



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十一五”规划教材
国家精品课程教材

PRINCIPLES OF AUTOMATIC CONTROL

自动控制原理

(非自动化类)

王万良 赵燕伟 编著

4



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TP13-8
2009
1

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材
国家精品课程教材

自动控制原理

(非自动化类)

王万良 赵燕伟 编著
赵光宙 主审

本书为作者主持完成的国家精品课程“自动控制原理”建设成果之一，面向机械、电子、计算机、通信、化工、仪器仪表等非自动化类专业学生，从应用角度系统地阐述自动控制的基本方向，注重实用性。全书共7章。第1章介绍自动控制的基本概念。第2章介绍连续系统的数学模型，包括微分方程、传递函数、结构图等。作为必要的数学基础，简要介绍了拉普拉斯变换的基本方法。第3章介绍线性连续系统的时域分析方法，包括稳定性、暂态性能和稳态误差等系统性能的分析。第4章介绍控制系统的频率法。第5章介绍控制系统中广为应用的PID控制工程设计方法。第6章介绍离散系统的分析方法。第7章介绍非线性系统的描述函数法。本书每章最后都简要介绍了使用MATLAB仿真软件辅助分析控制系统的方法。书后给出了习题参考答案。

本书可作为电子信息类、仪器仪表类、机械类、化工类等非自动化类专业的控制工程基础、自动控制原理等课程教材，也可以作为教学型大学自动化、电气工程及其自动化等专业的自动控制原理课程教材。对于少学时的专业，可以只讲授第1~5章的主要内容。作者通过浙江工业大学国家精品课程“自动控制原理”网站 (<http://kczy.zjut.edu.cn/zdkz/index.asp>) 和机械工业出版社网站 (<http://www.cmpedu.com>)，向读者免费提供电子教案、习题解答、教学录像等丰富的教学资源。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理. 非自动化类/王万良, 赵燕伟编著. —北京: 机械工业出版社, 2009. 2

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材. 国家精品课程教材

ISBN 978-7-111-25844-5

I. 自… II. ①王…②赵… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 201318 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: 王保家 责任编辑: 王保家 任正一

责任校对: 李秋荣 封面设计: 王洪流

责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 9.75 印张 · 239 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-25844-5

定价: 17.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379727

封面无防伪标均为盗版

全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编审委员会

主任委员 汪樵生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这套教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

1. 适用性：结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

2. 示范性：力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

3. 创新性：在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

4. 权威性：本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有

力保障。

此套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

此套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈永时 郑大钟

前 言

自动控制技术是生产过程中的关键技术，也是许多高新技术产品中的核心技术。因此，自动控制理论不仅是自动化类专业的主干课程，也已经成为许多非自动化类专业的重要课程。

本书为作者主持完成的国家精品课程“自动控制原理”的建设成果之一，面向机械、电子、计算机、通信、化工、仪器仪表等非自动化类专业学生，从应用角度深入浅出地介绍了自动控制的基本原理，沿着自动控制理论发展的历程进行介绍，即按照先连续系统理论后离散系统理论，先线性系统理论后非线性系统理论的顺序介绍。这样，分别采用不同的分析工具分析系统的稳定性、暂态性能和稳态性能，学生容易接受。全书共7章。第1章介绍自动控制的基本概念。第2章介绍连续系统的数学模型，包括微分方程、传递函数、结构图等。作为必要的数学基础，简要介绍了拉普拉斯变换的基本方法。第3章介绍线性连续系统的时域分析方法，包括稳定性、动态性能和稳态误差等系统性能的分析。第4章介绍控制系统的频率法。着重介绍频率特性的概念，伯德图和奈氏图的画法，奈氏稳定判据的应用方法。第5章介绍控制系统中广为应用的PID控制工程设计方法。第6章简要介绍离散系统的稳定性、暂态性能和稳态性能分析方法。第7章简要分析非线性系统的描述函数法。本书前五章为基本模块。后面两章前后没有依赖关系，可以根据学时数选择教学，这样仍可保持体系结构的完整性。书中带*的部分为选讲内容。本书将基于MATLAB的控制系统计算机辅助分析与设计方法贯穿在相关章节中介绍，使读者能够掌握应用广泛的计算机辅助分析软件。

