

高等院校机电类 **工程教育** 系列规划教材

机械工程控制基础

■ 董明晓 李娟 杨红娟 逢波 编著

→ **机械工程控制基础**：本书秉承“工程教育”的教学理念，在编著者数十年教学经验的基础上，根据国内经典教材的架构编写而成。内容上突出基础，增加了“数学基础”一章；编写上强调应用，不仅有MATLAB仿真，而且开辟了“应用点评”、“应用推广”和“工程实例”等专栏。详细内容请见目录和索引>>>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等院校机电类工程教育系列规划教材

机械工程控制基础

董明晓 李娟 杨红娟 逢波 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍经典控制论及其应用,包括3部分10章的内容。第1部分主要介绍经典控制论的数学基础;第2部分是经典控制论,包括系统的数学模型、系统的时间响应与误差分析、系统的频率特性、系统的稳定性、根轨迹法、系统的性能校正、离散控制系统的分析和校正等8章内容;第3部分主要介绍基于MATLAB软件进行控制系统的计算机仿真与辅助设计。

本书可作为高等学校机械工程及自动化专业的教材,也可作为相关专业的教学参考书,同时还可供有关专业工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容
版权所有·侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制基础/董明晓等编著. —北京:电子工业出版社,2010.3

(高等院校机电类工程教育系列规划教材)

ISBN 978-7-121-10391-9

I. 机… II. 董… III. 机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第25778号

策划编辑:余义

责任编辑:余义

印刷:北京民族印务有限责任公司

装订:北京民族印务有限责任公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:20.5 字数:525千字

印次:2010年3月第1次印刷

印数:4000册 定价:·33.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2008年7月间,电子工业出版社邀请全国20多所高校几十位机电领域的老师,研讨符合“工程教育”要求的教材的编写方案。大家认为,这适应了目前我国高等院校工科教育发展的趋势,特别是对工科本科生实践能力的提高和创新精神的培养,都会起到积极的推动作用。

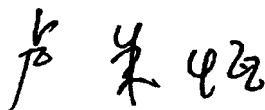
教育部于2007年1月22日颁布了教高(2007)1号文件《教育部财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》。同年2月17日,紧接着又颁布了教高(2007)2号文件《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》。由这两份文件,可以看到国家教育部已经决定并将逐步实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称质量工程),而质量工程的核心思想就在于培养学生的实践能力和创新精神,提高教师队伍整体素质,以及进一步转变人才培养模式、教学内容和方法。

教学改革和教材建设从来都是相辅相成的。经过近两年的教改实践,不少老师都积累了一定的教学经验,借此机会,编写、出版符合“工程教育”要求的教材,不仅能够满足许多学校对此类教材的需求,而且将进一步促进质量工程的深化。

近一年来,电子工业出版社选派了骨干人员与参加编写的各位教授、专家和老师们进行了深入的交流和研究。不仅在教学内容上进行了优化,而且根据不同课程的需要开辟了许多实践性、经验性和工程性较强的栏目,如“经验总结”、“应用点评”、“一般步骤”、“工程实例”、“经典案例”、“工程背景”、“设计者思维”、“学习方法”等,从而将工程中注重的理念与理论教学更有机地结合起来。此外,部分教材还融入了实验指导书和课程设计方案,这样一方面可以满足某些课程对实践教学的需要,另一方面也为教师更深入地开展实践教学提供丰富的素材。

随着我国经济建设的发展,普通高等教育也将随之发展,并培养出适合经济建设需要的人才。“高等院校机电类工程教育系列规划教材”就站在这个发展过程的源头,将最新的教改成果推而广之,并与之共进,协调发展。希望这套教材对更多学校的教学有所裨益,对学生的理论与实践的结合发挥一定的作用。

最后,预祝“高等院校机电类工程教育系列规划教材”项目取得成功。同时,也恳请读者对教材中的不当、不贴切、不足之处提出意见与建议,以便重印和再版时更正。



中国工程院院士、西安交通大学教授

教材编写委员会

主任委员 赵升吨(西安交通大学)

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

芮延年(苏州大学) 胡大超(上海应用技术学院)

钱瑞明(东南大学) 袁清珂(广东工业大学)

参编院校

(按拼音排序)

