



普通高等教育规划教材

伺服系统

第2版

钱平 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

伺 服 系 统

第 2 版

主 编 钱 平
副主编 李 宁 魏 建
参 编 谭季秋
主 审 邵群涛



机 械 工 业 出 版 社

本书以数控机床伺服系统为对象,在阐述伺服系统原理等基础上,重点介绍了交直流电动机的速度控制系统、步进式伺服系统、直流伺服系统、交流伺服系统,还介绍了位置伺服系统的典型实例。

本书在着重基本概念与原理介绍的同时,注意实际应用。本书可作为机械设计制造及自动化专业(数控技术和机械电子专业方向)应用型本科生的教材和参考书,也可供从事数控技术的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

伺服系统/钱平主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2011.2

普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-111-33222-0

I. ①伺… II. ①钱… III. ①伺服系统—高等学校—教材 IV. ①TP275

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第021699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:王小东 责任编辑:王小东 王荣

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

高等教育出版社印刷厂印刷

2011年4月第2版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·435千字

标准书号:ISBN 978-7-111-33222-0

定价:34.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育应用型人才培养规划教材 编审委员会名单

主任：刘国荣 湖南工程学院
副主任：左健民 南京工程学院
陈力华 上海工程技术大学
鲍 泓 北京联合大学
王文斌 机械工业出版社

委员：(按姓氏笔画排序)

刘向东 华北航天工业学院
任淑淳 上海应用技术学院
何一鸣 常州工学院
陈文哲 福建工程学院
陈 峻 扬州大学
苏 群 黑龙江工程学院
娄炳林 湖南工程学院
梁景凯 哈尔滨工业大学(威海)
童幸生 江汉大学

数控技术应用专业分委员会委员名单

- 主任：朱晓春 南京工程学院
副主任：赵先仲 华北航天工业学院
 龚仲华 常州工学院
委员：（按姓氏笔画排序）
 卜云峰 淮阴工学院
 汤以范 上海工程技术大学
 朱志宏 福建工程学院
 李洪智 黑龙江工程学院
 吴 祥 盐城工学院
 宋德玉 浙江科技学院
 钱 平 上海应用技术学院
 谢 骐 湖南工程学院

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化发展和我国加入 WTO,世界制造业将逐步向我国转移。有人认为,我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此,工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止,我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才,为经济的发展作出了巨大的贡献。但据 IMD1998 年的调查,我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第 36 位,与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校,并于 2001 年、2002 年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”,对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位做了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的,以适应经济、社会发展对工程教育的新要求,满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的先驱、美国加州理工学院的冯·卡门教授有句名言:“科学家研究已有的世界,工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律,所以科学强调分析,强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学(包括自然科学、技术科学和社会科学)理论和技术手段去改造客观世界的实践活动,所以它强调综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案,采用不同的培养模式,采用具有不同特点的教材。然而,我国目前的工程教育没有注意到这一点,而是:①过分侧重工程科学(分析)方面,轻视了工程实际训练方面,重理论,轻实践,没有足够的工程实践训练,工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象,导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一,课程结构不合理,知识面过窄,导致知识结构单一,所学知识中有一些内容已陈旧,交叉学科、信息学科的内容知之甚少,人文社会科学知识薄弱,学生创新能力不强。③教材单一,注重工程的科学分析,轻视工程实践能力的培养;注重理论知识的传授,轻视学生个性特别是创新精神的培养;注重教材的系统性和完整性,造成课程方面的相互重复、脱节等现象;缺乏工程应用背景,存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验,自身缺乏“工程训练”。⑤工程教育在实践中与经济、产业的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展,培养更多优秀的工程技术人员,我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材,目的在于改革传统的高等工程教育教材,建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材,满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是:

1. 保证基础,确保后劲

科技的发展,要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此,从内容安排上,保证学生有较厚实的基础,满足本科教学的基本要求,使学生日后具有较强的发展后劲。

2. 突出特色，强化应用

围绕培养目标，以工程应用为背景，通过理论与工程实际相结合，构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针：知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为：“精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上，挑选出最基本的内容、方法及典型应用；“新”指将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容，以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容，并将这些按新的教学系统重新组织；“广”指在保持本学科基本体系下，处理好与相邻以及交叉学科的关系；“用”指注重理论与实际融会贯通，特别是注入工程意识，包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

3. 抓住重点，合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课(专业基础课、专业课)教材的建设，并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设，力争做好与之配套的电子教材的建设。