本书的每章开始部分安排了导读，使读者在学习该章之前就知道为什么要介绍本章内容，以及主要介绍哪些内容。每章结尾部分扼要总结了该章的重要概念、定理与方法。本书语言简明，主要介绍最基本的理论与方法，注重实用性。教师在教学过程中可以剖析教材进行发挥，使学生通过教师讲解深入理解书中的内容。

作者通过浙江工业大学国家精品课程“自动控制原理”网站（<http://kczy.zjut.edu.cn/zdkz/index.asp>）和机械工业出版社网站（<http://www.cmpedu.com>）向读者免费提供电子教案、习题解答、教学录像等丰富的教学资源。

本书内容虽然经过多年使用和修改，但由于作者水平有限，书中仍然会存在许多缺点和错误，欢迎使用本书的教师、学生和科技人员提出宝贵意见。作者联系邮箱：wwl@zjut.edu.cn。

作 者
于杭州

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

书 名	主 编	
★电路基础	东南大学	黄学良
电路实验教程	燕山大学	毕卫红
工程电磁场基础及应用	山东大学	刘淑琴
数字电子技术	中国计量学院	王秀敏
电子技术实验教程	天津大学	王萍
★计算机软件技术基础	哈尔滨工程大学	李金
通信技术基础（非通信类）	重庆邮电大学	鲜继清
★微型计算机原理及应用	西安交通大学	张彦斌
计算机网络与通信	清华大学	张曾科
★自动控制理论	合肥工业大学	王孝武 方敏 葛锁良
★自动控制理论	西安理工大学	刘丁
★现代控制理论基础（第2版）	合肥工业大学	王孝武
现代控制理论	浙江大学	赵光宙
自动控制原理（非自动化类）	浙江工业大学	王万良
信号分析与处理（第2版）	浙江大学	赵光宙
自动化概论	四川大学	赵曜
★电力电子技术（第5版）	西安交通大学	王兆安 刘进军
电力电子技术（少学时）	华南理工大学	张波
Power Electronics		吴斌
★电机及拖动基础（第4版）（上下册）	合肥工业大学	顾绳谷
电力拖动基础	四川大学	张代润
★电力拖动自动控制系统——运动控制系统（第4版）	上海大学	阮毅 陈伯时
电力拖动自动控制系统——运动控制系统（少学时）	上海海运大学	汤天浩
控制系统数字仿真与CAD（第2版）	哈尔滨工业大学	张晓华
★过程控制与自动化仪表（第2版）	西安理工大学	潘永湘

书 名	主 编	
过程控制与自动化仪表	浙江大学	张宏建
过程控制系统	华东理工大学	俞金寿
传感器与检测技术	清华大学	赵勇
自动检测技术与系统设计	东南大学	周杏鹏
计算机控制技术	沈阳大学	范立南
现场总线技术及应用	哈尔滨工业大学	佟为明
电磁兼容原理及应用	华中科技大学	熊蕊
★电气绝缘技术基础 (第4版)	西安交通大学	曹晓琰
★电机学	重庆大学	韩力
电力工程基础	河海大学	鞠平
★供电技术 (第4版)	西安理工大学	余健明
智能控制理论及应用	湖南大学	王耀南 孙炜
智能电器	大连理工大学	邹积岩
建筑智能化系统	东北大学	吴成东
控制电机	山东大学	李光友
智能机器人引论	中国科学技术大学	关胜晓
机器人引论	清华大学	张涛
嵌入式系统原理与应用	青岛大学	范延滨
数字图像处理与应用基础	西安理工大学	朱虹
电网络理论	浙江大学	周庭阳
非线性电路理论	北京机械工业学院	刘小河
非线性系统理论	上海大学	康惠骏
最优控制理论与应用	西安交通大学	吴受章
系统建模理论与方法	东南大学	夏安邦
高等数字信号处理	海军工程技术大学	吴正国
高等电力电子技术	合肥工业大学	张兴
现代电机控制技术	沈阳工业大学	王成元

1. 本套教材全部配有免费电子课件, 欢迎选用本套教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件至 wbj@cmpbook.com 索取