- | | |
|------------|------------|
| ※ 安徽工业大学 | ※ 沈阳工业大学 |
| ※ 长安大学 | ※ 苏州大学 |
| ※ 东南大学 | ※ 苏州科技学院 |
| ※ 广东工业大学 | ※ 同济大学 |
| ※ 华南理工大学 | ※ 五邑大学 |
| ※ 华南农业大学 | ※ 武汉科技学院 |
| ※ 淮海工学院 | ※ 西安电子科技大学 |
| ※ 吉林师范大学 | ※ 西安工程大学 |
| ※ 南通大学 | ※ 西安工业大学 |
| ※ 山东建筑大学 | ※ 西安交通大学 |
| ※ 陕西科技大学 | ※ 西安科技大学 |
| ※ 上海应用技术学院 | ※ 西安理工大学 |
| ※ 深圳大学 | ※ 西安文理学院 |

前 言

本书是作者在多年教学和科研工作的基础上，通过总结同类教材的经验并吸收国内外有关本课程最新教学和科研成果，精心组织编写而成。

为了增强学生综合应用理论的能力和他们的工程素质，作者依据教学大纲，对课程内容进行了整合优化。注重理论与工程实践相结合，经典内容与技术发展前沿相结合，充分体现了经典控制论在机械工程中的应用。在教材的编写过程中，引入了机械工程中的典型实例，并根据经典控制论提出问题、分析问题、解决问题，以培养学生将经典控制论用于机械工程中的能力。

本书作为一门专业基础理论课的教材，在内容上力求重点明确、特点突出。详细介绍了经典控制论的基本概念、基本原理、基本方法；重点介绍了时域分析和频域分析的重点和难点。在章节编排上，首先介绍相关的数学基础知识，然后学习建立系统的数学模型，在此基础上再学习分析系统的时域特性和频域特性的方法，最后对系统进行性能校正。在写作手法上，力求使内容具有前瞻性，结构前后呼应，授课内容选择灵活，不仅便于教师安排教学，而且便于读者自学。

本书主要包括3部分10章的内容。第1部分主要介绍经典控制论的数学基础知识，包括拉氏变换基本概念及其性质；第2部分是经典控制论，主要包括系统的数学模型、系统时间与误差分析、系统的频率特性、系统的稳定性、根轨迹法、系统的性能校正、离散控制系统的性能分析和校正；第3部分主要介绍基于MATLAB软件进行控制系统的计算机仿真与辅助设计，通过编程或者应用Simulink，模拟机电系统的动态过程，分析系统的时间响应、频率特性和稳定性，最终进行系统的性能校正。

本书可作为高等学校机械工程及自动化专业的教材，也可作为相关专业的教学参考书，同时还可供机械工程及自动化专业科研与生产单位的技术人员参考。

全书由山东建筑大学董明晓，青岛农业大学李娟，山东建筑大学杨红娟、逢波等编著。其中，董明晓负责编写第1，6，7，8章和第10章的10.1，10.2，10.3，10.5，10.6节的内容；李娟负责编写第4，5，9章和10.4节的内容；杨红娟负责编写第2，3章的内容；逢波、高鸿雁、刘辉、李凡冰、徐书娟、胡常涛、朱翠兰也参与了各章部分内容的编写工作。董明晓对全书进行了统稿。在本书的编写过程中，引用了书后相关文献的材料和思想，谨向这些文献的作者表示谢意！

作者学识有限，难免存在着错误和不足之处，殷切期望广大读者和同行给予批评指正。

编 者

2009年10月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 工程控制理论的研究对象与任务	(1)
1.3 控制系统	(2)
1.3.1 控制系统	(2)
1.3.2 反馈控制系统	(3)
1.3.3 控制系统分类	(5)
1.4 对控制系统的基本要求	(9)
1.5 本课程的特点及学习方法	(10)
1.6 本章小结	(10)
1.7 习题	(11)
第 2 章 机械工程控制论的数学基础	(12)
2.1 复数和复变函数	(12)
2.1.1 复数	(12)
2.1.2 复数的运算规则	(12)
2.1.3 复变函数的零点和极点	(13)
2.2 拉氏变换	(13)
2.2.1 拉氏变换的定义	(14)
2.2.2 典型时间函数的拉氏变换	(15)
2.2.3 拉氏变换的主要运算定理	(18)
2.3 拉氏逆变换	(22)
2.3.1 拉氏逆变换的定义	(22)
2.3.2 拉氏逆变换的数学方法	(22)
2.4 拉氏变换在控制工程中的应用	(25)
2.5 本章小结	(27)
2.6 习题	(27)
第 3 章 系统的数学模型	(29)
3.1 系统的时域数学模型	(29)
3.1.1 系统微分方程	(29)
3.1.2 非线性微分方程线性化处理	(30)
3.1.3 机械系统的微分方程	(31)
3.2 系统的复域数学模型	(37)
3.2.1 传递函数	(37)
3.2.2 传递函数的零点、极点和增益	(39)
3.2.3 典型环节的传递函数	(39)
3.3 系统传递函数方框图	(48)

