

高等院校教材

机床数控技术及应用

陈蔚芳 王宏涛 主 编

薛建彬 楼佩煌 副主编



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

机床数控技术及应用

陈蔚芳 王宏涛 主 编
薛建彬 楼佩煌 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书首先对数控技术进行了简要介绍,然后系统论述了数控加工程序编制基础、数控加工编程方法、计算机数字控制装置、数控机床的控制原理、数控机床的检测装置、数控机床的伺服驱动系统、数控机床的机械结构与装置。最后,还介绍了分布式数字控制技术以及柔性制造系统。书中案例丰富,并在每章后配有复习思考题。

本书可以作为高等院校机械制造及自动化、材料成型等专业的本科生教材,也可以供一般工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机床数控技术及应用/陈蔚芳等主编. —北京:科学出版社,2005
(高等院校教材)

ISBN 7-03-014950-5

I. 机… II. 陈… III. 数控机床-高等学校-教材
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 006982 号

责任编辑:段博原 郝德平 于宏丽/责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年4月第一版 开本: B5(720×1000)

2005年4月第一次印刷 印张: 23 1/2

印数: 1—3 500 字数: 459 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

随着科学技术的高速发展,制造业发生了根本性的变化,高效率、高精度的数控机床逐渐取代普通机床,形成了巨大的生产力。数控机床的核心是机床数控技术,其发展和应用的水平标志着综合国力水平,也是实现制造系统自动化、柔性化、集成化、系统化的基础。《机床数控技术》作为培养机械工程技术人才的一门专业课程,其作用举足轻重,可使学生获得丰富的机械、电子、控制、检测、编程等方面的基础知识和综合技能,满足社会对数控技术人才的需要。

本书是与《机床数控技术》课程相配套的教材,主要偏重于数控编程和数控原理,同时兼顾数控机床结构、分布式数控技术、柔性制造技术等方面的知识。编写时既注重基础性、系统性、综合性,也考虑应用性和实践性,同时兼顾先进性。文字叙述上力求通俗易懂。

本书共分10章,第1章介绍了数控技术及数控机床的概念、组成、工作原理、分类、新发展;第2章介绍了数控编程的一些基础知识,包括数控工艺处理、数学处理、常用编程指令;第3章介绍了数控车床、数控铣床、加工中心、数控线切割机床的手工编程方法,同时介绍了基于UG平台的自动编程方法;第4章介绍了数控装置的硬件和软件结构及可编程控制器在数控系统中的应用;第5章介绍了各种插补方法及其实现步骤,介绍了刀具半径补偿;第6章介绍了用在数控机床上的各种检测装置;第7章介绍了数控机床中电机种类及相应的驱动控制方式;第8章介绍了数控机床的结构特点、主轴部件、进给传动系统、导轨、自动换刀装置;第9章介绍了分布式数控系统的概念、功能、控制方式、信息采集方式、应用实例;第10章介绍了柔性制造系统的组成、控制结构、调度与仿真技术,最后给出了应用实例。

本书第1章、第2章、第3章由陈蔚芳编写,第5章由王宏涛、陈蔚芳编写,第6章、第7章由王宏涛编写,第4章、第8章由薛建彬编写,第9章、第10章由楼佩煌编写。全书由陈蔚芳、王宏涛统稿和定稿。

南京航空航天大学范炳炎教授、竺钦尧教授、杨文源教授对本书进行了主审,提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,何磊老师提供了自动编程的例子并审核了部分手工编程的例题,冷晟老师参与了部分复习思考题的编写,倪丽君硕士生完成了书中大部分图形的绘制、部分文字的录入、编辑和整理工作,云乃彰教授、臧铁钢老师和无锡国盛精密模具公司史建新工程师提供了部分材料,对他们的大力支持同样表示感谢。