2. 书名前标“★”号的为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 自动控制系统简介	1
1.2 自动控制系统的类型	4
1.3 控制系统性能的基本要求	7
1.4 本章小结	7
习题	8
第 2 章 连续系统的数学模型	9
2.1 系统数学模型的概念	9
2.2 微分方程模型	10
2.3 拉普拉斯变换	14
2.4 传递函数	21
2.5 结构图	24
2.6 控制系统数学模型的 MATLAB 表示	31
2.7 本章小结	33
习题	34
第 3 章 时域分析法	37
3.1 稳定性分析	37
3.2 暂态性能分析	42
3.3 稳态性能分析	53
3.4 MATLAB 辅助分析控制系统时域性能	60
3.5 本章小结	61
习题	62
第 4 章 频率法	64
4.1 频率特性	64
4.2 典型环节的伯德图	67
4.3 控制系统开环频率特性的伯德图	71
4.4 由伯德图确定传递函数	76
4.5 奈奎斯特稳定判据	78
4.6 相对稳定性分析	84
4.7 MATLAB 在频率法中的应用	86

4.8 本章小结

习题

第 5 章 PID 控制设计方法	91
5.1 控制系统设计概述	91
5.2 PID 控制及其对系统性能的影响	94
5.3 PID 控制器的工程设计方法	96
5.4 Simulink 在控制系统仿真中的应用	100
5.5 本章小结	101
习题	101

第 6 章 离散系统控制理论	102
6.1 信号的采样与保持	102
6.2 差分方程	105
6.3 Z 变换	106
6.4 Z 传递函数	111
6.5 稳定性分析	115
6.6 暂态性能分析	118
6.7 稳态误差分析	120
6.8 数字 PID 控制	121
6.9 MATLAB 在离散系统分析中的应用	122
6.10 本章小结	123
习题	125

第 7 章 非线性控制系统分析	127
7.1 典型非线性特性	127
7.2 描述函数法	130
7.3 典型非线性特性的描述函数	132
7.4 用描述函数法分析非线性系统的自激振荡	135
7.5 MATLAB 在非线性系统分析中的应用	139
7.6 本章小结	139
习题	140
习题参考答案	142
参考文献	146

第 1 章 绪 论

自动化技术几乎渗透到国民经济的各个领域及社会生活的各个方面，是当代发展最迅速、应用最广泛、最引人注目的技术之一，是推动新的技术革命和产业革命的关键技术。在某种程度上说，自动化是现代化的同义词。自动控制理论研究分析、设计自动控制系统的基本方法。

本章从介绍自动控制的发展历史入手，引出利用自动控制理论分析、设计自动控制系统的基本思路，然后介绍自动控制的基本概念，以及对自动控制系统的基本要求，使读者对自动控制理论的总目标有个基本了解。

1.1 自动控制系统简介

1769 年瓦特发明的蒸汽机，推动了工业革命的进一步发展。但是，当时的蒸汽机需要人不断地手工调节蒸汽阀门才能保持蒸汽机的速度稳定，蒸汽机的应用受到调速精度的限制。为了解决蒸汽机的速度控制问题，瓦特于 1788 年又发明了飞球调节器，这是被公认的第一个自动控制系统。其工作原理如图 1.1 所示。它是一个与蒸汽机轴相联的机械装置，当蒸汽机的负载减轻或者蒸汽温度升高等原因导致蒸汽机转速升高时，飞球调节器的转速也升高，离心力增加，飞球升高，带着套环上升，汽阀连接器关小蒸汽阀门，从而降低蒸汽机速度。反之，当蒸汽机的负载增加或者蒸汽温度下降等原因导致蒸汽机转速降低时，飞球调节器的转速也下降，离心力减小，飞球降低，带着套环下降，汽阀连接器开大蒸汽阀门，从而提高蒸汽机速度。可见，尽管存在负载、蒸汽温度变化等扰动，蒸汽机速度仍然可以稳定在设定值上。

飞球调节器的发明进一步推动了蒸汽机的应用，促进了工业生产的发展。但是，有时为了提高调速精度，反而使蒸汽机速度出现大幅度振荡，其后出现的其他自动控制系统也有类似现象发生。由于当时还没有自动控制理论，所以不能从理论上解释这一现象。为了解决这个问题，不少人为提高离心式调速机的控制精度进行了改进研究。有人认为系统振荡是因为调节器的制造精度不够，从而努力改进调节器的制造工艺，这种盲目的探索持续了大约一个世纪之久。

