

〔美〕罗杰 S. 普雷斯曼 约翰 E. 维廉斯 著

北京航空学院制造工程教研室 译

李哲浩 校

数字控制与 计算机辅助制造

国防工业出版社

数字控制与计算机辅助制造

〔美〕 罗杰S.普雷斯曼 著
约翰E.维廉斯

北京航空学院制造工程教研室 译

李哲浩 校

国防工业出版社

9573 6/

内 容 简 介

全书共分十章。第一、二、三、四、五章重点介绍通用数控装置的基本概念,自动控制系统的基本原理和数学方法。第六、七、八章着重介绍数控系统的软件。第九、十章论述数控过程的优化以及计算机辅助制造系统的主要内容和 development 趋向。每章后附有参考文献和习题。

本书阐述比较简明系统,对实际应用也作了介绍,并列举了一些具体实例。

本书可作为大专院校制造工程专业的教学参考书,也可供从事数控技术工作的技术人员参考。

Numerical Control and Computer-Aided Manufacturing

Roger S. Pressman

John E. Williams

John Wiley & Sons 1977

数字控制与计算机辅助制造

【美】

罗杰S. 普雷斯曼 著

约翰E. 威廉斯 著

北京航空学院制造工程系教研室 译

李哲 校

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $10\frac{1}{8}$ 253 千字

1982年11月第一版 1982年11月第一次印刷 印数: 0,001—6,900册

统一书号: 15034·2425 定价: 1.25元

译者的话

全国工作重点向四个现代化建设转移之后，在我国机械制造业中，数控技术必将得到日益广泛的应用。为了适应教学、研究以及生产的需要，我们翻译了此书。本书比较系统地介绍了数字控制与计算机辅助制造技术的主要问题。分别阐述了有关硬件、软件、数控过程优化及计算机辅助制造系统的主要内容和发
展趋向。并对一些问题通过实例作了讲解。

由于我们业务水平所限，译文中难免存在一些不足之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 数字控制引论..... 1

1.1 人和机器..... 1

1.2 数字控制..... 3

1.3 数控机床..... 5

1.3.1 定位..... 5

1.3.2 控制系统..... 8

1.3.3 通讯媒体..... 9

1.3.4 数控机床的结构.....10

1.4 数控的应用.....10

1.4.1 金属切削机床.....11

1.4.2 自动绘图.....11

1.4.3 电子组件.....13

1.4.4 质量控制与检验.....13

1.4.5 数控的其它应用.....15

1.5 现状与发展趋向.....16

参考文献.....17

第二章 控制系统的基本原理.....18

2.1 控制系统的概念.....19

2.1.1 自动控制.....19

2.1.2 开环控制.....21

2.1.3 闭环控制.....22

2.1.4 系统响应.....23

2.2 反馈控制系统的元件.....23

2.2.1 方框图.....24

2.3 传递函数.....25

2.3.1 传递函数举例.....27

2.4 控制数学引论.....28

2.4.1 控制系统方程.....28

2.4.2	运算符——拉氏变换	28
2.4.3	表列变换式应用举例	30
2.4.4	举例说明二阶方程的求解	31
2.4.5	部分分式展开	32
2.4.6	部分分式应用举例	33
2.4.7	传递函数与运算表达式	35
2.4.8	控制系统传递函数	35
2.5	系统稳定性	38
2.5.1	动态响应例题	38
2.5.2	利用根轨迹法判别稳定性	40
2.6	控制系统举例	42
2.6.1	决定系统响应的参数	46
	参考文献	48
	习题	48
第三章	数控机床的控制系统	53
3.1	数控系统的元件	54
3.1.1	机床控制装置	54
3.1.2	数控回路中的反馈	56
3.1.3	位置和速度反馈	59
3.1.4	灵敏度	60
3.2	反馈元件概述	63
3.2.1	传感器	63
3.2.2	功率放大器及驱动器	64
3.2.3	误差信号的识别	65
3.3	点位控制系统	67
3.3.1	点位系统的速度控制	68
3.3.2	定位误差	68
3.4	轮廓控制系统	70
3.4.1	轮廓系统的元件	70
3.4.2	插补	70
3.4.3	轮廓轨迹速度——补充考虑	77
3.5	点位系统与轮廓系统之间的差别	79
3.6	一个典型数控系统的分析	79
3.6.1	命令信号和误差检测	79
3.6.2	轮廓系统中的形状误差	82

