〔美〕F.H.Raven著

范振武 荣深涛 译

自动控制工程

ZIDONG
KONGZHI
GONGCHENG

中国铁道出版社

自动控制工程
Automatic Control Engineering
〔美〕F.H.Raven 著
范振武 荣深涛 译
中国铁道出版社出版
责任编辑 何生泰 封面设计 刘景山
新华书店北京发行所发行
各 地 新 华 书 店 经 售
中国铁道出版社印刷厂印
开本：850×1168 1/32 印张：19.375 字数：501千
1984年2月 第1版 1984年2月 第1次印刷
印数：0001—10,000册 定价：2.80元

内 容 簡 介

本书共十四章。由控制元件讲起，进而论及控制系统、稳态工作、拉普拉斯变换、瞬态响应、根轨迹法、模拟计算机、状态空间法、数字控制系统、频率响应法、系统补偿、描述函数以及相平面法与李亚普诺夫法等内容。第一至七章由范振武翻译，第八至十四章由荣深涛翻译。

本书的特点是层次分明，循序渐进。对基本理论的分析比较透彻，例如从建立系统的数学模型开始，直到用拉氏变换法求解高阶常系数线性微分方程的每一步骤都讲得很清楚。在建立和求解系统的状态方程和输出方程，以及对各种途径与方法，都结合例题，作出详细的论证。因之，本书适于自学或作为工科院校的教材或参考教材。

译者前言

本书作者F.H.Raven是美国圣玛丽大学机械工程系教授。他曾写过《工程系统数学》一书（1966年）。《自动控制工程》这本书是从他多年来在该校讲授这门课的讲稿整理补充而成的。作者曾以本书为教材，在夜校对有经验的工程师们讲课，取得良好的效果。翻释时采用了1978年由McGraw-Hill书籍出版公司出版的第三版英文版本。这个版本1980年美政府在我国举办的美国图书展览会上曾作为高校推荐教材展出过。

这本书的主要特点是对基本理论的分析比较透彻细致。例如从建立系统的数学模型开始，直到用拉氏变换法求解高阶常系数线性微分方程的每一个步骤，都交待得十分清楚。在建立和求解系统的状态方程与输出方程时也是这样，各种可能的途径与方法都结合例题作了详细的论证。

作者很注意循序渐进的叙述方法。例如在建立数学模型时，首先采用运算子法，而没有像通常的教材那样直接采用拉氏变换法。这样取得了把线性常微分方程代数化的效果，但却保留了清晰的物理概念，其后在求解和分析系统时，才逐步引用拉氏变换法，实践证明这样较易为学生所接受。

在近代控制理论方面本书只介绍了状态空间法和数字计算机控制二章，此外在非线性系统的末二章中还包括了李亚普诺夫稳定性理论，从整体来说这当然是很不全面的。但由于近代控制理论所包括的范围极广，若不仅是罗列，而要把每一个问题都阐述清楚，就需要浩繁的篇幅，对初学者来说这样做未必适宜。不若先把系统限定于确定性的单输入单输出系统（SISO），也就是除经典理论之外，近代理论中主要讲SISO系统，把此作为本书限定的范围，以便在掌握了这部分理论之后，再循序渐进较为可

靠。本书这种处理经典理论与近代理论关系的办法，译者认为是比较合理的。

应当指出的是，本书虽未列专门一章来论述最优控制理论，但对SISO系统采用状态变量线性反馈法以及采用数字控制器实现最优控制方面的介绍却是通俗易懂、且具有实用价值的。

本书可作为工科院校的教材或参考教材，也适宜初学者的自学。限于译者的水平，错误在所难免，请读者批评指正。

目　录

第一章　自动控制导论

§1—1　发　展　史

古代人不得不依靠他们自己的体力或畜力来提供作功的能量。利用简单的机械装置，如滑轮和杠杆，人们完成了像建造高大的金字塔，罗马大道，以及高架过水桥等伟大业绩。人们首先利用自然界的动力来补充他们的能量和牲畜的能量，如利用风驱动帆船和风车，利用瀑布驱动水轮等。蒸汽机的发明是人类进步的里程碑，因为它提供人们以可随意利用的动力。此后，为了获得丰富和方便的能源，人们设计出了许多不同的装置。工程技术工作，首先是研究动力的实际应用，去为人类服务。这就是说，为了人们更有效地利用动力，工程师设计和改进了许多机器和设备。