1868 年，英国的麦克斯韦尔（J. C. Maxwell）发表的“论调速器”论文，第一次

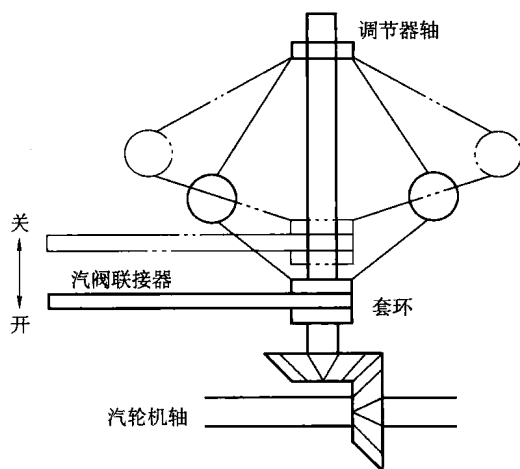


图 1.1 飞球调节器原理图

指出不应该单独讨论一个离心锤，必须从整个控制系统出发推导出微分方程，然后讨论微分方程解的稳定性，从而分析实际控制系统是否会出现不稳定现象。麦克斯韦尔的这篇著名论文被公认为自动控制理论的开端。

自动控制理论研究的对象是系统。我们在日常生活中就接触到很多系统，如经常提到的电力系统、机器系统、文教系统、卫生系统等。事实上，系统是一个相当广泛的概念。一部机器、一个生物体、一条生产线、一个电力网是一个系统，一个企业、一个社会组织也是一个系统。有小系统、大系统，也有把一个国家甚至整个世界作为对象的巨系统。

系统的种类如此繁多，又如此千差万别，但它们有一个共同的特点，就是都具有一定的功能，自身的各部分是互相依赖、互相制约的。例如，一条生产线是为了加工某个产品而设立的，生产线的各个部分存在一定的结构关系和运动关系。我们把系统的这一特征作为“系统”的定义，即由若干相互制约、相互依赖的事物组合而成的具有一定功能的整体称为系统。或者说，为实现规定功能以达到某一给定目标而构成的相互关联的一组元件称为系统。

由人工控制的系统称为手动控制系统。下面通过两个具体的例子，分析手动控制的过程，从而可以看出控制系统的基本原理。

例 1.1 热力系统。

图 1.2 所示为一个热力系统。通过调节蒸汽阀门，使流出的热水保持一定的温度。如果由人工控制，就要求控制者观测温度计的指示值，调节阀门开关的开度。调节方法：如果温度计的指示值高于期望值，则关小阀门，降低热水温度；否则，开大阀门，升高热水温度，从而使流出的热水保持设定的温度。

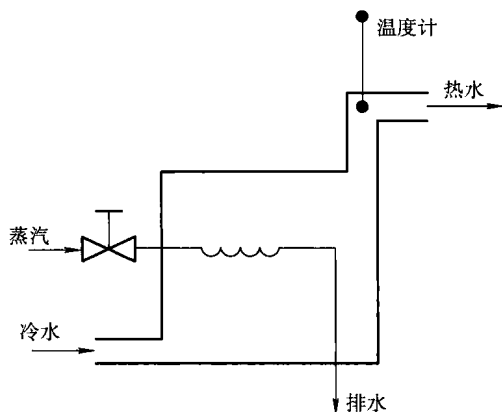


图 1.2 热力系统

例 1.2 直流电动机速度控制系统。

图 1.3 所示直流电动机速度控制系统。控制目标是使电动机在要求的转速上稳定运行。从图中可见，对应滑动电阻器的触点的某一位置，有一给定电压 U_g ，经过放大器放大为 U_d ，即为电动机电枢电压。在没有任何扰动的情况下，对应滑动电阻器触点的某一位置，有一电动机转速与之对应。

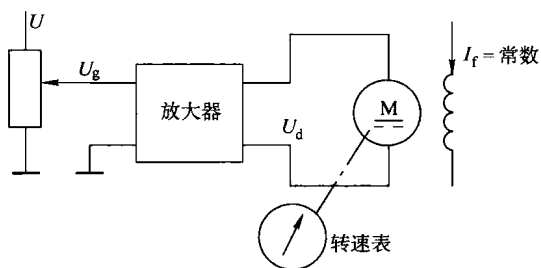


图 1.3 直流电动机速度控制系统

如果负载恒定，电动机及放大器参数也不变化，那么，给定电压 U_g 不变，电动机转速也不会变。但这只是一种理想情况。实际上，电动机负载是经常变化的，电动机、放大器的参数也会发生漂移，因此，即使保持给定电压 U_g 不变，电动机转速也会变化，不能达到控制的目的。