VI

3.6.3 系统性能和时间常数 τ	85
------------------------------	----

3.6.4 系统带宽和转角误差	87
-----------------------	----

参考文献	89
------------	----

习题	90
----------	----

第四章 数控系统的元件	93
-------------------	----

4.1 用于数控机床的传感器	94
----------------------	----

4.1.1 传感器类型	94
-------------------	----

4.1.2 直线式传感器	94
--------------------	----

4.1.3 旋转式传感器	94
--------------------	----

4.1.4 分解器	95
-----------------	----

4.1.5 编码器	96
-----------------	----

4.1.6 传感器的配置	98
--------------------	----

4.1.7 传感器的信号处理	98
----------------------	----

4.2 数控执行系统概述	99
--------------------	----

4.3 电气机械式执行系统	100
---------------------	-----

4.3.1 步进电机	100
------------------	-----

4.3.2 直流电动机	101
-------------------	-----

4.3.3 电功率放大	105
-------------------	-----

4.4 液压执行系统	107
------------------	-----

4.4.1 液压动力源	107
-------------------	-----

4.4.2 液压执行机构	108
--------------------	-----

4.4.3 液压功率放大	110
--------------------	-----

4.5 气动执行系统	112
------------------	-----

4.5.1 气压动力源	112
-------------------	-----

4.5.2 气动执行机构	113
--------------------	-----

4.5.3 气动功率放大	113
--------------------	-----

4.6 执行系统的比较	115
-------------------	-----

4.7 数控电子学基础	116
-------------------	-----

4.7.1 与门和或门	116
-------------------	-----

4.7.2 与非门和或非门	118
---------------------	-----

4.7.3 触发器电路	119
-------------------	-----

4.7.4 脉冲的产生	120
-------------------	-----

4.7.5 缓冲存储器	121
-------------------	-----

4.7.6 二进制计数电路	122
---------------------	-----

参考文献	123
------------	-----

习题	123
----------	-----

第五章 数控机床设计考虑的问题126

5.1 普通机床和数控机床在设计上的差别126

5.1.1 控制系统设计考虑的问题127

5.1.2 机械设计考虑的问题127

5.1.3 总的设计标准127

5.2 数控系统的无效运动128

5.3 无效运动的来源129

5.3.1 背隙129

5.3.2 机床构件的扭转130

5.3.3 说明计算扭转和无效运动的例子131

5.3.4 变形132

5.3.5 说明刚度对无效运动影响的一个例子133

5.3.6 机床溜板的摩擦134

5.3.7 爬行现象示例135

5.3.8 与切削力有关的数控设计问题136

5.4 数控机床的振动138

5.4.1 机床的共振138

5.4.2 固有频率计算示例141

5.4.3 机床的颤振141

5.4.4 颤振补偿144

5.5 伺服机构的设计特点145

5.5.1 执行系统的响应145

5.5.2 功率放大器的响应147

5.5.3 放大器的稳定性148

5.6 数控对调整刀具的技术要求150

5.7 公制化和数控系统151

参考文献153

习题153

第六章 数控系统的输入和输出156

6.1 信息接口156

6.2 媒体类型156

6.2.1 穿孔卡156

6.2.2 穿孔带158

6.2.3 磁性媒体	159
6.2.4 计算机传输的数控数据	161
6.3 符号代码	162
6.3.1 二进制展开的例子	163
6.3.2 二-十进制代码	164
6.3.3 美国信息交换标准代码(ASCⅡ)	165
6.4 纸带输入格式	166
6.5 机床控制装置与外界的通信	168
6.6 基本的数控输入数据	169
6.6.1 顺序号	169
6.6.2 准备功能	170
6.6.3 辅助功能	171
6.6.4 刀具功能	171
6.6.5 幻-3 码	173
6.6.6 说明幻-3 码的例子	174
6.6.7 反比时限码	174
6.7 有关功能规范的一些说明	176
6.7.1 进给速度	176
6.7.2 下切误差	177
6.7.3 计算过冲的一个例子	179
6.7.4 恒定的表面速度	179
6.8 数控输入的校验	181
6.8.1 加工代用材料	181
6.8.2 图形验证	182
参考文献	183
习题	184

第七章 数控程序编制 188

7.1 手工程序编制方法	188
7.1.1 坐标系的命名	189
7.1.2 手工计算坐标数据示例	189
7.1.3 数控程序的类型	190
7.1.4 点位式操作举例	190
7.2 点位式程序编制的应用	191
7.3 连续轨迹程序编制的应用	193
7.3.1 容差对曲线逼近的影响举例	195