4. 精选编者，确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验，又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务，以确保教材质量。

我们相信，本套系列教材的出版，对我国工程应用型人才培养质量的提高，必将产生积极作用，为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光，高瞻远瞩，及时提出并组织编写这套系列教材，他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作，并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件，在此深表衷心感谢！

编委会主任 刘国荣教授
湖南工程学院院长

第 2 版前言

伺服系统对数控技术、自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等专业是一门很重要的专业技术课。伺服系统的作用是联系数控装置与被控设备的中间环节，起着传递指令信息和反馈设备运行状态信息的桥梁作用。随着计算机技术、数字信号处理器、电力电子、信息技术、控制技术以及传感与检测等数控技术的发展，伺服系统正在向高精度、高速度、大功率方向发展。本书以伺服系统为对象，在阐述伺服系统原理、电力电子技术等基础上，从伺服系统发展的角度出发，系统地介绍了步进式伺服系统、直流伺服系统、交流伺服系统等的原理及应用。内容编排上既有较系统的理论阐述，又有大量的应用实例以及最新技术的介绍（如永磁同步伺服电动机控制技术、DSP 应用技术和计算机仿真技术）。在选材上力求少而精，旨在培养学生成为创新型、应用型工程技术人才。本书也可作为数控、自动化、电气工程、机电一体化等工程技术人员为迅速掌握伺服系统的最新技术，满足工程实际需要的参考书。

本书由钱平任主编，并编写了第一章、第四章、第六章（第一节）、第九章。李宁和魏建任副主编，李宁编写了第五章、第七章，魏建编写了第二章、第六章（第二至第五节）。第三章、第八章由谭季秋编写。

全书由邵群涛教授主审。

鉴于我们的水平和经验有限，书中难免有错误或不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

序

第 2 版前言

第一章 概述	1
第一节 伺服系统的作用及组成	2
第二节 伺服系统的基本要求和特点	2
一、对伺服系统的基本要求	2
二、伺服系统的主要特点	3
第三节 伺服系统的分类	3
一、按调节理论分类	3
二、按使用的驱动元件分类	5
三、按进给驱动和主轴驱动分类	5
四、按反馈比较控制方式分类	6
习题和思考题	8
第二章 伺服控制基础知识	9
第一节 电力电子器件的应用	9
一、不可控器件	9
二、半控型器件	9
三、全控型器件	12
第二节 检测元件	32
一、速度检测	32
二、角度(角位移)检测	37
三、位置检测	39
习题和思考题	44
第三章 步进电动机的控制	45
第一节 步进电动机的工作原理及驱动方法	45
一、步进电动机的种类	45
二、步进电动机的工作原理	46
三、步进电动机的驱动方法	53
四、步进电动机驱动电源设计	53
五、步进电动机与微机的接口技术	60
第二节 步进电动机的开、闭环控制	61
一、步进电动机的开环控制	61
二、步进电动机的闭环控制	63

第三节 步进电动机的最佳点一位控制	64
第四节 步进电动机控制的程序设计	67
一、步进电动机控制信号的产生	67
二、步进电动机的运行控制及程序设计	67
习题和思考题	73
第四章 直流电动机调速系统	75
第一节 直流电动机概述	75
一、直流电动机的基本结构	75
二、永磁直流伺服电动机及工作原理	75
第二节 直流电动机的单闭环调速系统	77
一、调速的定义	78
二、直流电动机的调速方法	78
三、调速指标	78
四、单闭环直流调速系统	80
第三节 双闭环直流电动机调速系统	88
一、转速、电流双闭环调速系统的组成	88
二、转速、电流双闭环调速系统的工作原理	88
第四节 直流脉宽调速控制系统	92
一、概述	92
二、PWM 调速系统的控制电路	101
第五节 转速、电流双闭环调速系统的工程设计法	110
一、工程设计方法的基本思路	110
二、典型系统及其参数与性能指标的关系	111
三、电流调节器设计	119
四、转速环设计	123

