

航空高等院校教材

数控加工程序编制

(航空机械加工工艺学之三)

范炳炎 编



航空专业教材编审组

介 前 容 目 内

介 前 容 目 内

数控加工程序编制

(航空机械加工工艺学之三)

范炳炎 编

航空专业教材编审组

1983年3月

内 容 简 介

本书为航空机械加工专业的专业教材,由于篇幅较大,分为三册出版,各分册均可单独使用。第一分册为机械加工工艺过程设计原理,第二分册为机床夹具设计,第三分册为数控加工程序编制。

本分册内容共分七章,除介绍数控加工和程序编制的概念、程编中的工艺处理、典型机床的程编方法外,着重介绍直线-圆弧轮廓零件、非圆曲线的数学处理,列表曲线和曲面的处理方法,以及数控语言(APT)应用和计算机自动编程等内容。

本书除作为高等院校的教学用书外,也可供从事有关专业的技术人员参考。

数 控 加 工 程 序 编 制

(航空机械加工工艺学之三)

范 炳 炎 编

*

航空专业教材编审组出版
南京航空学院印刷厂印装

787×1092 1/16 印张 12.625 323.24 千字

1984年3月第一版 1984年3月第一次印刷 印数 7000 册

统一书号: 32177j 定价: 1.32 元

前 言

《航空机械加工工艺学》是根据航空高等院校航空机械加工工艺专业的要求编写的。航空机械加工工艺课程目前正处在改造、更新和发展的过渡阶段。为了使教材内容和航空工业生产更好地结合起来,书中除保留机械加工工艺方面的有用的传统性内容之外,更注意到了数控加工和计算机辅助制造学科的发展。为此,较大幅度地增加了数控加工程序编制的内容,并且设置专门章节介绍计算机辅助制造(CAM)系统的内容。

全书分成工艺过程设计原理、机床夹具设计和数控加工程序编制三部分。工艺过程设计原理部分包括制订工艺路线的原则和方法,工序尺寸的计算和尺寸图表的应用,影响加工精度的因素和确定加工误差的方法,表面层的物理-机械性能和表面光洁度,以及计算机辅助制造系统等内容。机床夹具设计部分包括工件的定位原理、定位方法和定位件设计,手动和机动夹紧装置、自动定心、分度和靠模装置,典型夹具的构造和设计方法,以及组合夹具等内容。数控加工程序编制部分包括程编的工艺处理,点位和直线系统的程编方法,直线-圆弧轮廓零件的数学处理和程编方法,列表曲线和曲面的处理以及数控语言和计算机自动编程介绍等内容。

本书第一版出版于1980年7月,这次是修改后的第二版。全书三部分仍分成三个分册出版,各分册的内容相对独立,均可单独使用。全书共计六十五万字,附有实例和习题等。除有关高校学生外,本书亦可供从事有关专业的技术人员参考。

第一分册工艺过程设计原理由北京航空学院柯明扬、唐梓荣编写,第二分册机床夹具设计由西北工业大学戴陆武、曹绳德、马修德编写,第三分册数控加工程序编制由南京航空学院范炳炎编写。全书由北京航空学院唐梓荣担任主编,西北工业大学戴陆武和南京航空学院范炳炎担任副主编。

沈阳航空工业学院、南昌航空工业学院、西北工业大学、南京航空学院和北京航空学院的有关专业教师参加了本书编写大纲的讨论,提出了不少宝贵的意见。在此,谨向他们表示衷心的感谢。

本书第三分册《数控加工程序编制》由北京航空学院戴约真副教授负责审稿,对原稿提出了不少宝贵意见。另外,在编写过程中还得到南京航空学院五〇一教研室李健康副教授,五一厂万仲庄、禹宝康、江建娥和张玲姑工程师以及其他许多同志的指导和帮助;在图稿设计和描图方面得到朱凤英和符惠英同志的帮助。对此,谨向他们表示深切的谢意。

本书的大部分内容虽经多次的教学实践,并在实践中不断修改补充,但由于水平有限,编写时间又很仓促,书中难免有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1983年3月

目 录

第一章 数控加工程序编制概论

- § 1—1 数控加工的基本概念.....(1)
- § 1—2 什么是程序编制.....(7)
- § 1—3 程序编制的内容和步骤.....(11)
- § 1—4 程序编制方法的选择.....(13)

第二章 程序编制中的工艺处理

- § 2—1 程序编制中的工艺分析.....(16)
- § 2—2 程编中工艺指令的处理.....(26)

第三章 数控钻镗床和加工中心的程序编制

- § 3—1 钻镗床的程序编制.....(31)
- § 3—2 加工中心的程序编制.....(37)

第四章 数控车床的程序编制

- § 4—1 数控车床程编概述.....(43)
- § 4—2 数控车床的程编方法.....(44)
- § 4—3 数控车床程编实例.....(54)

第五章 数控铣床的程序编制

- § 5—1 直线-圆弧轮廓零件的程编方法.....(60)
- § 5—2 平面轮廓零件程编中的数学处理.....(64)
- § 5—3 尖角过渡和切入程序.....(73)
- § 5—4 轮廓零件数控加工程编实例.....(86)
- § 5—5 简化数控铣床程编功能的应用.....(88)

第六章 列表曲线和曲面的机助程编

- § 6—1 列表曲线和曲面的特点及其处理概述.....(98)
- § 6—2 列表曲线轮廓零件的机助程编.....(99)
- § 6—3 列表曲面机助程编简介.....(138)

第七章 数控语言的应用和程编方法的发展

- § 7—1 用数控语言实现机助程编的概述.....(148)
- § 7—2 数控语言(APT)介绍.....(149)

§ 7—3	数控语言应用实例.....	(175)
§ 7—4	数控语言系统概貌.....	(179)
§ 7—5	机助编程方法的发展.....	(183)

附录:

