

# SYSTEM DYNAMICS

Modeling and Simulation of  
Mechatronic Systems

(Fourth Edition)

# 系统动力学

机电系统的建模与仿真

(第4版)

[美] Dean C.Karnopp Donald L.Margolis Ronald C.Rosenberg

刘玉庆 等译



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



WILEY

本书得到总装备部装备科技译著出版基金、总装备部“1153”人才工程资助

# SYSTEM DYNAMICS

Modeling and Simulation of  
Mechatronic Systems

(Fourth Edition)

# 系统动力学

机电系统的建模与仿真

(第4版)

[美] Dean C. Karnopp Donald L. Margolis Ronald C. Rosenberg

刘玉庆 李昊 郭强 安明 周伯河 译  
陈善广 主审

国防工业出版社

北京

# 著作权合同登记 图字:军-2009-025号

## 图书在版编目(CIP)数据

系统动力学:机电系统的建模与仿真:第4版/  
(美)卡罗普(Karnopp,D.C.), (美)马戈利斯  
(Margolis,D.L.), (美)罗森伯格(Rosenberg,R.C.)  
著;刘玉庆等译. —北京:国防工业出版社,2012.5

书名原文: System Dynamics : Modeling and  
Simulation of Mechatronic Systems (4th Edition)

ISBN 978-7-118-07214-3

I. ①系… II. ①卡… ②马… ③罗… ④刘… III.  
①系统动态学 IV. ①N941.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第060962号

Translation from the English language edition:

System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic Systems; 978-0-471-70965-7

Copyright© 2006 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc 授权国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 24¼ 字数 568 千字

2012年5月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价118.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 序

很高兴受邀对这本专门介绍动态物理系统建模与仿真的教材进行修订再版,因为我们始终认为,在现代工程系统的设计中,非常有必要对系统的物理属性作深入理解;同时,用统一的形式化方法描述系统的数学模型也是至关重要的,因为这样可以直接掌握通过解析方法或计算机仿真预测获得响应的物理本质。在实际的工程环境中,工程人员必须在多学科的条件下工作和交互。实际上,对所有复杂系统的研究而言,都是解决热力学问题、结构问题、振动和噪声问题、控制和稳定性问题,等等,这些问题都无法归结到一个单独学科的范畴。对工作在各个领域的绝大多数工程技术人员而言,理解这些不同学科间的交叉是非常有价值的。我们也仍然相信,键合图为研究和解决这些多能域系统的问题提供了一种最佳的手段。

本书几乎涉及了对所有类型工程系统的建模与仿真。我们认为,撰写本书的目的完全是为了探讨一般意义下“机电(Mechatronic)”领域的问题。但是,由于在本书第1版出版时,学术界和工程领域已经开始使用术语“机电”,该术语通常被用来描述机械系统的电子控制领域的研究。而在本书中,我们的研究既包括单纯的机械系统,也包括各种各样的物理系统。我们将介绍如何使用类似于对复杂工程系统电子控制方案设计的方法,实现对各种复杂系统的建模和仿真。

自从本书的第3版问世后,在国际范围催生了许多相关的课程,甚至是在专门研究机电系统的院系。在国际互联网上以“Bond Graph Courses”(键合图课程)作为关键词搜索,能找到成百个目前使用键合图讲授系统建模的课程。这些课程涵盖多个领域,例如,生物学、经济学、物理学以及传统的工程学。作为本书作者,曾了解国际上所有使用键合图的科研和工程人员。但那个时候已经过去了,因为越来越多的学科中的人们已经意识到使用一种统一的方法对所有类型的物理系统建模以得到线性或非线性数学模型的优势。

在本书的早期版本中,将内容分为两部分,前6章作为本科生的教材,剩余部分作为研究生的教材。在第3版中,着重引入了一些最新的资料,这些资料涵盖了多维非线性机械系统,可表示为偏微分方程的典型分布式系统,用于电磁执行机构的电磁回路,以及热流系统,这些内容在第7~12章中给出。还专门增加了第13章,介绍如何使用商业软件对复杂非线性系统的仿真。

在第4版的前6章中,主要改写了基础内容。为了让初学者能更容易掌握,根据几十年的本科教学经验重写了前6章。其主题基本不变,但是具体的描述是全新的。每章中还加入了新的习题,和前面版本一样,也提供了解答手册。这些章节适合作为本科教材,

