



GH

高等学校 规划教材
工科电子类

自动控制原理

杨位钦 谢锡祺 编著



电子工业出版社

自 动 控 制 原 理

杨位钦 谢锡祺 编著

电子工业出版社

内 容 简 介

本教材是依据电子工业部高等学校工科电子类专业教材办公室制定的《八五(1991—1995)电子类教材出版规划》，由《自动控制》专业教材编审委员会评选审定而推荐出版的。

编者力求对自控的基本概念、基本原理和基本方法有较系统和深入浅出的阐述，注重提供实际背景，具体的物理解释和工程计算，文中穿插的自学题在于使读者检验和加深理解，并有所扩充。

适用于高校自控专业学生学习。

自动控制原理

杨位钦 谢锡祺 编著

责任编辑 魏 冬

特约编辑 卢慧筠

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

顺义县天竺颖华印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:31 字数:748千字

1995年11月第1版 1995年11月第1次印刷

印数:3000册 定价:23.80元

ISBN 7-5053-2825-5/G·232

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材是依据电子工业部高等学校工科电子类专业教材办公室制定的《八五(1991—1995)电子类教材出版规划》，由《自动控制》专业教材编审委员会评选审定而推荐出版的。

教材的责任编委是秦寿康教授(广州师范学院数学系)，主审人是以光衢教授(北京航空航天大学控制与导航教研室)。

按照编委会制订的本教材讲授参考学时数为100，以及关于内容要求范围和编写的指导思想，本书立足于传统(或古典)方法。在有关控制的名词术语的使用方面则采用我国《自动化名词审定委员会》所认定的规范词。

本书的形成经过了多年的使用和不断的改进，1990年初开始作为讲义使用，1991年底以《自动控制理论基础》(上、下册)由北京理工大学出版社公开出版，获校第六届优秀教材二等奖。现在原有基础上，根据编写大纲要求和作者在教学实践中的经验和体会，并参考现有教材的长处，经过删简和重新改写而成。在编写中，我们力求对自动控制的基本概念、基本原理和基本方法有较系统和深入浅出的阐述，注重提供实际背景、具体的物理解释和工程计算，文中穿插的自学题在于使读者检验和加深理解，并有所扩充。

使用本教材时可根据专业对象的不同和教学时数的多寡而适当选例或有所侧重。附录中提供的计算机程序可帮助读者实现复杂程度不同的计算，其运行可靠，所具备的功能对学习本书的主要部分来说是足够的。

本书关于线性连续控制系统部分(第一至第十章)由杨位钦教授执笔，离散和非线性控制系统部分(第十一至第十四章)由谢锡祺副教授执笔。作者对教材编委会张钟俊教授的正确指导、秦寿康教授在编写大纲的制定，以及以光衢教授在书稿编写上所提出的宝贵意见和建议表示由衷的感谢，囿于我们的学识水平，书中缺点和不当之处，热忱欢迎读者批评指正。

作者于北京理工大学

1994年

目 录

第一章 绪论

§ 1.1 引言	1
§ 1.2 简要的历史	3
§ 1.3 控制系统的基本形式、组成和术语	5
§ 1.4 控制理论的任务与本书的主要内容	8
习题	9

第二章 线性连续系统的传递函数

§ 2.1 引言	11
§ 2.2 传递函数模型	13
§ 2.3 模型的线性化	17
§ 2.4 机械装置的传递函数建立举例	19
§ 2.5 电路和电机的传递函数建立举例	21
§ 2.6 液压器件的传递函数建立举例	27
§ 2.7 反馈控制系统的传递函数	29
§ 2.8 框图的等效变换	37
§ 2.9 信号流图和梅森公式的应用	40
小结	44
习题	44

第三章 线性定常系统的时间响应

§ 3.1 引言	50
§ 3.2 传递函数和时间响应关系的一些概念	51
§ 3.3 一阶系统的时间响应	56
§ 3.4 二阶系统的时间响应	59
§ 3.5 具有零点的二阶系统	65
§ 3.6 三阶系统的时间响应及高阶系统的近似分析	69
§ 3.7 控制系统的过渡过程品质指标	73
小结	78
习题	78

