



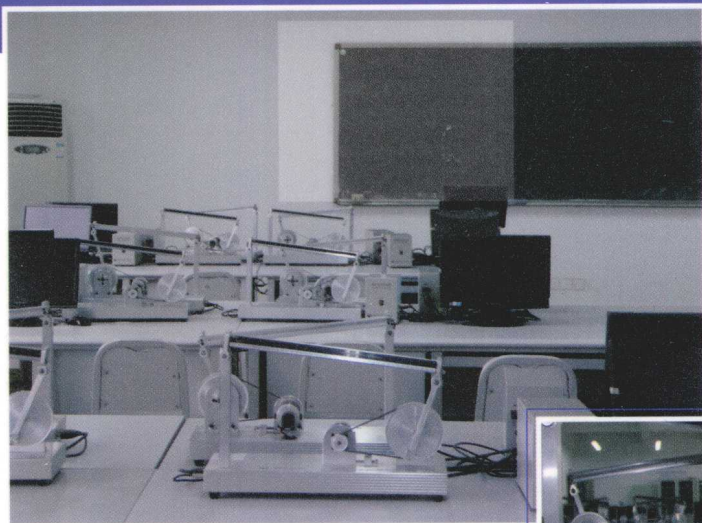
高等学校应用型特色规划教材

ZIDONG KONGZHI YUANLI



自动控制原理

宋乐鹏 主 编
胡 皓 副主编



免费赠送电子课件



从读者角度出发,力求每一步推导、每一道习题、每一段讲解都有理有据,通俗易懂,重点突出。

- ◎ 各章都编入了控制系统计算机仿真的内容,便于读者在学习理论的同时,掌握一种高效便利的仿真工具,减轻读者烦琐的计算负担。
- ◎ 书中加入了一些数学基础知识,便于读者理解本书的相关内容。

清华大学出版社

高等学校应用型特色规划教材

自动控制原理

宋乐鹏 主 编

胡 皓 副主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书共分为8章,主要内容包括自动控制的一般概念与数学基础、连续控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、控制系统的频率法校正、非线性系统、采样控制系统,其中第1章加入了自动控制原理相应的数学知识,以方便读者理解本书内容。此外,部分章节中还介绍了MATLAB在控制系统分析与设计中的应用。

本书可作为高等工科院校自动化、电气自动化、测控技术与仪器、环境工程、石油工程及计算机等专业的教材,也可供其他专业的师生和工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/宋乐鹏主编;胡皓副主编. —北京:清华大学出版社,2012
(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 978-7-302-28278-5

I. ①自… II. ①宋… 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(2012)第 040621 号

责任编辑:李春明 郑期彤

封面设计:杨玉兰

责任校对:周剑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 刷 者:北京世知印务有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:23

字 数:553千字

版 次:2012年8月第1版

印 次:2012年8月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:42.00元

产品编号:038734-01

前 言

自动控制技术已经广泛应用在各行各业，极大地提高了劳动生产率和产品质量，改善了工人的劳动条件，丰富和提高了人民的生活水平，为国民经济和国防建设发挥着越来越重要的作用。特别是我国神舟系列载人航天飞船的研制成功，极大地鼓舞了国人，提升了我国在国际社会中的地位。自动控制理论按其发展阶段不同，可以分为古典控制理论、现代控制理论以及大系统理论和智能控制理论。其中古典控制理论是学习现代控制理论的基础，也是工科院校普遍开设的一门专业基础理论课。本书共分为 8 章，主要包括自动控制的一般概念与数学基础、连续控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、控制系统的频率法校正、非线性系统和采样控制系统等内容，通过本书的学习，学生可掌握分析和设计自动控制系统的基本理论和方法，为学习相关专业知识打下良好的理论基础。

编者根据多年教学经验，从读者角度出发，力求每一步推导、每一道习题、每一段讲解都有理有据，通俗易懂，重点突出。MATLAB 计算仿真已经成为工科学生必须具备的一种应用工具，因此，本书在部分章节的最后一节中编入了控制系统计算机仿真的内容，使读者在学习理论的同时，能够掌握一种高效便利的仿真工具，减轻读者烦琐的计算负担。为了便于读者理解本书的相关内容，第 1 章中加入了一些数学基础知识，如拉普拉斯变换和傅里叶变换等。

本书由重庆科技学院宋乐鹏担任主编，宝鸡文理学院胡皓担任副主编。其中，第 1 章、第 3 章、第 6 章由宋乐鹏编写；第 2 章、第 7 章、第 8 章由胡皓编写；第 4 章、第 5 章由宜宾学院的郭靖杨编写。全书由宋乐鹏统稿、定稿。本书由重庆科技学院的唐德东教授主审。在编写过程中，重庆科技学院的姜泓教授提出了许多宝贵的意见，宝鸡文理学院任鸟飞和重庆科技学院的董志明、张小云、苏盈盈、兰杨参加了本书的审核工作，在此表示感谢！

