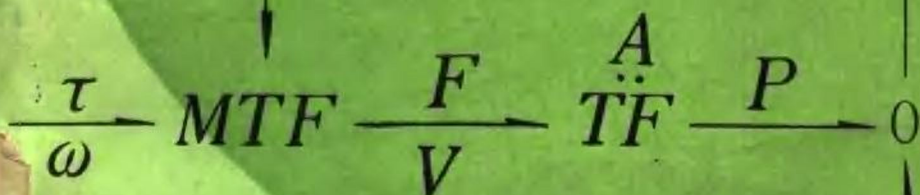
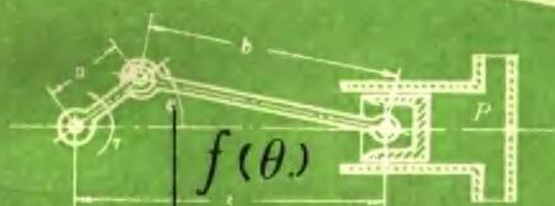


系统动力学

— 应用键合图方法 —

[美] D.C.卡诺普 著
R.C.罗森堡



机械工业出版社

SYSTEM DYNAMICS:
A UNIFIED APPROACH
DEAN C. KARNOPP RONALD C. ROSENBERG
John Wiley & Sons 1975

* * *

系统动力学

— 应用键合图方法 —

〔美〕D.C.卡诺普 著 胡大紘 译
R.C.罗森堡 著 邓延光 译

*

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 $12 \frac{3}{8}$ · 字数 326 千字
1985 年 6 月北京第一版 · 1985 年 6 月北京第一次印刷
印数 0,001—3,950 · 定价 3.10 元

*

统一书号: 15033·5794

译者前言

工程系统的动态分析，在现代科学技术发展中已显得非常重要。许多工程系统在设计、试验、操作和合理使用方面，都需要充分了解有关系统的动态性能。目前，计算机仿真技术已普遍应用于工程系统动态响应的预测，这就需要建立各种系统的数学模型并加以处理，才能对所研究的系统进行分析、识别和综合。

工程系统极其复杂多样，一个系统不仅涉及单一能量范畴，往往是多种能量范畴的耦合。现有各种系统的动态分析方法，从建立模型到列出数学公式，大都仅适用于某一种能量范畴或特定类型的系统。这是各类工程系统本身的发展过程所决定的。

键合图方法提供了一种统一处理多种能量范畴的工程系统的动态分析方法。它将多种物理参量统一地归纳成四种状态变量，即势、流、变位和动量变量。同时采用了表征基本物理性能，和描述功率变换和守恒的基本连接方式的十一种元件，就可以根据系统中功率流的方向，按照规定步骤来制定系统的键合图模型并且列出状态方程。图形和数学描述的统一格式使这种方法具有十分有效的功能。如果配以适当的计算机程序，只要制定一个完全增广定向的键合图模型，并作为计算机的输入，就可以得到在给定激励下系统动态响应的仿真结果。

这种方法在五十年代后期由H. Paynter 教授提出，继后由D. C. Karnopp 和 R. C. Rosenberg 等作了大量工作，现已在美、荷、澳、西德、加拿大等国一些大学中用于教学和科研。我国一些大学也在研究应用，并作为研究生及高年级的系统动力学选修课程的内容。键合图方法具有一定潜力，还可作进一步研究和推广到其它领域。

本书在翻译过程中吴根茂同志曾参加部分工作。原文中的错字已作了改正，少量段落及用词有不合国情之处，已作了删改。由于水平所限，译文若有不当之处，如蒙读者指正，不胜感激。

序 言

本书的主要贡献是其模化和处理动态工程系统的统一方法，由于采用了键合图才使这种方法成为可能。对于描述机械的、电的、液压的、热的、磁的和流体的动态系统所涉及的基本物理过程，只用四种形式的广义变量——势、流、变位和动量来表示。有规则地处理键合图模型就能得出标准形式的状态方程。此外，ENPORT 计算机程序能根据一个合适的键合图模型和给定的激励，直接给出动态响应而无须先行写明状态方程式。著者相信，对于含有不同形式能量流的复杂系统，从建立各种元件、器件及其连接方式的基本物理模型，直到得出解析的和计算的结果，键合图方法都提供了最为统一并且易懂的途径。

