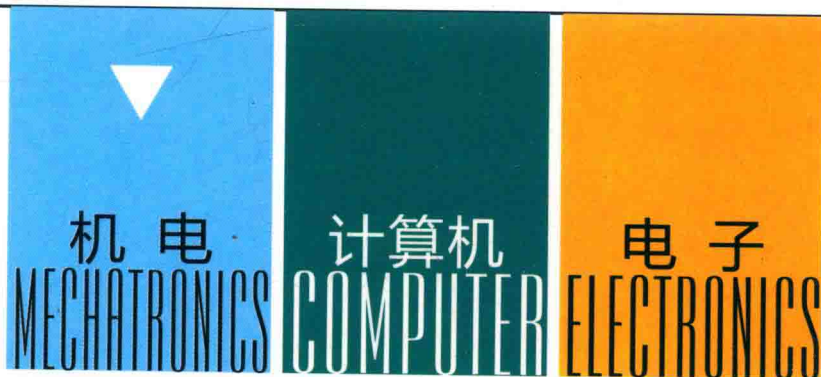


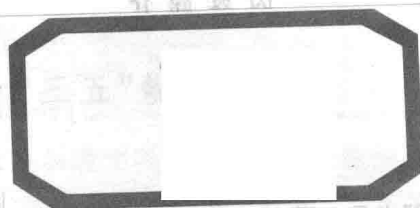
► 高等学校应用型本科“十三五”规划教材



机械工程控制基础

► 主编 刘国华

高等学校应用型本科“



机械程控制基础

主 编 刘国华

副主编 尚志武 耿冬寒 王天琪

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书内容包括机械控制的基本概念、系统的数学模型、时域分析、频域分析、系统的稳定性分析、系统的校正等。

本书着重阐述了经典控制理论,特别是其中的时域法和频域法,并基于时域法和频域法进行了系统的分析。同时,考虑到系统数学模型的重要性,在“控制系统的数学模型”一章对控制系统的建模过程进行了重点分析。

本书力求在讲清机械控制基本概念的前提下,更多地结合机械工程实际,为帮助读者学习与应用控制理论来解决机械工程的实际问题奠定必要的基础。

本书可以作为机械类、机电类、轻工机械类专业本科生的教材,也可作为其他学科本科生专业课的教材。此外,本书亦可供从事机械类相关工作的科技人员自学与参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械控制基础/刘国华主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2017. 1

高等学校应用型本科“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4349-6

I. ① 机… II. ① 刘… III. ① 机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. ① TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 298766 号

策划编辑 秦志峰

责任编辑 宁晓蓉

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 10

字 数 228千字

印 数 1~2000册

定 价 21.00元

ISBN 978-7-5606-4349-6/TH

XDUP 4641001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

西安电子科技大学出版社
高等学校应用型本科“十三五”规划教材

编审专家委员会名单

主任：鲍吉龙(宁波工程学院副院长、教授)

副主任：张国云(湖南理工学院副院长、教授)

彭 军(重庆科技学院电气与信息工程学院院长、教授)

刘黎明(南阳理工学院软件学院院长、教授)

庞兴华(南阳理工学院机械与汽车工程学院副院长、教授)

机电组

组 长：庞兴华(兼)

成 员：(成员按姓氏笔画排列)

丁又青(重庆科技学院机械与动力工程学院副院长、教授)

王志奎(南阳理工学院机械与汽车工程学院副院长、教授)

刘振全(天津科技大学电子信息与自动化学院副院长、副教授)

何高法(重庆科技学院机械与动力工程学院院长助理、教授)

胡文金(重庆科技学院电气与信息工程学院系主任、教授)

电子与通信组

组 长：张国云(兼)

彭 军(兼)

成 员：(成员按姓氏笔画排列)

王天宝(成都信息工程学院通信学院院长、教授)

朱清慧(南阳理工学院电子与电气工程学院院长、教授)

安 鹏(宁波工程学院电子与信息工程学院副院长、副教授)

杨光松(集美大学信息工程学院副院长、教授)

苏世栋(运城学院物理与电子工程系副主任、副教授)

沈汉鑫(厦门理工学院光电与通信工程学院副院长、副教授)

钮王杰(运城学院机电工程系副主任、副教授)

唐德东(重庆科技学院电气与信息工程学院副院长、教授)

谢 东(重庆科技学院电气与信息工程学院自动化系主任、教授)

