

数控职业技能培训系列教程

数控 编程技术

主 编 王爱玲
副主编 孙旭东

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



职业院校课程改革系列教材

数控

编程技术

主编 王 强
副主编 王 强

机械工业出版社



TG659
W-123.4

数控职业技能培训系列教程

数 控 编 程 技 术

主 编 王爱玲
副主编 孙旭东



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据职业教育教学、培训要求编写的,全面系统地介绍了数控编程的基本理论及相关知识,重点以详实、典型的实例讲述了数控车床、数控铣床、加工中心、数控线切割以及其他数控机床的编程方法及应用,结合 Master CAM 系统的应用对自动编程方法和 CAD/CAM 做了简介,并指出了当前国内外数控编程发展的重要趋势。

本书取材新颖,内容由浅入深、循序渐进,图文并茂,实例丰富,着重于应用;理论部分突出简明性、系统性、实用性和先进性。

本书可作为高等职业技术院校、中专、电大等数控专业的教材和参考书,也可作为企业数控加工职业技能的培训参考教程,同时可供其他对数控加工技术感兴趣的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控编程技术/王爱玲主编 一北京:机械工业出版社,2006.2(2006.9重印)

(数控职业技能培训系列教程)

ISBN 7-111-18497-1

I. 数... II. 王... III. 数控机床—程序设计—技术培训—教材
IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第009224号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李万宇 责任编辑:曾红 版式设计:霍永明

责任校对:申春香 封面设计:鞠杨 责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2006年9月第1版·第2次印刷

169mm×239mm·11.75印张·457千字

5001—8000册

定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线(010)68351729

封面无防伪标均为盗版

**“数控职业技能培训系列教程”
编辑委员会**

主 编 王爱玲

副主编 (按姓氏笔画排序)

刘中柱 刘永姜 孙旭东 李 清 杨福合
曾志强

编 委 (按姓氏笔画排序)

马清艳	王俊元	王 彪	王爱玲	刘中柱
刘永姜	孙旭东	齐明思	张吉堂	李伯民
李彩霞	李梦群	李 清	杨福合	沈兴全
赵丽琴	原 霞	郭平英	曾志强	温海骏
蓝海根	翟海光			

前 言

制造业是国民经济和国防建设的基础性产业,先进制造技术是振兴传统制造业的技术支撑和发展趋势,是直接创造社会财富的主要手段,谁先掌握先进制造技术,谁就能够占领市场。数控技术是先进制造技术的基础技术和共性技术,已成为衡量一个国家制造业水平的重要标志之一。现代数控技术集传统的机械制造技术、计算机技术、成组技术与现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术、网络通信技术、液压气动技术、光机电技术于一体,是现代制造技术的基础,它的发展和运用,开创了制造业的新时代,使世界制造业的格局发生了巨大变化。

数控技术是提高产品质量、提高劳动生产率必不可少的物质手段。它的广泛使用给机械制造业生产方式、产业结构、管理方式带来深刻的变化,它的关联效益和辐射能力更是难以估计。数控技术是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础,离开了数控技术,先进制造技术就成了无本之木。数控技术是国际技术和商业贸易的重要构成,工业发达国家把数控机床视为具有高技术附加值、高利润的重要出口产品,世界贸易额逐年增加。而采用数控技术的典型产品——数控机床是机电工业的重要基础装备,是汽车、石化、电子等支柱产业及重矿产业生产现代化的最主要手段,也是世界第三次产业革命的一个重要内容。因此,数控技术及数控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基础性产业,其水平高低是衡量一个国家制造业现代化程度的核心标志,实现加工机床及生产过程数控化,已经成为当今制造业的发展方向。

我国数控技术及产业尽管在改革开放后取得了显著的成就,开发出了具有自主知识产权的数控平台,即以PC机为基础的总线式、模块化、开放型的单处理器平台和多处理器平台,开发出了具有自主知识产权的基本系统,也研制成功了并联运动机床等新技术与新产品。但是,我国的数控技术及产业与发达国家相比仍然有比较大的差距,其原因是多方面的,但最重要的是数控人才的匮乏。目前,随着国内数控机床用量的剧增,急需培养一大批各种层次的数控人才,特别是应用型高级技术人才及能熟练操作数控设备的技能人才。为了适应我国高等职业技术教育发展及数控应用型人才、操作技能型人才培养的需要,编写了这一套“数控职业技能培训系列教程”。本系列教程共6册:《数控机床结构及应用》、《数控原