第四章 线性系统的稳定性和劳斯判据

§ 4.1 引言	82
§ 4.2 稳定性的定义和条件	83
§ 4.3 稳定性的劳斯判据	84
§ 4.4 劳斯阵列的特殊情况	88

§ 4.5	劳斯判据应用举例	91
小结		95
习题		96
第五章	线性定常系统的频率响应	
§ 5.1	引言	100
§ 5.2	频率响应函数	100
§ 5.3	频率响应的带宽和谐振峰	104
§ 5.4	伯德图	107
§ 5.5	最小相位系统和伯德幅相关系式	119
小结		122
习题		123
第六章	稳态误差分析及系统的灵敏度	
§ 6.1	误差和偏差信号	127
§ 6.2	系统的类型和典型作用下的稳态误差	130
§ 6.3	误差系数和稳态误差的计算	137
§ 6.4	前馈控制对稳态误差的补偿	141
§ 6.5	系统对参数变化的灵敏度	143
§ 6.6	关于反馈概念的补充	150
小结		153
习题		154
第七章	频率特性和系统的稳定性	
§ 7.1	引言	159
§ 7.2	围线映射和柯西辐角定理	160
§ 7.3	奈奎斯特稳定判据	163
§ 7.4	开环含有积分环节时判据的应用	172
§ 7.5	相对稳定性	178
§ 7.6	闭环频率特性的作图	182
小结		189
习题		189
第八章	系统设计的频率法	
§ 8.1	引言	194
§ 8.2	比例控制器	195
§ 8.3	滞后控制的设计	198
§ 8.4	超前控制的设计	201
§ 8.5	滞后—超前控制的设计	207
§ 8.6	PID 控制的设计	211
§ 8.7	反馈校正的近似计算	213
小结		217

习题	218
第九章 根轨迹	
§ 9.1 引言	221
§ 9.2 根轨迹的定义和基本原理	225
§ 9.3 根轨迹的性质和绘制方法	226
§ 9.4 根轨迹作图示例	233
§ 9.5 利用根轨迹确定参数和系统响应	244
§ 9.6 根轨迹图的一些推广	247
小结	252
习题	252
第十章 系统设计的根轨迹法	
§ 10.1 引言	257
§ 10.2 超前控制及其设计	259
§ 10.3 滞后控制及其设计	267
§ 10.4 PID 控制及其设计	272
§ 10.5 控制器的实现	275
小结	279
习题	279
第十一章 线性定常离散控制系统	
§ 11.1 引言	283
§ 11.2 信号的采样	284
§ 11.3 采样定理和信号的复现	285
§ 11.4 信号的保持	288
§ 11.5 z 变换	291
§ 11.6 z 逆变换	297
§ 11.7 离散控制系统的差分方程及其 z 变换法求解	300
§ 11.8 离散控制系统的 z 传递函数	303
§ 11.9 离散控制系统的稳定性	313
§ 11.10 离散控制系统的稳态精度	325
§ 11.11 离散控制系统动态性能指标的估算	330
小结	336
习题	337
第十二章 离散控制系统的设计	
§ 12.1 引言	340
§ 12.2 采样周期 T 的确定	341
§ 12.3 串联相位滞后控制器的设计	343
§ 12.4 串联相位超前控制器的设计	351
§ 12.5 数字 PID 控制器的设计	356

§ 12.6* Z 域根轨迹法设计·····	361
§ 12.7 最少拍系统的设计·····	364
小结·····	373
习题·····	374

第十三章 非线性控制系统的描述函数法

§ 13.1 非线性系统概述·····	376
§ 13.2 常见的典型非线性特性·····	380
§ 13.3 描述函数法的基本概念·····	383
§ 13.4 典型非线性特性的 $N(X)$ 及 $\frac{-1}{N(X)}$ 曲线·····	385
§ 13.5 非线性控制系统的描述函数法分析·····	394
§ 13.6 多回路非线性控制系统的应用·····	405
小结·····	406
习题·····	407

第十四章 非线性控制系统的相平面法

§ 14.1 相平面法基本概念·····	409
§ 14.2 解析法绘制相轨迹·····	411
§ 14.3 图解法绘制相轨迹·····	413
§ 14.4 由相轨迹求时间响应曲线·····	418
§ 14.5 平衡点·平衡线·····	419
§ 14.6 极限环及本迪森定理·····	426
§ 14.7 非线性控制系统的相平面法分析·····	429
§ 14.8 控制信号受约束的二阶时间最优控制系统·····	442
小结·····	445
习题·····	446

符号一览表

附 录

附录一 拉氏变换表·····	449
附录二 重根点处根轨迹的离开角和进入角·····	450
附录三 计算机辅助分析与设计·····	452
习题选答·····	476
参考文献·····	484

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

“控制”是一个很一般的概念或术语，因为实际上自然界中的任何事物都是受到不同程度的控制，但“控制”通常指的是有人参与（人作为操作者）的人机间的相互关系——人工控制，或没有明显人机关系的自动控制，这也是本书所讨论的控制。前一种情况，例如人驾驶汽车，为了安全达到预定地点，人必须对车辆进行控制；而只涉及机器的控制的例子，像室内温度的控制，在冬季可以用炉子来控制温度，在夏天则用空调机来控制温度。在各种控制的问题中，许多经验的和理论的分析都属于自动控制原理的范畴。