3.3.1	系统传递函数方框图	(48)
3.3.2	传递函数方框图的等效变换	(50)
3.3.3	传递函数方框图的简化	(52)
3.4	梅逊公式	(58)
3.5	系统的状态空间模型	(58)
3.5.1	状态变量与状态空间表达式	(58)
3.5.2	线性系统的状态方程	(59)
3.5.3	传递函数与状态空间表达式相互转化	(61)
3.6	本章小结	(62)
3.7	习题	(62)
第4章	系统的时域分析	(65)
4.1	系统的时间响应及其组成	(65)
4.1.1	系统的时间响应	(65)
4.1.2	非齐次二阶线性微分方程的解及其解的组成	(65)
4.1.3	系统的时间响应组成	(66)
4.2	典型输入信号	(68)
4.3	一阶系统的时间响应	(69)
4.3.1	单位脉冲响应	(69)
4.3.2	单位阶跃响应	(70)
4.3.3	单位斜坡响应	(71)
4.4	二阶系统的时间响应	(72)
4.4.1	二阶系统的传递函数	(73)
4.4.2	二阶系统的特征根	(74)
4.4.3	二阶系统的单位脉冲响应	(75)
4.4.4	二阶系统的单位阶跃响应	(77)
4.5	系统时域性能指标	(80)
4.5.1	系统的时域指标定义	(80)
4.5.2	一阶系统的动态性能指标	(81)
4.5.3	二阶系统响应的动态性能指标	(83)
4.6	高阶系统的时域分析	(89)
4.6.1	典型三阶系统的单位阶跃响应	(90)
4.6.2	高阶系统的单位阶跃响应	(91)
4.7	系统的误差分析与计算	(92)
4.7.1	系统的误差与偏差	(93)
4.7.2	稳态误差	(94)
4.7.3	系统类型	(94)
4.7.4	静态误差系数与稳态误差	(95)
4.7.5	干扰作用下的稳态误差	(98)
4.8	本章小结	(103)
4.9	习题	(103)

第 5 章 根轨迹法	(106)
5.1 根轨迹法概述.....	(106)
5.1.1 根轨迹的基本概念.....	(106)
5.1.2 根轨迹与系统性能.....	(108)
5.1.3 闭环零、极点与开环零、极点之间的关系.....	(109)
5.1.4 根轨迹方程.....	(111)
5.2 根轨迹绘制的基本法则.....	(112)
5.2.1 绘制根轨迹的基本法则.....	(112)
5.2.2 闭环极点的确定.....	(125)
5.3 广义根轨迹.....	(126)
5.3.1 参数根轨迹.....	(126)
5.3.2 添加开环零点的作用.....	(130)
5.3.3 零度根轨迹.....	(130)
5.4 系统性能的分析与设计.....	(135)
5.4.1 闭环零、极点与时间响应的关系.....	(135)
5.4.2 系统性能的定性分析.....	(138)
5.4.3 控制系统的复域设计.....	(139)
5.5 本章小结.....	(144)
5.6 习题.....	(144)
第 6 章 系统的频率特性	(147)
6.1 频率特性.....	(147)
6.1.1 频率响应与频率特性.....	(147)
6.1.2 频率特性的求法.....	(149)
6.1.3 微分方程、频率特性、传递函数之间的关系.....	(150)
6.1.4 频率特性的特点与作用.....	(151)
6.2 频率特性的极坐标图.....	(151)
6.2.1 频率特性的极坐标图.....	(151)
6.2.2 典型环节的 Nyquist 图.....	(152)
6.2.3 含有积分环节系统的 Nyquist 图.....	(157)
6.2.4 Nyquist 图的一般形状.....	(158)
6.2.5 机电系统的 Nyquist 图.....	(160)
6.3 频率特性的对数坐标图.....	(161)
6.3.1 频率特性的对数坐标图.....	(161)
6.3.2 典型环节的 Bode 图.....	(163)
6.3.3 典型环节 Bode 图的特点.....	(170)
6.3.4 绘制系统的 Bode 图的步骤.....	(171)
6.3.5 机电系统的 Bode 图.....	(173)
6.4 闭环频率特性与频域性能指标.....	(176)
6.4.1 闭环频率特性.....	(176)
6.4.2 频域性能指标.....	(176)

