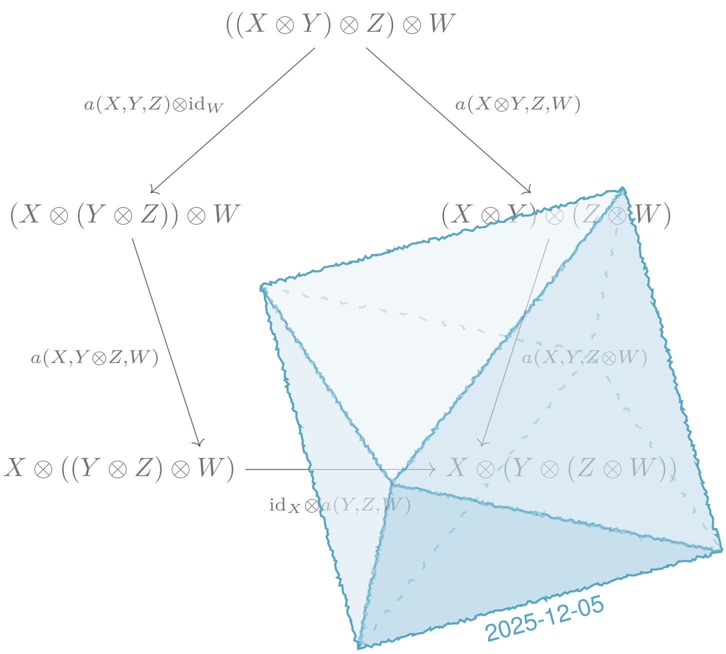
工程控制论

(新世纪版)

钱学森　　著



目录

汉文版序

本书原来是用英文写的, 当时作者尚在美国, 生活不安定, 所以写得很粗糙也没有能够引人非常重要的苏联文献。理当重写一遍, 补正这些缺点, 但是现在工作忙, 尚无暇及此。可是祖国的自动化事业在党的领导下正飞速发展, 工程控制论这门学科还是需要介绍。解决这样一个矛盾的办法是: 请戴汝为同何善🄵两位同志根据作者 1956 年春季在中国科学院力学研究所讲工程控制论的笔记, 在译英文版的基础上加以补充。今年工程控制论的俄译本也出版了, 俄译本编校人费尔德包姆 (A.A. enb6aym) 很耐心地收集了有关的苏联文献, 加注到译文里。汉译者就利用了这些文献, 在适当的地方用 [···] 来加注, 其中数字相当于书后俄文文献的号数。作者和汉译者希望就这样初步地补正英文版的一些缺点。

钱学森

1957 年 8 月于北京

原序

著名的法国物理学家和数学家安培 (A.M.Ampère) 曾经给关于国务管理的科学取了一个名字–控制论(Cybernétique)[安培著: “论科学的哲学” (Essaisur la philosophie des sciences) 第二部,1845 年, 巴黎出版]。安培企图建立这样一门政治科学的庞大计划并没有得到结果, 而且, 恐怕永远也不会有结果。可是在这些年代中, 各国之间的战争却大大地促进了另一个科学部门的发展, 这就是关于机械系统与电气系统的控制与操纵的科学。维纳 (N.Wiener) 就借用安培所创造的名称“控制论”来称呼这门新的科学, 然而, 这门科学却是对于现代化战争非常重要的。这真是有些讽刺意味的。维纳的控制论(Cybernetics)[“控制论—关于动物体和机器的控制与联系的科学” (Cybernetics，or Control and Communication in the Animal and the Machine , John Wiley & .Sons, Inc. , NewYork，1948) 是关于怎样把机械元件与电气元件组合成稳定的并且具有特定的性能的系统的科学。这门新科学的一个非常突出的特点就是完全不考虑能量、热量和效率等因素, 可是在其他各门自然科学中这些因素却是十分重要的。控制论所讨论的主要问题是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质, 以及整个系统的总的运动状态。