表1	EIA 和ISO标准代码表.....	(188)
表2	APT 的专用字.....	(192)
(1 )	.....	8-1-1
(2 )	.....	8-1-2
(3 )	.....	8-1-3
(4 )	.....	8-1-4
(5 )	.....	8-1-5
(6 )	.....	8-1-6
(7 )	.....	8-1-7
(8 )	.....	8-1-8
(9 )	.....	8-1-9
(10 )	.....	8-1-10
(11 )	.....	8-1-11
(12 )	.....	8-1-12
(13 )	.....	8-1-13
(14 )	.....	8-1-14
(15 )	.....	8-1-15
(16 )	.....	8-1-16
(17 )	.....	8-1-17
(18 )	.....	8-1-18
(19 )	.....	8-1-19
(20 )	.....	8-1-20
(21 )	.....	8-1-21
(22 )	.....	8-1-22
(23 )	.....	8-1-23
(24 )	.....	8-1-24
(25 )	.....	8-1-25
(26 )	.....	8-1-26
(27 )	.....	8-1-27
(28 )	.....	8-1-28
(29 )	.....	8-1-29
(30 )	.....	8-1-30
(31 )	.....	8-1-31
(32 )	.....	8-1-32
(33 )	.....	8-1-33
(34 )	.....	8-1-34
(35 )	.....	8-1-35
(36 )	.....	8-1-36
(37 )	.....	8-1-37
(38 )	.....	8-1-38
(39 )	.....	8-1-39
(40 )	.....	8-1-40
(41 )	.....	8-1-41
(42 )	.....	8-1-42
(43 )	.....	8-1-43
(44 )	.....	8-1-44
(45 )	.....	8-1-45
(46 )	.....	8-1-46
(47 )	.....	8-1-47
(48 )	.....	8-1-48
(49 )	.....	8-1-49
(50 )	.....	8-1-50
(51 )	.....	8-1-51
(52 )	.....	8-1-52
(53 )	.....	8-1-53
(54 )	.....	8-1-54
(55 )	.....	8-1-55
(56 )	.....	8-1-56
(57 )	.....	8-1-57
(58 )	.....	8-1-58
(59 )	.....	8-1-59
(60 )	.....	8-1-60
(61 )	.....	8-1-61
(62 )	.....	8-1-62
(63 )	.....	8-1-63
(64 )	.....	8-1-64
(65 )	.....	8-1-65
(66 )	.....	8-1-66
(67 )	.....	8-1-67
(68 )	.....	8-1-68
(69 )	.....	8-1-69
(70 )	.....	8-1-70
(71 )	.....	8-1-71
(72 )	.....	8-1-72
(73 )	.....	8-1-73
(74 )	.....	8-1-74
(75 )	.....	8-1-75
(76 )	.....	8-1-76
(77 )	.....	8-1-77
(78 )	.....	8-1-78
(79 )	.....	8-1-79
(80 )	.....	8-1-80
(81 )	.....	8-1-81
(82 )	.....	8-1-82
(83 )	.....	8-1-83
(84 )	.....	8-1-84
(85 )	.....	8-1-85
(86 )	.....	8-1-86
(87 )	.....	8-1-87
(88 )	.....	8-1-88
(89 )	.....	8-1-89
(90 )	.....	8-1-90
(91 )	.....	8-1-91
(92 )	.....	8-1-92
(93 )	.....	8-1-93
(94 )	.....	8-1-94
(95 )	.....	8-1-95
(96 )	.....	8-1-96
(97 )	.....	8-1-97
(98 )	.....	8-1-98
(99 )	.....	8-1-99
(100 )	.....	8-1-100
(101 )	.....	8-1-101
(102 )	.....	8-1-102
(103 )	.....	8-1-103
(104 )	.....	8-1-104
(105 )	.....	8-1-105
(106 )	.....	8-1-106
(107 )	.....	8-1-107
(108 )	.....	8-1-108
(109 )	.....	8-1-109
(110 )	.....	8-1-110
(111 )	.....	8-1-111
(112 )	.....	8-1-112
(113 )	.....	8-1-113
(114 )	.....	8-1-114
(115 )	.....	8-1-115
(116 )	.....	8-1-116
(117 )	.....	8-1-117
(118 )	.....	8-1-118
(119 )	.....	8-1-119
(120 )	.....	8-1-120
(121 )	.....	8-1-121
(122 )	.....	8-1-122
(123 )	.....	8-1-123
(124 )	.....	8-1-124
(125 )	.....	8-1-125
(126 )	.....	8-1-126
(127 )	.....	8-1-127
(128 )	.....	8-1-128
(129 )	.....	8-1-129
(130 )	.....	8-1-130
(131 )	.....	8-1-131
(132 )	.....	8-1-132
(133 )	.....	8-1-133
(134 )	.....	8-1-134
(135 )	.....	8-1-135
(136 )	.....	8-1-136
(137 )	.....	8-1-137
(138 )	.....	8-1-138
(139 )	.....	8-1-139
(140 )	.....	8-1-140
(141 )	.....	8-1-141
(142 )	.....	8-1-142
(143 )	.....	8-1-143
(144 )	.....	8-1-144
(145 )	.....	8-1-145
(146 )	.....	8-1-146
(147 )	.....	8-1-147
(148 )	.....	8-1-148
(149 )	.....	8-1-149
(150 )	.....	8-1-150
(151 )	.....	8-1-151
(152 )	.....	8-1-152
(153 )	.....	8-1-153
(154 )	.....	8-1-154
(155 )	.....	8-1-155
(156 )	.....	8-1-156
(157 )	.....	8-1-157
(158 )	.....	8-1-158
(159 )	.....	8-1-159
(160 )	.....	8-1-160
(161 )	.....	8-1-161
(162 )	.....	8-1-162
(163 )	.....	8-1-163
(164 )	.....	8-1-164
(165 )	.....	8-1-165
(166 )	.....	8-1-166
(167 )	.....	8-1-167
(168 )	.....	8-1-168
(169 )	.....	8-1-169
(170 )	.....	8-1-170
(171 )	.....	8-1-171
(172 )	.....	8-1-172
(173 )	.....	8-1-173
(174 )	.....	8-1-174
(175 )	.....	8-1-175
(176 )	.....	8-1-176
(177 )	.....	8-1-177
(178 )	.....	8-1-178
(179 )	.....	8-1-179
(180 )	.....	8-1-180
(181 )	.....	8-1-181
(182 )	.....	8-1-182
(183 )	.....	8-1-183
(184 )	.....	8-1-184
(185 )	.....	8-1-185
(186 )	.....	8-1-186
(187 )	.....	8-1-187
(188 )	.....	8-1-188
(189 )	.....	8-1-189
(190 )	.....	8-1-190
(191 )	.....	8-1-191
(192 )	.....	8-1-192
(193 )	.....	8-1-193
(194 )	.....	8-1-194
(195 )	.....	8-1-195
(196 )	.....	8-1-196
(197 )	.....	8-1-197
(198 )	.....	8-1-198
(199 )	.....	8-1-199
(200 )	.....	8-1-200