撰写本书考虑了以下几个方面：首先，尽管涉及的范围甚广，著者仍希望将书写得适当紧凑些。其次，我们想让学生能够利用本书的部分内容，着手学习较为简单的机械、电、液压、热的以及换能器的系统，而当学生们需要继续深入到系统动力学，控制和计算技术的一些领域中去时，本书的取材又是能加以适当推广的一种格局。第三，我们希望提供丰富的先进材料以证明这种方法对于含有变换和调制的复杂系统，以及对于大规模系统都是卓有成效的。著者期望这本教材的前几章内容将引起读者的兴趣，同时，本书又能适用于较高级的课程。

当然，任何一件工作都得花力气，对我们来说，最难决定的是各种数学方法的取舍问题。本书很自然地分成两部分。在第一部分中，从第一章至第六章，数学的复杂程度保持在低水平上。其实，凡选修微分方程第一课程的学生可同时学习本书的第一部分。其中所有的公式都是写成与状态空间相容的形式，而向量和矩阵的体系都被省略了。本书的第二部分中，在讨论大规模系统

和非线性系统，以及丰富多样的物理系统时，就采用了矩阵符号，而且假设读者对微分方程具有一定的熟悉程度。

由于现在已有各式各样的卓越的计算机程序能用于许多方面的系统分析，所以一旦作出一个模型，就可以指望学生将能研究多种系统的动态，而不必具有象 FORTRAN 语言那样的水平去编制程序。一般来说，这就提高了学生的积极性和兴趣，允许我们去考虑更为多样的工程例题，而别的方法则难以做到。我们极力建议，计算机辅助的应用要同本书的教学结合起来。

几年来，本书第一部分的试用版本在美国许多工程学校中已被一些基础课程和专业课程所采用。第二部分也已在高年级——研究生课程中采用，这时，学生虽具备了关于系统方面的一些初步经验，但不一定是键合图形式的。一些讲授者业已通过内容的增删，有选择地形成各自的特定变化。从某些方面来看，学生必须熟悉方框图、正弦频率响应、传递函数、拉普拉斯变换、以及另外一些在本书中已予省略或仅作简要讨论的内容。经验表明，在讲授本书的过程中，可以很好地配以一些附加内容。在这种意义上，本书所起的作用仅是作为一种统一方法的基础，于此基础上建立人们对于系统动力学的理解，而不是为获得这种理解对所有有效方法作全面的论述。

由于本书是采用键合图方法作为基础的第一本系统动力学教科书，著者谨向对本书出版欣然提供赞助的各方面人士致以感谢。书中无疑会有违背初衷的错误，如蒙指正，不胜感激。

D. C. 卡诺普

R. C. 罗森堡

目 录

第一章 绪论	1
1.1 系统的模型	4
1.2 系统, 子系统和元件	7
1.3 状态确定系统	9
1.4 动态模型的用途	10
第二章 多通口系统和键合图	12
2.1 工程多通口	12
2.2 通口, 键和功率	20
2.3 键合图	22
2.4 输入, 输出和信号	25
第三章 基本元件的模型	31
3.1 基本 1-通口元件	31
3.2 基本 2-通口元件	43
3.3 3-通口结元件	50
3.4 基本多通口因果关系的研究	56
3.4.1 基本 1-通口的因果关系	56
3.4.2 基本 2-通口和 3-通口的因果关系	58
3.5 因果关系和方框图	60
3.6 伪键合图和热系统	63
第四章 系统模型	71
4.1 电系统	71
4.1.1 电路	72
4.1.2 电网络	82
4.2 平移运动	88
4.3 定轴转动	100
4.4 液压系统	102
4.5 简单换能器模型	107
第五章 状态空间方程	127

