



工业和信息化普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Automatic Control Theory

自动控制原理

韩敏 潘学军 席剑辉 主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Automatic Control Theory

自动控制原理

韩敏 潘学军 席剑辉 主编

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

自动控制原理 / 韩敏, 潘学军, 席剑辉主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2015. 2
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-38142-2

I. ①自… II. ①韩… ②潘… ③席… 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(2015)第015168号

内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了经典控制理论的基本内容和自动控制系统的分析、校正与综合设计方法。全书共分 8 章, 主要包括自动控制系统的基本概念, 控制系统的数学描述, 用于分析控制系统的时域法、根轨迹法和频域法, 线性控制系统的分析与校正, 非线性控制系统的描述函数法和相平面法, 线性离散控制系统的分析方法等。每章最后一节为相应的 Matlab 仿真实例。各章末给出本章小结和关键术语的英文词汇, 并配有适当的习题。附录中给出习题的参考答案。

本书可作为普通高等院校自动化类、电气信息类、电子信息类和计算机类等相关专业的教材, 也可作为科技人员的参考用书。

◆ 主 编 韩 敏 潘学军 席剑辉

责任编辑 张孟玮

执行编辑 税梦玲

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 20.5

2015 年 2 月第 1 版

字数: 492 千字

2015 年 2 月北京第 1 次印刷

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010) 81055256 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

随着工业生产和科学技术的发展,自动控制系统已广泛应用于工农业生产、交通运输、国防现代化和航空航天等许多领域,具有极其重要的作用。自动控制原理专门用于研究有关自动控制系统中的基本概念、基本原理和基本方法,是从事自动化相关工作的广大工程技术人员和科学工作者必不可少的理论基础课之一。

在科学技术的发展进程中,自动控制原理在内容上也有了很大的扩展和更新,一般把20世纪40年代建立起来的主要处理单输入、单输出定常反馈系统的理论称为经典控制理论,而把60年代以来建立起来的处理多变量和时变系统的理论称为现代控制理论。本书对经典控制理论的基本内容做了较为详细的介绍,旨在阐明自动控制系统分析与综合的基本方法。

全书共分8章,前6章涉及线性定常连续系统的理论,具体包括控制系统的一般概念、描述控制系统的数学模型,用于系统分析的时域法、根轨迹法、频域法以及综合校正方法。第7章属于非线性控制理论,介绍分析非线性系统的描述函数法和相平面法。第8章讲述线性定常离散控制系统理论,介绍 Z 变换理论和描述离散系统的数学模型,分析离散系统的瞬态和稳态性能,设计数字控制器等。

结合自动控制原理基本概念的讲解,本书在各章最后一节给出相应内容的Matlab仿真实例,应用Matlab控制系统工具箱进行计算机辅助教学,帮助学生加深对基本原理的理解。同时,各章配有适量的习题,以配合课堂教学,便于学生准确理解有关概念,掌握解题方法和技巧,检验计算结果。每章之后的小结中给出了相应内容要点和关键术语英文注释,帮助学生掌握专业术语的英文词汇,符合高等教育的国际化需求,这是本书的一个重要特点。

本书是在编者二十余年教学讲义的基础上编写而成的,借鉴国内外优秀教材,合理安排内容,配有丰富例题,难度适中,可供自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程和计算机等专业的学生使用。第1、3、4、8章由韩敏编写,第5、7章由潘学军编写,第2、6章由席剑辉编写,全书由韩敏统稿审定。在书稿编辑过程中,许美玲对书稿进行了细致的检查并参与了本书习题的验算工作,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,热诚希望广大读者批评指正。

编者

2014年10月

目 录

第1章 自动控制的基本概念	1		22
1.1 自动控制的发展简史	1	2.2 拉普拉斯变换及反变换	24
1.1.1 经典控制理论阶段	2	2.2.1 拉普拉斯变换的定义	24
1.1.2 现代控制理论阶段	3	2.2.2 拉普拉斯变换的性质及其 应用	26
1.1.3 大系统控制理论阶段	3	2.2.3 拉普拉斯反变换	29
1.1.4 智能控制理论阶段	4	2.2.4 利用拉普拉斯变换求解线性 微分方程	31
1.2 自动控制的基本原理	4	2.3 控制系统的传递函数描述	32
1.2.1 人工控制与自动控制	4	2.3.1 传递函数的概念和性质	32
1.2.2 自动控制系统的构成	6	2.3.2 典型环节的传递函数	33
1.2.3 自动控制系统的的基本控制方式	7	2.4 控制系统的结构图	37
1.3 自动控制系统的分类	9	2.4.1 结构图的概念	37
1.3.1 按输入信号特征分类	9	2.4.2 控制系统结构图的建立	38
1.3.2 按系统参数特性分类	9	2.4.3 结构图的等效变换	40
1.3.3 按系统数学模型分类	10	2.5 控制系统的信号流图	44
1.3.4 按时间变量特性分类	11	2.5.1 信号流图	44
1.3.5 按变量数目分类	11	2.5.2 梅逊公式	45
1.3.6 其他分类方法	11	2.6 控制系统的传递函数	47
1.4 对控制系统性能的基本要求	11	2.7 控制系统数学模型的 Matlab 描述	50
1.4.1 稳定性	12	2.8 本章小结	52
1.4.2 快速性	12	关键术语和概念	53
1.4.3 准确性	13	习 题	54
1.5 Matlab 在自动控制系统中的应用	13	第3章 控制系统的时域分析法	60
1.6 本章小结	14	3.1 典型输入信号与时域性能指标	60
关键术语和概念	14	3.1.1 典型输入信号	60
习 题	16	3.1.2 系统的时域性能指标	62
第2章 控制系统的数学描述	17	3.2 一阶系统的时域分析	64
2.1 控制系统的微分方程描述	17	3.2.1 一阶系统的单位阶跃响应	65
2.1.1 典型控制系统的数学模型	18		
2.1.2 非线性微分方程的线性化			

