

“十三五”普通高等教育规划教材



“十三五”江苏省高等学校重点教材

控制工程基础

朱孝勇 傅海军 等编著



含电子课件

<http://www.cmpedu.com>



书中含 44 个二维码视频资源



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”江苏省高等学校重点教材（编号：2017-2-036）

“十三五”普通高等教育规划教材

控制工程基础

朱孝勇 傅海军 等编著

王万良 主审



机械工业出版社

本书是“十三五”江苏省高等学校重点教材。

本书较全面、系统地介绍了“控制工程基础”课程的基本内容，并注重对基本理论、基本概念和基本分析方法的阐述。内容包括绪论、线性控制系统的运动方程及模型、线性系统的时域和频域分析方法、闭环控制系统的稳定性分析、闭环控制系统的误差分析、自动控制系统的校正、控制系统实例、拉普拉斯变换、MATLAB 在控制系统中的应用等。

全书内容丰富，层次分明，能满足理工科高等院校相关专业的教学需要。教材内容理论联系实际，叙述重点突出，说理深入浅出，文字简练流畅，易于自学。重要知识点配有视频（可扫描二维码获取），旨在帮助学生加深对基本概念的理解和提高分析、综合问题的能力。

本书可作为高等院校本科机械、电子、计算机、通信、化工、仪器仪表、建筑环境、汽车等非自动化类专业学生的“控制工程基础”课程教材，同时也可作为自动控制专业经典控制理论课程的相应教材，也可供从事控制工程的科技人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

控制工程基础 / 朱孝勇等编著. —北京：机械工业出版社，2018.6

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-59427-7

I. ①控… II. ①朱… III. ①自动控制理论-高等学校-教材
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 048185 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：时 静 责任编辑：时 静

责任校对：张艳霞 责任印制：李 昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.25 印张·440 千字

0001-3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-59427-7

定价：53.00 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

服务咨询热线：(010)88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：(010)88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

前 言

本书是“十三五”江苏省高等学校重点教材。

自动控制理论作为一门科学，自它诞生之日起就显示出了强大的生命力。科学技术日新月异的发展，为自动控制理论的广泛应用提供了完备和有效的技术手段，使自动控制理论不断展现出新的活力和生机。在国家实施以信息化带动工业化，走新型工业化道路的战略，实现制造业数字化、网络化、智能化的过程中，以自动控制理论为理论指导的自动化技术无疑将起着重要的桥梁和纽带作用。

本书主要面向机械、电子、计算机、通信、化工、仪器仪表、建筑环境、汽车等非自动化类专业学生，从应用角度深入浅出地介绍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。本书是在汲取国内外同类教材的优点并结合编者多年的教学实践基础上编写的。

本书主要有三个方面的特点：

(1) 章节结构体系。以时域分析法、根轨迹法、频率分析法为主线，将三种分析方法独立成章；将判断稳定性的各类判据合为一章；集中介绍软件应用，将“MATLAB 在控制系统中的应用”在附录中作为专题论述，便于读者查阅。本书知识构成和结构体系合理，便于学习和阅读。

(2) 工程实例。除了有与工程应用紧密结合、具有代表性的例题和习题外，增设一章“控制系统实例”，涉及电气、暖通、生物等各个方面，便于相关专业的学生进一步了解。

(3) 网络应用。为适应学时减少、内容不减但基础知识需加强带来的教学困惑，本书将部分重要的知识点、例题、习题制成小视频并结合二维码以便学生扫码学习。

本书由江苏大学“控制工程基础”教学团队组织编写，由朱孝勇、傅海军、凌智勇、陈汇龙、吉奕、王博负责编写，并由朱孝勇、傅海军任主编，并负责全书的统稿。在本书的内容策划与撰写过程中，浙江工业大学国家级教学名师王万良教授等给予了热情的支持与帮助，并提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

本书是江苏省高等教育教改研究课题（2017JSJG）和江苏大学高等教育教改研究课题（2017JGYB045）的研究成果之一，并受到江苏高校优势学科建设工程项目（PADA）的资助。