本书在编写过程中学习和汲取了其他教材的部分内容，在此向原教材的各位作者表示诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 自动控制的一般概念与数学基础.....1	2.1.2 数学模型的特点37
概述.....1	2.1.3 建立数学模型的方法38
1.1 自动控制系统的基本原理.....2	2.2 控制系统的动态微分方程.....39
1.2 自动控制的基本方式.....5	2.2.1 列写动态微分方程的一般方法39
1.2.1 开环控制系统.....5	2.2.2 非线性元件微分方程的线性化42
1.2.2 闭环控制系统.....6	2.3 控制系统的传递函数.....45
1.2.3 复合控制系统.....8	2.3.1 传递函数的概念45
1.3 对控制系统性能的基本要求.....9	2.3.2 典型环节的传递函数及其动态响应47
1.4 自动控制系统的类型.....11	2.3.3 传递函数的求取51
1.4.1 按系统的特性分类.....11	2.4 动态结构图及其等效变换.....54
1.4.2 按信号的传递是否连续分类.....11	2.4.1 动态结构图的概念55
1.4.3 按给定量的特征分类.....11	2.4.2 结构图的等效变换58
1.5 复数及其表示.....12	2.5 信号流图.....64
1.5.1 复数及其代数运算.....12	2.5.1 信号流图的定义64
1.5.2 复数的表示.....13	2.5.2 系统的信号流图65
1.5.3 复数的乘幂与方根.....16	2.5.3 信号流图的定义和术语67
1.6 拉普拉斯变换及其应用.....17	2.5.4 信号流图的性质67
1.6.1 拉氏变换的概念.....17	2.5.5 信号流图的梅逊公式68
1.6.2 拉氏变换的性质.....19	2.6 MATLAB 简介及数学模型的表示.....70
1.6.3 拉氏反变换.....23	2.6.1 MATLAB 简介.....70
1.6.4 拉氏变换应用举例.....28	2.6.2 传递函数的表示70
1.7 傅里叶变换.....31	2.6.3 传递函数的特征根及零极点图71
1.7.1 傅里叶积分.....31	2.6.4 控制系统的方框图模型73
1.7.2 傅里叶变换的概念.....32	2.6.5 控制系统的零极点模型74
1.7.3 傅里叶变换的性质.....33	小结.....75
小结.....34	习题.....75
习题.....34	
第 2 章 连续控制系统的数学模型.....36	第 3 章 时域分析法.....81
概述.....36	概述.....81
2.1 控制系统数学模型的概念.....37	3.1 控制系统的典型输入信号.....81
2.1.1 数学模型的类型.....37	3.1.1 阶跃函数信号82

3.1.2 斜坡函数信号.....	82
3.1.3 抛物线函数信号.....	82
3.1.4 脉冲函数信号.....	83
3.1.5 正弦函数信号.....	83
3.2 线性系统的稳定性分析.....	84
3.2.1 稳定的基本概念.....	84
3.2.2 线性系统稳定的充分 必要条件.....	85
3.3 代数稳定判据.....	87
3.3.1 劳斯判据.....	88
3.3.2 用代数稳定判据分析 系统时的应用.....	91
3.4 稳态误差分析与计算.....	94
3.4.1 误差及稳态误差的定义.....	94
3.4.2 给定输入下的稳态误差.....	97
3.4.3 扰动的稳态误差.....	101
3.5 复合控制系统的稳态误差.....	103
3.5.1 引入给定补偿.....	103
3.5.2 引入扰动补偿.....	104
3.6 控制系统的动态响应及 其性能指标.....	104
3.7 一阶系统的动态响应分析.....	106
3.7.1 典型一阶系统的单位 阶跃响应.....	106
3.7.2 典型一阶系统的其他响应.....	108
3.8 二阶系统的动态响应分析.....	109
3.8.1 典型二阶系统的单位 阶跃响应.....	109
3.8.2 二阶系统性能指标与 系统参数的关系.....	112
3.9 二阶系统性能的改善.....	116
3.9.1 引入输出量的速度负 反馈控制.....	116
3.9.2 引入误差信号的比例 微分控制.....	117
3.10 高阶系统的动态分析.....	119
3.11 控制系统时域分析的 MATLAB 应用.....	120
3.11.1 线性系统的 MATLAB 表示.....	120

3.11.2 单位阶跃响应.....	120
3.11.3 单位脉冲响应.....	121
3.11.4 控制系统稳定性判定.....	121
小结.....	122
习题.....	123

第 4 章 根轨迹分析法..... 130

概述.....	130
4.1 自动控制系统的根轨迹.....	130
4.1.1 根轨迹的概念.....	130
4.1.2 根轨迹方程.....	132
4.2 绘制根轨迹的基本法则.....	134
4.3 广义根轨迹.....	147
4.3.1 参量根轨迹.....	147
4.3.2 多参数根轨迹簇.....	150
4.3.3 正反馈系统的根轨迹.....	151
4.4 控制系统的根轨迹分析.....	154
4.4.1 根轨迹确定系统的 闭环极点.....	154
4.4.2 根轨迹确定系统的 动态特性.....	155
4.4.3 开环零点对根轨迹的影响.....	156
4.4.4 开环极点对根轨迹的影响.....	158
4.5 利用 MATLAB 绘制根轨迹.....	159
小结.....	160
习题.....	161

第 5 章 频率特性法..... 165

概述.....	165
5.1 频率特性.....	165
5.1.1 频率特性的概念.....	165
5.1.2 频率特性的求取.....	167
5.1.3 频率特性的几种表示方法.....	169
5.2 典型环节的频率特性.....	172
5.2.1 比例环节.....	172
5.2.2 积分环节.....	172
5.2.3 微分环节.....	173
5.2.4 惯性环节.....	174
5.2.5 一阶微分环节.....	175