5.1	系统方程式的标准形式	127
5.2	键合图的增广定向	130
5.3	列方程式和简化的基本方法	139
5.4	扩展的列方程方法——第一部分	146
5.5	扩展的列方程方法——第二部分	153
5.6	输出变量方程的列式方法	158
第六章 线性系统分析		170
6.1	引言	170
6.2	常微分方程的解法	171
6.3	自由响应	174
6.3.1	一阶系统例子	175
6.3.2	二阶系统	179
6.3.3	例: 无阻尼振荡器	184
6.3.4	例: 阻尼振荡器	189
6.4	受迫响应	196
6.5	传递函数	211
6.6	总响应	215
6.7	其它要点	218
第七章 多通口场和结型结构		226
7.1	能量贮存场	226
7.1.1	C-场	226
7.1.2	关于C-场的因果关系研究	233
7.1.3	I-场	242
7.1.4	混合的能量贮存场	250
7.2	阻性场	251
7.3	调制 2-通口元件	256
7.4	结型结构	260
7.5	键和场的分类	263
第八章 换能器, 放大器和仪表		275
8.1	动力换能器	275
8.2	贮能式换能器	285
8.3	放大器和测量仪表	290

VI

第九章 多通口模型的其它应用	308
9.1 引言	308
9.2 力学中的多通口模型	308
9.2.1 制定模型的基本步骤	309
9.2.2 有约束的系统	321
9.2.3 用于机构学的一种对称的多通口模型	328
9.3 磁路和器件	330
9.4 热力学系统	341
9.4.1 热传递的表示法	348
9.4.2 一个简单的例子	351
9.4.3 电致热阻器	354
9.5 流体力学系统	356
9.5.1 一维不可压缩流动	361
9.5.2 压缩性效应的表示法	365
9.5.3 一维流动中的惯性效应和压缩性效应	369
9.5.4 结论	371

第一章 绪 论

本书旨在扩展对于动态物理系统的理解，这些系统都是要求工程师们去设计的系统。书中将介绍真实系统的模型化方法，指出如何进行系统分析以便弄清系统行为的途径，并且引出利用计算机技术来模拟系统对于外部激励的动态响应。在开始研究各种物理系统之前，值得先考虑一下工程中通常称作“系统动力学”的这门学科的实质。

“系统”这个词已被人们经常使用而又很不严谨地描述了种种不同的概念，所以很难给它下一个有意义的定义，就连能使其不同含意一致起来的基本概念也难以看清。本书中用到“系统”一词时，都有两个基本假定：（1）设想一个系统是一个统一体，它借助于物理边界或概念范围可以同所属领域的其余部分（即该系统的环境）分离开来。例如，可以认为一只动物是一个系统，它对环境（如空气温度）起反应并与之交换能量和信息。这种情况下系统的边界是物质的或占有空间的。又如：空中交通管理系统则是一个人为的、复杂的系统，其环境不仅是自然界的周围事物，而且有由于人们对旅行和货运的种种决定所最终形成的起伏变化的空运需求。这两种系统全然不同，却具有一致的基本点，就是可判定性，能判定什么属于系统之内和什么是外部干扰或起源于系统之外的指令。（2）一个系统是由相互作用着的一些成分所组成。在一只动物身上能识别出具有特定机能的各种器官，传递信息的各种神经等等。空中交通管理系统则由许多人和机器以及各种通讯联系所组成。由于大多数系统都能分解成许多成分而使任何一种分析都会被大量不切题的细节弄得不知所措，所以，使一个系统按其组成部分表示为网状结构，显然是一件需要技巧和艺术的事。

关于系统的这两点见解，在日常情况下以及在构成本书大部分题材的更为专门和技术性的应用中，都能得到承认。例如，当谁听到对本国运输系统管理不善的意见时，他就会理解使用系统一词的某些逻辑。首先，大体上可以认为该运输系统是一个统一体。它由海、陆、空交通工具和人员、机器设备以及使它们运转的各种规章制度所组成。此外，还可区别出此系统的许多组成部分——汽车、飞机、船舶、行李装卸设备、计算机等等。此运输系统的每一组成部分还可进一步细分成许多部件、零件，（即：每个组成部分本身也就是一个系统），所以显然必须对这种细分过程进行限制。