湛腾西(湖南理工学院信息与通信工程学院教授)

楼建明(宁波工程学院电子与信息工程学院副院长、副教授)

计算机大组

组 长:刘黎明(兼)

成 员:(成员按姓氏笔画排列)

毕如田(山西农业大学资源环境学院副院长、教授)

向 毅(重庆科技学院电气与信息工程学院院长助理、教授)

刘克成(南阳理工学院计算机学院院长、教授)

李富忠(山西农业大学软件学院院长、教授)

何明星(西华大学数学与计算机学院院长、教授)

张晓民(南阳理工学院软件学院副院长、副教授)

范剑波(宁波工程学院理学院副院长、教授)

赵润林(运城学院计算机科学与技术系副主任、副教授)

黑新宏(西安理工大学计算机学院副院长、教授)

雷 亮(重庆科技学院电气与信息工程学院计算机系主任、副教授)

前 言

本书是为高等院校的机械工程类专业，特别是机械制造工程类及机电类专业的“机械控制工程基础”课程编写的教材。

随着 20 世纪控制技术的巨大进步，控制理论不断地得到完善，将控制理论应用于机械工程的重要性日益明显，促使了“机械工程控制论”这门学科的产生与发展。本书作为一门技术基础课的教材，力求在阐明机械工程控制论的基本概念、基本知识与方法的基础上，紧密结合机械工程实际，特别是结合机械制造工程实际，以便沟通与加强数理基础与专业知识之间的内在联系。

本书特点是着重阐述了经典控制理论，特别是其中的时域法和频域法，并基于时域法和频域法进行了系统的分析。同时，考虑到系统数学模型的重要性，在“控制系统的数学模型”一章对控制系统的建模过程进行了重点分析。本书不包括数学基础部分（例如“积分变换”），因为这部分数学基础已见诸其他相关教材。本书的教学时数为 40~60 学时。

本书是根据机械与自动化学科的发展趋势，参考国内外同类教材改革的经验与动向，结合我们近年来的教学探索、研究与实践，在原讲义的基础上编写而成的。我们对原讲义的体系、内容和论述方法做了很多变动和修改。

本书由刘国华、尚志武、耿冬寒和王天琪集体讨论，分工执笔编写而成。其中：第三、四、五章由刘国华执笔；第一、二章由耿冬寒执笔；第六章由尚志武执笔；第七章由王天琪执笔，该章中的 Matlab 程序也由王天琪编写。全书由刘国华统编。在本书的编写过程中，李涛、卓金尧、李金鑫等几位研究生也参与了资料整理工作，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正！

编 者

2016 年 7 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 自动控制理论的形成与发展	1
1.1.2 机械工程控制论的研究对象与任务	2
1.2 机械工程控制系统的工作原理和基本组成	2
1.2.1 反馈与反馈控制	2
1.2.2 机械工程自动控制系统的基本原理	3
1.2.3 机械工程自动控制系统的基本组成	5
1.3 自动控制系统的分类	6
1.4 自动控制系统的的基本要求	8
1.5 本课程的特点和学习方法	8
习题	9
第二章 控制系统的数学模型	10
2.1 系统的微分方程	10
2.1.1 系统微分方程的建立	10
2.1.2 非线性数学模型的线性化	13
2.2 拉普拉斯变换与反变换	14
2.2.1 拉普拉斯变换的定义	14
2.2.2 拉普拉斯变换的基本性质	15
2.2.3 拉普拉斯反变换	17
2.3 系统的传递函数	18
2.3.1 传递函数的定义与基本特点	18
2.3.2 典型环节的传递函数	19
2.4 控制系统的方框图及其等效变换	24
2.4.1 系统方框图的组成	24
2.4.2 系统方框图的绘制	25
2.4.3 系统方框图的等效变换	26
2.5 信号流图与梅逊公式	29
2.5.1 信号流图的概念	29
2.5.2 梅逊公式	29
习题	30
第三章 线性系统的时域分析	33
3.1 概述	33
3.1.1 时域分析法	33