5.2.6	振荡环节.....	176
5.2.7	二阶微分环节.....	178
5.2.8	延迟环节.....	178
5.2.9	非最小相位环节.....	179
5.3	系统开环频率特性.....	180
5.3.1	系统开环幅相频率 特性曲线.....	180
5.3.2	系统开环对数频率 特性曲线.....	182
5.4	奈奎斯特稳定判据.....	186
5.4.1	映射定理.....	186
5.4.2	Nyquist 轨迹及其映射.....	187
5.4.3	Nyquist 稳定判据一.....	188
5.4.4	Nyquist 稳定判据二.....	189
5.4.5	Nyquist 对数稳定判据.....	193
5.5	控制系统的相对稳定性.....	194
5.5.1	增益裕度.....	195
5.5.2	相角裕度.....	196
5.5.3	用幅相频率特性曲线分析 系统稳定性.....	197
5.6	系统时域性能和开环频率 特性的关系.....	198
5.6.1	系统开环频率特性的 三个频段.....	198
5.6.2	低频段特性与系统的 稳态精度.....	198
5.6.3	中频段特性与系统的 暂态性能.....	199
5.6.4	高频段特性对系统性 能的影响.....	200
5.7	根据系统闭环频率特性分析 系统的动态性能.....	201
5.7.1	闭环频率特性.....	201
5.7.2	闭环频率指标.....	201
5.7.3	闭环频域指标与时域指标 的关系.....	202
5.7.4	闭环频域指标和开环指标 的关系.....	204

5.8	利用 MATLAB 绘制系统频率 特性曲线.....	205
	小结.....	211
	习题.....	212

第 6 章 控制系统的频率法校正.....217

	概述.....	217
6.1	控制系统的一般概念.....	217
6.1.1	校正的概念.....	217
6.1.2	校正的方式.....	218
6.1.3	控制系统的性能指标.....	219
6.2	常用的校正装置及其特性.....	219
6.2.1	相位超前校正装置.....	219
6.2.2	相位滞后校正装置.....	222
6.2.3	相位滞后-超前校正装置.....	225
6.3	频率法串联校正.....	227
6.3.1	串联相位超前校正.....	228
6.3.2	串联相位滞后校正.....	234
6.3.3	串联相位滞后-超前校正.....	241
6.4	期望对数频率特性法校正.....	242
6.4.1	基本概念.....	242
6.4.2	典型期望对数幅频特性.....	243
6.5	反馈校正.....	248
6.6	MATLAB 在控制系统校正中的 应用.....	251
6.6.1	MATLAB 函数在控制系统 校正中的应用.....	251
6.6.2	基于 Simulink 的系统校正.....	253
	小结.....	255
	习题.....	256

第 7 章 非线性系统.....261

	概述.....	261
7.1	非线性系统概述.....	262
7.1.1	常见非线性特性.....	262
7.1.2	非线性系统的特点.....	265
7.2	描述函数法.....	268
7.2.1	描述函数的概念.....	268
7.2.2	描述函数的求法.....	270



7.2.3	用描述函数研究非线性系统的稳定性和自振.....	276
7.2.4	描述函数法的精确度.....	285
7.3	改善非线性系统性能的措施及非线性特性的利用.....	286
7.3.1	改善非线性特性的措施.....	286
7.3.2	非线性特性的应用.....	287
7.4	基于 Simulink 的非线性系统分析.....	291
小结		298
习题		298
第 8 章	采样控制系统	303
概述		303
8.1	离散系统的定义及常用术语.....	304
8.1.1	离散系统的几个定义.....	304
8.1.2	离散系统的几个常用术语.....	305
8.1.3	离散系统的特点.....	305
8.2	采样过程和采样信号的复现.....	306
8.3	Z 变换	311
8.3.1	Z 变换的定义	311
8.3.2	Z 变换方法	312
8.3.3	Z 变换的性质	314
8.3.4	Z 反变换	317
8.4	离散系统的数学模型.....	319
8.4.1	差分方程.....	319
8.4.2	脉冲传递函数的定义.....	323
8.4.3	采样系统的结构图	324
8.4.4	闭环系统的传递函数	328
8.5	采样系统的稳定性分析.....	330
8.5.1	采样系统的稳定条件	330
8.5.2	劳斯稳定判据	332
8.6	采样系统的稳态误差.....	334
8.6.1	用终值定理计算稳态误差	334
8.6.2	用静态误差系数计算稳态误差	336
8.7	暂态响应与传递函数零极点分布的关系.....	339
8.8	采样系统的校正.....	342
8.8.1	数字控制器的脉冲传递函数	342
8.8.2	最少拍系统的脉冲传递函数	344
8.9	MATLAB 在离散系统中的应用.....	347
8.9.1	连续系统的离散化	347
8.9.2	求采样系统的响应	348
小结		350
习题		350
附录		354
参考文献		357

第 1 章 自动控制的一般概念与数学基础

【教学目标】

通过本章的学习,熟悉自动控制的定义、自动控制系统的组成和相关的常用术语,了解自动控制的发展史和自动控制系统的分类,重点掌握开环控制和闭环控制系统的特点,并在此基础上全面掌握自动控制系统的基本要求,为后续进行控制系统分析与设计打下基础。

“数学基础”部分要求掌握拉普拉斯变换的定义,拉普拉斯变换的性质与计算,以及一些函数的拉普拉斯变换及逆变换;了解傅里叶变换的定义,傅里叶变换的性质与计算,以及一些简单函数的傅里叶变换及逆变换。

概 述

自动控制系统的早期应用可追溯到两千年前古埃及的水钟控制和中国汉代的指南车控制。

1788 年英国科学家瓦特(James Watt)为内燃机设计的飞锤调速器可以认为是最早的反馈控制系统的工程应用。由于当时应用的调整器出现振荡现象,所以产生了麦克斯韦(James Clerk Maxwell)对微分方程系统的稳定性的理论研究,后来又出现了劳斯(E. J. Routh)和赫尔维茨(A. Hurwitz)等人的稳定性研究成果。控制器的设计问题是由米诺尔斯基(N. Minorsky)等人在 1922 年开始研究的,其研究成果可以看成是现在广泛应用的 PID 控制器的前身。而在 1942 年,齐格勒(John G. Ziegler)和尼柯尔斯(N. B. Nichols)提出了调节 PID 控制器参数的方法,其方法对当今的 PID 整定仍有影响。

