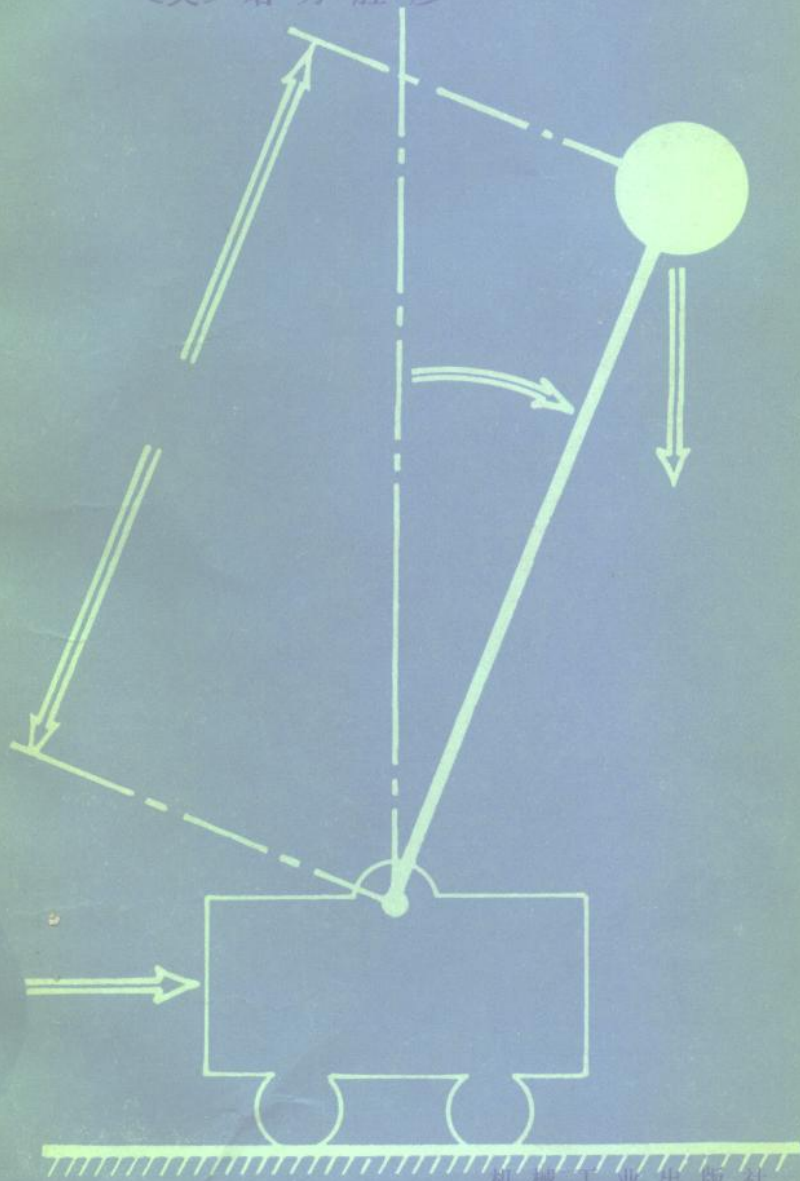


系统动力学

〔美〕绪方胜彦



机械工业出版社

73.225

804



系统动力学

〔美〕绪方胜彦

孙祥根 译

朱骥北 校



机械工业出版社

1110863

DL13 / 13

SYSTEM DYNAMICS
KATSUHIKO OGATA
PRENTICE-HALL 1978

系统动力学

〔美〕 绪方胜彦

孙祥根 译

朱骥北 校

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $19\frac{3}{4}$ · 字数 524 千字

1983 年 2 月北京第一版 · 1983 年 2 月北京第一次印刷

印数 00,001—10,300 · 定价 2.95 元

*

统一书号: 15033 · 5421

译者序

本书是作者在控制和系统动力学领域内,总结其多年的教学、科研、工程设计的经验及在前著《现代控制工程》(1976年科学出版社翻译出版)等专著基础上编写而成。

本书涉及的面较宽,包括机械系统、电系统、液压系统和气动系统。从建立数学模型到研究系统的基本性质、定律;对拉普拉斯变换及其应用;线性系统分析(包括隔振和计算机模拟)及控制系统分析等都作了详细的叙述。全书不仅重视基本理论,而且对解决实际问题的方法也作了详细的介绍。

