

自动化国家级特色专业系列规划教材

自动控制原理

孙优贤 王 慧 主编



化学工业出版社

自动化国家级特色专业系列规划教材

自动控制原理

孙优贤 王 慧 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

全书共分九章。第一章概述自动控制系统的基本概念以及发展的历程；第二章较为全面地描述控制系统各单元的微分方程、传递函数、方块图、状态空间等形式不一的数学模型和模型之间的关系；第三章讨论如何获取控制系统的时域响应和时域性能指标，着重分析了二阶系统的特点；第四章说明了系统的稳定性与稳态误差；第五章与第六章分别给出了根轨迹与频率特性两种图解分析方法；第七章则将连续时间控制系统分析与综合的方法推广应用到线性离散时间控制系统；第八章阐述基于状态空间模型的线性系统理论基础；第九章简单地介绍了非线性系统的基本概念、相平面分析法与描述函数法的基本知识。

本书立足自动控制的基础理论与概念，注意到知识的完整性与系统性。因此，不仅可作为自动化类与电气信息类相关专业本科生、研究生相应课程的教材，而且还可以作为广大从事自动控制人员教学、科研的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/孙优贤，王慧主编. —北京：化学工业出版社，2011.6

自动化国家级特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-122-11607-9

I. 自… II. ①孙…②王… 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 (2011) 第 122900 号

责任编辑：唐旭华 郝英华

文字编辑：徐卿华

责任校对：宋 夏

装帧设计：张 辉

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 27½ 字数 736 千字 2011 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：48.00 元

版权所有 违者必究

总 序

随着工业化、信息化进程的不断加快,“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化”已成为推动我国工业产业可持续发展、建立现代产业体系的战略举措,自动化正是承载两化融合乃至社会发展的核心。自动化既是工业化发展的技术支撑和根本保障,也是信息化发展的主要载体和发展目标,自动化的发展和应用水平在很大意义上成为一个国家和社会现代工业文明的重要标志之一。从传统的化工、炼油、冶金、制药、机械、电力等产业,到能源、材料、环境、军事、国防等新兴战略发展领域,社会发展的各个方面均和自动化息息相关,自动化无处不在。

本系列教材是在建设浙江大学自动化国家级特色专业的过程中,围绕自动化人才培养目标,针对新时期自动化专业的知识体系,为培养新一代的自动化后备人才而编写的,体现了我们在特色专业建设过程中的一些思考与研究成果。

浙江大学控制系自动化专业在人才培养方面有着悠久的历史,其前身是浙江大学于1956年创立的化工自动化专业,这也是我国第一个化工自动化专业。1961年该专业开始培养研究生,1981年以浙江大学化工自动化专业为基础建立的“工业自动化”学科点被国务院学位委员会批准为首批博士学位授予点,1984年开始培养博士研究生,1988年被原国家教委批准为国家重点学科,1989年确定为博士后流动站,同年成立了工业控制技术国家重点实验室,1992年原国家计委批准成立了工业自动化国家工程研究中心,2007年启动了由国家教育部和国家外专局资助的高等学校学科创新引智计划(“111”引智计划)。经过50多年的传承和发展,浙江大学自动化专业建立了完整的高等教育人才培养体系,沉积了深厚的文化底蕴,其高层次人才培养的整体实力在国内外享有盛誉。

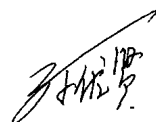
作为知识传播和文化遗产的重要载体,浙江大学自动化专业一贯重视教材的建设工作,历史上曾经出版过很多优秀的教材和著作,对我国的自动化及相关专业的人才培养起到了引领作用。当前,加强工程教育是高等学校工科人才培养的主要指导方针,浙江大学自动化专业正是在教育部卓越工程师教育培养计划的指导下,对自动化专业的培养主线、知识体系和培养模式进行重新布局和优化,对核心课程教学内容进行了系统性重新组编,力求做到理论和实践相结合,知识目标和能力目标相统一,使该系列教材能和研讨式、探究式教学方法和手段相适应。

本系列教材涉及范围包括自动控制原理、控制工程、检测和传感、网络通信、信号和信息处理、建模与仿真、计算机控制、自动化综合实验等方面,所有成果都是在传承老一辈教育家智慧的基础上,结合当前的社会需求,经过长期的教学实践积累形成的。大部分教材和其前身在我国自动化及相关专业的培养中都具有较大的影响,例如《过程控制工程》的前身是过程控制的经典教材之一、王骥程先生编写的《化工过程控制工程》。已出版的教材,既有国家“九五”重点教材,也有国家“十五”、“十一五”规划教材,多数教材或其前身曾获得过国家级教学成果奖或省部级优秀教材奖。

本系列教材主要面向自动化(含化工、电气、机械、能源工程及自动化等)、计算机科学与技术、航空航天工程等学科和专业有关的高年级本科生和研究生,以及工作于相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我希望,这套教材既能为在校本

科生和研究生的知识拓展提供学习参考，也能为广大科技工作者的知识更新提供指导帮助。

本系列教材的出版得到了很多国内知名学者和专家的悉心指导和帮助，在此我代表系列教材的作者向他们表示诚挚的谢意。同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持，并热忱欢迎提出批评和意见。



2011 年 6 月

前 言

自动控制原理是国内外各高校自动化及相关专业最重要的专业基础课,本书吸取了国内外同类教材的优点,抓住自动控制理论中最基础的知识点组织编写,比较全面地介绍包括经典控制理论与现代控制理论的理论基础与基本原理。