所谓的“系统观点”，实质上是必须考虑整个系统的运行而不是只关心各组成部分的工作状态。对运输系统的意见往往就是对“系统”的实际意见。很可能一次旅行中，出发时乘一辆性能完全符合设计要求的私用汽车，后来改乘一架毫无故障地按设计速度飞行的飞机，最后乘一辆服务令人满意的出租汽车，但由于交通阻塞、航班延期等等原因，仍然使人感到经历了一次糟透的旅行。一些完美无缺的组成部分却被组合成了一个不能令人满意的系统。

工程中，实际上同人们努力从事的其它一切活动一样，总是把关于一个系统的设计或者运行的各项任务划分成能在一定范围内单独进行的许多部分。例如，在一个发电厂里，发电机、汽轮机、锅炉和给水泵，一般地由单独的专业组加以设计。而热传导、应力分析、流体动力学和电的研究，则由这些专业组下属的小组承担。同样，政府各级机构体现了政府多种职能的分权。为一个总任务而工作的所有专业组都必须以某种方式互相配合，不仅要确保系统的各组成部分能够工作，而且要确保整个系统完成预期任务。可是，往往只根据对系统一小部分所作的研究，就对该系统将如何运转而作出过于简单的设想。出现这种情况时其结果会使人失望。发电厂在满负载甩荷时可能遭到破坏；如果政府每一部门都奋力从事似乎合理的政策而互相干扰的话，一个国家的经济就会导致崩溃。

本书将把主要着重点放在系统性能的研究上，而不去研究各组成部分的性能。这就需要了解所研究系统的各个成分的知识。因而，工程领域中学科截然不同的课程甚至实践性的知识都是需要的。本书中最感兴趣的工程系统，将取材于振动、材料力学、动力学、流体力学、热力学、自动控制和电路等方面的课题。尽管一项重要的工程设计无不涉及多种学科，但是一位工程师却可能，也许还很普遍，只在一门学科上度过他专业经历的主要时间。系统工程师却不然，他们不但必须具有某几种工程科学的运用能力，而且要具有研究系统本身的有关知识。

虽然，通过密切注意系统的稳态或静态工况并假设系统各变量对时间保持恒定，就可以成功地设计出许多系统，但本书主要关心的将是动态系统，即：其行为作为一时间函数是重要的那些系统。就一架运输飞机而言，它的大部分飞行时间是用在近乎稳定的速度上，故恒速时的燃油经济性就是重要的。而这架飞机在稳定飞行时，翼梁的应力或许就不如飞过大气湍流、应急操纵或硬着陆时的时变应力那么重要了。研究飞机的燃油经济性时，系统静态分析就已足够。对应力预测来说，就要求进行动态系统分析。

当然，一般说来，在真正的静态或稳态下运行的系统是没有的，不但系统中缓慢演变的变化很重要，而且伴随启动和停机的短时间瞬态作用也是很重要的。尽管稳态分析在设计研究中有其重要性，本书仍将着重点放在动态系统方面。动态系统分析比静态分析更为复杂，但是极其重要，因为根据静态分析作出的判断会使人误入歧途。考虑系统动态时会出现许多外部干扰或者不稳定性，因此系统也许决不能达到某个可能的稳定状态。而且，所有各种系统仅从静态方面考察时，都会表现反直观的行为。根据静态的考虑使某一系统或控制对策改变一下，可能有利于短期运转，但是却会得到违背初衷的长期反响。社会系统的历史不时充满了灾难性的事例，可以希望动态系统分析能帮助避免某些“静态思考”〔1〕的错误。然而，即使对工程中十分简单的系统，人们要能在静态基础上合理地研究该系统，也必须先具有某些关于系