特别要指出的是本书从内容安排、叙述上,完全适合作为我国机械工程类的机械、液压、控制等专业的教材。书中配有大量例题和习题,因此也适宜作为工程技术人员的自学用书。

本书由朱骥北同志审校,高文龙同志为责任编辑。在翻译过程中得到刘瑞芳等许多同志帮助和支持,对以上同志谨表谢意。

原文有个别不当及错误,译文已作更正。由于时间仓促,水平有限,翻译不当或错误之处,望广大读者批评指正。

前 言

近年来，许多工程系的教学计划要求开设处理动态系统数学模型和响应分析的系统动力学课程。本书是为课程而准备的教材。本书介绍物理系统动力学各种模型的综合分析，是为低年级工程系学生而编写的。

本书的概要如下：第1章介绍系统的一般引言。第2章讨论建立数学模型和机械系统的分析。第3章涉及电系统。第4章和第5章分别讨论液压和气动系统，并包括讨论非线性系统数学模型的线性化过程。第6章给出分析线性系统的拉普拉斯变换方法，而线性系统分析在第7章中讨论。最后，第8章介绍控制系统的分析。

贯串全书，在关键地方介绍精心选择的例子，使得读者对所讨论的主要材料有较好的理解。同时，除了第1章以外，在本书每一章的结尾，提供了许多问题的解答。这些问题，其中有许多是描述工程中的实际情况。因此，建议学生在学习所有这些问题时要特别精心。此外，许多未解的问题包含有程度不同的困难，这是检验读者运用所学理论的能力。

物理量是采用国际单位。但是，在某些例题和问题中，物理量是采用国际单位和其它单位制的单位，因此读者可以自由的从一种单位制转换到另一种单位制。

这里所介绍的大部分材料，曾在明尼苏达大学机械工程系中作为低年级的系统动力学教材，是经受过多年考验的。

为了便于教师在课堂上使用这本书，更复杂的节（以及对应的已解和未解的问题）带有星号，使用者可以根据课程的目的来保留或取掉这些节。

如果本书用于1/4学年的学期课程，可采用第1章到第7章

的大部分材料（带星号的节例外）。在学习这七章以后，读者具有列出合理而简化的物理系统数学模型的能力，并将具有决定这种系统瞬态和频率响应的能力。而对于 1/2 学年的学期课程，则采用全书为教材。

最后，我很想对于我以前的学生——他们解过的许多问题被包含在本书中；对于曾对本书提出许多建设性意见而未具名的人们；对于为这本书的完成有帮助的人们表示感谢。

绪方胜彦

目 录

第1章 引言	1
1-1 系统	1
1-2 建立模型	3
1-3 动态系统的分析和设计	4
1-4 小结	6
第2章 机械系统	8
2-1 引言	8
2-2 建立数学模型	21
2-3 具有两个或多个自由度的机械系统	35
2-4 具有干摩擦的机械系统	40
2-5 功、能和功率	49
2-6 运动、能量和功率转换	60
参考文献	67
例题和解答	67
习题	96
第3章 电系统	104
3-1 引言	104
3-2 电路的基本定律	109
3-3 建立数学模型和电路分析	117
3-4 功率和能	128
3-5 相似系统	133
参考文献	137
例题和解答	137
习题	158
第4章 液压系统	163
4-1 引言	163
4-2 液压系统	165
4-3 液压流体的性质	178
4-4 流体流动的基本定律	182

4-5 建立液压系统的数学模型.....	190
*4-6 非线性系统的线性化.....	202
参考文献	208
例题和解答	208
习题	229
第5章 气动系统	234
5-1 引言.....	234
5-2 气动系统.....	236
5-3 气体的物理和热力学性质.....	251
*5-4 气体通过小孔的流动.....	257
5-5 建立气动系统的数学模型.....	268
*5-6 射流装置引论.....	275
*5-7 数字射流和逻辑回路.....	283
参考文献	298
例题和解答	298
习题	313
第6章 拉普拉斯变换	319
6-1 引言.....	319
6-2 复数、复变数和复变函数.....	319
6-3 拉普拉斯变换.....	326
6-4 拉普拉斯变换定理.....	332
6-5 拉普拉斯反变换.....	345
6-6 解线性定常的微分方程.....	351
参考文献	354
例题和解答	354
习题	368
第7章 线性系统分析	372
7-1 引言.....	372
7-2 一阶系统的瞬态响应分析.....	374
7-3 二阶系统的瞬态响应分析.....	380
7-4 传递函数.....	400
7-5 频率响应和正弦传递函数.....	409