在本书的编写过程中，机械工业出版社、江苏大学给予了大力支持和帮助在此深表谢意。

限于编者水平，书中难免存在问题和不足之处，恳请广大读者批评指正。联系邮箱为 hifu21@126.com。

编 者

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 自动控制理论的发展概述	1
1.2 控制系统工作原理	2
1.3 自动控制系统的类型	5
1.3.1 按信号流向划分	5
1.3.2 按输入信号的特征分类	6
1.3.3 按描述元件的动态方程分类	6
1.3.4 按信号的传递是否连续分类	6
1.3.5 按系统的参数是否随时间变化分类	7
1.4 自动控制系统的的基本要求	7
1.4.1 稳定性	7
1.4.2 快速性	8
1.4.3 稳态性能	8
1.5 小结	8
1.6 习题	9
第 2 章 线性控制系统的运动方程及模型	12
2.1 控制系统的时域数学模型	13
2.1.1 线性系统微分方程的建立	13
2.1.2 线性系统的重要特征	16
2.1.3 非线性微分方程的线性化	16
2.1.4 运动的模态	17
2.2 控制系统的传递函数	17
2.2.1 传递函数的概念	17
2.2.2 关于传递函数的几点说明	19
2.2.3 典型环节及其传递函数	22
2.3 控制系统的结构图(框图)	25
2.3.1 结构图的组成和建立	26
2.3.2 结构图的等效变换和简化	27
2.3.3 典型闭环控制系统的结构图及其传递函数	34
2.4 信号流图	35
2.4.1 信号流图的概念	36
2.4.2 梅森公式	38
2.5 小结	39

2.6	习题	39
第3章	线性系统的时域和频域分析方法	44
3.1	线性系统的时域分析法	45
3.1.1	典型输入信号	45
3.1.2	线性系统的时域分析	48
3.1.3	二阶系统的瞬态性能指标	53
3.2	线性系统的根轨迹分析法	57
3.2.1	根轨迹的概念	58
3.2.2	幅值条件和相角条件	59
3.2.3	绘制根轨迹的基本法则	62
3.2.4	根轨迹法分析系统的性能	73
3.2.5	增加开环零极点对根轨迹的影响	75
3.2.6	增加开环偶极子对根轨迹的影响	76
3.3	线性系统的频域分析法	78
3.3.1	频率特性的基本概念	79
3.3.2	频率特性的图示方法	81
3.3.3	典型环节的频率特性	83
3.3.4	系统的开环频率特性	92
3.3.5	最小相位系统、非最小相位系统	98
3.4	小结	98
3.5	习题	99
第4章	闭环控制系统的稳定性分析	104
4.1	稳定性和劳斯判据	104
4.1.1	稳定性的基本概念	104
4.1.2	线性系统稳定的充要条件	104
4.1.3	劳斯稳定判据	106
4.1.4	劳斯判据的应用	108
4.2	辐角定理和奈奎斯特稳定判据	110
4.2.1	辐角定理	110
4.2.2	奈奎斯特稳定判据	111
4.2.3	奈奎斯特稳定判据的应用	113
4.3	伯德图的稳定性分析	118
4.4	基于频率特性的性能分析与优化	122
4.4.1	幅值裕度	123
4.4.2	相角裕度	123
4.4.3	利用开环频率特性分析系统性能	128
4.5	控制系统的闭环频率特性	134
4.5.1	用向量法求闭环频率特性	135
4.5.2	等 M 圆图和等 N 圆图	135

4.5.3	尼柯尔斯图	138
4.5.4	利用闭环幅频特性分析和估算系统的性能	140
4.6	小结	143
4.7	习题	143
第5章	闭环控制系统的误差分析	147
5.1	稳态误差分析	147
5.1.1	稳态误差的定义	148
5.1.2	控制系统的型别	149
5.1.3	给定输入作用下系统的稳态误差	149
5.1.4	扰动输入作用下系统的稳态误差	153
5.2	稳态误差与对数幅频特性曲线的关系	155
5.2.1	稳态位置误差系数的确定	155
5.2.2	稳态速度误差系数的确定	156
5.2.3	稳态加速度误差系数的确定	156
5.2.4	降低稳态误差的方法	157
5.3	小结	159
5.4	习题	159
第6章	自动控制系统的校正	163
6.1	控制系统校正的基本概念	164
6.1.1	校正方式	164
6.1.2	性能指标	165
6.1.3	设计方法	165
6.1.4	基本控制规律	166
6.2	串联校正装置及其特性	170
6.3	串联校正的设计	178
6.3.1	串联校正的频域法设计	178
6.3.2	串联校正的根轨迹法设计	186
6.3.3	串联校正的期望对数频率特性设计法	192
6.4	反馈校正的设计	196
6.4.1	反馈校正装置对系统特性的影响	196
6.4.2	反馈校正装置的设计方法	197
6.4.3	反馈校正的特点	200
6.5	复合控制校正	202
6.6	小结	205
6.7	习题	205
第7章	控制系统实例	209
7.1	直流电动机的控制	209
7.1.1	电枢控制	209
7.1.2	磁场控制	210