可以作为被控制的变量多得举不胜举，作为机械量的例子，可以对位置、速度和力进行控制。在人体中，血压、血糖、瞳孔直径等则是生物机制中许多被控制变量的几个例子。在自然界和工程领域中都存在非常广泛的形式多样的控制对象和控制过程，它们都可以用控制理论的方法进行研究。

一类特定的控制系统是利用反馈构成的系统，它的特点是对被控制的变量（如温度、速度或压力）用传感器进行测量，然后把测得的信息反馈回来以对被控制变量施加影响，这里用一个液位控制系统为例来说明。图 1.1 是一个容器的液面高度控制系统，图中 A 是液

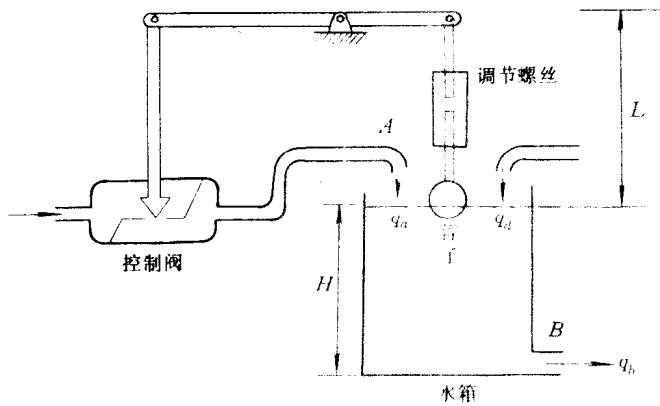


图 1.1 液位控制系统

体入口管，B 是液体的流出口。如果没有其他添加的注入流量（称其为扰动输入 q_d ），则在平衡状态下，输入流量等于输出流量，即 $q_a = q_b$ ， $q_d = 0$ ，而液面高度 $H = \text{常值}$ 。控制系统的作用在于当扰动 q_d 不为零时，力图使液面高度保持为某一希望的值 h_c 。由于扰动流量使 H 变化，而液位的变化可由浮子的位置感知，并通过杠杆机构改变控制阀门的开度大小，从而调节输入流量 q_a ，达到液位升降对扰动的调整。

容器中液面高低的希望值可以通过调节螺丝改变浮子杆的长短来预置（不难看出， L 较大时相应的希望值 h_c 较低）。图 1.1 是实际液位系统的简化构成图，如果从系统各部分的功

能，及相互间信号和能量的关系出发，我们还可以用图 1.2 形式的元件框图来表示上述系统，图中带箭头的线表明各元件之间作用传递的方向。

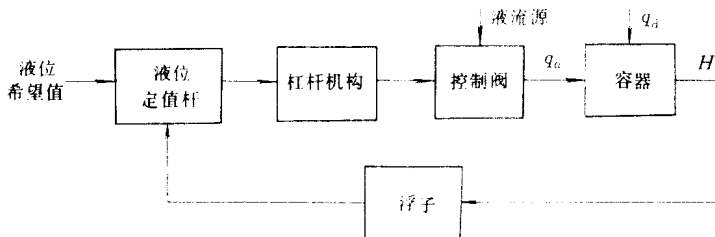


图 1.2 液位控制系统元件框图

倘若将图 1.2 按各部分的功能分解，则可画成图 1.3 所示的功能框图，其中每一方框都是从它在控制系统中的作用来注明的，因此它不仅可用于某个具体的控制系统，且有典型的代表性。例如图中的“对象”在液位控制系统中指的是容器，而在温度控制系统中，它可以是炉子。控制对象也可以指某种“过程”（如发酵），对象中有某个（或某些）变量是需要控制的，这个受控制的变量也称为系统的输出。本例中输出指的是液面高度（温度控制系统中是炉内温度）。使输出偏离希望值的作用称为扰动，本例中它是作用于对象的添加流量。执行机构是用来影响过程或对象的装置或设备，它力图使系统输出满足预定的要求。

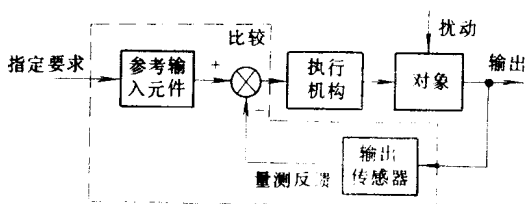


图 1.3 简单反馈控制系统的功能框图

本例中的执行机构就是控制阀门。对于一个复杂的或性能良好的系统，执行机构的作用至关重要，它本身也可能形成一个子系统。

图 1.3 中虚线内的三部分是：输出变量的传感器；用于设定希望液位值的参考输入元件；以及用 \$\otimes\$ 表示的比较器。它们相当于浮子杆所具备的这三种功能的分解。从反馈控制的需要来说，必须对输出量（液位）进行测量，并将其与设定的液位（参考液位）比较。

