

工程系统动力学

〔联邦德国〕 曼弗雷德·希勒 著

叶谋仁 蔡忠全 译



上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了运用经典的分析力学方法求解现代工程系统——特别是力学系统的各种问题。全书比较系统地阐述了分析力学的基本原理,简要地介绍了工程系统的模型,对系统动力学与一般力学进行了对比,并与现代工程系统相结合,在系统动力学的概念上讨论了线性时不变系统和完整系统的解与稳定性问题。书中介绍了机械工程、自动控制、航空与航天技术中的一些实际例子。

本书内容通俗,阐述严谨清晰。书后还附有一定数量的习题,以便读者进一步理解和掌握有关的理论内容及其应用。

本书可作为高等学校应用力学、机械工程、工业自动化、自动控制与航空等类专业的研究生课程或高年级学生选修课程的教材,也可作为有关科学工作者、高等学校教师与有关科技人员的参考书。

工程系统动力学

上海交通大学出版社出版
(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

江苏常熟文化印刷厂排版印装

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 8.5 字数 180,000

1986年9月第1版 1986年12月第1次印刷

印数 1—3,500

统一书号: 15324·27

科技书目: 135—253

定价: 1.45 元

译者序

联邦德国斯图加特大学力学第一研究所曼弗雷德·希勒(Manfred Hiller)教授、博士于1983年来上海机械学院讲学,其中一部分讲学内容是关于《工程系统动力学》(*Dynamik Technischer Systeme*)的,这部分内容用的是希勒博士在斯图加特大学讲授“系统动力学 I”课程时的讲稿。此后他把讲稿略加修改写成本书,并由联邦德国 Springer 出版社于1983年出版,书名“*Mechanische Systeme—Eine Einführung in die analytische Mechanik und Systemdynamik*”。作者写本书的意图是应用经典的分析力学方法来解现代的系统理论问题,内容除涉及力学问题外,还涉及其他如控制、调节技术等现代系统理论问题,因而本书具有多学科性质。把经典力学方法与现代工程系统相结合,既可使某些现代技术问题得以解决,也可使经典力学能在现代技术中继续发挥作用。作者这一工作对有关学科的互相溶合与发展无疑是有益的,我们把它作为系统动力学的导论介绍给国内的读者,因而译本仍采用《工程系统动力学》这一作者来我院讲学时所用之书名。

本书对理论概念的阐述严谨清晰,并附有运用经典力学理论对机械工程、自动控制、航空与航天技术中的一些问题进行分析的实际例子。本书可作为高等学校应用力学、机械工程、工业自动化、自动控制与航空等类专业的研究生课程或高年级学生选修课程的教材;也可作为有关科学工作者、高等学校教师与有关科技人员的参考书。为使读者更好地理解与掌

握本书的内容,译本最后附有原著中没有的习题,这些习题是作者在讲学时带来的。此外,为了便于阅读,译本已将原著中的某些符号改成国内惯用的。

本书前言,第一、二、四、五、六章及所附习题由蔡忠全翻译;第三、七、八章及附录由叶谋仁翻译。朱继梅同志承担了全面校阅工作。由于我们的水平有限,译本中难免出现斑点与错误,亟盼读者予以指正。

在翻译过程中得到孙保国、王乃宁和曹祖植同志的大力帮助,我们谨对他们表示衷心感谢。此外还要感谢上海交通大学出版社为本译书的编辑和出版做了大量的工作。

叶谋仁 蔡忠全

1985年6月于上海机械学院

前 言

七十年代初,斯图加特大学开设了工程控制论学程^①,其目的是在工程科学基础方面满足现代化需要的教学要求。同时,通过相应的课程使这些工程科学基础知识能应用到各种不同的领域中去。因此,工程控制论学程具有边缘学科的性质,它主要应用于机械制造、加工工艺、航空与航天、电子技术、交通技术、生物医学和经济管理科学等方面。

工程控制论学程的主干课程由工程系统动力学 I 和 II 组成。前者涉及到力学系统、后者涉及到热力系统和化学系统。工程系统动力学 I 把分析力学的经典方法和系统动力学的现代课题结合起来。直到 1978 年为止,这门课由自然科学博士 Peter Sagirow 教授讲授。接着,课程由我担任,并对它作进一步的补充。在我补充整理时,使用了 Sagirow 教授以前的讲稿,为此,在这里对他表示万分感谢。

在工程系统动力学 I 课程的基础上形成的这本教材,它首先适用于工程控制、机械制造、加工工艺以及航空与航天技术的领域中攻读主学位的学生(假定他们已具有前期考试水平的数学、力学知识)。这本教材也适合于工程师和科学工作者,可使他们在本书的帮助下熟悉分析力学与系统动力学。为此,在书中某些部分引用了一些很详细的例子。

