

系统建模与响应

—理论及实验方法—

〔美〕E. O. 多比林 著



机械工业出版社



系统建模与响应

——理论及实验方法——

〔美〕E. O. 多比林 著

朱骥北 熊诗波 译
程高楣 校



机械工业出版社

本书分为三个部分14章。第一部分是系统响应值的计算，第二部分是系统数学模型的建立，第三部分是一些具体系统的建模与分析，其中包括人机系统等较新的内容。这是作者在美国俄亥俄州立大学机械系为大学生及研究生开课而写的教材，是系统动力学方面内容较为全面而深入的一本教材。

—本书可作为机械类专业大学生的选修教材，研究生用参考书，同时也适用于自动化及控制方面的专业。对于工程技术人员知识更新也是一本较好的自学用书。

**SYSTEM
MODELING**

**AND
RESPONSE**

**Theoretical
and**

**Experimental
Approaches**

Ernest O Doebelin

JOHN WILEY & SONS 1980

• • •
系统建模与响应

——理论及实验方法——

〔美〕 E O 多比林 著

朱骥北 熊诗波 译

程高楣 校

•
责任编辑 孙样根

封面设计 刘代

•
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）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

•
开本 787×1092 1/16·印张 24 1/2·字数 602 千字

1987年8月北京第一版·1987年8月北京第一次印刷

印数 0,001—2,400·定价 6.10 元

•
科技新书目：145-101

统一书号：15033·6628



译 者 序

本书系作者在1972年写的《系统动力学》一书的继续，是一本内容较深入的系统动力学方面的教材。系统动力学教材是在六十年代末、七十年代初在美国开始出现的，我国最早曾于1983年翻译了美国绪方胜彦著的《系统动力学》，引起了国内的重视。现在这本书的出版，必将给我国高等学校机械工程专业的改造起一定的作用。

这本书的第一部分是系统响应值的计算，第二部分概述了建模的一般方法，第三部分是建模的一些典型例子。以上内容是控制理论、动力学、测试技术、计算机、机械工程的综合运用，书中还附有一些典型的程序及实验数据和图表，为便于学习，书中配有较多的习题及列出参考文献。本书是作者在美国俄亥俄州立大学机械工程系执教时，为大学生和研究生所写的教材，它不但适用于机械类专业，也可供力学及自动控制等专业的师生及工程技术人员学习使用。

本书一至六章由熊诗波翻译，七至十四章由朱骥北翻译，并由程高楣审校，最后由朱骥北对全书进行了校阅及统稿。在翻译过程中，发现本书原文有不当及错误之处，译文已作了更正。在此，我们谨向在翻译此书过程中提供帮助的研究生及其他有关同志表示感谢。

由于时间仓促，加之译者水平有限，书中一定有不少缺点和错误，恳切希望读者不吝指教，以便改正。

译者

1985.10.

前 言

当系统动力学初级教材在60年代末和70年代初开始出现时,这方面的课程在整个工程课程中所占的比例是很小的。从那以后,更多的学校引入了这一内容,他们或者在个别系里介绍这一内容,或者将之作为“核心”内容介绍给所有学工程的学生。迄今为止,在一些与之有关的工程课程中,这一内容并未作为基本的内容而被广泛的接纳,这一点并不令人奇怪,因为要想在当前安排很紧的课程中加入这一新方法的介绍,通常是要对一些非常完善的“传统”内容进行替换、压缩或重新排列。而要紧的是对这些改变的正确性要有严谨的证明,这通常是要花费一些时间的。我相信,这一新的内容不但会被人们接受,而且最终它还会得到人们广泛承认的。

这本系统动力学的中心部分属于入门课程以后的较高水平的内容。究竟是作本科三年级、四年级课程还是作研究生课程,显然要看使用此书的具体课程而定。在我校,这本教材是用在两门研究生水平的课程,因为我们的本科课程要求分设各自独立的系统动力学、测量系统及自动控制课程(包括实验),为学士学位充分提供了全面基础。而对那些在大学期间并未将系统动力学作为重点的新入学的研究生,在开学初对基本内容进行一段集中自学,也是能够顺利跟上第一门研究生的课程的。

尽管系统动力学的大部分内容出自控制系统设计的方法和需要,我相信这些技术具有广泛的意义和实用性,因此对所有的工科大学生和工科研究生来说,它都应成为一个整体的学业基础知识。但是,在这一领域的分析研究中所遇到的极度抽象的概念、专业术语和过多的数学方法,都大大影响了广大读者对这一概念的接受。我希望那些至今还是系统动力学领域“门外汉”的教师和学生,能够通过这本教材的内容清楚地看到这些方法在各种工程领域中的实用性。系统动力学不应被看作一个专业性学科,而应视之为所有工程技术人员的基本工具。而当前许多研究生的课程及培养方案却放在物理现象的细节上,因此我认为,对一个学生重要的是不要忘记工程技术人员最终所涉及的是整个机器和过程,以及掌握整个系统的方法。

浏览一下目录,并迅速的阅读一下第一章,你就可以清楚的看出本书的体系和内容,这里进行的一些简短的介绍,也许是适当的。本书是由三个主要部分组成,系统响应值计算,建模的一般方法,以及建模技术的特殊应用。通常这些部分不包含在一个整体内或在一门课程中讲授,教师可以选用(其中的一部分或全部)一些最能满足需要且可用作该课程预备知识的章节。由于我的这本讲义是用于两门研究生课程,因此设计为一门单独的课程时,在内容选择上就有很宽的余地。

