

**ZIDONG
KONGZHI
LILUNJICHU**

自动控制理论基础

杨位钦 谢锡祺 编著

上册

北京理工大学出版社

1.822
684.1
=1

自动控制理论基础

上册

杨位钦 谢锡祺 编著

34587/20

北京理工大学出版社



(京)新登字149号

内 容 简 介

本书系大学本科教材,上册共十一章,适于60~80学时使用。本书阐述基于传递函数的经典控制理论,研究线性定常连续系统(数学模型、时间响应、频率响应、根轨迹法和频率法的系统分析与设计)和非线性控制系统(相平面法、描述函数法和波波夫法)。总结多年教学经验,参考现有国内外教材特点,内容经过精选,叙述透彻,强调基本概念和工程背景,实例多,适应面宽。正文中穿插附有答案的自学题,章末有大量的习题(附有部分答案),便于读者自学。与本书配套的有习题解集和计算机辅助教学软件。读者对象为各类高等学校自动控制类专业师生,从事自动控制、工业自动化的科技工作者。

自动控制理论基础

上册

杨位钦 谢锡祺 编著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县向阳印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 28.125印张 647千字

1991年12月第一版 1985年9月第二次印刷

ISBN 7-81013-464-7/TP·39

印数:5501—9500册 定价:21.50元

前 言

自动控制理论及其应用在许多工程技术基础教学中占有愈来愈重要的地位,随着科学技术的不断进步,传统的和现代的自动控制理论在内容上也有很大的扩展和更新。我们编写《自动控制理论基础》一书的目的是:(1)能更好地满足工科控制专业学生对传统的和现代的控制理论基本知识的要求,为后续课程(包括有关的选修课和研究生课程)扩大和加深某些领域的学习打好基础;(2)根据多年来在本课程教学和科研实践中的经验和体会,参考国内外常用的和近期出版的教材和专著,广采精选反映到这本教材之中,以方便教与学。

本书的编写得到北京理工大学自动控制系《控制理论与应用》教研室主任——张兆华教授和有关教师的热情关怀,他们根据多年从事教学的经验和本课程教学大纲的要求,在使用了本书初稿后提出了许多有益的修改意见。

本书经王子平教授审阅,他对编写的内容和文稿都提出了许多宝贵的意见和建议。

作者在此向他们表示由衷的感谢。

全书共二十一章,分上、下两册出版,一至十一章为上册,十二至二十一章为下册。其中第一至第十章由杨位钦教授执笔,第十一至第二十一章由谢锡祺副教授执笔。书中有关控制方面的名词术语参照并采用我国《自动化名词审定委员会》所认定的规范词。

囿于作者的学识水平,不当或疏漏之处,热忱欢迎读者不吝指正。

作 者

一九九一年六月

上册 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	(7)
习题	(8)

第二章 线性连续系统的数学模型

2.1 引言	(10)
2.2 传递函数模型	(12)
2.3 状态空间模型	(15)
2.4 模型的线性化	(20)
2.5 机械装置的数学模型建立举例	(22)
2.6 电路和电机的数学模型建立举例	(24)
2.7 其他动力学器件的数学模型	(31)
2.8 反馈控制系统的数学模型	(33)
2.9 反馈控制系统数学模型举例	(35)
2.10 框图的等效变换	(46)
2.11 信号流图和梅逊公式的应用	(49)
习题	(52)

第三章 线性定常系统的时间响应

3.1 引言	(58)
3.2 传递函数和时间响应	(59)
3.3 用状态空间模型求时间响应	(63)
3.4 一阶系统的时间响应	(66)
3.5 二阶系统的时间响应	(68)
3.6 具有零点的二阶系统	(75)
3.7 三阶系统的时间响应及高阶系统的近似分析	(79)
3.8 控制系统的过渡过程品质指标	(83)
3.9 系统对参数变化的灵敏度及反馈的作用	(87)
习题	(95)

第四章 线性系统的稳定性和劳斯判据

4.1 引言	(101)
4.2 稳定性的定义和条件	(102)

4.3 稳定性的劳斯判据	(106)
4.4 劳斯阵列的特殊情况	(110)
4.5 劳斯判据应用举例	(113)
习题	(116)