第一章 数控加工程序编制概论

数控机床是五十年代初期发展起来的一种新型自动化机床，它对复杂型面零件的加工，对单件、小批生产的自动化都具有重要作用。

五十年代初期，航空工业、舰船制造、武器生产等工业部门在产品上出现了不少加工形状比较复杂，改型频繁和精度要求高的零件。这类零件的加工，靠传统手工操作，不但劳动强度大，生产周期长，而且精度不容易保证。有些复杂的曲面零件，手工操作甚至已无能为力。由于数控机床的出现和发展，现在对于那些过去用手工加工需要花费很大劳动量的复杂零件，已能借助电子计算机高速运算处理制作数控带，然后用它控制机床，在短时间内以满意的精度把零件加工出来。数控机床和电子计算机已经成为航空工业等部门中必不可少的设备。

本书的目的是尽可能具体而详细地介绍数控加工程序编制方面的基础知识。为了使读者便于理解数控加工程序编制，本章首先简介数控加工和数控机床的一些知识和概念。

§ 1—1 数控加工的基本概念

一、什么是数控加工

数控加工，顾名思义是在数控机床上进行加工的一种工艺方法。也就是说在控制方法上它与一般加工方法有所不同。大家都知道，在普通机床上进行加工时，为了达到预定的加工要求，总要对机床的动作进行控制，一是控制机床动作的先后次序，另一是控制机床各种运动部件的位移量，以此达到加工的工艺要求。例如加工图 1—1 所示的台阶轴，图中表明了工件的安装方法、刀具的起始位置以及走刀路线（按①、②、…⑧的顺序进行）。在普通车床上加工此工件时，从刀具快速接近工件，对加工面进行切削，一直到快速退回等一系列的机床动作，都是由人工手动操作的方式来完成。若在一般自动车床、靠模车床上加工，虽不需要人对它进行操作，但这些机床的动作都是由事先做好的凸轮、靠模、挡块等装置自动进行控制的。而在数控车床上加工时，机床的这些动作要求（刀具运动轨迹、主轴转速、进给速度、行程距离等）则是以一定的数字形式，预先记录在数控带（通常是穿孔纸带）上。加工时，穿孔纸带上记录的数字信息传送给用于控制机床的控制机，控制机便根据输入的信息进行运算和控制，并向机床的伺服机构发送脉冲信号，伺服机构对其进行转换和放大，再通过一套传动机构（如滚珠丝杆）使机床各运动部件按规定的程序、速度和位移量进行动作，从而加工出符合要求的零件。因此不难看出，数控

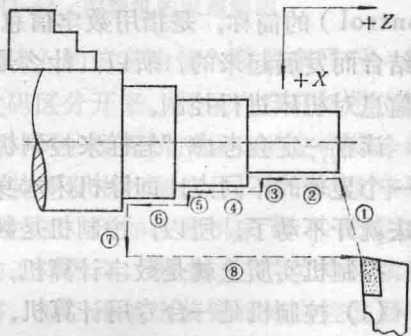


图1—1 台阶轴的加工

加工与一般加工方法的不同点在于：数控加工是以穿孔纸带作为机床自己能“阅读”的工艺卡片，用控制机和伺服机构代替人的大脑和双手的部分功能，控制全部加工过程。

综上所述，采用数控机床加工零件，从零件图纸到加工出合格的产品，大体上需经过下列几个主要环节（图 1—2）：

- (1) 根据零件图纸，按规定的代码（数字、字母和符号）编写加工程序单；
- (2) 根据程序单制作穿孔纸带；
- (3) 穿孔纸带上的数字信息经纸带阅读机输入控制机；
- (4) 控制机将输入信息进行运算处理后转换成驱动伺服机构的指令信号；
- (5) 由伺服机构控制机床的各种动作。

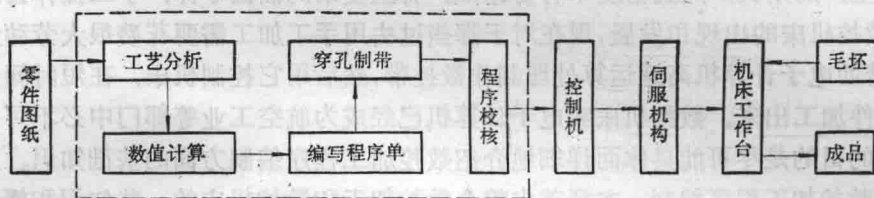


图 1—2 数控机床加工零件的过程

图 1—2 为用数控机床加工零件过程的示意图。程序校核以前的诸环节（虚框中的内容）称为程序编制，自控制机起到机床工作台这几个部分即构成数控机床。

二、什么是数控机床

要知道什么是数控机床，首先要了解什么是数控。“数控”是数字控制（Numerical Control）的简称，是指用数字信息来控制一台或多台机械的动作。数控是与机床的控制密切结合而发展起来的。所以，什么是数控机床呢？最简单的解释是：主要是用纸带穿孔的数字信息对机床进行控制。

读者一定会考虑“怎样来控制机床？”。大家都知道，数控机床从外观上看与普通机床有一个显著的不同点，即除机床本身外还有一个通常称之为控制机的装置。若控制机坏了，机床就开不动了。所以，控制机是数控机床的一个重要组成部分。