早期的机器和设备主要依靠人力来控制，为了保持预期的输出或性能，必须频繁、重复地调节。设计用途多、容量大的新式设备，促使控制装置的发展与日俱增。其原因有二。第一，自动控制能免除人们很多单调的工作，使他们可以把自己的才能，集中于其他的努力；第二，现在复杂的控制系统所能执行的功能，已成倍地超出人的体力。例如，由一个完善的自动控制系统，去控制一架现代喷气式飞机的发动机，只需飞行员花费很少的注意力，从而使他能够自由自在地操纵和驾驶飞机。

饶有趣味的是，随着控制装置的应用和使用的增长，对这些系统的性能要求也在增长。毫无疑问，今天工程师们主要关心的是自动控制系统的设计和发展，在将来更加是这样。

§1—2　反馈控制系统

温度调节装置是反馈控制系统的一个典型例子。温度指针的

位置按要求温度放置（即参考输入）。系统的实际温度是受控制的变量（即被控制量）。恒温计或比较器将实际温度与要求温度相比较，以测量其误差。这个误差信号是操作信号，被送到加热装置，以纠正实际温度。例如，若实际温度小于要求温度，操作信号就使控制元件供给更多的热。如果没有误差，控制元件就不改变热量的供应。当实际温度大于要求值时，那么，操作信号就要求减少供热量。

一个系统归类为反馈控制系统，它必须是把被控变量反馈到输入端，并与参考输入相比较；此外，还必须把比较产生的误差信号作用于控制元件，去改变输出，从而减小误差。反馈控制系统又叫做闭环系统。与恒温器相结合，去控制温度的任何系统，都是反馈系统或闭环系统。众所周知的例子有：带恒温器的电煎锅、电熨斗、电冰箱和家用加热电炉等。

对于速度控制系统来说，由参考输入减去反馈信号的装置（即比较器）通常是一离心调速器。调速器所起的作用与恒温器控制温度相似。即，调速器把被控制的实际速度与要求值相比较，并测量其误差，然后把这个误差信号作用于控制元件。上述基本概念同样适用于所有反馈控制系统，无论被控变量是温度、速度、压强、流量、位置、力、扭矩，或任何其他物理量。

在开环系统里，没有被控变量和期望输入的比较。每一个调定的输入信号，确定着控制元件的一个固定工作位置。例如，对于一个给定的温度输入，就使加热装置处于一个按固定速率供热的位置（注意，这里没有比较器或温差计来测量误差并重新调节加热装置）。这种系统的缺点可用下述事实来说明，如果以一定的速率向一间屋子供热，室内温度将明显地随外界温度的变化而变化。因此，对于一个开环系统的给定输入来说，被控变量可以随环境温度而有很大的变化。

在这个例子里，环境温度是一个外界扰动。所谓外扰动就是指系统之外的事物作用于系统，使被控变量发生变化或扰动。应用反馈控制的重大优点是，由于有比较器，操作信号可连续变

化，使被控变量趋向等于参考输入，而与外干扰无关。另外，一般地说，反馈系统采用较便宜的元件所得到的控制效果，比开环系统采用昂贵元件的控制效果还要好。这本教材把主要的精力集中于反馈控制系统。

§1—3　系统的表达式

控制系统的数学关系式通常用方框图来表示。与纯粹抽象的数学表达式相反，这种方框图具有更真实地表示实际发生过程的优点。另外，只要把系统的每个元件或每个部分的方框图合并起来，就很容易形成整个系统的总方框图。

比较器的作用是从参考输入 r 中减去反馈信号。对于被控变量 c 是直接反馈(即对于单位反馈系统)的情况来说，从比较器来的信号为 $r-c$，它等于操作信号 e。这个运算的数学关系式为

$$e=r-c \tag{1—1}$$

如图1—1所示，图中的圆是用来表示加法运算的符号。指向圆的箭头表示输入量，而离开圆的箭头表示输出量。每个输入箭头上的符号，或者表示数值相加，或者表示相减。

进入控制元件的操作信号 e 和被控变量 c（控制元件的输出）之间的关系式用下式表示

$$c=G(D)e \tag{1—2}$$

这里$G(D)$表示控制元件的运算式。在第二、三章里，将说明具体控制系统$G(D)$的实际值是如何求得的。上述方程式的方框图示于图1—2中。方框是乘法符号。在这里，输入量 e 乘以方框里的函数，得到输出 c。用圆表示相加点，而用方框表示乘法，则任何线性的数学表达式都可以用方框图的符号来表示。