学时约占 1/4 学期或 1/2 学期。

键合图对于描述线性和非线性系统同样适用。虽然通篇的介绍和举例中一直说明真实系统实际上都是非线性的,而且其非线性特性最终必须要考虑,但是在第 1 章引言中还是重点介绍线性系统。因为在所研究的系统中不论包含何种能域,都可以使用线性简化方法建立一个系统模型作为分析和仿真研究的标准起点。为讨论自动化仿真新添加了一节,可以直接在计算机显示屏上画出其键合图,然后使用软件将所有的方程自动导出,并配合一些可用的开发包将其集成到仿真中去。接下来的章节属于研究生阶段的课程,也可作为高级键合图建模技术的参考。

很高兴地看到书中的内容得到不断丰富并被认可。经实践证实,键合图方法不仅能有效帮助本科生为动态物理系统建立数学模型,并且可被扩展至研究生阶段来处理一些高级问题,甚至可被用来处理一些有工业背景的具体问题。对系统建模的初学者而言,虽然键合图方法和其他建模方法一样简单,但键合图方法相比有更多优势,尤其当遇到更有挑战性的系统问题时,其他那些形式化功能较差的方法几乎派不上什么用场。

有关物理系统建模的话题仍然深深地吸引着我們,希望同学们能喜欢这本书,并在实际工作中发现它的用处,也希望专业工程师们能从中获益。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 系统模型 .....	2
1.2 系统、子系统和元件 .....	4
1.3 确定状态系统 .....	5
1.4 动态模型的应用 .....	6
1.5 线性系统与非线性系统 .....	7
1.6 自动化仿真 .....	7
习题 .....	8
参考文献 .....	10
<b>第 2 章 多通口系统与键合图</b> .....	11
2.1 工程多通口 .....	11
2.2 通口、键和功率 .....	15
2.3 键合图 .....	17
2.4 输入、输出和信号 .....	18
习题 .....	20
<b>第 3 章 基本元件模型</b> .....	23
3.1 基本一通口元件 .....	23
3.2 基本二通口元件 .....	31
3.3 三通口结元件 .....	36
3.4 基本多通口系统的因果关系 .....	40
3.4.1 基本一通口元件的因果关系 .....	40
3.4.2 基本二通口和三通口元件的因果关系 .....	41
3.5 因果关系与方块图 .....	43
3.6 伪键合图与热系统 .....	44
习题 .....	46
参考文献 .....	50
<b>第 4 章 系统模型</b> .....	51
4.1 电系统 .....	51
4.1.1 电路 .....	52
4.1.2 电路网络 .....	55

4.2	机械系统	58
4.2.1	机械平动	59
4.2.2	定轴转动	63
4.2.3	平面运动	66
4.3	液力与声学回路	75
4.3.1	流体阻力	76
4.3.2	流体容量	78
4.3.3	流体惯量	82
4.3.4	流体回路构建	83
4.3.5	一个声学回路的例子	84
4.4	换能器与多能域模型	85
4.4.1	变换器型换能器	86
4.4.2	回转器型换能器	87
4.4.3	多能域模型	89
	习题	91
	参考文献	102
<b>第5章</b>	<b>状态空间方程与自动化仿真</b>	<b>103</b>
5.1	系统方程的标准形式	105
5.2	键合图的增广	107
5.3	基本公式与化简	112
5.4	扩展的形式化方法:代数环	117
5.4.1	扩展的形式化方法:微分因果关系	121
5.5	输出变量形式化	126
5.6	自动化的和非线性系统	128
5.6.1	非线性系统	128
5.6.2	自动化系统	130
	习题	133
	参考文献	139
<b>第6章</b>	<b>线性系统分析</b>	<b>140</b>
6.1	引言	140
6.2	常微分方程解法	141
6.3	特征值与自由响应	143
6.3.1	一阶系统举例	143
6.3.2	二阶系统举例	146
6.3.3	举例:无阻尼振荡器	149
6.3.4	举例:有阻尼振荡器	153