第一部分,系统响应值的计算,包括用最一般的变换法对线性系统响应的研究,接下来特别强调了频谱法。近来许多教材强调时域方法而忽略了较经典的频率方法。我相信,工业实践的检验证明了频域法还在继续广泛使用,因此学生们要能非常熟练地使用这些方法。这短短的一节里还包括了分布参数变换法,差分方程和 Z 变换以及系统状态变量的简介。非线性系统的重点是用数字仿真的手段去进行系统的分析和设计。目前,确实存在一些对非线性系统的分析行之有效的方法,但不断涌现出来的更有效的、普遍的和经济的数字仿真方法,不

禁会使人产生疑问：大批的学生去研究那些专门的非线性分析法是否有很大的实用价值？

第二部分，概括了建模的一般方法，涉及了获取模型描述的方法，而第一部分只是探讨了描述给定系统响应的计算方法。“一般”这个词规定了其范围可用于多种类型的系统（理论和实际的），而不单单是某一具体物理类型的系统。本书这一部分集中论述了实验测试技术，主要是对线性系统，而对非线性系统也给予了一定的重视。在文献中讨论的众多的“系统辨识”方法中，重点是放在相对来说已被公认且经过实践检验的那些方法。对各种模型具有普遍意义的理论问题是子系统耦合方法和离散化问题。在这个问题上所占的篇幅是有些简短，但足以建立起基本概念且可以用之作为解决问题的方法。

最后一部分，是建模法的具体应用，重点是放在用于各种类型的物理装置的理论方法，它包括集中和分布参数方法。这里总的目的不仅是要培养解决具体问题的能力，而且要弄清楚系统分析方法在整个工程中非常广泛的适用性。一个学生可能永远不会用到在第13章中引入特殊的人的传递函数；但是，了解到这些问题是可能并且已经得到解决，对于增强自信心去解决新的问题是很有意义的。第三部分集中讲述了理论模型，而且在可能的情况下，都给出了实验结果，由此发展了实际可行的简化假设的类型判断。另外从几个方面对同一物理系统的集中模型和分布模型作了比较，同时还就已知模型的复杂形式和简化形式进行了比较。

我认为对于大学本科生的系统动力学课程是要开设实验的，而研究生课对实验课的需要就不那么明显。至于现在，我们的两门研究生课程，其中一门有实验课，并且引入了一些实际的东西，这当然不是说没有它就不行的。尽管不是绝对需要，但学习这类课程也要有计算机作为工具。由于现有程序可以让学生们从编程上转到集中于物理和工程方面，因此我比较喜欢它。我觉得正确的选择应包括广泛的数字仿真语言（如CSMP），一种良好的复数运算和矩阵运算简单且常用的工程语言（如SPEAKEASY），以及一种广泛应用的统计软件包（如SAS）。

由于本书所讲述的是非常成熟的方法而不是一些“前沿”的研究，因此我的工作只是选材、组织、解释并对这些技术进行评价，而不在于其原始的概念。在此，对那些我从他们书中提取了编纂本书所必须的基本材料的作者们，我深表感谢，并在各种情况下都仔细地标出所参考的他们的原著。对系主任J. E. A. 约翰在编写原稿中所提供的支持，以及B. G. 斯特恩布鲁克熟练的打字，本人也深表谢意。

E. O. 多比林 (Doebelin)

哥伦布，俄亥俄

目 录

第一部分 系统响应值的计算

第一章 系统分析法的基本原理和方法	1
1.1 复杂性讨论	1
1.2 输入、系统和输出的概念	3
1.3 输入型式的分类	5
1.4 系统模型类型的分类	7
1.5 子系统耦合	11
参考文献	12
第二章 微分方程的变换解	14
2.1 问题型式的分类	14
2.2 线性化	15
2.3 线性微分方程古典解法的回顾	16
2.4 拉普拉斯变换的定义和定理	19
2.5 积分-微分方程的解: 逆变换	22
2.6 稳定性问题	30
2.7 拉普拉斯传递函数	33
2.8 延迟定理: 延时元件和不连续输入	36
2.9 初值和终值定理	38
参考文献	39
习题	39
第三章 一般响应的变换方法	43
3.1 脉冲响应	43
3.2 卷积: 当脉冲响应已知时, 对任意输入的响应	46
3.3 频率响应	51
3.4 脉冲响应和频率响应之间的关系	55
3.5 对周期输入的响应: 傅里叶级数	58
3.6 调幅输入	62
3.7 瞬态输入: 频率法	65
3.8 随机信号描述	71
3.9 系统对随机信号的响应	82
3.10 在数字谱分析中的混迭和泄漏	86
参考文献	89
习题	89
第四章 其它变换问题	93
4.1 分布参数模型	93
4.2 差分方程和Z变换	98

4.3 使用状态变量的系统描述	106
参考文献	109
习题	109
第五章 数字仿真方法	111
5.1 解析法的局限性	111
5.2 模拟、数字和混合仿真	111
5.3 数字仿真语言的特点	112
5.4 典型的数字仿真语言: CSMP II	114
5.5 任意函数发生器: 优化程序中终端程序的使用	121
5.6 延迟时间、常数和变量	125
5.7 分布系统大离散模型的数组处理方法	130
5.8 CSMP中FORTRAN编程的SORT/NOSORT的使用	134
5.9 在CSMP中的随机信号	137
5.10 采样数据系统	141
5.11 刚性系统问题	143
5.12 数字频率响应计算	144
参考文献	147
习题	148

