

高等教育“十二五”精品规划教材

自动控制原理

田思庆 李艳辉 主编



化学工业出版社

高等教育“十二五”精品规划教材

自动控制原理

田思庆 李艳辉 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地介绍了自动控制理论的基本内容,着重于基本概念、基本理论和基本分析方法,内容包括控制系统概论、控制系统的数学模型、线性系统的时域分析法、线性系统的根轨迹法、线性系统的频域分析法、线性系统的综合与校正、非线性系统的分析、线性离散系统的分析、Matlab 语言与自动控制系统设计。

本书可以作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、计算机、电子信息工程、通信工程、生物医学工程、机械工程、能源与动力工程等专业的教材或教学参考书,还可供从事控制工程的科技人员自学与参考。本书电子教案可在 www.cipedu.com.cn 下载。



图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/田思庆,李艳辉主编. —北京:
化学工业出版社, 2015. 2

高等教育“十二五”精品规划教材

ISBN 978-7-122-22505-4

I. ①自… II. ①田…②李… 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 (2014) 第 288649 号

责任编辑: 马 波 李玉晖

责任校对: 宋 玮

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: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 23¼ 字数 565 千字 2015 年 7 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: 42.00 元

版权所有 违者必究

前言

自动控制技术以自动控制理论为基础和支撑,是生产过程中的关键技术,已广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防建设等各个领域,在科学技术现代化发展的过程中,正在发挥着越来越重要的作用。

自动控制原理是自动化学科的重要理论基础,是自动化专业的核心课程,由于自动控制技术在各个行业的广泛渗透与应用,其控制理论已逐渐成为很多学科的专业基础课程,且愈来愈占有重要的位置。

本书介绍的经典控制理论是整个自动控制理论的基础,也是进一步学习和研究其他控制理论的“先行课程”。全书共分9章,其中前6章是线性定常连续系统的分析与综合,第7章讲述了非线性系统的分析方法,第8章讲述了线性离散系统的基本理论,第9章是关于 Matlab 控制软件的应用简介和实例。

本书在讲述方法上简明扼要、通俗易懂,具有条理清晰,层次分明等特点,在内容安排上注意各专业的通用性和便于不同教学时数的取舍。为了帮助读者掌握和运用所学理论,每章均备有大量的例题和习题。本书电子教案可在 [www. cipedu. com. cn](http://www.cipedu.com.cn) 下载。

本书由田思庆,李艳辉担任主编。其中王春红编写第1章和第9章,于长兴编写第2章,田思庆编写第3章,王淑玉编写第4章,王鹏编写第5章,梁秋艳编写第6章,李艳辉编写第7章,刘天编写第8章。全书由田思庆统稿,周经国、梁春英主审。

本书在编写过程中参考了该领域的优秀教材和著作,笔者向收录于参考文献中的一些专家、教授表示真诚的谢意。由于笔者水平有限,书中难免有不当之处,恳请使用本教材的教师、学生提出宝贵意见。有需要电子教案、习题解答等教学资源的教师可与笔者联系,邮件请寄 [tian_siqing@163. com](mailto:tian_siqing@163.com)。

编 者

2015 年 4 月

1

第1章

自动控制系统概论

1

1.1	自动控制系统	1
1.2	开环控制和闭环控制	3
1.2.1	开环控制	3
1.2.2	闭环控制	4
1.3	控制系统的分类	5
1.3.1	线性系统和非线性系统	6
1.3.2	定常系统与时变系统	6
1.3.3	连续系统与离散系统	7
1.3.4	恒值系统、随动系统和程序系统	7
1.3.5	单输入单输出系统与多输入多输出系统	8
1.3.6	确定性系统与不确定性系统	8
1.3.7	集中参数系统与分布参数系统	8
1.3.8	几种先进控制理论介绍	9
1.4	控制系统的组成及对控制系统性能的要求	9
1.4.1	控制系统的组成	9
1.4.2	对控制系统的性能要求	10
1.5	控制理论发展简史	11
1.6	本课程的特点与学习方法	14
	小结	14
	术语和概念	14
	控制与电气学科世界著名学者——麦克斯韦	15
	习题	15