控制机实质上就是数字计算机，就对单台机床控制而言，控制机有两类：

(1) 控制机是一台专用计算机，其特点一是“专用”，就是说用于铣床的控制机不能用于控制其他机床；另一是它的控制功能是由逻辑电路实现的。现在一般称为数控装置的就是这类控制机，用它控制的机床叫 NC 机床。

(2) 控制机是通用计算机（小型计算机等），用它控制机床，即计算机数控（CNC——Computer Numerical Control 的缩写）。这是近年来迅速发展的一类数控系统，具有许多优越性。

计算机数控系统主要特点是用一台小型计算机代替通常的数控装置。所以输入信息的存储、数据的加工、插补运算以及各种控制功能都通过计算机由软件来完成，并能增加很多用逻辑电路难以实现的功能。计算机和机床及其驱动、强电等设备之间只要采用一种接口设备联接即可，所以它的通用性及适应性较强。当被控制的机床或控制功能改变时，只要改变其

软件和接口即可。

计算机数控系统还具有存储能力。零件加工程序可以一次性经光电阅读机输入给存储器，以后使用时，只要从计算机存储器内调出零件加工程序去控制机床，而不再要光电阅读机随机工作。这样不仅节省了倒带时间，更主要的是可以减少由于光电阅读机起动频繁而造成的差错。

此外，CNC 系统通过各种软件程序能对整个工作包括程序编制方法、程序纸带的编辑方法等方面都有其优越性，是一般数控系统所不能比拟的。

从数控机床使用的角度来说，无论用哪一类控制机，在加工前，首先要对被加工零件进行编程，即将设计图纸上的零件形状和尺寸等变换成控制机能接受的形式，并且绝大多数都是以穿孔纸带作为将全部数字信息传送给控制机的一种手段。如图 1—3 所示，纸带从光源灯下面通过时，有孔的部分可以通过光线而射向光敏元件，使它产生电流而将穿孔的代码传送到控制机内部的电路中去。

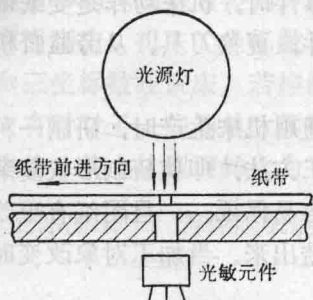


图 1—3 光电纸带阅读机

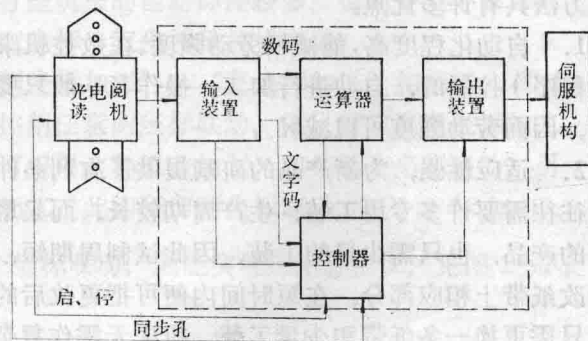


图 1—4 控制机的原理结构

图 1—4 所示为一般控制机的方框图。光电阅读机读入的信息由输入装置来译码，其主要功能是用以识别穿孔纸带上的代码，并将文字码和数码区分开来。记录在穿孔纸带上的数字信息有二类：一类主要用来表示机床坐标位置的数码；另一类是机床操作的文字指令码。输入的数码供给运算器，运算器一面运算，一面向输出装置发出控制信号。输入的文字码，则不经过运算器，直接进入控制器，实现对机床的各种控制，例如控制机床部件的运动方向、进给速度等等；控制器的另一个作用是控制整机的工作循环，例如控制光电阅读机的启、停，控制运算器的运算，控制输出脉冲的分配等等。最后由输出装置将来自控制器和运算器的指令信息传送到各执行机构（伺服机构）。

由输出装置发出的脉冲信号，是一种不连续的数字量。而机床工作台的位移是一种连续的模拟量，为此就需要一个中间转换环节，即伺服机构。所以伺服机构的作用，就是接受控制机发出的进给脉冲信号，并把它转换成模拟量（如转角等），经功率放大后通过机床的进给传动机构——滚珠丝杆去驱动机床工作台。因此可知，控制机在单位时间内发出的脉冲数就表示工作台的移动速度（进给速度），而全部脉冲则表示工作台的总位移量。例如 1 个脉冲相当于使工作台移动 0.01 毫米，当总位移量为 150 毫米时，则需 15000 个脉冲。因此，控制机能够根据纸带上的数字信息，使工作台精确定位或按规定的轨迹作严格的相对运动，最终加工出符合要求的零件。

最常用的伺服机构是电液脉冲马达，它通过滚珠丝杆与工作台连接，驱动工作台运动。

综上所述，控制机控制机床加工的过程大致是这样的：当光电阅读机将穿孔纸带上的一段程序读完后，输入指令通过控制器关闭阅读机，由于控制器获得加工指令，于是便控制运算器运算，使机床进行加工；运算器不断进行偏差计算，就不断地确定出刀具或工件进给的方向，从而通过伺服机构使机床逐步加工出要求的轮廓形状。当加工到该段程序终点坐标时，运算器关闭，控制器又启动阅读机，开始读入下一段程序，进行另一线段的加工。这样循环下去直至全部加工结束，整个控制系统停机。由此可知，数控机床的加工运动基本上是不停顿地进行着，而穿孔纸带的移动则是断续的。

三、数控加工的应用

在一般机械工业，尤其是航空工业中，多品种、小批量和生产过程自动化的要求之间的矛盾是十分突出的。采用数控加工方法是解决这种矛盾行之有效的途径之一。这是因为数控加工方法具有许多优点：

1. 自动化程度高，能减轻劳动强度。在数控机床上加工零件时，机床动作是受纸带上信息（程序）控制的，自动进行加工。操作者一般只要装卸零件，更换刀具，从旁监督机床的运行，因而劳动强度可以减轻。

2. 适应性强，为新产品的研制提供了有利条件。采用通用机床生产时，研制一种新产品，往往需要许多专用工装，生产周期较长。而采用数控加工方法，即使研制形状复杂、精度高的产品，也只需少量的工装，因此试制周期短，精度也容易保证。一旦图纸有更改，只需修改纸带上相应部分，在短时间内便可把更改后的零件制造出来。当加工对象改变时，一般也只需更换一条纸带和少量工装，机床无需作复杂调整。

