



中国机械工程学科教程配套系列教材
教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

数控技术（修订版）

严育才 张福润 主编
傅水根 主审

中国机械工程学科教程
China Mechanical Engineering Curricula
中国机械工程学科教程

清华大学出版社

清华大学出版社



中国机械工程学科教程配套系列教材
教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

数控技术（修订版）

严育才 张福润 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材。

全书共分为7章。第1章简要介绍了数控的有关概念、数控机床的组成、工作原理、分类及其发展趋势;第2章深入分析了插补原理,并详细介绍了典型的插补方法;第3章简要介绍了计算机数控系统硬件的组成、功能和软件的功能及结构;第4章按照工作原理的不同分别对各种数控位置检测装置进行了深入分析;第5章对数控伺服系统的类型,伺服电机原理及控制方法,现代典型数控伺服系统进行了较详细的讲解;第6章讲述了数控手工编程,介绍了数控编程的工艺处理方法、编程误差的来源和控制方法、数控编程中的指令代码及数控编程;第7章介绍了自动编程、CAXA软件的使用及加工案例。

本书可作为本科院校相关专业学生的教学用书,也适合研究生、专科学生、从事数控技术及有关工程技术人员阅读参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数控技术/严育才,张福润主编. --修订版. --北京:清华大学出版社,2012.7

(中国机械工程学科教程配套系列教材暨教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材)

ISBN 978-7-302-29292-0

I. ①数… II. ①严… ②张… III. ①数控技术—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第152378号

责任编辑:庄红权

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:16.25

字 数:391千字

版 次:2012年7月第1版

印 次:2012年7月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:30.00元

产品编号:047951-01

中国机械工程学科教程配套系列教材

教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会推荐教材

编 委 会

顾 问
李培根院士

主 任 委 员
陈关龙 吴昌林

副主任委员
许明恒 于晓红 李郝林 李 旦 郭钟宁

编 委(按姓氏首字母排列)
韩建海 李理光 李尚平 潘柏松 芮执元
许映秋 袁军堂 张 慧 张有忱 左健民

秘 书
庄红权

丛书序言

PREFACE

我曾提出过高等工程教育边界再设计的想法,这个想法源于社会的反应。常听到工业界人士提出这样的话题:大学能否为他们进行人才的订单式培养。这种要求看似简单、直白,却反映了当前学校人才培养工作的一种尴尬:大学培养的人才还不是很适应企业的需求,或者说毕业生的知识结构还难以很快适应企业的工作。

当今世界,科技发展日新月异,业界需求千变万化。为了适应工业界和人才市场的这种需求,也即是适应科技发展的需求,工程教学应该适时地进行某些调整或变化。一个专业的知识体系、一门课程的教学内容都需要不断变化,此乃客观规律。我所主张的边界再设计即是这种调整或变化的体现。边界再设计的内涵之一即是课程体系及课程内容边界的再设计。

技术的快速进步,使得企业的工作内容有了很大变化。如从 20 世纪 90 年代以来,信息技术相继成为很多企业进一步发展的瓶颈,因此不少企业纷纷把信息化作为一项具有战略意义的工作。但是业界人士很快发现,在毕业生中很难找到这样的专门人才。计算机专业的学生并不熟悉企业信息化的内容、流程等,管理专业的学生不熟悉信息技术,工程专业的学生可能既不熟悉管理、也不熟悉信息技术。我们不难发现,制造业信息化其实就处在某些专业的边缘地带。那么对那些专业而言,其课程体系的边界是否要变?某些课程内容的边界是否有可能变?目前不少课程的内容不仅未跟上科学研究的发展,也未跟上技术的实际应用。极端情况甚至存在有些地方个别课程还在讲授已多年弃之不用的技术。若课程内容滞后于新技术的实际应用好多年,则是高等工程教育的落后甚至是悲哀。

课程体系的边界在哪里?某一门课程内容的边界又在哪里?这些实际上是业界或人才市场对高等工程教育提出的我们必须面对的问题。因此可以说,真正驱动工程教育边界再设计的是业界或人才市场,当然更重要的是大学如何主动响应业界的驱动。