第二部分 一般的建模方法

第六章 试验建模方法	
("系统辨识")	149
6.1 频率响应(正弦)方法和仪器	149
6.1.1 外差式带通跟踪滤波分析仪	150
6.1.2 "傅里叶滤波"分析仪	154
6.1.3 快速数字傅里叶变换(FFT)	
分析仪在正弦试验中的应用	156
6.1.4 根据实测的频率响应数据拟合解析传递函数	157
6.2 脉冲试验方法和仪器	162
6.3 随机信号试验	171
6.3.1 功率谱测量的随机误差	171
6.3.2 测量的传递函数的随机误差	173
6.3.3 输入信号: 连续的、二进制的和伪随机信号	175
6.3.4 应用实例	178
6.4 参数跟踪(急剧下降)法	181
6.5 多重回归和最小二乘法	196

6.5.1 静态模型的多重回归	196
6.5.2 动态模型的多重回归	207
6.6 建模方法的比较	211
参考文献	211
习题	212
第七章 子系统耦合方法	214
7.1 子系统耦合方法的用途	214
7.2 双口器件, 作用力变量及流动变量	214
7.3 四极耦合的基本方法	216
7.4 阻抗耦合的基本方法	218
7.5 现代耦合方法	222
参考文献	225
习题	225
第八章 分布系统的离散化	228
8.1 物理分块	228
8.2 有限差分法	231
8.3 有限元法	234
参考文献	235
习题	235

第三部分 建模方法的具体应用

第九章 液压管路及液压机械	237
9.1 液压管路动力学: 分布模型	237
9.1.1 特殊输入及出口情况下传递函数的确定	242
9.1.2 管端小孔的频率响应及阶跃响应特性	244
9.2 分块模型及实验结果	246
9.3 含摩擦的分布模型	250
9.3.1 采用无穷乘积的分块近似	250
9.4 管路纵向振动效应(流体/固体相互作用)	255
9.5 变量泵系统	258
9.5.1 泵控液压马达(流体静力传动)	258
9.5.2 节能液压动力源	262
参考文献	266
习题	268
第十章 电气机械系统	272
10.1 电力激振器	272
10.1.1 激振器推杆的动力学	275
10.2 一个实验的铁路车辆的电磁悬浮系统	279
参考文献	284
习题	286

第十一章 热交换器动力学	288
11.1 单流体热交换器的分布参数动力学	288
11.2 空间飞行器核动力装置中凝结器的热流体动力学	294
参考文献	307
习题	309
第十二章 运载体动力学	313
12.1 刚体动力学	313
12.1.1 刚体的惯性性质	313
12.1.2 刚体的主轴	315
12.1.3 运动方程	316
12.1.4 欧拉角和方向余弦	318
12.1.5 自转卫星: 精确模型及简化模型	320
12.2 汽车操纵动力学	327
12.2.1 气胎的特性	329
12.2.2 非滚动, 定轴模型	330
12.2.3 具有体滚动和体轴的双质量模型	332
参考文献	343
习题	346
第十三章 人机系统中人的因素	349
13.1 通过实验建立人体振动的模型	349
13.2 与跟踪和领航有关的神经及肌肉系统的基本解剖学和生理学	354
13.3 通过实验建立人的跟踪/导航行为模型	360
参考文献	366
习题	367
第十四章 燃气轮机动力学	369
14.1 基本喷气发动机的类型及运转	369
14.2 轴功率涡轮机的半实验、低频、线性化、小信号模型	372
14.3 涡轮喷气发动机的半实验、低频、线性化、小信号模型	375
14.4 结束语	377
参考文献	380
习题	381
附录	382
A 拉普拉斯变换函数变换对	382
B 拉普拉斯变换定理	383
C 国际单位制和符号	384
D 换算系数	385

第一部分 系统响应值的计算

第一章 系统分析法的基本原理和方法

1.1 复杂性讨论

尽管本书的目的是对系统进行中高级水平的研究,并且认为读者已具有一些导论性知识(这些知识可由初级系统学教科书提供,例如作者以前的著作^①,但开头我们还将试图说明一下工程系统分析法的一般范围、目的和方法。这个简短的引言将复习以前所遇到的一些概念,并将这些观点加以引伸,从而为以后章节的进一步讨论作准备。

为弄清本节目“复杂性讨论”的意义,我们将诸如弹性理论、流体力学及热传导等“传统的”工程课程的重点,同新近增加的系统研究课程加以比较和对照。我们使用“复杂性”这个词,特别是针对由日益增多的元件,以及越来越复杂的连接方式构成的机器与过程(“系统”)的设计和应用这个明显的趋势来说的。当然,熟悉近代物理和化学的任何人都能认识到,即使要了解简单的单一元件的特性或其物理效应,如果要求严格,也会遇到无穷的复杂性。然而,系统分析法所蕴含的复杂性并不在于元件的更详细的物理描述,而在于多个元件的相互连接,其中每个元件的特性是以比较简单的方式来模拟的。

这里,说明“复杂性”的这种差别的几个例子可能是有用的。在高等对流热传导课程中,我们可能致力于把流体力学的详细分析研究应用于边界层现象,试图了解它所包含的物理机理以及由几何的和流体的基本性质来预示热传导系数值。当保持最少的简化假设试图得到精确的预示时,即使对简单的物理结构,这样的研究也会变得十分复杂。虽然这样的计算方法可能是错综复杂的,而最终的结果常常是单一的以 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 为单位的有效热传导系数值。当分析(如我们要在以后的章节中所做的那样)包含一个或更多热交换器的热系统时,热传导系数仅仅是影响总系统特性的许多参数中的一个。于是,系统分析者和设计者有必要从总的运行观点考虑热传导现象,并且在不追求详细计算方法的情况下,假定有热传导系数值存在。

这里要提请读者注意,这种做法存在这样的危险,即系统分析者并不确保对基本现象有足够的物理理解,这就会导致过分简化事物的真实性,这一担心特别是对那些主要是经过数学训练的人而言的,他们感兴趣的是系统分析的复杂性,但要有效地判断物理问题,他们的基础知识可能是不足的。在提出这个担心之后,接着我们有必要主张在系统的高度上限制数学的复杂性,而且我们也认识到人的知识的广度和深度的局限性,因而在系统分析中,对现象和元件这一级上的简化是必要的,同时,也要冒在细节上不精确的风险,以便能在深入了解整个系统中获益。幸而,如果系统的许多元件实际上要被组合起来,而不是仅仅在数学上加以讨论,那么系统设计者当然将利用实验测试,以证实所假设的物理现象的关系形式和所

^① Doebelin, E.O., System Dynamics, C.E. Merrill, Columbus, Ohio, 1972.