全书共分九章。第一章概述自动控制系统的基本概念以及发展的历程;第二章从具体的物理系统入手,较为全面地推导了控制系统各单元的微分方程、传递函数、方块图、状态空间等不同形式的模型和模型之间的关系;第三章讨论如何获取控制系统的时域响应,如何求取系统的时域性能指标,着重分析二阶系统的特点;由于控制系统设计中的稳定性非常重要,因此将系统的稳定性与稳态误差计算单独设在第四章;作为经典控制理论中的重要组成部分,第五章与第六章分别给出根轨迹与频率特性两种图解分析方法;第七章将连续时间控制系统分析与综合的方法推广应用于线性离散时间控制系统,如数学模型、时域分析、稳定性分析等,而基于状态空间模型的现代控制理论中的线性系统理论如能控性、能观性的分析,状态反馈与状态观测器的设计等在第八章得到阐述;虽然本书的着眼点是线性时不变系统,但作为知识的扩展,第九章简单地介绍了非线性系统的基本概念、相平面的基本分析法与描述函数法。

本书既深入浅出、较为全面地介绍自动控制系统的基本概念、控制理论基础、控制系统的分析与综合方法,又突出经典控制理论与现代控制理论的发展衍变以及它们自然融会贯通的重点,使读者在了解半个多世纪来控制理论的发展脉络,从科学方法论的高度上掌握系统与连贯的知识,提高分析问题与解决问题的能力,从而可以从更全面更客观的视角认识世界。

由于本书立足自动控制的基础理论与概念,注意到知识的完整性与系统性。因此,本书不仅可作为自动化类与电气信息类相关专业本科生、研究生相应课程的教材,而且还可以作为广大从事自动控制人员教学、科研的参考书。

为方便教学,本书配套的电子教案可免费提供给采用本书作为教材的相关院校使用,如有需要,请发电子邮件至 cipedu@163.com;与书配套的学习指导书即将出版,欢迎选用。

本书由孙优贤院士、王慧教授主编,王慧教授负责第一~三章,赵豫红副教授负责第四章,周立芳副教授承担了第五、六章的编写,赵豫红与周立芳副教授共同编写了第七章,吴俊教授与王慧教授共同编写了第八、九章。王慧教授承担了全书的统稿工作,孙优贤院士负责全书内容的审阅与最终定稿。

需要说明的是,在编写本书的五年间,得到了浙江大学本科生院、教务处、控制系领导与同仁的大力支持;本书的初稿问世后,系里一些老师提出了很好的建议;在浙江大学控制系“自动控制原理”课程中的多轮使用中也得到来自于学生的反馈意见。还有化学工业出版社的领导与编辑们,也对本书的出版做出了许多努力。五年时间的点点滴滴,在付诸于印刷之际,编者惟有感激。

由于编者水平有限,书中定有不妥之处,敬请读者指正,以便在下次印刷或再版时修正。

编 者

2011年5月于杭州浙大求是园

目 录

第一章 概述	1
第一节 自动控制系统的基本概念	1
第二节 自动控制系统的基本结构形式	4
一、开环控制系统	4
二、闭环控制系统	4
三、开环与闭环控制系统的比较	6
第三节 自动控制系统的分类	9
一、按控制系统的结构分类	9
二、按系统给定信号的特征分类	9
三、按系统传输信号的性质分类	9
四、按系统的输入输出信号的数量分类	9
五、按系统的数学描述分类	10
六、按系统的参数是否随时间变化分类	11
第四节 对自动控制系统的基本要求	12
一、稳定性	12
二、瞬态性能	12
三、稳态误差	12
第五节 自动控制理论的发展概况	12
一、早期的自动控制系统	12
二、经典控制理论	13
三、现代控制理论	14
四、大系统控制理论与智能控制理论	14
第六节 本书的主要内容及结构体系	15
习题一	15
第二章 连续时间控制系统的数学模型	19
第一节 列写动态系统的微分方程	19
一、几个典型的例子	19
二、微分方程模型及相似系统	26
三、动态系统建模举例	27
第二节 状态及状态空间模型	31
一、状态空间的基本概念	31
二、状态空间模型的建立	33
三、关于状态空间模型的说明	39
第三节 特殊环节的建模及处理	41
一、纯滞后	41
二、分布参数	42
三、积分	43
四、高阶	44
五、非线性环节的线性化处理	45
第四节 控制系统中其他环节的数学模型	48
一、控制器的数学模型	48
二、测量元件的数学模型	49
三、执行机构的数学模型	51
第五节 传递函数与方块图	52
一、基本概念	52
二、关于传递函数的讨论	53
三、系统方块图	55
第六节 信号流图与梅逊公式	66
一、信号流图的基本构成	66
二、信号流图的绘制	67
三、梅逊增益公式	67
第七节 各种数学模型间的关系	70
一、由微分方程转换为状态方程	70
二、由状态空间表达式求传递函数	73
三、状态变换和状态变换中特征值的不变性	75
四、由传递函数求状态空间表达式	77
五、由方块图求系统状态空间表达式	81
本章小结	82
习题二	82
第三章 连续时间控制系统的时域分析	90
第一节 概述	90
一、概述	90
二、典型输入信号	90
第二节 微分方程的经典求解方法	92
一、系统的稳态响应求解	92
二、微分方程的暂态响应求解	95
三、暂态响应的时间常数	97
第三节 微分方程的拉氏变换求解方法	97
第四节 控制系统的性能指标及时域分析	99
一、控制系统的时域性能指标	99
二、控制系统的时域分析	103
第五节 高阶系统的暂态响应	113