当然,教育理想和社会需求是有矛盾的,对通才和专才的需求是有矛盾的。高等学校既不能丧失教育理想、丧失自己应有的价值观,又不能无视社会需求。明智的学校或教师都应该而且能够通过合适的边界再设计找到适合自己的平衡点。

我认为,长期以来,我们的高等教育其实是“以教师为中心”的。几乎所有的教育活动都是由教师设计或制定的。然而,更好的教育应该是“以学生

为中心”的,即充分挖掘、启发学生的潜能。尽管教材的编写完全是由教师完成的,但是真正好的教材需要教师在编写时常怀“以学生为中心”的教育理念。如此,方得以产生真正的“精品教材”。

教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会、中国机械工程学会与清华大学出版社合作编写、出版了《中国机械工程学科教程》,规划机械专业乃至相关课程的内容。但是“教程”绝不应该成为教师们编写教材的束缚。从适应科技和教育发展的需求而言,这项工作应该不是一时的,而是长期的,不是静止的,而是动态的。《中国机械工程学科教程》只是提供一个平台。我很高兴地看到,已经有多位教授努力地进行了探索,推出了新的、有创新思维的教材。希望有志于此的人们更多地利用这个平台,持续、有效地展开专业的、课程的边界再设计,使得我们的教学内容总能跟上技术的发展,使得我们培养的人才更能为社会所认可,为业界所欢迎。

是以为序。



2009年7月

前 言

FOREWORD

数控技术(数字化控制技术)是未来控制技术的发展方向,从家用电器到医疗器械,从地下的探测设备到太空飞行器,许多领域都大量使用了数字信号和数控技术。随着信息技术的发展,特别是现代控制理论研究的深入,数字化控制技术在控制领域的比重将逐渐增加,并有逐渐取代其他传统控制方法的趋势。

数控技术与机械制造中的机床设备相结合,形成了一种全新的加工装备——数控机床。数控机床的整个加工过程由数控系统进行自动控制。近年来数控技术的快速发展极大地推动了计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)、柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的发展。数控技术正在改变制造业的生产方式、产业结构、组织模式,是关系到国家战略地位的重要技术。

数控技术的发展历程经历了硬件数控(numerical control, NC)和计算机数控(computerized numerical control, CNC)两个阶段。硬件数控的运算和控制功能均由逻辑电路来完成,灵活性差,柔性不好。计算机数控是随着微电子技术和计算机技术的发展而产生的,其主要功能基本上由软件来完成。随着数控操作系统功能的不断完善,软件系统开放性的不断提高, CNC对不同的加工工艺及要求容易通过软件程序来解决,不需改变硬件,因此,灵活性好,柔性较强。

教育部高等学校机械设计制造及其自动化专业教学指导分委员会于2007年会同中国机械工程学会、清华大学出版社组成“中国机械工程学科教程研究组”出版的《中国机械工程学科教程》,采用知识领域边界再设计的方法,构造了机械工程本科专业教育的知识体系和框架,形成了科学的课程知识体系。我们根据该知识体系和框架,本着从高等院校教育目标及知识、能力和素质结构的要求出发,编写了数控技术教材。书中以数控技术的基本原理和基本知识为根基,以数控机床为主线,全面且系统地反映了数控技术各方面的内容。本书对数控技术的核心内容和最新技术作了较为深入、系统的介绍,全书内容充实、具体、科学、先进,叙述深入浅出,内容编排循序渐进,文字简练。本书采用国产著名品牌华中数控系统作为典型系统进行分析讲解,以国产三维CAD/CAM软件CAXA作为自动编程软件进行介绍,在数控系统和自动编程的讲解上实例充分。通过对本教材的学习掌握,读者可以对数控技术有较完整的、系统的认识,对数控机床的结构有较

清晰的了解。

本书可作为高等院校机械工程相关本科专业“数控技术”、“数控系统及数控机床原理”课程的教学用书,也适合研究生、专科学生及从事数控技术工程的技术人员阅读参考。

本书共分为7章。第1章简要介绍数控机床的组成、工作原理、分类和发展;第2章分析插补原理,并介绍典型的插补方法;第3章讲述计算机数控系统的硬件和软件,分别介绍计算机数控系统硬件的组成和功能以及软件的结构和功能;第4章分析数控位置检测装置,按照工作原理的不同分别对各种数控位置检测装置进行了分析;第5章分析数控伺服系统,对数控伺服系统的类型、伺服电机及调速、现代典型数控伺服系统进行了详细介绍;第6章讲述数控手工编程;第7章讲述自动编程及CAXA软件的使用方法。