6.5	最小相位系统与非最小相位系统	(177)
6.5.1	最小相位系统与非最小相位系统	(177)
6.5.2	产生非最小相位系统的环节	(178)
6.6	本章小结	(179)
6.7	习题	(179)
第7章	系统的稳定性	(182)
7.1	系统的稳定性	(182)
7.1.1	稳定性的概念	(182)
7.1.2	判别系统稳定性的基本原则	(183)
7.2	Routh 稳定判据	(185)
7.2.1	系统稳定的必要条件	(185)
7.2.2	系统稳定的充要条件	(186)
7.3	Nyquist 稳定判据	(189)
7.3.1	Nyquist 稳定判据简介	(189)
7.3.2	开环含有积分环节的系统稳定性分析	(192)
7.3.3	具有延时环节的系统的稳定性分析	(197)
7.4	Bode 稳定判据	(201)
7.4.1	Nyquist 图与 Bode 图的对应关系	(202)
7.4.2	正负穿越的概念	(203)
7.4.3	Bode 稳定判据	(203)
7.5	系统的相对稳定性	(205)
7.5.1	相位裕度与幅值裕度	(206)
7.5.2	条件稳定系统性	(208)
7.6	本章小结	(210)
7.7	习题	(211)
第8章	系统的性能校正	(213)
8.1	控制系统的性能指标及校正	(213)
8.1.1	控制系统的时域和频域性能指标	(213)
8.1.2	系统性能校正	(214)
8.2	串联校正	(215)
8.2.1	增益调整校正	(215)
8.2.2	相位超前校正	(216)
8.2.3	相位滞后校正	(221)
8.2.4	相位滞后—超前校正	(226)
8.3	PID 校正	(230)
8.3.1	PID 控制规律	(231)
8.3.2	PD 调节器	(231)
8.3.3	PI 调节器	(233)
8.3.4	PID 调节器	(235)
8.4	反馈校正和顺馈校正	(236)

8.4.1	反馈校正	(237)
8.4.2	顺馈校正	(238)
8.5	本章小结	(239)
8.6	习题	(240)
第9章	离散控制系统的分析和校正	(242)
9.1	概述	(242)
9.2	信号的采样与保持	(243)
9.2.1	信号的采样	(243)
9.2.2	采样定理	(245)
9.2.3	保持器	(247)
9.3	Z变换与Z逆变换	(247)
9.3.1	Z变换的定义	(248)
9.3.2	Z变换的性质	(250)
9.3.3	Z逆变换	(253)
9.4	离散控制系统的数学模型	(256)
9.4.1	线性常系数差分方程	(256)
9.4.2	差分方程的解	(257)
9.4.3	脉冲传递函数	(258)
9.5	离散控制系统的性能分析	(267)
9.5.1	离散控制系统的稳定性分析	(268)
9.5.2	离散控制系统的稳态误差分析	(273)
9.5.3	离散控制系统的动态响应分析	(274)
9.6	离散控制系统的校正与设计	(276)
9.6.1	数字控制器 $D(z)$ 的脉冲传递函数	(276)
9.6.2	最少拍系统的设计与校正	(277)
9.7	本章小结	(283)
9.8	习题	(283)
第10章	机械工程控制系统的计算机仿真与辅助设计	(285)
10.1	MATLAB 仿真软件简介	(285)
10.1.1	MATLAB 系统构成	(285)
10.1.2	MATLAB 桌面操作环境	(286)
10.1.3	MATLAB 程序设计	(289)
10.2	机械工程控制系统时域特性仿真	(291)
10.2.1	桥式起重机坐标系统	(291)
10.2.2	桥式起重机线性化模型	(292)
10.2.3	桥式起重机载荷摆动传递函数	(292)
10.2.4	桥式起重机传递函数频率特性仿真	(292)
10.2.5	MATLAB 源程序	(294)
10.3	机械工程控制系统频率特性仿真	(295)
10.3.1	桥式起重机传递函数	(295)