理及数控系统》、《数控机床加工工艺》、《数控编程技术》、《数控机床操作技术》、《数控机床故障诊断与维修》。

承担本系列教程编写工作的中北大学机械工程系,在“机械设计制造及其自动化”专业建设的基础上,1995年就开设了“机床数控技术”和“制造自动化技术”两个专业方向;在继续工程教育方面,作者单位作为“兵器工业现代数控技术培训中心”和“全国数控培训网太原分中心”的承办单位,自1995年以来,开办了50多期现代数控技术普及班、高级班和各种专项班,为80多个企事业单位培训了大量现代数控技术方面的工程技术人才。目前中北大学是教育部、国防科工委、中国机械工业联合会认定的数控技术领域技能型紧缺人才培养培训基地。

本系列教程是经过10年来的教学实践的积累和检验,不断进行补充、更新、修改而编著完成的。本教材力求取材新颖,介绍的内容由浅入深、循序渐进、深入浅出、图文并茂、形象生动、理论密切联系实际,特别着重于应用,每一部分都列举了大量实例,为了打造数控技术应用人才的市场需要,理论部分的讲解突出了简明性、系统性、实用性和先进性,反映机与电的结合,减少繁杂的数学推导,系统全面地介绍了数控技术、数控装备、数控加工工艺等方面的知识。

本系列教程具有下列特色:

1) 各个出版社都出了不少各种层次的数控相关的书籍,但作为专门针对职业教育的系列教材还是不多见的。本系列教程是针对数控职业教育的较为全面的系列教材。

2) 系列的各本教材编写突出了“应用”的特色,精选了大量的应用实例。

3) 教材中涉及到的内容,既有标志学科前沿的最新知识,又深入浅出地交代了数控基本理论知识。

4) 在有限的课时内,安排较大量的实验、习题,以锻炼学生实际动手能力及学习解决实际问题的能力。

本系列教程的编写者均为主讲过“机械设计制造及其自动化”类“数控技术”专业本科各门数控专业课程,并参加相关科研项目的青年教师,由博士生导师王爱玲教授担任系列教程的总策划与主编。

本系列教程可作为高等职业教育的教学与实践用教材或教学参考用书;同时对数控技术开发、数控设备使用、维修人员,数控编程技术人员,以及数控机床操作人员均有较大的参考价值;也可作为各种层次的继续工程教育用数控培训教材。

《数控编程技术》主要内容是数控机床概述、数控机床加工程序编制基础、数控编程加工工艺分析及设计、数控车床的编程、数控铣床的编程、加工中心的编程、数控电火花和数控线切割等其他数控机床的编程以及自动编程。

本分册由王爱玲任主编、孙旭东任副主编。其中第3章由王爱玲编写，第2、4~8章由孙旭东编写，第1章由原霞编写。全书由沈兴全审稿。

本书编写时参阅了很多院校和单位的教材、资料和文献，部分资料来源于网络，并得到很多专家和同事的支持和帮助，在此谨致谢意！

限于编者的水平和经验，书中难免会有不少疏漏和错误，恳请读者和各位同仁批评指正。

编 者

2006年1月

目 录

前言

第 1 章 数控机床概述	1
1.1 数控机床的产生和发展	1
1.2 数控机床的组成	3
1.2.1 控制介质	3
1.2.2 数控装置	3
1.2.3 伺服系统	4
1.2.4 反馈装置	4
1.2.5 机床本体	5
1.3 数控机床的控制对象	5
1.3.1 主运动控制	5
1.3.2 进给运动控制	6
1.3.3 输入/输出 (I/O) 控制	6
1.4 数控机床的工作原理	6
1.5 数控机床的特点	6
1.6 数控机床的分类	8
1.6.1 按用途分类	8
1.6.2 按运动方式分类	9
1.6.3 按控制原理分类	11
1.6.4 按数控系统类型分类	12
1.7 插补原理与计算机数控系统	13
1.7.1 插补原理	13
1.7.2 计算机数控系统	16
1.8 数控机床的发展趋势	18
思考题 1	20
第 2 章 数控机床加工程序编制基础	21
2.1 数控程序编制的概念	21
2.2 程序编制的基本知识	21
2.2.1 程序编制的内容和方法	21
2.2.2 零件加工程序的输入方式	27
2.2.3 穿孔纸带信息代码	27
2.2.4 程序结构与格式	30
2.2.5 程序数据输入格式	35
2.3 数控编程几何基础	36
2.3.1 数控机床坐标系和运动方向	36