系统的频域分析技术是在奈奎斯特(Harry Nyquist)、波特(H. W. Bode)等人早期的关于通信学科的频域研究工作的基础上建立起来的。哈里斯(H. Harris)于 1942 年提出了传递函数的概念,首先将通信学科的频域技术移植到了控制领域,构成了控制系统频域分析技术的理论基础。伊万斯(W. R. Evens)等在 1946 年提出的线性反馈系统的根轨迹分析技术是那个时代的另一个里程碑。

苏联科学家庞特里亚金(L. S. Pontryagin)于 1956 年提出极大值原理,同年美国数学家贝尔曼(R. Bellman)创立动态规划;1959 年美国数学家卡尔曼(R. E. Kalman)发表了“最优滤波与线性最优调节器”理论,提出著名的“卡尔曼滤波器”;1960 年卡尔曼又提出能控性和能观性的概念,他们的理论当时统称为“现代控制理论”。在那个时期以后,控制理论研究中出现了线性二次型最优调节器、最优状态观测器及线性二次型(LQG)问题的研究,并在后来出现了引入回路传输恢复技术的 LQG 控制器。

20 世纪 60 年代出现的各种空间技术在很大程度上依赖于最优控制问题的解决,例如使运载火箭达到燃料最少、送入轨道时间最短等。但工业控制中,现代控制理论却遇到很多问题:①直接用最优控制方法设计的控制器过于复杂,不便于应用;②对象的数学模型



很难精确得到,而现代控制理论所用的各种分析、综合方法都是以对象数学模型为基础的,数学模型的精确程度对控制系统性能影响很大。

为了解决此问题,一些以自适应控制、鲁棒控制、预测控制、模糊控制、大系统理论为代表的“先进控制”理论逐渐成为研究的热点。

自适应控制是针对对象特性的变化、漂移和环境干扰对系统的影响提出的,它的基本思想是通过在线辨识使这种影响逐渐降低,以至消除。各种自适应系统大体可归纳为两类:模型参考自适应控制和自校正控制。

鲁棒控制是 20 世纪 70 年代针对模型的不确定性问题提出来的,其基本思想是在设计中设法使系统对模型误差扰动不敏感,使系统不但能保持稳定,品质也保持在工程所能接受的范围内。模型的不确定性包括模型不精确、降阶近似、非线性的线性化、参数和特性随时间变化或漂移等。系统的鲁棒性是它可否用于工业现场的关键。

预测控制不要求对模型的结构有先验知识,不必通过复杂的辨识过程便可设计控制系统,它吸取了现代控制理论中的优化思想,使用不断的在线有限优化取代传统的最优控制,优化过程中利用实测信息不断反馈校正,克服不稳定性的影响,增强控制的鲁棒性。

模糊控制源于 1965 年查德(L. A. Zadeh)教授创立的模糊集理论,它的基本思想是,把人类专家对特定的被控对象或过程的控制策略总结成一系列以“IF(条件)THEN(作用)”表示的控制规则,通过模糊推理得到控制作用集,作用于被控对象。

大系统理论是用控制与信息的观点,研究各种大系统的结构方案、总体设计中的分解方法和协调等问题的技术基础理论。

从自动控制科学的发展可以看到,自动控制理论和技术的发展已经向多学科和多领域的综合应用方向发展。20 世纪 70 年代中期以来,自动控制理论的概念和方法已经应用于交通管理、生态控制、生命科学、经济科学、社会系统等领域。自动控制理论的建立和发展不仅推动了自动控制技术的发展,也推动了其他邻近科学和技术的发展,特别为我国两弹一星和航空航天事业的发展做出了不可磨灭的贡献。

1.1 自动控制系统的基本原理

在工业生产中,为了提高产品质量及生产率,需要对生产设备和工艺过程进行自动控制。所谓自动控制,就是在人不直接参与的情况下,依靠外加装置或设备(称为控制装置或控制器),使机械、设备或生产过程(称为被控对象)的某个工作状态或参数(称为被控量)自动地按照预定的规律运行,或使某个被控制的参数按预定要求变化。例如,无人驾驶飞机按照预定的飞行航线自动升降和飞行,先进的导弹发射和制导系统自动将导弹击中敌方目标,这些都是典型的自动控制技术应用的结果。如果用一个数学表达式来表示自动控制系统的控制任务,应使被控对象的被控物理量满足

$$\text{被控量 } c(t) = \text{给定量 } r(t)$$

下面以锅炉液位控制系统为例,说明自动控制的原理。锅炉液位人工控制系统原理图如图 1.1 所示。

锅炉是电厂和化工厂里常用的生产蒸汽的设备,为了保证锅炉正常运行,需要维持锅炉液位为正常标准值。锅炉液位过低,容易烧干锅炉而发生严重事故;锅炉液位过高,容

易使蒸汽带水并有溢出危险。因此,必须严格控制锅炉液位的高度。

控制的任务是保持锅炉液位恒定(或锅炉液位按一定的要求变化)。锅炉液位的高低受到给水压力变化或蒸汽负荷变化的影响,而主要受调节阀出水量的控制。改变调节阀的开度,可以控制锅炉液位的高低。如果采用人工操作,则要靠人眼观察实际锅炉液位和所要求的锅炉液位差,用手不断调节阀门,以保持锅炉液位高度恒定(或温度按要求变化)。

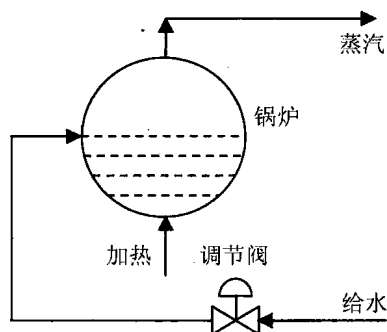


图 1.1 锅炉液位人工控制系统原理图

锅炉液位人工控制系统的工作情况可以分解为如图 1.2 所示的功能方框图,图中表示了各部分的功能及相互关系。如果采用控制装置来代替人工操作,自动完成控制过程,即可得到如图 1.3 所示的锅炉液位自动控制系统。