10.3.2	桥式起重机传递函数频率特性仿真	(295)
10.3.3	MATLAB 源程序	(296)
10.4	机械工程控制系统根轨迹仿真	(297)
10.4.1	绘制根轨迹的相关 MATLAB 函数	(297)
10.4.2	电磁驱动水压伺服机构及其线性化模型	(298)
10.4.3	电磁驱动水压伺服机构的根轨迹仿真	(299)
10.4.4	磁盘驱动读取系统的根轨迹仿真	(300)
10.4.5	未来超音速喷气式客机的根轨迹仿真	(301)
10.5	机械工程控制系统稳定性仿真	(302)
10.5.1	集中供热系统的数学模型	(303)
10.5.2	典型 PID 控制器	(303)
10.5.3	基于 Nyquist 准则设计 PID 控制器	(304)
10.5.4	集中供热系统的控制过程仿真	(305)
10.5.5	MATLAB 源程序	(307)
10.6	机械工程控制系统性能校正仿真	(307)
10.6.1	热处理炉的数学模型	(307)
10.6.2	典型 PID 控制器	(308)
10.6.3	基于 Nyquist 准则设计 PI 控制器	(309)
10.6.4	热处理炉的控制过程仿真	(310)
10.6.5	MATLAB 源程序	(311)
	主要符号说明	(312)
	索引	(313)
	参考文献	(315)

第1章 绪论

本章主要介绍工程控制理论的基本概念、控制系统、研究对象与任务，以及对控制系统的基本要求，然后对本门课程的特点及学习方法做简要介绍。

1.1 概述

随着科学技术的不断发展，自动控制技术已广泛应用于工业、农业、交通、生命学科、国防装备、航空航天和科学实践的各个领域，极大地提高了整个社会的劳动生产率，改善了人们的劳动条件，推动和促进了现代社会的快速发展。除了在宇宙飞船、导弹发射和飞机驾驶等领域中起着特别重要的作用之外，自动控制技术在现代制造业和工业生产过程中也是不可缺少的组成部分，而且在广泛应用于制造工业的数控机床、加工中心、工业机器人中，自动控制技术都起到了关键作用。此外，在过程控制工业中，对于压力、温度和流量等的控制，自动控制技术也是不可缺少的。

自动控制技术的不断发展促使人们不断地探索和实现自动控制技术的理论和方法。自动控制理论是自动控制技术的基础理论，是专门研究有关自动控制系统的概念、基本原理和基本方法的一门科学。根据自动控制技术的发展进程，自动控制理论可分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三大部分。

经典控制（Classical Control）理论是在复数域内以积分变换为数学工具研究单输入、单输出线性定常系统的动态历程，分析系统的稳定性、瞬态过程和稳态性能，以及系统性能校正。

现代控制（Modern Control）理论是在时间域内以状态方程为基础研究多输入、多输出系统的动态历程。这里的系统可以是线性的也可以是非线性的，可以是定常的也可以是时变的，可以是连续的也可以是离散的，可以是确定的也可以是随机的。

智能控制（Intelligent Control）理论是自动控制理论发展的高级阶段，是人工智能、控制理论、系统论、信息论、仿生学、神经生理学、进化计算和计算机等多种学科的高度综合与集成，是一门新兴的边缘交叉学科。它主要研究那些用传统方法难以解决的具有不确定性模型、高度非线性及复杂要求的复杂系统的控制问题。

经典控制理论是自动化控制理论的基础，它在工业、化工、能源等领域得到了广泛的应用，不失为解决工程实际问题的基本理论和方法。

经典控制理论在机械系统和机械工业生产过程中得到广泛的应用，从而形成了一门新型科学——机械工程控制理论（Mechanical Engineering Control Theory）。机械工程控制理论是将经典控制理论应用于机械工程而形成的一门科学，是研究以机械工程为对象的经典控制理论问题，这是一门跨控制理论与机械工程领域的边缘科学。

1.2 工程控制理论的研究对象与任务

工程控制理论实质上是研究工程技术中广义系统的动力学问题。具体地说，它研究的是

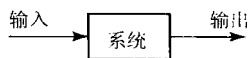


图 1-1 工程控制理论研究对象

工程技术中的广义系统在一定的外界条件（即输入或激励，包括外加控制与外加干扰）作用下，从系统一定的初始状态出发，所经历的由其内部的固有特性（即系统的结构与参数所决定的特性）所决定的整个动态历程；同时研究这一系统（System）、输入（Input）和输出（Output）三者之间的动态关系，如图 1-1 所示。