7.3.2 圆弧逼近的其它方法	195
7.3.3 圆弧插补	197
7.3.4 抛物线插补	197
7.3.5 刀具轨迹的偏置	197
7.4 简单几何图形的手工编程	199
7.5 计算机辅助数控编程	204
7.5.1 计算机化的零件程序	205
7.5.2 处理程序	205
7.5.3 后置处理程序	205
7.6 一种简易的零件编程语言——SPPL	206
7.6.1 SPPL 几何语句举例	209
7.6.2 SPPL 程序的翻译	210
7.6.3 运动语句和特殊语句指令	211
7.6.4 一个 SPPL 程序	212
7.7 后置处理程序	216
7.7.1 减速时间的计算	218
7.7.2 后置处理程序的辅助功能	219
7.8 工业中的程序语言——APT	222
参考文献	227
习题	227

第八章 数字控制中应用的数字 233

8.1 数控中的解析几何	234
8.1.1 直线-圆弧计算	234
8.1.2 确定圆弧	237
8.2 计算机辅助分析	240
8.3 外形的拟合过程	243
8.3.1 数学样条	243
8.3.2 参数样条	244
8.3.3 参数样条一例	248
8.3.4 插补与法线	249
8.3.5 插补与偏置的例子	251
8.3.6 样条在数控中的应用	253
8.4 曲面	253
8.4.1 解析曲面	253

X

8.4.2 数控语言中解析曲面的实现	254
8.4.3 二次曲面语句举例	255
8.5 自由曲面	256
8.5.1 多变量曲线插值	256
8.5.2 双三次曲面块	258
8.5.3 计算M矩阵的例子	261
8.5.4 数控语言中自由曲面的实现	262
参考文献	263
习题	264

第九章 过程最优化

9.1 适应控制	267
9.1.1 优化适应控制	268
9.1.2 适应控制数控系统	269
9.2 适应数控系统的组成部分	272
9.2.1 约束修正方式	273
9.2.2 优化方式	274
9.2.3 最速上升法	275
9.2.4 序贯单形寻优法	275
9.3 适应控制用的检测方法	276
9.3.1 适应控制的测试设备	277
9.3.2 空程和断续切削	279
9.4 切削加工性	279
9.4.1 切削加工性数据与数控	280
9.4.2 切削加工性数据和适应控制	282
9.5 计算机化的切削加工性系统	282
9.5.1 数学模拟程序	283
9.5.2 数据库系统	283
9.5.3 综合的切削加工性系统——EXAPT	284
参考文献	286
习题	286

第十章 计算机辅助制造

10.1 计算机辅助制造分级结构	288
10.2 计算机辅助制造中的数字控制	290

10.3 计算机辅助制造的组成部分	291
10.3.1 计算机辅助制造的数据库	291
10.3.2 生产管理	293
10.3.3 制造控制	294
10.4 计算机管理的数控系统	295
10.5 计算机化的数字控制 (CNC)	296
10.5.1 计算机数控的功能要素	296
10.5.2 软件插补	297
10.5.3 计算机数控的优点	298
10.6 直接数字控制 (DNC)	299
10.6.1 直接数控系统的结构	300
10.6.2 读带机旁路系统	301
10.6.3 具有专用机床控制的直接数控系统	302
10.6.4 直接数控系统的比较	303
10.7 可编程序的机床误差补偿	305
10.7.1 轴向校准	305
10.7.2 实时误差补偿	307
10.7.3 维修能力	307
10.8 计算机辅助制造系统中的监测	307
10.8.1 监测要求	308
10.8.2 信号采集技术	309
10.9 计算机辅助制造的趋势	310
参考文献	311

第一章 数字控制引论

人被说成是使用工具的动物。在人区别于其他动物的特征之中，有一种能制做扩展自己本领的复杂装置的能力。被称为机器的这些装置，曾在整个历史上影响着人类物质进步的速度。机器的发展可归因于它固有的增殖能力。即已有的工具能用来制造更先进的工具，而后者又有助于加速发展的进程。

1.1 人和机器

最初的一些机床，据认为早在 2500 年前就已经创造出来了。这些早期的旋转装置，使工匠能用木材或其他硬质材料来制造复杂的圆形件。虽然这些早期的机床扩大了人们制造复杂形状的能力，但直到十四世纪，才创造出最初的简易精密机床。由德东狄 (Giovanni De Dondi) (1318~1389) 设计的靠机械重力传动的钟，促进了最初的一些真正的机床，如螺纹车床的产生。工业革命的到来，大大加速了机床的发展，在十八世纪后半叶，瓦特蒸汽机的发展，促使对新的装置和金属切削工具的精度提出要求。

