软、硬件资源可供利用，不仅使数控系统制造商和用户进行的系统集成得到有力的支持，而且也为用户的二次开发带来了极大方便，促进了数控系统多档次、多品种的开发和应用，既可通过升级或组合构成各种档次的数控系统，又可通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统。

2. 数控系统的控制性能大大提高

数控系统在控制性能上向智能化方向发展。随着人工智能在计算机领域的应用，数控系统引入了自适应控制、模糊系统和神经网络的控制机理，使新一代数控系统具有自动编程、前馈控制、模糊控制、学习控制、自适应控制、工艺参数自动生成、三维刀具补偿、运动参数动态补偿等功能，而且人机界面极为友好，并具有故障诊断专家系统，使自诊断和故障监控功能更趋完善。伺服系统智能化的主轴交流驱动和智能化进给伺服装置，能自动识别负载并自动优化、调整参数。直线电动机驱动系统已进入实用阶段。

1.6.2 数控机床的发展趋势

新一代数控系统技术水平大大提高，大大促进了数控机床性能的提高。当前，世界数控技术及其装备发展趋势主要体现在以下几个方面：

1. 高速、高效化

数控机床向高速化方向发展，可充分发挥现代刀具材料的性能，大幅度提高加工效率，降低加工成本，提高工件的表面加工质量和精度。超高速加工技术对制造业实现高效、优质、低成本生产有广泛的适用性。

20世纪90年代以来，美、日及欧洲各国争相开发应用新一代高速数控机床，加快了机床高速化发展步伐。高速加工的巨大吸引力在于提高效率的同时，提高了加工精度。高速切削可以减小切削深度，有利于克服机床振动，降低传入工件的热量，减小热变形，从而提高加工精度，改善加工表面质量。随着超高速切削机理、超硬耐磨长寿命刀具材料和磨料磨具、大功率高速电主轴、高加/减速度直线电动机驱动进给部件以及高性能控制系统(含监控系统)和防护装置等一系列技术领域关键技术的解决，新一代高速数控机床的车削和铣削速度已达到5 000~8 000 m/min以上；主轴转数在40 000 r/min(有的高达100 000 r/min)以上；工作台的移动速度(进给速度)，在分辨率为1 μm时，为100 m/min以上(有的达到200 m/min)，在分辨率为0.1 μm时，为24 m/min以上；自动换刀时间在1 s以内；工作台交换时间在2.5 s

以内。高速化的趋势目前有增无减，甚至有人提出了达到“非切削时间为零”的目标。

2. 高精度化

随着高新技术的发展和对机电产品性能与质量要求的提高，机床用户对机床加工精度的要求也越来越高。为了满足用户的需要，近 10 多年来，普通级数控机床的加工精度已由 $\pm 10 \mu\text{m}$ 提高到 $\pm 5 \mu\text{m}$ ，精密级加工中心的加工精度则从 $\pm (3 \sim 5) \mu\text{m}$ ，提高到 $\pm (1 \sim 1.5) \mu\text{m}$ 。

随着现代科学技术的发展，对超精密加工技术不断提出新的要求。新材料及新零件的出现、更高精度要求的提出等都需要超精密加工工艺，发展新型超精密加工机床、完善现代超精密加工技术是适应现代科技发展的必由之路。当前，精密加工精度提高了两个数量级，超精密加工精度进入纳米级 ($0.001 \mu\text{m}$)，主轴回转精度要求达到 $0.01 \sim 0.05 \mu\text{m}$ ，加工圆度为 $0.1 \mu\text{m}$ ，加工表面粗糙度为 $Ra0.003 \mu\text{m}$ 等。

3. 高可靠性

数控机床要发挥高性能，高精度、高效率，并获得良好的效益，关键取决于其可靠性。衡量可靠性的重要量化指标是平均无故障工作时间 MTBF (mean time between failure)，具体是指产品每连续两次故障之间的平均间隔时间。数控系统的 MTBF 已由 20 世纪 80 年代的 10 000 h，提高到目前的 30 000 ~ 50 000 h。数控机床整机的可靠性水平也有显著提高，其 MTBF 值已由 20 世纪 80 年代初期的 100 ~ 200 h，提高到目前的 1 000 h。

4. 智能化

现代数控机床将引进自适应控制技术，根据切削条件的变化，自动调节工作参数，使加工过程保持在最佳工作状态，从而得到较高的加工精度和较小的表面粗糙度值，同时也能提高刀具的使用寿命和设备的生产率，确保生产安全；具有自诊断、自修复功能，在整个工作状态中，随时对 CNC 系统本身以及与其相连的各种设备进行自诊断、检查。一旦出现故障，立即采用停机等措施，并进行故障报警，提示发生故障的部位、原因等。还可以自动使故障模块脱机，接通备用模块，以满足无人化工作环境的要求。