3.2.2 一阶系统的单位脉冲响应	66	4.2 根轨迹绘制的基本规则	116
3.2.3 一阶系统的单位斜坡函数响应	66	4.2.1 绘制根轨迹的基本规则	116
3.3 二阶系统的时域分析	67	4.2.2 绘制根轨迹举例	128
3.3.1 二阶系统的单位阶跃响应	68	4.3 广义根轨迹绘制	133
3.3.2 二阶系统的脉冲响应	71	4.3.1 参变量根轨迹的绘制	133
3.3.3 欠阻尼二阶系统在单位阶跃输入作用下的瞬态响应指标	72	4.3.2 正反馈系统根轨迹的绘制	135
3.3.4 改善二阶系统性能的措施	78	4.3.3 非最小相位系统的根轨迹	138
3.4 高阶系统的时域分析	80	4.4 基于根轨迹的系统性能分析	139
3.4.1 高阶系统的单位阶跃响应	80	4.4.1 开环零极点对根轨迹的影响	140
3.4.2 主导极点	81	4.4.2 利用根轨迹估算系统参数与性能	143
3.5 线性系统的稳定性分析	82	4.4.3 闭环零、极点分布与系统性能的关系	145
3.5.1 稳定性概念	83	4.5 利用 Matlab 绘制根轨迹图 ...	147
3.5.2 稳定的充分必要条件	84	4.6 本章小结	152
3.5.3 稳定判据	86	关键术语和概念	152
3.6 线性系统的稳态误差	93	习 题	153
3.6.1 稳态误差概念	93	第5章 频率响应分析法	156
3.6.2 稳态误差的计算	94	5.1 频率特性的基本概念	156
3.6.3 减小或消除稳态误差的措施	101	5.2 频率特性的图示方法	158
3.7 利用 Matlab 进行时域分析	103	5.2.1 极坐标图	159
3.8 本章小结	107	5.2.2 对数坐标图	170
关键术语和概念	108	5.3 奈奎斯特稳定判据	180
习 题	109	5.3.1 幅角定理	180
第4章 根轨迹分析法	112	5.3.2 奈奎斯特稳定判据	182
4.1 根轨迹的基本概念	112	5.4 控制系统的稳定裕量	188
4.1.1 采用解析法绘制根轨迹图	112	5.4.1 相角裕量和幅值裕量	188
4.1.2 根轨迹与系统性能	113	5.4.2 稳定裕量的计算	189
4.1.3 根轨迹方程	114	5.5 控制系统的闭环频率特性 ...	190
4.1.4 利用试探法确定根轨迹上的点	115	5.6 频域响应与系统性能指标间的关系	192
		5.6.1 二阶系统	192
		5.6.2 高阶系统	193
		5.7 利用 Matlab 进行控制系统的	

频域分析	194	关键术语和概念	261
5.8 本章小结	196	习 题	261
关键术语和概念	196	第8章 离散控制系统	264
习 题	197	8.1 离散系统的基本概念	264
第6章 线性控制系统的综合与校正		8.2 采样过程与采样定理	265
.....	201	8.2.1 采样过程及其数学描述	266
6.1 综合与校正的概念	201	8.2.2 采样定理	267
6.1.1 校正的基本方式	201	8.2.3 信号的恢复	269
6.1.2 基本控制规律	202	8.3 Z变换理论	271
6.1.3 校正装置及其特性	205	8.3.1 Z变换定义和性质	271
6.2 串联校正	210	8.3.2 Z变换方法	273
6.2.1 串联超前校正	211	8.3.3 Z反变换方法	277
6.2.2 串联滞后校正	213	8.4 离散控制系统的数学描述	279
6.2.3 滞后-超前校正	216	8.4.1 线性常系数差分方程	280
6.3 反馈校正	217	8.4.2 脉冲传递函数	282
6.3.1 反馈校正的基本原理	217	8.5 离散控制系统的分析与设计	292
6.3.2 反馈校正设计	218	8.5.1 稳定性分析	292
6.4 复合校正	221	8.5.2 瞬态响应	296
6.5 利用 Matlab 进行系统校正	222	8.6 离散控制系统的稳态误差	298
6.6 本章小结	225	8.7 离散系统的数字控制器设计	300
关键术语和概念	225		304
习 题	226	8.8 离散系统的 Matlab 仿真	304
第7章 非线性控制系统	230	8.9 本章小结	309
7.1 非线性系统的特点	230	关键术语和概念	309
7.2 典型非线性环节的数学描述	231	习 题	310
.....	231	附录 部分习题参考答案	313
7.3 描述函数法	233	第1章	313
7.3.1 描述函数的基本概念	234	第2章	313
7.3.2 典型非线性特性的描述函数	235	第3章	315
7.3.3 用描述函数分析非线性系统	240	第4章	316
7.4 相平面法	245	第5章	317
7.4.1 相平面图及绘制方法	245	第6章	318
7.4.2 奇点与极限环	249	第7章	319
7.4.3 相平面分析举例	252	第8章	320
7.5 非线性系统的 Matlab 仿真	256	参考文献	322
7.6 本章小结	261		