3. 能提高加工精度，稳定加工质量。由于数控机床加工完全是自动控制的，人为误差小，所以加工精度与质量比较稳定。此外，数控加工的重复精度很高，即一批中从首件到最后一件，尺寸的一致性很好。

4. 具有高的生产效率。由于数控机床使用了液压或电动伺服马达和精密滚珠丝杆，所以机床主轴转速和进给速度比普通机床的调节范围大，数控机床的刚性也大，提供了提高切削用量的可能性。

此外 由于数控机床加工常采用标准定位夹紧装置，缩短了生产准备时间和减少夹具调整时间；由于通常只进行首件检查，检验时间也可以减少。总之，数控机床加工，利用程序编制使机床发挥最大能力和减少非生产性时间，所以从缩短加工时间等方面看，大幅度提高了生产率。

5. 适于用计算机控制。为了适应机械工业，尤其是航空工业多品种、小批量生产的需要，将要发展计算机辅助制造系统，而数控机床和数控加工就是这种系统的基础。

四、数控加工中一些常用术语的含义

在采用数控加工时，为了了解数控机床技术性能和程序编制，往往要碰到下列一些术语：

1. 两坐标，三坐标

在数控机床中，要进行位移量控制的部件较多，故要建立坐标系，以便分别进行控制。目前大多采用直角坐标系。一台数控机床，所谓的坐标数是指有几个运动采用了数字控

制。图 1—5 所示例子说明：图 1—5a) 是一台数控车床， X 和 Z 方向的运动采用了数字控制，所以是一台两坐标机床；图 1—5b) 所示的铣床是 X 、 Y 、 Z 三个方向的运动都能进行数

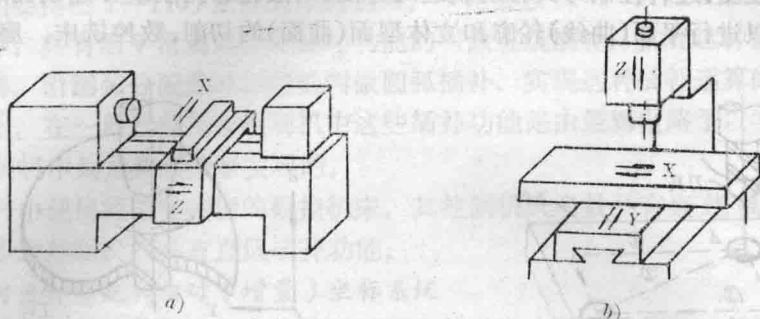


图 1—5 两坐标机床与三坐标机床

控，则它就是一台三坐标的数控铣床。有些机床的运动部件较多，在同一坐标轴方向上会有两个或更多的运动是数控的，所以还有四坐标、五坐标数控机床等。

应当指出，机床的坐标数不要与“两坐标加工”、“三坐标加工”相混淆。图 1—5b) 是一台三坐标数控铣床，若控制机只能控制任意两坐标联动，则只能实现两坐标加工，见图 1—6；有时对于一些简单立体型面，也可采用这种机床加工，即某两个坐标联动，另一坐标周期进给，将立体型面转化为平面轮廓加工，此即所谓两坐标联动的三坐标加工，亦叫

“ $2\frac{1}{2}$ 坐标加工”。若控制机能控制三个坐标联动，则能实现三坐标加工，见图 1—7。

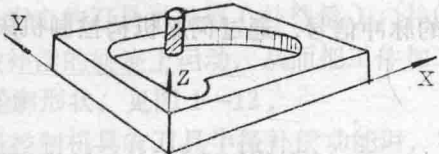


图 1—6 两坐标轮廓加工

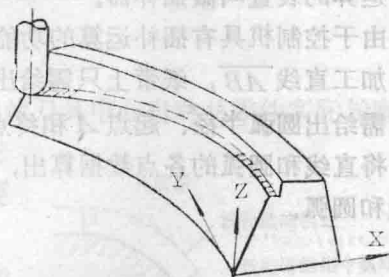


图 1—7 三坐标曲面加工

2. 点位控制和轮廓控制

数控机床就其功能来说，一般分为点位控制和轮廓控制两种：

1) 点位控制 刀具从某一位置向另一位置移动时，不管中间的移动轨迹如何，只要刀具最后能准确到达目标位置的控制方式叫做点位控制。如采用数控钻镗床加工如图 1—8 所示的零件上 A 、 B 两孔，当 A 孔加工后，从 A 孔位置向 B 孔位置移动刀具时，可采用①、②、③中的任意一种轨迹。这样，即使移动中的速度和轨迹不同，只要正确地移动到最终目标位置上即可。

采用点位控制的机床有：数控钻床，数控镗床等。

在实际中，还有一种“点位加直线切削控制”。它与点位控制的主要区别是：除了要控制位移终点的坐标位置外，还要保证被控制的两坐标位置间位移轨迹是平行某一坐标轴的直

线，并在直线位移过程中进行切削。如图 1—1 台阶轴的数控车削加工就属此类。

2) 轮廓控制 铣削图 1—9 所示的凸轮零件时，需要控制刀具每个位置的 X 、 Y 坐标的切削方向和进给速度。这种控制刀具移动轨迹的方法，叫做轮廓控制或称连续轮廓控制。利用这种控制功能可以进行平面(曲线)轮廓和立体型面(曲面)的切削。数控铣床、磨床等属此类。