工程控制论 的目的是研究控制论这门科学中能够直接用在工程上设计被控制系统或被操纵系统的那些部分。因此, 通常在关于伺服系统的书里所讨论的那些问题当然都包括在工程控制论的范围之内。但是, 工程控制论比伺服系统工程内容更为广泛这一事实, 只是二者之间的一个表面的区别, 一个更深刻的, 因而也是更重要的区别在于: 工程控制论是一门技术科学, 而伺服系统工程却是一种工程实践。技术科学的目的是把工程实际中所用的许多设计原则加以整理与总结, 使之成为理论, 因而也就把工程实际的各个不同领域的共同性显示出来, 而且也有力地说明一些基本概念的重大作用。简单地说, 理论分析是技术科学的主要内容, 而且, 它常常用到比较高深的数学工具。只要把本书稍微浏览一下就对这个事实更加清楚了。关于系统的部件的详细构造和设计问题

(也就是把理论付诸实践的具体问题) 在这本书里几乎是不予讨论的。关于元件的具体问题更是根本不谈的。

能不能够把理论从工程实践分出来研究呢? 其实, 只要看到目前已经存在的各门技术科学以及它们的飞速发展, 就会发现这个怀疑简直是完全不必要的。举一个特别的例子来说: 流体力学就是一门技术科学, 它与空气动力学工程师, 水力学工程师, 气象学家以及其他在工作中经常利用流体力学的研究结果的人的实践是“分割”开来的。可是, 如果没有流体力学家的话, 对于超音速流动的了解和利用至少也要大大地推迟。因此, 把工程控制论建成一门技术科学的好处就是: 工程控制论使我们可能有更广阔的眼界用更系统的方法来观察有关的问题, 因而往往可以得到解决旧问题的更有成效的新方法, 而且工程控制论还可能揭示新的以前没有看到过的前景。最近若干年以来, 控制与导航技术已经有了多方面的发展, 所以, 确实也很有必要设法用这样一种统观全局的方法来充分地了解与发挥这种新技术的潜在力量。

因此, 关于工程控制论的讨论, 应该合理地包括科学中对于工程实践可能有用的所有方面。尤其是不应该仅仅由于数学的困难而逃避任何一个问题, 其实深入地考虑一下就会发觉, 任何一个问题在数学上的困难常常带有很大的人为的性质。只要把问题的提法稍微加以改变, 往往就可以使问题的数学困难减轻到进行研究工作的工程师所能处理的程度。因此, 本书的数学水平也就是读过数学分析课程的大学生的水平。关于复变数积分, 变分法和常微分方程的基本知识是研读这本书所预先需要的。此外, 只要比较直观的讲法能够达到目的, 我们就不用严密的精巧的数学方法来讨论; 所以, 以一个专门作具体工作的电子工程师的眼光来看, 我们这种做法一定是太“学究气”了; 可是, 从一个对这门科学有兴趣的数学家的眼光来看, 这种做法可能是太“不郑重”了。倘若以上确是仅有的批评, 那么，承蒙各方指正之余，笔者将以为，我并没有违背自己写作这本书时的初衷（这句话在原译著上稍有修改，更接近原意)。

在编写本书期间, 作者从和他的两位同事的多次交谈中得益很多, 因为, 这些谈话常常使一些含混之处突然明确起来。这两位先生就是美国加利福尼亚省理工学院 (California Institute of Technology) 的马勃尔 (Frank E. Marble) 博士和德普利马 (Charles R. Deprima) 博士。由于寨尔登杰克梯 (Sedat Serdengecti) 和温克耳 (Ruth1.Winkel) 给予的有效帮助, 大大地减少了书稿的准备工作。对于以上提到的各位先生, 作者谨表示衷心的感谢。

钱学森

第一章 引言

如果我们所考虑的系统自由度是 1, 因此, 只用一个变数 y 就可以记录或描述这个系统的物理状态。把变数 y 取作时间 t 的函数, 也就可以描写这个系统在时间过程中的运动状态。为了确定这个运动状态–也就是函数 $y(t)$, 我们就必须知道这个系统的构造以及它的各个组成部件的特性。具备了关于系统的这些知识之后, 再根据物理学的基本定律把这些知识“翻译”成数学的语言, 这样我们就得到一个为了计算 $y(t)$ 而建立的方程。这个方程可能是一个积分方程, 也可能是一个积分微分方程, 但是在绝大多数的情况下, 它是一个微分方程, 而且是一个常微分方程, 因为只有时间 t 是唯一的自变数。