6.3.5 一般情况 .....	155
6.4 激励响应与频率响应函数 .....	158
6.4.1 响应曲线的正态属性 .....	165
6.4.2 一般情况 .....	166
6.5 传递函数 .....	167
6.5.1 方块图 .....	168
6.6 完全响应 .....	169
6.7 可选状态变量 .....	171
习题 .....	173
参考文献 .....	179
<b>第7章 多通口场和结型结构 .....</b>	<b>180</b>
7.1 储能场 .....	180
7.1.1 $C$ -场 .....	180
7.1.2 $C$ -场的因果关系 .....	184
7.1.3 $I$ -场 .....	190
7.1.4 混合储能场 .....	195
7.2 阻性场 .....	196
7.3 可调二通口元件 .....	199
7.4 结型结构 .....	201
7.5 多通口变换器 .....	202
习题 .....	206
参考文献 .....	210
<b>第8章 换能器、放大器和设备 .....</b>	<b>211</b>
8.1 功率换能器 .....	211
8.2 储能换能器 .....	217
8.3 放大器和设备 .....	220
8.4 受控系统的键合图和方块图 .....	224
习题 .....	227
参考文献 .....	236
<b>第9章 含非线性几何学的机械系统 .....</b>	<b>237</b>
9.1 多维动力学 .....	237
9.2 机械系统动力学中的非线性 .....	244
9.2.1 基本建模过程 .....	244
9.2.2 多体系统 .....	252
9.2.3 拉格朗日或哈密顿 $IC$ -场表示 .....	258
9.3 车辆动力学的应用 .....	262



习题	265
参考文献	275
<b>第 10 章 分布参数系统</b>	277
10.1 应用于分布式系统的简单集总技术	277
10.2 分离变量实现连续集总模型	285
10.3 有限模式键合图的通用性研究	296
10.4 组合完整系统模型	303
10.5 小结	304
习题	305
参考文献	309
<b>第 11 章 磁路和设备</b>	310
11.1 磁效应与流变量	310
11.2 磁能的存储与损耗	313
11.3 磁路的组成	317
11.4 磁力元件	319
11.5 设备模型	321
习题	326
参考文献	329
<b>第 12 章 热流系统</b>	330
12.1 键合图形式表示的基本热力学	330
12.2 实键合图和伪键合图中的热传递	335
12.2.1 一个简单案例	337
12.2.2 电热电阻器	338
12.3 流体动态系统	340
12.3.1 一维不可压流	342
12.3.2 可压缩效应的表示	345
12.3.3 一维流的惯性和可压缩性	347
12.4 可压气体动力学的伪键合图	349
12.4.1 动态热存储器	349
12.4.2 等熵喷嘴	352
12.4.3 构建含热动态存储器和等熵喷嘴的模型	354
12.4.4 小结	357
习题	357
参考文献	361
<b>第 13 章 非线性系统仿真</b>	362
13.1 显式一阶微分方程	362

13.2	代数环产生的微分代数方程	364
13.3	微分因果关系导致的隐式方程	367
13.4	动态系统的自动化仿真	370
13.4.1	方程的分类	370
13.4.2	隐式方程和微分代数方程的求解	371
13.4.3	基于图标自动化仿真	371
13.5	非线性仿真举例	372
13.5.1	一些仿真结果	375
13.6	结论	377
	习题	377
	参考文献	380
附录	用于建模机械、声学及液压元件等典型材料的属性值	381

# 第1章 绪论

本书与工程师们要设计的动态物理系统的发展息息相关。将要研究的系统可用术语“机电”来描述,其含义是系统的组成在一般意义下是机械的,同时包括一些电子控制。在计算机—控制系统的设计中,透彻理解功率和能量以各种形式相互转化的系统动力学至关重要。本书中介绍了对实际系统的建模过程,探究了系统行为的分析方法,以及使用计算机技术仿真在外界激励下系统的动态响应。在开始学习物理系统之前,有必要先讲解一下工程学中的系统动力学。

术语“系统”通常被用来描述一系列广义的概念,因此很难对其下一个精确的定义,甚至无法给出一个能够涵盖其不同含义的基本概念。在本书中,使用“系统”需要预先给定两个假设:

(1)系统可以理解为通过物理边界或者概念边界从其他事物(系统环境)中分离出来的一个实体。例如:一个动物就是一个系统,它受周围环境的影响(例如气温)并与之相互交换能量和信息。这种情况下边界是物理的或是空间上的。航空指挥控制系统是一个复杂的人造系统,它不仅包括周边的物理环境,而且还包括不断变化的交通情况,它最终由客流和货流的运输所决定。这两个不同系统的共有特点是它能够确定哪些属于该系统,哪些属于外部干扰或是源自系统外部的命令。