假设的系数的数值，因为这是切实可行的。事实上，对于一些复杂的、不易理解的现象，可能需要在解析研究之前，对模型或原型进行实验测试，以便提供列写基本关系式所必需的资料。因此，应该认识到，最有效的是，系统工程师必须作出不懈的努力，以保持物理细节、系统分析工具和实验方法等方面技能的适当平衡。

最后一个运载体动力学领域的例子（这是在后面的章节中将作深入讨论的一个方面），对巩固我们关于涉及到复杂性的系统分析方法的见解可能是有用的。图1.1以有助于研究车辆的横向一定向或“操纵”特性的形式给出汽车悬挂装置的图解说。减震器或机械阻尼器B的一个用途是控制车体倾斜角 ϕ 的摆动幅度。在牛顿定律的绕摆动轴的力矩方程中，一个通常的线性动力学模型将阻尼力矩表示为 $-B_t\dot{\phi}$ ，其中 B_t 是二个阻尼器的阻尼系数并有 $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ 的量纲。尽管不同类型和尺寸的车辆，它们能够采用同车身有各种几何连接的变化很大的阻尼器设计，但只要适当地选择 B_t 的数值，总是能够用 $-B_t\dot{\phi}$ 简洁地描述总的阻尼作用。尽管系统分析不要求这么细，但对图1.1所示的特定结构，下面估计 B_t 的公式 $\ominus$ 可能是很适用的：

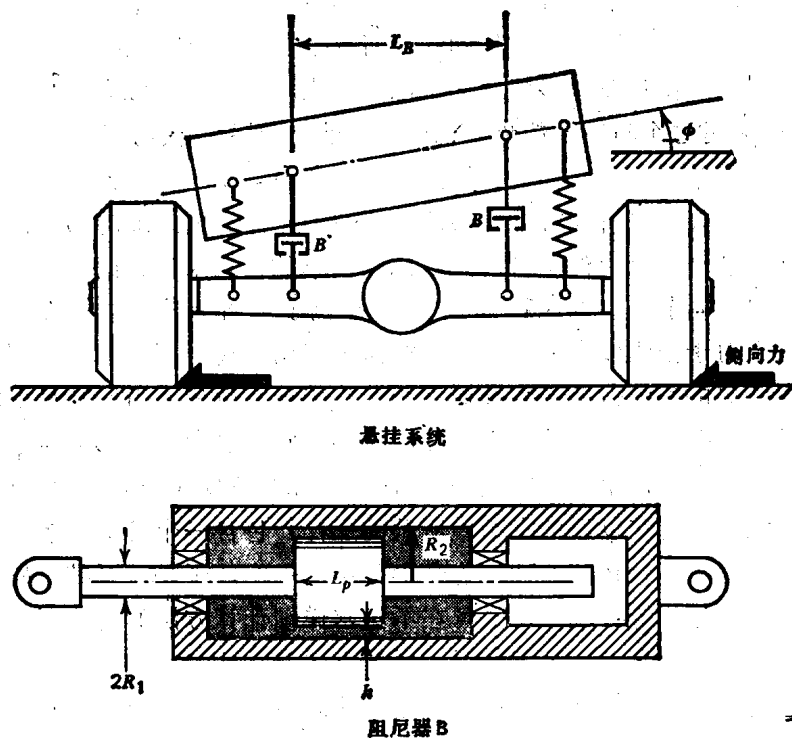


图1.1 车辆悬挂系统中的阻尼器元件

$$B_t = \frac{6\pi\mu L_p L_s^3}{h^3} \left[\left(R_2 - \frac{h}{2} \right)^2 - R_1^2 \right] \left[\frac{(R_2^2 - R_1^2)}{R_2 - h/2} - h \right] \quad (1.1)$$

虽然式(1.1)的推导已经包括许多近似和简化假设，但我们注意到 B_t 以一种相当复杂的形式依赖于5个几何尺寸以及流体粘度 μ 。如果对所有系统元件都进行这么详细描述的话，那么我

$\ominus$ Doeblin, E.O., System Dynamics, C.E. Merrill, Columbus, Ohio, 1972, p.59.

们就将陷入不可思议的参数泥淖之中。因此，一个系统设计者或分析者必须知道估计参数值的现成公式〔例如式(1.1)〕，并且必须清楚地了解如何适当地模拟一个元件在系统中的总的物理作用，而将元件细节数据的研究留给设计组的其他成员。

在图1.1中，路面作用在轮胎上的侧向力（“拐弯力”）实际上是同车辆的控制及稳定性有关的主要的力。尽管轮胎和汽车工业的研究者在轮胎特性的研究上作了并继续作着巨大的努力，而且这些努力的结果也已大大地丰富了我们的知识，但是由尺寸和材料特性来预测所提出的新轮胎设计的“力系数”仍归是不可能的。因此，车辆动力学的系统分析就依赖于由现有轮胎的实验室试验所得到的轮胎特性测量值。由此看来，试图将这样的实验数据同建模研究的另一种“理论”方法相结合，就成为有效的系统分析的必要标志。