所示。

就系统、输入、输出三者之间的动态关系而言，工程控制理论的研究内容大致可归纳为如下五个方面：

（1）当系统已定、输入已知时，求系统的输出，并且通过输出研究系统本身有关的问题，即系统分析（System Analysis）问题；

（2）当系统已定时，求系统的输入，并且所确定的输入应使输出尽可能符合给定的最佳要求，即最优控制（Optimal Control）问题；

（3）当输入已知时，确定系统，并且所确定的系统应使输出尽可能符合给定的最佳要求，即最优设计（Optimal Design）问题；

（4）当输出已知、系统已定时，识别输入或输入中有关的信息，即滤波（Filtering）与预测问题；

（5）当输入与输出均已定时，求系统的结构与参数，以建立系统的数学模型，即系统识别或系统辨识（System Identification）问题。

本书主要从经典控制理论的角度来研究问题（1）。学习机械工程控制基础要解决两个问题：一是如何分析给定控制系统的工作原理、稳定性和过渡特性；二是如何根据实际需要来进行控制系统的设计。前者是系统分析，后者是系统综合与设计。

1.3 控制系统

1.3.1 控制系统

系统是一个由相互联系、相互作用的若干部分构成的，并且有一定的目的或运动规律的整体。其实，在自然界、社会和工程中，存在着各种各样的系统，任何一个系统都处于同外界相互联系之中，也都处于运动之中。由于系统具有相应的机制，又同外界相互作用，所以会有相应的行为、响应或输出。外界对系统的作用和系统对外界的作用，分别称为输入和输出。

以实现一定的机械运动，承受一定的机械载荷为目的，由机械元件组成的系统，称为机械系统（Mechanical System）。这是一类广泛存在的系统，如各种工作机械、动力设备、交通工具及某些工程结构等均是机械系统。数控机床工作台的驱动系统如图 1-2 所示，控制装置通过发出一定频率和数量的脉冲指令来驱动步进电机，以控制工作台或刀架的移动量。机械系统的输入与输出，往往又分别称为激励（Excitation）与响应（Response）。机械系统的激励一般是外界对系统的作用，如作用在系统上的力（即载荷）等，而响应则是系统的变形或位移等。

一个系统的激励，如果是人为地、有意识地加上去的，则往往又称为控制（Control）；如果是偶然因素产生的且一般无法完全人为控制的，则称为扰动（Disturbance）。

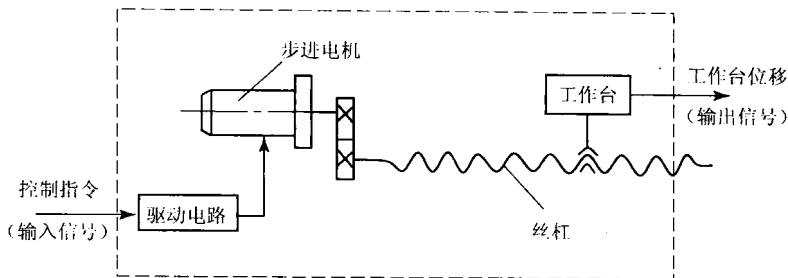


图 1-2 数控机床工作台的驱动系统

1.3.2 反馈控制系统

反馈（Feedback）是工程控制理论中一个最基本、最重要的概念，是工程控制系统的一大特点。所谓反馈，就是将系统的输出信号通过一定的检测元件变送返回到系统的输入端，并和系统的输入信号进行比较的过程。当反馈信号与输入信号同相，反馈信号加强输入信号的作用时，称为正反馈（Positive Feedback）；反之，当反馈信号与输入信号反相，反馈信号抵消输入信号的作用时，称为负反馈（Negative Feedback）。控制系统一般采用负反馈的工作方式，因为只有负反馈才能减小偏差量，使系统最终能稳定工作。系统及其输入、输出之所以有动态关系，就是由于系统本身有着信息的反馈。