一、高阶系统的阶跃响应	113	三、线性定常状态方程的解	127
二、高阶系统的闭环主导极点	114	四、状态空间模型下的系统输出响应	128
第六节 常规控制器及其对系统的影响	115	第八节 被控对象的实验建模	130
一、常规控制器的控制规律	115	一、常用的实验测试方法	130
二、控制器参数对控制过程的影响	118	二、输入测试信号	131
三、测量滞后对控制过程的影响	120	三、实验测试数据的处理	132
第七节 状态方程的求解与分析	120	本章小结	134
一、线性定常齐次状态方程的解	120	习题三	135
二、状态转移矩阵	122		
第四章 连续时间控制系统的稳定性与稳态误差	139		
第一节 劳斯稳定判据	139	一、稳态误差	148
一、稳定性	139	二、反馈控制系统的“型”	149
二、劳斯判据	141	三、稳态误差系数	153
三、劳斯判据的应用	145	第三节 等效单位负反馈系统	158
四、赫尔维茨判据	147	本章小结	159
第二节 反馈控制系统的稳态误差	148	习题四	159
第五章 根轨迹分析法	162		
第一节 概述	162	第四节 基于根轨迹的系统性能分析	192
一、根轨迹概念	162	一、开环极点对系统性能的影响	192
二、闭环零、极点和开环零、极点之		二、开环零点对系统性能的影响	193
间的关系	164	三、增益 K 的选取	195
三、根轨迹方程	165	第五节 基于根轨迹的系统补偿器设计	196
第二节 根轨迹的绘制方法	166	一、超前补偿器的设计	196
第三节 广义根轨迹	183	二、滞后补偿器的设计	198
一、参数根轨迹	183	三、PID 控制器的设计	200
二、零度根轨迹	185	本章小结	201
三、纯滞后系统的根轨迹	187	习题五	202
第六章 频率特性分析法	206		
第一节 概述	206	一、Nyquist 稳定性判据	236
第二节 频率特性及其图示法	208	二、Nyquist 稳定性判据的应用	241
一、频率特性的定义	208	三、稳定裕度	245
二、频率特性的图示法	209	第五节 基于频率响应的补偿器设计	248
第三节 开环系统典型环节分解和频率		一、频域指标与时域指标的关系	248
特性曲线的绘制	211	二、超前补偿器的设计	250
一、开环系统典型环节分解	211	三、滞后补偿器的设计	253
二、典型环节的幅相曲线绘制	212	第六节 系统的闭环频率响应	256
三、系统的开环幅相曲线绘制	216	一、闭环频率特性	257
四、典型环节 Bode 图的绘制	224	二、等 M 圆	257
五、开环对数频率特性曲线绘制	228	三、等 N 圆	258
六、由频域实验确定系统传递函数	233	本章小结	259
第四节 奈奎斯特 (Nyquist) 稳定性判据	236	习题六	259
第七章 线性离散时间控制系统分析与综合	264		
第一节 采样过程与采样定理	264	四、采样信号的复现	268
一、采样过程的数学描述	264	第二节 Z 变换基础	269
二、采样信号的频谱分析	265	一、 Z 变换	270
三、采样定理	267	二、 Z 变换的几个性质	271

三、 Z 反变换	272	一、离散系统的稳定性	298
四、改进 Z 变换	274	二、基于 z 域的分析与设计	305
五、 Z 变换的局限性	277	三、基于频率特性的分析与设计	310
第三节 线性离散系统的数学描述及求解	277	第五节 数字控制系统简介	311
一、差分方程及其求解	277	一、基于连续系统的分析与设计	311
二、脉冲传递函数	279	二、基于离散系统的分析与设计	313
三、离散系统的状态空间模型	287	本章小结	317
第四节 离散系统的分析与设计	298	习题七	317
第八章 线性定常系统的状态空间分析法	322		
第一节 线性定常连续系统的能控性和能观性	322	四、状态反馈镇定	356
一、直观理解	322	第四节 最优控制	358
二、能控性定义和能观性定义	324	一、最优控制概述	358
三、能控性判别	325	二、线性系统二次型最优控制问题	359
四、能观性判别	333	三、状态调节器	361
五、对偶原理	335	第五节 线性定常连续系统的状态观测器	364
第二节 线性定常连续系统的线性变换与结构分解	336	一、状态观测器	364
一、非奇异线性变换	336	二、降维状态观测器	368
二、状态空间的几种标准型式	337	三、状态观测反馈系统(分离定理)	370
三、结构分解	340	第六节 线性定常离散系统的状态空间分析	372
四、状态空间描述与传递函数描述的关系	344	一、离散系统的能控性	372
第三节 线性定常连续系统的状态反馈控制	346	二、离散系统的能观性	373
一、状态反馈控制的基本概念	346	三、连续系统与离散系统的关联与区别	374
二、闭环线性系统的能控性与能观性	348	四、连续动态系统离散化后的能控性与能观性	375
三、状态反馈极点配置	349	第七节 内模控制器设计	376
第九章 非线性系统分析	383	本章小结	378
第一节 控制系统中的典型非线性特性	383	习题八	378
一、典型非线性特性	383		
二、非线性控制系统的特殊性	385	一、描述函数的概念	397
三、非线性控制系统的分析方法	386	二、典型非线性特性的描述函数	397
第二节 相平面法	386	三、描述函数分析法	403
一、相平面的基本概念	386	第四节 李雅普诺夫稳定性分析	409
二、相轨迹的性质	386	一、自治系统及其平衡状态	409
三、相轨迹的绘制	387	二、李雅普诺夫稳定性定义	410
四、二阶线性系统的相轨迹	389	三、李雅普诺夫稳定性的间接判别法	412
五、非线性系统的相轨迹	391	四、李雅普诺夫稳定性的直接判别法	414
六、由相轨迹求时间解	392	五、线性连续定常系统的李雅普诺夫稳定性分析	418
七、相平面分析	392	六、离散系统的李雅普诺夫稳定性分析	420
第三节 描述函数法	396	本章小结	421
附录 拉普拉斯变换	424	习题九	422
参考文献	428		