机床数控技术仍有许多理论需要进一步研究和完善。同时由于编者学识水平有限,成书时间仓促,因此书中难免有不足和错误,恳请广大读者批评指正。

· 编 者

2005年1月

目 录

前言

第 1 章 数控技术概论	1
1.1 数控技术的基本概念	1
1.2 机床数控技术的组成	1
1.2.1 机床本体	1
1.2.2 数控系统	2
1.2.3 外围技术	4
1.3 数控加工零件的过程	4
1.4 数控机床的特点与分类	6
1.4.1 数控机床的特点	6
1.4.2 数控机床的分类	7
1.5 数控技术的发展趋势.....	12
复习思考题	14
第 2 章 数控加工程序编制基础	15
2.1 概述.....	15
2.1.1 数控编程的基本概念	15
2.1.2 数控编程的内容和步骤	15
2.1.3 数控编程的方法	17
2.1.4 数控机床坐标系	17
2.1.5 加工程序结构与格式	20
2.2 数控编程中的常用指令.....	21
2.2.1 准备功能 G 代码	22
2.2.2 辅助功能 M 代码	30
2.2.3 F、S、T 代码	33
2.3 数控编程中的工艺处理.....	33
2.3.1 数控加工工艺的特点与内容	34
2.3.2 数控加工零件的选择	34
2.3.3 数控加工工艺性分析	35

2.3.4	数控加工工艺路线的设计	36
2.3.5	数控加工工序的详细设计	38
2.4	数控编程中的数学处理	50
2.4.1	直线、圆弧类零件的数学处理	51
2.4.2	非圆曲线节点坐标计算	52
2.4.3	列表曲线轮廓零件的数学处理	58
2.4.4	列表曲面轮廓零件的数学处理	61
2.4.5	刀位点轨迹的计算	63
	复习思考题	66
第3章	数控加工编程方法	68
3.1	概述	68
3.2	手工编程方法	69
3.2.1	数控车床编程方法及编程实例	69
3.2.2	数控铣床编程方法及编程实例	89
3.2.3	数控线切割机编程方法及编程实例	96
3.2.4	加工中心编程方法及编程实例	105
3.3	自动编程方法	114
3.3.1	概述	114
3.3.2	主要 CAD/CAM 系统简介	114
3.3.3	图形交互编程的主要过程	117
3.3.4	编程实例	118
	复习思考题	123
第4章	计算机数字控制装置	126
4.1	概述	126
4.2	计算机数字控制装置的硬件结构	126
4.2.1	单微处理器结构	126
4.2.2	多微处理器结构	129
4.2.3	开放式数控系统	130
4.3	计算机数字控制装置的软件结构	131
4.3.1	CNC 装置的软件组成	131
4.3.2	CNC 系统软件的工作过程	131
4.3.3	CNC 系统的软件结构特点	133
4.4	数控机床的可编程控制器	135
4.4.1	数控机床中 PLC 实现的功能	135
4.4.2	PLC、CNC 与数控机床的关系	136

4.4.3 PLC 在数控机床上的应用举例	137
4.5 典型的 CNC 系统简介	139
4.5.1 FANUC 公司的主要数控系统	139
4.5.2 SIEMENS 公司的主要数控系统	143
复习思考题	145
第 5 章 数控机床的控制原理	146
5.1 概述	146
5.1.1 插补的基本概念	146
5.1.2 插补方法的分类	147
5.2 逐点比较法	150
5.2.1 逐点比较法直线插补	150
5.2.2 逐点比较法圆弧插补	153
5.2.3 逐点比较法的速度分析	157
5.3 数字积分法	158
5.3.1 DDA 法直线插补	159
5.3.2 DDA 法圆弧插补	162
5.3.3 提高数字积分法插补质量的措施	165
5.3.4 其他函数的 DDA 插补运算	171
5.4 直线函数法	172
5.4.1 直线函数法直线插补	172
5.4.2 直线函数法圆弧插补	173
5.5 扩展数字积分法	174
5.5.1 扩展 DDA 直线插补	175
5.5.2 扩展 DDA 圆弧插补	176
5.6 曲面直接插补	178
5.6.1 实现 SDI 的软件系统结构和工作流程	179
5.6.2 SDI 算法的基本原理	180
5.6.3 SDI 的信息输入	183
5.6.4 曲面直接插补的技术关键	184
5.7 刀具半径补偿	185
5.7.1 B 刀具半径补偿	186
5.7.2 C 刀具半径补偿	187
复习思考题	191
第 6 章 数控机床的检测装置	193
6.1 概述	193