3.1.2	时间响应	33
3.1.3	典型输入信号	34
3.2	时间响应及其组成	35
3.3	一阶系统的时间响应	37
3.3.1	一阶系统的单位阶跃响应	38
3.3.2	一阶系统的单位斜坡响应	39
3.3.3	一阶系统的单位脉冲响应	39
3.4	二阶系统的时间响应	40
3.4.1	二阶系统的数学模型	41
3.4.2	二阶系统的单位阶跃响应	42
3.5	二阶系统的性能指标分析	46
3.5.1	瞬态响应指标分析	46
3.5.2	二阶系统时域指标与频域指标的关系	53
3.6	利用 Matlab 分析控制系统的特点及性能	54
	习题	55
第四章	线性系统的频域分析	57
4.1	概述	57
4.1.1	频率响应和频率特性	57
4.1.2	频率特性的求法	59
4.1.3	频率特性的性质	61
4.1.4	频率特性的表示法	61
4.2	频率特性的极坐标图	62
4.2.1	典型环节的极坐标图	62
4.2.2	Nyquist 图的一般绘制方法	68
4.3	频率特性的伯德图(Bode 图)	71
4.3.1	概述	71
4.3.2	典型环节的 Bode 图	72
4.3.3	Bode 图的绘制方法	78
4.4	频率特性的实验测定法	81
4.4.1	频率特性的实验分析方法	81
4.4.2	由 Bode 图确定(估算)系统的频率特性	81
4.5	最小和非最小相位系统	83
4.6	利用 Matlab 绘制频率特性图	84
4.6.1	Nyquist 图的一般描述	85
4.6.2	Bode 图的一般描述	85
	习题	86
第五章	线性系统的稳定性分析	88
5.1	控制系统稳定性的基本概念	88
5.1.1	稳定性的定义	88

5.1.2	判别线性系统稳定性的充要条件	88
5.1.3	稳定性的一些提法	90
5.2	劳斯(Routh)稳定判据	90
5.2.1	劳斯稳定判据的必要条件	91
5.2.2	劳斯稳定判据的充要条件	92
5.2.3	劳斯稳定判据的特殊情况	93
5.2.4	劳斯稳定判据的应用	94
5.3	奈奎斯特(Nyquist)稳定判据	95
5.3.1	函数 $F(s)$ 与开环、闭环的传递函数零点和极点的关系	96
5.3.2	幅角原理	97
5.3.3	奈奎斯特稳定判据	97
5.3.4	奈奎斯特稳定判据应用举例	99
5.3.5	奈奎斯特稳定判据的几点说明	101
5.4	对数判据(Bode 判据)	102
5.5	控制系统的相对稳定性	105
5.5.1	相位裕量	106
5.5.2	幅值裕量	107
5.5.3	关于相位裕量和幅值裕量的说明	107
5.5.4	影响系统稳定性的主要因素	107
5.6	利用 Matlab 分析系统稳定性	110
5.6.1	代数法判别系统稳定性	110
5.6.2	奈奎斯特图法判断系统稳定性	110
5.6.3	伯德图法判断系统稳定性	111
	习题	112
第六章	线性系统的校正方法	114
6.1	系统的设计与校正问题	114
6.1.1	性能指标	114
6.1.2	系统的校正方式	116
6.1.3	基本控制规律	117
6.2	常用校正装置及其特性	122
6.2.1	无源校正装置(阻容元件)	122
6.2.2	有源校正装置	127
6.3	串联校正	127
6.3.1	串联超前校正	128
6.3.2	串联滞后校正	129
6.3.3	串联滞后-超前校正	131
6.4	反馈校正	132
	习题	133
第七章	直线一级倒立摆控制系统分析	135

7.1 倒立摆控制系统	135
7.1.1 倒立摆控制系统简介	135
7.1.2 牛顿力学方法的推导	136
7.1.3 倒立摆系统模型	138
7.2 直线一级倒立摆频率响应仿真	138
7.3 直线一级倒立摆 PID 控制实验	140
7.3.1 PID 控制分析	140
7.3.2 直线一级倒立摆 Simulink 仿真	141
7.3.3 PID 控制参数设定及仿真	146
习题	149
参考文献	150

第一章 绪 论

机械工程自动控制是一门跨控制论和机械工程的技术学科,它研究自动控制理论在机械工程中的应用问题。它提供了辩证的系统分析方法,即不但从局部,而且从整体上认识和分析机械系统,改进和完善机械系统,以满足科技发展和工业生产的实际需要。控制论在机械工程中的应用,使机械制造过程和机械产品本身的自动化和智能化水平不断提高,机械工程控制论这门新兴学科也随之越来越为人们所重视。