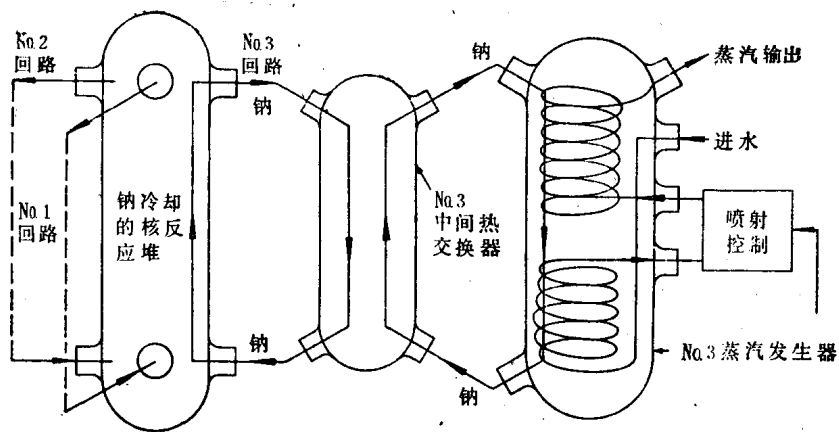
读者在阅读本书时，可能会为作者对系统分析方法的热心而倾倒，而且他们会开始认为这些方法能为所有的社会技术、经济和社会问题提供现成的解决方法。为避免这些问题的出现，我们给出以下说明。当系统分析方法正确地应用于意义明确的工程问题时，它当然会取得许多显著的、并被证实的成果。然而，工程师和其他不从事工程工作的人都试图将这些方法扩展到技术领域之外，然而，他们的尝试一般都没有得到明显的成功。我们援引文献[⊖]的一段话：“从常规工程任务、教科书、军事以及外层空间领域转到内陆城市及其管理和事务的过程中，系统分析失去了指导它在通常领域中应用的方法论上的严密性……。工程师们正在曲解社会赋予他们的使命吗？随着提倡人们肩负更大的社会义务，以及教授们主张更深入地致力于社会问题，工程师们开始面临新的任务。他们为形势所迫去做好这些事，而最终将导致他们缺乏工作能力，同时也可以说他们放弃了在广义上能为社会造福的特殊本领。道义上的支持当然是需要的；就工程师来说，社会责任感是值得称赞的。但是并不是说应该迫使他们力不从心地从事社会问题的研究，相反，他们应该做更能胜任的工程方面的工作……。工程师们能够在技术圈子中（例如我们这个领域中）发挥许多重要作用。事实上，一个清晰的“公认技术”概念能够使其所包含的内容规格化，以使公众避免产生滥用系统科学这个名称的错误。也许工程职业界能够提供的最大服务就是解除幻想——让社会了解技术的真正界限。”

1.2 输入、系统和输出的概念

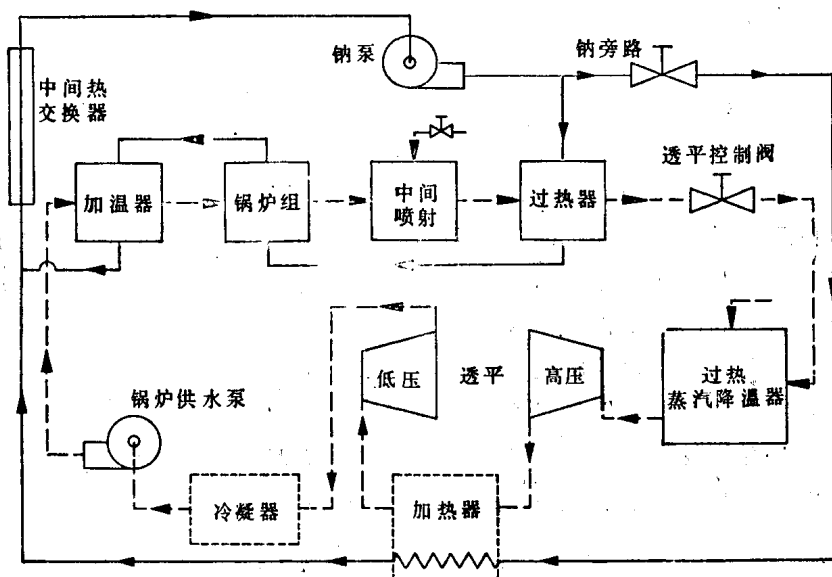
因为我们致力于研究相互连接的元件或子系统，因此，在系统分析中，一般强调采用“信号”和“系统”的工程问题描述方法是不奇怪的。系统是构成机器或所研究的过程的实际硬件，而信号则是在系统间的连接通道中“流动”的物理变量（应该指出，这里对“系统”一词的使用似乎是不一致的；我们既对较小的结构单元，也对较大的组合结构使用它。虽然能够使用“元件”或“子系统”这些词来避免产生这样的问题，但许多作者还是按这种方式不加区别地使用“系统”这个术语；而依靠上下文搞清它的意思。一旦我们承认了这种用法，则将不会产生理解上的问题。）。

当我们把系统看作是相互连接的元件的总体时，显然，每个元件将有一个或多个由其它元件流入的信号，并且有一个或多个由它流向其它元件的信号，前者称为输入，而后者称为输出。