第一章 概 述

目前,自动控制系统几乎不知不觉地渗透到人们生活的每个角落,从航天空间站、飞行器、高速列车、城市交通这些复杂的大系统,到工业生产、现代农业、垃圾处理、机器人,再到轿车、家用电器等,几乎无所不在。可以毫不夸张地说,自动控制系统不知不觉地影响和改变着人们的生活。

自动控制理论是研究所有自动控制系统工作的共同规律。它的任务是:①对各类系统中的信息传递与转换关系进行定量分析,然后可由这些定量关系预见整个系统的行为;②在分析的基础上进行系统的综合与校正,使系统达到某种性能指标。定量分析在自动控制理论中非常重要,需要广泛地用到各种数学与物理工具,例如微积分、微分方程、线性代数、复变函数、电学、力学以及相关应用学科的背景知识。同时,自动控制理论又是一门涉及多个学科的应用性学科,必须注意到将基础理论与具体的实际问题相结合。今天所能看到的许多用在不同领域的高、精、尖自动控制系统,正是控制工程专家与这些领域专家合作,将控制理论与各领域的专业知识相结合的产物;也正是应用的需求驱动使自动控制理论自身不断地向前发展,将更多的梦想变成现实。

第一节 自动控制系统的基本概念

“控制”是个常用词,在人们日常生活与工作中出现的频率非常高。现代汉语词典对其所作的解释是:“掌握住对象不使其任意活动或超出范围;或使其按控制者的意愿活动”。在本教材中,“控制”往往是指通过对某个装置或生产过程的某个或某些物理量进行操作,以达到使某个变量保持恒定或沿某个预设轨迹运动的一个动态过程。例如,对房间室内温度与湿度、电机的转速、锅炉的压力、机器人的动作、航天器的发射轨迹等的控制。在这些控制问题中,房屋、电机、锅炉、机器人、航天器等被称为被控对象;室内温度与湿度、电机转速、锅炉压力、航天器发射角度与速度等是控制的目的,称为被控变量(简称被控量);人们在控制过程中操纵的那些物理量则被称为控制变量(简称控制量)或操纵变量。

那么,什么是控制系统呢?简单地说,就是为了达到某种“目标”设计并按照人们意愿予以实施的一套系统。例如,城市道路交叉口的红绿灯信号控制系统控制着各个方向的车辆,保证城市交通的安全与通畅。控制系统中的基本要素应该包含:①被控变量,也就是控制系统的目标;②被控对象;③检测传感器,通过它知道被控对象当前状态;④控制器,体现设计者意愿的控制策略;⑤执行机构,实现控制目标的手段。如果控制系统在启动工作之后不再需要人工干预而能自动地完成预先设置的任务,称该系统是自动控制系统;否则为手动(或称人工)控制系统。比如说,同为道路交叉口的交通系统,由交警指挥车辆通行是典型的人工控制系统;而若采用信号灯自动控制,则为自动控制系统。

【例 1-1】 图 1-1(a) 描述的是一个工业用水槽。为了稳定生产,要求通过调节出水口的阀门开度将水槽的液位保持在高度 H 上。当工况稳定时,进水与出水的阀门开度一定,进水量 Q_{in} 与出水量 Q_{out} 保持平衡,液位恒定在 H ;但若进水量 Q_{in} 因为某种原因变大时,

液位显然会上升,此时要让液位回到 H ,必然应将出水阀门开度相应增加。

本例中,若采用人工控制,需要操作工用眼睛时刻观测实际的液位高度 h ,并在大脑里直接将观测到的液位 h 与目标值 H 比较。当实际液位 h 不等于 H 时,大脑将根据 h 与 H 间的误差方向与大小,发出将出水阀门“开多少”或“关多少”的控制“命令”,目的是尽可能减少误差,将液位调整成给定的 H 值。在手动控制系统中,为了保持液位的恒定,操作工需要不间断地观测、判断并实施调节作用。

同样的目的,可以通过设计一个如图 1-1(b) 所示的自动控制系统来达到。其中,液位测量传感仪表 LT 代替了操作工的眼睛,将连续测量的水槽实际液位 h 传送给代替了操作工大脑的液位控制器 LC; LC 比较 h 与期望值 H ,根据它们间的偏差值得到出水流量的调节量,并将该调节量送出,驱动出水阀门动作。正常情况下,水槽的进出水量处于平衡状态,偏差为零;若进水量 Q_{in} 增大,实际液位 h 上升,控制器 LC 给出加大出水阀开度以增加出水量 Q_{out} 的指令;反之,若进水量 Q_{in} 减少, h 下降,控制器 LC 就会发出关小出水阀门的指令。由上述调节过程看出,无论进水量变大还是变小,只要液位 h 发生变化,系统都会自动而及时地采取控制作用,以使液位自动上升或下降,直至偏差为零,达到新的平衡状态。