*7-6 隔振	422
7-7 模拟计算机	439
参考文献	463
例题和解答	463
习题	501
第 8 章 控制系统分析	512
8-1 引言	512
8-2 方块图	515
8-3 工业自动控制器	524
8-4 瞬态响应分析	544
8-5 瞬态响应指标	552
8-6 瞬态响应指标的改进	562
8-7 一个设计问题	569
参考文献	575
例题和解答	575
习题	597
附录	605
A. 单位制	605
B. 单位换算	609
C. 拉格朗日运动方程式	613

第1章 引言

1-1 系 统

系统。系统是一些元件的组合，这些元件共同作用以完成给定的任务。元件是系统单个作用的单元。由于不局限于某一物理对象，系统的概念可以扩充到任何动态的现象，例如，在经济、运输、人口增长和生态学等方面遇到的这些现象。

如果系统的现时输出是由其之前的输入决定，这系统称为动态的；如果系统的即时输出仅仅是由其即时输入决定，这系统称为是静态的。如果输入不改变，则静态系统的输出保持为常量，而且只有当输入改变时输出才改变。如果系统不是处在平衡状态，动态系统的输出是随时间而改变的。我们在本书中只讨论有关的动态系统。

数学模型。试图设计任何一系统时，在对系统本身进行设计之前，必须从对系统的性能有预先了解开始，这样系统才能达到在细节上的或真正的建立。这些预示是建立在系统的动态特性的数学描述上。这种数学描述称为数学模型。对于物理系统，最有用的数学模型是用微分方程来描述。

系统动力学是讨论动态系统的数学模型和响应分析。在近代工程设计中需要我们仔细学习这些内容。

线性和非线性微分方程。线性微分方程可以分为线性定常微分方程和线性时变微分方程。

线性定常微分方程是由因变量和其导数的线性组合表示。这种方程的例子为

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 5 \frac{dx}{dt} + 10x = 0$$

因为各项的系数都是常数，因此线性定常微分方程也称为线性常

系数微分方程。

线性时变微分方程是由因变量和其导数的线性组合表示，但一个系数项或更多的系数项可以包含有独立的变量，作为这种类型微分方程的例子如

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + (1 - \cos 2t) x = 0$$

有一点是很重要的，为了是线性，方程中必须不包含有因变量及其导数的幂次、其它函数或因变量和它的导数间的乘积。

如果微分方程不是线性的就称为非线性微分方程。非线性微分方程的例子有

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + (x^2 - 1) \frac{dx}{dt} + x = 0$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + x + x^3 = \sin \omega t$$

线性系统和非线性系统。对于线性系统，方程的结构模式是线性的。我们在本书中将讨论线性系统，它能够由线性定常微分方程来代表。

线性系统最重要的性质是能够应用叠加原理。这原理说明由同时作用的两个不同的激励函数或输入，其产生的响应是此两个单独响应之和。显然，对于线性系统几个输入的响应可以看成同一时刻的单独输入并把其结果相加来计算。作为叠加原理的结果，线性微分方程的复杂解可以分解为简单解的和。

在动态系统的试验研究中，如果因和果是正比的，则蕴含着叠加原理成立，此系统就可以看成是线性的。

非线性系统，显然是由非线性方程来表示。

虽然物理关系常常是由线性方程来表示，但在许多时候其实际关系不完全是线性的。事实上，仔细研究物理系统揭示出来所谓的线性系统，只是限制在一定的范围内才是真正的线性。例如，许多液压系统和气动系统在它们的变量之间包含有非线性的关系。

对于非线性系统，其最重要的特征是叠加原理不能应用。一般，寻找包含这种系统问题解的过程是十分复杂的。由于牵涉到数学上的困难，一般必须把一非线性系统在给定条件附近线性化。一旦非线性系统由一线性数学模型来近似，许多线性方法就可以应用于此系统的分析和设计中。

1-2 建立模型

建立数学模型。应用物理定律于具体的系统，它可能建立一数学模型来描述此系统。这样的系统可以包括有未知的参数，这些参数必须通过实际的试验来求值。但是，有时用物理定律来确定系统的行为是不能完全说清楚的，并且列出数学模型有时成为不可能。如果是这样，就可以应用实验建立模型的方法。在这个过程中系统经受一组已知的输入并测量出它的输出。此时数学模型是由这些输入和输出间的关系来得到。