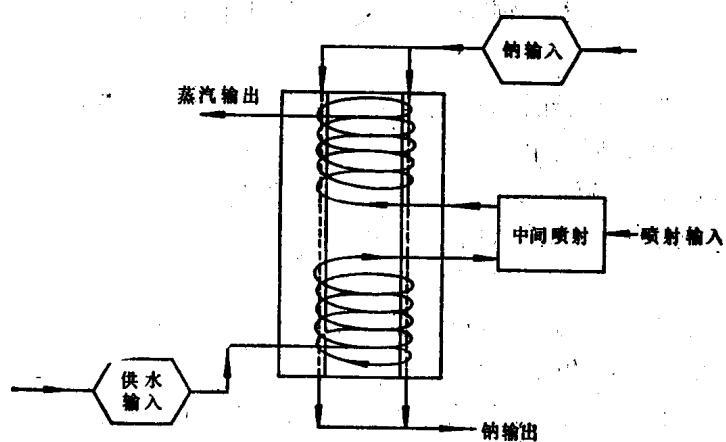
⊖ Hoos, Ida R., "Can Systems Analysis Solve Social Problems?", *Datamation*, June 1974, p. 82.



a) 液体金属冷却的核电厂总轮廓
(1000 MW_e 的核电厂)



b) 蒸汽发生器回路的详细说明



c) 蒸汽发生器示意图

图1.2 核电厂的输入-输出模型

图1.2 a [⊖]表示可用于拟议中的增殖反应堆型核电厂的一种蒸汽发生器方案示意图,而图1.2b则详细表示这个系统中各组件的相互连接。所提到的报告专门分析图1.2a所示的蒸汽发生器子系统,并建立一组方程(数学模型),当给定系统参数和输入时,可由此方程组计算所选择的输出量。在这个研究中,系统的输入包括供水流量和温度、钠的流量和温度以及中间喷射流量和温度(输入量的总数为6),而感兴趣的5个输出量(响应)是蒸汽主流量和温度,锅炉出口流量和温度以及钠的出口温度。系统参数(它决定系统的物理特性)包括诸如几何数据(锅炉管子的数目、长度、直径等)、材料性质(例如比热和密度)以及依赖于材料性质和工作条件的热传递系数等量。模拟图1.2 c 的系统需要44个方程和约90个参数。

1.3 输入型式的分类

在前一节中,我们将输入看成是流入系统的信号(常常认为它是另一系统的输出);而这里我们引用更一般的观点,将输入定义为任何能够激发系统产生响应的因素。因为这一章打算提出课题的简要概述,所以将输入分成一些类型是合适的。我们当然希望这些类型能包括任何特定的实际应用中出现的所有可能性,这样就使得我们能够建立系统分析的这种形式的相互协调体制。

我们的分类方案将是作者以前的著作[⊖]中所使用的分类法的推广。第一种分类方法是将输入分成三类:

1. 外部驱动
2. 初始的能量储存
3. 参数激励

我们用图1.3所示电路的简单例子来引出这些概念。固定电容、电感以及可变电阻称为无源元件,它们不可能连续提供能量。外部驱动由加到系统上的外部能量输入所构成,例如理想的电压源 $e_i(t)$ 。这个外部驱动将使系统产生输出电流 i_o 的响应。如果不加外电源(用导线代替 $e_i(t)$),但只要回路具有某种初始的能量储存,我们仍旧能够使系统发生电流 i_o 的响应。在这个电的例子中(更一般地说,也适用于其它所有类型的系统),存储的能量可能以“势能”和(或)“动能”的形式出现。如果开始时用某种外电源将电容器充电(“势能”),然后将电源拿开,显然放电的电容将释放其能量,并使电路发生电流响应。同样,如果通过加 $e_i(t)$ 在电感中形成了电流(“动能”),然后将 $e_i(t)$ 短接(阻止 e_i 进一步向电路供给能量),那么,由于电流 i_o 和 R 、 L 、 C 两端的电压随时间变化,电路仍然显示动态响应。最后,如果 e_i 是稳态的,通过移

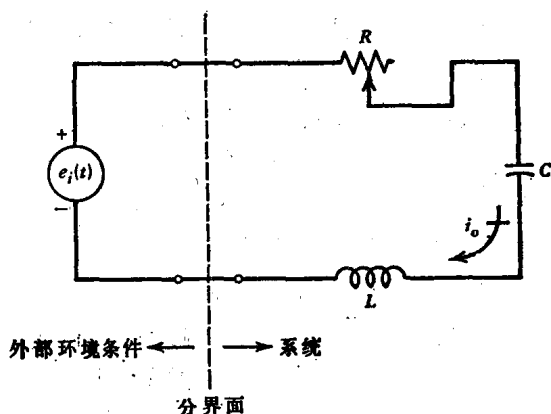


图1.3 具有三种输入形式的电路

⊖ Iyer, J.S., "Analog Simulation of Sodium-Heated Steam Generator.", BAW-1280-42, Babcock and Wilcox Research Center, Alliance, Ohio, 1967.

⊖ Doebelin, op.cit., p. 7.

动 R 的触点,使电阻随时间变化,那么就能够再次发生 i_0 和电路各部分电压的动态变化。这类输入称为参数激励。这里,能量仍旧由稳态电压源供给(现在我们要将电压源看成是系统的一部分);但是现在是由外部控制系统“内部”的参数变化,从而引起能量供给的动态变化。

另一种实用的分类方案涉及到外部驱动和(或)参数激励输入随时间变化的性质(规定初始的能量储存为常数,而不是时间的函数)。从对真实系统的实际运行情况和对求解模拟系统的数学方程所需要的方法两者来说,这种分类方式是有一定意义的。这种分类方式的一个实用(尽管不完善)方案是将输入分成如下一些型式:

1. 确定性的

(a) 周期的

(b) 瞬态的

(c) 特殊情况(调制和解调信号等)

2. 随机的(“不规则的”)