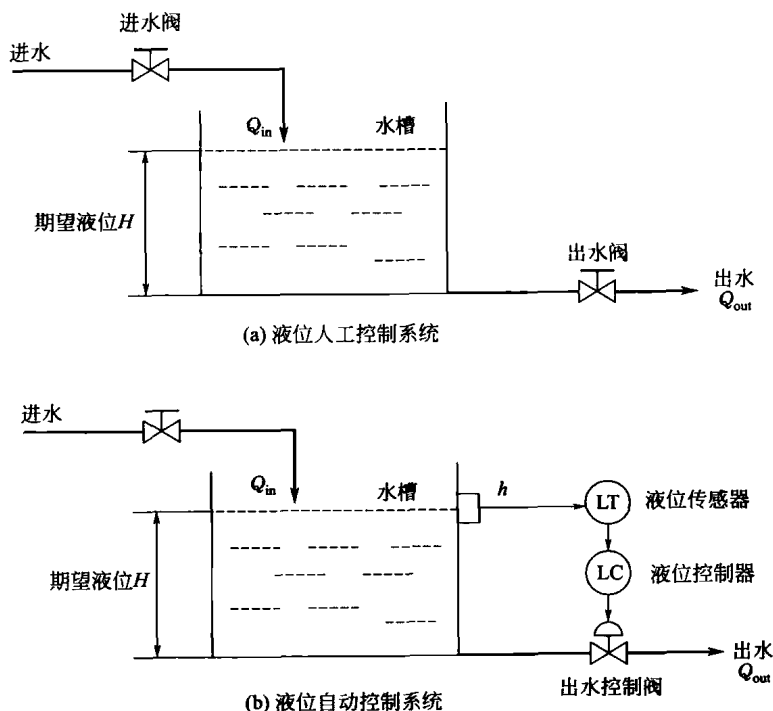


图 1-1 水槽液位控制系统示意图

在例 1-1 所示的液位控制系统中,称系统的被控对象是水槽,被控变量是水槽液位,控制变量为出口流量,出水阀门为执行机构——即由它具体地执行控制器的“指令”完成控制任务。该系统中,由于进水流量是引起液位变化又未加控制的主要因素,称其为干扰或扰动。可以看出,所谓自动控制系统,是指将被控对象和测量传感器、控制器、执行机构等按一定的方式有机连接在一起的整体,目的是代替人工控制系统中由操作工完成的功能。虽然自动控制系统根据被控对象、控制目标和应用场合的不同,可能有各种各样的结构形式,但就其工作原理而言,闭环自动控制系统的基本组成部分已经在例 1-1 中出现,即被控对象(过程)、测量传感器、控制器、执行机构,一般用如图 1-2 所示的方块图表示。其中,系统的输入分为参考输入(即期望值)与扰动输入两部分,由扰动引起输出(被控变量)变化的

这条通道称为扰动通道；由偏差 e 驱动控制器引起输出变化的通道称为控制通道（又称为前向通道）；从输出信号返回到输入信号的通道称为反馈通道；比较器包括在控制器中，如图中虚线框所示。

图 1-1 和图 1-2 都可表示系统的结构与组成。其中，图 1-1 清晰地表示出了被控对象的物理过程，称为工艺流程图或物理结构图，图中的箭头方向表示的是实际系统中的物料流方向；图 1-1(b) 因为画上了控制系统，称为带控制点的工艺流程图，图中除了表示物料（水）流向的箭头外，还增加了连接 LT-LC-阀门等表示信息流方向的箭头。图 1-2 表示的是自动控制系统的组成部分及信息流向，称其为控制系统方块图（简称方块图），图中每个方块代表系统的一个组成部分（又称一个环节），箭头指出了信息的流向。

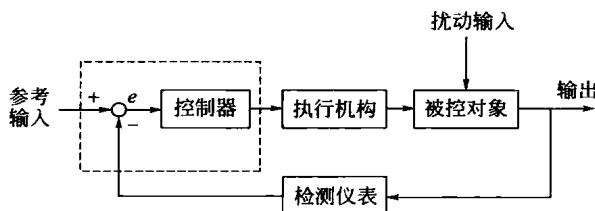


图 1-2 自动控制系统的典型组成方块图

下面给出自动控制理论中常用的一些术语。

系统 作为一个有机的整体，将一些部件组合在一起完成特定的任务。系统不仅限于物理系统，还可用于软件系统，甚至抽象的动态过程，如计算机操作系统、经济系统、工程系统进行某种数学上的变换（如 Laplace 变换、Z 变换）等。

被控对象（或过程） 指被控制的设备、物体或者一个运行的变化过程，如化学反应过程、炼油生产过程、生物学过程等。

被控变量（系统输出） 被控对象的输出，表征了对象或过程的状态和性能。

控制变量（操作变量） 作用于被控对象，改变对象运行状态的量。

参考输入 人们希望被控变量能达到的数值，又称给定输入、给定值、给定信号等。

反馈信号 从系统输出端取出并反向送回到系统输入端的信号称为反馈信号。当反馈信号的符号与被比较信号相反时称为负反馈，相同时称为正反馈。

反馈控制 将系统的输出量与参考输入进行比较，根据其误差进行控制，力图保持两者间预先设定好的关系。

偏差信号 指期望输出值与实际输出值之间的偏差，往往简称偏差，有时也称为误差。如在反馈控制系统中，参考输入和反馈信号间的偏差也称为误差。所以，在有可能引起误解时，最好能用文字或公式进行说明。

扰动信号 使系统的输出量偏离期望值的信号。如果扰动产生在系统内部，称为内部扰动（简称内扰）；当扰动来自系统外部时，称为外部扰动（简称外扰）。

控制器 使被控对象具有期望的性能或状态的控制设备。它的作用是将系统输出与参考输入比较，根据得到的偏差，按预先设计好的控制规律给出控制量输出到执行机构。

执行机构 执行来自控制器的指令，并将控制作用施加于被控对象，以使被控变量按照预定的控制规律变化。

特性 指系统输入与输出之间的关系，可用数学式表示，也可用曲线或图表方式表示。系统特性分为静态特性与动态特性。静态特性是系统稳定以后表现出来的输入输出关系，通常表现为静态的放大倍数；动态特性指的是系统输入输出在从一个平稳状态过渡到另一个平稳状态的过程中所表现出来的特性，又称为过渡过程特性。

第二节 自动控制系统的的基本结构形式

自动控制系统的种类虽多，但就其基本结构形式可分成开环控制与闭环控制两大类。

一、开环控制系统

【例 1-2】 举个日常生活中用微波炉将牛奶加热到合适温度的例子来说明控制系统的基本概念。由于微波炉面板上无直接设定温度的键，通常只能设定加热的时间长短与强弱。若在加热前没有任何先验知识，则加热牛奶的时间长短与强弱是否合适只有等取出牛奶才能知道。