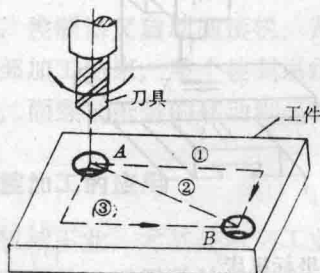


图 1—8 点位控制加工

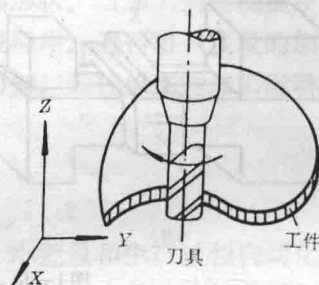


图 1—9 轮廓控制加工

3. 插补、直线插补和圆弧插补

一个零件的形状往往看起来很复杂，实际上大多数是由一些简单几何元素——直线、圆弧等构成。数控机床是如何加工出直线、圆弧的呢？例如加工图 1—10 所示的一段圆弧，已知条件仅是该圆弧的起点 A 和终点 B 的坐标，圆心 O 坐标及半径 R ，要想把圆弧段 $\widehat{AB}$ 光滑地描绘出来，必须把圆弧段 A 、 B 之间诸点的坐标值计算出来，把这些点填补到 A 、 B 之间，通常把这种“填补空白”的工作称为插补。把计算插补点的运算称为插补运算，把实现插补运算的装置叫做插补器。

由于控制机具有插补运算的功能，所以穿孔纸带上打的信号孔数很少。如图 1—11 所示，加工直线 $\overline{AB}$ ，纸带上只需给出直线起终点 A 和 B 的坐标信息；加工圆弧 $\widehat{AB}$ ，纸带上只需给出圆弧半径、起点 A 和终点 B 的坐标，控制机就能根据纸带上的信息进行插补运算，将直线和圆弧的各点数据算出，并发出相应的脉冲信号，通过伺服机构控制机床加工出直线和圆弧。

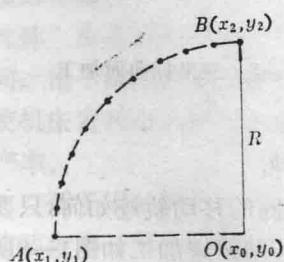


图 1—10 “插补”的概念

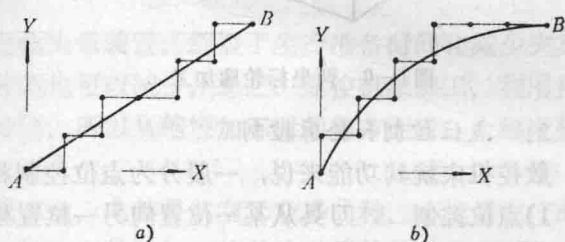


图 1—11 直线插补与圆弧插补

由图 1—11 清楚地看出，在加工直线、圆弧等的轮廓控制中，刀具中心从 A 到 B 点移动时，仅仅是寻求格点（即以每个脉冲当量使工作台产生最小移动量的单位运动的合成）来实现刀具移动的。所以不能丝毫不偏离地寻走平滑的直线或圆弧，也就是在寻走平滑直线或圆弧时，是通过如图 1—11 a)、b) 那样非常接近于平滑直线或圆弧的格点的单位运动使其

逼近于轮廓线的。

由前述知,由控制机根据纸带上的信息来控制对各坐标轴的脉冲分配比例而得到所希望的轨迹。例如要得图 1—11a) 所示斜率的直线,一定要按 $X \cdot Y \cdot X \cdot Y \cdot X \cdot X \cdot Y \cdot X \cdot Y \cdot X$ 的顺序分配脉冲。具有沿平滑直线分配脉冲功能的叫做直线插补,实现这种插补运算的装置叫做直线插补器。沿圆弧分配脉冲功能的叫做圆弧插补,实现这种插补运算的装置叫做圆弧插补器。应指出,在一般数控机床控制机中这些插补功能是由逻辑电路予以实现;而在计算机数控机床控制机中则是靠软件来实现的。

现在生产中使用的轮廓控制的数控机床,其控制机大多数具有直线插补和圆弧插补功能,但也有少数控制机只具有直线插补功能。

4. 绝对坐标系统和相对(增量)坐标系统

1) 绝对坐标系统是指工作台位移是从固定的基准点开始计算的。例如,假设程序规定工作台沿 X 坐标方向移动,其移动距离为离固定基准点 100 毫米,那么不管工作台在接到命令前处于什么位置,它接到命令后总是移动到程序规定的位置处停下来。

2) 相对(增量)坐标系统是指工作台的位移是从工作台现有位置开始计算的。在这里,对一个坐标轴虽然也有一个起始的基准点,但是它仅在工作台第一次移动时才有意义,以后的移动都是以工作台前一次的终点为起始的基准点。例如,设第一段程序规定工作台沿 X 坐标方向移动,其移动距离是离起始点 100 毫米,那么工作台就移动到 100 毫米处停止,下一段程序规定在 X 方向再移动 50 毫米,那么工作台到达的位置离原起始点就是 150 毫米了。

点位控制的数控控制机有的是绝对坐标系统,有的则是相对(增量)坐标系统,也有的两种都有,可以任意选用。轮廓控制的控制机一般都是相对坐标系统。编程时应注意到不同的坐标系统,其输入要求不同(见第三章)。

5. 刀具半径补偿(刀具偏移运算)

所谓刀具半径补偿,就是具有这种功能的控制机能使刀具中心自动从零件实际轮廓上偏离一个指定的刀具半径值(补偿量),并使刀具中心在这一被补偿的轨迹上运动,从而把工件加工成图纸上要求的轮廓形状,见图 1—12。

当控制机具有刀具半径补偿功能时,在程编时不考虑加工所用的刀具半径,直接按照零件的实际轮廓形状来编制数控带的程序指令;而在加工时,把实际采用的刀具半径值由“刀具半径拨码盘”拨入,系统自动地算出每个程序段在各坐标方向的补偿量。