当前,自动控制作为一种技术手段已经广泛地应用于工业、农业、国防、日常生活和社会科学等诸多领域,如数控车床按照预先编好的程序加工部件、雷达自动跟踪空中的飞行体、智能洗衣机自动调节水量等,都离不开自动控制技术的成功应用。

随着科技的发展,自动控制技术所起的作用越来越重要,自动控制技术本身也得到进一步发展。所谓自动控制(Automatic Control),是指在脱离人的直接干预情况下,利用控制装置(控制器)使被控对象(如生产过程等)的工作状态(被控量)按照预定的规律运行。从定义可以看出,自动控制包含两层含义,一方面自动控制必须不能有人直接干预,由设备和装置自主完成控制任务,另一方面装置和设备的运动必须按照人预定的规律运行。自动控制系统是以实现控制目的为目标,由相互制约的各装置按一定规律组成具有特定功能的整体。

自动控制理论广泛地渗透到各个学科领域中,它的核心内涵是研究如何通过能量转换和信息传递来满足人类生产生活的最佳需要。因此自动控制理论是一门“横断学科”,意指各行各业都要学习,并应用相关的控制理论去解决各自面临的控制难题。例如,为使发电机正常供电,其输出的电压和频率必须保持恒定,尽量不受负荷变化的干扰;为使数控机床加工出高精度的工件,就必须保证其工作台或刀架的进给量准确地按照程序指令的设定值变化;要使烘烤炉提供优质的产品,就必须严格地控制炉温;为使火炮能自动跟踪并命中飞行目标,炮身就必须按照指挥仪的命令而作方位角和俯仰角的变动;为把数吨重的人造卫星送入数百里高空的轨道,使其所携带的各种仪器能长期、准确地工作,就必须保持特定的姿态,确保卫星的太阳能电池一直朝向太阳,无线电发射天线一直指向地球……所有这一切都以高水平的自动控制技术为前提。作为现代的工程技术人员和科学工作者,必须具备一定的自动控制理论基础知识。

1.1 自动控制的发展简史(History of Automatic Control)

自动控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生,并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展、完善起来的。许多技术,在人类的历史上早已出现过,但由于没有上升为理论,很快就失传了,无法成为推动社会发展的生产力。科学的发展史告诉我们,任何一个基本原理,都需要经过长期的实践,经历千百次的失败和成功,通过长期的积累,到达某一个升华的阶段后才能形成自己的理论体系,这也正是科学要等待历史很久很久的原因。自动化技术和它的基础理论——控制论之间的关系亦是如此。在长达数千年的自动化技术发展中,直到20世纪,人们才概括出控制论的基本原理,然后有意识地用自动控制基本原理去建造各种各样的自动化装置、机器人、无人工厂、办公自动化设备、农业自动化器具和家庭

自动化电器等,形成今天这样强大的社会生产力,把人类推进到一个崭新的时代——自动化时代。可以说,没有控制论的建立和发展,也就没有今天这样高度发达的自动化技术。那么,控制论究竟是怎样形成的?

1.1.1 经典控制理论阶段(Classical Control Theory Stage)

早在古代,劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对自动控制技术的直观认识,发明了许多闪烁着控制理论智慧火花的杰作。然而最终形成完整的自动控制理论体系,是在 20 世纪 40 年代末。现在该理论已经成熟,并在工程实践中得到广泛的应用。

公元前 2689 ~ 2698 年之间,中国人发明了指南车,不管车身怎样转弯,车上“仙人”的手,预先指南的方向都不会改变。原理是指南车上装有齿轮条,当车子按预定方向行驶时,齿轮条不转动,仙人指向不变。当车子改变方向时,齿轮条就啮合上,让仙人所在的主轮朝相反的方向转过同样的偏移角度,此时,车身方向的改变,对预先指定的方向而言,是干扰(Disturbances)。啮合上的齿轮套,用来测量扰动大小,根据测量到的扰动大小,去调节仙人指向。

公元前 300 年,希腊人凯特斯比斯(Kitesibbios)在油灯中使用了浮子控制器以保持油面高度稳定。亚历山大时期的赫容(Hero),在公元 1 世纪时出版了一本叫《浮力学》的书,书中介绍了好几种用浮阀控制液位的方法。现代欧洲最先发明反馈控制的是荷兰的德勒贝尔(C. Drebel),他实现了对温度的反馈控制。邓尼斯·帕平(Dennis Papin)最先发明了蒸汽阀的压力控制器,帕平发明的是一种安全阀,相当于现在的压力安全阀。最早的有历史意义的反馈系统是俄国人波朱诺夫(I. Polzunov)在 1765 年制作的控制液位的浮动控制器。