在本例中，作为输出传感器的是浮子，它的位置（高度）代表实测液面高度（即图中的量测反馈），而浮子位置相对于 h_0 （平衡状态下的液面高度）的偏离反映了液位的变化，即实际液位和要求液位间的差值（即比较结果），浮子杆调节螺丝用来调整杆的长度，对不同的设置长度，进入容器的流量和排出流量将在不同的液面高度下达到平衡，因此调节螺丝所产生的效果就是规定了液面的要求高度，由于它是实际高度是否符合要求的参照标准，因此称其为参考输入，而调节螺丝就是参考输入元件。

不同系统所控制的物理量不同，例如温度控制系统的输出量是温度，若用热电偶作为传感器来测量温度，则量测反馈是电压值，为了能对实际温度和要求温度进行比较，需将要求温度用电压作标准（参考电压），以便和量测反馈具有相同的量纲和比例关系（指电压-温度比），在输入端产生电压的元件可用电位器（参考输入元件）。在实际系统中，图 1.3 虚线中的几部分元件可以是机械的、电气的或液压的装置，而且构造上往往是不可分的。

图 1.3 是一般反馈控制系统的最基本的功能。上面以及后面将举出一些控制系统的实际例子，其目的除了给读者提供一些具体的工程背景和物理概念以外，更多的是要归纳出它们之间的共同属性。事实上，自动控制理论这门课的目的就在于提供一种探讨反馈控制

系统行为的一般分析方法，同时给出一些最常用的工程设计方法来解决自动控制的任务。

§ 1.2 简要的历史

反馈控制的原始装置在古代就有了，我国和希腊古代都发明了水钟（“铜壶滴漏”），这种装置包含了反馈原理。水钟要求控制水流的速度。古代还有油灯和酒桶的液面控制，它要求不管从桶中汲取多少，总保持液面是满的。事实上液体流速的控制也归结为控制液面高度，因为当压力恒定时，管口处的流速必恒定，而这要求液面对管口的高度恒定。古代发明的液面控制机构和现在卫生间水箱中所用的浮子阀门机构是很相似的，当液面降落时，浮子可使流入水箱的流量增加，而液面上升时则相反，乃至切断水流，其原理略图见图 1.4 所示。可以看出，这里的传感器和控制器是由适当形状的浮子和供水管组合构成的。

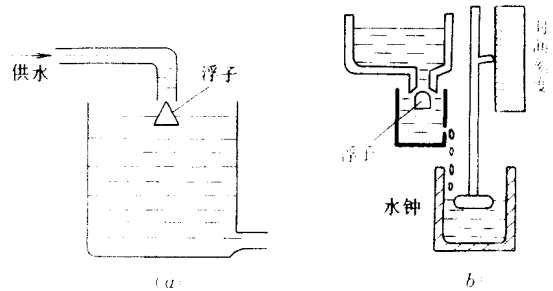


图 1.4 古代的液面和流量控制

大约在 1620 年，Drebbel 设计的鸡蛋孵化器是恒温控制的一个很好的反馈系统，孵化器是用火将孵化器内外夹层中的水加热，而火焰的大小靠孵化器顶部的通风口挡板的开度来调节，孵化器内部温度由温度计来测量，温度的升降可以使排风口开度减小或增大。

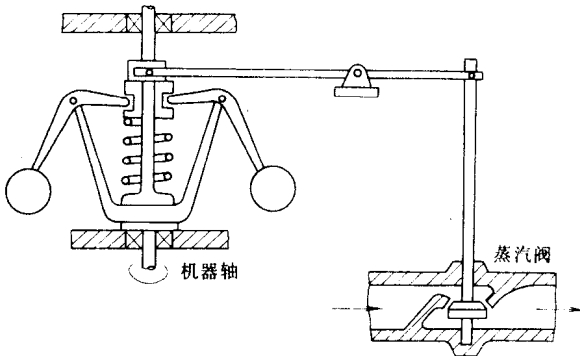


图 1.5 离心调速器的应用

离心调速器的工作原理很简单，假定机器在平衡状态运行时突然加上负载，此时机器速度下降，调速器飞球的高度下降，通过杠杆的作用使蒸汽阀门（它在这里作为执行机构）打开以使更多的蒸汽进入机器，从而使速度大体上能复原。

瓦特是位实干家，他并没有对调速器进行理论分析，后来有人发现并从微分方程的角度讨论了调速器系统可能产生的不稳定现象，从而开始了对反馈控制动力学问题的研究。

首先对反馈控制的稳定性进行系统研究的是 J. C. Maxwell (1868) 的论文——“论调节器”，文章导出了调节器的微分方程，并在平衡工作点附近进行了线性化处理，指出稳定性取决于特征方程的根是否具有负的实部。Maxwell 探讨了为了使多项式的根具有负实部，