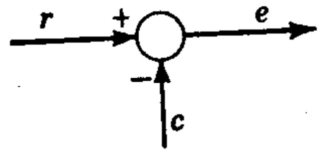

图1—1　比较器的方框图

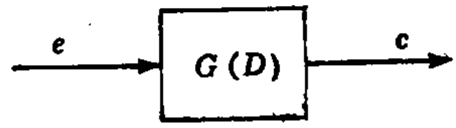

图1—2　控制元件的方框图

把图1—1和1—2联结为图1—3，就得到一个基本的单位反馈控制系统的完整方框图。这个方框图说明被控变量c是反馈到相加点去的，在这里，它与参考输入r进行比较。这个图以图解的方式说明了为什么反馈控制系统又叫做闭环系统的原因。

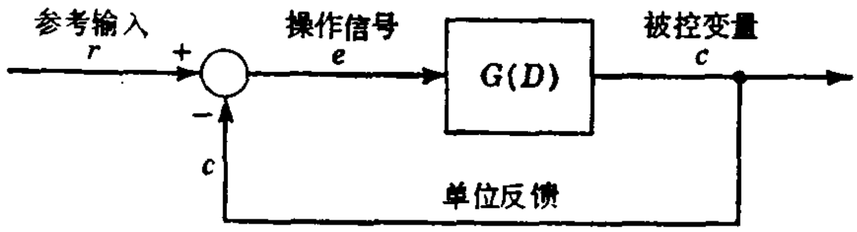

图1—3　单位反馈控制系统的方框图

当被控变量反馈到比较器的时候，常常需要将被控变量的形式转换成适合于比较器的形式。例如，在一个温度控制系统里，被控制温度一般转变为正比于比较器用的力或位置。这种转变由反馈元件$H(D)$来完成。反馈控制系统的这种更一般化的方框图示于图1—4，反馈信号为

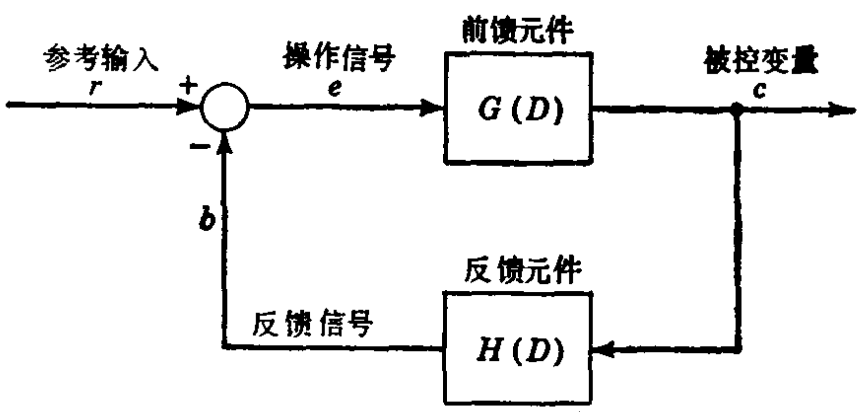

图1—4　反馈控制系统的方框图

$$b = H(D)c \qquad (1-3)$$

$H(D)$所代表的元件叫做反馈元件，因为它位于控制系统的反馈部分。用$G(D)$表示的控制元件叫做前馈元件，因为它位于环路的前馈部分。现在，操作信号e为$r-b$。这个操作信号e是误差的量度或误差的指示。

"反馈控制系统"这个词，是用于被控变量被检测并反馈去

与参考输入相比较的任何系统的通用名词。“伺服机构”和“自动调节器”这两个词的区别是：伺服机构是反馈控制系统的一个特殊类型，它的被控变量是机械位移(例如轴的角位移)。自动调节器也是反馈系统，把它区分出来，是由于其参考输入虽然是可调的，但在长时期内却是保持固定不变的（例如大多数温度控制器）。

第二章　控制元件的表达式

为了研究控制系统的性能，需要求出被控变量 c 和前馈元件操作信号 e 之间的数学关系式$G(D)$。这个任务可以这样来完成：首先为操作信号和被控变量之间的每个元件求得数学表达式，然后，把每一个这样的方程式表示成方框图，将每个元件的方框图联结起来，便得到所要求的表达式$G(D)$。对于控制系统反馈部分中的诸元件，应用同样的方法，可求得$H(D)$值。