7.1.3 直流电动机的反馈控制	210
7.2 楼宇电梯的拖动控制系统	212
7.3 分体单冷空调自动控制系统	213
7.3.1 分体单冷空调的基本工作原理	213
7.3.2 分体单冷空调自动控制系统结构	213
7.4 锅炉设备的控制	214
7.4.1 汽包水位控制	214
7.4.2 蒸汽过热系统的控制	215
7.4.3 锅炉燃烧过程的控制	216
7.5 青霉素发酵过程 MLS-SVM 逆系统内模控制	219
7.6 液压控制系统	226
7.6.1 液压控制系统的建模过程	226
7.6.2 液压基本元件的数学描述	226
7.6.3 液压位置控制系统的建模	227
7.6.4 液压速度控制系统建模	230
附录	233
附录 A 拉普拉斯变换	233
A.1 拉普拉斯变换的定义	233
A.2 拉普拉斯变换的基本性质	234
A.3 拉普拉斯反变换	240
附录 B MATLAB 在控制系统中的应用	245
B.1 用 MATLAB 建立传递函数模型	245
B.2 利用 MATLAB 进行时域分析	251
附录 C 部分重要术语	273
附录 D 部分习题答案	275
参考文献	282

第1章 绪 论

1.1 自动控制理论的发展概述

当前,自动控制技术几乎渗透到国民经济的各个应用领域及社会生活的各个方面,在工农业生产、交通运输、国防建设、航空航天工程、家用电器等许多领域获得了越来越广泛的应用。应用自动控制方法来控制各种机械设备是人类发展史上的一大创举。由于自动控制的引入,使各种机械装置能够在无人或用人很少的情况下连续工作,并使各种机械设备能够更有效、更安全地运行,生产出来的产品质量明显提高,同时也大大降低了人们的劳动强度。

自动控制和反馈是自动控制系统中的重要概念。自动控制是指在没有人的干预下,通过检测装置和执行装置,使被控对象或过程按照预定的条件运行;反馈是指通过检测装置将系统的输出返回到系统的输入端,与设定值进行比较,产生偏差信号作为控制器的输入量。

最早的自动控制装置出现于两千多年以前,早在我国西汉(公元前206年—公元25年)以前,劳动人民就发明了指南车,它是按扰动原理构成的开环自动调节系统。北宋年间(公元1068~1089年),苏颂和韩公廉制成了一座水运仪象台,这是对东汉时张衡制造的铜壶滴漏装置的改进,是一个依照被调节量偏差进行调节的闭环非线性自动调节系统。中国古代科学技术发展的历史表明,自动控制的思想是很早就形成的。

工业生产和军事技术的需要,促进了经典自动控制理论和技术的产生和发展。控制理论的主要发展及简要应用历程如下:

1788年,英国人瓦特(James Watt)发明了蒸汽发动机离心式调速机构,标志着英国工业革命的开始(在蒸汽机控制中,人们总希望转速恒定,因此设计稳定可靠的调节器成为当时重要的工程任务)。

1868年,麦克斯韦发表了“论调节器”一文,文中利用线性微分方程对离心式调速机构的动态性能进行了分析和研究,建立了基于飞球调节器的蒸汽机控制系统的数学模型,解释了蒸汽机调速机构存在不稳定现象,指出了避免这种现象的调速器的设计原则,并提出了一种不直接求解微分方程、适用于低阶微分方程描述的系统的稳定性代数判据。

1877年,劳斯和赫尔维茨把上述思想扩展到用高阶微分方程描述的更为复杂的系统,他们独立地发现了两种著名的代数判据,用于判断由任意阶线性常微分方程所描述的系统的稳定性。

1927年,布莱克发明了电子反馈放大器,在对系统的分析过程中引入了反馈的概念,使人们对自动控制系统中的反馈控制有了更深入的理解。

1932年,奈奎斯特提出了根据系统开环传递函数或频率响应曲线判定系统稳定性的方法,即著名的奈奎斯特稳定判据。

1942年,齐格勒(Ziegler)和尼柯尔斯(Nichols)提出了控制器参数的最优整定方法,

并将该方法应用于生产过程。

1945年，伯德根据奈奎斯特稳定判据，提出了用对数频率特性曲线分析反馈控制系统的方法。上述研究成果一方面满足了在当时条件下系统分析和研究的需要，另一方面为控制论作为一门独立学科的建立和发展奠定了基础。