五、转速调节器饱和限幅时的超调量和计算	125	第六章 异步电动机调速系统及主轴驱动	163
第六节 伺服控制系统的计算机辅助设计	127	第一节 异步电动机变频调速系统	163
一、伺服控制系统计算机辅助设计的基本原理	127	一、变频调速基本原理	163
二、MATLAB/Simulink 在伺服控制系统 CAD 中的应用	128	二、正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变器	165
三、MATLAB 的一些工具箱函数简介	129	三、U/F 变频调速系统	170
四、运用 MATLAB 的 Simulink 仿真	133	第二节 数控机床对主轴驱动和主轴电动机的要求	176
习题和思考题	138	一、数控机床对主轴驱动的要求	176
第五章 无刷直流电动机控制系统	141	二、数控机床对主轴电动机的要求	177
第一节 无刷直流电动机的组成结构和工作原理	141	第三节 直流主轴控制单元	179
一、无刷直流电动机的结构特点	141	第四节 交流主轴控制单元	179
二、无刷直流电动机的转子位置传感器	142	一、矢量控制变频调速系统	179
三、无刷直流电动机的换向原理	144	二、矢量变换控制系统原理及控制方案	182
第二节 无刷直流电动机的基本公式和数学模型	148	第五节 主轴定向控制	185
一、电枢绕组的反电动势	148	一、主轴定向控制的意义	185
二、电磁转矩	149	二、主轴定向控制的实现	185
第三节 无刷直流电动机的转矩波动	150	习题和思考题	186
第四节 无刷直流电动机的驱动控制	151	第七章 三相永磁同步伺服电动机的控制	187
一、开环型无刷直流电动机驱动器	152	第一节 三相永磁同步伺服电动机及其数学模型	187
二、速度闭环的无刷直流电动机驱动器	154	第二节 三相永磁同步伺服电动机的控制策略	188
三、速度电流双闭环的无刷直流电动机驱动器	156	第三节 速度反馈信号的检测和 处理	192
第五节 无位置传感器的无刷直流电动机的驱动控制	159	第四节 伺服电动机转子初始位置的检测	195
一、无刷直流电动机转子位置估计方法	159	第五节 交流伺服系统的电子齿轮功能	196
二、无位置传感器无刷直流电动机控制系统的构成	160	习题和思考题	200
第六节 无刷直流电动机驱动控制的专用芯片介绍	161	第八章 进给伺服系统	201
习题和思考题	162	第一节 进给伺服系统概述	201
		一、开环、闭环和半闭环	201
		二、点位和连续轨迹控制的伺服系统	203
		第二节 进给伺服系统分析	203
		一、进给伺服系统的数学模型	204
		二、进给伺服系统动、静态性能	

分析	205
三、前馈控制	208
四、位置指令信号分析	208
五、指令值的修正	209
第三节 脉冲比较的进给位置伺服系统	210
一、脉冲比较式进给位置伺服系统	210
二、脉冲比较进给系统组成原理	211
三、脉冲比较电路	212
第四节 相位比较的进给伺服系统	214
一、相位伺服进给系统组成原理	214
二、脉冲调相器	215
三、鉴相器	216
第五节 幅值比较的进给伺服系统	217
一、幅值伺服系统组成原理	217
二、鉴幅器	218
三、电压—频率变换器	219
四、脉冲调宽式正、余弦信号发生器	220
第六节 数据采样式进给伺服系统	222
一、数据采样式进给位置伺服系统	223
二、反馈补偿式步进电动机进给伺服系统	224
第七节 交、直流伺服电动机的微机位置闭环控制	226
一、直流伺服电动机的微机位置闭环控制	226
二、交流伺服电动机的微机位置闭环控制	227

习题和思考题	228
第九章 基于 DSP 芯片为核心构成的伺服系统	229
第一节 控制系统硬件结构	229
一、TMS320LF2407 的结构与特点	229
二、TMS320LF2407 DSP CPU 控制器的功能结构图	230
第二节 伺服控制通用平台的软件编程及调试环境	232
一、程序编写	232
二、调试环境	233
三、开发一个简单的应用程序	234
第三节 TMS320LF2407-A 应用实例	235
一、基于 TMS320X2407-A 的全数字直流电动机伺服控制系统	235
二、基于 TMS320LF2407-A 的全数字无刷直流电动机伺服控制系统	238
三、基于 TMS320LF2407-A 的全数字交流电动机伺服控制系统	241
四、基于 DSP-LF2407A 和 CAN 总线的分布式电动机控制系统	253
第四节 全数字交流伺服系统安装、操作与运行	257
一、数字交流伺服系统	257
二、通信功能	261
三、常用输入/输出接口	262
四、运行	264
习题和思考题	269
参考文献	270