实际上,刀具半径补偿仅仅是刀具补偿功能中的一种,还有刀具长度补偿等。有关刀具半径补偿的用法见后述。

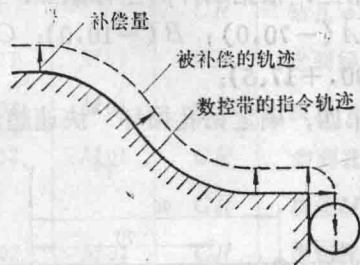


图1—12 刀具半径补偿的概念

§ 1—2 什么是程序编制

由图 1—2 知,我们常把穿孔纸带、程序校核以前各部分统称为数控加工程序编制。

由图看出,首先是分析零件图纸上零件形状、尺寸和技术要求等,结合控制机的指令系统,给这个零件编制加工程序,穿孔制带,然后将纸带上的数字信息输入控制机,以控制机

床加工出零件。数控机床所以能加工出各种各样形状、不同尺寸和精度的零件,就是因为有不同的加工程序。所以数控加工程序的编制是数控机床使用中最重要的一环。

那么,什么是程序编制呢?大家知道,在普通机床上加工零件时,是用工艺规程或工艺卡来规定每道工序操作程序和加工用量,操作者按工艺卡上规定的“程序”加工零件;在一般自动车床或靠模机床上加工零件,事先要设计和制造凸轮和靠模,零件的加工过程由凸轮或靠模控制。所以上述根据零件图纸要求编制工艺卡、设计制造凸轮或靠模,也是一种程序编制的工作。

在数控机床加工零件时，就要把被加工零件的全部工艺过程、工艺参数和位移数据，以数字信息的形式记录在穿孔纸带上，用它控制机床加工。而操作者的工作只是装卸刀具和工件，安装纸带，调整机床原点，按动开关以及从旁监督加工进行情况。

由上述知, 从分析零件图纸起, 到获得数控机床所需穿孔纸带的全过程称为程序编制。

在程编过程中,用来记录工艺过程、工艺参数和位移数据的表格称为“零件加工程序单”或简称“程序单”。它是制备纸带的依据。所以,程编中最关键一环是如何根据零件图纸正确地编写出程序单。至于穿孔制带,则是程序单以穿孔代码表示的一种方式,它是按照程序单在纸带上准确而迅速地穿孔制作出来的。下面通过对一个具体例子的讨论,熟悉一下“程序单”,知道它是如何来记录零件加工工艺过程、工艺参数和位移数据的。

例:在数控钻镗床上加工图 1—13 所示的零件,在其上只加工五个孔,其中两个是螺孔。程编过程如下:

第一, 根据零件加工的要求, 确定装夹方法和对刀点。对刀点往往就是数控加工的起点, 程序就是从这一点开始的。在加工过程中需要换刀, 所以还需要规定换刀点。图中“O”点为工件的坐标原点。

第二, 确定加工 (走刀) 路线的顺序: 对刀点→孔 A→孔 B→孔 C→孔 D→孔 E→换刀点→孔 D (攻丝)→孔 E (攻丝)。

第三, 根据工件的坐标原点, 按照绝对坐标系换算各孔位置尺寸的坐标值, 换算结果是: $A(-70.0)$; $B(-10.0)$; $C(+10, -5)$; $D(0, -96.2)$; $E(-60, -80)$; 对刀点 $(-90, +17.5)$ 。

第四, 确定钻孔循环“快速趋近→工作进给→快速退回”的行程长度, 见图 1—14。攻

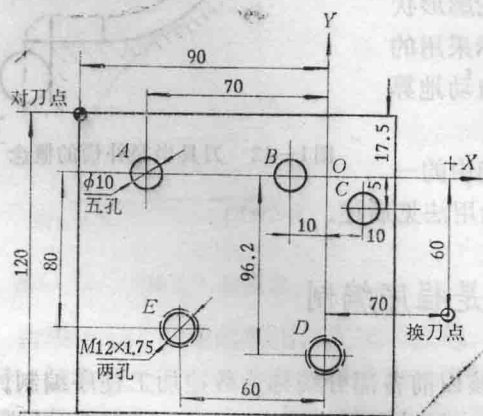


图1—13 数控钻镗床上加工的例子

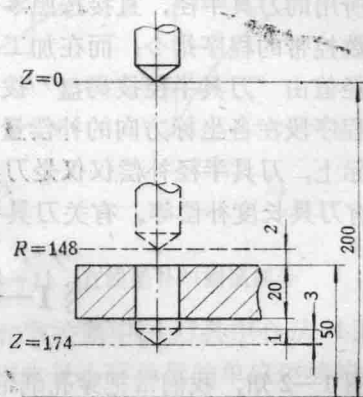


图1—14 轴向尺寸的确定

丝循环与钻孔循环的区别在于：当工作进给至终点时主轴（丝锥）要反转，然后仍以工作进给（每转移动一个螺距）的速度退出工件。

第五，确定切削用量

主轴转数：钻孔为 880 转/分；攻丝为 170 转/分。

进给速度：钻孔为 0.125 毫米/转=110 毫米/分，空行程时为 600 毫米/分；攻丝为 1.75 毫米/转=297.5 毫米/分。

第六，根据上面计算、选定的数值，按加工路线的顺序填写程序单(表1—1)

表1—1 程 序 单

序号 N	准备 功能 G	坐 标				进给速度 F	主轴转数 S	刀具号 T	辅助功能 M	程序段 结 束 CR/ER	备 注
		X	Y	Z	R						
001		-90	+17.5							CR	对原点
002	G81	-70				600		T01	M01	CR	走到孔 A
003				174	148	110	880			CR	钻孔 $\phi 10$
004	G81	-10				600		T01	M01	CR	走到孔 B
005				174	148	110	880			CR	钻 孔 $\phi 10$
006	G81	+10	-5			600		T01	M01	CR	走到孔 C
007				174	148	110	880			CR	钻 孔 $\phi 10$
008	G81		-96.2			600		T01	M01	CR	走到孔 D
009				174	148	110	880			CR	钻 孔 $\phi 10$
010	G81	-60	-80			600		T01	M01	CR	走到孔 E
011				174	148	110	880			CR	钻 孔 $\phi 10$
012		+70	-60			600		T01	M01	CR	走到换刀点
013								T02	M01	CR	换刀
014	G84		-96.2			600		T02	M01	CR	走到孔 D
015				174	148	297.5	170			CR	攻丝 M12
016	G84	-60	-80			600		T02	M01	CR	走到孔 E
017				174	148	297.5	170			CR	攻丝 M12
018	G80								M02	ER	程序完