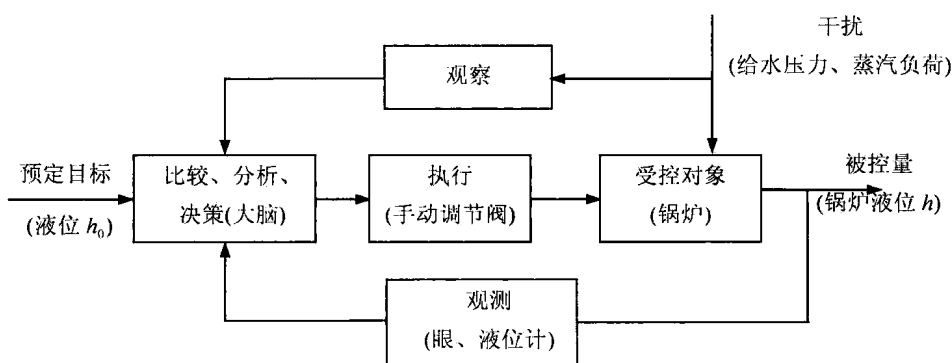


图 1.2 锅炉液位人工控制系统功能方框图

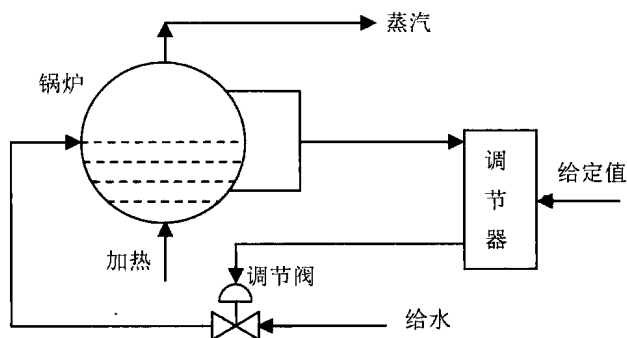


图 1.3 锅炉液位自动控制系统



压差变送器将液位的高低转化成一定的信号输至调节器, 调节器是锅炉液位自动控制系统中的控制器, 在调节器内将测量液位与给定液位比较, 得到偏差值, 然后根据偏差信号情况按一定的控制规律发出相应的输出信号去推动调节阀动作。具体调节过程为: 压差变送器将液位的高低转化为 u_f , 并与给定值 u_g 作比较, 将液位差变换成电压差, 如所测锅炉液位(h)不等于给定液位(h_0), 即 $h \neq h_0$, 则有电压差 $\Delta u = u_g - u_f$, 它通过调节器去带动阀门, 启用调节阀以调节锅炉液位。若 $h > h_0$, 则 $u_f > u_g$, Δu 为负, 使调节器反向调节关小阀门, 降低锅炉液位; 反之则开大阀门。直到 $h = h_0$, $\Delta u = 0$ 时, 调节器停止工作。图 1.4 所示为锅炉液位自动控制系统功能方框图, 其中 $\otimes$ 为比较元件(又称比较器)。在比较元件中, 参考输入信号(给定值 u_g)与反馈信号 u_f 进行比较, 其差值输出即为偏差信号 Δu , 偏差信号就是调节器的输入。

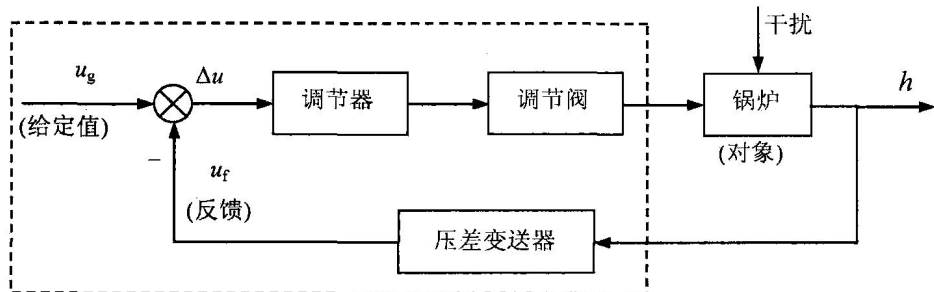


图 1.4 锅炉液位自动控制系统功能方框图

由上例可见, 一个控制系统包括如下几部分。

1. 控制对象与控制装置

控制系统即指控制对象与控制装置这两大部分的组合。其中控制对象是指工作对象, 它可以是一个工作机械或生产过程, 如上例中的锅炉。控制装置则是为完成规定控制任务而按一定方式连接的各种元器件及设备, 如图 1.4 中点画线框内的部分。控制装置的功能一般为检测、比较、运算调节、放大、执行等。

2. 参与控制的信号

1) 输出量

输出量即为系统的被控量, 在上例中为锅炉液位高度。

2) 输入量

输入量是指影响被控量的外来信号, 通常分为以下两种。

(1) 给定量。它是人们期望系统输出按照这种输入的要求而变化的控制量。故一般又称给定输入或简称输入。上例中的调节器的给定值 u_g 即是给定输入。

(2) 扰动量。它是一种人们所不希望的、影响系统输出使之偏离了给定作用的控制量。上例中给水压力变化或蒸汽负荷变化都属于扰动。

3) 反馈量

反馈量是从输出量中取得、直接或经过某种变换后返回到输入端参与系统控制的一种信号。反馈环节可以是系统中的某个局部环节, 反馈量也可以是某个局部环节的输出的

反馈信号。上例是将检测的实际锅炉液位高度转换成电压 u_f 后, 与给定锅炉液位高度 u_g 比较, 用所得的偏差来进行控制。采用锅炉液位反馈, 反馈量变换成了一个电压信号。