6.1.1	数控机床对检测装置的主要要求	193
6.1.2	位置检测装置分类	194
6.2	旋转变压器	195
6.2.1	旋转变压器的结构	195
6.2.2	旋转变压器的工作原理	196
6.2.3	旋转变压器的应用	199
6.2.4	磁阻式多极旋转变压器简介	199
6.3	感应同步器	200
6.3.1	感应同步器的结构与种类	200
6.3.2	感应同步器的安装	202
6.3.3	感应同步器工作原理	202
6.3.4	感应同步器的特点	205
6.4	光栅	206
6.4.1	光栅的种类与精度	206
6.4.2	光栅的结构与测量原理	208
6.4.3	光栅测量系统	210
6.5	磁栅	212
6.5.1	磁栅的工作原理与结构	212
6.5.2	磁栅位置检测装置的结构类型	217
6.6	编码器	218
6.6.1	接触式编码器	218
6.6.2	光电式编码器	220
6.6.3	电磁式编码器	221
6.6.4	编码器在数控机床中的应用	226
	复习思考题	229
第7章	数控机床的伺服驱动系统	230
7.1	概述	230
7.2	步进电机及其驱动控制系统	232
7.2.1	步进电机的工作原理	232
7.2.2	步进电机的主要特性	234
7.2.3	步进电机的分类	236
7.2.4	步进电机的环形分配器	237
7.2.5	功率放大电路	241
7.3	直流伺服电机及其速度控制	245
7.3.1	直流伺服电机的结构与分类	245

7.3.2	直流伺服电机的调速原理与方法	246
7.3.3	直流伺服电机速度控制单元的调速控制方式	248
7.4	交流伺服电机及其速度控制系统	256
7.4.1	交流伺服电机的分类与特点	256
7.4.2	交流电机控制方式	258
7.4.3	交流伺服电机的变频调速	259
7.4.4	交流伺服电机的矢量控制	263
7.5	直线电机及其在数控机床中的应用简介	266
7.5.1	直线电机的特点	266
7.5.2	直线电机的基本结构和分类	267
7.5.3	直线电机的基本工作原理	269
7.5.4	直线电机在机床上的应用	271
7.6	位置控制	272
7.6.1	相位比较伺服系统	272
7.6.2	幅值比较伺服系统	278
7.6.3	数字脉冲比较伺服系统	279
7.6.4	全数字控制伺服系统	280
	复习思考题	281
第8章	数控机床的机械结构与装置	282
8.1	概述	282
8.1.1	数控机床机械结构的特点	282
8.1.2	数控机床机械结构的基本要求	282
8.2	数控机床主运动系统	290
8.2.1	主传动方式	290
8.2.2	主轴部件的结构	291
8.2.3	主轴部件的支承	291
8.2.4	主轴的准停装置	295
8.2.5	自动换刀装置	296
8.3	数控机床的进给传动系统	299
8.3.1	齿轮传动副	300
8.3.2	滚珠丝杠螺母副	302
8.3.3	齿轮齿条副	305
8.3.4	回转工作台	305
8.4	数控机床的导轨	311
8.4.1	带有塑料层的滑动导轨	311

8.4.2 滚动导轨	312
8.4.3 静压导轨	314
8.5 数控机床的自动换刀装置	314
8.5.1 自动换刀装置	315
8.5.2 刀库	317
8.5.3 刀具交换装置	319
8.6 数控机床的辅助装置	319
8.6.1 液压和气动装置	319
8.6.2 排屑装置	320
8.6.3 其他辅助装置	321
复习思考题	321
第9章 分布式数字控制技术	323
9.1 概述	323
9.1.1 DNC的产生	323
9.1.2 DNC的特点	324
9.1.3 DNC的基本组成	324
9.1.4 DNC的主要功能	325
9.2 DNC系统的结构与控制	327
9.3 DNC系统的通信方式	328
9.3.1 点对点型	328
9.3.2 局域网型	329
9.3.3 现场总线网	330
9.4 DNC系统中的数据采集与信息监视	331
9.4.1 数据采集与信息监视技术	331
9.4.2 信息采集的实现方案与策略	332
9.4.3 OPC原理与规范	334
9.4.4 OPC技术在DNC中的应用	336
9.5 DNC系统实例分析	339
9.6 DNC技术发展趋势	341
复习思考题	342
第10章 柔性制造系统	343
10.1 概述	343
10.1.1 柔性制造系统定义	343
10.1.2 柔性制造系统特点	345
10.2 柔性制造系统基本组成	346

10.2.1 FMS 制造工作站	346
10.2.2 物料储运系统	347
10.2.3 FMS 管理与控制系统	353
10.3 FMS 实例	358
10.3.1 FMS-500 系统概况	358
10.3.2 FMS-500 系统递阶控制结构与系统功能	360
10.3.3 FMS-500 的特点	362
复习思考题	362
参考文献	363