第一章 概 述

现代化生产的水平、产品的质量和经济效益等各项指标，在很大程度上取决于生产设备的先进性和电气自动化与信息化的程度。机电一体化技术是随着科学技术的不断发展、生产工艺不断提出新的要求下而迅速发展的。在控制方法上，主要是从手动到自动；在控制功能上，从简单到复杂；在操作上，从笨重到轻巧。电力电子技术的进步，微机技术的应用和新型控制策略的出现，又为电气控制技术的发展开拓了新的途径。

机床工业是工业化国家经济发展的基础行业。机床是用来制造一切机械的机器。数控机床是以数控技术为代表的新技术对传统机械制造业渗透而形成的机电一体化产品，它的技术范围包括机械制造技术、自动化控制技术、伺服驱动技术、信息处理及传递技术、监控检测技术以及软件技术等。数控机床的使用给制造业带来了一场重大的革命，它满足了人们对高制造水平的追求和对高生产率的期望。近年来，随着新产业的兴起和新技术对机械加工所产生的冲击，数控机床正朝着高速度、高精度、绿色化、高柔性化、智能化以及模块化、复合化方向飞速发展。

伺服系统接受来自 CNC (Computerized Numerical Control) 装置的进给脉冲，经变换和放大，然后去驱动各加工坐标轴按指令脉冲进行运动。这些轴有的带动工作台，有的带动刀架，通过一个或多个坐标轴的综合联动，涉及各轴上运动速度的调节，以一定的加减速曲线来进行运动，使刀具相对于工件产生各种复杂的机械运动，加工出所要求的复杂形状工件。

进给伺服系统是数控装置和机床机械传动部件间的联系环节，是数控机床的重要组成部分。它包含机械、电子、电动机等各种部件，并涉及强电与弱电控制，是一个复杂的控制系统。而伺服系统的动态和静态性能决定了数控机床的最高运动速度、跟踪及定位精度、加工表面质量、生产率及工作可靠性等技术指标。数控机床的故障也主要出现在伺服系统上。所以，提高伺服系统的技术性能和可靠性，对于数控机床具有重大意义，研究与开发高性能的伺服系统一直是现代数控机床的关键技术之一。

机床的主轴驱动与进给驱动有很大的差别。机床主传动的工作运动通常是旋转运动，满足主轴调速及正反转功能即可，无需丝杠或其他直线运动的装置。但当要求机床有螺纹加工功能、准停功能和恒线速加工等功能时，就对主轴提出了相应的位置控制要求。此时，主轴驱动系统也可称为主轴伺服系统，只不过控制较为简单。

伺服系统的主要研究内容是机械运动过程中涉及的力学、机械学、动力驱动、伺服参数检测和控制等方面的理论和技术问题。伺服系统对自动化、自动控制、电气工程、机电一体化等专业既是一门基础技术，又是一门专业技术，因为它不仅分析各种基本的变换电路，而且结合生产实际，解决各种复杂定位控制问题，如机器人控制、数控机床等，它是运动控制系统及现代电力电子技术相结合的交叉学科，是力学、机械、电工、电子、计算机、信息和自动化等科学和技术领域的综合，这些技术出现的新进展都使它向前迈进一步，其技术进步是日新月异的。

第一节 伺服系统的作用及组成

在自动控制系统中，使输出量能够以一定准确度跟随输入量的变化而变化的系统称为随动系统，亦称为伺服系统。数控机床的伺服系统是指以机床移动部件的位置和速度作为控制量的自动控制系统。

数控机床进给伺服系统的作用在于接受来自数控装置的指令信号，驱动机床移动部件跟随指令脉冲运动，并保证动作的快速和准确，这就要求是高质量的速度和位置伺服。数控机床的精度和速度等技术指标往往主要取决于伺服系统。

数控机床伺服系统的一般结构如图 1-1 所示。它是一个双闭环系统，内环是速度环，外环是位置环。

速度环中用作速度反馈的检测装置为测速发电机、脉冲编码器等。速度控制单元是一个独立的单元部件，它由速度调节器、电流调节器及功率驱动放大器等各部分组成。位置环是由 CNC 装置中的位置控制模块、速度控制单元、位置检测及反馈控制等各部分组成。位置控制主要是对机床运动坐标轴进行控制。轴控制是要求最高的位置控制，不仅对单个轴的运动速度和位置精度的控制有严格要求，而且在多轴联动时，还要求各移动轴有很多的动态配合，才能保证加工效率、加工精度和表面粗糙度。