3. 信号传递通道

信号传递通道包括主通道(又称前向通道)和反馈通道。

1.2 自动控制的基本方式

按照自控系统的结构及控制方式, 可将其分为三种: 开环控制、闭环控制、复合控制。其中, 闭环控制是自动控制系统最基本的控制方式, 也是应用最广泛的一种控制方式。近几十年来, 以现代数学为基础, 引入电子计算机的新的控制方式也有很大发展, 如最优控制、自适应控制、滑模控制、模糊控制、神经网络控制、鲁棒控制等。

1.2.1 开环控制系统

开环控制方式是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程, 按这种方式组成的系统称为开环控制系统, 其特点是系统的输出量不会对系统的输入量产生影响。开环控制系统可以按给定量控制方式组成, 也可以按扰动控制方式组成。

以直流电动机开环控制调速系统为例, 其原理图及方框图如图 1.5 所示。

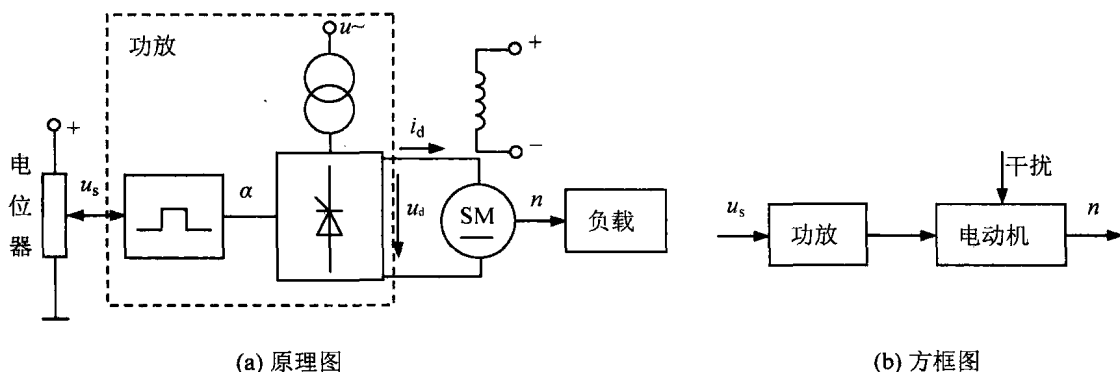


图 1.5 直流电动机开环控制调速系统

被控量是直流电动机的速度, 电动机为被控制对象, 给定输入为电压 u_s , 输出为转速 n 。由于电动机的励磁磁通恒定, 当改变 u_s 时, 晶闸管的相控角 α 及整流电压 u_d 改变, 使电动机的速度 $n = (u_d - i_d R) / C_e$ 随之变化, 实现了电动机的调速。若给定不变, 则速度不变。但电网电压的波动、负载电流的变化都将引起速度的变化, 这些便是系统的扰动量。这种控制方式为改变输入电压 u_s 直接控制输出转速 n , 而输出对系统的控制过程没有直接的影响, 故称为开环控制。从控制系统的结构上来看, 只有从输入端到输出端、从左到右的信号传递通道(该通道称为前向通道或正向通道)。这种开环控制系统的特点是系统结构简单, 但控制精度不高, 抗干扰能力差, 只用于对控制性能要求不高的场合。

如果扰动因素已知, 并能直接或间接地检测出来, 那么也可以利用扰动信号来产生一

种补偿作用，以抵消扰动的影响，这种利用扰动进行控制的方式称为扰动控制或顺馈控制。例如，在一般的直流速度控制系统中，转速常常随负载的增加而下降，且转速的下降是由于电枢回路的电压降引起的。如果我们设法将负载引起的电流变化测量出来，并按其大小产生一个附加的控制作用，用于补偿由它引起的转速下降，这样就可以构成按扰动控制方式组成的开环控制系统，图 1.6 所示为一种简单的直流电动机扰动控制调速系统的原理图及方框图。

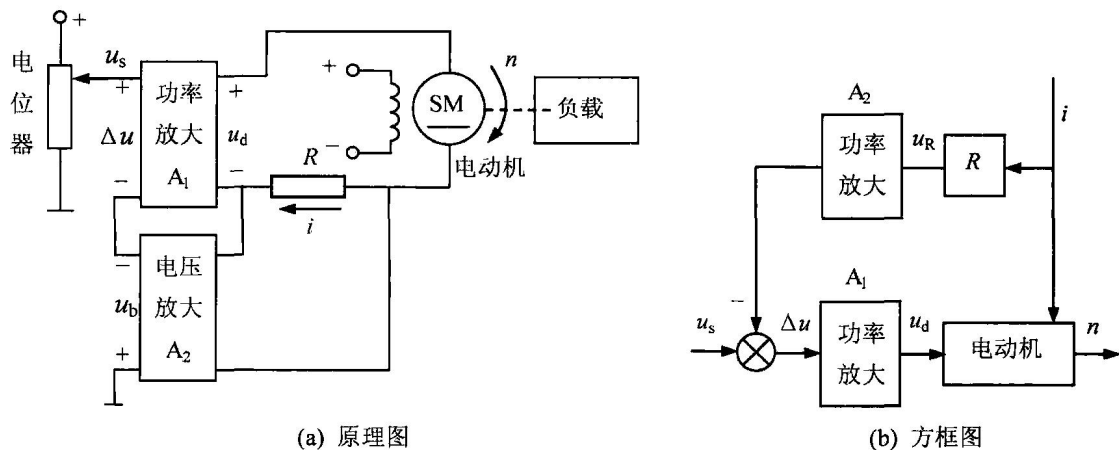


图 1.6 直流电动机扰动控制调速系统

图中电动机为控制对象， n 为被控量， u_s 为给定输入，负载电流是一种扰动量。当负载增大($i \uparrow$)转速下降($n \downarrow$)时，电阻 R 上的压降增大($u_R \uparrow$)，它加强了输入信号，使 $u_d \uparrow$ 补偿 $n \downarrow$ 。这种系统在结构上输出量 n 对系统的控制作用没有任何影响， u_b 来自于扰动量，因此它仍属于开环控制系统，它具有控制转速的特点。