第 1 章 数控技术概论

1.1 数控技术的基本概念

数控技术是综合了计算机、自动控制、电机、电气传动、测量、监控、机械制造等学科领域最新成果而形成的一门边缘科学技术。在现代机械制造领域中,数控技术已成为核心技术之一,是实现柔性制造(flexible manufacturing, FM)、计算机集成制造(computer integrated manufacturing, CIM)、工厂自动化(factory automation, FA)的重要基础技术之一。数控技术较早地应用于机床装备中,本书中的数控技术具体指机床数控技术。

国家标准(GB8129-87)把机床数控技术定义为“用数字化信息对机床运动及其加工过程进行控制的一种方法”,简称数控(numerical control, NC)。数控机床就是采用了数控技术的机床。国际信息处理联盟(International Federation of Information Processing)第五技术委员会对数控机床作了如下定义:“数控机床是一个装有程序控制系统的机床,该系统能够逻辑地处理具有使用代码,或其他符号编码指令规定的程序。”换言之,数控机床是一种采用计算机,利用数字信息进行控制的高效、能自动化加工的机床,它能够按照机床规定的数字化代码,把各种机械位移量、工艺参数、辅助功能(如刀具交换、冷却液开与关等)表示出来,经过数控系统的逻辑处理与运算,发出各种控制指令,实现要求的机械动作,自动完成零件加工任务。在被加工零件或加工工序变换时,它只需改变控制的指令程序就可以实现新的加工。所以,数控机床是一种灵活性很强、技术密集度及自动化程度很高的机电一体化加工设备。

随着自动控制理论、电子技术、计算机技术、精密测量技术和机械制造技术的进一步发展,数控技术正向高速度、高精度、智能化、开放型以及高可靠性等方向迅速发展。

1.2 机床数控技术的组成

机床数控技术由机床本体、数控系统和外围技术组成,如图 1-1 所示。

1.2.1 机床本体

机床本体主要由床身、立柱、工作台、导轨等基础件和刀库、刀架等配套件组

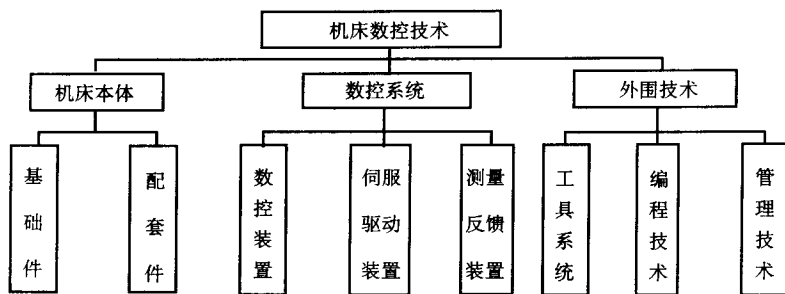


图 1-1 数控技术的组成

成。数控机床由于切削用量大、连续加工发热量大等因素,对加工精度有一定影响。数控加工是自动控制,不能像普通机床那样由人工进行调整、补偿。数控机床的主运动、进给运动都由单独的伺服电机驱动,所以传动链短、结构较简单。为保证数控机床的快速响应特性,数控机床普遍采用精密滚珠丝杠和直线滚动导轨副。为保证数控机床的高精度、高效率和高自动化加工,机械结构应具有较高的动态特性、动态刚度、抗变形性能、耐磨性。除此之外,数控机床还配备有冷却、自动排屑、对刀、测量等配套装置,以利于更大地发挥数控机床的功能。

1.2.2 数控系统

数控系统是一种程序控制系统,它能逻辑地处理输入到系统中的数控加工程序,控制数控机床运动并加工出零件。

图 1-2 所示为数控系统的基本组成。它由输入输出装置、计算机数控 (computer numerical control, CNC) 装置、可编程控制器 (programmable logic control, PLC)、主轴伺服驱动装置、进给伺服驱动装置以及检测装置等组成。