(2)系统由一些相互作用的成分构成。对动物来说,在其体内可以发现具有特殊功能的器官和神经等。而航空交通控制系统由人和机器组成,并通过通信链路相互连接。显然,把系统内部的网状结构映射到其各组成部分的研究既是一门技术又是一门艺术,而且大多数的系统都可以分解为很多的部件,对这些部件的分析也很复杂。

在日常生活以及本书大部分主题所涉及的更特殊且技术化的应用中,我们都能意识到系统这两方面的特性。例如,当听到有人抱怨某个国家的交通系统不是很好时,在逻辑上就有人会使用“系统”这个词。首先,交通系统大体被定义为一个整体,它由空中、陆地以及海洋交通运输工具、人、机器和交通规则组成。另外,系统中的很多部分都很明确:汽车、飞机、船、行李处理设备、计算机等。交通系统的每一部分还可以细分(每一个组成部分也是一个系统),但是由于各种原因在细分过程中必须谨慎。

所谓“系统观点”的本质就是从整个系统的运行出发,而不是在组成部分的层面上考虑问题。对交通系统的抱怨就是对整个“系统”的抱怨。按照各自设计,驾驶者能够开车进行旅行,飞机按设计时速无故障飞行,出租车也像预计的那样为大家服务,但事实却可能是交通大拥堵,飞机晚点,诸如此类的情况经常发生。事实上,光有好的部分不一定能组合成一个让人满意的系统。

在工程领域里,一个系统的设计或运行与各种各样的人类活动和任务紧密相关,在某些层面上系统的很多部分都可以独立运行。例如发电站的发电机、涡轮、锅炉、供水泵,它

们都是由不同的人独立设计而成的。而且,热传递、压力分析、流体动力学和电子学等都是其中的一个子集。必须意识到在一个任务下的所有工作组都不仅是本组在工作,更重要的是整个系统都在工作,而且还要实现整个系统的预期功能。很多情况下,过分简化的假设都是这些只负责局部小系统设计的工作人员做出的。这种情况发生后,结果往往让人很失望。他们设计的发电站可能在满载的时候损坏,而这种结果是那些看上去似乎很合理的设计导致的。

本书的重点放在研究系统行为,而不是组成部分的层面上。这需要有关于组成系统各成分的知识以及某些特定工程领域的知识。本书中工程系统的主要问题和题目来自振动学、材料力学、动力学、流体力学、自动控制、热力学以及电路学。很多的工程师把自己职业生涯的大部分时间花在了以上学科中的一种上,但是很少有大工程系统只涉及一个学科领域。因此,系统工程师有理由必须掌握工程学的各方面以及相关的其他知识。

很多系统是以其变量不随时间改变为假设的,以此来完成静态或者稳态操作,这样的设计也许会成功,但是本书关注的是动态系统,这类系统的行为是时间的函数。对于一架运输机而言,它的绝大部分时间是匀速飞行,因为保持匀速以节约燃油是很重要的。对同一架飞机来说,研究匀速飞行时机翼所承受的压力远不如在湍流中飞行以及在紧急情况 and 硬着陆情况下所受的时变压力那样重要。在研究飞机燃油经济问题方面,静态系统分析就够用了。但是对于压力预测,系统动态分析是必需的。

一般来说,没有一个系统可以真正地在静态或者稳态下工作,系统都会有短时间的起伏变化并受瞬时效应的影响,例如,开关状态就很重要。尽管稳态分析在设计研究中很重要,但本书着重研究动态系统。由静态系统分析作出的决策往往会误导我们,因此动态系统分析要比静态系统分析复杂的多和重要的多。当考虑系统动力学时,由于外部的干扰和不稳定性,系统可能永远都达不到稳态。而且当以静态考虑时,各种系统会有反直觉的行为。系统的一处改动或者一条控制策略的变化,即使是从静止状态起的短暂运行都可能给整个系统带来长时间的影响,甚至是带来和初始状态相反的结果。社会历史中就充满了类似的悲剧,因此人们希望动态系统分析可以帮助规避“静态思维”的错误。甚至对简单的工程系统,在以静态为基础合理地研究系统之前,也必须要了解一些系统动态响应方面的问题。