1946年，美国福特公司的机械工程师哈德最先提出“自动化”一词，描述了发动机气缸的自动传送和加工的过程。

1948年，伊文思根据反馈系统开环、闭环传递函数之间的内在联系，提出了由开环传递函数寻求闭环特征根（即闭环极点）的根轨迹法。

1950~1959年，美国数学家卡尔曼（R. Kalman）提出了著名的卡尔曼滤波器。自动调节器和经典控制理论的发展，使自动化进入以单变量自动调节系统为主的局部自动化阶段。

1960~1969年，卡尔曼提出系统的可控性和可观测性问题，为现代控制理论的发展奠定了基础。随着现代控制理论的发展和电子计算机的推广应用，自动控制与信息处理结合起来，使自动化进入到生产过程的最优控制与过程信息管理的综合自动化阶段。

1970~1979年，针对大规模的工业生产过程、复杂的工程和非工程系统，运用一般控制理论已难以解决复杂的控制问题。对这些问题的研究，促进了自动控制理论和控制技术的发展，出现了大系统控制、自适应控制、智能控制等。

1980年至今，单片微处理机（单片机）的出现对控制技术产生了重大影响，使综合自动化和集成自动化成为现实。综合利用计算机技术、通信技术、系统工程和人工智能控制技术，研制成功的一体化集成系统有DCS系统、FCS系统、柔性制造系统、计算机集成制造系统、办公自动化系统、智能机器人、协同控制系统等。

近年来，控制理论的应用范围已经扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多领域，自动控制技术已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。微处理器、单片机及微型计算机的应用和发展，大大促进了自动控制理论的发展进程。控制理论在与其他学科的互相渗透与促进之中必将导致新的发明和创造。计算机技术的迅猛发展，对控制系统的设计和应用起到了很大的推动作用。使用诸如MATLAB这样的软件，能够为分析自动控制系统的性能提供便利的工具。微型计算机以其更高的性价比，使得自动控制的应用从没有像现在这样活跃……自动控制正为社会的发展、人类进步做着不懈的贡献。

1.2 控制系统工作原理

所谓自动控制，就是利用各种自动控制装置和仪表（包括工业控制计算机）代替人的操作，使生产过程或机器设备自动地按预定的规律运行，或使它的某些参数（如温度、压力、流量、成分、电流、电压、转速等）按预定要求变化或在一定的精度范围内保持恒定。自动控制可以说是对人工操作的模仿和发展。下面以一个温度控制系统为例，说明自动控制系统的构成和一些基本概念。

图1-1所示为人工控制的恒温箱示意图。人工控制的任

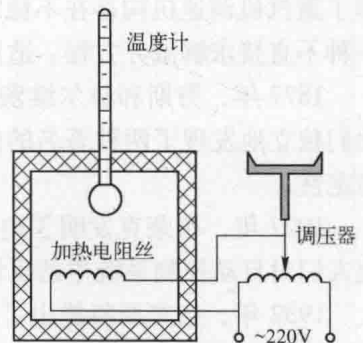


图1-1 人工控制的恒温箱

保持箱内温度恒定，以满足物体对温度的要求。操作者移动调压器触头以改变通过加热电阻丝的电流来控制温度。箱内温度由温度计测量。人工调节过程可归结如下：

- 1) 观察由测量元件（温度计）测出的恒温箱内的温度（被控量）。
- 2) 与要求的温度值（给定值）进行比较，得出偏差的大小和方向。
- 3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱内温度高于所要求的给定温度值时，调整调压器减小电流，使温度降到正常范围内。若温度低于给定的值，则调整调压器，将电流增大，使温度升到正常范围。

可见，上述人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程。

这种人工控制要求操作者随时观察箱内温度的变化情况，随时进行调节。对于此类简单的控制形式，可以用一个控制器来代替人的职能，把人工控制变成一个自动控制系统。

图 1-2 所示是一个自动控制系统。其中，恒温箱所需的温度由电压信号 u_1 给定。当外界因素引起箱内温度变化时，热电偶（测量元件）把测得的温度转换成对应的电压信号 u_2 反馈至比较器，并与给定信号 u_1 相比较，所得结果为温度的偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。经过电压、功率放大后，进一步控制执行电动机的转速和方向，并通过传动装置移动调压器触头。当温度偏高时，触头向着减小电压的方向运动，反之加大电压，直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时，电动机才停转。上述这些器件组成了一个自动控制系统，也完成了所要求的控制任务。