(a) 平稳的

(b) 不平稳的

当我们讲到输入类型时,将它们称为输入模型更为确切,因为就像不能够精确地描述任何实际系统,而必须去分析简化的系统模型那样,我们也不能够精确地描述实际输入,从而迫使我们讨论近似方法。

一个确定性的输入模型,其时间历程由一个数学公式、图解曲线或数据表来描述,并且它能够“随意”加以重复。例如高速运行的火车的一个重要输入是轨道的“粗糙度”,它是以火车相对于地平面的垂直偏移给定的,这种输入对以“乘客舒适程度”来描述的输出有颇大的影响。对于一段给定的轨道来说,这样的轨道曲线每天的变化很小,我们能够在其上重复驶行一列火车,并且合理地假设传递给火车的垂直输入运动一直被重复着。然而对于飞机来说,类似的情况就引致随机输入。考虑一架飞机通过大气湍流区,飞一条直的水平路线,并承受着“垂直阵风速度”的输入力的作用,此输入力使飞机发生垂直运动并使乘客感到不适。如果飞机装备适当的仪器,那么随着飞机穿过一条确定的路线,我们就能够得到一个空气垂直作用力的时间历程;而如果我们使飞机转向并完全沿着先前的路线折回,那么仪器将指出空气的作用力并不重复先前的时间历程,事实上,因为我们涉及到一个真正的随机现象,因此那个时间历程将永不再发生。

现在我们详细说明确定性输入模型的类型。因为周期性输入与在不变的转速下运转的一大类机器的运行相对应,因此它是具有极为重要的实际意义的输入之一。考虑任何往复的或(和)旋转的发动机、泵、透平、压缩机等机器恒速运行的情况。当稳态运行时,力、应力、速度、温度、压力、流量等每个参数都以某种重复的周期循环着。然而,因为所有恒速运转的机器总是要启动以及间或要停车,并且因为这种非稳态运行可以说明临界状态,因此工程师们也十分关心这些瞬态输入。瞬态运行也包括由一个稳态向另一稳态的变化,如汽车刹车或加速以及诸如安全阀突然开启或汽车轮胎爆裂等紧急的或破坏性的情况。再者,如果一个事件的发生是周期的,但事件之间的周期比事件的持续时间长,那么瞬态输入模型就可能是恰当的。例如在冲床上,前一次冲孔冲击的作用在下次冲击发生之前可能早就消失了。

前面我们将列出的随机输入细分为平稳的和不平稳的二个子类型;现在我们要说明它们之间的区别。在飞机颠簸的例子中,尽管一个特定的时间历程将永不重复,但由一个“样本”

到下一个“样本”输入的统计特性（例如幅值分布、均方值和频率成分等）可能是可再现的。例如，同时有十架隔开相当大水平距离的飞机在飞行，由于扰动，每个时间历程将是不同的，但十个记录能够有相同的统计数据。事实上，我们可以将所有的记录数据加以综合，从而得到在统计上更可靠的表征随机输入的信息；这就叫做总体平均。另一种做法是只使用一架飞机，但让它在十倍的路程上飞行而将数据记录长度增大十倍。如果我们将这个长记录分成十个等长度的子记录，那么我们就能够计算每个子记录的统计数据。如果十个记录的统计数据是一致的，那么就说随机输入是平稳的，亦即其统计特性不随时间变化。如果输入是平稳的，则考虑到较高的统计可靠性，我们能够将十个子记录作为一个长的记录来对待并对数据加以综合（时间平均）。如果从一个子记录到另一个子记录统计数据变化很大，那么随机输入是不平稳的。不平稳的随机输入存在数学上的困难；然而通过将整个时间记录截断成合理选择的分段，并假设在每段中有平稳的特性，这样处理许多实际问题可得到满意的结果。

在结束这一节时我们再次提醒读者，这里所讨论的输入类型指的是分析工作者选择来描述某种物理现象的模型形式。因为没有任何实际发生的事件是完全可预测或可重复的，因此所有的实际输入都是不平稳的随机过程（最困难的形式）。就像所有其它实际工程研究那样，分析工作者必须以最简单的方式模拟真实情况，而这种模拟方式要产生对研究要求来说足够精确的结果。

1.4 系统模型类型的分类

根据定义，物理系统的数学模型是用适当选择的数学关系或方程描述系统的特性。因为现实情况的数学描述在某种程度上必然是不完善的，对于给定的系统来说，决不是只有一个模型，而是有一系列的模型。在分析或设计的开始阶段，工程师往往要从这个系列中选择一个比较简单的模型，以便在不费过大的分析努力的情况下，对主要的决定因素有某种了解。作为能够从迅速统观系统基本特征中获益所要付出的必要代价，人们愿意接受这种不太精确的简单模型。由于基本关系是从比较简单的模型推导出来的，这也是它们所表现出的局限性，因此为了改善精度给模型加上复杂的性质就是恰当的了。这种做法，即有计划地逐渐增加模型的复杂程度已经被认为是解决困难问题的一种合理的惯常方法。

对于那些从前没有对模型类型进行过系统认识的人，我们作如下简要介绍^①。因为模型类型的区别在于所使用的方程的性质不同，因此模型类型的讨论本质上就变成方程类型的讨论。为了使这样的讨论有实用价值，我们采取工程师的（而不是数学家的）观点，并限制其范围和细节，以便仅包括我们认为是在系统动力学的实际应用中经常使用的主要方程类型。尽管各种类型的方程都可找到实际用处，但这里我们将着重讨论常微分方程和偏微分方程。

因为物理课题在三维空间展开，并且我们的兴趣一般包含动态响应（取时间为独立变量），于是系统研究中的未知量（输出）将依赖于4个独立变量。例如，振动结构的运动依赖于我们观测的位置（空间坐标 x 、 y 、 z ）以及观测的时刻（ t ，时间变量）。在各种工程科学领域问题（如流体流动、热传递和振动等）的建模中所使用的“最精确”的宏观观点是认为研究对象是非结晶的连续介质；于是未知量在空间“平滑地”变化。把变量联系起来的物理定律一般包括相对于空间和（或）时间的变化速率，这样我们自然就导出微分方程，因

^① Doebelin, E.O., System Dynamics, C.E. Merrill, Columbus, Ohio, 1972, p. 10.