2

第2章

控制系统的数学模型

18

2.1	控制系统数学模型概述	18
2.1.1	数学模型的定义	18
2.1.2	数学模型的简化性与分析准确性	19

2.1.3	数学模型的分类	19
2.1.4	控制系统的建模方法	20
2.2	控制系统的时域数学模型	21
2.2.1	控制系统微分方程的建立	21
2.2.2	非线性微分方程的线性化	24
2.3	数学基础——拉普拉斯变换	28
2.3.1	拉普拉斯变换的定义	28
2.3.2	典型函数的拉氏变换	28
2.3.3	拉氏变换的基本性质	32
2.3.4	拉氏反变换	33
2.3.5	应用拉氏变换解线性微分方程	35
2.4	控制系统的复域数学模型	36
2.4.1	传递函数	36
2.4.2	典型环节的传递函数	39
2.4.3	电气网络的运算阻抗与传递函数	42
2.5	控制系统的方框图和传递函数	44
2.5.1	方框图的概念	44
2.5.2	方框图的基本变换	45
2.5.3	反馈系统的传递函数	47
2.5.4	方框图的化简及其传递函数	50
2.6	信号流图与梅森增益公式	54
2.6.1	信号流图	55
2.6.2	梅森增益公式	56
2.7	相似原理	59
	小结	61
	术语和概念	62
	控制与电气学科世界著名学者——维纳	62
	习题	63

3

第3章

线性系统的时域分析法

67

3.1	典型输入信号及系统性能指标	67
3.1.1	典型输入信号	68
3.1.2	系统时域性能指标	70
3.2	一阶系统的时域分析	71
3.2.1	一阶系统的数学模型	71
3.2.2	一阶系统的单位阶跃响应	72
3.2.3	一阶系统的单位脉冲响应	73
3.2.4	一阶系统的单位斜坡响应	74

3.2.5 三种响应之间的关系	75
3.3 二阶系统的时域分析	75
3.3.1 二阶系统的数学模型	75
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	77
3.3.3 欠阻尼二阶系统的动态性能指标	82
3.3.4 二阶系统的单位脉冲响应	89
3.3.5 二阶系统的单位斜坡响应	90
3.3.6 非零初始条件下的二阶系统响应	92
3.4 高阶系统的时域分析	93
3.4.1 三阶系统的单位阶跃响应	93
3.4.2 高阶系统的单位阶跃响应	95
3.4.3 闭环主导极点	97
3.5 改善控制系统动态性能的方法	99
3.5.1 速度反馈	99
3.5.2 添加零点对系统暂态特性的影响	101
3.6 线性控制系统的稳定性分析	105
3.6.1 稳定的概念	105
3.6.2 线性系统稳定的充要条件	106
3.6.3 劳斯稳定判据	107
3.6.4 赫尔维茨稳定判据	111
3.7 线性控制系统的稳态性能分析	112
3.7.1 控制系统误差与稳态误差	113
3.7.2 控制系统型别	114
3.7.3 终值定理法求稳态误差	115
3.7.4 静态误差系数法求稳态误差	117
3.7.5 扰动信号作用下的稳态误差	121
3.7.6 动态误差系数法求动态误差	122
3.8 减小或消除稳态误差的方法	124
3.8.1 增大开环放大倍数	125
3.8.2 增加串联积分环节	125
3.8.3 复合控制	125
小结	127
术语和概念	127
控制与电气学科世界著名学者——李雅普诺夫	128
习题	128