19 世纪 60 年代期间是控制系统的高速发展期,无论是在理论还是实践上都有很多发展。1866 年麦克斯韦尔(J. CMaxwell)基于积分方程描述从理论上给出了系统的稳定性条件。劳斯(E. J. Routh)和赫尔维茨(A. Hurwitz)分别于 1877 年和 1895 年独立给出了高阶线性系统的稳定性判据;另一方面,1892 年李雅普诺夫(L. M. Ltapunov)给出了非线性系统的稳定性判据。

1922 年米罗斯基(N. Minorsky)给出了位置控制系统的分析,并对比例-积分-微分(PID)三作用控制给出了控制规律公式。1931 年,美国开始出售带有线性放大器和积分作用的气动控制器。1934 年,哈仁(H. L. Hazen)给出了伺服机构的理论研究成果。1942 年,齐格勒(J. G. Zigger)和尼科尔斯(N. B. Nichols)又给出了 PID 控制器的最优参数整定法。上述方法基本都是时域方法。另一方面,针对美国长距离电话线路负反馈放大器应用中出现的失真等问题,1932 年奈奎斯特(Nyquist)提出了负反馈系统的频率域稳定性判据,这种方法只需利用频率响应的实验数据,无需导出和求解微分方程,便可判断系统的稳定性。1940 年,波德(H. Bode)进一步研究通信系统频域方法,提出了频率响应的对数坐标图描述方法。1943 年,哈尔(A. C. Hall)利用传递函数(复数域模型)和方框图,把通信工程的频域响应方法和机械工程的时域方法统一起来,人们称此方法为复数域方法。频域分析法主要用于描述反馈放大器的带宽和其他频域指标。

在二战时期,使用和发展自动控制系统的主要动力就是设计和发展自动导航系统、自动瞄准系统、自动雷达探测系统和其他在自动控制系统上发展的军事系统。这些系统的高性能要求和复杂性使创造出的控制装备的性能有了飞跃性的进步,涌现出大量的新的研究方法与手

段。对高性能武器的要求还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。

第二次世界大战结束后,经典控制技术和理论基本建立。1948 年伊万斯(W. Evans)又进一步提出了属于经典方法的根轨迹法,给出了系统参数变换与时域性能变化之间的关系。至此,复数域与频率域的方法得以进一步完善。

复数域方法以传递函数作为系统的数学模型,常利用图表进行分析设计,比求解微分方程简便。它可通过试验方法建立数学模型,且物理概念清晰,因而至今仍得到广泛的工程应用,但只适应单变量线性定常系统,又对系统内部状态缺少了解,且采用复数域方法研究时域特性,得不到精确的结果。

1.1.2 现代控制理论阶段(Modern Control Theory Stage)

由于航天事业和电子计算机的迅速发展,20 世纪 60 年代初,在原有“经典控制理论”的基础上,形成了“现代控制理论”。

状态空间法是现代控制理论中最具代表性的方法,1954 年贝尔曼(R. Bellman)提出的动态规划理论,1956 年庞特里雅金(L. S. Pontryagin)提出的极大值原理和 1960 年卡尔曼(R. E. Kalman)提出的多变量最优控制和最优滤波理论都为状态空间法的建立和发展做出了开拓性的贡献。

频域分析法在二战后持续占着主导地位,特别是拉普拉斯变换和傅里叶变换的发展。20 世纪 50 年代,控制工程发展的重点在于复平面和根轨迹法。进入 20 世纪 80 年代,数字计算机在控制系统中的普遍使用,使得控制更为精确和快速。

随着人造卫星的发展和太空时代的到来,需要为导弹和太空卫星设计高精度、复杂的控制系统。因而,对重量小、控制精度高的系统的需求促进了最优控制的发展,同时时域手段也发展起来。状态空间方法属于时域方法,其核心是最优化技术。它以状态空间描述(实质上是一阶微分或差分方程组)作为数学模型,采用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适应于多变量、非线性和时变系统,不但在航空航天、制导与军事武器控制中有成功的应用,在工业生产过程控制中也逐步得到应用。

1.1.3 大系统控制理论阶段(Large-Scale System Control Theory Stage)

随着生产的发展和科学技术的进步,出现了许多大系统,如电力系统、城市交通网、数字通信网、柔性制造系统、生态系统、水源系统和社会经济系统等。这类系统都具有如下特点:规模庞大、结构复杂(环节较多、层次较多或关系复杂)、目标多样、影响因素众多,且常带有随机性。

原有的控制理论,不论是经典控制理论,还是现代控制理论,都是建立在集中控制的基础上,即认为整个系统的信息能集中到某一点,经过处理,再向系统各部分发出控制信号。这种理论应用到大系统时遇到了困难,不仅由于系统庞大,信息难以集中,也由于系统过于复杂,集中处理的信息量太大而难以实现。因此需要有一种新的理论,用以弥补原有控制理论的不足。

大系统控制理论是动态的系统工程理论,应用范围从个别小系统的控制,发展到若干个相互关联的子系统组成的大系统整体的控制。大系统控制出现了一些新的方法和理论,如自适应控制理论与方法、鲁棒控制方法、预测控制方法等,目前仍处于进一步的发展中。

1.1.4 智能控制理论阶段(Intelligent Control Theory Stage)

智能控制(Intelligent Control)是在无人干预的情况下能自主地驱动智能机器实现控制目标的自动控制技术。它的指导思想是根据人的思维方式和处理问题的技巧,解决那些目前需要人的智能才能解决的复杂的控制问题,控制对象的复杂性体现为:模型的不确定性,高度非线性,分布式的传感器和执行器,动态突变,多时间标度,复杂的信息模式,庞大的数据量以及严格的特性指标等。