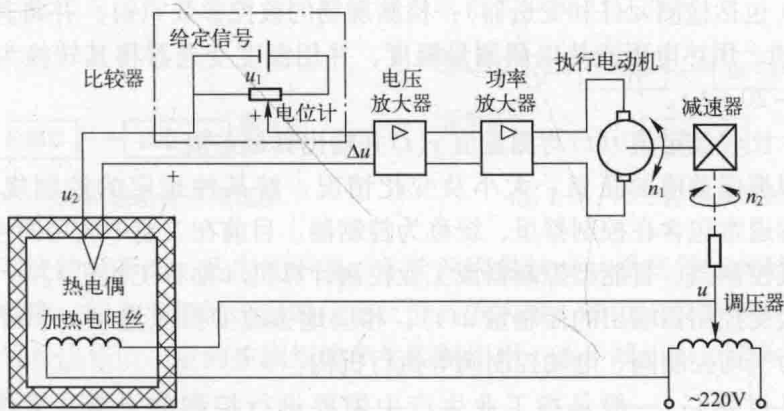


图 1-2 恒温箱的自动控制系统

分析上述恒温箱的两种工作过程可以看出，自动控制系统和人工控制系统非常相似。自动控制系统中，测量装置相当于人的眼睛，控制器类似于人脑，执行机构相当于人手。它们的共同特点都是要检测偏差，并用检测到的偏差去纠正偏差，可以说没有偏差就不会有控制调节过程。

在控制系统中，给定量又称为系统的输入量，被控量又称为系统的输出量。输出量的返回过程称为反馈，它表示输出量通过测量装置将信号的全部或部分返回输入端，使之与输入量进行比较。比较产生的结果称为偏差。在人工控制中，这一偏差是通过人眼观测后，由人脑判断、决策得出的；而在自动控制中，偏差则是通过反馈，由控制器进行比较、计算产生的。因此，可以归纳出上述控制系统的工作原理如下：

- 1) 检测输出量的实际值。

2) 将实际值与给定值 (输入量) 进行比较得出偏差值。

3) 用偏差值产生控制调节作用去消除偏差。

这种基于反馈原理的控制系统称为反馈控制系统。可见, 作为反馈控制系统至少应具备检测、比较 (或计算) 和执行三个基本功能。

要实现恒温箱内温度的自动控制, 至少必须有检测元件和变送器、控制 (调节) 器、控制 (调节) 阀、恒温箱等四个部分, 它们组成一个简单的自动控制系统。常规的自动控制系统由被控对象、测量装置、控制器以及执行器组成, 如图 1-3 所示。

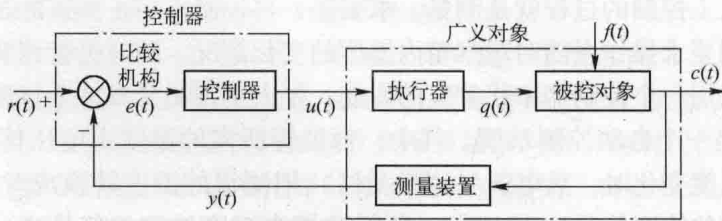


图 1-3 自动控制系统的组成

$r(t)$ —设定值 $c(t)$ —被控参数 (实际值) $e(t)$ —偏差, $e(t) = r(t) - y(t)$

$u(t)$ —控制量 (控制器输出) $y(t)$ —被控参数 (测量值) $q(t)$ —操纵量 $f(t)$ —扰动

下面说明控制系统中常用的一些术语。

测量装置 (包括检测元件和变送器): 检测现场的被控参数 $c(t)$, 并将其转化为标准测量值 $y(t)$ 。例如, 用热电阻或热电偶测量温度, 并用温度变送器将其转换为标准直流信号 (0~10 mA 或 4~20 mA)。

比较机构: 比较设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 并输出其偏差值。

控制器: 根据偏差值的正负、大小及变化情况, 按某种预定的控制规律给出控制量 $u(t)$ 。比较机构通常包含在控制器里, 统称为控制器。目前在工业中应用的控制器有气动式控制器或电动式控制器、智能型控制器或工业控制计算机 (简称工控机)。

执行器: 接受控制器输出的控制量 $u(t)$, 相应地去改变操纵量 $q(t)$ 。工业生产过程中应用的执行器为气动控制阀、电动控制阀等执行机构。

被控对象 (过程): 一般是指工业生产中需要进行控制的设备、装置或生产过程。图 1-2 所示的恒温箱的自动控制系统中, 恒温箱就是被控对象。

被控参数: 在被控对象中要求按预定规律变化的物理量, 即被控制的物理量, 又称被调参数。图 1-2 所示的恒温箱的自动控制系统中, 箱内的温度就是被控参数。

控制量: 也称调节量, 是控制 (调节) 器的输出, 它通过执行器 (例如控制阀) 改变作用在被控对象上的控制作用大小 (例如出口流量), 从而对被控对象实现控制。