1.1 引 言

1.1.1 自动控制理论的形成与发展

自动控制技术的应用远比自动控制理论的历史悠久得多。控制理论的产生有其自身的实践基础。中国古代的指南车、木牛流马、地动仪、水运仪象台、J. Watt 为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器等等,都是自动控制领域的重要成果。控制论从解决生产实际问题开始,并随着生产实践的发展得到了不断的丰富与完善。

1868 年 J. C. Maxwell 发表《论调速器》文章,从理论上对 J. Watt 的离心式飞球调速器加以提高,并首先提出了“反馈控制”的概念,同时也开辟了用数学方法研究控制系统中运动现象的途径,指出振荡现象的出现同由系统导出的一个代数方程根的分布形态有密切的关系,从而解释了速度控制系统中出现的不稳定现象。此后,许多科学家致力于控制稳定性方面的研究。1884 年, E. J. Routh 提出劳斯稳定性判据;1892 年, A. M. Lyapunov 提出李雅普诺夫稳定性理论;1895 年, A. Hurwitz 提出赫尔维茨稳定性判据;1932 年, H. Nyquist 运用复变函数理论的方法建立了根据频率响应判断反馈系统稳定性的准则,即奈奎斯特稳定性判据,奠定了频率响应法的基础,随后, H. W. Bode 的负反馈放大器进一步将频率响应法加以发展。第二次世界大战期间,美国 MIT 伺服机构实验室等对以往的自动调节器和反馈放大器作了总结,提出了反馈控制的数学基础。1948 年, N. Wiener 通过研究火炮自动控制系统,发表了著名的《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一文,提出了控制论所具有的信息、反馈与控制三要素,标志着经典控制理论基本形成。同年,美国科学家 W. R. Evans 提出了根轨迹的分析方法,用于研究系统参数对反馈控制系统的稳定性和运动特性的影响,并于 1950 年将其推广于反馈控制系统的设计,从而构成了经典控制理论的又一核心方法——根轨迹法。1954 年,钱学森发表《工程控制论》,奠定了工程控制论这一技术科学的基础,使得控制论又向前大大地发展了一步。

20 世纪 50 年代及其之前的控制理论属于经典控制理论,它以调节器和伺服机构为基础,在复域(特别是频域)内利用传递函数(或频率特性)来研究与解决单输入单输出线性系统的稳定性、响应快速性和准确性的问题。经典控制理论在解决简单的控制系统的分析和

设计问题方面是很有效的,至今仍不失其实用价值。存在的局限性主要表现在只适用于单变量系统,且仅限于研究定常系统。

从20世纪50年代末开始,伴随着科学技术的进步尤其是计算机技术的快速发展,现代控制理论得到了发展,它以状态空间法为基础,研究多输入多输出、变参数、非线性、高精度、高效能控制系统的设计与分析问题。

20世纪末至今,控制论向着“大系统论”和“智能控制论”发展。大系统论是用控制和信息的观点研究大系统的结构方案、总体设计中的分析方法和协调问题;智能控制论是研究与模拟人类活动的机理,以使控制系统具有仿人工智能的工程控制和信息处理功能,实现具有高度复杂性、高度不确定性的系统,以满足人们对控制系统越来越高的要求。

1.1.2 机械工程控制论的研究对象与任务

1. 机械工程控制论的研究对象

机械工程控制论是研究以机械工程技术为对象的控制论问题。具体地讲,是研究工程技术中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,从系统的一定初始状态出发,所经历的由其内部的固有特性(即由系统的结构与参数决定的特性)所决定的整个动态历程;研究这一系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

需要特别强调的是,工程控制论的研究对象是广义系统。这个系统可大可小,可“繁”可“简”,甚至可“虚”可“实”,完全由研究的需要而定。例如,这个系统可以是一台机器(数控机床、工业机器人等),也可以是一个过程(切削过程、生产过程等),还可以是通过计算机网络组织起来的整个生产的组织与管理(无人车间、虚拟企业等)。