2.3.2 绝对坐标和增量坐标	39
2.3.3 工件坐标系	40
2.3.4 编程坐标系	42
2.3.5 数控编程的特征点	43
2.4 程序编制中的基本指令	47
2.4.1 准备功能指令——G 指令	52
2.4.2 辅助功能指令——M 指令	67
2.4.3 其他功能指令	71
2.5 程序编制中的数学处理	72
2.5.1 数学处理的内容	72
2.5.2 基点计算	75
2.5.3 直线圆弧系统刀位点轨迹计算	77
2.5.4 节点坐标计算	80
思考题 2	85
第 3 章 数控编程中的加工工艺分析及设计	86
3.1 数控加工工艺分析的特点及内容	86
3.1.1 数控加工的工艺设计特点	86
3.1.2 数控加工工艺的主要内容	88
3.2 数控加工工艺性分析	88
3.2.1 从零件加工工艺分析决定零件进行数控加工的适用范围	89
3.2.2 分析零件图	90
3.2.3 零件各加工部位的结构工艺性应符合数控加工的特点	94
3.2.4 零件毛坯的工艺性分析	95
3.3 加工方法选择及加工方案确定	96
3.3.1 数控机床的合理选用	96
3.3.2 加工方法的选择	96
3.3.3 加工方案设计的原则	101
3.4 数控加工工艺路线的设计	101
3.4.1 工序的划分	101
3.4.2 加工顺序的安排	103
3.4.3 数控加工工序与普通加工工序的衔接	105
3.5 走刀路线的设计	105
3.5.1 点位控制加工路线	105
3.5.2 孔系加工的路线	107
3.5.3 车螺纹的加工线路	108
3.5.4 铣削平面的加工路线	109
3.5.5 铣削曲面的加工路线	111
3.6 确定零件的夹紧方法和夹具的选择	112
3.6.1 工件的定位与夹紧方案的确定	112

3.6.2 夹具的选择	112
3.7 刀具的选择	113
3.8 切削用量的确定	115
3.9 顺铣与逆铣	117
3.10 切削液选择	118
3.11 数控编程的误差控制	118
3.12 数控加工工艺文件	119
3.13 计算机辅助工艺设计	122
思考题 3	126
第 4 章 数控车床的编程	127
4.1 数控车床编程基础	127
4.1.1 数控车床的分类与特点	127
4.1.2 数控车床的编程特点	130
4.1.3 数控系统的功能	131
4.1.4 数控车床刀具补偿	137
4.1.5 数控车床坐标系	143
4.2 数控车床常用指令及基本编程方法	149
4.2.1 数控车床的常用指令	149
4.2.2 数控车床基本编程方法	151
4.3 典型零件的数控车削编程举例	193
4.3.1 轴类零件车削编程举例	193
4.3.2 盘类零件车削编程举例	196
思考题 4	201
第 5 章 数控铣床的编程	204
5.1 数控铣床概述	204
5.1.1 数控铣床的用途和组成	204
5.1.2 机床的主要技术参数	204
5.1.3 机床的传动系统	206
5.2 数控铣床编程基础	206
5.2.1 数控铣床的主要功能	206
5.2.2 数控铣床的加工工艺范围	207
5.2.3 数控铣床工艺装备	209
5.3 基本编程方法	210
5.3.1 数控系统功能	210
5.3.2 数控铣床加工坐标系	216
5.3.3 一般通用功能指令	221
5.3.4 刀具半径补偿功能	224
5.3.5 主子程序调用	231
5.3.6 比例及镜像功能	233