1798 年，惠特尼 (Eli Whitney) 和美国政府签订了生产 12000 支滑膛枪的合同，并约定每支枪的零件可以互换。这个约定要求对制造进行控制，这是从未尝试过的。惠特尼和他的同事们，在康涅狄格州纽黑文市他的工厂里，设计了用于进行锻造、镗孔、磨削、抛光及滚轧等工序的水力机械。惠特尼创造了在当时成为一种优质标志的精密制造方法。

由惠特尼首先应用的制造原理，后来被科尔特 (Samuel Colt) 和鲁特 (Elisha Root) 在康涅狄格州哈特福德市他们的武器制造厂中应用和发展了。到了 1855 年，安装的机床已有 1,400 多台。鲁特专门设计了许多切削刀具、钻模和夹具，而科尔特兵

工厂则用当时所能达到的最高精度生产武器，鲁特的两个雇员普拉特 (Francis Pratt) 和惠特尼 (Amos Whitney) 接着建立了一个公司，现在已经成为生产数控机床的一个大厂了。

在十九世纪后半叶，对金属切削机床进行了重大的改进。早期的机床如林肯 (Lincoln) 铣床 (图 1.1 所示) 被不断加以改进，以提高生产率。提高产量的愿望，导致了 1873 年第一台自动控制机床——斯宾塞 (C. M. Spencer) 的自动车床的研制。斯宾塞用他所定名的“智能轮” (brain wheel) 促进了自动化的诞生。

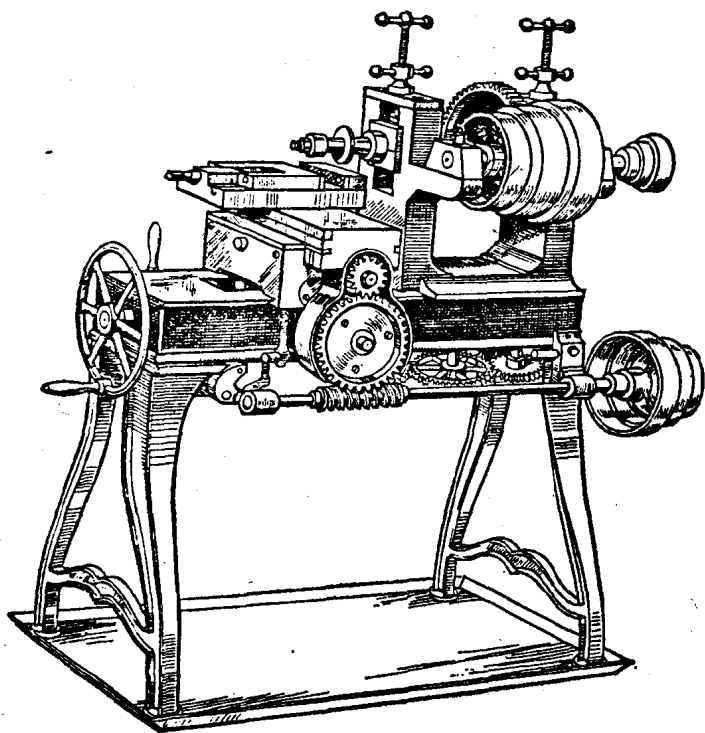


图1.1 林肯铣床——早期的一种机床

到了1900年,美国的机械加工车间所装备的基本机床与今天所用的机床,在功能上和形式上都没多大差别。英国的和美国的汽车制造业相继推动研制性能更好的机床。到了1914年,福特汽车公司每年生产一百多万辆“Ts型”的汽车。只不过五十多年,大规模生产已经成为一种不可少的方式了。

1.2 数字控制

到了本世纪,机床发展得更自动化了,从而排除了操作工人对加工过程的干预。而且,由于自动化程度已经得到提高,机床也就必然地更加专门化了。一台每天可生产两万个零件的高度自动化的机床,一般只能生产品种有限的零件。直到最近,样件和小批生产还在用手工操作的普通机床制造。

随着新的难加工材料的出现和精度高达万分之一的公差要求,这就使技术最好的工人也力不能及。上述要求再加上适应加工零件品种多变的需要,促成了一种自动机床的控制形式,一般称为数字控制〔本书及工程文献中通常简称为数控(NC)〕。