在工程领域中一个反直觉系统的简单例子,如水力发电站。为了减小功率,位于涡轮前面的水闸门向关闭的位置移动。但是,在该瞬时,由于惯性作用使水流过阀门时保持稳定,导致水流通过小阀门区域时水流加速,导水管中水的惯性作用反而使功率增加。慢慢地,随着导水管中的水流速减慢,从而使功率减少。如果对这一系统的动力学不了解,人可能会打开阀门来减小功率。如果真的这样做,只会导致功率暂时减小,而后就是不可避免的增大。从这个例子可以看出,对于设计机电一体化系统控制器而言,掌握动态响应是非常关键的。

## 1.1 系统模型

对实际系统的动力学研究中,核心是对系统模型的认识。系统模型是通过简化和抽象得到的一种用来预测系统行为的结构。在工程中,缩放模型曾得到了广泛使用。例如:

飞机风洞模型、船模实验水池中的船体模型、城市工程中的建筑模型、光弹性应力分析中金属部件的塑料模型、以及电路设计中的“试验板”模型。

这些模型只能体现真实系统的部分特性。例如：在飞机风洞模型中，并没有刻意改变真实飞机内部的色彩或是座位布局。航空工程师们做出了如下的假设：真实飞机中的某些因素对飞机的空气动力学并不重要，因此系统的模型中只包含对真实系统当前研究内容有重要影响的因素。

本书中把另一类模型称作数学模型。尽管这类模型比物理模型要抽象得多，但是在物理模型与数学模型之间仍然有很多相似之处。数学模型也可以用来预测系统响应输入的一些方面。例如，在测试过程中数学模型可以预测一架飞机是如何响应来自飞行员的输入命令，但是这样的模型却不能预测真实飞机在任何一个方面的响应。例如，这个模型不包括在操作过程中气动力加热变化的任何信息，以及飞机结构高频振动的信息。

因为模型是由真实系统简化得来的，所以构建模型也是一门艺术。一个非常复杂的系统可能还有若干无法估计的参数，甚至无法进行分析，而且即便可以分析也会产生一些无关的细节。过度简化的模型同样不适用于体现重要的作用。事实上要明白：没有任何一个系统可以被精确地建模。任何一个可靠系统的设计人员都必须要经历建立各种复杂程度模型的过程，以此来寻找解决问题的最简模型。

本书的剩余章节将继续介绍系统模型、构建模型以及从模型中抽象系统特性的过程。此处模型一词仍为通常意义上的数学模型，但它是以形式化图形和计算机模型的形式体现，而不是以常微分方程组的形式表示。

各种物理系统的系统模型将由统一的符号构建。这些模型以工程学领域的各分支为基础，在能量和信息流的基础上使用“键合图”的符号表示系统。这些符号能够支持我们研究系统模型的“结构”。模型元件的自然属性和形式以及它们之间的相互作用以图形方式清晰地表示出来。通过这种方法，可明显看出各种系统之间的相似之处，且其经验可以从某一个领域扩展到其他领域。

使用键合图语言，仅需要一套很少的理想化的模型元件就能构建各种系统的模型，如电模型、磁场模型、机械模型、液压模型、气压模型、热力学模型以及其他系统模型。该形式化方法支持将模型转化为微分方程模型或图形化的计算机仿真模型。过去针对每一类型的系统分别用图表来表示其动态系统模型，如图 1.1 中的(a)、(b)、(c)，每一个图都表示一种典型的模型。注意到图中每一元件看上去都源自其设计草图，但事实上真实系统的图片却和此图完全不同。图 1.1(a)表示一辆汽车在路面行驶的动力学，但是模型中的质量块、弹簧、阻尼器与可视化的部件并没有一一对应关系。类似地，图 1.1(b)中的电阻和电感符号并不是对应被称为电阻和感应线圈的物理元件，而是对应单独物理设备中的电阻作用和电感效应。因此，系统的部分示意图甚至要比直观上更为抽象。

图 1.1(d)显示的是一种复合的系统，这种传统方法表示的系统模型不是很完善。事实上，如此将模型中功能都在图中显示的情况确不多见，图中模型的基本结构并不明显。键合图要比图 1.1 中的示意图抽象得多，但是它的描述很清楚且图 1.1 中最大的好处是所有模型都使用了一组相同的符号。对于图 1.1(d)中的复合系统，可用键合图这样的通用语言来显示系统模型的本质结构。