5.3.7 坐标系旋转功能·····	236
5.3.8 A类宏功能应用·····	239
5.4 典型零件的数控铣削工艺及编程举例·····	249
5.4.1 简单轮廓加工·····	251
5.4.2 连杆的数控铣削加工及编程·····	253
5.4.3 凸轮数控铣削工艺分析及程序编制·····	254
5.4.4 宏功能指令加工·····	258
思考题5·····	260
第6章 加工中心的编程 ·····	263
6.1 加工中心·····	263
6.1.1 概述·····	263
6.1.2 自动换刀装置·····	264
6.1.3 XH714B型立式加工中心·····	267
6.2 加工中心编程基础·····	269
6.2.1 数控系统的功能·····	269
6.2.2 工件坐标系和参考点·····	270
6.2.3 加工中心的工艺及工艺装备·····	271
6.2.4 加工中心编程的要点·····	273
6.3 基本编程方法·····	274
6.3.1 固定循环·····	274
6.3.2 指令介绍·····	291
6.3.3 B类宏程序应用·····	303
6.4 加工中心编程举例·····	307
思考题6·····	311
第7章 其他数控机床的编程 ·····	314
7.1 数控电火花成形加工技术·····	314
7.1.1 电火花成形加工原理及特点·····	314
7.1.2 电火花成形加工的应用·····	317
7.1.3 HCD型数控电火花机床·····	318
7.1.4 数控电火花成形加工工艺·····	319
7.1.5 数控电火花成形加工编程·····	321
7.2 数控线切割·····	326
7.2.1 数控线切割机床的类型及应用·····	327
7.2.2 HCX400E数控电火花线切割机床·····	328
7.2.3 数控电火花线切割加工工艺·····	330
7.2.4 数控电火花线切割编程·····	332
思考题7·····	335
第8章 自动编程 ·····	336
8.1 自动编程概述·····	336

8.1.1 自动编程的基本原理与特点	336
8.1.2 自动编程系统的基本类型与特点	338
8.1.3 APT 语言编程示例	344
8.2 Master CAM 系统软件在数控编程中的应用	346
8.2.1 CAM 基本概念	347
8.2.2 Master CAM 软件介绍	347
8.2.3 典型 CAM 应用实例	349
8.2.4 数控仿真技术	358
8.3 CNC 技术的新进展 STEP - NC	360
思考题 8	362
参考文献	364

第 1 章 数控机床概述

数字控制 (Numerical Control) 技术是用数字化信息对机械设备 (机床) 的运动及其加工过程进行控制的一种方法, 简称为数控 (NC)。数控技术是近代发展起来的一种自动控制技术, 在机械制造加工技术方面得到了广泛的应用。

1.1 数控机床的产生和发展

随着科学技术快速发展和市场竞争的日益激烈, 社会化大生产对机械产品的要求越来越趋于多样化、复杂化, 尤其是在造船、航空航天、国防军工、重型机械以及电子等工业中, 其加工批量小、零件形状复杂、改形频繁、精度要求高、加工困难、生产效率低、劳动强度大和质量难以保证的生产特点, 已经不能靠传统的加工设备和制造方法来适应这种柔性化程度很高的加工要求。因此能有效解决复杂、精密、中小批量加工的数控机床在近几十年来得到迅速发展和最广泛的应用。

采用数控技术控制的机床, 即装备了数控系统的机床, 称之为数字控制机床 (Numerically Controlled Machine Tool), 简称数控机床。国际信息处理联盟 (International Federation of Information Processing, IFIP) 第五技术委员会对数控机床作了如下定义: 数控机床是一种装有程序控制系统的机床, 该系统能逻辑地处理具有特定代码或其他符号编码指令规定的程序。

数控机床是采用数控装置或电子计算机来控制机床运动, 自动地取代一般通用机床上人工控制的各种操作, 如起动、加工顺序、主轴变速、切削用量、松夹工件、选择刀具、进刀退刀、切削液开关以及停车等。通常, 数控机床将所需的全部机械动作、步骤和控制功能, 以及工件的形状尺寸预先按规定的字符和文字代码的形式编制数控程序, 通过穿孔机或键盘等把程序上的信息以数字代码的形式记载在控制介质 (如穿孔纸带或磁盘等) 上, 通过控制介质将加工信息送入数控装置, 数控装置或计算机对输入的信息进行处理与运算, 发出各种指令性控制信号, 去控制机床的伺服系统或其他驱动元件的各种动作, 从而使数控机床自动加工出所需要的零件。