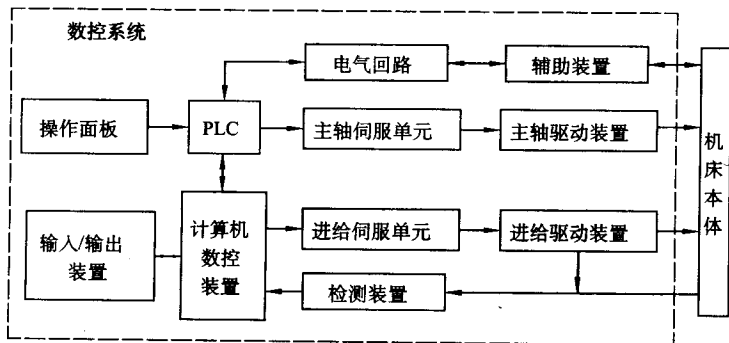


图 1-2 数控系统组成

1) CNC 装置

CNC 装置是数控系统的核心。在一般的数控加工过程中,首先启动 CNC 装置,在 CNC 内部控制软件的作用下,通过输入装置或输入接口读入零件的数控加工程序,并存放到 CNC 装置的程序存储器内。开始加工时,在控制软件作用下,将数控加工程序从存储器中读出,按程序段进行处理,先进行译码处理,将零件数控加工程序转换成计算机能处理的内部形式,将程序段的内容分成位置数据和控制指令,并存放到相应的存储区域,最后根据数据和指令的性质进行各种流程处理,完成数控加工的各项功能。

输入装置可以通过多种方式获得数控加工程序。早期数控机床,通过读取穿孔纸带上的信息获得编写好的数控加工程序;目前可以通过 MDI(manual data input)方式直接从键盘输入和编辑数控加工程序,更多的是通过软驱、USB 接口、RS232C 接口等获得数控加工程序。有些高档的数控装置本身就包含一套自动编程系统或 CAD/CAM 系统,只需键盘输入相应的零件几何信息和加工信息,就能生成数控加工程序。

CNC 装置通过编译和执行内存中的数控加工程序来实现多种功能。CNC 装置一般具有以下基本功能:坐标控制(XYZAB 代码)功能、主轴转速(S 代码)功能、准备功能(G 代码)、辅助功能(M 代码)、刀具(T 代码)功能、进给(F 代码)功能,以及插补功能、自诊断功能等。有些功能可以根据机床的特点和用途进行选择,如固定循环功能、刀具半径补偿功能、通信功能、特殊的准备功能(G 代码)、人机对话编程功能、图形显示功能等。不同类型、不同档次的数控机床,其 CNC 装置的功能有很大的不同。CNC 系统制造厂商或供应商会向用户提供详细的 CNC 功能和各功能的具体说明书。详细内容将在后续各章介绍。

2) 伺服驱动装置

伺服驱动装置又称伺服系统,它是 CNC 装置和机床本体的联系环节,它把来自 CNC 装置的微弱指令信号通过调解、转换、放大后驱动伺服电机,通过执行部件驱动机床运动,使工作台精确定位或使刀具与工件按规定的轨迹作相对运动,最后加工出符合图纸要求的零件。数控机床的伺服驱动装置分为主轴驱动单元(主要是转速控制)、进给驱动单元(包括位移和速度控制)、回转工作台和刀库伺服控制装置以及它们相应的伺服电机等。伺服系统分为步进电机伺服系统、直流伺服系统、交流伺服系统、直线伺服系统。步进电机伺服系统比较简单,价格又低廉,所以在经济型数控车床、数控铣床、数控线切割中仍有使用;直流伺服系统从 20 世纪 70 年代到 80 年代中期,在数控机床上获得了广泛的应用。但由于直流伺服系统使用机械(电刷、换向器)换向,维护工作量大。80 年代后,由于交流伺服电机的材料、结构、控制理论和方法均有突破性的进展,电力电子器件的发展又为控制方法的实现创造了条件,使得交流伺服电机驱动装置发展很快,目前正在取代直流伺服

系统。该系统的最大优点是电机结构简单、不需要维护、适合于在恶劣环境下工作。此外,交流伺服电机还具有动态响应好、转速高和容量大等优点。当今,在交流伺服系统中,除了驱动级外,电流环、速度环和位置环可以全部采用数字化控制。伺服系统的控制模型、数控功能、静态补偿、前馈控制、最优控制、自学习功能等均由微处理器及其控制软件高速实时地实现,使得其性能更加优越,已达到和超过直流伺服系统。直线伺服系统是一种新型高速、高精度的伺服机构,已开始数控机床中使用。