第五章 线性定常系统的频率响应

5.1 引言	(121)
5.2 频率响应函数	(121)
5.3 频率响应的带宽和谐振峰	(125)
5.4 频率特性灵敏度	(129)
5.5 波德图	(132)
5.6 最小相位系统和波德幅相关式	(143)
习题	(146)

第六章 稳态误差分析

6.1 误差和误差信号	(150)
6.2 系统的类型和典型作用下的稳态误差	(153)
6.3 误差系数和稳态误差的计算	(160)
6.4 系统类型和闭环传递函数的关系	(164)
6.5 反馈控制对稳态误差的补偿	(165)
习题	(167)

第七章 根 轨 迹

7.1 引言	(172)
7.2 根轨迹的定义和基本原理	(175)
7.3 根轨迹的性质和绘制方法	(177)
7.4 根轨迹作图示例	(184)
7.5 利用根轨迹确定参数和系统响应	(194)
7.6 根轨迹图的一些推广	(197)
7.7 根对参数变化的灵敏度	(203)
习题	(207)

第八章 系统设计的根轨迹法

8.1 引言	(212)
8.2 超前控制的概念和设计方法	(215)
8.3 根轨迹超前控制设计的解析算法	(222)
8.4 滞后控制的概念和设计方法	(224)
8.5 PID控制及其解析设计	(230)
8.6 控制器的实现	(234)
习题	(238)

第九章 频率特性和系统的稳定性

9.1 引言	(244)
--------------	---------

9.2 围线映射和柯西辐角定理	(245)
9.3 乃奎斯特稳定判据	(248)
9.4 开环含有积分环节时判据的应用	(257)
9.5 相对稳定性	(262)
9.6 闭环频率特性的作图	(267)
习题	(274)

第十章 系统设计的频率法

10.1 引言	(230)
10.2 比例控制器和滞后控制的设计	(281)
10.3 超前控制的设计	(287)
10.4 频率域设计的解析算法	(291)
10.5 滞后-超前控制的设计	(295)
10.6 PID控制的设计	(299)
10.7 PID参数的解析设计	(301)
10.8 反馈校正的近似计算	(303)
习题	(309)

第十一章 非线性控制系统

11.1 非线性系统概述	(315)
11.2 常见的典型非线性特性	(319)
11.3 相平面法基本概念	(322)
11.4 解析法绘制相轨迹	(324)
11.5 图解法绘制相轨迹	(326)
11.6 由相轨迹求时间响应曲线	(331)
11.7 平衡点、平衡线	(332)
11.8 极限环及本迪森定理	(339)
11.9 二阶线性控制系统的相平面法分析	(341)
11.10 非线性控制系统的相平面法分析	(345)
* 11.11 控制信号受约束的二阶时间最优控制系统	(358)
11.12 描述函数法的基本概念	(360)
11.13 典型非线性特性的 $N(X)$ 及 $-1/N(X)$ 曲线	(362)
11.14 非线性控制系统的描述函数法分析	(372)
11.15 * 波波夫法	(383)
11.16 多回路非线性控制系统的应用	(389)
习题	(390)

上册 附录

附录一 拉氏变换表	(394)
附录二 重根点处根轨迹的离开角和进入角	(396)
附录三 解析设计方程	(398)

上册 习题 选 答

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，在夏天则用热泵（一种空调机）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，其原理可以用很普通的系统为例说明，如用定温器来控制室内加热炉就是如此。图1.1描绘了系统中的主要元件及其相互关系，我们把这种图称为元件框图，在方框中标出了主要元件，并且用箭头表示了信息和能量从一个元件到另一个元件的