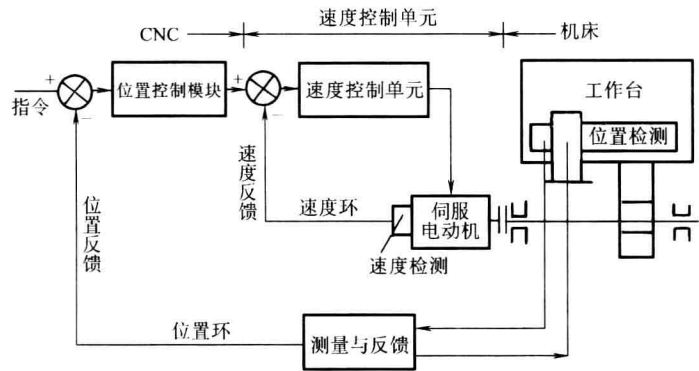


图 1-1 数控机床伺服系统的一般结构

第二节 伺服系统的基本要求和特点

一、对伺服系统的基本要求

1. 稳定性好

稳定是指系统在给定输入或外界干扰作用下，能在短暂的调节过程后到达新的或者恢复到原有的平衡状态。通常要求承受额定力矩变化时，静态速降应小于 5%，动态速降应小于 10%。

2. 精度高

伺服系统的精度是指输出量能跟随输入量的精确程度。作为精密加工的数控机床，要求的定位精度或轮廓加工精度和进给跟踪精度通常都比较高，这也是伺服系统静态特性与动态特性指标是否优良的具体表现。允许的偏差一般都在 $0.01 \sim 0.001\text{mm}$ ($10 \sim 1\mu\text{m}$) 之间，高的可达到 $\pm 0.0001 \sim \pm 0.00005\text{mm}$ ($\pm 0.1 \sim \pm 0.05\mu\text{m}$)。

相应地，对伺服系统的分辨率也提出了要求。当伺服系统接受 CNC 送来的一个脉冲时，工作台相应移动的单位距离叫分辨率。系统分辨率取决于系统的稳定工作性质和所使用的位置检测元件。目前的闭环伺服系统都能达到 $1\mu\text{m}$ 的分辨率。数控测量装置的分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$ 。高精度数控机床也可达到 $0.1\mu\text{m}$ 的分辨率，甚至更小。

3. 快速响应并无超调

快速响应性是伺服系统动态品质的标志之一，即要求跟踪指令信号的响应要快，一方面要求过渡过程时间短，一般在 200ms 以内，有的甚至小于几十毫秒，且速度变化时不应有超调；另一方面是当负载突变时，要求过渡过程的前沿陡即上升率要大，恢复时间要短，且无振荡。这样才能得到光滑的加工表面。

4. 低速大转矩和调速范围宽

机床的加工特点，大多是低速时进行切削，即在低速时进给驱动要有大的转矩输出。同时，为了适应不同的加工条件，要求数控机床进给能在很宽的范围内无级变化。这就要求伺服电动机有很宽的调速范围和优异的调速特性。目前，先进的水平是在进给脉冲当量为 $1\mu\text{m}$ 的情况下，进给速度在 $0 \sim 240\text{m}/\text{min}$ 范围内连续可调。一般的数控机床，进给速度范围在 $0 \sim 24000\text{mm}/\text{min}$ 。在 $1 \sim 24000\text{mm}/\text{min}$ 即 $1:24000$ 的调速范围内，要求速度均匀、稳定、无爬行，且速降小；在 $1\text{mm}/\text{min}$ 以下时具有一定的瞬时速度，但平均速度低；在零速时，即工作台停止运动时，要求电动机有电磁转矩以维持定位精度，使定位误差不超过系统的允许范围，即电动机处于伺服锁定状态。

由于位置伺服系统是由速度控制单元和位置控制环节两大部分组成的，如果对速度控制系统也过分地追求像位置伺服控制系统那么大的调速范围而又要可靠稳定地工作，那么速度控制系统将会变得相当复杂，既提高了成本又降低了可靠性。

一般对于进给速度范围为 $20000:1$ 的位置控制系统，在总的开环位置增益为 20s^{-1} 时，只要保证速度控制单元具有 $1000:1$ 的调速范围就可以满足需要。代表当今世界先进水平的实验系统，速度控制单元调速范围已达 $100000:1$ 。