函数$G(D)$也可以这样求得：写出描述 e 和 c 之间的每个元件工作的数学方程式，然后，将这些单个方程代数地联立起来，便可求得 e 和 c 之间的总关系式。然而，对于尽管是最简单的系统来说，这种步骤也是很笨拙的，因为在一个典型的控制系统里，不同元件之间是互相影响的。此外，由于方框图的形象化的表达式，能使人对系统有一个较好的理解。

本章说明如何求得控制装置里使用的典型元件的方框图。下章将指出如何将这些个别的方框图联结起来，以形成一个完整的控制系统。

§2—1　运 算 符 号

在书写控制系统方程式中，使用下述运算符号是很方便的：

$$D^n=\frac{d^n}{dt^n}\quad n=1,\ 2,\ 3\cdots \qquad (2-1)$$

算子D表示对时间微分的一种符号。例如，如果 x 和 y 都是时间的函数，那么

$$D(x+y)=\frac{d}{dt}(x+y)=\frac{dx}{dt}+\frac{dy}{dt}=Dx+Dy$$

这表明算子D服从分配律，即

$$D(x+y)=Dx+Dy$$

它也表明，如果a和b是常数，则

$$(D+a)(D+b)y=(D+a)\left(\frac{dy}{dt}+by\right)$$

$$=\frac{d}{dt}\left(\frac{dy}{dt}+by\right)+a\left(\frac{dy}{dt}+by\right)$$

$$=\frac{d^2y}{dt^2}+(a+b)\frac{dy}{dt}+aby$$

$$=[D^2+(a+b)D+ab]y$$

因此，交换律也成立，即

$$(D+a)(D+b)y=(D+b)(D+a)y$$

研究一微分方程

$$\frac{d}{dt}x(t)+ax(t)=f(t)$$

使用运算符号，这个微分方程可写为

$$(D+a)x(t)=f(t) \qquad (2-2)$$

求解这个微分方程，首先，两边通乘以e^{at}，即

$$e^{at}\left[\frac{d}{dt}x(t)+ax(t)\right]=\frac{d}{dt}[e^{at}x(t)]=e^{at}f(t)$$

积分得

$$e^{at}x(t)=\int f(t)e^{at}dt+C$$

这里C为积分常数。求解上述方程的函数$x(t)$，该函数满足微分方程，得

$$x(t)=e^{-at}[\int f(t)e^{at}dt+C] \qquad (2-3)$$

校验该函数$x(t)$是否满足微分方程，请注意：

$$Dx(t)=\frac{d}{dt}x(t)=-ae^{-at}[\int f(t)e^{at}dt+C]$$
$$+e^{-at}[f(t)e^{at}]$$

以及
$$ax(t)=ae^{-at}[\int f(t)e^{at}dt+C]$$

把它们相加就证明$Dx(t)+ax(t)=f(t)$。在式(2—2)中，又乘算子$1/(D+a)$，得

$$x(t)=\frac{1}{D+a}f(t) \qquad (2-4)$$

因为式（2—2）和（2—4）是同一微分方程的等价形式，由式（2—3）求出的$x(t)$应当满足式（2—2）和式(2—4)，即

$$\frac{1}{D+a}f(t)=e^{-at}[\int f(t)e^{at}dt+C] \qquad (2-5)$$

前面已经指出，把上式右侧的微分$\frac{d}{dt}$与a乘右侧的结果相加，就可得$f(t)$。因此，将式（2—5）的两边都乘以（$D+a$）得

$$(D+a)\frac{1}{D+a}f(t)=f(t) \qquad (2-6)$$

因为右边为$f(t)$，由此得出，左边的算子可以相消。一般，上式可以表示为

$$(D+a)^n\frac{1}{(D+a)^m}f(t)=(D+a)^{n-m}f(t) \qquad (2-7)$$

这里m和n为正整数

注解一个函数的微分的积分，就可获得D的倒数的意义：

$$y(t)=\int[Df(t)]dt=\int f'(t)dt=f(t)+C \qquad (2-8)$$

这里C是积分常数。上式两边对时间的微分为

$$Dy(t)=Df(t)$$

求解$y(t)$得

$$y(t)=\frac{1}{D}[Df(t)] \qquad (2-9)$$

比较式（2—8）和（2—9）证明

$$\frac{1}{D}[Df(t)]=\int[Df(t)]dt=f(t)+C$$

因此，符号$1/D$表示积分。

积分常数由式（2—8）在某合适的初始时间t_0时来确定。因此，求得

$$C=y(t_0)-f(t_0)$$

将此结果代回式（2—8）中得