1.2.2 闭环控制系统

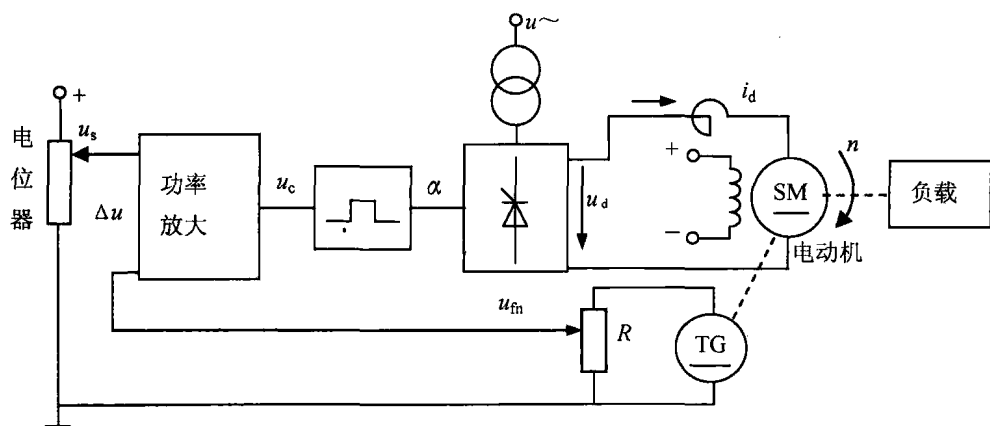
1. 闭环控制系统的原理

闭环控制方式是按照偏差进行控制的，其特点是不论什么原因使被控量偏离期望而出现偏差时，必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，使被控量与期望值趋于一致。按闭环控制方式组成的闭环控制系统，具有抑制任何内外扰动对被控量产生影响的能力，有较高的控制精度。这种系统使用元件多，结构复杂，系统分析和设计比较麻烦，尽管如此，闭环控制系统仍是一种重要的并被广泛应用的控制系统，是自动控制理论主要研究的控制系统。

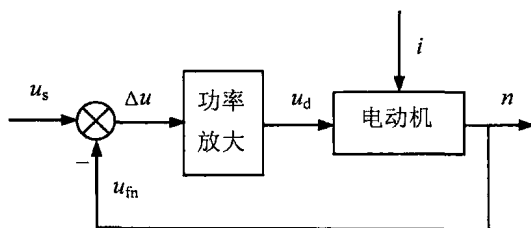
直流电动机闭环控制调速系统如图 1.7 所示，其中图 1.7(a)所示为原理图，图 1.7(b)所示为方框图。

电动机为控制对象，输出 n 为被控量，速度给定 u_s 为输入量。系统的输出量参与控制，直接影响系统的控制过程，这种系统称为闭环控制系统。测速发电机 TG 将输出转速 n 转换成电压 u_{fn} ，并返回到输入端，形成一个闭环。系统的调速原理同开环控制系统，但它采用了差值 $\Delta u = u_s - u_{fn}$ 来控制。例如在某给定量 u_s 下电动机工作在某一相应速度 n 时，若负载

增大($I_d \uparrow$), 引起转速降低($n \downarrow$), 则测速发电机的输出也相应减小($u_{fn} \downarrow$), 使比较环节的出差值增大($\Delta u \uparrow$), 通过放大, 控制电动机转速升高, 来补偿由扰动(负载)引起的转速下降, 而保持系统转速的恒定。



(a) 原理图



(b) 方框图

图 1.7 直流电动机闭环控制调速系统

闭环系统的特点如下。

(1) 信号传递存在两类通道：一类通过放大器、晶闸管去控制电动机速度，称为主通道；另一类将输出信号返回输入端，称为反馈通道。

(2) 系统是采用差值进行控制的，差值所产生的控制作用是使系统向减小或消除偏差值的方向变化，故有利于克服惯性和干扰而维持给定的控制，常称这种控制为偏差控制。具有以上两个特点的系统称为反馈控制系统。

(3) 对于一个反馈控制系统而言，无论取哪种物理量反馈，包围在它反馈环内的各种干扰量所引起的输出量变化的偏差值都能得到减小或消除，而使系统具有较好的动、静态精度。如转速反馈系统能维持转速恒定，电压反馈系统能保持电压恒定。

2. 闭环控制系统的基本组成

闭环控制系统是由各种结构不同的系统部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看，一个控制系统必然包含被控对象和控制装置两个部分。控制装置由具有一定职能的各种基本元件组成。在不同系统中，结构完全不同的元件都可以具有相同的职能。组成系统的元件按职能分类主要有以下几种。



(1) 测量元件：其职能是测量被控制的物理量，如果这个物理量是非电量，一般再转换为电量。

(2) 给定元件：其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量(即参变量)。

(3) 比较元件：把测量元件检测的被控量的实际值与给定元件给出的参变量进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置和电桥等。