如果用人工控制，则可以观测转速表的指示值，调整滑动电阻器的触点位置改变 U_g ，从而使电动机转速保持在期望值运行。例如，当负载增大使速度下降时，控制人员则调节触点位置，增大 U_g ，使 U_d 增大，

从而使电动机转速回升。

上述两个系统都是由人工控制的，可以看出，人在控制过程中起三个作用：

1) 观测：用眼睛去观测温度计和转速表的指示值。

2) 比较与决策：把观测得到的数据与要求的数据相比较，进行判断，根据给定的控制规律给出控制量。

3) 执行：根据控制量进行手工调节，如调节阀门开度、改变触点位置。

在自动控制中，则用控制装置代替人来完成上述功能。例如，自动控制热力系统如图 1.4 所示。

温度测量元件测出实际水温，并转换成电压信号，与设定水温的电压信号同时加在放大器输入端，即可比较大小，其差值信号经放大器放大后，驱动执行电动机，从而调节阀门开度。例如，当实际水温偏低时，设定水温与实际水温的偏差是一正值，驱动执行电动机朝开启阀门方向运转，增大蒸汽流量，从而使水温上升。反之，当实际水温偏高时，设定水温与实际水温的偏差是一负值，驱动执行电动机朝关闭阀门方向运转，减小蒸汽流量，从而使水温下降。可见，控制装置能够代替人进行控制。

直流电动机自动调速系统如图 1.5 所示。

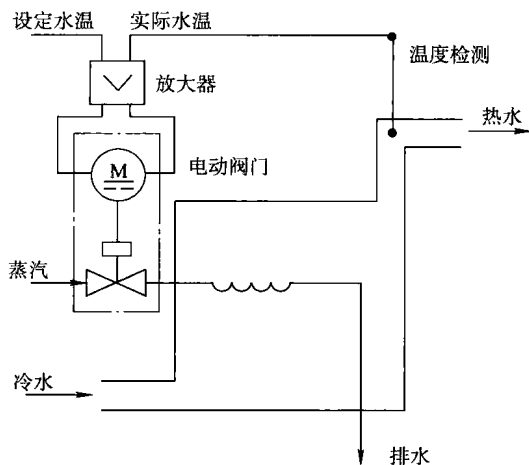


图 1.4 自动控制热力系统

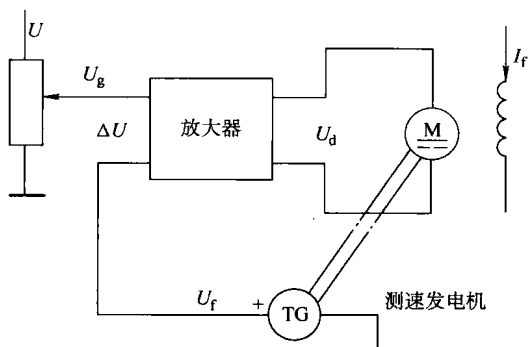


图 1.5 直流电动机自动调速系统

测速发电机的输出电压 U_f 与电动机转速成正比，当电动机转速比期望值大时， U_f 大， $\Delta U = U_g - U_f$ 变小， U_d 变小，从而使电动机转速降低；反之，当电动机转速比期望值小时， U_f 小， $\Delta U = U_g - U_f$ 变大， U_d 变大，从而使电动机转速增加。因此，无论负载变化使电动机速度增加还是减少，控制器都能使电动机保持期望转速运行。

在上述两个自动控制系统中，没有人参与控制，而是由系统本身进行自动控制来满足要求的。因此，所谓自动控制是在没有人参与的情况下，系统的控制器自动地按照人预定的要求控制设备或过程，使之具有一定的状态和性能。具有自动控制功能的系统称为自动控制系统。

在自动控制系统中，有许多变量或者信号。从系统外部施加到系统上而与该系统的其他信号无关的信号称为输入信号。输入信号包括参考输入和扰动输入。在控制系统中希望被控信号再现的恒定的或随时间变化的输入信号称为参考输入，简称为输入。而干扰系统被控量