数控的历史始于四十年代后期,当时由帕森斯(John T. Parsons)提出要研究一种自动机床的控制方法,用以引导铣刀加工出光滑的曲线。他设想的方案是,把坐标点的代码打在穿孔卡上,然后输入到机床的控制器中去,使一台改装过的铣床,按照微小增量的步距移动来得到需要的轨迹。到了1949年,美国空军委托麻省理工学院的伺服机构实验室,根据帕森斯的概念研究一种实用的数控系统。

麻省理工学院的科学家和工程师们选用穿孔带作为通讯媒体,开始时制成了一台两坐标的点位系统,使钻头能按坐标定位。随后,又研制出一台更复杂的连续轨迹数控铣床。接着,一些其他的机床制造厂也研制成当时可供采用的许多数控系统。

到了1957年,最初一批成功的数控机床用于生产。然而,许多用户都碰到编制零件的加工程序以输入机床控制器的困难。为

了解决这个问题，麻省理工学院开始研究一种以计算机为依据的零件编程语言，称为 APT——自动编程工具。其目的是要设计一种符号语言，使零件编程人员能以简易的方式来表达数学关系（见第七章）。在 1962 年发表了第一套用于一般工业生产的 APT 编程系统。

数控技术在以下两个主要方面得到发展：硬件的发展集中在改进控制系统和机床。到了 1965 年，在所有主要的机床品种中都有了较完善的数控机床和控制系统；软件的发展集中在改进 APT 语言，以及发展其它的数控编程系统。

在七十年代里，总的基本观点开始改变，数控技术被看作是一个更大概念——计算机辅助制造（CAM）的一部分。CAM 不仅包括数控加工，而且还包括生产管理和监控，材料管理和计划进度等。由于强调在制造过程中使用计算机，发展了新的数控方式：计算机数控（CNC）和直接数控（DNC）。数控技术继续发展下去，科学小说中所曾设想的那些可能性，现在已被认为是可以达到的目标了。

在不适于用其他专门自动装置的地方，使用数控技术最有效。数控是一种系统，它能译解一套以某种符号形式预先记录的指令；它能使所控制的机床执行这些指令；然后还能监控执行的结果，以保持要求的精度和功能。

数控不是一种机床，而是一种能控制多种机械的技术。因此，数控已应用于装配机械、检验设备、绘图机、排字机、木材加工机床（这里只提几种应用），以及金属切削机床。因为数控最初是为机床而发展起来的，又由于数控金属切削机床包括了全部数控应用的绝大部分，所以在本书中只论述数控机床。

数控系统形成一个通讯链，它与一般的通讯过程有许多相似之处。图 1.2 所示为一最重要的数控系统单元的简图。指令输入到一个电子控制装置中进行译码，并执行所需要的逻辑运算，再输出准确的命令去控制机床的工作。许多数控系统包含有传感装

置，用以将机床的实际状态回输给控制装置。正是这种反馈，使控制器能够校核机床的工作与输入的符号指令是否一致。

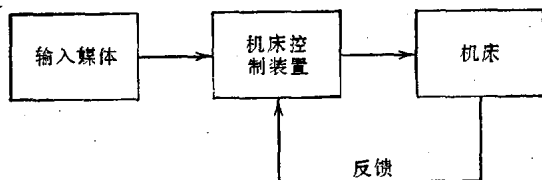


图1.2 一种数控系统的简图

1.3 数控机床

前面已经定义数控是一种自动控制的方法，它用符号编码的指令，使机床完成一系列规定的工作。这些指令中以位置指令最为重要。

1.3.1 定位

现代的数控系统，虽可完成许多功能，但最重要的控制功能是使用一种坐标系，对切削刀具作静态的或动态的定位。这个坐标系要有足够的通用性，以确定任何的几何运动。

图 1.3 所示的右手笛卡尔坐标系为在三维空间确定任何一个点提供了一种简单的方法。虽然所有数控机床都利用一种坐标系，但有些只需要两轴向（ x 和 y ）运动，而另一些则需要三维的直线和角向的坐标轴。在本书中使用的是三维笛卡尔坐标系。

参见图 1.3，点 P_1 是由坐标（1，2，2）确定的，图中每个平面的分格表示一个单位。同样，点 P_2 是由坐标（3，3，4）确定的。在三维空间中分格的数目可以增大，以便在预定边界内的任何点都能用可数的单位数来表示。

在纯笛卡尔坐标系中，每根轴都可无限细分。与此不同，一个数控的坐标系，只能作有限数目的细分。在后面的一章会