感谢 Renate Schenk 女士对手稿进行了认真的整理,感谢 Sieglinde Hiller 女士为本书耐心地制作插图,感谢 Ar-

^① 学程(Studiengang)是由一组互相关联的技术基础课构成的综合课程。

——译注

nold Kistner 教授、博士对手稿进行了仔细的审阅。此外,还要感谢斯图加特大学第一力学研究所的同事们的支持而使本书得以顺利完成。最后,还要对 Springer 出版社热情和愉快的合作表示感谢。

曼弗雷德·希勒

1983 年 4 月于斯图加特

目 录

一、导言与概述	(1)
1.1 系统的概念	(1)
1.2 系统动力学的任务	(2)
1.3 概述	(3)
二、有限多自由度力学系统	(6)
2.1 系统及其符号	(6)
2.2 约束	(6)
2.2.1 几何约束	(7)
2.2.2 运动约束	(9)
2.2.3 完整与非完整约束	(10)
2.3 自由度与虚位移	(11)
2.4 动力学主要问题	(13)
2.4.1 主动力, 约束反力	(13)
2.4.2 受约束系统的运动方程	(14)
2.4.3 理想约束	(15)
2.5 动力学基本方程	(16)
2.6 静力学定律	(17)
2.6.1 虚位移原理	(17)
2.6.2 刚体的平衡条件	(18)
2.7 达朗伯原理	(19)
2.8 动力学定律	(20)
2.8.1 定常系统的能量定律	(20)

2.8.2 第一类拉格朗日方程	(21)
三、完整系统	(28)
3.1 广义坐标	(28)
3.2 广义力	(29)
3.3 第二类拉格朗日方程	(31)
3.4 第二类拉格朗日方程的例子	(35)
3.5 以广义坐标表示的动能	(47)
3.6 完整系统总能量的变化	(50)
3.7 从哈密顿最小作用量原理推导第二类拉 格朗日方程	(53)
3.8 哈密顿正则方程	(56)
3.8.1 含有广义冲量的方程	(56)
3.8.2 哈密顿方程	(57)
3.8.3 势力场中完整系统的哈密顿方程	(58)
3.8.4 首次积分(守恒定律)	(59)
3.8.5 哈密顿-雅各比方程	(60)
3.8.6 哈密顿-雅各比方程和最佳系统理论 之间的关系	(62)
3.9 刚体的转动	(62)
3.9.1 欧拉角	(63)
3.9.2 卡尔丹角	(66)
3.9.3 欧拉角与卡尔丹角之间的对比	(69)
3.9.4 欧拉动力学方程	(69)
3.9.5 人造卫星相对于固结在轨道上的坐 标系的转动	(72)
3.9.6 在圆形轨道上人造卫星的引力稳定	(74)
四、非完整系统	(76)

4.1	非完整系统的例子	(76)
4.2	非完整系统的自由度	(78)
4.3	含有拉格朗日乘子的运动方程	(80)
4.4	伪速度与阿佩尔方程	(86)
4.5	从高斯最小拘束原理推导阿佩尔方程	(96)
4.5.1	最小拘束原理	(96)
4.5.2	阿佩尔方程	(97)
五、	工程系统模型	(99)
5.1	状态空间中的方程	(99)
5.2	力的分类	(100)
5.3	线性化	(101)
5.4	系统动力学问题	(106)
5.5	系统动力学与力学	(108)
六、	线性时不变系统的解	(110)
6.1	经典解法	(110)
6.2	现代解法	(112)
6.2.1	矩阵的乘幂与函数	(112)
6.2.2	矩阵 e^{At}	(113)
6.2.3	齐次方程的解	(115)
6.2.4	非齐次方程的解	(118)
6.2.5	基本矩阵的物理解释	(120)
6.3	主坐标	(126)
6.3.1	特征值的不变性	(126)
6.3.2	单特征值情况下的不受控运动	(127)
6.3.3	多重特征值的影响	(132)
6.3.4	乔丹正规型	(135)
6.3.5	多重特征值情况下的不受控运动	

和受控运动	(140)
6.4 应用例子, 空间会合问题	(142)
6.4.1 运动方程	(142)
6.4.2 在坐标 x_i 中的解	(145)
6.4.3 用主坐标表示的运动方程	(147)
6.4.4 讨论	(149)
七、线性时不变系统的稳定性	(152)
7.1 平衡位置	(152)
7.2 解的时间性态	(155)
7.3 稳定性判据	(158)
7.3.1 稳定的必要条件	(158)
7.3.2 稳定的必要和充分条件	(159)
7.4 稳定区域、稳定裕量、稳定度	(163)
7.5 稳定性的一次近似	(166)
7.6 转速调速器稳定性的应用举例	(168)
7.6.1 运动方程	(169)
7.6.2 稳定性条件	(172)
7.6.3 讨论	(172)
7.7 线性系统的定性研究	(173)
7.7.1 在主坐标中考察	(173)
7.7.2 二阶线性系统的分类	(177)
7.7.3 二阶线性系统的稳定性结构	(183)
八、线性完整系统的解和稳定性	(187)
8.1 保守系统的微振动	(187)
8.1.1 运动方程	(187)
8.1.2 运动方程的解	(191)
8.1.3 主坐标	(200)