有记载的一个著名的自动控制装置是转速的控制，它用来控制风力磨房中辗压辊的速度。在各种控制方法中利用飞球离心摆是一种较好的方案，这种控制装置能根据转速，通过绳索和滑轮使风帆收起或张开以保持速度固定。不过，真正使这种飞球离心调速器广为人知的是 1788 年左右瓦特所发明的蒸汽机而不是风力磨面机，瓦特把它用于蒸汽流量的调节。图 1.5 是这种控制的原理图。离心调速

该多项式系数应满足的条件，但他只做了二阶和三阶的情况。

给出确定稳定与否的准则应当归功于 E. J. Routh，他给出的准则简便易行，至今仍被广泛应用。应当指出，在 Routh 发表他的结果后不久，俄国数学家 A. M. Lyapunov 也开始研究运动的稳定性。1892 年他研究非线性的运动方程，并且也包含了和 Routh 准则等价的结果。他的工作是基础性的，不过直到大约 1958 年才被引进控制理论的领域中来。

控制理论的发展也同反馈放大器的研制紧密相关。在第一次世界大战之后，随着电子管放大器的产生，长距离的电话通讯成为可能。但是随着距离增加，电信号能量损耗加大。尽管可以用粗导线，但还是需要更多的放大器来弥补损耗。可是真空管的微小的非线性所产生的失真必随着放大器的增多而呈几何级数式上升。为解决这一问题，Black 提出使用反馈放大器来减小失真，但他发现在高增益放大器中出现了不稳定现象。由于问题的复杂性（常常要用 50 阶微分方程描述），用 Routh 准则也不方便。1932 年，H. Nyquist 提出了用回路频率特性图形判别稳定性的方法。根据这个理论，Bode (1945) 提出了反馈放大器的一般设计方法。

和研究反馈放大器的同时，反馈控制在工业过程中也得到普遍应用。在这个领域中，受控过程的特性相当复杂，常常是非线性的，而且在执行器和传感器之间的信号传递有很大的时间滞后。这时，在实践中提出了比例—积分—微分控制，即所谓 PID 控制器，这种方法根据大量的实际经验和对系统动态的线性近似，经过调试 PID 参数可获得满意的控制效果。

第二次世界大战期间，由于军事科学的需要，飞机驾驶，火炮控制系统、雷达天线控制系统等都大大促进了反馈控制理论的进展。美国麻省理工学院雷达实验室的工程师和数学家把反馈放大器理论，PID 控制以及由 N. Wiener 的随机过程理论等结合在一起，形成了一整套称之为随动系统的设计方法。

另一种控制系统的设计方法是 1948 年 W. R. Evans 提出的。他所从事的领域是飞机导航和控制，其中遇到许多涉及动态系统的稳定性问题，因此又回到 70 多年前 Maxwell 和 Routh 曾经做过的关于特征方程的工作。但 Evans 提出的方法和规则是根据系统参数变化时特征方程式根的变化的几何轨迹来进行分析的，因此，这种方法称为根轨迹法。直到现在，它还是系统设计和稳定性分析的一个重要方法。

在 50 年代，一些学者，其中包括美国的 Bellman 和 Kalman、苏联的 Pontryagin 开始考虑用常微分方程作为控制系统的数学模型，这个工作很大程度上是由于人造地球卫星进入太空而提出的。卫星要求重量轻、控制精确，在分析和设计中用常微分方程作为数学模型比较方便，而且由于数学计算机的发展，原先无法实现的计算问题已成为可能。大体在这个时候，Lyapunov 的工作遂被介绍到控制中来，而且由 Wiener 等人在二次大战中关于最优控制的研究也被推广来研究轨迹的优化问题。这方面的许多研究成果于 1960 年在莫斯科举行的国际自动控制协会 (IFAC) 上发表。上述研究工作不是利用频率响应或特征方程，而是在标准形式或状态形式的常微分方程的基础上直接求解并且大量使用计算机。这种方法现在通称为“现代控制”以区别于以往的“传统”或“古典”方法。

60 年代以来，控制理论一直在不断发展和充实。如同人类研究事物的目的不但在于认识事物的客观规律，而且在于改造客观世界一样，控制理论研究的是如何按被控对象和环境的特性，通过获取并运用信息来施加控制作用，使系统完成预定的任务。它从 20 年代为