本书由严育才、张福润担任主编,程宪平、段明忠担任副主编。本书第1、2章由张福润编写,第3、4、7章由严育才编写,第5章由程宪平、严育才共同编写,第6章由段明忠、严育才共同编写。本书在编写过程中得到了华中科技大学数控国家重点实验室和华中科技大学金工实训中心的大力帮助,在此对数控国家重点实验室和金工实训中心的各位老师表示衷心的感谢。华中科技大学李元科教授、孙亲锡教授、刘延林教授、朱冬梅教授对本书的编写提出了许多宝贵的意见,在此也一并致谢!

本书为修订版,利用此次修订的机会,作者不仅认真仔细地订正了第一版中存在的错误和疏漏,还将平时教学中使用的电子课件进行了整理,并增补了部分习题参考解答。

需要电子课件(包含课件和部分习题参考解答)的老师可发邮件到 zhuang_hq@163.com 邮箱索取,同时也欢迎对该教材提出宝贵建议。

限于编者的水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2012年2月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 数控技术概念概述	1
1.2 数控机床组成及工作原理	1
1.2.1 数控机床的组成	1
1.2.2 数控机床的工作原理	4
1.2.3 数控系统的工作过程	4
1.3 数控机床的分类、特点与应用	4
1.3.1 数控机床的分类	4
1.3.2 数控机床的特点	7
1.3.3 数控机床的应用	8
1.4 数控机床的产生与发展	8
1.4.1 数控机床的产生	8
1.4.2 数控机床的发展历程	8
1.4.3 数控机床的发展趋势	9
1.5 数控技术在我国的发展情况	12
习题	13
第 2 章 插补原理	14
2.1 插补概念分析	14
2.1.1 插补的概念	14
2.1.2 插补需要解决的问题	15
2.1.3 插补的实质	15
2.1.4 插补的基本要求	16
2.1.5 插补方法的分类	16
2.2 硬件插补	16
2.2.1 数字脉冲乘法器的工作原理	17
2.2.2 数字脉冲乘法器的直线插补	18
2.2.3 脉冲分配的不均匀性问题	19
2.3 逐点比较法	20
2.3.1 逐点比较法插补原理	20

2.3.2	逐点比较法直线插补	21
2.3.3	逐点比较法圆弧插补	24
2.3.4	逐点比较法象限处理	27
2.3.5	逐点比较法的进给速度	29
2.4	数字积分法	30
2.4.1	数字积分法的工作原理	30
2.4.2	数字积分法直线插补原理	30
2.4.3	数字积分法圆弧插补原理	34
2.4.4	数字积分法插补精度的提高	37
2.5	数据采样插补法	40
2.5.1	概述	40
2.5.2	时间分割法插补	42
2.5.3	扩展 DDA 数据采样插补法	45
习题		48
第3章	计算机数控(CNC)系统	49
3.1	CNC 系统的组成与工作原理	49
3.1.1	CNC 系统的组成	49
3.1.2	CNC 装置的工作原理	50
3.2	CNC 装置的硬件结构	51
3.2.1	大板结构和功能模板结构	51
3.2.2	单微处理器结构和多微处理器结构	52
3.2.3	CNC 装置的硬件功能模块	55
3.2.4	CNC 装置的输入输出接口	59
3.3	CNC 装置的软件结构	61
3.3.1	CNC 装置软件的组成	61
3.3.2	CNC 装置软件结构模式	63
3.3.3	CNC 装置软件的特点	67
3.4	CNC 装置的数据转换及处理	70
3.4.1	数据转换流程	70
3.4.2	数据处理	73
3.5	进给速度处理和加减速控制	77
3.5.1	开环 CNC 系统的进给速度及加减速控制	77
3.5.2	闭环(或半闭环)CNC 系统的加减速控制	78
3.6	数控机床用可编程控制器(PLC)	79
3.6.1	数控机床中 PLC 完成的功能	80
3.6.2	PLC 顺序程序接口信号处理	81
3.6.3	PLC 地址分配	82
3.6.4	PLC 顺序程序的执行	83