第七，根据程序单，制备穿孔纸带，用它控制机床加工出零件。

从这份程序单中可以看出，从机床开始启动到零件加工完毕，程序结束，每一个动作都作了规定。正因加此，程序单中不能漏掉或写错任何一个细小的过程。必须严格按照所用机床规定的程序格式填写“程序单”中每一个符号、字母和数字，否则控制机就不能正常运算，机床也就无法加工出符合要求的零件。

表 1—1 是一份点位钻镗床的程序单，共有十八条程序，每一条习惯上称为一个程序段。每一程序段是按规定的次序书写的，其格式和内容随控制机不同而异，一般表为

N $\Delta\Delta\Delta$ G $\Delta\Delta$ X $\pm\Delta\Delta\cdots\Delta$ Y $\pm\Delta\Delta\cdots\Delta$ Z $\pm\Delta\Delta\cdots\Delta$ 其他坐标 $\cdots$
F $\Delta\Delta$ S $\Delta\Delta$ T $\Delta\Delta$ M $\Delta\Delta$ 其他附加指令 CR

每个程序段起始是程序段顺序号，以字母 N 和三位数字($\Delta\Delta\Delta$)表示，接着是准备功能指令，由字母 G 和两位数字组成。常用的准备功能指令见表 1—2。第二部分内容是各坐标的运动尺寸，对于多坐标系，其顺序是 X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R、I、J、K、A、B、C、D、E（它们的含义见附录表 1）。第三部分内容是一些工艺性指令，包括坐标进给速度、主轴转数、刀具号和辅助功能指令。常用的辅助功能指令见表 1—3。如果还有其他附加指令则列于辅助功能指令之后。最后是程序段结束代码 CR（有时也有用其他符号）。

表 1—2 常用 G 功能代码

表 1—3 常用 M 功能代码

代 码	功 能
G00	点位控制
G01	直线插补
G02	顺时针方向圆弧插补
G03	逆时针方向圆弧插补
G04	暂停(延迟)
G17	XY 平面选择
G18	ZX 平面选择
G19	YZ 平面选择
G33	螺纹切削，等螺距
G34	螺纹切削，增螺距
G35	螺纹切削，减螺距
G36~G39	保留作控制用
G40	取消刀具偏移
G41	刀具左偏
G42	刀具右偏
G60~G79	保留用于点位系统
G80	取消固定循环
G81~G89	固定循环并 1~并 9
G90	绝对坐标编程
G91	相对坐标编程

代 码	功 能
M00	程序停机
M01	任选停机
M02	程序结束
M03	主轴顺时针方向旋转
M04	主轴逆时针方向旋转
M05	主轴停转
M06	换 刀
M07	开 2 号冷却液
M08	开 1 号冷却液
M09	关闭冷却液
M10	夹 紧
M11	松 开
M13	主轴顺转并开冷却液
M14	主轴逆转并开冷却液
M15	正向(+)运动
M16	负向(-)运动
M30	纸带终了
M31	旁路互锁
M32~M35	恒切削速度
M40~M45	可用于变换齿轮，否则不用

上述程序段的格式是：一个程序段内由一组开头是英文字母、后面是数字（有的数字前面有数符）组成信息单元——“字”，每个“字”是根据字母来确定其意义。这样的英文字母称为“字地址”，这种程序段格式叫做“字地址格式”。例如：N001 X+1000 Y+20⁰ Z+50 F30 M03 CR，“N001”表示第一个程序段，“X+1000 Y+2000 Z+50”分别表示 X、Y、Z 坐标方向的移动量，“F30”为进给速度，“M03”表示主轴顺时针方向旋转，“CR”表示程序段结束。

字地址格式的特点是：程序段内包含何种信息一目了然；程序有错误时便于订正；容易校验程序。

目前国内外的控制机几乎都采用字地址格式。

通过上面的例子，使我们更清楚地了解什么是程序编制：首先对零件图纸进行工艺分析。在分析的基础上作出各种处理（如确定加工路线，选择刀具、切削用量等等），然后进行必要的计算。在上述分析和计算的基础上编制出如表 1—1 所示的程序单。最后，制成穿孔纸带以便控制机床加工。

程编工作在数控加工中的重要性是非常明显的，这是因为程编工作的好坏直接影响到数控机床的使用和数控加工的特点的发挥。

这里还应指出，从事航空机械加工工艺人员不仅仅需要了解数控加工程编工作，而且其中一些人要专门从事程编工作。程编工作处于整个数控加工中最重要的地位。程编人员必须通晓机床、刀具、控制机的性能及其使用，而且应当清楚了解所在工厂的生产特点和生产习惯等。

§ 1—3 程序编制的内容和步骤

程序编制主要包括如下八方面的工作：

1. 分析被加工零件的图纸；
2. 制订零件数控加工工艺过程；
3. 选择或设计工夹具；
4. 计算出机床控制机所需的输入数据；
5. 编写出零件加工程序单；
6. 制备穿孔带；
7. 校对、校验程序纸带；
8. 首件的试切削加工。

在生产中，完成上述工作方法（即程编方法）不尽相同，目前主要有两种程编方法：

一种是上述八方面工作几乎都由人来作，叫做手工程编（人工程编）。尽管可以采用一些高效的计算工具，甚至在编制一些较复杂的零件程序时也可用通用电子计算机进行数值计算工作，但是从写算式、记数据、填写程序单直至手工穿孔、校对需要大量的人工工作。

另一种是将八方面工作中一部分，转由通用电子计算机来完成。例如控制机所需输入数据的计算、程序单编排以及穿孔制带等都可由计算机代替人工进行。这种方法叫做计算机辅助程编（简称机助程编）或叫自动程编。其特点是效率高，而且编出的程序质量亦高。这是因为应用计算机进行处理可以避免象手工程编中各种各样的差错。

不管是手工程编还是机助程编，按其工作的顺序和性质，可将程编八方面工作分为三个阶段，即工艺处理阶段、数学处理（数值计算）阶段和制备纸带阶段。

一、工艺处理阶段

程编人员首先要根据零件图纸对零件进行工艺分析，明确加工内容及技术要求。在此基础上才能确定零件的加工方式和路线，并确定加工用量等工艺参数，为必要的数学处理作准备。