简化与精度。当试图建立一模型时，必须作模型简化与分析所得精度之间的比较。应注意到，从分析得到的结果，只是在模型近似一给定物理系统的范围内是正确的。

对于一个要用成百个方程来描述的系统，在建立精确而十分复杂的模型时，可以运用快速的数字计算机来完成算术运算。显然，如果不是需要极端精确的情况，最好是仅仅建立一合理的简化模型。

决定一合理的简化的模型，我们必须确定哪些物理变量和关系是可以忽视的；哪些是对于模型的精度有决定性作用的。为了得到一具有线性微分方程形式的模型，在物理系统中可能出现的任何分布参数和非线性都将被忽略。如果这些被忽略的参数对响应的作用是小的，此时数学模型分析所得的结果与对物理系统的实验研究结果相比，将有很好的 consistency。然而，任一特别的性能是不是重要，在某些情况可能是清楚的，而在另一些情况则可能需要从其物理意义上去理解和观察。在这些关系中经验是一很重要的因素。

一般，当解决一个新的问题时，对于它的描述首先是建立一个简化的模型，得到关于这个解的一般概念。以后可以建立更详细的数学模型，以便进行更复杂的分析。

关于数学模型的附注。数学模型不能精确地代表任何物理元件或系统。它总是包含有近似性和假设。某些近似或假设限制数学模型的正确性范围。（近似程度只能由实验来决定。）因此，在作关于系统性能的预示时，必须记住在模型中包含有哪些近似和假定。

数学模型建立的步骤。建立系统数学模型的步骤可以综合如下：

1. 画系统的简图，并决定变量。
2. 应用物理定律，写出每一元件的方程，根据系统图综合这些方程，并得到数学模型。
3. 为了验证模型的正确性，把由模型方程所得到解的性能预示与实验结果相比较。（任何数学模型正确性的问题只能由实验来回答。）如果实验结果与预示偏差很大，模型必须重新建立。于是引出新的模型，并有新的预示与实验结果相比较。重复这一过程直到预示与实验结果之间得到满意的一致为止。

1-3 动态系统的分析和设计

本节简要地介绍包含在动态系统的分析和设计中的一些问题。

分析。系统分析表示对已知数学模型在给定的条件下对系统性能的研究。

在分析一个动态系统时第一步是导出它的数学模型。因为任何系统都是由元件所构成的，分析必须从建立每一元件的数学模型开始，并综合这些模型，以便建立整个系统的模型。一旦得到最后的系统模型，分析就可以用列公式的方法表示，改变模型中系统的参数而产生一些数值解。此时工程师对照这些解及其意义，并把分析的结果应用于他的基本任务中。

总要记住，对于整个系统推导一合理模型是整个分析的基础部分。一旦得到这样的模型，各种解析的和计算机方法就可以应用在分析中。进行这些分析的方法是与物理系统的形式——机械的、电的、液压的等等——无关。

设计。系统设计是指寻找完成给定任务的系统的过程。一般，设计过程不是直线向前的而需要逐步试探的。

综合。所谓综合，意思是指用一定的方法来寻找一个按既定要求完成任务的系统。这里首先提出所要求的系统的特性，然后用各种数学方法去综合一系统使其达到这些特性。通常，这种方法从设计过程开始到结束完全是数学的。

系统设计的基本方法。设计任何动态系统的基本方法必须包括试探法。从理论上说，线性系统的综合是可能的，并且工程师能够系统的决定为完成给定任务所需要的元件。而实际上，系统可能受到许多限制，或可能是非线性的；在这种情况下，目前还得不到综合的方法。此外，元件的特性也不可能十分清楚，因此试探法总是必须的。

设计步骤。通常系统的设计步骤如下。工程师在开始设计阶段是已知技术要求及元件的动态性能，其中后者包括设计参数。技术要求可能是由精确的数值和一般的定性要求来表示。（技术要求常常包括这些参数的说明：如成本、可靠性、空间、重量和维修的难易等。）要注意在设计进程中可能要改变技术要求，因为在经过详细分析后可能发现某些要求是不可能达到的。最后如有可能，工程师将应用综合方法及其它方法来建立系统的数学模型。