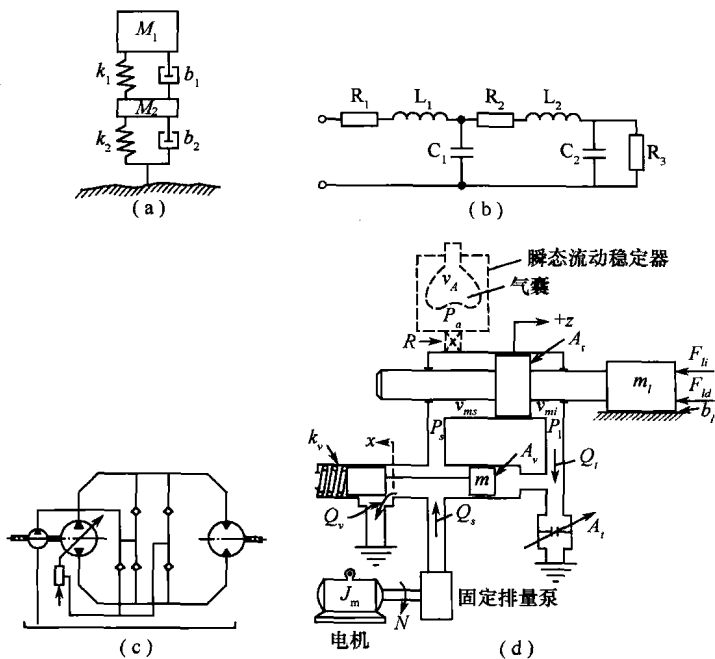


图 1.1

(a) 典型示意图；(b) 典型电路图；(c) 典型液压图；  
 (d) 包含机械、电、液压元件的复合系统示意图。

## 1.2 系统、子系统和元件

为了建立一个系统的模型,通常需要先系统分解为若干小的部件,对部件进行建模和实验研究,然后将这些部件再组合成系统模型。通常对系统的分解需要经过几个步骤完成。在本书中称系统中的主要部件为子系统,子系统的基本组成部分称为元件。当然,元件、子系统、系统的分界也不是完全绝对的,一个系统最基本的部分也可能是一个复杂的子系统。但是在很多的工程应用中,子系统和元件的分界是非常明显的。

从根本上来说,子系统是系统的一部分,像系统一样被建模;子系统可以分解为若干相互作用的元件。元件被作为一个单元进行建模,并且认为其不可再分。一方面必须弄清楚各个元件之间如何相互作用,另一方面元件被看做是一个“黑盒”,没有必要知道它内部如何工作。

为了说明上述观点,考虑图 1.2 所示的振动测试系统。系统将一个测试结构放置到由信号发生器确定的振动环境中。例如,如果信号发生器产生随机噪声信号,那么振动台的加速度将完全复制电子噪声信号的波形。在一个由物理上相互独立的部件组成的系统中,我们自然把通过连接线、水管线或机械固件而装配起来的部件看做是子系统。因此,以信号发生器标注的电子方框、控制器、电子放大器、电子液压阀、液压振动器和测试结构都可以看做是子系统。如果一些子系统在内部结构未知的情况下,与系统其他部分的相互作用能够确定,那么这些子系统也可以被视为元件。电子放大器很明显是由许多元件构成,比如电阻、电容、晶体管以及其他类似元件,但是如果放大器设计合理,那么它