4

第4章

线性系统的根轨迹法

132

4.1 控制系统的根轨迹	132
--------------------	-----

4.2	绘制 180° 根轨迹的基本规则	135
4.3	广义根轨迹	147
4.3.1	参数根轨迹	147
4.3.2	0° 根轨迹	149
4.4	闭环零、极点分布对系统性能的影响	153
4.4.1	系统闭环零、极点分布与阶跃响应的关系	153
4.4.2	根轨迹的稳定性和动态性能分析	154
4.4.3	利用主导极点估算系统的性能指标	157
4.5	添加开环零、极点对根轨迹的影响	158
4.5.1	添加开环零点对根轨迹的影响	158
4.5.2	添加开环极点对根轨迹的影响	160
4.5.3	添加开环偶极子对根轨迹的影响	161
	小结	163
	术语和概念	163
	控制与电气学科世界著名学者——伊文思	164
	习题	164

5

第5章

线性系统的频域分析法

166

5.1	频率特性的基本概念和表示方法	167
5.1.1	频率特性的定义	167
5.1.2	频率特性的几何表示	169
5.2	系统开环奈奎斯特图的绘制	170
5.2.1	典型环节	170
5.2.2	最小相位环节奈奎斯特图的绘制	171
5.2.3	开环奈奎斯特图的绘制	173
5.3	系统开环对数频率特性图的绘制	176
5.3.1	典型环节的对数频率特性图	176
5.3.2	系统开环对数频率特性图的绘制	181
5.3.3	系统的类型与对数幅频特性曲线低频渐近线斜率的对应关系	184
5.4	最小相位系统	185
5.5	传递函数的频域实验确定	186
5.6	奈奎斯特稳定判据	188
5.6.1	幅角定理	188
5.6.2	奈奎斯特稳定性判据	192
5.6.3	对数频率稳定判据	196
5.7	控制系统的相对稳定性	198
5.7.1	相角裕度	198
5.7.2	幅值裕度	199

5.8 系统闭环频率特性与时域性能指标的关系	201
5.8.1 闭环频率特性与频域性能指标	201
5.8.2 二阶系统闭环频域指标与时域指标的关系	203
5.9 系统开环频率特性与时域性能指标的关系	204
5.9.1 开环幅频特性“三频段”与闭环系统性能的关系	204
5.9.2 二阶系统开环频率特性与时域性能指标的关系	207
5.9.3 高阶系统频率特性与时域性能指标的关系	209
小结	209
术语和概念	210
控制与电气学科世界著名学者——奈奎斯特	211
习题	211

6

第6章

线性系统的综合与校正

215

6.1 概述	215
6.1.1 系统校正的一般概念	215
6.1.2 校正方式	216
6.1.3 校正方法	217
6.2 基本控制规律	219
6.2.1 比例 (P) 控制规律	219
6.2.2 比例-微分 (PD) 控制规律	220
6.2.3 积分 (I) 控制规律	221
6.2.4 比例-积分 (PI) 控制规律	221
6.2.5 比例-积分-微分 (PID) 控制规律	222
6.3 串联校正	223
6.3.1 串联超前校正 (PD)	223
6.3.2 串联滞后校正 (PI)	228
6.3.3 串联滞后-超前校正 (PID)	232
6.3.4 串联校正方式比较	236
6.4 串联校正综合法	236
6.4.1 期望频率特性法	237
6.4.2 按最佳典型系统校正方法	239
6.5 反馈校正	243
6.5.1 反馈校正功能	243
6.5.2 用频率法分析反馈校正系统	245
小结	251
术语和概念	251
控制与电气学科世界著名学者——伯德	252
习题	252

7.1 非线性系统概述	255
7.1.1 典型的非线性特性	255
7.1.2 非线性系统的特点	258
7.2 描述函数法	260
7.2.1 描述函数法的基本概念	260
7.2.2 典型非线性特性的描述函数	261
7.2.3 组合非线性特性的描述函数	265
7.2.4 非线性系统的描述函数分析	269
7.3 相平面分析法	277
7.3.1 相平面和相轨迹	277
7.3.2 极限环	279
7.3.3 线性系统的相轨迹	281
7.3.4 相轨迹的绘制方法	285
7.3.5 由相平面图求时间解	289
7.3.6 非线性系统相平面分区线性化分析方法	291
小结	296
术语和概念	297
控制与电气学科世界著名学者——钱学森	297
习题	297