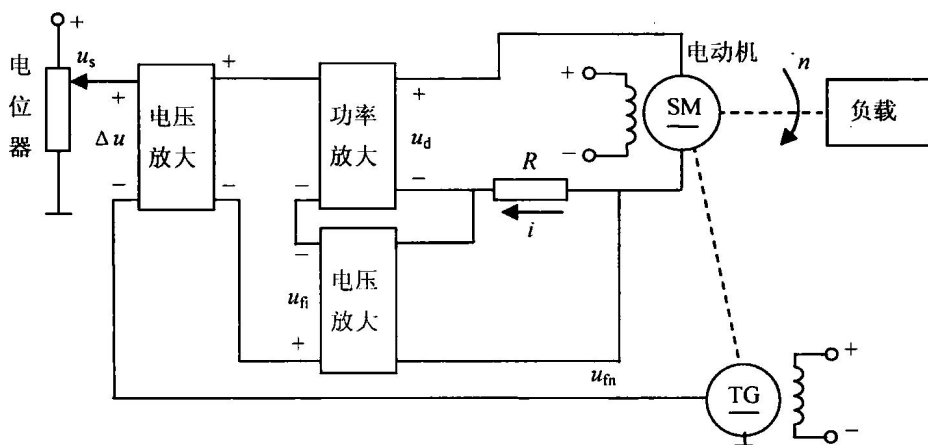
(4) 放大元件：将比较元件给出的偏差进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。如电压偏差信号可用电子管、晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器和功率放大器加以放大。

(5) 执行元件：直接推动被控对象，使被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

(6) 校正元件：也称补偿元件，它是结构或参数便于调整的元件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络；复杂的则用电子计算机。

1.2.3 复合控制系统

扰动控制方式在技术上比反馈控制方式简单，但它只适用于扰动可测量的场合，并且一个补偿装置只能补偿一种扰动因素，对其余扰动不起补偿作用。因此，比较合理的一种控制方式是把反馈控制与扰动控制结合起来，对于主要扰动采用适当的补偿装置实现扰动控制；同时，再组成反馈控制系统实现偏差控制，以消除其余扰动产生的偏差。这样，系统的主要扰动已经被消除，反馈控制系统就比较好设计，控制效果也就会更好。这种将闭环控制系统和开环控制系统结合在一起构成的开环-闭环相结合的控制系统，称为复合控制系统。图 1.8 所示为偏差控制和扰动控制相结合的直流电动机复合控制调速系统。图 1.9 所示为偏差控制和顺馈控制相结合的复合控制系统的方框图。这类系统兼有闭环及开环的优点，控制精度高，控制作用快，但结构也较为复杂。



(a) 原理图

图 1.8 直流电动机偏差控制和扰动控制调速系统

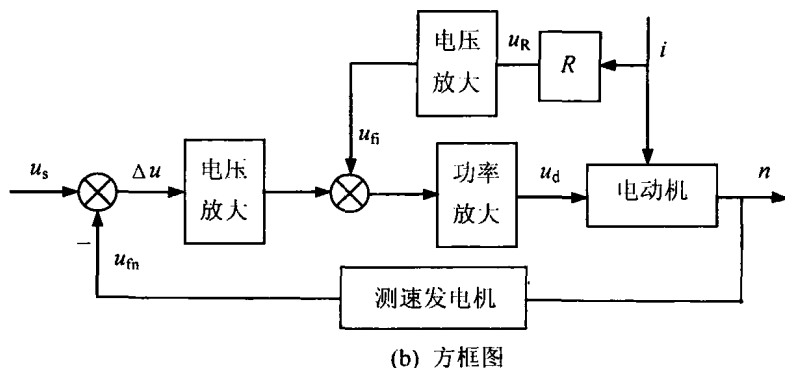


图 1.8 直流电动机偏差控制和扰动控制调速系统(续)

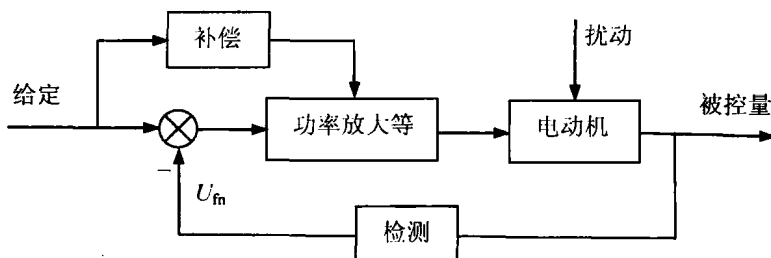


图 1.9 直流电动机偏差控制和反馈控制调速系统

1.3 对控制系统性能的基本要求

当自动控制系统受到各种干扰或按照给定值改变时,被控量就会发生变化,偏离给定值。通过系统自身自动调节,经过一定的过渡过程,被控量又恢复到原来的稳定值或达到一个新的稳定状态。这时系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态,被控量在变化中的过渡过程称为动态过程;而被控量处于平衡状态(达到平衡状态的 95%或 98%以上)时称为静态或稳态。

自动控制系统最基本的要求是必须稳定,也就是要求控制系统的被控量的稳态误差(系统稳定时希望值与实际值之差)为零或在一定的允许范围之内,一般工程上要求系统的稳态误差在被控量额定值的 2%或 5%以内。

自动控制系统除了要满足稳态性能之外,还应该满足系统动态过程的要求。在介绍自动控制系统动态过程之前,有必要介绍自动控制系统的动态过程有哪几种类型。一般自动控制系统被控量变化的动态过程有以下几种。

(1) 单调上升过程。被控量 $c(t)$ 单调上升达到新的平衡状态(新的稳态值),如图 1.10(a)所示。

(2) 衰减振荡过程。被控量 $c(t)$ 的动态过程是一个振荡衰减的过程,幅度不断在衰减,到过渡过程结束时,被控量达到新的稳态值,如图 1.10(b)所示。