二、伺服系统的主要特点

(1) 精确的检测装置 用以组成速度和位置闭环控制。

(2) 有多种反馈比较原理与方法 根据检测装置实现信息反馈的原理不同，伺服系统反馈比较的方法也不相同。目前常用的有脉冲比较、相位比较和幅值比较三种。

(3) 高性能伺服电动机 用于高效和复杂型面加工的数控机床，由于伺服系统经常处于频繁地起动和制动过程中，因此要求电动机的输出力矩与转动惯量的比值要大，以产生足够大的加速或制动力矩。电动机应具有耐受 $4000\text{rad}/\text{s}^2$ 以上角加速度的能力，才能保证其在 0.2s 以内从静止起动到额定转速。要求伺服电动机在低速时有足够大的输出力矩且运转平稳，以便在与机械运动部分连接中尽量减少中间环节。

(4) 宽调速范围的速度调节系统 从系统的控制结构看，数控机床的位置闭环系统可以看做是位置调节为外环、速度调节为内环的双闭环自动控制系统，其内部的实际工作过程是把位置控制输入转换成相应的速度给定信号后，再通过调速系统驱动伺服电动机，实现实际位移。数控机床的主轴运动要求调速性能也比较高，因此要求伺服系统为高性能的宽调速系统。

第三节 伺服系统的分类

一、按调节理论分类

1. 开环伺服系统

这是一种比较原始的伺服系统。这类数控系统将零件的程序处理后，输出数据指令给伺

服系统，驱动机床运动，没有来自位置传感器的反馈信号。最典型的系统就是采用步进电动机的伺服系统，如图 1-2 所示。它一般由环形分配器、步进电动机功率放大器、步进电动机、配速齿轮和丝杠螺母传动副等组成。数控系统每发出一个指令脉冲，经驱动电路功率放大后，驱动步进电动机旋转一个固定角度(即步距角)，再经传动机构带动工作台移动。这类系统信息流是单向的，即进给脉冲发出去后，实际移动值不再反馈回来，所以称为开环控制。

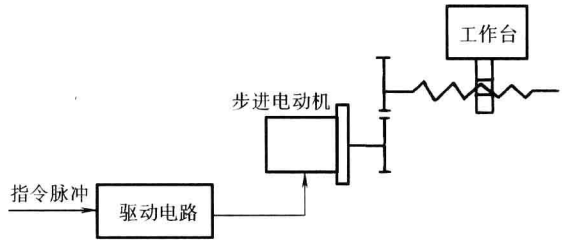


图 1-2 开环伺服系统

2. 闭环伺服系统

这类伺服系统带有检测装置，直接对工作台的位移量进行检测，其原理如图 1-3 所示。当数控装置发出位移指令脉冲，经电动机和机械传动装置使机床工作台移动时，安装在工作台上的位置检测器把机械位移变成电参量，反馈到输入端与输入信号相比较，得到的差值经过放大和变换，最后驱动工作台向减少误差的方向移动，直到差值等于零为止。这类控制系统，因为把机床工作台纳入了位置控制环，故称为闭环控制系统。常见的检测元件有旋转变压器、感应同步器、光栅、磁栅和编码盘等。目前闭环系统的分辨率多数为 $1\mu\text{m}$ ，定位精度可达 $\pm 0.01 \sim \pm 0.005\text{mm}$ ，高精度系统分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$ 。系统精度只取决于测量装置的制造精度和安装精度。该系统可以消除包括工作台传动链在内的误差，因而定位精度高、调节速度快。但由于该系统受进给丝杠的拉压刚度、扭转刚度、摩擦阻尼特性和间隙等非线性因素的影响，给调试工作造成很大困难。若各种参数匹配不当，将会引起系统振荡，造成不稳定，影响定位精度，而且系统复杂和成本高。因此该系统适用于精度要求很高的数控机床，如镗铣床、超精车床、超精铣床等。

3. 半闭环伺服系统

大多数数控机床是半闭环伺服系统。这类系统用安装在进给丝杠轴端或电动机轴端的角位移测量元件(如旋转变压器、脉冲编码器、圆光栅等)来代替安装在工作台上的直线测量元件，用测量丝杠或电动机轴旋转角位移来代替测量工作台直线位移，其原理如图 1-4 所示。因这种系统未将丝杠螺母副、齿轮传动副等传动装置包含在闭环反馈系统中，所以称之为半闭环控制系统。它不能补偿位置闭环系统外的传动装置的传动误差，却可以获得稳定的控制特性。这类系统介于开环与闭环之间，精度没有闭环高，调试却比闭环方便，因而得到广泛的应用。