扰动 (干扰): 在自动控制系统中, 干扰又称扰动。除控制量以外引起被控参数变化的所有作用因素都可视为干扰。如在恒温箱的控制系统中, 电压的变化是扰动作用。又如在蒸汽加热的温度控制系统中, 冷流体流量的变化、蒸汽压力的变化等都是扰动因素。

设定 (给定) 值: 指与被控参数工艺规定值相对应的信号值, 又称控制目标值, 是控制系统的输入变量。

偏差值: 指设定值与被控参数测量值之差, 在自动控制系统中, 一般规定偏差值 $e(t) = r(t) - y(t)$ 。

广义对象：在系统中，控制器以外的各部分组合在一起，即被控对象、执行器、检测装置的组合称为广义对象。

1.3 自动控制系统的类型

自动控制系统有多种分类方法。例如，按控制方式可分为开环控制、闭环控制、复合控制等；按元件类型可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统、生物系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等。这些就不一一列举了，在此根据后面的分析需要介绍几种常见的分类方法。

1.3.1 按信号流向划分

1. 开环控制系统

开环控制系统原理框图如图 1-4 所示。信号由输入端到输出端单向流动。输入端与输出端之间只有信号的前向通道而不存在由输出端到输入端的反馈通路。

2. 闭环控制系统

若控制系统中信号除从输入端到输出端外，还有从输出端到输入端的反馈信号，则构成闭环控制系统，也称反馈控制系统，闭环控制系统框图如图 1-5 所示。

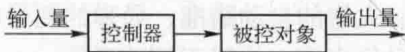


图 1-4 开环控制系统原理框图



图 1-5 闭环控制系统框图

开环控制系统精度不高，适应性不强，主要原因是缺少从系统输出到输入的反馈回路。若要提高控制精度，就必须把输出量的信息反馈到输入端，通过比较输入值与输出值，产生偏差信号，该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用，逐步减小以至消除这一偏差，从而实现所要求的控制性能。

必须指出，在系统主反馈通道中，只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈，将使偏差越来越大，导致系统发散而无法工作。

闭环控制系统工作的本质机理是将系统的输出信号引回到输入端，与输入信号相比较，利用所得的偏差信号对系统进行调节，达到减小偏差或消除偏差的目的。这就是负反馈控制原理，它是构成闭环控制系统的核心。

一般来说，开环控制系统结构比较简单，成本较低。开环控制系统的缺点是控制精度不高，抑制干扰能力差，而且对系统参数变化比较敏感，一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合，如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

在闭环控制系统中，不论是输入信号的变化，或者干扰的影响，还是系统内部的变化，只要被控量偏离了规定值，都会产生相应的作用去消除偏差。因此，闭环控制抑制干扰能力强，与开环控制相比，系统对参数变化不敏感，可以选用不太精密的元件构成较为精密的控制系统，获得满意的动态特性和控制精度。但是采用反馈装置需要添加元部件，造价较高，

同时也增加了系统的复杂性。如果系统的结构参数选取不适当,控制过程则可能变得很差,甚至出现振荡或发散等不稳定的情况。因此,如何分析系统、合理选择系统的结构参数,从而获得满意的系统性能,是自动控制理论必须研究解决的问题。

1.3.2 按输入信号的特征分类

1. 恒值控制系统

这类系统的特点是输入量为某个恒定的常量,系统的基本任务是尽量排除各种干扰因素的影响,使被控量保持在一个给定的期望值上。由于扰动的出现,将使被控量偏离期望值而出现偏差,恒值系统能根据偏差的性质产生控制作用,使被控量以一定的精度回复到期望值附近。例如前面介绍的恒温控制系统即恒值控制系统。

2. 程序控制系统

这类系统的输入量不是常值,而是事先确定的运动规律,编成程序装在输入装置中,即控制输入信号是事先确定的程序信号,控制的目的是使被控对象的被控量按照要求的程序动作。如热处理炉温控制系统中的升温、保温、降温等过程,都是按照预先设定的规律进行控制的。又如机械加工中的数控机床、加工中心均是典型的例子。