达到期望值的输入称为扰动输入，简称为扰动。例如，温度控制系统中的温度设定是参考输入，而蒸汽温度的变化、热水流量的变化等都是干扰热水温度恒定的，所以都是扰动输入。在电动机速度控制系统中，电位器给出的电压是参考输入，而电动机负载的变化、电网电压的波动等都是干扰电动机速度保持恒定的变量，是扰动输入。

在有些系统中，参考输入是随时间变化的，例如啤酒发酵、家禽孵化过程中，温度设定是时间的函数。而在自动火炮系统中，飞机的飞行轨迹是自动火炮系统的参考输入，是一个事先无法预料的信号。

系统中被控制的量称为被控量。例如，温度控制系统中的温度，电动机速度控制系统中的电动机转速都是被控量。自动控制系统的目的就是使被控量按照期望的规律变化。控制器的输出称为控制量。例如，温度控制系统中的蒸汽阀门开度，电动机速度控制系统中的电枢电压都是控制量。控制系统输出的量称为输出量。在控制系统分析与设计中，系统的被控量常作为输出量。实际上，控制系统中需要监控的量都可以作为输出量。例如，系统的误差信号等。

1.2 自动控制系统的类型

自动控制系统根据分类目的的不同，可以用多种不同的方法进行分类。了解控制系统的分类方法，就能在分析和设计系统之前，对系统有一个正确的认识。

下面介绍控制系统常见的几种类型及其性质。

1.2.1 开环、闭环与复合控制系统

控制系统按其结构可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

1. 开环控制系统

在例 1.2 所示电动机速度控制系统中，系统仅受控制量的控制，输出对系统的控制没有作用，这就是开环控制系统的共同特点。根据这一特点，可以给出开环控制系统的定义。

如果控制系统的被控量对系统没有控制作用，这种控制系统称为开环控制系统。开环控制系统的控制原理如图 1.6 所示。

在开环调速系统中，如果没有任何扰动，电动机将按期望的速度运行，但当有扰动时，例如负载的变化、电网电压的变化或者其他参数的变化，这些扰动就要影响到电动机的转速，使它偏离期望值。为了使电动机在有扰动的影响下也能自动稳定到期望值，必须采用闭环控制系统。

2. 闭环控制系统或反馈控制系统

图 1.5 所示系统就是闭环控制系统。我们已经简单地分析了它的工作原理，可以看出，闭环控制系统有自动修正偏差的能力。现在，我们考察闭环控制系统的优点。容易看出，这个系统不仅由给定电压进行控制，而且被控量也参与控制。或者说，是用给定量与被控量的反馈信号的差值来进行控制，这就是闭环控制系统的共同特点，根据这一特点给出闭环控制

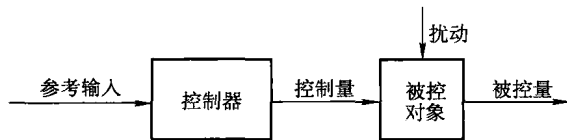


图 1.6 开环控制系统

系统的定义。

定义 1-1 如果系统的被控量直接或间接地参与控制，这种系统称为闭环控制系统或更直接地称为反馈控制系统。

反馈控制系统的控制原理如图 1.7 所示。

反馈控制系统分为正反馈和负反馈两种情况，上面说的是负反馈的情况，这里仍以电动机自动调速系统为例说明正反馈的概念。若将测速发电机的正负极性反接一下，就成为正反馈系统。此时， $\Delta U = U_g + U_f$ ，所以，当电动机转速升高， U_f 增加， ΔU 增加，则 U_d 增加，电动机转速会进一步增加，如此循环，电动机转速越来越高。反之，若扰动使电动机转速下降，则 U_f 减少， U_d 减小，则电动机转速会进一步减少。可见正反馈助长了系统扰动的影晌，而负反馈是抑制扰动的影晌。