表1.1 系统模型类型的分类

模型 类型 编号	作为模型的介质的性质							系统参数的时变性		
	连续性 ④	方向性		均匀性		线性		随机的	确定性变量	确定性常数
连续的	各向 异性的	各向 同性的	不均质的	均质的	非线性	线性				
1	X	X		X		X		X		
2	X	X		X		X			X	
3	X	X		X		X				X
4	X	X		X			X	X		
5	X	X		X			X		X	
6	X	X		X			X			X
等等	X									
20	X		X		X		X		X	
21	X		X		X		X			X
22	X		X		X			X		
23	X		X		X		X		X	
24	X		X		X					X
25							X	X		
26							X		X	
27							X			
28								X		X
29									X	
30										X

图 4-1-1 模型分类

图 4-1-2 模型分类

↑ 离散分量
↓ 连续分量

↑ 离散分量
↓ 连续分量

为未知量依赖于4个变量(x, y, z, t), 因此这些微分方程将是偏微分方程。

求解上述偏微分方程的精度及所包含的困难程度主要决定于分析者在建立实际情况的数学模型时所采用的简化假设。就像我们所预料的那样, 与实际物理性质愈接近的模型包含的假设愈少, 也就愈复杂, 如果它们是完全可以解的, 那么求解时则需要应用更复杂和冗长的数学方法。表示由各类假设所导出的模型型谱的一个有效方法是使用二种概括的分类方法: 介质的性质和系统参数的时变性, 如表1.1所示, 每一类可以再进一步细分。此表的前24类(“场的问题”)对应于上述的偏微分方程模型, 现在让我们来讨论表的这一部分。

考虑一个具体的物理例子作为对表1.1一般意义的讨论可能是有益的。图1.4表示由有惯量和弹性的材料制成的任意形状的固态物体, 因此它能够发生振动。如果特定的外力(驱动输入)和(或)初始变形(能量存储)是给定的, 那么要知道振动运动就要解出作为位置 x, y, z 和时间 t 的函数的位移 u, v, w 。应用

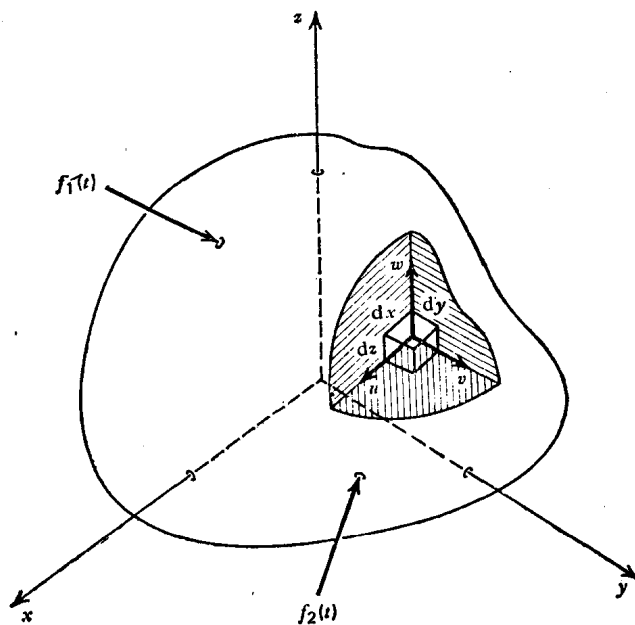


图1.4 振动的物体

相应的物理定律和某些假设导出的联立偏微分方程组 $\ominus$, 方程组中的一个方程是

$$\left[\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \right] \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

此方程是假设系统模型属于表中的第24类而得到的。表中方向性指的是当考虑物体中不同方向时材料的性质(例如应力和应变之间的关系)是否是不同的。例如, 合成纤维材料沿着纤维方向同垂直于纤维方向相比将表现出颇为不同的性质, 而许多种钢在所有方向上表现出近于一致的性质。有方向性的材料称为各向异性的, 而无方向性的材料则称为各向同性的。

说明材料性质的另一项目就是从一点到另一点的均匀性。这种均匀性如: 在整个物体内部质量密度 ρ 是相同的吗? 均匀的介质称为均质的; 不均匀的介质称为非均质的。一种材料或介质可能在某一方面的性质(比如说密度)是均质的, 而另外的性质(比如说弹性模数 E)是非均质的。在介质性质项下, 最后的特性是线性或非线性。这就涉及到变量之间数学关系的性质, 例如应力-应变关系。我们做了最简单的假设(各向同性、均质、线性)而得出式(1.2)。

另一种主要分类方法为系统参数的时变性, 它涉及到这样的可能性, 即模型可以假设某些参数按已知方式随时间变化, 而不是随方向变化(各向异性)或随位置变化(非均质), 或者说除了按参数随方向或位置变化分类之外, 还可按参数的时变性分类。例如, 如果我们知道图1.4的振动物体的温度按已知的规律随时间变化, 那么这种情况就可以用密度 ρ 、弹性模数 E 和泊桑比 ν 为时变值组合成模型。实际上, 由于温度、湿度、空气压力等环

$\ominus$ Timoshenko, S., Theory of Elasticity, McGraw-Hill, 1951, N.Y. p.453.