统动态响应的理解。

以水力发电站的情况作为工程中反直观系统的一个简单例子。为了减少出力，把水轮机前的导叶朝关闭位置调节。但由于引水管中水的惯性迫使通过导叶的流量几乎保持不变，使水流以较高流速通过调小了的导叶过水断面，因而输出功率实际上暂时地增加了。最后，引水管中的水流减速后出力才被减少。若不了解这个系统的动力学，就会使人们以为打开导叶才可“减少”出力。如果这样做的话，虽然直接效果是满意地降低了出力，但是随即发生了出人意外而又无法避免的出力上升。显然，对于动态系统控制对策的设计来说，切实了解动态响应是关系重大的。

1.1 系统的模型

真实系统的动力学研究中的主要思想是把系统模型化。各种系统的模型都是用来预测所研究系统的行为而作了简化和抽象化的产物。按比例实物模型，在工程中是熟知的。属于这一类的模型有飞机的风洞模型，造波池中用的船体模型，土木工程中的结构模型，光弹应力分析中金属零件的塑料模型，以及电路设计所用的电路板模型。

这些模型的特征性能所反映的是真实系统的某一些特性，而不是全部。例如，在飞机的风洞模型中，决不会试图再现真实飞机的颜色或内部座位的布置。航空工程师们认为一架真实飞机的某些方面，对于确定作用于飞机的空气动力是无关紧要的，因此模型只包括那些在真实系统中被认为对研究系统特性至关重要的方面。

本书所研究的是另一种形式的模型，常称之为数学模型。虽然这种模型也许看来比实物模型抽象得多，但是在实物的和数学的模型之间存在着很强的相似性。数学模型常用以预测系统对各输入信号在某几个方面的响应。例如，可能用一数学模型来预测一架设计中的飞机如何响应操纵试验时的输入指令信号。但是，这样一个模型不会具有预测真实飞机响应的每一方面的能力。譬

如说，这种模型可能不包括空中机动动作时气动加热变化情况的信息，也不包括飞机结构高频振动的信息。

由于模型必定是真实事物的简化，所以构造模型有许多技巧。一个过于复杂和详尽的模型也许包含实际上无从估算的许多参数，或者事实上不可能进行分析，即使能够分析的话，也会使重要答案同不相干的细节混淆而弄得模糊不清。但是，一个过于简化的模型又将显示不出重要的效果。因此，重要的是要认识到，没有一个系统能够被模化得丝毫不差，而且要认识到任何一个称职的系统设计者都必须掌握一种构造不同复杂程度的系统模型的方法，以便能够找到最简明的模型来回答关于所研究系统的问题。

本书其余各章讨论各种系统的模型和构造模型的方法，以及根据模型求出系统特性的方法。虽然这些模型采用特定格式的图形和计算机打印输出来表示，而不用更为习惯的微分方程式组来表示，但是按照术语的通常含义，它们都将是数学模型。

书中将采用统一的标记法来构造各类物理系统的模型。值得注意的事实是，以工程科学中性质显然不同的学科为基础的各种模型，全都能用根据能量和信息流的键合图标记法加以表达。这就允许我们研究某一系统模型的结构。模型各部分的性质及其相互作用的方式，都能用一种图示格式使之清晰可见。这样，就能搞清楚不同类型系统之间的类似之处，并能把某一领域里的经验推广到其它领域。

采用键合图语言，我们可以只用一组相当少的理想元件来构造电、磁、机械、液压、气动、热的和其它系统的模型。一些标准步骤就可将这些模型转换成微分方程式或计算机仿真方案。历来，表示动态系统模型的各种图形都是分门别类地为专门的系统而发展起来的。如图 1.1 中的 a , b , c 部分，分别表示一种典型模型的图形。注意每一图形中的元件，看来都是从各种器件的示意图演变而来的，其实，真实系统的本来面貌却一点也不象所示的图形。图 1.1 a ，也许可以恰当地表示一辆汽车颠簸运动的动