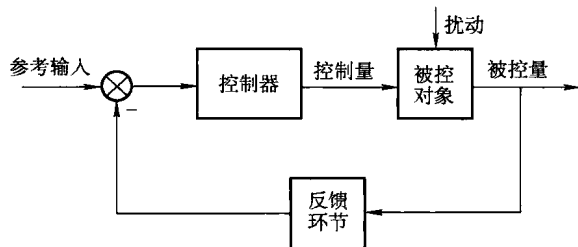


图 1.7 反馈控制系统

反馈是十分重要的概念，在自动控制中得到广泛应用。反馈控制系统的研究是本课程的重要内容。

3. 复合控制系统

开环控制的缺点是精度低，优点是控制稳定，不会产生闭环控制系统中可能出现的振荡情况。相反，闭环控制（负反馈）的优点是控制精度高，缺点是容易造成系统不稳定，这一问题早在瓦特发明飞球调节器时就已引起人们的注意。

为了发扬开环控制和闭环控制的优点，克服它们的缺点，人们在系统中同时引进开环控制和闭环控制，这种系统称为复合控制系统。复合控制系统的原理如图 1.8 所示。

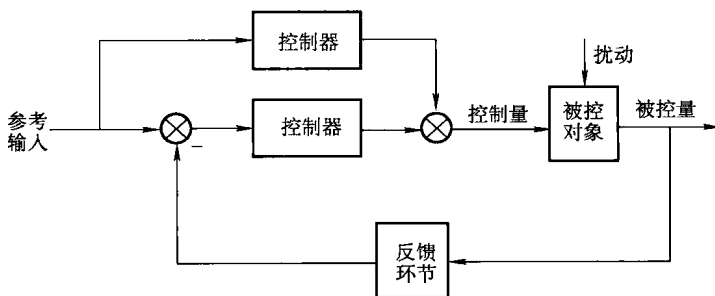


图 1.8 复合控制系统

1.2.2 线性系统与非线性系统

根据分析和设计系统的方法来分类，系统可分为线性系统和非线性系统。

定义 1-2 如果一个系统具有下列性质，则该系统是线性系统，否则是非线性系统。

- 1) 输入 $x_1(t)$ 产生输出 $y_1(t)$ 。
- 2) 输入 $x_2(t)$ 产生输出 $y_2(t)$ 。
- 3) 输入 $c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t)$ 产生输出 $c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$ 。

其中， $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 是任意的输入信号； c_1 、 c_2 是任意的常数。

从上面的叙述可以看出，线性系统满足叠加原理；而满足叠加原理的系统必定是线性系统。

在本课程中，着重讨论线性系统的分析和设计方法。人们对线性系统已经进行了长期的研究，形成了一套较为完整的分析和设计方法，并且在实践中已经获得了相当广泛的应用。而非线性控制系统很难用数学方法处理，目前尚无解决各种非线性系统的通用方法。

需要指出的是，所有的物理系统在某种程度上都是非线性的，线性系统只是一种理想模型，实际上是不存在的。但很多实际系统的输入输出在一定的范围内基本上是线性的，可以用线性系统（环节）这一理想模型来描述。例如，控制系统中的放大器，在输入信号较小时，输入输出间的关系基本上是线性的，而当输入信号较大时，系统进入饱和状态，或者输出被限幅，此时，输入输出间的关系是非线性的。在大多数情况下，可以通过限制系统的输入信号，使系统部件工作在线性特性的范围内。

1.2.3 连续系统与离散系统

控制系统中存在各种形式的信号。按照时间变量取值的连续性与离散性，可将信号分为连续时间信号与离散时间信号，简称为连续信号与离散信号。

如果在所讨论的时间间隔内，对于任意时间值（除若干不连续点外），都可以给出确定的值，此信号就称为连续时间信号。例如，正弦波、方波信号等都是连续信号。

离散时间信号在时间上是离散的，只在某些不连续的规定瞬时给出函数值，而在其他时间上没有定义。离散时间信号是数的序列，一般记为 $f(k)$ 、 $y(k)$ 等。 $f(k)$ 既可直接产生，如产品的年产量或月产量，也可以是对连续信号 $f(t)$ 进行采样得到的。

根据系统中的信号是连续信号还是离散信号，可以将系统分为连续时间系统和离散时间系统。若系统中所有信号都是连续信号，则称为连续时间系统，简称为连续系统。如果系统中有一处或几处的信号是离散信号，则称为离散时间系统，简称为离散系统。