8.1 概述	301
8.2 采样过程和采样定理	302
8.2.1 采样过程	302
8.2.2 采样定理	304
8.2.3 采样周期的选取	305
8.3 信号的复现	306
8.4 差分方程	307
8.4.1 差分方程的定义	307
8.4.2 差分方程的解法	308
8.5 Z变换	308
8.5.1 Z变换的定义	309
8.5.2 Z变换的方法	309
8.5.3 Z变换的性质	311

8.5.4	Z反变换	313
8.5.5	用Z变换法求解差分方程	315
8.6	脉冲传递函数	315
8.6.1	脉冲传递函数的定义	316
8.6.2	开环系统脉冲传递函数	317
8.6.3	闭环系统脉冲传递函数	319
8.7	采样系统的性能分析	322
8.7.1	稳定性分析	322
8.7.2	稳态性能分析	328
8.7.3	动态性能分析	331
8.7.4	离散系统极点分布与动态响应的关系	332
8.7.5	采样系统的频域分析	334
	小结	336
	术语和概念	337
	控制与电气学科世界著名学者——香农	337
	习题	338

9

第9章

Matlab语言与自动控制系统设计

340

9.1	Matlab 语言简介	340
9.1.1	Matlab 的数值运算基础	340
9.1.2	矩阵及矩阵函数	341
9.1.3	Matlab 的绘图功能	343
9.2	自动控制系统设计	345
9.2.1	时域分析命令	345
9.2.2	频率域命令	348
9.2.3	根轨迹法命令	351
9.2.4	传递函数的常用命令	353
9.2.5	控制系统分析举例	355
	小结	361
	参考文献	362

第1章

自动控制系统概论

在现代科学技术的众多领域中，自动控制技术起着越来越重要的作用，目前，自动控制技术已广泛应用于工业、农业、国防和科学技术等领域。可以这样说，一个国家在自动控制方面水平的高低是衡量它的生产技术和科学技术先进与否的一项重要标志。

自动控制通常被称为“控制工程”，是一门理论与工程实践相结合的技术学科，学科的理论为“自动控制理论”。自动控制技术的广泛应用，不仅使生产过程实现了自动化，极大地提高了劳动生产率和产品质量，改善了劳动条件，并且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活方面都起着极为重要的作用。从自动控制发展的现状与前景上看，它是极活跃、极富生命力的。控制理论不仅是一门重要的学科，而且也是科学方法论之一。本课程是一门非常重要的技术基础课，主要讲述自动控制的基本理论和分析、设计控制系统的基本方法。根据自动控制理论发展的不同阶段可分为经典控制理论和现代控制理论。随着控制理论的不断扩展和更新，经典控制理论和现代控制理论越来越趋于融合。

本章从工程实例出发，介绍自动控制的基本概念、基本方式和自动控制系统的分类，重点是自动控制系统的基本组成原理，核心是反馈控制，同时简单介绍了控制理论的发展历史。

【本章重点】

- 1) 了解自动控制系统的工作原理、分类和特点；
- 2) 掌握自动控制系统的组成，根据工作原理画出系统的方框图；
- 3) 明确对自动控制系统的基本要求，熟悉自动控制系统的基本控制方式；
- 4) 了解自动控制理论发展概况。

1.1 自动控制系统

所谓自动控制，就是指在没有人直接操作的情况下，通过控制器使一个装置或过程（统称为控制对象）自动地按照给定的规律运行，使被控物理量或保持恒定或按一定的规律变化，其本质在于无人干预。系统是指按照某些规律结合在一起的物体（元部件）的

组合，它们互相作用、互相依存，并能完成一定的任务。为实现某一控制目标所需要的所有物理部件的有机组合体称为自动控制系统。例如，机械行业的热处理炉温度控制系统、数控机床按照预定程序自动切削工件的自动控制系统、火电厂锅炉蒸汽温度和压力的自动控制系统等。