5. 数控编程自动化

随着计算机应用技术的发展，目前已得到较多的应用，是数控技术发展的新趋势。它利用 CAD 绘制的零件图样，再经计算机内的刀具轨迹数据进行计算和后置处理，从而自动生成 NC 零件加工程序，以实现 CAD 与 CAM 的集成。随着 CIMS 技术的发展，当前又出现了 CAD/CAPP/CAM 集成的全自动编程方式，它与 CAD/CAM 系统编程的最大区别是其编程所需的加工工艺参数不必由人工输入，直接从系统内的 CAPP 数据库获得。

6. 复合化

复合化包含工序复合化和功能复合化。数控机床的发展已模糊了粗精加工工序的概念。车铣复合中心的出现，又把车、铣、镗等工序集中到一台机床来完成，打破了传统的工序界限和分开加工的工艺规程。近年来，又相继出现了许多跨度更大的功能集中的超复合化数控

机床，如日本池贝铁工所的 TV4L 立式加工中心，由于采用 U 轴，也可进行车削加工。

7. 出现新一代数控加工工艺与装备

为适应制造自动化的发展，向 FMC、FMS 和 CIMS 提供基础设备，要求数字控制制造系统不仅能完成通常的加工功能，而且还要具备自动测量、自动上下料、自动换刀、自动更换主轴头（有时带坐标变换）、自动误差补偿、自动诊断、网络通信等功能，广泛地应用机器人、物流系统；数控技术、制造过程技术在快速成形、并联机构机床、机器人化机床、多功能机床等整机方面已有所突破。近年来出现了所谓六条腿结构的并联机床（parallel machine tools），这种新颖的数控机床是以可伸缩的六条“腿”（伺服轴）支撑并连接上平台（装有主轴头）与下平台（装有工作台）的构架结构形式，取代传统的床身、立柱等支撑结构，而没有任何导轨与滑板的所谓“虚轴机床”，如图 1-8 所示。其最显著的优点是机床基本性能高，精度、刚度和加工效率均可比传统加工中心高出许多倍。随着这种结构技术的成熟和发展，数控机床技术将进入一个有重大变革和创新的新时代。并联杆系结构的新型数控机床的出现，开拓了数控机床发展的新领域。



图 1-8 我国自主研发的并联机床



复习思考题

一、填空题

1. 数控机床是按加工要求预先编制程序，由控制系统发出_____指令对工件进行加工的机床。
2. 数控机床一般由控制介质、_____、伺服系统、测量反馈装置和机床主体组成。

3. 将零件加工信息传送到数控装置去的程序载体是_____。
4. 数控机床的中枢是_____，它将接收到的全部功能指令进行解码、运算，然后有序地发出各种需要的运动指令和各种机床功能的控制指令，直至运动和功能结束。
5. 伺服系统由驱动装置和执行部件组成，它是数控机床的_____机构。
6. 伺服系统分为_____伺服系统和_____伺服系统。
7. 伺服系统的作用是把来自_____的指令信号转换为机床移动部件的运动。
8. 测量反馈装置的作用是通过测量元件将机床移动的实际位置、速度参数检测出来，转换成电信号，并反馈到_____装置中。
9. 测量反馈装置安装在数控机床的_____或_____上。
10. 机床主体是数控机床的本体，主要包括床身、_____进给机构等机械部件，还有冷却、润滑等辅助装置。

二、判断题

1. 数控机床是在普通机床的基础上将普通电气装置更换成 CNC 控制装置。 ()
2. 数控机床必须应用控制介质向数控装置传递加工程序。 ()
3. MDI 键盘和显示器是数控系统不可缺少的人机交互设备。 ()
4. 进给伺服系统的性能是决定数控机床加工精度和生产效率的主要因素之一。 ()
5. 适应性强是数控机床最突出的优点，也是数控机床得以产生和迅速发展的主要原因。 ()
6. 就所加工工件的尺寸一致性而言，数控机床不如普通机床。 ()

三、选择题

1. 下列特点中，数控机床不具备的是 ()。

A. 适应性强	B. 高效率
C. 加工的零件精度高，质量稳定	D. 大批量生产
2. 数控系统的核心是 ()。

A. 伺服装置	B. 计算机数控装置
C. 反馈装置	D. 检测装置
3. 数控机床的进给运动是由 () 完成的。

A. 进给伺服系统	B. 主轴伺服系统
C. 辅助控制系统	D. 数控装置
4. 数控机床是 () 技术与机床相结合的产物。

A. 计算机	B. 数字控制
C. 通信	D. 电子

四、名词解释

1. 数控机床
2. 数控技术
3. 控制介质

五、简答题

1. 数控机床主要由哪几部分组成？
2. 数控装置有何作用？
3. 伺服系统有何作用？
4. 测量装置有何作用？
5. 简述数控机床的工作过程。
6. 同普通机床相比，数控机床有哪些特点？

020