解决机械和电子设备的控制问题开始发展，现在已成功地运用并渗透到工农业生产、科学技术、军事、生物医学、社会经济和人类生活的众多领域，发展为具有独特的研究对象、方法学、概念体系、研究手段，而且内涵极为丰富的一门新兴学科。控制理论的未来发展仍将十分活跃，它同先进的生产力相辅相成，伴随着人类的知识和技术条件的日臻成熟而不断发展完善，并反过来把它的影响扩大到人类活动的各个领域。

§ 1.3 控制系统的基本形式、组成和术语

在 1.1 节中所举的液位控制系统是一种具有反馈的控制系统。我们从它的简单框图（图 1.1 和 1.2）已经看到，由于系统输出信号要引回输入端以形成对系统的控制，所以它的信号流通构成了闭合的回路，这种输出信号对控制作用有直接影响的系统，称之为**闭环系统**。反馈信号可以是输出信号本身，也可以是输出量的函数。输入信号和反馈信号进行比较在数学上就是求二者之差。或者说，这种反馈是负反馈。

在工业和日常生活中，大量应用着闭环控制系统，但也存在不少控制系统是所谓**开环系统**，在开环系统中，输出量对系统的控制作用没有影响，它既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来和输入量进行比较。一种工业上应用开环控制的例子是皮革喷涂机，它用来对皮革表面喷上一层涂料。由于原料皮革大小不一，各自的边缘形状是不规则的，在喷涂过程中，作业是沿一条传送带进行的，需喷涂的皮革平铺在传送带上向前移动（图 1.6）。在初始阶段，由光电传感器测量出皮革所复盖的不规则的轮廓范

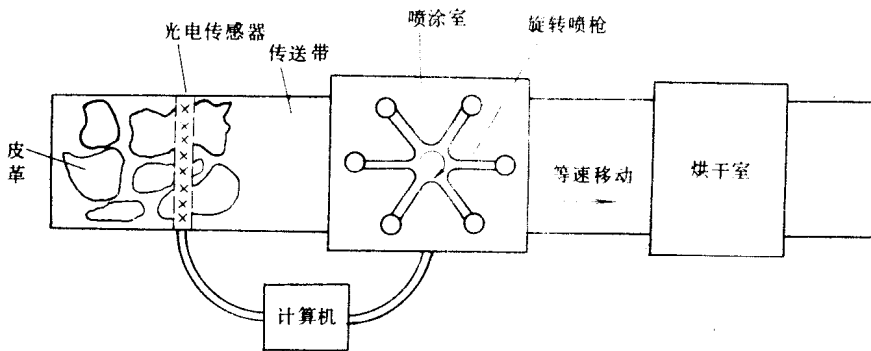


图 1.6 皮革喷涂机顶视图

围，把信息存入计算机，当皮革进入喷涂室时，旋转着的喷枪（6 个喷枪分布在一个转盘上）由计算机根据皮革轮廓决定的控制指令，当喷枪转到适当的角度时开启或关闭喷嘴以便保证在皮革上喷满涂料而又不在没有皮革复盖的区域进行喷涂，以避免浪费涂料。这个控制系统的输出量是喷枪在旋转过程中开启和关闭的相对位置，而系统的输入是由光电传感器测得的皮革在传送带上的复盖区域信息。对应于每一个输入信息，计算机给出一个相应的喷枪开关状态与之对应。在工作过程中，系统的输出量没有用来与输入进行对比，该系统在投入运行时，必须准确校准，并且在工作过程中保持校准状态不变，以保证输出量和输入量之间的确定关系。

图 1.7 表示开环控制系统的框图。一般说，如果输入量与输出量之间的关系已知，并

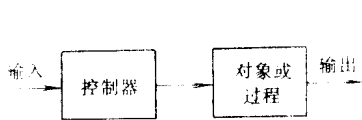


图 1.7 开环控制系统框图

且不存在内部和外部扰动时，采用开环控制是适宜的。然而当系统存在着无法预计的扰动和（或）系统中元件参数可能有无法预料的变化时，闭环控制就显得更为优越。

在控制室温时，如果并不需要对室温可能受到的扰动进行自动和精确调整的话，它可以做成开环的，即只需添加一定的燃料而不必测量实际的室温。另一个例子是他激直流电机的转速控制。这种电机在给定激磁电流的情况下，加上某一电枢电压可以使电机达到要求的转速。如图 1.8 电机是控制对象，电枢电压为输入，电机轴转速为输出，由于输出量不会反过来影响输入量，因此这是开环控制。如果电机轴机械负载有变化而使转速偏离要求值，这里无法改变电枢电压来维持原有转速。要想构成闭环控制可以采用人工的或自动的调整方案。前者就是由人按照轴上转速表的指示读数对电枢电压进行修正；但要做到准确和及时的调整，采用一种自动控制的方案是让电动机带动一台测速发电机，如图 1.9，它产生与转速成比例的电压，将该电压和设置电机转速的基准量（参考电压）比较，由二者的差值来调整电枢电压，这就是闭环调速系统。当然它增加了成本和复杂性，在分析和设计中会产生新的问题。至于闭环控制的特点，我们还将后面对开环和闭环进行对比讨论。