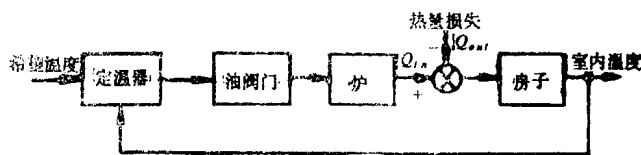


图1.1 室温控制系统的元件框图

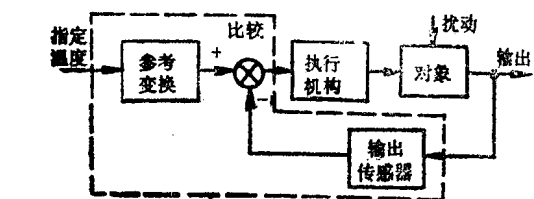


图1.2 简单反馈控制系统的功能框图

流动方向。这个系统的定性分析如下，假定室内温度（定温器装在室内）和室外温度都比要求的温度明显偏低，则定温器接通，炉子的油阀门被打开，使炉子点火，热风机运转，热被送到室内，如果炉子设计得当，往房子的输入热量 Q_{in} 应比房子热量损失 Q_{out} 大得多，因而室温将上升直到室温略微超过定温器的设定值，这时炉子将被关上，室温开始向室外温度值方向降低，当它比定温器设定值低(1°C 左右)时，定温器再次接通，重复上面的循环过程。

把图1.1控温系统按各部分的功能可以分解成图1.2所示的功能框图。框内注明了各自的功能。框图中的核心部分是某个“过程”或“对象”，它的变量是需要控制的。在控温例子

中，对象就是房间，输出信号是室内温度，扰动信号是从室内外传的热量，这是通过墙壁向室外低温环境进行的热传导（风以及打开窗户等必会产生这种扰动）。执行机构是能够影响过程的装置或设备，如控温所用的燃油炉，其中有阀门、鼓风机和指示器等。应当指出，一个复杂系统的执行机构本身，可能是用带反馈或不带反馈的控制来实现的，其目的例如是使控制作用的接通或断开的循环时间达到较高的运行效率。因此系统中某一部分本身可能形成另一个反馈系统或子系统，对这些细节这里姑且省略。

图1.2中虚线内的二部分——设定温度的参考变换，输出量的传感器以及比较器（用记号⊗表示）是定温器功能的分解。从反馈控制的原理来说，为了控制的需要必须对输出量（室温）进行测量，对输入指令（要求的室温）进行设定，并将二者加以比较。下面我们来看这三个任务如何由定温器来完成。图1.3是气动式定温器的原理图。它由温度设定指针、双金属片挡板、空气喷嘴、气动执行阀等组成，实际上它是一种气动功率放大器，以具有一定压力（ P_1 ）的空气作能源，加压的空气通过节流孔从喷嘴对着挡板喷射，当挡板接近喷嘴时，空气流过喷嘴的阻力增大，使背压 P_1 增加。如果喷嘴被挡板完全关闭， $P_1 = P_2$ ，反之挡板和喷嘴间的距离 x 增大，空气流动阻力减小， P_1 的最低值等于环境压力。可见挡板和喷嘴间距离的微小变化（ x ）可以引起喷嘴中压力 P_1 （背压）较大的变化。喷嘴通过管道和执行阀膜盒一侧的空腔连接，腔内压力 P_2 随 P_1 增减而增减，薄膜的

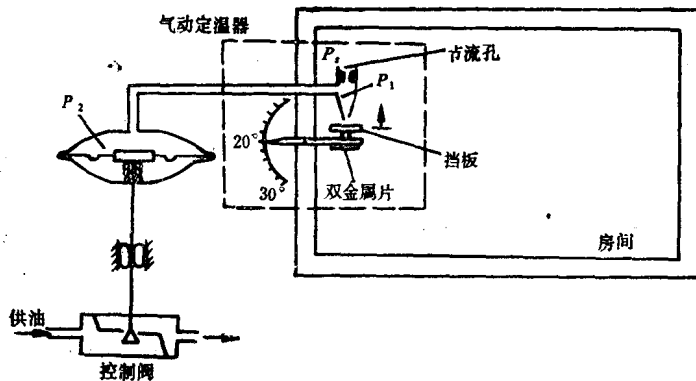


图1.3 定温器原理图

另一侧有弹簧和压力 P_2 平衡，同薄膜相连的阀杆随 P_2 变化而上下移动控制阀门的开度大小，从而改变燃料油的流量。

挡板和喷嘴间的相对距离 x 由两个因素决定：一是人根据室内温度要求值事先定好的指针位置，另一因素是室内实际温度造成的双金属片的变形量。在指针位置一定的情况下（如图示 20°C 位置），若室内温度偏高，双金属片的变形会使喷嘴挡板间的距离减小，室温偏低则相反。所以双金属片起敏感元件（或测量元件）的作用，距离 x 的变化对应于室温在设定值这个参考基准上的增减，即相当于设定温度值和实际温度值比较后的差值信号，从定温器的功能分析不难看出图1.2虚线框中三部分的作用是如何具体实现的。在其他实际系统中，相应功能可能是通过电气的、机械的、液压的装置来实现的，而且构造上往往是不可分的。