3. 随动系统

这类系统的输入量是预先无法确定的任意变化的量。控制系统能使被控量以尽可能高的精度跟随给定值的变化,或要求系统的输出量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。随动系统也能克服扰动的影响,但一般说来,扰动的影响是次要的。许多自动化武器都是由随动系统装备起来的,如鱼雷的飞行、炮瞄雷达的跟踪、火炮的自动瞄准、导弹的制导等。民用工业中的船舶自动舵、数控切割机以及多种自动记录仪表等,均属于随动系统。

1.3.3 按描述元件的动态方程分类

1. 线性系统

线性系统的特点在于组成系统的全部元件都是线性元件,它们的输入输出静特性均为线性特性。这类系统的运动过程可用线性微分方程或线性差分方程来描述。线性系统满足叠加原理,即初始条件为零时,几个输入信号同时作用在系统上所产生的总的输出信号,等于各输入信号单独作用时所产生的输出之和。线性系统的主要特征是具有齐次性和叠加性。

2. 非线性系统

非线性系统的特点在于系统中含有一个或多个非线性元件。非线性元件的输入输出静特性是非线性特性。例如饱和限幅特性、死区特性、继电特性以及传动间隙等。凡含有非线性元件的系统均属非线性系统,这种系统不满足叠加原理,其运动过程需用非线性微分方程或非线性差分方程来描述。非线性系统还没有一种完整、成熟、统一的分析方法。通常对于非线性程度不很严重或做近似分析时,均可用线性系统的理论和方法来处理。

1.3.4 按信号的传递是否连续分类

1. 连续系统

若系统各环节间的信号均为时间 t 的连续函数,信号的大小均是可任意取值的模拟量,

则这类系统称为连续系统。连续系统的运动规律可用微分方程描述。

2. 离散系统

离散系统是指系统中有一处或多处的信号是脉冲序列或数码。若系统中采用了采样开关,将连续信号转变为离散的脉冲形式的信号,此类系统称为采样控制系统或脉冲控制系统。若采用数字计算机或数字控制器,其离散信号是以数码形式传递的,此类系统称为数字控制系统。在这种控制系统中,一般被控对象的输入/输出是连续变化的信号,控制装置中的执行部件也常常是模拟式的,但控制器是用数字计算机实现的,所以系统中必须有信号变换装置,如模数转换器(A-D转换器)和数模转换器(D-A转换器)。离散系统的运动规律可用差分方程描述。计算机控制系统将是今后控制系统的主要发展方向。

1.3.5 按系统的参数是否随时间变化分类

1. 定常系统

如果描述系统特性的微分方程中各项系数都是与时间无关的常数,即系统中的参数不随时间变化,则这类系统称为定常系统。该类系统只要输入信号的形式不变,在不同时间输入下的输出响应形式是相同的。实践中遇到的大部分系统都是属于这类系统,或者可以合理地、近似地看成这类系统。

2. 时变系统

描述系统特性的微分方程中只要有一项系数是时间 t 的函数,则这类系统称为时变系统。

1.4 自动控制系统的基本要求

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

1.4.1 稳定性

稳定性是控制系统最基本的要求。所谓稳定性是指控制系统受到干扰偏离平衡状态后,能自动恢复或接近平衡状态的能力。控制系统的稳定性是一个衡量系统对外界干扰的抑制能力的性能指标。

当系统受到扰动后,其状态偏离了平衡状态,当此扰动消除后,如果系统的输出响应在随后所有时间内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。

当受到干扰的系统的解与未受干扰的系统的解在经历一段时间后,其差别限制在一个很小的范围内,这类控制系统可以称为是“稳定”的。相反,在某些情况下,即使扰动因素十分小,但是经过足够长的时间后,受到干扰的系统的解和未受到干扰的系统的解差别可以很大,这类系统可以称为是“不稳定的”。如果系统不稳定,则系统在受到干扰后越来越偏离预定的工作状态,最后导致系统的运动状态发散或产生某些严重的振荡而使系统损坏或崩溃。

1.4.2 快速性

快速性是指当系统的输出量与输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快慢程度。快速性好的系统消除偏差的过渡时间就短,就能复现快速变化的输入信号,因而具有较好的动态性能。

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,而且在调节过程中,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,它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较好。

1.4.3 稳态性能

当动态过程结束、系统达到新的稳态时,要求系统的输出等于系统给定值所期望的值,但实际上可能存在误差。在自动控制理论中,系统稳态输出与期望值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,普通数控机床的加工误差小于 0.02 mm ,一般恒速、恒温控制系统的稳态误差都在给定值的 1% 以内,所以,稳态性能是控制系统最重要的性能之一。

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,主要侧重于系统的稳态性能;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。