2. 机械工程控制论的研究任务

就系统及其输入与输出三者之间的关系而言,机械工程控制论主要研究并解决以下几个方面的问题。

(1) 当系统已定,并且输入(激励)已知时,求出系统的输出(响应),并通过输出来研究系统本身的有关问题,此即系统分析问题。

(2) 当系统已定时,要确定使系统输出尽可能符合给定的最佳要求的输入,即系统的最优控制。

(3) 当输入已知时,要确定使输出尽可能符合给定的最佳要求的系统,即最优设计问题。

(4) 当输入与输出均已知时,求出系统的结构与参数,建立系统的数学模型,即系统识别或系统辨识问题。

(5) 当输出已知时,确定系统,以识别输入或输入中的有关信息,即滤波与预测问题。

1.2 机械工程控制系统的工作原理和基本组成

1.2.1 反馈与反馈控制

控制论的核心内容是通过信息的传递、加工处理和反馈来进行控制。控制论把一切能表达一定含义的信号、符号、密码和消息统称为信息。所谓信息传递,是指信息在系统及

过程中以某种关系动态地传递,亦称转换。

将系统的输出直接地或经过中间变换后,全部或部分地返送回系统的输入端,并与输入信号共同作用于系统的过程,称为反馈或信息反馈。如果反馈回去的信号与系统的输入信号方向相反,称之为负反馈;如果方向相同,则称之为正反馈。

人类最简单的活动,如走路或取物都利用了反馈的原理以保持正常的动作。人抬起腿每走一步路,腿的位置和速度的信息不断通过人眼及腿部皮肤与神经感觉反馈到大脑,从而保持正常的步法;人取物时,手的位置与速度信息不断反馈到人脑以保证准确而适当地抓住待取之物。

反馈是机械控制工程中一个最基本、最重要的概念。在自动控制系统中,通常存在着反馈控制,即利用反馈信号对系统进行控制。

如水位自动控制系统中,控制的目的是使水位保持在一定的高度上。水位高度是被控量。水位实际高度通过浮球装置检测,并作为反馈信息与期望液面高度做比较,所得结果即为水位高度的偏差信号。利用偏差信号推动杠杆控制阀门的开闭程度,一直到实际液面高度与要求液面高度相等。又如恒温箱自动控制系统,控制的目的是使箱内温度恒定。恒温箱的温度由给定信号电压控制,当外界因素引起箱内的温度变化时,热电偶作为检测元件把温度转换为对应的电压信号,并反馈回去与给定信号相比较,所得结果即为温度的偏差信号。利用偏差信号通过调整电动机转速控制电流大小,直到恒温箱内实际温度等于期望温度。

在上述两例中,由于存在输出量反馈,系统能在存在扰动的情况下,自动减少系统的输出量与参考输出量之间的偏差,故称之为反馈控制。在机械技术领域,越来越多地采用自动控制系统,在这种系统中,往往有着“反馈控制”,正如以上两例中的反馈,均是人们为达到一定的控制目的有意设计的。事实上,除了上述人为的“外在反馈”以外,机械系统中还广泛地存在着各种自然形成的反馈,称为“内在反馈”。例如机械系统中作用力与反作用力的相互耦合从而形成内在反馈。又如在机械系统或过程中自激振动的产生,也必是存在内在的反馈使能量在内部循环,促使振动持续进行。内在反馈反映系统内部各参数之间互为因果的内在联系,这对系统的动态性能有着非常重要的影响,而且往往很难加以控制。机械系统或过程中广泛地存在外反馈和内在反馈,所以要注意必须从动力学而不是静力学的观点,从系统而不是孤立的观点进行分析,才能揭示控制过程的本质。

1.2.2 机械工程自动控制系统的基本原理

机械工程自动控制系统简称机械控制系统,它是一种自动控制系统。自动控制是在无人直接参与的情况下,利用控制器使被控对象的某一物理量按预期的规律运动,包括被控对象和控制装置。

本小节以蒸汽机转速控制系统和卷纸张力系统为例说明自动控制系统的工作原理。

1. 蒸汽机转速控制系统

如图 1-1 所示蒸汽机转速控制系统中,控制的目的是使蒸汽机的转速 n 保持在一个恒定的数值上,这个恒定的数值即控制系统的目标值,转速称为控制系统的被控量或控制量。如果给蒸汽机额定的蒸汽流量 Q ,负载为额定负载不变,在没有外界干扰的情况下,则蒸汽机的转速为额定转速 n ,即目标值。但当负载发生变化时,蒸汽机的转速必然随之