3.6.5 PLC 与 CNC 机床的关系	83
3.6.6 M、S、T 功能的实现	85
3.6.7 华中数控系统 PLC 的形式和原理	86
3.7 开放式数控体系结构	88
3.7.1 概述	88
3.7.2 开放式数控系统的定义及其基本特征	88
习题	91
第 4 章 数控检测技术	92
4.1 概述	92
4.1.1 检测装置的分类	92
4.1.2 数控测量装置的性能指标及要求	93
4.2 旋转变压器	93
4.2.1 旋转变压器的结构	93
4.2.2 旋转变压器的工作原理	94
4.2.3 旋转变压器的应用	95
4.3 感应同步器	97
4.3.1 直线式感应同步器	97
4.3.2 旋转式感应同步器	98
4.3.3 直线式感应同步器的工作原理	99
4.3.4 感应同步器的应用	100
4.3.5 感应同步器使用应注意的事项	101
4.4 光栅传感器	101
4.4.1 光栅的类型和结构	102
4.4.2 计量光栅的工作原理	103
4.5 脉冲编码器	107
4.5.1 脉冲编码器的结构与分类	107
4.5.2 脉冲编码器在数控机床上的应用	107
4.5.3 增量式光电脉冲编码器	108
4.5.4 绝对式脉冲编码器	109
4.5.5 光电脉冲编码器的应用形式	111
习题	112
第 5 章 数控伺服系统	114
5.1 概述	114
5.1.1 伺服系统的组成	114
5.1.2 对伺服系统的基本要求	116
5.1.3 对伺服电机的要求	116
5.1.4 伺服系统分类	117

5.2	步进电机伺服系统	119
5.2.1	步进电机结构及工作原理	119
5.2.2	步进电机的主要性能指标	121
5.2.3	步进电机功率驱动	123
5.2.4	功率放大器	127
5.2.5	调频调压驱动电路	129
5.2.6	细分驱动电路	129
5.2.7	步进电机应用中的注意事项	130
5.3	直流电机伺服系统	130
5.3.1	直流伺服电机的种类与应用	130
5.3.2	直流伺服电机的结构与工作原理	130
5.3.3	直流伺服电机的控制原理	131
5.3.4	直流伺服电机的分类	131
5.3.5	直流伺服电机的调速	132
5.3.6	晶闸管调速控制系统	133
5.3.7	晶体管直流脉宽调制调速系统	134
5.3.8	全数字脉宽调制调速系统	137
5.4	交流电机伺服系统	138
5.4.1	交流伺服电机的种类	138
5.4.2	永磁交流同步伺服电机的结构	138
5.4.3	交流伺服电机的发展方向	139
5.4.4	交流伺服电机的调速原理	139
5.4.5	交流伺服电机的速度控制单元	139
5.5	伺服系统的位置控制	143
5.5.1	相位比较伺服系统	143
5.5.2	幅值比较伺服系统	147
5.5.3	数字比较伺服系统	148
5.5.4	全数字伺服系统举例	149
	习题	151
第6章	数控加工的程序编制	153
6.1	数控机床编程概述	153
6.2	数控机床坐标系的确定	154
6.2.1	数控机床的坐标系	154
6.2.2	数控机床上坐标轴方向的确定	155
6.2.3	机床坐标系与工件坐标系	156
6.3	数控编程工艺处理	158
6.3.1	数控加工工艺方案设计的主要内容	158
6.3.2	影响数控加工工艺方案设计的主要因素	159