图1.2是一般反馈控制系统的最基本的功能。虽然上面以及以后还会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适合于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面临的控制任务。

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展了水钟(“铜壶滴漏”)①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形状适当的浮子和供水管组合构成的。

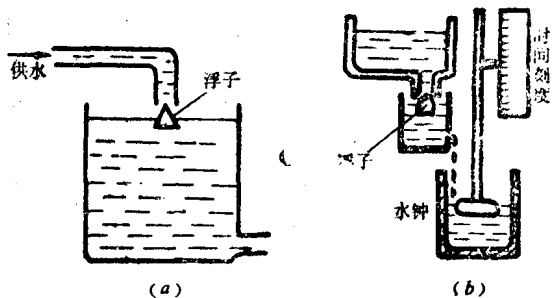


图1.4 古代的液面和流量控制

大约在1620年 Drebhel 设计的鸡蛋孵化器是恒温控制的一个很好的反馈系统,孵化器是用火通过孵化器内外夹层中的水间接加热的,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。

有记载的一个著名的自动控制问题是转速的控制,它看来是由于风力磨房中辗压辊的速度需要控制而产生的。在各种控制方法中利用飞球离心摆是一种较好的方案,这种控制器装置根据测量转速,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

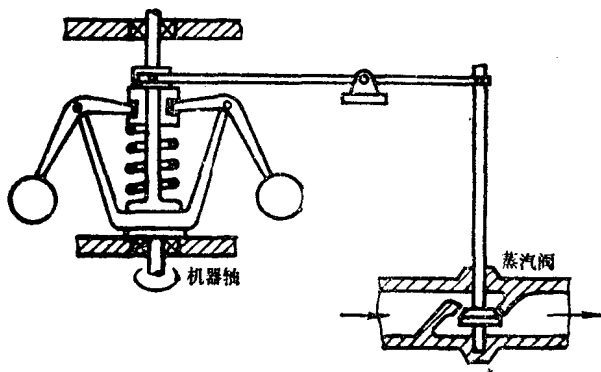


图1.5 离心调速器的应用

球离心调速器广为人知的并非风力磨面机,而是1788年左右瓦特所发明的蒸汽机,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(它在这里是执行器)打开以使更多的蒸汽进入机器从而使速度大体上能复原。为了

使阀门维持在这个新的开启状态,飞球张开的角度自然和原先(未加负载时)不同,这意味着在有负载时的速度实际不会完全和原先的速度相等,亦即负载的变动产生了转速误差。如果该误差在允许范围内,则上述控制已满足要求,若要求转速不因加上负载而变化,可以设法改变阀门的阀杆长度。后来的发明者设计了自动重新调整机构实现了转速恒定。

① 刘仙洲著“中国古代机械史”,李约瑟著“中国科技史”。

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 探讨了为了使根具有负实部多项式系数应满足的条件，但他只做到二阶和三阶的情况。

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，至今仍得到广泛应用。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以便弥补损耗。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），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，经过调试可获得满意的控制效果。在同一时期，由于用作测量飞机高度和速度的传感器的研制与开发，飞机的导航和控制装置也有很大发展。

第二次世界大战期间，军事科学的需要，如飞机驾驶，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当系统参数变化时特征方程式根的变化的几何轨迹，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空间时代而提出的。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，而且由于数字计算机的发展已经有可能对 10 年前尚不可能实现的计算问题进行计算。大体在这个时候，Lyapunov 的工作才被介绍到控制中来，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进行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。当然,它的基础应当说是十九世纪后期由Maxwell、Routh和Lyapunov所建立了的。