数控机床是为了满足单件、小批、多品种自动化生产的需要而研制的一种灵活的、通用的、能够适应产品频繁变化的柔性自动化机床, 具有适应性强、加工精度高、加工质量稳定和生产效率高的优点。它综合应用了电子计算机、自动控

制、伺服驱动、精密测量和新型机械结构等多方面的技术成果。随着机床数控技术的迅速发展，数控机床在机械制造业中的地位越来越重要。

数控机床首先由美国率先发展，并且是为了适应航空工业制造复杂零件的需要而产生的。1948年，美国帕森斯公司接受美国空军委托，研制直升飞机螺旋桨叶片轮廓检验用样板的加工设备。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，于是提出采用数字脉冲控制机床的设想。1949年，该公司与美国麻省理工学院（MIT）开始共同研究，并于1952年试制成功第一台三坐标数控铣床，当时的数控装置采用电子管元件。

1959年，数控装置采用了晶体管元件和印制电路板，出现带自动换刀装置的数控机床，称为加工中心（Machining Center, MC），使数控装置进入了第二代。1965年，出现了第三代的集成电路数控装置，不仅体积小，功率消耗少，而且可靠性提高，价格进一步下降，促进了数控机床品种和产量的发展。

20世纪60年代末，先后出现了由一台计算机直接控制多台机床的直接数控系统（DNC），又称群控系统；采用小型计算机控制的计算机数控系统（CNC），使数控装置进入了以小型计算机化为特征的第四代。

1974年，研制成功使用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控装置（MNC），这是第五代数控系统。20世纪80年代初，随着计算机软硬件技术的发展，出现了能进行人机对话式自动编制程序的数控装置；数控装置趋于小型化，可以直接安装在机床上；数控机床的自动化程度进一步提高，具有自动监控刀具破损和自动检测工件等功能。

20世纪90年代后期，出现了PC+CNC智能数控系统，即以PC为控制系统的硬件部分，在PC上安装NC软件系统，此种方式系统维护方便，易于实现网络化制造。

我国数控机床开发的起步并不晚，大约与日本、德国、前苏联同步。1958年北京第一机床厂与清华大学合作试制成功我国第一台数控铣床。但是，由于相关工业基础差，尤其是数控系统的支撑工业——电子工业薄弱，致使发展速度缓慢。

直到1970年北京第一机床厂的XK5040型数控升降台铣床才作为商品，小批量生产并推向市场。1975年沈阳第一机床厂的CSK6163型数控车床才真正进入商品化。在1974至1976年间，虽然开发了加工中心、数控镗床、数控磨床和数控钻床，但是因为系统不过关，多数机床没有在生产中发挥作用。

20世纪80年代前期，即“六五”期间，我国在引进国外先进数控技术的基础上，加强了数控机床的研究和数控机床的生产，使我国的数控机床真正进入小批量生产的商品化时代。通过“七五”数控技术攻关和“八五”数控系统攻关，大大推进了我国数控机床的发展。目前我国已经有自主知识产权的数控系统，并能生

产门类齐全的数控车、数控铣、数控钻、数控镗、数控磨、数控齿轮加工、数控电加工等数控机床，数控加工中心也相继研制成功。但是从机床的整体来看，数控系统的可靠性以及功能等方面，与国外相比，还存在着不小的差距。一些精密的、多坐标联动的数控机床还要依赖于进口。

1.2 数控机床的组成

数控机床是机电一体化的典型产品，是集机床、计算机、电动机及拖动、自动控制、检测等技术为一体的自动化设备。数控机床的基本组成包括控制介质、数控装置、伺服系统、反馈装置及机床本体，见图 1-1。