反馈是控制理论中一个极其重要的概念，它是控制理论的基础。一个系统的输出信号直接地或经过中间变换后全部或部分地返回输入系统的过程，就称为反馈。根据反馈信号对输入信号的加强或减弱，反馈分为正反馈和负反馈。正反馈是由输出端返回来的物理量加强输入量的作用，系统不会稳定，可能产生自激振荡。负反馈由输出端返回来的物理量减弱输入量的作用，负反馈可以改善系统的动态特性，控制和减少干扰信号的影响。只有负反馈系统才具有自动调节能力。自动控制理论主要的研究对象一般都是闭环负反馈控制系统。

自动控制系统的种类较多，被控制的物理量有各种各样，如温度、压力、液位、电压、转速、位移和力等。组成控制系统的元部件虽然有一定的差异，但是组成系统的结构却基本相同。下面通过两个自动控制系统的实例，来讲述自动控制系统的工作过程。

锅炉是电厂和一些企业常见的生产蒸汽的设备。为了保证锅炉正常运行，需要维持锅炉汽包液位在正常值范围内。锅炉液位过低，易烧干锅而发生严重事故；锅炉液位过高，则易使蒸汽带水并有溢出危险。因此，必须通过调节器严格控制锅炉液位的高低，以保证锅炉正常地运行。图 1-1 为锅炉汽包液位控制系统示意图。

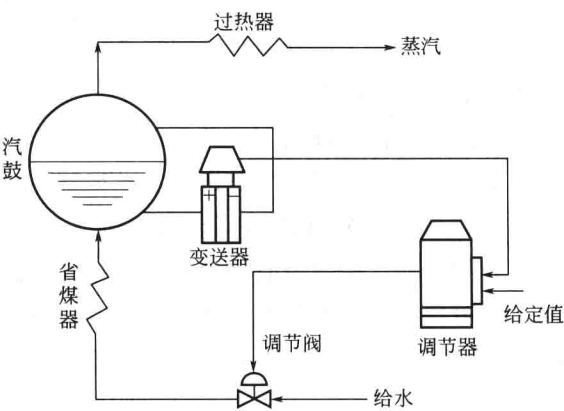


图 1-1 锅炉汽包液位控制系统示意图

当蒸汽的蒸发量与锅炉进水量相等时，液位保持为正常给定值。当锅炉的给水量不变，而蒸汽负荷突然增加或减少时，液位就会下降或上升；或者，当蒸汽负荷不变，而给水管道的压力发生变化时，引起锅炉汽包液位发生变化。不论出现哪种情况，只要实际液位高度与正常给定液位之间出现偏差，调节器就应立即进行控制，去开大或关小给水阀门，以使锅炉汽包液位保持在给定值上。

图 1-2 是锅炉汽包液位控制系统方框图。图中，锅炉为被控对象，其输出量为被控参数汽包液位；作用于锅炉上的扰动量是指给水压力或蒸汽负荷的变化；差压变送器（测量变送器）用来测量锅炉液位，并转换为一定的信号输至调节器；调节器根据测量的实际液位与给定液位进行比较，得出偏差值，根据偏差值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，以保证锅炉汽包液位控制在恒定给定值上。