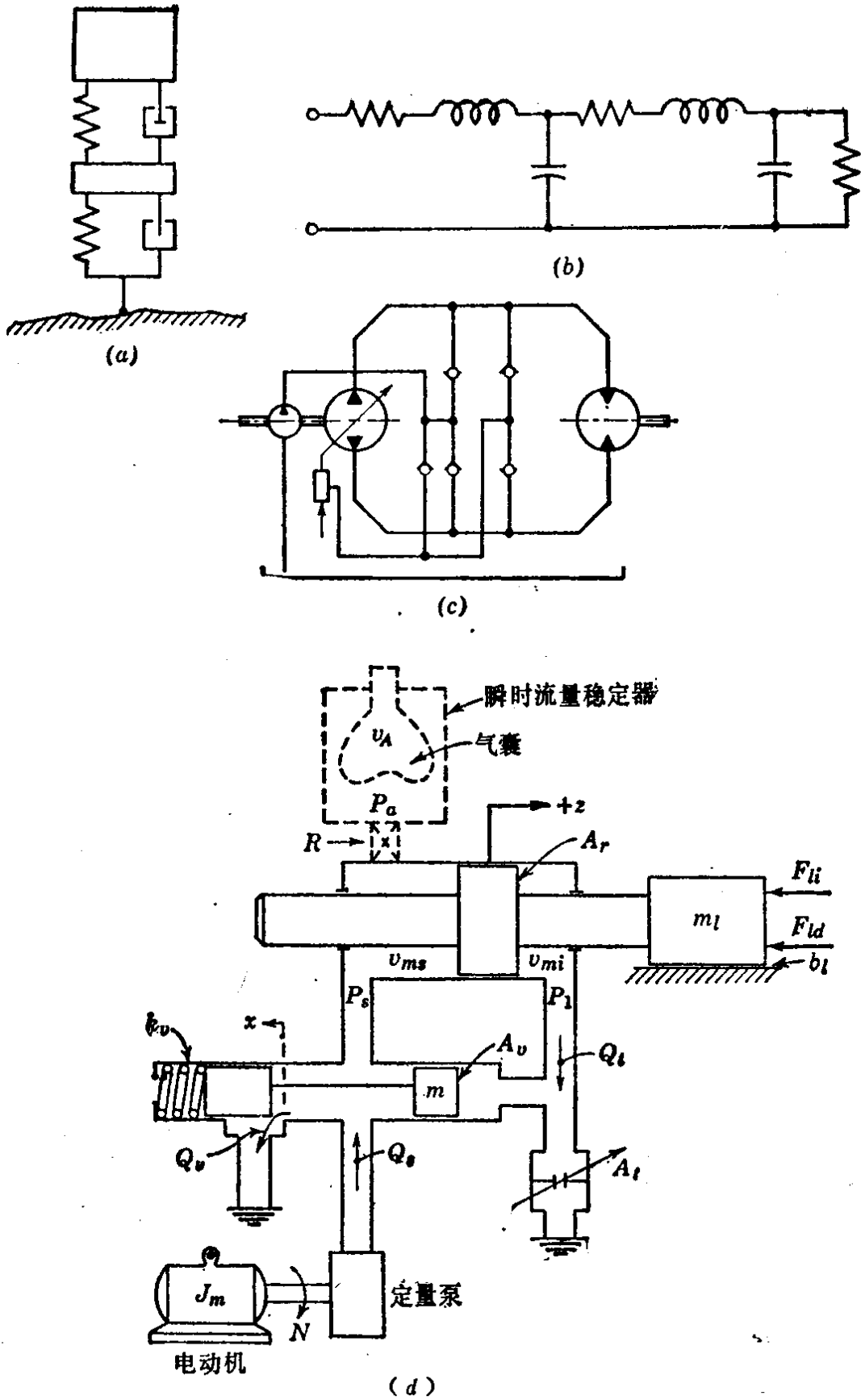


图 1.1

(a) 典型的力学示意图 (b) 典型的电路图 (c) 典型的液压系统图 (d) 包含机械的、电的和液压部件系统的示意图

力学，但是模型的质量、弹簧和阻尼器并不直接相当于一辆汽车的具体部件。同样地，象图 1.1 b 中电阻和电感的符号可能并不对应于称做电阻器和扼流圈的分离元件实物，而是相当于某一个实际器件中呈现的电阻和电感效应。因此，即使是半图示的简图也往往比它们原来呈现的外表抽象得多。