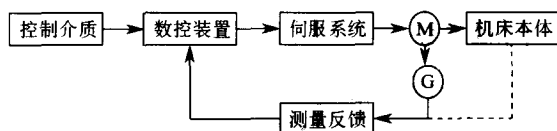


图 1-1 数控机床组成

1.2.1 控制介质

数控机床工作时，不要人去直接操作机床，但又要执行人的意图，这就必须在任何数控机床之间建立某种联系，这种联系的中间媒介物称之为控制介质。

在普通机床上加工零件时，由工人按图样和工艺要求进行加工。在数控机床加工时，控制介质是存储数控加工所需要全部动作和刀具相对于工件位置等信息的信息载体，它记载着零件的加工工序。数控机床中，常用的控制介质有穿孔纸带、穿孔卡片、磁带和磁盘或其他可存储代码的载体，至于采用哪一种，则取决于数控装置的类型。早期时，使用的是 8 单位（8 孔）穿孔纸带，并规定了标准信息代码 ISO（国际标准化组织制定）和 EIA（美国电子工业协会制定）两种代码。尽管穿孔纸带已经趋于淘汰，但是规定的标准信息代码认为是数控程序编制、制备控制介质惟一遵守的标准。

1.2.2 数控装置

数控装置是数控机床的核心。其功能是接受输入装置输入的数控程序中的加工信息，经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行译码、运算和逻辑处理后，发出相应的脉冲送给伺服系统，使伺服系统带动机床的各个运动部件按数控程序预定要求动作。一般由输入输出装置、控制器、运算器、各种接口电路、CRT 显示器等硬件以及相应的软件组成。数控装置作为数控机床“指挥系统”，能完成信息的输入、存储、变换、插补运算以及实现各种控制功能。它具备的主要功能如下：

- 1) 多轴联动控制。
- 2) 直线、圆弧、抛物线等多种函数的插补。
- 3) 输入、编辑和修改数控程序功能。
- 4) 数控加工信息的转换功能: ISO/EIA 代码转换, 米英制转换, 坐标转换, 绝对值和相对值的转换, 计数制转换等。
- 5) 刀具半径、长度补偿, 传动间隙补偿, 螺距误差补偿等补偿功能。
- 6) 实现固定循环、重复加工、镜像加工等多种加工方式选择。
- 7) 在 CRT 上显示字符、轨迹、图形和动态演示等功能。

1.2.3 伺服系统

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、方向和位移量。每个进给运动的执行部件都配有一套伺服系统。伺服系统的作用是把来自数控装置的脉冲信号转换为机床移动部件的运动, 它相当于手工操作人员的手, 使工作台(或溜板)精确定位或按规定的轨迹作严格的相对运动, 最后加工出符合图样要求的零件。

伺服系统由伺服驱动电动机和伺服驱动装置组成, 它是数控系统的执行部分。驱动机床执行机构运动的驱动部件, 包括主轴驱动单元(主要是速度控制)、进给驱动单元(主要有速度控制和位置控制)、主轴电动机和进给电动机等。一般来说, 数控机床的伺服驱动系统, 要求有好的快速响应性能, 以及能灵敏且准确地跟踪指令功能。数控机床的伺服系统有步进电动机伺服系统、直流伺服系统和交流伺服系统, 现在常用的是后两者, 都带有感应同步器、编码器等位置检测元件, 而交流伺服系统正在取代直流伺服系统。

1.2.4 反馈装置

反馈装置是闭环(半闭环)数控机床的检测环节, 该装置可以包括在伺服系统中, 它由检测元件和相应的电路组成, 其作用是检测数控机床坐标轴的实际移动速度和位移, 并将信息反馈到数控装置或伺服驱动中, 构成闭环控制系统。检测装置的安装、检测信号反馈的位置, 决定于数控系统的结构形式。无测量反馈装置的系统称为开环系统。

由于先进的伺服系统都采用了数字式伺服驱动技术(称为数字伺服), 伺服驱动和数控装置间一般都采用总线进行连接。反馈信号在大多数场合都是与伺服驱动进行连接, 并通过总线传送到数控装置, 只有在少数场合或采用模拟量控制的伺服驱动(称为模拟伺服)时, 反馈装置才需要直接和数控装置进行连接。伺服电动机内装式脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、测速机、光栅和磁尺等