改变，为了控制转速始终保持在目标值上，需要对速度进行实时调节。

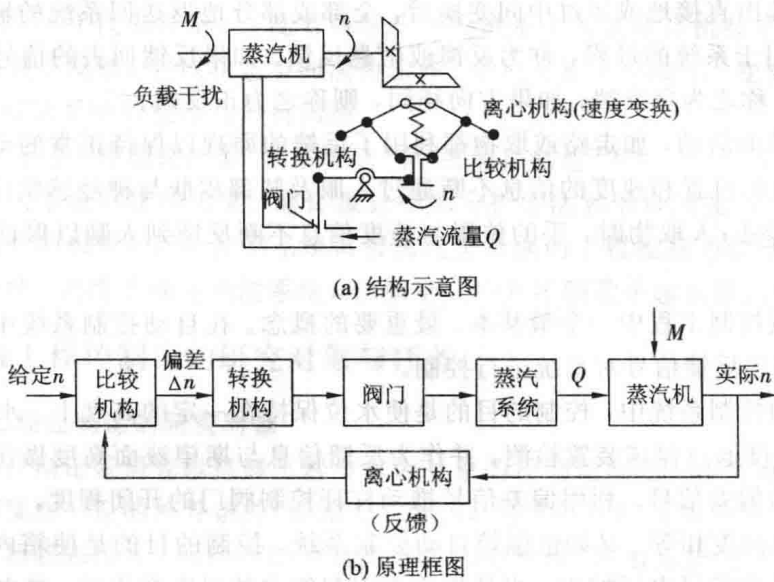


图 1-1 蒸汽机转速控制系统

在蒸汽机转速自动控制系统中，离心调速装置由离心机构、比较机构和转换机构组成，通过调节进入蒸汽机的蒸汽流量 Q ，使蒸汽机在不同的工作负载下，输出转速 n 保持不变。工作(调速)过程为：当外界负载增大时，因蒸汽带入的功率不变，故输出转速 n 下降，离心机构的张开角度 ϕ 减小，比较机构的滑套下降，带动转换机构的杠杆，使得调节阀阀门的开度增大，蒸汽流量 Q 随之增加，从而使输出转速 n 上升并趋于目标值。反之，负载减小，转速 n 上升，张角 ϕ 增大，滑套上移，阀门开口减小，流量 Q 降低，从而调节转速下降并趋于目标值。

2. 卷纸张力系统

在造纸厂的卷纸过程中，卷开轴和卷进轴之间的纸张承受的张力应基本恒定。如图 1-2 所示，随着纸卷厚度的变化，纸上的张力将会发生变化，因此必须调整电机的转动速度。通常用 3 个滑轮和 1 个弹簧组成的系统来测量纸上的张力。

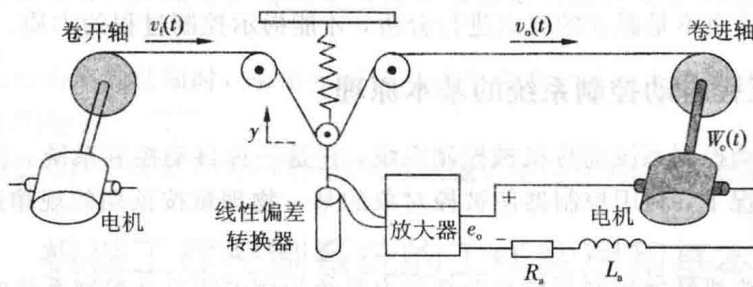


图 1-2 卷纸张力系统

整个自动控制系统的工作过程如下：

- (1) 检测输出量(被控量)的实际值；
- (2) 将输出量的实际值与给定值(输入量)进行比较而得出偏差；
- (3) 根据偏差值产生的控制调节作用消除偏差，使输出量维持在期望的输出值。

1.2.3 机械工程自动控制系统的基本组成

从上面几个实际控制系统的例子可以看出,一个典型的反馈控制系统的基本组成可用图 1-3 表示。

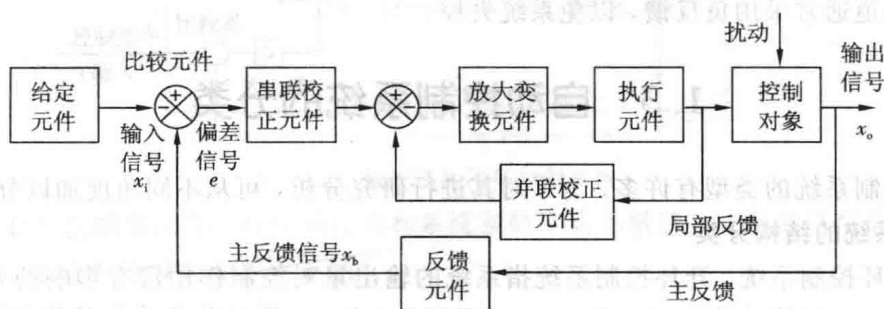


图 1-3 典型反馈控制系统原理框图

给定元件: 又称输入元件, 主要用于产生给定信号或输入信号。

比较元件: 接收输入和反馈信号并进行比较, 输出两者的偏差值。

放大元件: 对较弱的偏差信号进行放大以推动执行元件动作。

执行元件: 直接对被控对象进行操纵的环节。

反馈元件: 测量被控量或输出量, 产生主反馈信号。反馈元件一般使用检测元件, 为了便于传输, 这些检测元件通常是用电量来测量非电量的一些元件, 并转换成电信号反馈到比较环节, 如各种传感器、测速发电机等。