由于控制对象的具体情况不同,各种系统对稳定、精确、快速这三方面的要求是各有侧重的。例如,调速系统对稳定性要求较严格,而随动系统则对快速性提出了较高的要求。

即使对于同一个系统,稳、准、快三个指标也是相互制约的。提高快速性,可能会引起强烈振荡;改善了稳定性,控制过程又可能过于迟缓,甚至精度也会变差。分析和解决这些矛盾,是本书所要讨论的主要内容之一。

对于实际的控制系统,除了上述要求以外,还有鲁棒性(Robustness)等要求。如果系统的参数或者结构在一定范围内变化时,系统仍然保持某个性能,则称系统的这个性能是鲁棒的。如果系统的参数或者结构在一定范围内变化时,系统仍然保持稳定,则称系统是鲁棒稳定的。

1.5 小结

本章简要介绍了自动控制理论的发展历史,叙述了自动控制原理的基本内涵、基本概念及有关术语,并对自动控制系统进行了基本分类。同时,本章介绍了开环控制系统和闭环控制系统、定值控制系统、随动控制系统、程序控制系统、连续控制系统和离散控制系统等概念,以使读者对自动控制系统的基本结构、控制原理、基本术语以及控制类型有较深入的理解。

1.6 习题

1-1 水箱液面高度控制系统的三种原理方案如图 1-6 所示。在运行中，希望液面高度 H 维持不变。试

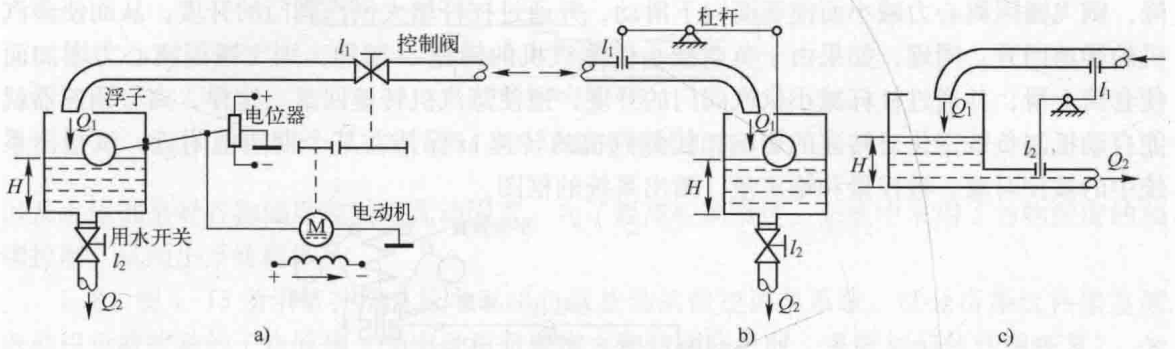


图 1-6 水箱液面高度控制系统

- (1) 说明各系统的工作原理。
- (2) 画出各系统的框图，并指出被控对象、被控量、给定值、干扰量。
- (3) 说明各系统属于哪种控制方式。

1-2 仓库大门自动控制系统的原理图如图 1-7 所示。试说明自动控制大门开启和关闭的工作原理，并画出系统的框图。

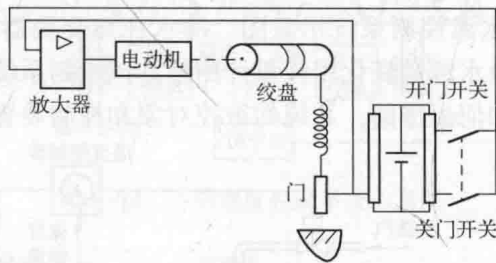


图 1-7 仓库大门自动控制系统

1-3 图 1-8 所示为工业炉温自动控制系统的原理图。试分析系统的工作原理，并指出被控对象、被控量和给定值，画出系统框图。

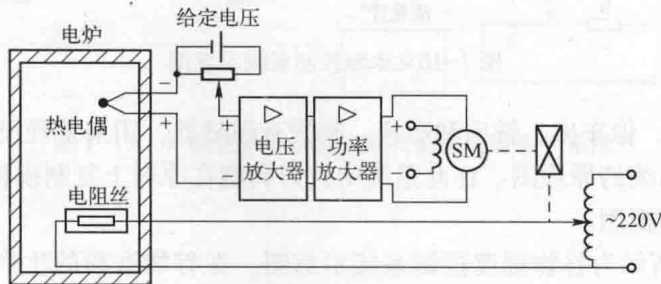


图 1-8 工业炉温自动控制系统工作原理图