实际控制工程中，离散系统一般与连续系统连用，例如，图 1.9 所示的计算机控制系统。被控对象的输入信号 $r(t)$ 、输出信号 $c(t)$ 等均为连续信号，由于计算机处理的是二进制数据，其输入信号不能是连续信号，所以，误差信号 $e(t)$ 要经过模数转换器（A/D）变成计算机能接受的离散数字信号 $e(kT)$ 。这种将连续信号变为离散信号的过程称为采样。具有采样过程的离散控制系统通常又称为采样控制系统。在大部分控制理论著作中，并不对离散系统进行严格的区分，而是统称为离散系统。

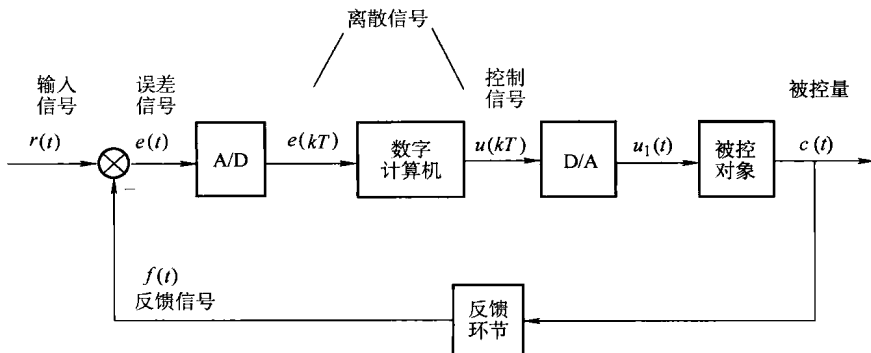


图 1.9 计算机控制系统

在离散系统中存在采样、保持、数字处理等过程，具有一些独特的性能。随着计算机的发展，离散系统已得到越来越广泛的应用。

1.3 控制系统性能的基本要求

在自动控制理论中，对控制系统性能的要求，主要有稳定性、暂态性能和稳态性能几个方面。

1. 稳定性

稳定性是控制系统最基本的性质。所谓稳定性是指控制系统偏离平衡状态后，自动恢复到平衡状态的能力。

当系统受到扰动后，其状态偏离了平衡状态，在随后所有时间内，如果系统的输出响应能够最终回到原先的平衡状态，则系统是稳定的；反之，如果系统的输出响应逐渐增加趋于无穷，或者进入振荡状态，则系统是不稳定的。

2. 暂态性能

对于稳定的系统，虽然理论上能够到达平衡状态，但还要求能够快速到达。在调节过程中，要求系统输出超过给定的稳态值的最大偏差（超调量）不要太大，要求调节的时间比较短，这些性能称为暂态性能。系统的超调量刻画了系统的振荡程度，反映了系统的相对稳定性。超调量大的系统容易不稳定，所以相对稳定性差，而超调量小的系统的相对稳定性好。

3. 稳态性能

当暂态过程结束，系统达到新的稳态时，希望系统的输出就是系统的给定值，但实际上可能存在误差。在控制理论中，系统给定值与系统稳态输出的误差称为稳态误差。系统的稳态误差衡量了系统的稳态性能。由于系统一般工作在稳态，稳态精度直接影响到产品的质量，例如，造纸过程中的纸张厚度控制、啤酒发酵过程中的温度控制等，所以，稳态性能是控制系统最重要的性能指标之一。

系统的暂态性能和稳态性能常常是矛盾的。由于控制系统的功能要求不同，所以对系统暂态性能和稳态性能的要求往往有所侧重。例如，对于恒温控制、调速系统等定值调节系统，主要侧重系统的稳态性能，而对于随动系统则侧重于暂态性能，要求能够快速调节，跟上输入量的变化。

上面简单介绍了对控制系统的基本要求，这是本书将要着重分析的几个方面，关于精确的定义和分析方法，将在后面有关章节中详细介绍。

1.4 本章小结

由若干相互制约、相互依赖的事物组合而成的具有一定功能的整体称为系统。或者说，为实现规定功能以达到某一给定目标而构成的相互关联的一组元件称为系统。

所谓自动控制是在没有人参与的情况下，系统的控制器自动地按照人们预定的要求控制设备或过程，使之具有一定的状态和性能。具有自动控制功能的系统称为自动控制系统。

如果控制系统的被控量对系统没有控制作用，这种控制系统称为开环控制系统。