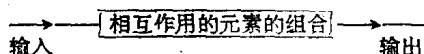
8.1.4 几个经典的结果.....	(206)
8.2 定常系统.....	(208)
8.2.1 运动方程.....	(208)
8.2.2 稳定性判据.....	(209)
8.2.3 受控系统.....	(214)
8.3 结束语.....	(216)
习题	(218)
附录	(235)
参考文献	(242)
德汉对照	(247)

一、导言与概述

编写本书的目的是试图把系统理论的现代方法与分析力学的经典方法结合起来。经典力学的主要任务是解释和阐明自然界的力学过程。系统理论是从主动的作用以及系统影响等问题的研究中逐步发展形成的。把分析力学方法与系统理论方法结合起来,便可在工程科学的理论基础方面为处理现今典型问题提供一种工具。关于这一点,首先有必要对系统这一概念作简要的解释,特别是因为在日常用语中,系统这一概念常以各种各样的、很不精确的方式被引用着。

1.1 系统的概念

系统这一概念总是在下面场合中被引用的:为了用公式来表达一个复杂的和常常难以完全弄清的过程,常应用这一个概念;在考察不同的学科(物理、化学、生物学、经济学、社会学)互相作用时也常使用这一概念。以下把系统定义为:一定数量的元素(部件、组件)的组合,这些元素有相互影响(相互作用),也接受外来的影响(输入),并作用于外界(输出)。若用简图表示,则为



因此,系统最重要的性质是当对系统适当地施加输入(力)时,系统具有可变性(运动)和可影响性(可控性)。根据

经典力学理论，人们把施加于系统上的作用与系统本身所发生的变化之间的关系称为**系统动力学**。这同样地意味着所考察的问题首先应延伸到力学系统。

1.2 系统动力学的任务

研究系统动力学要涉及到下列四项任务。

任务 I——模型的建立

这一项任务的提出是为了提供一个描述系统性态的数学关系式。相应的系统方程或运动方程是一般的微分方程。例如微分方程

$$\ddot{\phi} + \frac{g}{l} \sin \phi = 0.$$

描述一个数学摆的平面运动。

模型的建立总离不开理想化和抽象化，所谓质点、刚体、理想气体的概念就是一些具有代表性的例子。同一个系统按照不同的理想化程度可得到不同的模型。一辆汽车经过模型化之后可以看成是一个质点或者看成一个带有四个轮子的刚体，甚至可以看成一个复杂的多刚体系统。模型对实际的描述越精确，运动方程就越复杂。

任务 II——模型的研究

模型的研究是为了考察系统的性质，如能求出运动方程的显式解，则这一问题就可得到圆满的解决。可是，这仅在很少数的情况下才能做到。如上述的单摆方程也只有借助于椭圆函数才能解出。因此在研究模型时，大多采用的是间接的方法，即研究系统的稳定性或者寻求线性化系统的近似解。

任务 III——选择控制输入

选择系统的输入必须使所预期的作用有可能实现。例如飞机升降舵的配置以及舵的作用方式的确定必须使飞机能实现所要求的飞行状态。

任务 IV——系统性态的计算机模拟

对系统性态的鉴别可在计算机上进行模拟，从而说明模型选择得好还是坏，以及证明控制的有效性。在这种情况下常常需要重新研究不同的模型和选择新的控制。

要完成上述各项任务还需涉及到下列各种不同的学科：

任务 I 涉及到物理、化学、生物学、经济学、社会学；

任务 II 涉及到数学；

任务 III 涉及到控制技术、调节技术；

任务 IV 涉及到模拟技术、计算技术。

因此，系统动力学是一门多种学科相互渗透的学科，而现今只把它当作一个整体来认识 and 对待。

1.3 概 述

在前两节所列出的各项任务中，有两项首要任务：**模型的建立和与它直接有关的模型的研究**。它们就是本书所讨论的对象。因为探讨这两个问题同时也为探讨与之紧接的系统主动影响（即控制与调节技术中所提出的问题）创造了先决条件，所以在本书的许多地方将联系到受控系统。