6.3.3	零件数控加工工艺性分析	160
6.3.4	划分加工阶段	162
6.3.5	数控加工工序规划	163
6.3.6	选择走刀路线	165
6.3.7	数控编程误差及其控制	168
6.4	数控加工刀具与切削用量的选择	169
6.4.1	数控加工刀具的选择	169
6.4.2	切削用量的选择	171
6.5	数控机床上工件的装夹	173
6.5.1	零件装夹注意事项	173
6.5.2	数控机床上零件装夹的方法	174
6.5.3	使用平口虎钳装夹零件	174
6.5.4	使用压板和 T 形槽用螺钉固定零件	175
6.5.5	弯板的使用	175
6.5.6	V 形块的使用	176
6.5.7	零件通过托盘装夹在工作台上	176
6.5.8	使用组合夹具、专用夹具等	177
6.6	数控加工程序的组成及各指令的应用	177
6.6.1	程序的组成	177
6.6.2	程序的格式	177
6.6.3	程序指令一览表	178
6.6.4	数控机床常用指令的使用方法说明	182
6.7	数控编程指令用法及加工举例	184
6.7.1	数控车床编程指令用法及加工举例	184
6.7.2	数控铣床编程指令用法及加工举例	193
	习题	202

第 7 章 CAXA 自动编程 203

7.1	自动编程概述	203
7.2	CAXA 制造工程师基本功能	205
7.2.1	简介	205
7.2.2	主要功能	205
7.2.3	用户界面简介	206
7.3	CAXA 几何建模技术基础	208
7.4	CAXA 的拾取操作	210
7.5	线架造型	213
7.5.1	线架造型简介	213
7.5.2	实例操作	213
7.6	实体特征造型	225

7.6.1	草图绘制	225
7.6.2	轮廓特征	227
7.7	连杆件的造型与加工	231
7.7.1	连杆件的实体造型	231
7.7.2	加工前的准备工作	237
7.7.3	刀具轨迹的生成和仿真检验	240
参考文献		244

绪 论

▲ 本章重点内容

数控技术的有关概念, 数控机床的构造和工作原理, 数控机床的分类, 数控机床的发展历程以及数控技术的发展趋势。

▲ 学习目标

了解数控机床的产生和发展趋势, 掌握数控机床的工作原理、工作过程、组成、分类, 以及数控机床的特点。

1.1 数控技术概念概述

数字控制(numerical control, NC)是一种借助数字、字符或其他符号对某一工作过程(如加工、测量、装配等)进行可编程控制的自动化方法, 简称数控。数控技术(numerical control technology)是采用数字控制的方法对某一工作过程实现自动控制的技术。数控技术综合运用了微电子、计算机、自动控制、精密检测、机械设计和机械制造等技术的最新成果, 通过程序来实现设备运动过程和先后顺序的自动控制, 位移和相对坐标的自动控制, 速度、转速及各种辅助功能的自动控制。

计算机数控(computerized numerical control, CNC)是用计算机实现数控所需的所有运算、控制功能和其他辅助功能的方法。

数控系统是指利用数控技术实现自动控制的系统。

用数控技术实现自动控制的机床称为数控机床。具体来说是用数字化的代码将零件加工过程中所需的各种操作和步骤以及刀具加工轨迹等信息记录在程序介质上, 送入数控系统进行译码、运算及处理, 控制机床的刀具与工件的相对运动, 加工出所需要的工件的机床即为数控机床。