将上述牛奶加热的过程视作一个控制过程，又设微波炉功率是一个定值，可以控制加热牛奶温度的只有时间。若取出牛奶后发现加热得还不够热，只能重新设定时间再次加热，可以重复该过程直至满意为止。这是因为微波炉无法感知被加热牛奶的实际温度并据此影响定时器设定的时间长短。用控制系统的术语来描述这样一个简单的加热过程：合适的牛奶温度是系统的参考输入值（给定值），它是系统的输入，但因为不能直接在微波炉上设定，需要将其转换为加热时间；加热后的牛奶温度为被控变量，即系统的输出。图 1-3 给出了该系统输入输出之间的关系。

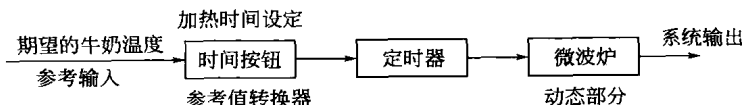


图 1-3 微波炉加热牛奶过程的方块图

由生活经验、文字描述与图 1-3 都可以看出，不管牛奶的温度是否满足要求，它都不能影响到定时器的动作。称这类输出量不能对系统的控制作用产生影响的系统为开环控制系统。系统中，被控对象微波炉承担了将冷牛奶加热的动态任务，又称其为系统的动态部分；时间按钮称为参考值转换器，定时器部分是控制器，微波炉中的加热部分为执行机构。

【例 1-3】 再举一个工业上常见的直流电动机转速控制系统的例子，如图 1-4 所示。图中电动机是电枢控制的直流电动机，要求带动负载以一定的转速转动，其电枢电压由功率放大器提供。通过调节滑臂在电位器上的位置，可以改变功率放大器的输入电压，从而改变电动机的电枢电压，达到改变电动机的转速的目的。与例 1-2 相仿，可用方块图 1-4(c) 简单直观地表示上述控制过程。显然，这也是一个开环控制系统。

由例 1-2、例 1-3 可以明显地看出开环控制系统的特点：首先，控制作用的传递具有单向性，直接由系统的输入驱动产生、输入一旦给定，它就沿箭头方向逐级地影响到输出；其次，输出无法影响到输入端，控制的精度完全取决于系统中所用元器件的性能与精度。

开环控制系统结构简单，调整方便，成本相对较低，在日常生活中应用很广，如自动售货机、产品的自动生产线、数控机床、许多家用电器。缺点是精度较差，这是因为当系统输出在干扰影响下发生改变时，控制器无法知晓，不能随之而变。比如说例 1-3 给出的直流电动机转速控制系统，正常工作状态是，输入电压值与输出转速保持着相应的平衡关系；但当系统受到外界扰动时，例如电动机的负载增大，输出转速就会下降，而电位器的位置并不会随着变化。因此，在控制精度要求较高的场合，应该采用闭环控制。

二、闭环控制系统

为克服开环控制系统的缺点，提高系统的控制精度以及在扰动作用下的系统性能，人们希望控制器能感知系统输出的变化，“随机应变”地给出相应控制指令。这种在控制系统中

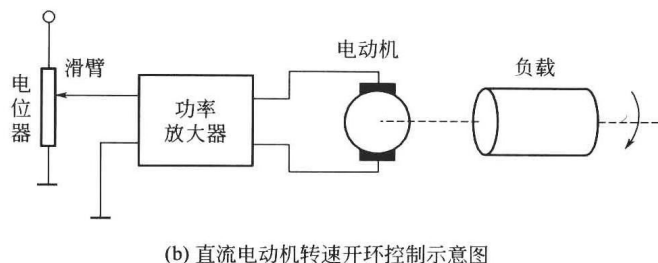
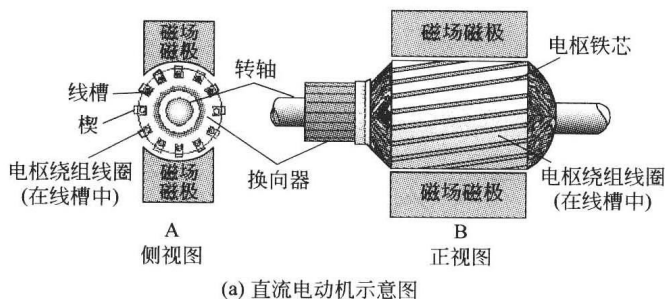


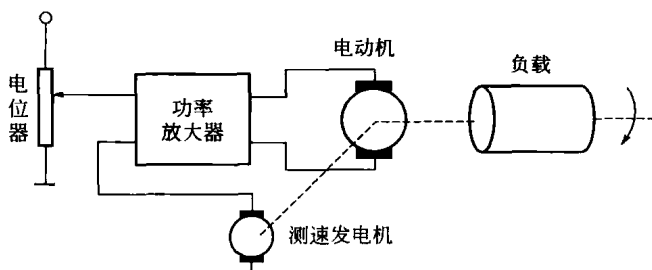
图 1-4 直流电动机转速开环控制系统

将输出量反馈到输入端，对控制作用产生影响的系统就称为闭环控制系统。下面仍用例子来说明。

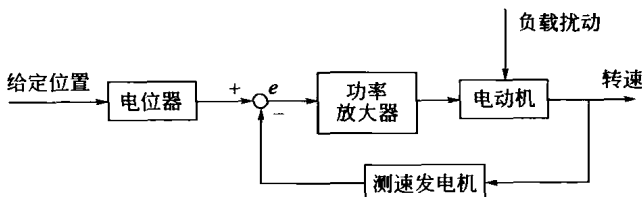
【例 1-4】 在图 1-4 的基础上，只需要增加一个测速发电机就可构成直流电动机转速闭环控制系统，如图 1-5(a) 所示。其中反馈回路的测速发电机用来检测输出转速，并给出与电动机转速成正比的反馈电压。将这个代表实际输出转速的反馈电压与代表期望输出转速的参考电压进行比较，所得到的偏差信号通过功率放大器来控制电动机的转速，以消除电动机实际转速与给定转速之间的偏差，使电动机转速保持在期望值附近。用方块图 1-5(b) 表示上述过程，可以更清晰地进行分析。