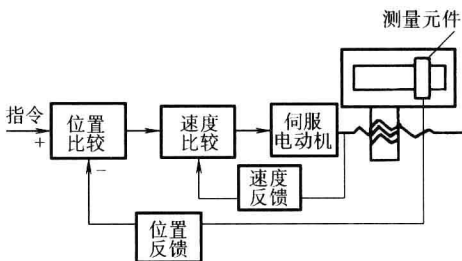


图 1-3 闭环伺服系统

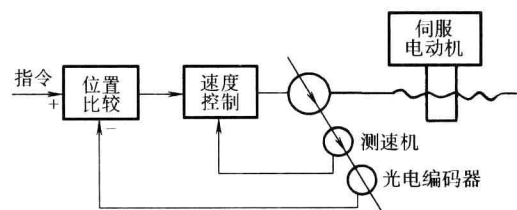


图 1-4 半闭环伺服系统

二、按使用的驱动元件分类

1. 步进伺服系统

如图 1-2 所示, 步进式伺服系统亦称为开环位置伺服系统, 其驱动元件为步进电动机。功率步进电动机盛行于 20 世纪 70 年代, 控制系统的结构最简单, 控制最容易, 维修最方便, 控制为全数字化(即数字化的输入指令脉冲对应着数字化的位置输出), 这完全符合数字化控制技术的要求, 数控系统与步进电动机的驱动控制电路结为一体。

随着计算机技术的发展, 除功率驱动电路之外, 其他硬件电路均可由软件实现, 从而简化了系统结构, 降低了成本, 提高了系统的可靠性。但步进电动机的耗能太大, 速度也不高, 当其在脉冲当量 δ 为 $1\mu\text{m}$ 时, 最高移动速度仅有 $2\text{mm}/\text{min}$, 且功率越大移动速度越低, 所以主要用于速度与精度要求不高的经济型数控机床及旧设备改造中。

2. 直流伺服系统

直流伺服系统常用的伺服电动机有小惯量直流伺服电动机和永磁直流伺服电动机(也称为大惯量宽调速直流伺服电动机)。小惯量伺服电动机最大限度地减少了电枢的转动惯量, 所以能获得最好的快速性, 在早期的数控机床上应用较多, 现在也有应用。小惯量伺服电动机一般都设计成有高的额定转速和低的惯量, 所以应用时, 要经过中间机械传动(如减速器)才能与丝杠相连接。近年来, 力矩电动机有了新的发展, 永磁直流伺服电动机的额定转速很低, 如可在 $1\text{r}/\text{min}$ 甚至在 $0.1\text{r}/\text{min}$ 下平稳地运转, 甚至可以在堵转状态下运行。这样低速运行的电动机, 其转轴可以和负载直接耦合, 省去了减速器, 简化了结构, 提高了传动精度。因此, 自 20 世纪 70 年代至 80 年代中期, 这种直流伺服系统在数控机床上的应用占了绝对统治地位, 至今, 许多数控机床上仍使用这种电动机的直流伺服系统。永磁直流伺服电动机的缺点是有电刷, 限制了转速的提高, 一般额定转速为 $1000 \sim 1500\text{r}/\text{min}$, 而且结构复杂, 价格较贵。

3. 交流伺服系统

交流伺服系统使用交流异步伺服电动机(一般用于主轴伺服电动机)和永磁同步伺服电动机(一般用于进给伺服电动机)。由于直流伺服电动机存在着有电刷等一些固有缺点, 使其应用环境受到限制。交流伺服电动机没有这些缺点, 且转子惯量比直流电动机小, 使其动态响应好。在同样体积下, 交流电动机的输出功率可比直流电动机提高 $10\% \sim 70\%$ 。还有, 交流电动机的容量可以比直流电动机造得大, 达到更高的电压和转速。因此, 交流伺服系统得到了迅速发展, 已经形成潮流。从 20 世纪 80 年代后期开始, 大量使用交流伺服系统, 有些国家的厂家, 已全部使用了交流伺服系统。