在70年代和80年代,控制理论也在不断发展和充实。新的关于最优控制的理论由苏联的L.S.Pontryagin,美国的R.Bellman等提出。现在人们必须同时考虑用时间域和频率域的方法来分析和设计控制系统。人们想办法如何充分和最好地利用已提出的方法来设计控制系统(有人幽默地把从各种方法中随意取用称之为“自选控制”——eclectic control)。也就是说,作为熟练的控制工程师应当懂得许多方法,能够根据自己要解决的问题选择最为适当的方法,并且能够应用这种方法来指导实现计算机的运算。

以上是自动控制理论和应用的历史发展概况。可以看出,古代文明尚不足以使其上升到科学的高度,后来由于同先进的生产力联系起来,而且伴随着人类的知识技术准备的日臻成熟,而使控制理论不断发展完善。现在和未来,控制理论及其应用还将十分活跃,它的影响将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节中所举的室内温度控制的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影响对系统的控制,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**。实际上闭环控制系统也就是反馈控制系统,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**,这种系统的输出量对系统的控制作用没有影响。在开环系统中,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围,把信息存

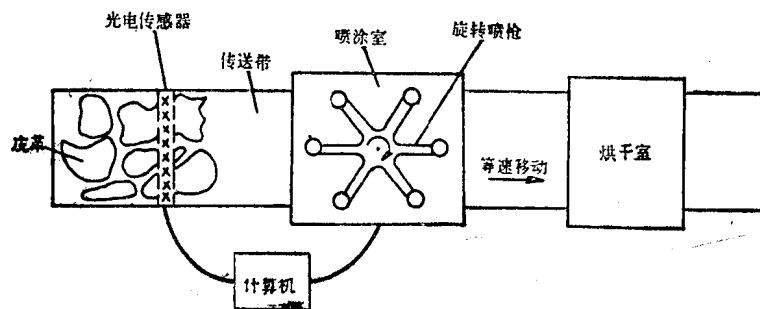


图1.6 皮革喷涂机顶视图

入计算机,当皮革进入喷涂室时,旋转着的喷枪(8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,当转到适当的角度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。应当指出,沿时间轴单向运行的任何系统都是开环系统。一般说,如果输入量与输出量之间的关系已知,并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,闭环控制就显得优越。

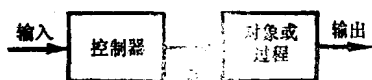


图1.7 开环控制系统框图

1.1节中室温控制就是闭环控制的例子,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,它必可以做成开环的,这时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,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。这里电机是控制对象,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在电机轴上安装一台测速发电机,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。为了说明闭环控制的特点,我们还将在后面对开环和闭环进行对比。

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1.8)。

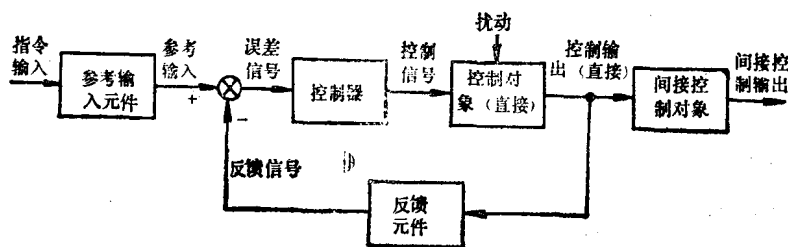


图1.8 闭环系统组成框图

图1.8和图1.2大体相同,它代表了更为一般的闭环控制系统框图。我们说这是一个基本组成形式,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。需要指出的是,关于控制器和控制对象之间的界限有时并不明显。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?这里用来区分的主要着眼点是扰动输入的主要影响是控制对象。控制对象根据实际问题是多种多样

的，它可以是具体的物理系统，诸如一架飞机，一部跟踪雷达，一台铣床，一个衣服烘干机，或者是一个机器人。控制对象也可以指一个过程，诸如化学成核反应过程、结晶过程、水的净化或热的传导过程等。控制对象可以是生物的、或者是人口统计的（例如人体中的血流量，某种动物群体的数量，一个国家的人口增长），它甚至还可以是政治的、社会的、经济的或是它们的某种组合等。

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，必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，如供热系统受控的温度是系统的输出。但在有些情况下，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——称其为间接控制输出。