控制理论发展至今已有 100 多年的历史,经历了“经典控制理论”和“现代控制理论”的发展阶段,已进入“大系统理论”和“智能控制理论”阶段。智能控制理论的研究和应用是现代控制理论在深度和广度上的拓展。20 世纪 80 年代以来,信息技术、计算技术的快速发展及其他相关学科的发展和相互渗透,也推动了控制科学与工程研究的不断深入,控制系统向智能控制系统的发展已成为一种趋势。

自“智能控制”概念提出以来,智能控制已经从二元论(人工智能和控制论)发展到四元论(人工智能、模糊集理论、运筹学和控制论),在取得丰硕研究和应用成果的同时,智能控制理论也得到不断的发展和完善。智能控制是发展较快的新兴学科,尽管其理论体系还没有经典控制理论那样成熟和完善,但智能控制理论和应用研究所取得的成果显示出其旺盛的生命力,受到相关研究和工程技术人员关注。随着科学技术的发展,智能控制的应用领域将不断拓展,理论和技术也必将得到不断的发展和完善。

1.2 自动控制的基本原理(Basic Principles of Automatic Control)

自动控制技术发展至今,已在许多工业生产领域和日常生活中得以应用。下面以一个具体的例子引出自动控制的基本原理。

1.2.1 人工控制与自动控制(Manual Control and Automatic Control)

在对系统进行控制时,根据系统中是否有人参与,可分为人工控制和自动控制。图 1-1 所示的是人工控制的恒值水位系统。水池中的水源源不断地经出水管流出,以供用户使用。随着用水量的增多,水池中的水位必然下降。这时,若要保持水位高度不变,就得开大进水阀门,增加进水量以作补充。在本例中,若由人工控制来完成对水位的控制,需要操作者根据实际水位的多少,来调节进水阀门的开启程度。具体操作步骤如下:首先,操作者用眼睛测量实际水位,与期望水位进行比较,得到误差值。然后根据误差的大小和正负,由大脑指挥手去正确地调节进水阀门的开度。其控制目的是要尽量减小误差,使水位尽可能地保持在期望值附近。

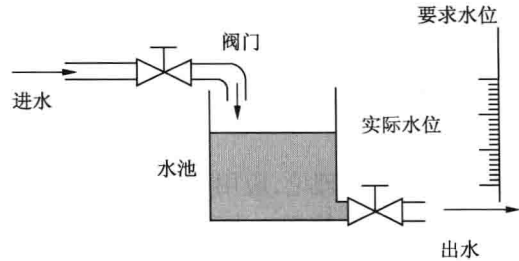


图 1-1 人工控制的水位恒值系统

若用杠杆结构代替人工来进行操作,就成为自动控制,如图 1-2 所示。图中,用浮子代替人的眼睛来测量水位的高低,另用一套杠杆机构代替人的大脑和手来计算误差和调节阀门开度。具体操作步骤如下:杠杆的一端由浮子带动,通过杠杆的作用,若用水量变大,进水阀门上提,开度增大,进水量增加,使水位回至期望值附近。反之,若用水量变小,水位及浮子上升,进水阀门关小,减小进水量,使水位自动下降至期望值附近。整个过程是在无人直接参与下进行的,所以是自动控制过程。

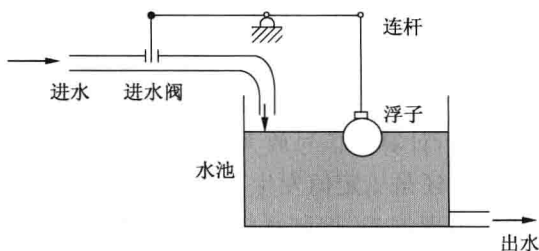


图 1-2 简单的水位自动控制系统

图 1-2 所示的系统虽然可实现自动控制,但由于结构简单而存在较大的缺点,主要表现在被控制的水位高度将随着出水量的变化而变化。出水量越多,水位就越低,偏离期望值越大。也就是说,控制的结果,总存在一定范围的误差。产生这种现象的原因可解释如下:当出水量增加时,为了使水位基本保持恒定不变,需要开大进水阀门,使较多的水流进水池以作补充。要开大进水阀,唯一的途径是浮子要下降得更多,这意味着控制的结果是水位要偏离期望值而降低。于是,整个系统将在较低的水位建立起新的平衡状态。

为克服上述缺点,可在原系统中增加一些设备而组成较完善的自动控制系统,如图 1-3 所示。这里,浮子仍是测量元件,连杆起比较作用,它将期望水位与实际水位两者进行比较,得出误差,并以运动的形式推动电位器的滑块做上下移动。电位器输出电压的高低和极性反映出误差的性质(大小和方向)。电位器输出的微弱电压经放大器放大后用以控制直流伺服电动机,其转轴经减速器金属后拖动进水阀门,对给水系统进行控制。