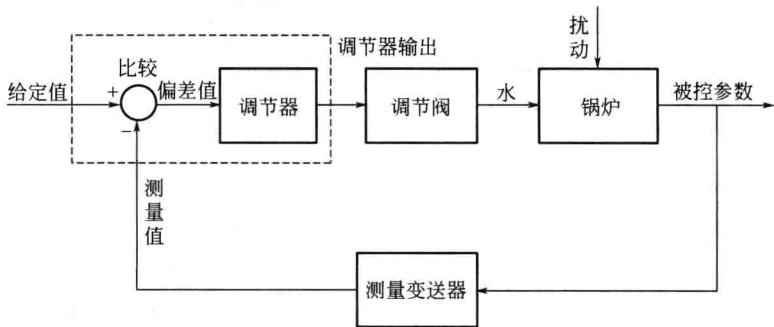


图 1-2 锅炉汽包液位控制系统方框图

下面再举一个电阻炉温度控制系统的例子，其系统如图 1-3 所示。炉温 T_c 的给定量由电位器滑动端位置所对应的电压值 U_g 给出，炉温的实际值由热电偶检测出来，并转换成电压 U_f ，再把 U_f 反馈到系统的输入端与给定电压 U_g 相比较（通过二者极性反接实现）。由于扰动（例如电源电压波动或加热物件多少等）影响，炉温偏离了给定值，其偏差电压经过放大，控制可逆伺服电动机 M，带动自耦变压器的滑动端，改变电压 u_c ，使炉温保持在给定温度值上。例如，当炉温 T_c 下降时，系统的自动调节过程可表示为

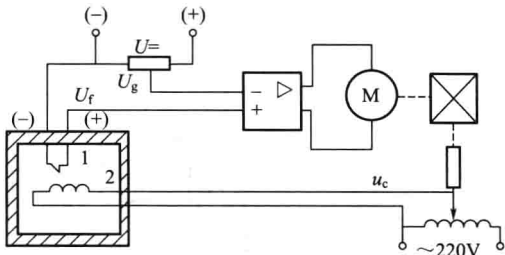


图 1-3 电阻炉温度控制系统
1—热电偶；2—加热器

1.2 开环控制和闭环控制

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。

1.2.1 开环控制

如果系统的输出量与输入量间不存在反馈通道，这种控制方式称为开环控制。在开环控制系统中，不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较。图 1-4 为开环控制系统方框图。由图可见，这种控制系统的特点是结构简单、所用的元器件少、成本低，系统一般也容易稳定。然而，由于开环控制系统没有对它的被控制量进行检测，所以当系统受到干扰作用后，被控制量一旦偏离了原有的平衡状态，系统就无法消除或减少误差，使被控制量稳定在给定值上，这是开环控制系统的一个最大缺点。正是这个缺点，大大限制了这种系统的应用范围。然而，对于控制精度不高的一些简单控制，开环控制也有其广泛的应用。例如，洗衣机就是开环控制系统的例子。浸湿、洗涤和漂清过程，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，即衣服清洁程度进行测量。

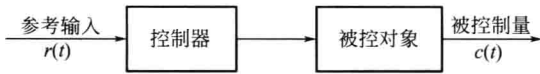


图 1-4 开环控制系统方框图

图 1-5(a) 为一个开环直流调速系统，图 1-5(b) 为它的方框图。图中 U_g 为给定的参考输入，它经触发器和晶闸管整流装置转变为相应直流电压 U_d ，并供电给直流电动机，使其产生一个 U_g 所期望的转速 n 。但是，当电动机的负载、交流电网的电压以及电动机的励磁稍有变化时，电动机的转速就会随之而变化，不能再维持 U_g 所期望的转速。

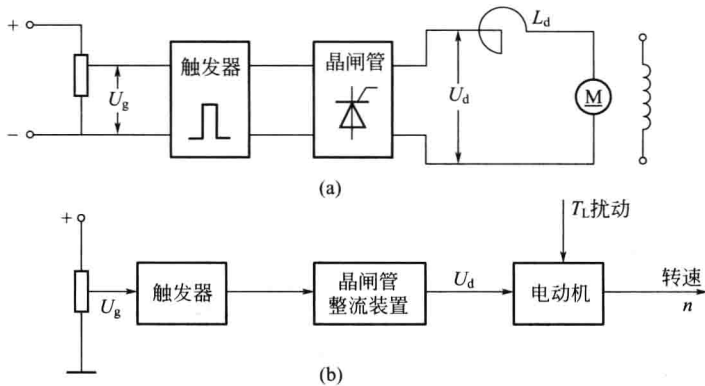


图 1-5 开环直流调速系统

图 1-6 为数控机床中广泛应用的定位系统框图。这也是一个开环控制系统，工作台的位移是该系统的被控制量，它是跟随着控制信号（控制脉冲）而变化的。显然这个系统没有抗扰动的功能。