电动机转速的自动调节过程如下：当系统受到扰动时，例如负载增大，引起电动机的转速降低，测速发电机的端电压减小。在给定电压不变情况下，偏差电压 e 将会增大，也即功率放大器输入电压增加，电动机的电枢电压上升，使得电动机的转速增加；如果负载减小，则电动机转速的调节过程与上述调节过程相反。同样，如果有其他因素变化（如系统内部元器件因磨损老化等引起参数变化）影响到电动机输出转速变化，上述调节过程仍会自动进行。因此，闭环控制系统提高了系统抗干扰的能力，可以保证系统的控制精度。

由上面描述的电动机转速闭环控制过程，可以大概得到开环控制不具备的特点：①控制作用不是直接来自给定输入，而是由系统的偏差信号 e 驱动了对系统被控量的控制；②系统被控量被反馈到输入端，保证在有偏差产生的情况下影响系统的控制作用；③系统中，这种自成循环的信息传递路径形成了一个闭合的环路，称为闭环回路。由此，给出闭环控制的一般定义：凡是系统输出信号对系统的控制作用直接产生影响，都叫作闭环控制系统。



(a) 直流电动机转速闭环控制示意图



(b) 直流电动机转速闭环控制方块图

图 1-5 直流电动机转速闭环控制示意图

三、开环与闭环控制系统的比较

闭环控制系统的核心是采用了反馈（绝大多数情况是负反馈），使得系统既能克服外部干扰的影响又对系统的内部参数变化不灵敏，从而可使系统被控变量与输入保持一致。

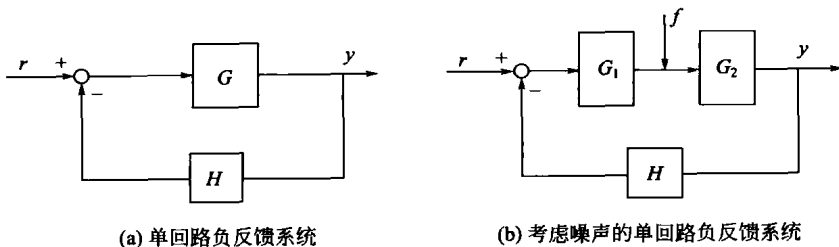
下面考察参数变化时反馈系统对敏感度的影响。考虑如图 1-6(a) 所示的单回路负反馈系统。若认为 G 是系统内部可能变化的增益参数，定义系统的闭环增益 M 对 G 变化的敏感度

$$S_G^M = \frac{\partial M/M}{\partial G/G} = \frac{M \text{ 变换的百分比}}{G \text{ 变化的百分比}} \quad (1-1)$$

式中， ∂M 表示由于 G 的增量引起的 M 增量。

由图可得闭环增益 M ：

$$M = \frac{y}{r} = \frac{G}{1+GH} \quad (1-2)$$



(a) 单回路负反馈系统

(b) 考虑噪声的单回路负反馈系统

图 1-6 单回路反馈系统示意图

代入敏感度定义式(1-1) 得

$$S_G^M = \frac{\partial M/M}{\partial G/G} = \frac{\partial M}{\partial G} \times \frac{G}{M} = \frac{\partial M}{\partial G} (1+GH) = (1+GH) \frac{\partial}{\partial G} \left(\frac{G}{1+GH} \right) = \frac{1}{1+GH} \quad (1-3)$$

式(1-3) 表明：如果 GH 是正常数，则可以在系统保持稳定的情况下，通过增加 GH 来减少敏感度函数的幅值。

比较：开环系统的开环增益是 $G_0 = GH$ ，代入敏感度函数，有

$$S_{G_0}^{G_0} = \frac{\partial G_0 / G_0}{\partial G / G} = \frac{\partial G_0}{\partial G} \times \frac{G}{G_0} = \frac{1}{H} \times \frac{\partial}{\partial G} (GH) = 1 \quad (1-4)$$

从式(1-4)知,系统增益 G_0 与 G 的变化一一对应,即开环系统对内部参数的变化敏感。一般地,反馈系统增益对于参数变化的敏感度取决于参数所在位置。请读者自己推导闭环反馈系统对反馈回路增益 H 变化的敏感度,可比较如图 1-6(b) 中所示的外加干扰(或噪声) f 对输出 y 的影响。

如果没有反馈回路,即在开环情况下,输出 y 与干扰 f 的关系为

$$y = G_2 f \quad (1-5)$$

在有闭环负反馈的情况下

$$y = \frac{G_2}{1 + G_1 G_2 H} f \quad (1-6)$$

当 $1 + G_1 G_2 H > 1$ 并且系统保持稳定时,包含在输出中的干扰噪声将会被削弱。所以,如果干扰是加在如图所示的环内位置,则干扰对输出的影响较小,可以较好地被抑制;但若是处于反馈回路的环外,则反馈对其没有影响。在绝大多数控制系统设计时,都应该考虑将主要干扰包含在控制回路以内。

由于开环控制针对预先确定的输入输出关系设计,对无法预计的输入将无能为力,在系统输入量能预先知道并且可以忽略其他干扰时,可以采用开环控制。在系统的组成上,显然,闭环控制系统的组成要比开环控制系统复杂,其成本通常比开环控制高。从设计的观点出发,开环控制系统容易设计与实现,而在设计闭环控制系统时,稳定性问题必须考虑。