人们早就知道利用反馈控制原理来设计和制造机器、仪表或其他工程系统。我国早在北宋时代（1086—1089）就发明了具有反馈控制原理的自动调节系统——水运仪象台。通常把具有反馈的系统称为闭环控制系统（Closed-Loop Control System）。例如，在日常生活中经常使用的储水槽，其水面自动调节系统就是一个简单的反馈控制系统，如图 1-3(a)所示。浮子测出水面实际高度 h ，根据与期望水面高度 h_0 之差，推动杠杆控制进水阀门进水，一直到实际水面高度 h 与期望水面高度 h_0 相等时，关闭进水阀门。它的信息作用、传递关系可用图 1-3(b)表示，其中反馈信息为实际水面高度 h ，通过与期望水面高度 h_0 相比较形成一个反馈控制系统。

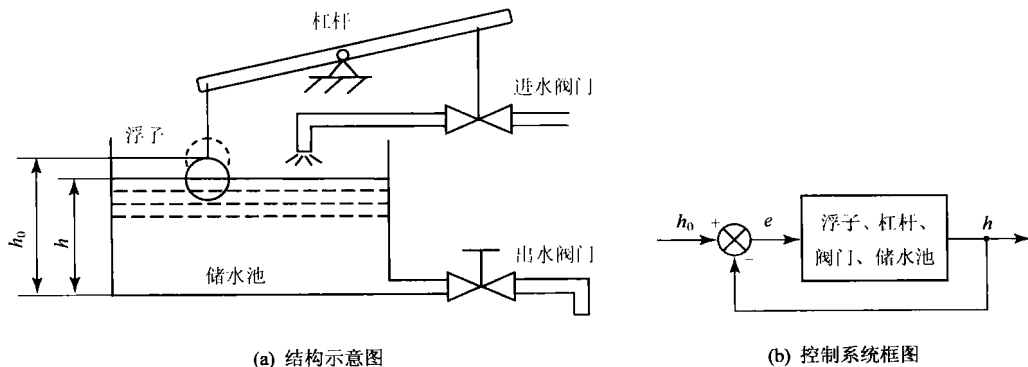


图 1-3 水面自动调节系统

图 1-2 所示的是数控机床工作台的驱动系统，对工作台或刀架的实际移动量不进行检测，从驱动电路到工作台整个传动链中的任意一环的误差均会影响工作台的移动精度或定位精

度，工作台的位移对系统的输入没有控制作用，因此，这种控制方式结构简单，成本低廉。为了提高工作台的定位精度，用检测装置测定工作台的实际位置，然后反馈到输入端，与控制指令比较，再根据工作台实际位置与期望位置之间的误差，决定控制动作，以达到消除误差的目的，这便是反馈控制系统，如图 1-4 所示。

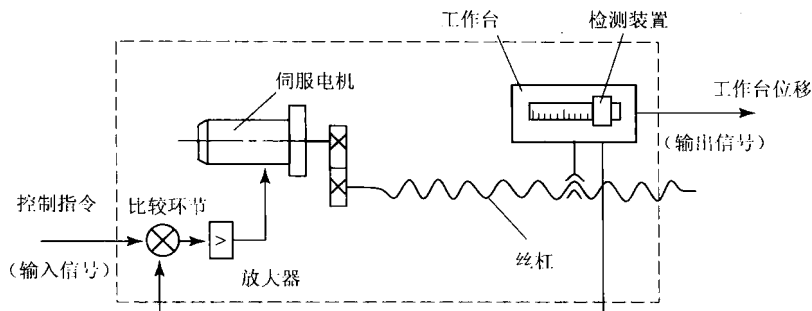


图 1-4 数控机床工作台伺服驱动系统

应当特别指出，人们往往把反馈控制系统局限于自动控制系统，或者仅从表面现象来判断系统是否为反馈控制系统，这就大大限制了控制理论的应用范围。人们往往利用反馈控制系统原理在机械系统或过程中加上一个“人为”的反馈，从而构成一个自动控制系统。例如，上述水面自动调节系统及其他所谓“自动控制系统”都人为地外加了反馈。但是，在许多机械系统或过程中，往往存在由相互耦合作用构成非人为的“内在”的反馈，从而形成一个闭环控制系统。例如，机械系统中由作用力与反作用力的相互耦合形成的内在反馈。又如，在机械系统或过程（如切削加工过程）中，自激振动的产生必是由于存在内在反馈，使能量在内部循环，从而促使振动持续进行。这样的例子有很多，因而很多机械系统或过程从表面上看是开环系统，但经过分析可以发现它们实际上都是闭环系统。但是，必须注意从动力学的而不是静力学的观点，从系统的而不是孤立的观点进行分析，从而揭示系统或过程的本质。