图 1-6 开环定位控制系统

如果系统的给定输入与被控制量之间的关系固定，且内部参数或外来扰动的变化都较小，或这些扰动因数可以事先确定并能给予补偿，则采用开环控制也能得到较为满意的控制效果。

1.2.2 闭环控制

若把系统的被控制量反馈到它的输入端，并与参考输入相比较，这种控制方式称为闭环控制。由于这种控制系统中存在着将被控制量经反馈环节到比较点的反馈通道，故闭环控制又称反馈控制，它是按偏差进行控制的。图 1-1 和图 1-3 所示的系统，都是闭环控制系统。这些系统的特点是：连续不断地对被控制量进行检测，把所测得的值与参考输入作减法运算，求得的偏差信号经控制器变换运算和放大器放大后，驱动执行元件，以使被控制量能完全按照参考输入的要求去变化。这种系统如果受到来自系统内部和外部干扰信号的作用时，

通过闭环控制的作用，能自动地消除或削弱干扰信号对被控制量的影响。由于闭环控制系统具有良好的抗扰动功能，因而它在控制工程中得到了广泛的应用。

闭环控制是在开环控制基础上演变而来的。如果把图 1-5 所示的开环直流调速系统改接为图 1-7 所示的闭环系统则它就具有自动抗扰动的功能。例如当电动机的负载转矩 T_L 增大时，流经电动机电枢中的电流便相应地增大，电枢电阻上的压降也变大，从而导致电动机转速的降低；而转速的降低使测速发电机的输出电压 U_{fn} 减小，误差电压 ΔU 便相应地增大，经放大器放大后，使触发脉冲前移，晶闸管整流装置的输出电压 U_d 增大，从而补偿了由于负载转矩 T_L 的增大或电网电压 $u_{\sim}$ 的减小而造成的电动机转速的下降，使电动机的转速近似地保持不变。上述的调节过程表示为

$$\left. \begin{matrix} T_L \uparrow \\ u_{\sim} \downarrow \end{matrix} \right\} \rightarrow n \downarrow \rightarrow U_{fn} \downarrow \rightarrow \Delta U = (U_g - U_{fn}) \uparrow \rightarrow U_k \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