仍然考虑图 1-6(a) 所示的单回路负反馈系统。设原开环系统稳定,在式(1-2)给出的系统闭环增益 M 中,如果分母 $GH = -1$,则意味着对于任意的有限输入,系统的输出均为无穷大,闭环系统将不稳定。可见,如果控制系统设计得不好,反馈可能会使原来稳定的开环系统变得不稳定。需要指出,为简化讨论,这里仅考虑了静态情况。一般情况下, $GH = -1$ 并非是使系统不稳定的惟一条件。有关稳定性的问题,在本课程的后续章节中还会详细讨论。然而,采用反馈的好处之一在于可以使原本不稳定的开环系统变得稳定。假设原图所示系统因为 $GH = -1$ 而变得不稳定,可以再引入另一个反馈增益为 F 的负反馈回路,如图 1-7 所示。整个系统的输入输出关系 Φ 即为

$$\Phi = \frac{\frac{G}{1+GH}}{1 + \frac{G}{1+GH}F} = \frac{G}{1+GH+GF} \quad (1-7)$$

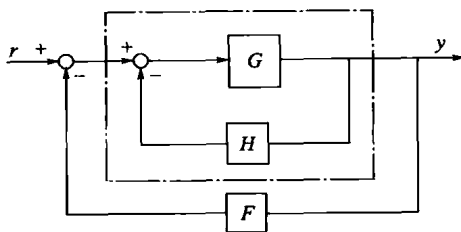


图 1-7 多回路反馈系统示意图

从式(1-7)可看出,虽然因为 $GH = -1$ 而使得反馈系统的内环不稳定,但通过适当选择外环反馈增益 F 仍然可以使整个闭环系统稳定。所以,概括地说,反馈可以改善系统的稳定性,也会因为不恰当的使用而损害系统的稳定性。

工程上通常将开环控制与闭环控制结合起来使用,以获得满意的综合系统性能,这种方

式称为复合控制的方式。复合控制的实质是在闭环控制回路的基础上，增加一个输入信号的通道，对该信号实行补偿，以达到更精确的控制效果。例如，为了补偿可测量的主要扰动输入对系统被控量的影响，常常在反馈回路上再附加一个前向通道，一旦测量到该扰动有变化，在它还没有影响到输出时，即采取相应的控制作用。

【例 1-5】 假设例 1-1 中的主要干扰来自可以检测的进水量。由于进水量与水槽液位之间可以找到对应的关系，所以可设计如图 1-8 所示的控制系统。其中的补偿装置按不变性原理设计，一旦检测到进水量发生变化，预先设计好的补偿装置将立即产生一个控制量施加到系统上，以抵消该扰动引起系统输出的变化。如进水量减少，补偿装置则根据具体减少的量“命令”出水流量相应减少，以使液位保持恒定。这类不等到扰动影响到输出发生变化后再采取控制作用的开环控制系统称为前馈控制系统。

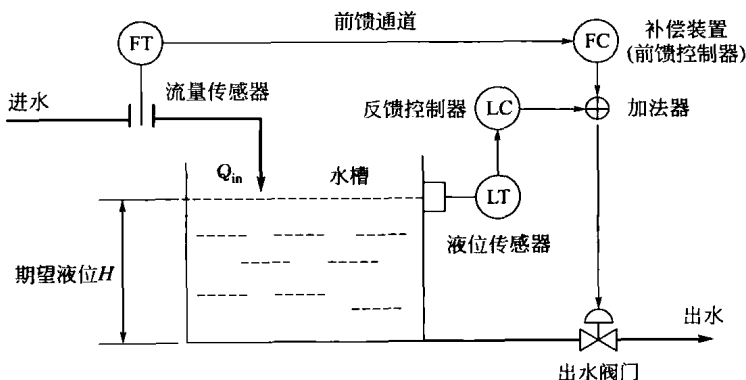


图 1-8 前馈+反馈液位自动控制系统示意图

与图 1-8 相对应的方块图如图 1-9 所示。画方块图的一般原则是，将输入置于图的最左边，按照汉字的书写规律，从输入端开始按信息流向画出系统中的每个环节，直到输出为止。通常，反馈通道放在图的下方，前馈通道放在图的上方。特别注意的是，方块图中的箭头方向是信息流方向，与物料流方向可能不一致。考虑将此例中的控制量改为进水量，扰动为出水量，请读者画出系统带控制点的工艺流程图与方块图。

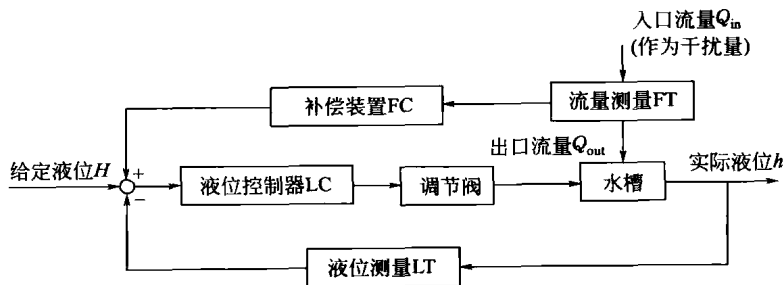


图 1-9 前馈+反馈液位自动控制系统原理方框图

前馈控制系统与反馈控制系统的最大区别在于，反馈控制是“事后”控制，即输出与给定值之间出现偏差之后，由偏差驱动控制器产生控制作用以消除偏差；而前馈控制是“事前”控制，即一旦检测到设计控制系统时考虑的扰动出现，控制作用就随之产生，以抵消该扰动对系统输出的影响。明显看出，前馈控制是开环控制系统，只对特定的扰动输入产生控制作用，不能克服其他扰动对输出的影响。如图 1-8 所示的既有前馈控制又有反馈控制的系统称为前馈+反馈控制系统，在工程上得到广泛的应用。