三、按进给驱动和主轴驱动分类

1. 进给伺服系统

进给伺服系统是指通常所说的伺服系统, 它包括速度控制环和位置控制环。进给伺服系统完成各坐标轴的进给运动, 具有定位和轮廓跟踪功能, 是数控机床中要求最高的伺服控制系统。

2. 主轴伺服系统

机床的主轴驱动和进给驱动有很大的区别。一般来说, 主轴控制只是一个速度控制系统, 实现主轴的旋转运动, 提供切削过程中的转矩和功率, 且保证任意转速的调节, 完成在转速范围内的无级变速, 无需丝杠或其他直线运动的装置。

此外，刀库的位置控制是为了在刀库的不同位置选择刀具，与进给坐标轴的位置控制相比，性能要低得多，故称为简易位置伺服系统。

四、按反馈比较控制方式分类

1. 脉冲、数字比较伺服系统

脉冲比较伺服系统如图 1-5 所示。在数控机床中，插补器给出的指令是数字脉冲。如果选择磁尺、光栅、光电编码器等元件作为机床移动部件位移量的检测装置，输出的位置反馈信号亦是数字脉冲。这样，给定量与反馈量的比较就是直接的脉冲比较，由此构成的伺服系统就称为脉冲比较伺服系统，该系统是闭环伺服系统中的一种控制方式。

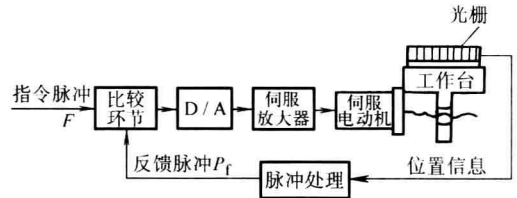


图 1-5 脉冲比较伺服系统

该系统比较环节采用的是可逆计数器，当指令脉冲为正，反馈脉冲为负时，计数器作加法运算；当指令脉冲为负，反馈脉冲为正时，计数器作减法运算。指令脉冲为正时，工作台正向移动；指令脉冲为负时，工作台反向移动。

指令脉冲 F 来自插补器，反馈脉冲 P_f 来自检测元件光电编码器。两个脉冲源是相互独立的，而脉冲频率随转速变化而变化。脉冲到来的时间不同或执行加法计数与减法计数发生重叠，都会产生误操作。为此，在可逆计数器前还有脉冲分离处理电路。

当可逆计数器为 12 位计数器时，允许计算范围是 $-2048 \sim +2047$ 。外部输入信号有加计数脉冲输入信号 UP、减法计数脉冲输入信号 DW 和清零信号 CLR。

12 位可逆计数器的值反映了位置偏差。该计数值经 12 位 D/A 转换，输出双极性模拟电压，作为伺服系统速度控制单元的速度给定电压，由此可实现根据位置偏差控制伺服电动机的转速和方向，即控制工作台向减少偏差的位置进给。

当计数器清零时，相当于 D/A 转换器输入数字量为 800H，D/A 输出量为 $U_{gn} = 0$ ，电动机处于停转状态；当计数器值为 FFFH 时，D/A 输出量为 $+U_{REF}$ 最大值；当计数器值为 000H 时，D/A 输出量为 $-U_{REF}$ 最小值。 U_{REF} 为 D/A 装置的基准电压。改变 U_{REF} 的数值或调整 D/A 输出电路中的调整电位器，即可获得速度控制单元要求的控制电压极性和转速满刻度电压值。

脉冲、数字比较伺服系统结构简单，容易实现，整机工作稳定，在一般数控伺服系统中应用十分普遍。

2. 相位比较伺服系统

在高精度的数控伺服系统中，旋转变压器和感应同步器是两种应用广泛的位置检测元件。根据励磁信号的不同形式，它们都可以采取相位工作方式或幅值工作方式。如果位置检测元件采用相位工作方式，控制系统中要把指令信号与反馈信号都变成某个载波的相位，然后通过二者相位的比较，得到实际位置与指令位置的偏差。由此可以说，如果旋转变压器或感应同步器为相位工作状态下的伺服系统，指令信号与反馈信号的比较就采用相位比较方式，该系统就称为相位比较伺服系统，简称为相位伺服系统。由于这种系统调试比较方便，精度又高，特别是抗干扰性能好而在数控系统中得到较为普遍的应用，是数控机床常用的一种位置控制系统。

图 1-6 所示为采用感应同步器作为位置检测元件的相位比较伺服系统的原理框图。数控