校正元件: 又称校正装置, 该环节不是反馈系统必须具备的, 是为改善系统控制性能而加入的环节。其中, 串联在系统前向通道的称为串联校正元件, 并接在反馈回路上的称为并联校正元件。

以上介绍了控制系统的基本组成, 下面将常用的控制系统的一些基本概念和名词术语归纳如下:

被控对象: 在控制理论和控制技术中, 运动规律或状态需要控制的装置称为控制对象或被控对象。

控制器: 在控制系统中, 被控对象以外的所有装置统称为控制器。因此, 控制系统可以说是由控制器和被控对象两部分组成的。

输入信号: 又叫输入量、控制量或给定量。从广义上说, 输入信号是指输入到系统中的各种信号, 包括对系统输出不利的扰动信号在内。但一般我们所说的输入信号是指控制输出量变化规律的信号。

输出信号: 又叫输出量、被控制量或被调节量, 是表征被控对象运动规律或状态的物理量。输出信号是输入信号作用的结果, 因此, 它的变化规律应与输入信号之间保持确定的关系。

反馈信号: 输出信号经过反馈元件变换后加到输入端的信号。

偏差: 系统的输入量与反馈量之差, 即比较环节的输出。

误差: 输出量实际值与希望值之差, 希望值常常是系统的输入量。误差和偏差不是相同的概念, 只有在单位反馈系统, 即反馈信号等于输出信号的情况下, 误差才等于偏差。

扰动信号：偶然的无法加入人为控制的信号，称为扰动信号或干扰信号。根据产生的部位，分为内扰和外扰。扰动是一种输入量，一般对系统的输出量将产生不利的影响，人为的激励或输入信号称为控制信号。

若反馈信号的符号与输入信号相同，则称为正反馈；反之，则称为负反馈。控制系统中的主反馈通道通常采用负反馈，以免系统失控。

1.3 自动控制系统的分类

实际控制系统的类型有许多，为了对其进行研究分析，可从不同角度加以分类。

1. 按系统的结构分类

(1) 开环控制系统。开环控制系统指系统的输出量对控制作用没有影响的系统。在开环控制系统中，系统的输出量与输入量间不存在反馈的通道，不需要对输出量进行测量。洗衣机就是开环控制系统的例子，浸湿、洗涤和漂洗过程，在洗衣机中是依次进行的，在洗涤过程中，无需对其输出信号，即衣服的清洁程度进行测量。

图 1-4 是开环系统的又一实例。这是一种简单的数控机床工作台驱动系统，根据待加工工件的图纸要求，编制成控制指令，输入装置将控制指令转换为控制信号输入驱动电路，驱动步进电机按加工指令要求，控制工作台的运动，从而加工出图纸所要求的工件。

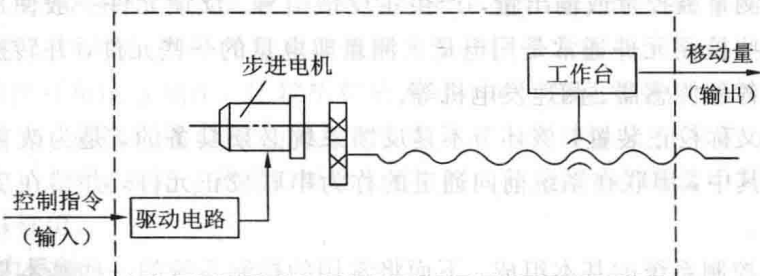


图 1-4 数控机床开环控制系统

开环系统简单、稳定、可靠。若组成系统的元件特性和参数值比较稳定，且外界干扰较小，开环控制能够保持一定的精度。开环系统的缺点是精度通常较低、无自动纠偏能力。

(2) 闭环控制系统。凡是系统输出信号对控制作用有直接影响的系统，都称为闭环系统。输入信号和反馈信号(反馈信号可以是输出信号本身，也可以是输出信号的函数或导数)之差，称为偏差信号，偏差信号加到控制器上，以减小系统的误差，并使系统的输出量趋于所希望的值。换句话说，“闭环”的涵义，就是应用反馈作用来减小系统的误差。上节中提到的蒸汽机转速控制系统和卷纸张力系统都属于闭环控制系统。