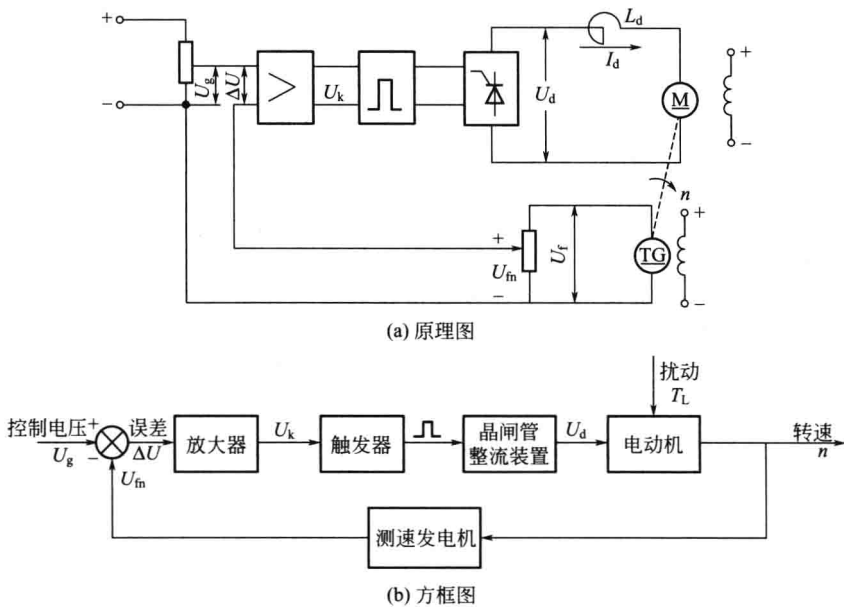


图 1-7 闭环直流调速系统

复合控制是由开环和闭环传递路径组成的混合控制系统，它兼有开环控制和闭环控制的特点。复合控制将在 3.8 中介绍。

1.3 控制系统的分类

自动控制系统有许多分类方法。根据系统元件特性是否线性而分为线性系统和非线性系统；根据系统参数是否随时间变化而分为时变系统和定常系统；根据系统内信号传递方式的不同而分为连续系统和离散系统；根据系统所使用的元件的不同而分为机电控制系统、液压控制系统、气动控制系统和生物控制系统等；根据参考输入信号，即被控制量所遵循的运动规律不同，自动控制系统又可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统等。此外，根据被控制量是否存在稳态误差还可以分为有差系统 and 无差系统。为了更好地了解自动控制

系统的特点，下面介绍其中比较重要的几种控制系统分类。

1.3.1 线性系统和非线性系统

按描述系统运动方程分类，自动控制系统分为线性系统和非线性系统。

(1) 线性系统 线性系统是由线性元件组成的系统，其性能和状态可以用线性微分方程来描述，线性系统的特点是具有叠加性和齐次性，在数学上比较容易实现和处理。

叠加性：若干个输入信号同时作用于系统所产生的响应等于各个输入信号单独作用于系统所产生响应的代数和。

齐次性：当输入信号同时倍乘一常数时，那么响应也倍乘同一常数。

$$\begin{aligned} &a_n(t)\frac{d^nc(t)}{dt^n}+a_{n-1}(t)\frac{d^{n-1}c(t)}{dt^{n-1}}+\cdots a_1(t)\frac{dc(t)}{dt}+a_0(t)c(t) \\ &=b_m(t)\frac{d^mr(t)}{dt^m}+b_{m-1}(t)\frac{d^{m-1}r(t)}{dt^{m-1}}+\cdots b_1(t)\frac{dr(t)}{dt}+b_0(t)r(t) \end{aligned} \tag{1-1}$$

式中， $r(t)$ 为系统的输入量， $c(t)$ 为系统的输出量。

在该方程式中，输出量 $c(t)$ 及其各阶导数都是一次的，并且各系数与输入量无关。线性微分方程的各项系数为常数时，称为线性定常系统。这是一种简单而重要的系统，关于这种系统已有较为成熟的研究成果和分析设计的方法。

(2) 非线性系统 在构成系统的元部件当中，只要有一个输入输出特性是非线性的，则称为非线性系统。非线性系统要用非线性方程描述其输入输出关系，非线性方程的特点是系数与变量有关，或者方程中含有变量及导数的高次幂或乘积项。例如

$$\frac{d^2c(t)}{dt^2}+c(t)\frac{dc(t)}{dt}+c^2(t)=r(t)$$

典型的非线性特性有继电器特性（如图 1-8a）、饱和特性（如图 1-8b）和不灵敏区特性（如图 1-8c）等。

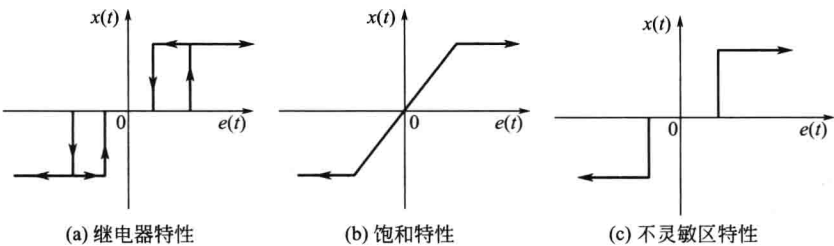


图 1-8 典型非线性环节特性

对于非线性控制系统的理论研究远不如线性系统那样完整，一般只能满足于近似的定性描述和数值计算。本书第 7 章将介绍有关非线性理论的描述函数法和相平面分析法等基本内容。

1.3.2 定常系统与时变系统

按照模型中参数是否随时间变化来分类，自动控制系统分为定常系统和时变系统。

如果控制系统的结构和参数在运行过程中不随时间变化，则称为定常系统或者时不变系统，否则，称为时变系统。