本书的内容按上述两项任务可分两部分：第二、三、四章属于模型的建立；第六、七、八章属于模型的研究，而这两部分内容之间的衔接就构成了第五章。

在第二章里，在质点的基础上引进了有限多自由度的力学系统，并由此借助于约束概念得到刚体与物体系的模型。除

了一些重要的力学基本定理之外，还可以从力学的基本方程很简单地推导出第一类拉格朗日(Lagrange)方程。

在第三章里，考察的问题局限于完整系统，对于这种系统，在自由度与广义坐标概念的基础上建立了第二类拉格朗日方程。与第一类拉格朗日方程相反，第二类拉格朗日方程所必需的方程个数降低到与系统的自由度数相等。在这里也讨论了与第二类拉格朗日方程密切相关的哈密顿(Hamilton)正则方程。最后，在本章里也研究了在实际中很重要的刚体转动问题，并用例子加以说明。

为了讨论非完整系统(即在第四章中所讨论的问题)，需要建立起在形式上经过修正的运动方程。对此，一方面可以通过第二类拉格朗日方程的扩充形式，另一方面也可引入加速度能量和伪加速度，从而得到阿佩尔(Appell)方程。在这些方程中，方程的数目再次与系统的自由度数相等。在第二、三和第四章里也将分别涉及到一些重要的力学原理。

在第五章里，如同通常在系统理论中那样，运动方程被变换成一个一阶微分方程组。这样的表达方式是很普遍的，因为对于非力学的动力过程也常常表达成这样的形式。此外，通过这种写法，可使经典力学过渡成系统动力学。在此，如何将一般的非线性系统进行线性化就显得特别重要。在受控系统的研究范围内，线性化的系统方程可对给定性态有微小偏差的系统性态给出主要的描述。另一方面，如果良好地选择控制，则受控系统的性态与给定性态之间可保持微小的偏差。因此在后面几章中，仅对线性系统加以讨论。对此，在系统理论中提出大量可供试用的方法(即通过数值方法)来求解具体问题。

研究线性时不变系统可获得特别简单而明显的结果。借

助于基本矩阵,在不受控的情况下,线性时不变系统的解(第六章所讨论的内容)可以写成通用的形式。通过把系统变换到主坐标上可以直观地解释和阐明多重特征值对系统性能的影响。

如果研究的问题仅限于线性时不变系统的稳定性(见第七章),则特征方程及系统的特征值就具有决定性的意义。由此可以得到稳定性的判据以及给出稳定性的区域。同时,对于非线性系统的稳定性也可从它相应的线性系统的稳定性中引出一定的结果。与此问题有密切关系的是对线性系统的定性研究,在那里引入了稳定性结构的概念,并用二阶系统的例子加以解释和阐明。

第六、七章中给出一般线性时不变系统的求解方法和稳定性问题的判别方法。所提出的方法对所有问题虽不能普遍适用,但如果把问题局限于力学系统,则这些方法仍是有效的。在第八章里集中考虑线性的完整系统;通过把运动方程表达成一个矩阵形式的二阶微分方程,可把在方程中出现的各个项从物理意义上看成是不同类型的力,各种类型的力对系统性能的影响可用一定的矩阵特性来表达,根据所出现的不同类型的力便可得出一系列稳定性的论述。

二、有限多自由度力学系统

2.1 系统及其符号

下面这一章的讨论是以质点这一概念为基础的，质点是指在描述运动时其空间尺寸可略去的物体。在考察一个具有 N 个质点、质量为 m_i 的系统时，系统各质点在直角坐标 x, y, z 中的位置以位置矢

$$\mathbf{r}_i^{(1)} = \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} = [x_i, y_i, z_i]^T, \quad i=1, \dots, N, \quad (2.1)$$

表示，其速度以速度矢

$$\mathbf{v}_i = \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \dot{\mathbf{r}}_i = [\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i]^T, \quad i=1, \dots, N, \quad (2.2)$$

表示。系统的加速度为

$$\mathbf{b}_i = \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}_i}{dt^2} = \ddot{\mathbf{r}}_i = [\ddot{x}_i, \ddot{y}_i, \ddot{z}_i]^T, \quad i=1, \dots, N, \quad (2.3)$$

为简明起见，采用下列符号：

$$\begin{aligned} (x_1, \dots, z_N) &= (x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots; x_N, y_N, z_N), \\ (\dot{x}_1, \dots, \dot{z}_N) &= (\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{z}_1; \dot{x}_2, \dot{y}_2, \dot{z}_2; \dots; \dot{x}_N, \dot{y}_N, \dot{z}_N). \end{aligned}$$

2.2 约 束

若矢量 $\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i$ 可以取任意值，则该系统称为自由的力学

① 本书除力矢量外其他矢量都用小写黑体字表示，并且都是列矢量。——译注