下面来介绍闭环控制系统中经常提到的一些关于变量的术语和意义。闭环系统中的变量大体可以分成以下几类：

一般性的变量：输入信号——加于系统或元件的信号；输出信号——由系统或元件产生的信号。

回路中的一般性变量：回路反馈信号——在一闭合回路中，由某个特定的输入信号经过回路传输后产生的信号，该信号与上述输入信号相减；回路误差信号——在一闭合回路中，其输入信号与相应的回路反馈信号相减后得到的信号。

控制系统的变量：控制输出——指受到控制的任何变量的统称；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——它不是用来产生反馈信号的控制输出，但它和直接控制输出有关；参考输入信号——是在控制回路之外的一个信号，它作为和控制输出进行比较的基准量；系统反馈信号——由参考输入信号经过控制回路后产生的回路反馈信号；系统误差信号——参考输入信号减去系统反馈信号后得出的信号，也称激励信号；指令——独立于自动控制系统之外所建立的输入量，它和控制输出的单位相同，用来设定和等价于理想的控制输出；控制信号——是依一定规律随系统误差信号变化的量，它用来改变系统的直接控制输出；扰动——加于系统的不希望有的作用，它对控制输出的值产生不利影响。

上面是一些通用的常见的术语。在以后的章节中，将结合讨论所涉及的内容引入一些必要的新的名词术语。

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。分析方面涉及确定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或进入稳态，而达到稳态之前，系统的行为称为过渡响应或暂态过程。如果系统是不稳定的，则它不可能进入平衡状态或稳态。从数学上说，它的过渡状态将无限斜地继续下去。而实际上，它将一直继续直至受到某种物理条件的约束为止。例如受放大器或电动机的饱和和极限的限制，或者系统本身被损坏等。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。

如果已有的系统经过分析,其动态响应是满意的,则不存在进行设计的问题。如果响应不满足要求,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响应使其满足要求。

分析和设计系统往往是互相联系、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?因此,第五步是很重要的,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。

本书的中心目的是介绍自动控制系统分析和设计中一些最基本的原理和方法。整个内容大体可分成四部分,即以传递函数方法为主的线性定常连续控制系统原理部分(第二至十章),非线性系统原理部分(第十一章),线性定常离散控制系统原理部分(z 传递函数法)(第十二至十三章),以及以状态空间方法为主的现代控制系统理论部分(第十四至二十一章)。第二章中关于状态空间模型的介绍是初步的,目的在于更直接地和传递函数的概念和方法相对照,如果读者愿意把这部分内容抽出来并不会影响其他内容的学习。这和有的教材把传递函数同状态空间方法融为一体来编写是有区别的。

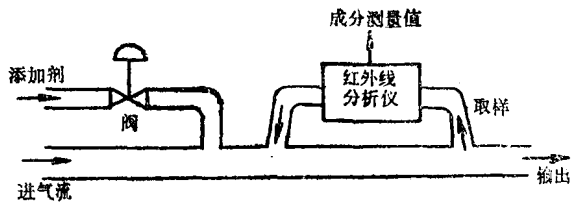
本书目录中带有*号的部分可以酌情取舍。各章正文中均安排有若干自学题,其难度比习题小,目的在于:(1)给读者检验并加强对已学基本内容的掌握;(2)对正文叙述作简洁的补充。

习 题

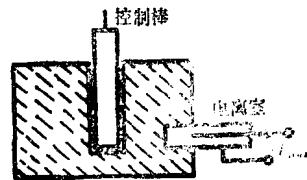
1.1 在化工过程控制系统中需要对化工产品的化学成分进行控制,为此利用红外线分析仪对成分进行测量(如图 P1.1),通过调节添加剂流量的阀门可以改变产品成分。试画出描述控制回路工作原理的反馈控制框图。

1.2 核电站中核反应堆的精确控制是很重要的,设发电功率和产生的中子数成正比,电离室用来测量电功率,电功率和电流成正比,石墨控制棒的位置可以改变功率。画出图 P1.2 所示核控制系统的框图并说明控制过程。