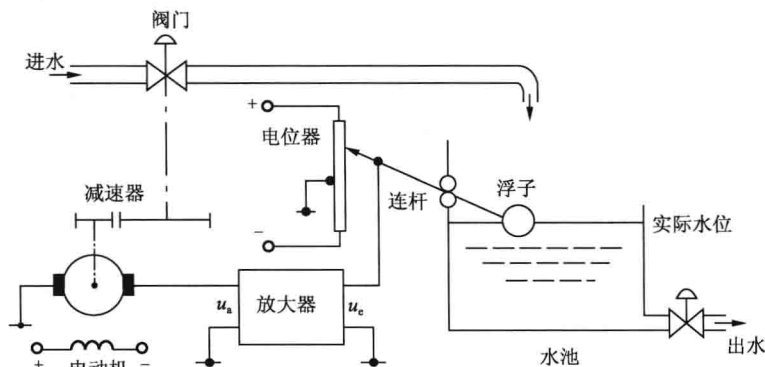


图 1-3 较完善的水位自动控制系统

在正常情况下,实际水位等于期望值,此时,电位器滑块居中,电压为零。当出水量增大,浮子下降,带动电位器滑块向上移动,输出电压大于零,经放大后控制电动机做正向旋转,以增大进水阀门的开度,促使水位回升。只有当实际水位回到期望值时,才能使电压为

零,控制作用停止。本系统的优点是:无论出水量多或少,自动控制的结果总是使实际水位的高度恒等于期望值,不致出现误差,从而大大提高了控制的精度。

1.2.2 自动控制系统的构成(Structure of an Automatic Control System)

从上例可以看出,自动控制是把某些装置有机地组合在一起,以代替人的智能。图 1-3 中的浮子相当于人的眼睛,连杆和电位器类似于大脑,电动机相当于人手等。由于这些装置负担着控制的职能,通常称之为控制装置。任何一个自动控制系统,都是由被控对象和控制装置两大部分构成的。控制装置包括比较装置、计算装置、放大装置、执行机构、测量装置等。通过测量装置随时监测被控量,将被控量反馈到输入端并与给定值进行比较,产生偏差信号。根据控制要求对偏差进行计算和信号放大,并且产生控制量,驱动被控量维持在希望值附近。无论是由于干扰造成的,还是给定值发生变化,或是由于系统内部结构参数发生变化引起的,只要被控量与希望值出现偏差,控制系统就自行纠偏,这种控制方式称为按偏差调节。由于将输出量反馈到输入端进行比较,并产生偏差信号,所以这种控制系统称为反馈控制系统或闭环控制系统,如图 1-4 所示。反馈控制方式在原理上为实现系统高精度控制提供了可能。关于图 1-4,具体解释如下。

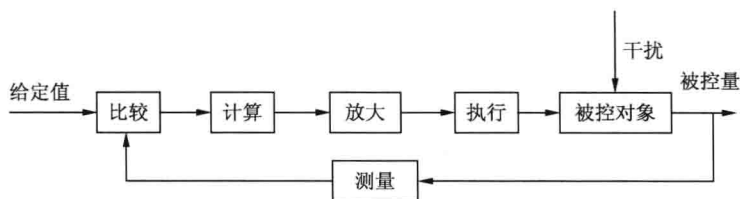


图 1-4 反馈控制系统（闭环控制系统）方框图

① 被控对象或受控对象(Controlled Plants):一般指生产过程中需要进行控制的工作机械、装置或生产过程。它接受控制量并输出被控量。

② 比较装置(Comparing Devices):把测量元件检测的被控量实际值与给定值进行比较,求出它们之间的偏差。通常采用的比较装置有差动放大器、电桥和机械的差动装置等。

③ 计算装置(Computing Devices):根据控制要求,对偏差信号进行各种计算并形成适当的控制作用。它是控制装置的核心,决定控制系统性能的好坏。校正装置是可以实现某些控制规律的计算装置,而一些复杂的运算可以利用计算机完成。

④ 放大装置(Amplifiers):将比较元件给出的偏差信号进行放大,用来推动执行元件去控制被控对象。由于经过计算处理的信号通常是标准化的弱信号,一般经放大装置作用后,输出信号要有大幅值和大功率,才具备驱动功能。

⑤ 执行机构(Actuators):直接推动被控对象,使被控量发生变化。例如电动机和调节阀门等。

⑥ 测量装置(Measure Devices)或传感器:用于检测被控量或输出量,产生反馈信号。如果被检测的物理量属于非电量,一般要转换成标准的电信号,以便处理。为了保证控制精度,要求测量装置测量准确、牢固、可靠、受环境影响小。

除此之外,下面给出控制系统方框图中常用的名词术语。

① 给定值(Set Points)或参考输入:与期望的被控量相对应的系统输入量,给定值与希望的输出值之间一般存在着物理量纲转换关系。给定值可以是常值,也可以是随时间变化

的已知函数或未知函数。

② 被控量 (Controlled Variables): 描述被控工作状态的、需要进行控制的物理量。它与给定值之间存在一定的函数关系。

③ 干扰 (Disturbances): 又称为扰动信号, 是指由某些因素 (外部和内部) 引起的、对被控量产生不利影响的信号。

④ 反馈通道 (Feedback Channels): 从被控量端 (输出) 到给定值端 (输入) 所经过的通路。

⑤ 前向通道 (Forward Channels): 从给定值端 (输入) 到被控量端 (输出) 所经过的通路。

1.2.3 自动控制系统的基本控制方式 (Basic Control Modes of Control Systems)