一旦列出设计问题的数学模型，就可以进行数学方法的设计，并得到设计问题的数学解。随着数学方法设计的完善化，工程师就可以在计算机上模拟此模型，以试验各种输入的效果和扰动对所求的系统性能的影响。如果对原系统结构不满意，此系统必须重新设计，并且相应地进行全部分析。这种设计和分析的过程，重复进行直至找到满意的系统为止。此时就可以建立物理系统的

样机。

注意，建立样机过程是建立数学模型的反演。样机是一物理系统，它代表具有适当精确度的数学模型。一旦建立了样机，工程师就可以对它进行试验，看它是否是满意的。如果是满意的，设计就是完善的。如果不满意，必须再修改样机和重新试验。重复这种过程直至得到满意的样机为止。

1-4 小 结

从分析的观点，一个有成就的工程师必须能够得到给定系统的数学模型，并预示它的性能。（预示的正确性在很大程度上与用以完成预示的数学模型的正确性有关。）另外，从设计的观点，在建立样机以前他必须能够实现整个性能的分析。

本书的任务是使读者能够（a）求得紧密地代表物理系统性能的数学模型和（b）建立系统的响应，对于各种确定的输入，他或她能够有效的分析和设计动态系统。（确定的输入与随机的输入相反，这些输入完全是确定的时间的函数。随机的输入是另一种情况，是与预先不知道的偶然的变量有关的。）

本书的概貌。第1章是已经讨论过的动态系统的引言。第2到第5章是与建立数学模型有关的问题。从本质上讲，系统模型是把物理定律应用于各元件并且考虑到它们之间的联系方式而建立的。其中第2章讨论了机械系统，第3章讨论了电系统。第4章和第5章是液压和气动元件及系统。这两章包括非线性系统的线性化方法。非线性系统的线性化中，我们把变量的偏差限制在很小的范围内，从而得到线性化数学模型。虽然变量仅在很小的范围内是精确的，但是这个模型具有很大的实用价值。这是因为很多非线性系统均设计成在给定的工作点附近工作或是尽可能处于平衡状态。

第6章叙述拉普拉斯变换方法，它对分析线性定常系统是很有用的。接着线性系统瞬态的和频率响应分析在第7章中讨论，包括拉普拉斯变换的方法用于瞬态响应分析，传递函数，频率响

应分析与在解隔振问题中的应用，以及模拟计算机。最后第 8 章介绍关于控制系统分析的入门材料。包括讨论关于自动控制器，使用液压、气动和电气元件得到控制作用的典型方法，控制系统的瞬态响应分析以及设计问题。

第2章 机械系统

2-1 引言

本章的任务是讨论机械系统的数学模型和响应分析。在 2-1 节中是介绍性的材料,在那里我们一开始主要叙述单位制,接着复习质量、力和牛顿定律等课题,所有这些都是大学物理课程的标准部分。在 2-2 节中叙述机械系统的数学模型和简单机械系统的自由振动。在 2-3 节中讨论具有两个或多个自由度的自由振动系统。在 2-4 节讨论具有干摩擦的机械系统,这课题中首先讨论静摩擦和滑动摩擦,随后分析系统的滑动和滚动运动。最后引进达朗贝尔原理。在 2-5 节出现功、能和功率的概念。这一节包括用能量方法来得到系统的运动方程式。最后一节, 2-6 节讨论运动、能量和功率的转换,并讨论和分析有关运动、能量和功率转换的例子。

单位制。清楚的了解各种单位制是定量的研究系统动力学所必须的。过去在美国大量的工程计算是建立在英制 (BES) 基础上的。而最近以来,显然,计算将按国际单位制 (SI) 来进行。

国际单位制是由米制转化来的,但是,它区别于一般米制绝对单位制 (mks 制和 cgs 制) 或米制重力单位制。表 2-1 列出国际单位制、一般米制单位制和英制单位制。(此表仅介绍描述机械系统性能所必须的那些单位。对于其它的单位制的细节参考附录 A。)

绝对单位制与重力单位制之间最主要的区别是在于选择质量或力作为原始的量度。在绝对单位制中 (SI 和米制绝对制以及英制绝对制) 质量是选作原始的量度,而力是作为导出量。相反的,在重力制中 (米制工程制和英制工程制) 力的单位是作为原始量