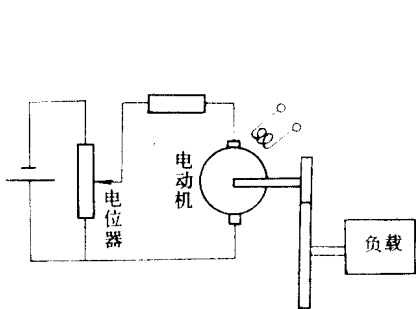


图 1.8 开环转速控制

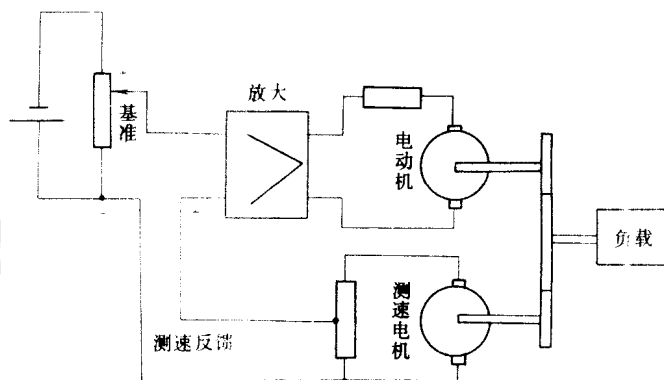


图 1.9 闭环转速控制

下面我们结合闭环系统一般的基本组成框图来介绍有关的术语（见图 1.10）。

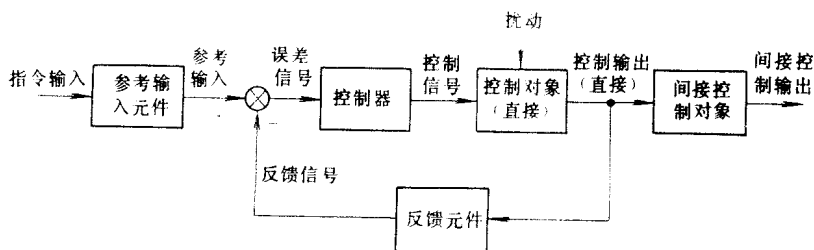


图 1.10 闭环系统组成框图

图 1.10 和图 1.3 大体相同，它代表了更为一般的闭环控制系统框图。不过这也只是一个基本组成，因为实际系统可能有多个局部小回路，而且在一个大的系统中还可能包含有若干小的子系统。

图 1.10 中每一方框同样是根据它在系统中的功能命名的,箭头线旁边注明相应变量的名称,它与该变量所起的作用有关,因此是属于控制系统的变量。

框图中的核心部分是控制对象。控制对象在实际问题中是多种多样的。它可以是具体的物理系统,如一架飞机,一部跟踪雷达,一台铣床,或是一个机器人。控制对象也可以指一个过程,诸如化学或核反应过程、结晶过程、发酵过程、水的净化或热的传导过程等。控制对象还可以是生物的、经济的、社会的,或者是它们的某种组合等。

控制对象和执行控制作用的控制器之间的界限有时不是很明显的,例如在雷达天线转角的控制系统中,天线的驱动电机是属于控制对象,还是控制器的一部分?这时通常的区分原则是把受扰动作用影响的哪一部分归入控制对象。

控制输出则是控制对象或过程中受到控制的任何变量的统称。控制输出所涉及的范围也很广泛,除了常见的各种物理量之外,还可以是控制对象中需要控制的某种特性,如溶液的酸碱度,合成氨的氢氮比等。控制输出通常是整个系统最终的输出,如供热系统中受控的温度是系统的输出。但有些情况下,系统的直接控制输出需要经过转换才是实际要得到的输出——称为间接控制输出。一般是这样来区分直接和间接输出的,即

直接控制输出是控制回路中的一个控制输出,它的值经过传感器测量后产生一个反馈信号。间接控制输出和直接控制输出有关,但它不是用来产生反馈信号的控制输出。

参考输入信号是在控制回路之外的一个信号,它作为和控制输出直接或间接进行比较的基准量。所谓间接比较是指和控制输出经过传感器变换后的反馈信号进行比较。

图 1.10 中的反馈信号是指系统反馈信号(而非局部或元件中的反馈),亦即它是指由参考输入信号经过系统控制回路后产生的回路反馈信号。

系统误差信号是参考输入信号减去系统反馈信号后得出的信号,也称为激励信号。

控制信号是将系统误差信号按某种规律(称为控制律)处理后用来改变系统的直接控制输出。实现这种控制规律的装置就是控制器,它的设计是整个控制系统设计的重点。

指令是独立于系统之外所建立的输入量,用来设定和理想的控制输出相等价的输入。指令输入和最终的控制输出单位相同,为了信号获取和处理的方便,往往需要把指令输入转换成可以和反馈信号直接对比的参考输入。这也正是参考输入元件的作用。