自动控制系统的基本控制方式主要有开环控制、闭环控制和复合控制三种方式, 其中, 闭环反馈控制是自动控制系统中应用最广泛的控制方式。

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 (Open-loop Control Systems), 其特点是系统的输出量不会对系统的控制作用发生影响, 开环控制系统可以按给定值控制方式组成, 也可以按扰动控制方式组成。

(1) 按给定值控制

按给定值控制的开环控制系统, 其控制作用直接由系统的输入量产生, 给定一个输入量, 就有一个输出量与之对应。系统的连接结构如图 1-5 所示。从图中可以看出, 信号由给定值至被控量单向传递, 故这种控制方式称为开环控制。

由于在开环控制系统中, 控制装置和被控对象之间只有顺向作用, 而无反向联系, 系统的被控量对控制作用没有影响, 控制精度完全取决于所用元器件的精度和特性调整的准确度。因此, 开环系统只有在输出量难于测量且要求控制精度不高的场合, 才能得以广泛使用。

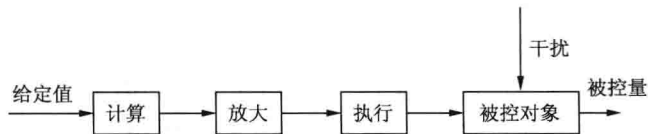


图 1-5 按给定值操作的开环系统方框图

(2) 按干扰补偿

按干扰控制的开环控制系统的工作原理: 当某一干扰对被控量影响较大并且可以测量时, 利用干扰信号产生控制作用, 以减少或抵消干扰对被控量的影响。由于干扰经测量、计算、执行诸环节直至被控对象的被控量, 信号也是单向传递, 故亦称开环控制方式, 有时也称为顺馈控制方式。其原理图如图 1-6 所示。

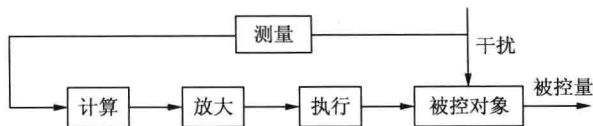


图 1-6 按干扰补偿的开环系统方框图

这种控制系统直接从扰动取得信息,只对可测干扰进行补偿。当系统受到不可测量的干扰,以及系统内部参数发生变化时,由于系统自身无法进行补偿,因此,控制精度仍然受到限制。这种控制方式一般不单独使用。

2. 闭环控制系统

开环控制系统精度不高、适应性不强的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。控制作用受被控量影响的控制系统称为闭环控制系统(Closed-loop Control Systems),也称反馈控制系统。

闭环控制系统原理图如图 1-4 所示,将系统的输出信号引回到输入端,与输入信号进行比较,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。由于存在偏差信号和闭合回路,所以称为按偏差调节的闭环控制,或称为反馈控制。闭环控制或反馈控制是自动控制系统中最基本的控制方式,在实际系统中获得了广泛的应用。本书所说的控制系统,一般都是指闭环控制系统。

在闭环控制系统中,不论是输入信号的变化,还是干扰的影响,或是系统内部参数的改变,只要是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,闭环控制系统抗干扰能力强。与开环控制系统相比,闭环系统对参数变化不敏感,可以选用相对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,如果系统结构参数选取不适当,控制过程可能变得很差,甚至出现振荡或者发散等不稳定的情况。

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目的。若采用正反馈,将使偏差越来越大,导致系统发散无法工作。

3. 复合控制系统

复合控制系统(Compound Control Systems)实际上是闭环控制系统与按扰动补偿的开环系统相结合的一种自动控制系统,其原理图如图 1-7 所示,对于主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制,同时,再利用闭环控制系统实现按偏差控制,以消除其余扰动产生的偏差。

如果是单纯的闭环控制,当出现干扰信号时,由于系统一般都有惯性或延迟特性,不能马上观察到被控量受到影响,闭环控制也就不能马上产生作用。而当被控量受到的影响反映出来时,控制作用已经滞后。因此,需要按干扰进行补偿控制,使干扰信号作用于系统的同时产生一个补偿作用来抵消干扰的影响。需要注意的是,采用这种复合控制的前提条件是干扰信号可以测量。

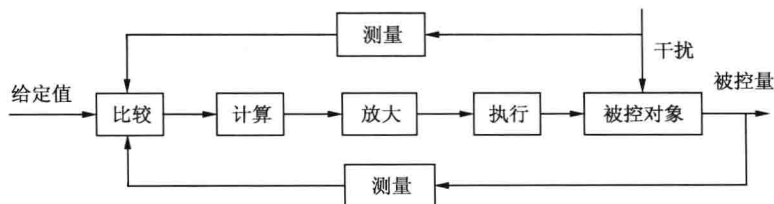


图 1-7 自动控制方框图

1.3 自动控制系统的分类(Classification of Automatic Control Systems)

自动控制系统的形式是多种多样的,采用不同的标准划分,就会得到不同的分类结果,常见的有以下几种。

1.3.1 按输入信号特征分类(Classification by Input Signal Characteristics)

1. 恒值控制系统

如果系统的输入信号是某一恒定的常值,要求系统能够克服干扰的影响,被控量保持在这一常值附近做微小变化,则这类控制系统称为恒值控制系统(Fixed Set-point Control Systems)(又称自动调节系统)。如连续生产过程中要求某些温度、压力、液位高度等保持恒定的自动控制系统均属于这一类。