3) 测量反馈装置

测量反馈装置主要用于闭环和半闭环系统。检测装置检测出实际的位移量,反馈给 CNC 装置中的比较器,与 CNC 装置发出的指令信号比较,如果有差值,就发出运动控制信号,控制数控机床移动部件向消除该差值的方向移动。不断比较指令信号与反馈信号,然后进行控制,直到差值为 0,运动停止。

常用检测装置有旋转变压器、编码器、感应同步器、光栅、磁栅、霍尔检测元件等。

4) 可编程控制器

在数控系统中除了进行轮廓轨迹控制和点位控制外,还应控制一些开关量,如主轴的启动与停止、冷却液的开与关、刀具的更换、工作台的夹紧与松开等,主要由可编程控制器来完成。

1.2.3 外围技术

外围技术主要包括工具系统(主要指刀具系统)、编程技术和管理技术。

1.3 数控加工零件的过程

在数控机床上加工零件时,要事先根据零件加工图纸的要求确定零件加工路线、工艺参数和刀具数据,再按数控机床编程手册的有关规定编写零件数控加工程序,然后通过输入装置将数控加工程序输入到数控系统,在数控系统控制软件的支持下,经过处理与计算后,发出相应的控制指令,通过伺服系统使机床按预定的轨迹运动,从而进行零件的切削加工。数控机床加工零件的过程如图 1-3 所示。

在数控机床上加工零件的整个工作过程如下:

1) 零件图工艺处理

拿到零件加工图纸后,应根据图纸,对工件的形状、尺寸、位置关系、技术要求进行分析,然后确定合理的加工方案、加工路线、装夹方式、刀具及切削参数、对刀点、换刀点,同时还要考虑所用数控机床的指令功能。

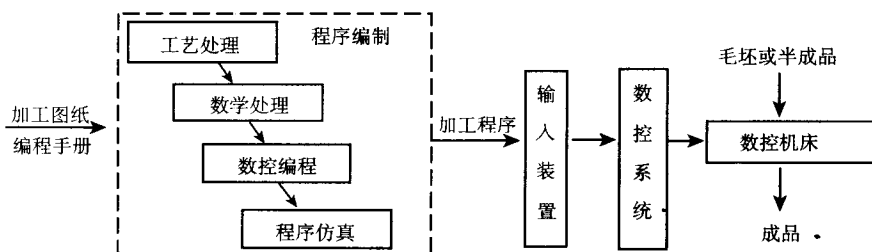


图 1-3 数控机床的工作过程

2) 数学处理

在工艺处理后,应根据加工路线、图纸上的几何尺寸,计算刀具中心运动轨迹,获得刀位数据。如果数控系统有刀具补偿功能,则只需要计算出轮廓轨迹上的坐标值。

3) 数控编程

根据加工路线、工艺参数、刀位数据及数控系统规定的功能指令代码及程序段格式,编写数控加工程序。程序编完后,可存放在控制介质(如软盘、磁带)上。

4) 程序输入

数控加工程序通过输入装置输入到数控系统。目前采用的输入方法主要有软驱、USB 接口、RS232C 接口、MDI 手动输入、分布式数字控制(direct numerical control, DNC)接口、网络接口等。数控系统一般有两种不同的输入工作方式:一种是边输入边加工,DNC 即属于此类工作方式;另一种是一次将零件数控加工程序输入到计算机内部的存储器,加工时再由存储器一段一段地往外读出,软驱、USB 接口即属于此类工作方式。

5) 译码

输入的程序中含有零件的轮廓信息(如直线的起点和终点坐标;圆弧的起点、终点、圆心坐标;孔的中心坐标、孔的深度等)、切削用量(进给速度、主轴转速)、辅助信息(换刀、冷却液开与关、主轴顺转与逆转等)。数控系统按一个程序段为单位,按照一定的语法规则把数控程序解释、翻译成计算机内部能识别的数据格式,并以一定的数据格式存放在指定的内存区内。在译码的同时还完成对程序段的语法检查,一旦有错,立即给出报警信息。

6) 数据处理

数据处理程序一般包括刀具补偿、速度计算以及辅助功能的处理程序。刀具补偿有刀具半径补偿和刀具长度补偿。刀具半径补偿的任务是根据刀具半径补偿值和零件轮廓轨迹计算出刀具中心轨迹。刀具长度补偿的任务是根据刀具长度补偿值和程序值计算出刀具轴向实际移动值。速度计算是根据程序中所给的合成进