扰动是加于系统的不希望有的作用,它对控制输出产生不利影响(即偏离理想值),由于扰动的存在往往无法避免,因此控制系统的重要作用之一是削弱或抑制扰动所产生的影响。

以上是从整个闭环系统的角度介绍一些经常要提及的变量和术语的含义。实际上,有些术语名称并不局限于系统变量,例如输入信号和输出信号就是常用的一般性变量,前者是指加于系统或元件的信号,后者则是由系统或元件产生的信号。此外,在任一闭合回路中,由某个特定的输入信号经回路传输后产生的信号,如果该信号与上述输入信号相减,则称其为回路反馈信号。闭合回路中输入信号与相应回路反馈信号相减得到的信号则称为回路误差信号。

除上述常见术语外,在以后的章节中,将结合讨论所涉及的内容引出一些必要的名词术语。

§ 1.4 控制理论的任务与本书的主要内容

控制理论要解决两方面的问题，即动态分析和控制系统设计。分析的任务是求出已给系统的控制对象对指令输入和扰动作用的响应以及由于对象参数的变化而引起响应的变化。通过动态分析，可以判断系统是否能正常和满意地运行，例如系统是否能够稳定地工作。如果稳定，则系统终将达到某种平衡状态即进入稳态，而达到稳态之前的行为称为过渡或暂态过程。如果系统是不稳定的，则它不可能进入平衡状态或稳态。对于一个稳定的系统，动态分析还要得出有关系统精度和动态品质的估计。

如果已给系统经过分析，其动态行为是满意的，则不存在进行设计的问题。如果不满足要求，而控制对象的特性又不能改变，则系统设计的任务就是选择适当的控制器及其控制律以改善动态品质。

系统分析和设计往往是互相联系、交替进行的。实际上往往不是单纯为了分析而分析，而是为了设计新的系统或改造原有的系统而进行分析工作。在一般情况下，系统的分析和设计包含以下几项工作：(1) 建立控制对象的数学模型；(2) 将对象模型作线性化处理，以减少复杂性；(3) 对象的动态分析；(4) 对象的非线性仿真；(5) 控制方案的建立；(6) 选择性能指标；(7) 设计控制器；(8) 全系统的动态分析；(9) 全系统的非线性仿真；(10) 选择硬件；(11) 构造出研制中的系统并进行试验；(12) 设计实际系统的模型；(13) 对实际系统的模型进行试验。

一般说，只是在完成了以上这些工作之后，才有可能建造实际的控制系统。当然，以上所列几点并非一成不变、包揽无遗或者顺序固定的。它只是提供一种可能的较为合理的途径，并从中看到控制理论及其工程应用所涉及的范围。事实上，在设计过程中有许多步骤是要反复进行的。譬如为了建立一个便于数学处理的对象模型就可能在前四个步骤中反复进行。当对象已经具备并且条件许可时还可实际试验模型的合理性。在第五步建立控制方案时需要回答这样的问题：是否需要重新设计控制对象？采用开环抑或闭环控制？线性还是非线性控制？这一步是很重要的，设计者的创造性和智慧也往往表现在这里。其余所列步骤的必要性是明显的，它们的重要性也不能低估。

本书的中心内容是介绍自动控制系统分析和设计中一些基本的原理和方法，而重点则是在控制理论中历史最悠久、理论最完善、技术比较成熟、应用也最广泛的部分——线性系统理论，它在控制理论中一直起着基础和带头的作用，至今仍受到最多的注意。当然，本书介绍限于建立在传递函数和频率特性基础上的传统（或古典）的频率法和根轨迹法。至于60年代的状态空间理论，以及随后的多变量频域法等则不作介绍。事实上，实际工作中古典方法常常是最适用的，因为复杂理论所依据的精确模型往往难以得到，以致给出的设计结果并不比简单的控制方法更加优越。

关于线性定常连续系统的传递函数和频率响应函数两种数学模型在第二、五章中分别介绍。第三章介绍时间响应，特别是低阶系统的时间响应，建立控制系统动态过程的初步概念。第四章和第六章是基于传递函数模型的系统稳定性代数判据和稳态误差分析方法，同时介绍关于系统对参数变化的灵敏度的概念，以加深对反馈作用的认识。第七、八两章是基于频率法的系统分析和设计。第九、十两章则是基于根轨迹法的系统分析和设计，它们