1. 反馈控制系统的基本组成

图 1-5 是一个典型闭环控制系统（Closed-Loop Control System）的框图。该系统的控制部分由以下几个环节组成。

(1) 给定环节：该环节是给出输入信号的环节，用于确定被控制对象的“目标值”（或称为给定值），给定环节可以用各种形式（电量、非电量、数字量、模拟量等）发出信号。例如，在图 1-3 所示的水面自动调节系统中，期望水面高度 h_0 就是给定环节。

(2) 测量环节：该环节用于测量被控制量，并把被控制量转换为便于传送的另外一个物理量。例如，用电位计将机械转角转换为电压信号，用测速电机将转速转换为电压信号，用光栅测量装置将直线位移转换为数字信号等。图 1-4 中的工作台位置检测装置、图 1-3 中的浮子均为测量环节。

(3) 比较环节：在这一环节中，输入信号 x_i 与测量环节测量的被控制量 x_o 的反馈量 x_b 相比较，并得到一个小功率偏差信号 ε ， $\varepsilon = x_i - x_b$ 。其中，比较包括幅值比较、相位比较和位移比较等。偏差信号是比较环节的输出。

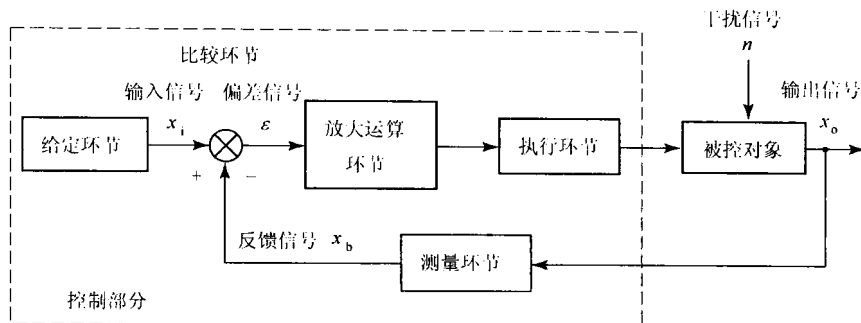


图 1-5 反馈控制系统的基本组成

(4) 放大运算环节：为了实现控制，要对偏差信号进行必要的运算，然后进行功率的放大，以便推动执行环节。常用的放大类型有电流放大、液压放大等。

(5) 执行环节：该环节接收放大环节送来的控制信号，驱动被控制对象按照预期的规律运行。执行环节一般是一个有源的功率放大装置，工作中要进行能量转换。例如，把电能通过直流电机转化为机械能，驱动被控制对象进行机械运动。在图 1-3 中，杠杆就是执行机构。

给定环节、测量环节、比较环节、运算放大环节和执行环节一起，组成了这一控制系统的控制部分，目的是对被控制对象实现控制。当然，有的装置可兼有两个环节的作用。

2. 反馈控制系统的信号

下面对反馈控制系统（Feedback Control System）中的信号进行定义。

- (1) 输入信号（Input Signal）（又称为激励）：它是控制输出信号变化规律的信号。
- (2) 输出信号（Output Signal）（又称为响应）：它的变化规律要加以控制，应保持与输入信号之间有一定的关系。
- (3) 反馈信号（Feedback Signal）：从系统输出端测量的信号，通过变换后加到系统输入端。
- (4) 偏差信号（Error Signal）（或称为偏差）：它是输入信号与反馈信号之差。
- (5) 误差信号（或称为误差）：它是系统的输出信号的实际值与期望值之差。
- (6) 扰动信号（Disturbance Signal）（或称为干扰）：除输入信号之外，对系统的输出信号产生影响的因素都称为扰动信号。

1.3.3 控制系统分类

为便于研究和分析控制系统，可对有关控制系统从不同角度进行分类。

1. 按反馈情况分类

1) 开环控制系统

开环控制（Open-loop Control）是最简单的一种控制方式，如图 1-6 所示。它的特点是控制系统的控制量与被控量之间只有前向通道，即只有从输入端到输出端的单方向通道，而无反向通道。系统中只有输入信号对输出信号产生控制作用，输出信号不参与系统的控制，因而控制作用的传递路径不是闭合的。