如果微分方程的每一项中最多只含有因变数 y 或者 y 的各阶时间导数的一次方幂, 不包含 y 或者它的各阶时间导数的高次方幂, 也不包含这些函数的乘积我们就说这个方程是线性的, 同时, 也就把这个方程所描述的系统称为线性系统。反之, 我们就说, 这个方程是非线性的, 同时, 把它所描述的系统称为非线性系统。更进一步, 还可以把所有线性系统分为常系数线性系统 和变系数线性系统 两类。如果描述系统状态的线性微分方程的每一项的系数都是常数, 我们就把这个系统称为“常系数线性系统”。如果这些系数不全是常数而是时间 t 的函数, 我们就把这个系统称为“变系数线性系统”。

从各类微分方程的解的特性来看, 以上的分类方法是有道理的。因为, 每个系统的运动状态的特性与描述这个系统的微分方程的类型是有密切关系的。不但如此, 微分方程的类型还能确定我们可以对系统提出的合理的问题的性质。换句话说, 微分方程的类型确定了解决系统的工程问题的正确做法。现在我们就来看一看这种情况。

1.1 常系数线性系统

让我们来讨论一个最简单的系统—一阶系统。也就是说, 微分方程是一个一阶的常系数线性方程。如果假定系统本身的特性不受到外界的影响, 并且不受到驱动函数(也就是外力) 的作用, 那么, 微分方程就可以写作下列形式:

$$\frac{dy}{dt} + ky = 0 \tag{1.1}$$

其中 k 是一个实常数, 可以叫作弹簧常数。当 y 不随时间变化时,dy/dt 等于零。根据方程(1.1)必定要有 $y = 0$。因此, 系统的平稳状态（或者平衡状态）, 就相当于 $y = 0$ 的状态。

方程(1.1)的解是

$$y = y_0 e^{-kt} \tag{1.2}$$

这里，y_0 是 y 的初始值，或者说

$$y(0) = y_0 \tag{1.3}$$

这样,y 也就是系统的离开平衡状态的初始扰动。对于正的 k 值和负的 k 值, 在图1.1里画出 $k < 0$ 了系统在 $t > 0$ 时的运动状态。我们看到, 在 $k > 0$ 的情况下,y 随着时间的增加而逐渐减小。当时间无限增大时, $y \to 0$。因此, 对于 $k > 0$ 的情形, 系统的扰动就会最后消失掉。于是我们就可以说, 系统是稳定的。在 $k < 0$ 的情况下, 系统的运动随着时间的增加而不断地增大, 而且不论初始的扰动位移多么微小, 系统的扰动都会逐渐增长到非常大的数值, 这也就是说, 一旦受到扰动, 系统就永远不能再回到平衡状态上去了。这样的系统就是不稳定的。对于阶数更高的系统来说, 微分方程里含有更高阶的导数。n 阶系统的微分方程就是:

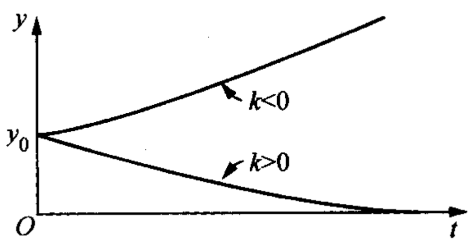


图 1.1:

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_0 y = 0 \tag{1.4}$$

对于实际的物理系统而言, 各个系数 $a_{n-1}, ..., a_0$。都是实数。在这种情况下, 方程(??)的

解可以写成

$$y=\sum_{i=1}^{n} y_0^{(i)} e^{a_i t} \sin(\beta_i t+\phi_i) \tag{1.5}$$