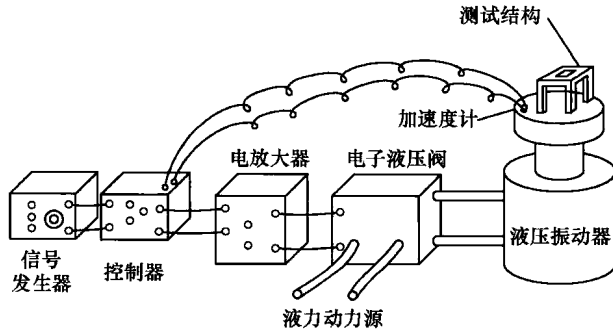


图 1.2 振动测试系统

就不会过载,而且也可以把放大器看做是一个元件,由制造商规定它的输入输出数据。为了研究整个系统,获得整个系统的动态描述,其他子系统可能需要进行系统分析。

例如:电子液压阀,图 1.3 所示为典型的伺服阀,此阀门是由一系列的电子、机械、液压部件组成,它们协同工作产生阀门的动态响应。对于这个子系统而言,元件是力矩马达、液压放大器、弹簧、液压通道及滑阀。对子系统进行动态分析,可以发现子系统设计上的缺陷,从而可以考虑用其他子系统来替代或者重新配置整个系统。从整个系统设计的角度出发,在这样的分析中,可以把一个子系统看做是一个简单的元件。一个熟练且经验丰富的系统设计者经常可以凭着直观估计对子系统建模细节做出恰当的判断。本书所介绍的方法的主要目标是阐明一个系统模型是如何通过元件模型集合而成的,当然也可以对子系统模型进行各种程度的实验,用以校验或者反驳最初建模决策。

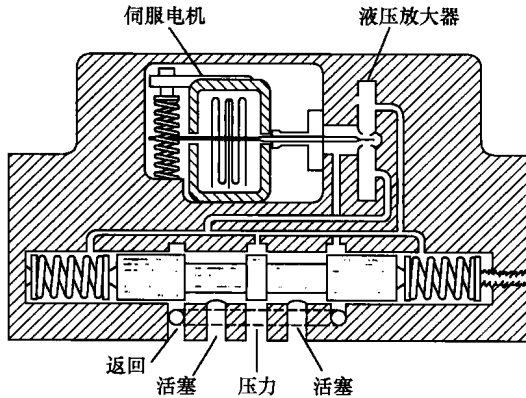


图 1.3 电子液压阀

### 1.3 确定状态系统

本书的主要目的是介绍系统数学模型的建立方法。这类模型通常称做“确定状态系统”。在数学描述中,这类系统模型由一系列的常微分方程和代数方程来表示。常微分方程是根据状态变量给出的,代数方程把其他系统的变量和状态变量相关联。在下面的章节中,将举例说明从物理效应建模开始到建立状态方程的整个过程。尽管很多分析方法和计算机仿真方法并不要求写出状态方程,但是从数学的角度出发所有的系统模型都

应是确定状态系统。

确定状态系统中如果给定:①状态变量的初始时刻值;②输入量随时间变化的曲线关系,那么系统中所有变量的未来变化均能预测得到。

事实上,某些仅在工程中使用的模型,也嵌入了一些哲学应用。例如,未来的事件不会影响到当前的系统状态。这个应用与以下的假设相联系,那就是时间只有一个方向,从过去到未来。尽管不明显,模型应该拥有这些性质看起来似乎理所当然,但要证明真实系统总是具有这些性质的难度非常大。

很明显,过去的状态对系统有影响;确定状态系统中过去状态的影响以一种特殊的方式体现出来。确定状态系统的所有过去状态决定了当前状态变量的值,这意味着很多的过去状态会导致状态变量出现相同的当前值以及相同的未来系统行为。它也意味着如果可以将状态变量设定为特定值来设置系统环境,那么将来系统的响应只是由未来的输入所决定,除了将状态变量的过去值设定为特定值外,过去的状态也并不重要了。

如果所研究系统是确定状态的,那么就能进行科学实验。系统从受控条件下启动,受控条件通过控制变量来表示。如果实验可以重复,那么就可以假设状态变量的值由实验操作来进行初始化。如果实验不可以重复,那么就假设某些重要条件并没有得到控制。这种条件可能是由不可观测的或不可完全初始化的状态变量造成的,也可能是未被识别的输入量通过系统周围环境造成的。

经过多年在科学和技术领域中的应用,确定状态系统模型的作用得到了广泛认可。对工程领域中的宏观系统,确定状态系统模型是非常普遍的,而且进一步研究这类模型对社会和经济系统仍然有很多可用之处。本书以明确定义的物理系统为例讲解了对确定状态系统模型的建立和研究,作为教材,这些例子能引起工程师们的兴趣。

## 1.4 动态模型的应用

图 1.4 所示为一个普通的动态系统模型示意图。系统变量  $S$  由一组状态变量  $X$  表示,它受输入变量  $U$  的影响, $U$  表示系统周围环境对系统的影响。 $Y$  是一组输出变量,它表示系统对外界环境的反馈结果。这一类型的动态模型有以下 3 种不同的使用方法:

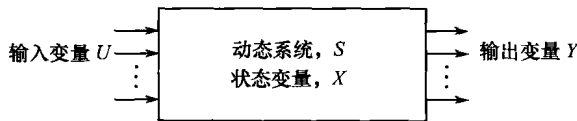


图 1.4 通用动态系统模型

(1)分析。已知输入变量  $U$  的未来值, $X$  的当前值,系统模型  $S$ ,需要预测输出  $Y$  的未来值。在系统模型是对真实系统的精确表示的假设前提下,分析技术能支持预测系统行为。

(2)辨识。给定  $U$  和  $Y$  关系的历史记录,通常根据对真实系统的试验,找到一组系统模型  $S$  和状态变量  $X$ ,使其与  $U$  和  $Y$  的时变关系相一致。这其实是科学实验的本质所在。显然,一个“好的”模型应该能够与很多组不同的  $U$  和  $Y$  组合的关系相一致。

(3)综合。给定  $U$  和某个预期的  $Y$ ,找到  $S$ ,使得通过  $U$  对  $S$  的作用来得到  $Y$ 。绝大



多数工程问题都涉及综合,但只有很有限的一些情况可以使用直接综合法。通常系统综合的完成是通过反复试验,对一系列备选系统进行重复分析。在这种意义下,动态模型显得尤为重要,因为如果对每一个备选系统都“从本质上”建立其模型以发现其特性的话,则该过程会进行得很缓慢。

本书采用分析或计算技术重点讲解如何建立系统模型以及预测系统行为。因此,重点是分析,但是必须要牢记分析对辨识问题也是很重要的,组建一个让人满意的系统对工程师来说仍然是一个重大挑战。对于分析,这里对其重要性不再赘述,但是除了作为综合的重要支持外,仅分析方法本身,也是值得每一个工程人员学习和掌握的。

## 1.5 线性系统与非线性系统

对于一个由子系统及其元件构成的整个系统模型而言,必须根据其建模目的确定建模决策,即什么动态效应必须包含在模型中。这些建模决策的结果恰是一个典型的系统示意图,它反映重要的动态效应。图 1.1 和图 1.2 是系统示意图,这些图中就包含建模决策。图 1.1(d)中,在元件层面通过标记惯性、柔性、阻性来表示重要的动态效应。图 1.2 中,建模决策在子系统层面显示出来,但是每一个子系统的建模细节并未显示。建模过程中组成子系统的元件是线性还是非线性是非常重要的。随着章节的深入,关于线性与非线性意味着什么会逐渐清晰。目前简单地说线性系统可以由一系列的线性一阶微分方程表示,非线性系统依然是状态确定系统,由一系列的非线性一阶微分方程组描述。

如果可以假设整个系统为线性的,那么就有大量的分析工具可供使用,来获得线性方程组的精确解析解,并可解析出极其详细的系统响应。后面的章节涵盖了一些关于分析的知识,其中包括特征值、传递函数和频率响应。如果一个系统含有大量的状态变量,那么将很难用解析方法求解,必须求助于计算方法来获取系统的线性特性。

如果一个系统模型中的某个元件是非线性的,那么系统就是非线性的,线性分析工具在此时不适用。滑动摩擦就是非线性元件的一个例子,此时特征值的解析解、传递函数或者是频率响应都不存在。为了获得非线性系统的响应信息,借助于时间步长仿真。幸运的是,有很多商业软件可用于仿真非线性系统。

事实上没有一个物理系统是线性的。但是,当一个系统中包含有相互作用的机电、机械、液压和热元件时,为了介绍构建整个系统模型的概念,从线性系统起步很容易入手,接着再逐步扩展到非线性系统。在下面的 5 章中,重点是线性系统模型,但是读者随时都有可能被提示真实的物理系统都是非线性的,而且为了获得系统响应必须使用仿真工具。

## 1.6 自动化仿真

自从出现了微分方程以后,动态物理系统的数学模型都是由其表示的。但是直到计算机功能强大以前,对这类模型的分析仍然有很多局限性。实际上,动态行为的预测只是应用在低阶的线性模型上,而低阶线性模型并不是真实系统的准确表示。

为了获得对系统动力学的一个正确评价,针对低阶线性模型的研究很有必要,本书前 6 章的重点是此类系统模型。但是,如今甚至在系统模型很庞大或包含有非线性元件时,