2. 随动控制系统

如果系统的输入信号是一个已知或未知函数,要求被控量能够精确地跟随输入信号变化,则这类系统称为随动控制系统(Servo Systems)(又称伺服系统)。系统面临的主要矛盾是,被控对象和执行机构因惯性等因素的影响,使得系统的输出信号不能紧紧跟随输入信号的变化;控制的任务是,提高系统的跟踪能力,使系统的输出信号能跟随难于预知的输入信号的变化。在随动控制系统中,也会有各种扰动影响,但是系统的主要任务是提高跟踪能力,抑制扰动的影响是次要任务。而恒值控制系统的主要任务是抑制扰动的影响,这是两者的主要差别。工业自动化仪表中的函数记录仪,火炮自动跟踪系统和飞机-自动驾驶仪系统等均属于随动控制系统。

3. 程序控制系统

如果系统的输入信号是按预先编制的程序确定,要求被控量按照相应的规律随控制信号变化,则这类系统称为程序控制系统(Programmed Control Systems)。如数控机床按给定程序加工一个工件、供热锅炉的点火操作等就属于这类控制系统,这类系统实际上是开环控制系统,而不是反馈控制系统。

1.3.2 按系统参数特性分类(Classification by System Parameter Characteristics)

1. 定常系统

如果系统参数在系统运行过程中相对于时间是不变的,则称这类系统为定常系统或时不变系统(Time-invariant Systems)。这类系统的特点是系统的响应特性只取决于输入信号的形状和系统的特性,而与输入信号施加的时刻无关。严格的定常系统是不存在的,若在所考察的时间间隔内,系统参数的变化相对于系统的运动缓慢得多,则可近似将其作为定常系统来处理。

2. 时变系统

如果系统中的参数是时间 t 的函数,则这类系统称为时变系统(Time-varying Systems)。这类系统的特点是系统的响应特性不仅仅取决于输入信号的形状和系统的特性,而且还与输入信号施加的时刻有关。严格讲,在工程上的大部分系统属于这类系统,比如电器设备的内部温升、机械部件的磨损和老化、管道的结垢等,都属于慢参数变化的系统。另外还有一

类是随运动过程而参数明显变化的系统,其典型例子是导弹或火箭控制系统,它的质量参数会随着所携带的燃料不断消耗而减小。

1.3.3 按系统数学模型分类(Classification by Mathematical Models of Systems)

按系统是否满足齐次定理和叠加定理,可以将系统分为线性系统 and 非线性系统。

1. 线性系统

由线性元部件组成的自动控制系统,称为线性系统(Linear Systems),它的运动规律可以用线性微分方程来描述。严格来说,线性系统实际上并不存在,因为实际的物理系统总是具有某种程度的非线性。线性系统纯粹是为了简化分析和设计而提出的理想模型。但是,当控制系统内部信号的变化范围在各部件的线性特征范围内时,就可以认为系统是线性的。

线性系统中各元件的静特性为直线,如图 1-8 所示。图中 r 为输入量, c 为输出量。

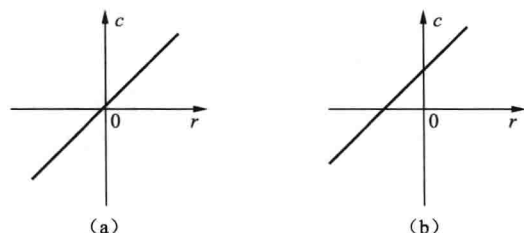


图 1-8 线性系统的静特性

线性系统有两个重要特性——叠加性和齐次性。

① 叠加性:当同时存在多个输入时,线性系统的输出等于各输入单独作用时所引起的输出量之和。如果用 $c_1(t)$ 表示由输入 $r_1(t)$ 产生的输出量,用 $c_2(t)$ 表示由输入 $r_2(t)$ 产生的输出量,则当 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 同时作用时,输出量为 $c_1(t) + c_2(t)$ 。

② 齐次性(倍增性):当输入量增大或缩小 $K(K$ 为实数) 倍时,线性系统的输出量也按同一倍数增大或缩小,即用 $c(t)$ 表示由 $r(t)$ 产生的输出量,则在 $Kr(t)$ 作用下的输出量为 $Kc(t)$ 。

系统的稳定性与初始状态和外部作用无关。

2. 非线性系统

含有一个或一个以上具有非线性特性的元件的自动控制系统,就是非线性系统(Nonlinear Systems)。非线性系统的特点是不满足叠加原理,系统响应与初始状态和外作用都有关。图 1-9 示出几种常见的非线性特性,分别为继电器、死区、饱和、间隙特性,另外还有大量的其他非线性特性。对于非线性控制系统,由于没有通用的数学方法解决,一般采用近似方法或计算机仿真技术求解。

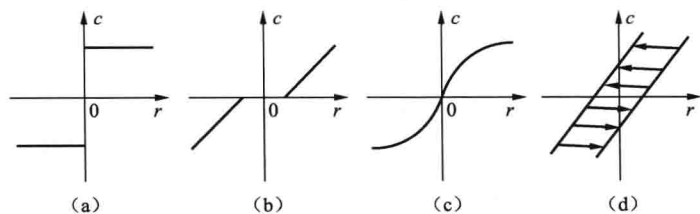


图 1-9 非线性特性