在研究如图 1.1 d 所示的混合系统时，表示这类系统模型的常规方法研究得还很不够。确实，能非常明确地表示模型中所包含各种效应的简图几乎是没的。根据简图也搞不清模型的基本结构。键合图比图 1.1 所示的图形更加抽象，但它是明确的，并具有只用一组完全相同的符号就能表示图 1.1 所示的全部模型的极大优点。对于如图 1.1 d 的混合系统，为了显示该系统模型的基本结构就需要象键合图那样的一种通用语言。

1.2 系统，子系统和元件

为了制定某一系统的模型，通常必须先把系统分解成能够模型化或者能加以实验研究的一些较小部分，然后把这部分组合成系统模型。一个系统往往能很方便地按几个层次分解开来。本书中把系统的各个主要部分称为子系统，并把子系统的基本部分称为元件。当然，元件、子系统和系统的层次决不是绝对的，因为即使一个系统的最基本部分也能被详细地模化，就象一个复杂子系统那样。另一方面，在许多工程应用中子系统和元件的分类则是相当明显的。

基本上，一个子系统虽是系统的一部分，但它本身也象系统一样可以被模化，也就是可以把子系统分解成一些相互作用的元件。另一方面，一个元件是作为一个整体来制定模型的，并且不认为它由更简单的成分所组成。我们必须知道一个元件怎样同其它元件相互作用，而且必须取得该元件的特性描述，然而在别的方面却把一个元件当作“黑盒子”来处理，而毫无必要知道是何者使它起作用的。

为了说明上述观点，研究图 1.2 所示的振动试验系统。此系

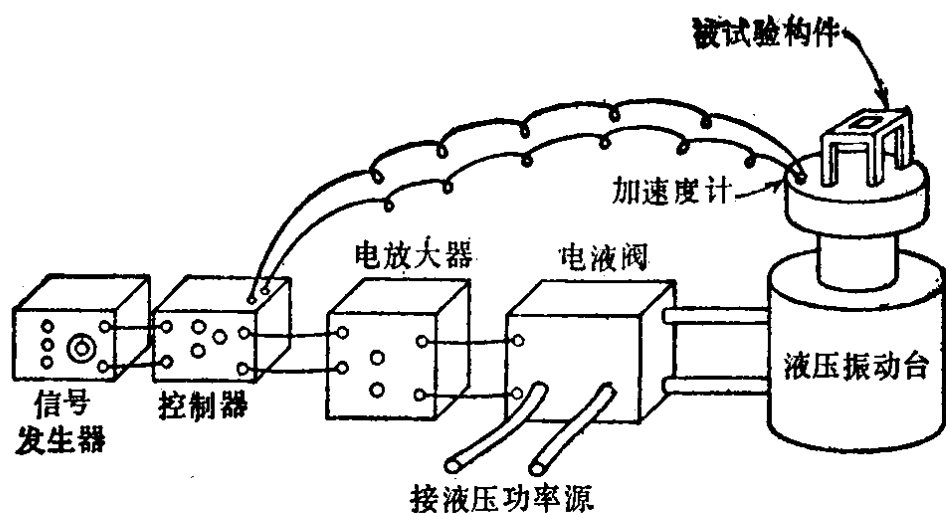


图1.2 振动试验系统

统是用未把被试构件放在由信号发生器给定的振动环境作用之下。例如，若信号发生器发出的是一随机噪声信号，就可期望激振器台面加速度如实地复现电噪声信号的波形。在实际上由一些独立部件组合起来的系统中，很自然地要把由连接导线、液压导管或机械紧固件总装在一起各部件当作子系统。当然，标注了信号发生器、控制器和电放大器的电子组件，就象电液阀、液压激振器和被试构件一样都是子系统。也可以把其中的某些子系统当做元件来处理，如果用不着了解它们的内部结构就能规定它们同系统其余部分的相