1.3 磁悬浮控制系统如图 P1.3,钢球由电磁铁吸引悬浮在空中一定的位置上,这时射

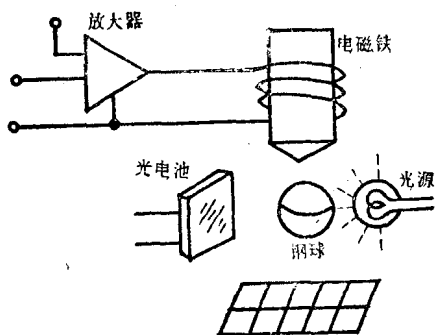


P1.1

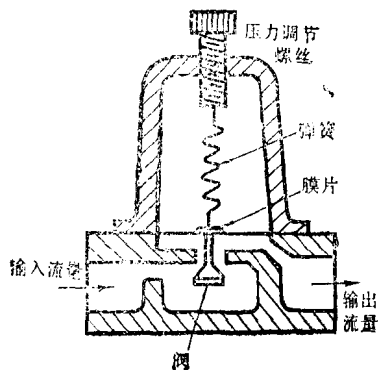


P1.2

向光敏电池的光线被钢球挡住。当小球偏离要求位置时，光照到光电池上再通过电压和功率放大使电磁铁的电流改变，从而调节对钢球的吸引力使它回到要求的悬浮位置。试画出闭环控制框图。



P1.3



P1.4

1.4 图 P1.4 是一个常用的压力调节器剖面图。旋转上面的调节螺丝可以设定希望的压力，压紧弹簧对膜片的向上移动施加相反的力，膜片底面受到水的压力，这个压力是我们加以控制的，膜片如果向上移动则表示希望的压力和实际的压力之间有压差，膜片上联有一个阀，它根据压差而运动并停留在使压差为零的位置。试以输出压力为被控制变量画出控制作用的框图。

1.5 画出一个冰箱的温度反馈控制框图。

1.6 画出一个电梯位置反馈控制系统框图。如何测量电梯的位置？

第二章 线性连续系统的数学模型

2.1 引言

控制系统分析和设计中的一个关键问题是确定物理系统的数学模型,以便定量地给出系统中一些变量之间的相互关系。所谓模型,就是基于对系统的知识所建立的关于系统某一方面属性的描述。当然,和模型有关的因素可能很多,在建立模型时不可能也不必把一些非主要因素都囊括进去而使模型过于复杂,以致难于理解和实际应用。

在控制系统中,输入和扰动往往随时间改变,因此系统中的变量都和时间有关,所以系统模型通常是以时间为自变量的动态模型。由于实际系统种类各异,描述系统属性的动态模型可有以下几种不同的分类。

1. 分布参数系统和集总参数系统模型 分布参数系统中物理参数是在空间中连续分布的,如弹簧有分布质量,导线有分布电阻,物体有弹性而非刚体等,因此系统变量不仅随时间,也随空间坐标的变化而变化,由此导出的动态数学模型是以时间和空间坐标为自变量的偏微分方程。流体力学、热传导、柔性固体弹性动力学中都不乏分布参数模型的例子。

在集总参数系统中,假定物理特性集中在空间中的一个或一些离散点处,这样得到的动态模型是仅含时间自变量的微分方程。例如假定某物体为刚体,并认为是质点,弹簧没有质量,导线没有电阻。这便可导出集总参数模型。集总参数模型具有参数集中、能量集中、信号传递无延时的特点,而分布参数模型则与此相反。

使用集总参数模型可以使数学模型大为简化。本书所讨论的控制系统都采用集总参数模型。严格说来,大多数固体、流体和电路都具有分布参数,因此在用集总参数表示时必须谨慎处理。

2. 非线性系统和线性系统模型

这是从另一个角度对系统模型的分类。我们知道,在变换、运算和函数关系中,或者一般地说,在任何一种映射关系中,所谓“线性”是指它具有以下两个性质:

(1) 可加性 即在属于函数 f 的域内任意的 x_1 和 x_2 有

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2)$$

(2) 齐次性 即在属于函数 f 的域内任意 x 和任意标量常数 a 有

$$f(ax) = af(x)$$

这两个性质就是线性系统中常用到的叠加原理。一切不满足这两个性质的函数都是非线性的。微分算子 $d/dt(\cdot)$ 和积分算子 $\int(\cdot)dt$ 属于线性算子,因为它们满足上述叠加原理。一个时间函数 $x(t)$ 的拉普拉斯变换定义为

$$\mathcal{L}\{x(t)\} = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st}dt$$