1.2 数控机床组成及工作原理

1.2.1 数控机床的组成

数控机床一般由程序载体、输入装置、数控装置(CNC)、主轴控制单元、PLC、伺服系统、

强电控制装置、位置检测装置、输出装置、机床本体(主运动机构、进给运动机构、辅助动作机构)组成,如图 1.1 所示。

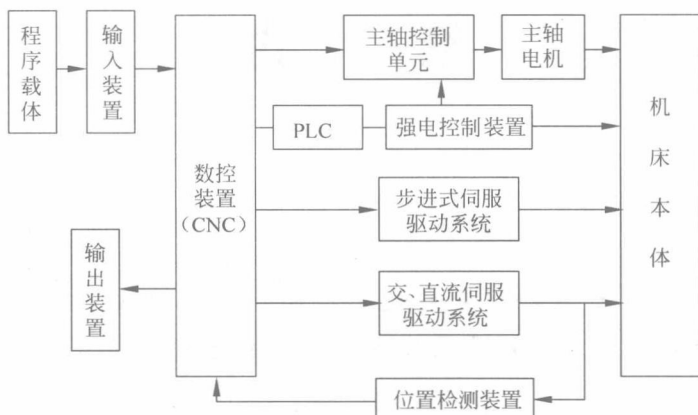


图 1.1 数控机床的结构组成

1. 程序载体

程序载体是人和数控机床联系的媒介物,也称程序介质、输入介质、信息载体。根据待加工零件的图纸获得数控加工需要的运动、尺寸、工艺参数等数据信息,再把这些数据写入程序代码并存储到程序载体中,数控机床通过读取和处理程序载体的数据信息就可以实现人机交流。就相当于人与人之间交流需要声音做媒介、空气做载体一样,这时声音相当于数控程序、空气相当于存储介质。程序载体可以是穿孔带,也可以是穿孔卡、磁带、磁盘、电子闪存盘(flash)或其他可以储存代码的载体。比如,华中数控的程序载体为电子闪存盘。

2. 输入装置

输入装置将数控代码变成相应的电脉冲信号,传递并存入数控装置内。输入方式主要有通过手工(MDI)用键盘直接输入数控系统,或通过网络通信的方式输入数控系统,或通过程序载体读取设备输入数控系统。程序载体读取设备有光电阅读机、磁带机、软驱等。目前,编写小程序一般用数控系统操作面板上的键盘直接输入,比较复杂的零件加工一般用 CAD/CAM 软件自动生成程序,然后用软盘、电子闪存盘或网络通信传入数控系统。

3. 数控装置

数控装置是数控机床的数据信息处理中心,相当于计算机的主机,只不过数控装置是在数控系统上运行,其主要完成运算和控制功能,在普通数控机床中一般由输入装置、存储器、控制器、运算器和输出装置组成。数控装置接收输入介质的信息,并将其代码加以识别、储存、运算,输出相应的指令脉冲以驱动伺服系统,进而控制机床动作。在计算机数控机床中,由于计算机本身即含有运算器、控制器等上述单元,因此其数控装置的作用由一台计算机来完成。

4. 主轴控制单元

主轴控制单元主要接受 CNC、PLC 的开关量指令对主轴的工作状态进行控制,如主轴的启动、加速、换向和停止等。

5. PLC

在数控机床中,利用 PLC 的逻辑运算功能可实现各种开关量的控制,代替传统的继电器工作。

6. 强电控制装置

强电控制装置的主要功能是接受数控装置所控制的内置式可编程控制器(PLC)输出的主轴变速、换向、启动或停止,刀具的选择和更换,分度工作台的转位和锁紧,工件的夹紧或松开,切削液的开或关等辅助操作的信号,经功率放大直接驱动相应的执行元件,诸如接触器、电磁阀等,从而实现数控机床在加工过程中的全部自动操作。强电控制装置是相对于 CNC 输出的低电压脉冲信号而言的,脉冲信号一般为 5 V,强电为几十到几百伏。

7. 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成机床移动部件的运动,一般由功率放大器和伺服控制电机组成。按照特性可分为步进式、交流、直流伺服系统三种。其性能好坏直接决定加工精度、表面质量和生产率。CNC 每输出一个进给脉冲,伺服系统就使工作台移动一个脉冲当量 δ 。

脉冲当量 δ 为对于每个脉冲信号,机床工作台移动的位移,也称为机床的分辨率。常见的有 0.01 mm、0.001 mm。

8. 位置检测装置

位置检测装置运用各种灵敏的位移、速度传感器检测机床工作台的运动方向、速率、距离等参数,并将位移、速度等物理量转变成对应的电信号显示出来并且送到机床数控装置中进行处理和计算,实现数控系统工作的反馈控制,同时数控装置能够校核机床的理论位置及实际位置是否一致。闭环数控系统一般利用理论位置与实际位置的差值进行工作,并由机床数控装置发出指令,修正理论位置与实际位置的偏差。

9. 机床本体

机床本体主要由床身、立柱、导轨、工作台等基础件和刀架、刀库等配套件组成。

10. 输出装置

输出装置指数控系统的显示器,一般都采用液晶屏,显示软件系统界面加工过程的信息,是人机对话的窗口。