互作用的话。电放大器显然由许多元件组成，如电阻器、电容器、晶体管等等，但若正确选用放大器而不致过载，就可以将该放大器作为一个按其输入——输出数据所标明的元件来对待。另外一些子系统

也许需要分析以便取得适合于整个系统研究的动态描述。

以图 1.3 所示的典型伺服阀为例。该阀显然由电的、机械的

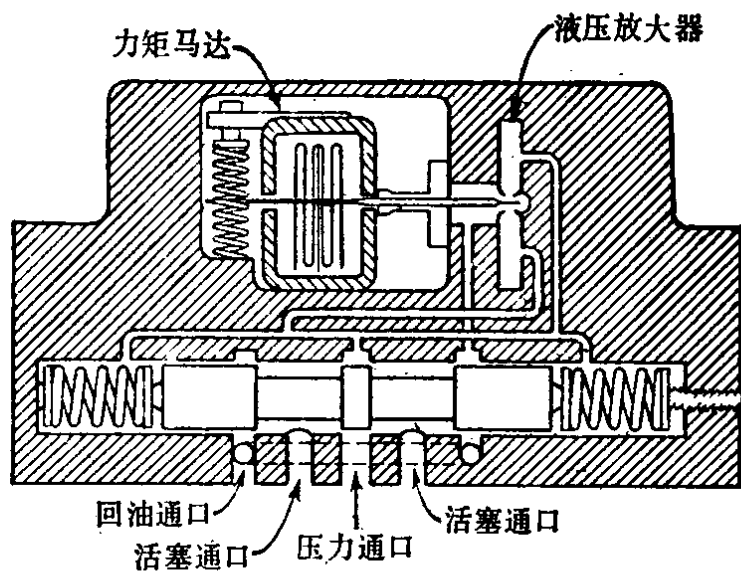


图1.3 电液阀

和液压的各种另件所组成，并相互配合动作以产生阀的动态响应。这个子系统的元件可能是力矩马达、液压放大器、机械弹簧、液流通道和滑阀。对此子系统作动态分析就能揭示其设计中的缺点，或者不得不替换另一个子系统，或者重新配置整个系统。另一方面，这种分析也许指出，从整个系统观点来看，将该子系统表征为一个单纯的元件已能满足要求。一位熟练而有经验的系统设计者为了在直观基础上拟定出子系统的模型，往往要对模型繁简的合适程度作出判断。本书所提方法的主要目的是要说明怎样才能根据元件模型方便地组合成系统模型。然后才可能对不同复杂程度的 subsystem 进行试验，以便证实或者推翻原先的模型化判断。

1.3 状态确定系统

本书目的在于阐明对系统建立数学模型的方法。所求模型的形式往往被描述成“状态确定系统”。在数学表示法中，这类系统经常采用一组以状态变量表示的常微分方程和一组代数方程来描述，后者是将所研究的其它系统变量同状态变量联系起来的。在随后各章中，将说明一种从待模型化的物理效应着手，直到求出状态方程为止的循序渐进的方法。尽管一些分析和计算机仿真的方法不需要写出状态方程，但从数学观点来看，所有系统模型都是状态确定系统。

与一个状态确定系统有关的全部变量的未来都是能够预测的，只要（1）某初始时间的各状态变量为已知，和（2）来自环境的各输入量的未来时间函数为已知。

实际上，工程中所应用的也正是这种具有某些内在哲学涵义 的模型。例如，未来的事件不影响系统的现在状态。这一涵义同时间仅向一个方向流逝——从过去到将来——的前提是相当的。模型理应具有这些性质，这件事即使并不明显，看来却是合理的，可是要想出一项论证来说明真实系统总是具有这些性质倒是相当困难的。