图 1-5 为闭环控制的数控机床驱动系统，该系统和上述开环系统相比多了比较装置和检测装置，将检测信号反馈到输入端经过比较装置与输入信号比较。它的工作原理是检测装置随时测定工作台的实际位置并反馈到输入端的比较器上，将实际位置与输入所给定的位置相比较，若实际位置与给定的希望位置有误差，则将两者之间的差值作为控制信号，驱动伺服电机，使之拖动工作台运动以消除该误差，从而加工出所希望的工件形状。

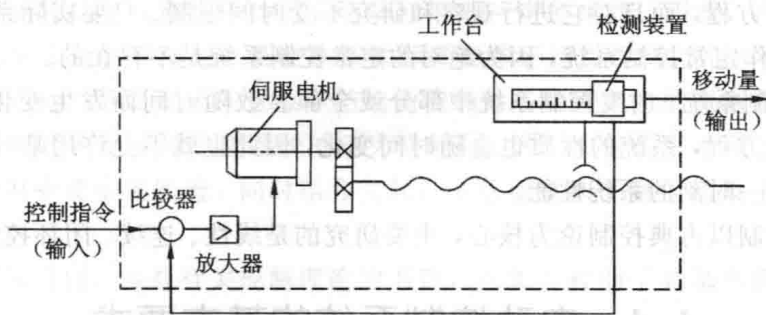


图 1-5 数控机床闭环控制系统

闭环控制系统精度较高,对外部扰动和系统参数变化不敏感,缺点是存在稳定、振荡、超调等问题,系统性能分析和设计麻烦。

2. 按输入量的变化规律分类

(1) 恒值控制系统。恒值控制系统指系统输入量为恒定值,控制任务是保证在任何扰动作用下,系统的输出量恒定不变,又称自动调节系统,如恒温箱控制、电网电压控制、频率控制等。在恒值控制系统中,其控制量取常值,所以使被控制量偏离期望值的主要因素为扰动量的存在。生产过程中的温度、压力、流量和液位等自动控制系统多属于此类系统。

(2) 程序控制系统。程序控制系统是指输入量的变化规律预先确知,控制任务是将输入量按其变化规律编制成程序,由程序发出控制指令,按照控制指令的要求运动的系统,如数控加工系统。程序控制系统可以是开环系统,也可以是闭环系统。

(3) 随动控制系统。随动控制系统是指输入量的变化规律未知,要求输出量能迅速、平稳、准确地复现控制信号的变化规律的系统,又称自动跟踪系统、伺服控制系统。雷达天线跟踪系统、火炮自动瞄准系统以及船用随动舵都属于此类系统。

3. 按输入信号类型分类

(1) 连续控制系统。连续控制系统指系统中所有信号的变化均为时间的连续函数的系统,系统的运动规律可用微分方程来描述。这种系统中的传递信号都是模拟信号,控制规律是用硬件组成的控制器实现的。

(2) 离散控制系统。离散控制系统是指系统中至少有一处信号是脉冲序列或数字量的系统,系统的运动规律必须用差分方程来描述。这种系统的控制规律是用软件实现的,计算机作为系统的控制器。

4. 按描述系统的数学模型分类

(1) 线性控制系统。线性控制系统中所有环节或元件的输入—输出都呈线性关系,满足叠加定理和齐次性原理,可用线性系统理论来分析。

(2) 非线性控制系统。非线性控制系统中至少有一个环节的输入—输出关系是非线性的,不满足叠加定理和齐次性原理,不能用线性微分方程来描述,必须采用非线性系统理论来分析。此种系统包含着变量中具有非线性关系的元器件,如存在死区、间隙和饱和特性等。实际上真实的物理系统大都是非线性系统,但因非线性系统的数学描述和求解是非常复杂的,所以在工程允许的情况下大部分非线性系统可线性化为线性系统。

5. 按系统参数的变化特征分类

(1) 定常控制系统。定常控制系统中所有参数不随时间而发生变化,描述它的微分方