

第1篇

基礎知識與設計

第1章 緒論

1.1

1.2

1.3

目 录

序言

第 1 篇 系统响应的估计

第 1 章 系统研究的基本原理与方法	2
1.1 关于复杂性问题	2
1.2 输入-系统-输出的概念	4
1.3 输入信号的分类	6
1.4 系统模型的分类	8
1.5 子系统的耦合	11

参考文献	12
------------	----

第 2 章 微分方程的变换解法

2.1 问题的分类	14
2.2 线性化	15
2.3 线性微分方程经典解法的复习	16
2.4 拉普拉斯变换的定义与定理	18
2.5 积分-微分方程的求解; 反变换	22
2.6 稳定性	29
2.7 拉普拉斯传递函数	32
2.8 延迟定理: 时延部件和不连续输入	35
2.9 初值定理和终值定理	37

参考文献	38
------------	----

习题

第 3 章 广义响应的变换法

3.1 冲激响应	43
3.2 卷积积分; 当冲激响应为已知时求任意输入的响应	46
3.3 频率响应	51
3.4 冲激响应与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	64
3.8 随机信号的描述	70
3.9 系统对随机信号的响应	81
3.10 数字谱分析中的混迭和泄漏	85

参考文献	88
------------	----

习题	88
----------	----

第4章 其他变换问题	93
4.1 分布参数模型	93
4.2 差分方程和Z变换	98
4.3 系统的状态变量表示法	106
参考文献	108
习题	108
第5章 数字仿真法	110
5.1 解析法的局限性	110
5.2 模拟仿真、数字仿真和混合仿真	110
5.3 数字仿真语言的特点	111
5.4 一种典型的数字仿真语言: COSMP III	114
5.5 任意函数发生程序和 TERMINAL 段在最优设计中的应用	120
5.6 时延、常时延和可变时延	124
5.7 大分布系统离散模型的数组处理技术	130
5.8 SORT/NOSORT 语句在 COSMP 的 FORTRAN 编程中的应用	134
5.9 COSMP 中的随机信号	137
5.10 采样数据系统	141
5.11 刚性系统问题	142
5.12 数字-频率响应的计算	144
参考文献	147
习题	147
第2篇 广义建模方法	
第6章 实验建模方法(“系统辨识”)	150
6.1 频率响应法(正弦响应法)及其设备	150
6.1.1 外差式带通跟踪滤波分析仪	151
6.1.2 傅里叶滤波分析仪	155
6.1.3 用数字快速傅里叶变换(FFT)分析仪进行正弦试验	157
6.1.4 解析传递函数与实测频率响应数据的拟合	158
6.2 脉冲试验法及其设备	163
6.3 随机信号试验	172
6.3.1 功率谱测量中的随机误差	172
6.3.2 传递函数测量中的随机误差	174
6.3.3 输入信号: 连续信号、二进制信号及伪随机信号	175
6.3.4 应用实例	178
6.4 参数追踪(最速下降)法	181
6.5 多元回归与最小二乘法	196
6.5.1 静态模型的多元回归法	196
6.5.2 动态模型的多元回归法	208

6.6 各种建模方法的比较	210
参考文献	211
习题	211
第7章 子系统耦合法	213
7.1 子系统耦合法的用途	213
7.2 二端口装置、源变量与流变量	213
7.3 四端口耦合法基础	215
7.4 阻抗耦合法基础	217
7.5 先进耦合方法	221
参考文献	224
习题	224
第8章 分布系统的离散化	227
8.1 物理集总化	227
8.2 有限差分法	229
8.3 有限元法	232
参考文献	234
习题	234
第3篇 建模方法的具体应用	
第9章 液压管道与机械	238
9.1 液压管道动力学: 分布模型	238
9.1.1 在规定的流入与流出条件下传递函数的确定	242
9.1.2 终端有锐孔管路的频率响应特性与阶跃响应特性	245
9.2 集总模型和实验结果	247
9.3 具有摩阻的分布系统	251
9.3.1 采用无穷项乘积的集总近似方法	253
9.4 管子的纵向振动(液体-固体的相互作用)	256
9.5 变容式泵系统	260
9.5.1 泵控液压马达(液压传动)	260
9.5.2 节能液压力源	264
参考文献	268
习题	269
第10章 机电系统	274
10.1 电动式振动台	274
10.1.1 振动台推杆动力学	278
10.2 实验铁路车辆的磁悬浮系统	281
参考文献	286
习题	288
第11章 换热器动力学	290

11.1 单液换热器的分布参数动力学	290
11.2 宇宙飞船核动力装置中冷凝器的热流体动力学	296
参考文献	309
习题	310
第12章 运载器动力学	316
12.1 刚体动力学	316
12.1.1 刚体的惯量特性	316
12.1.2 刚体的惯量主轴	318
12.1.3 运动方程	319
12.1.4 欧拉角和方向余弦	321
12.1.5 自旋卫星的精确模型与简化模型	323
12.2 汽车操纵动力学	329
12.2.1 充气轮胎的特性	331
12.2.2 无侧倾的固定轴模型	333
12.2.3 考虑车体侧倾和车体轴线的二质量模型	335
参考文献	345
习题	347
第13章 人机系统中人的因素	351
13.1 人体振动的实验建模	351
13.2 与跟踪和驾驶行为有关的神经系统和肌肉系统的基础解剖学和心理学	357
13.3 人的跟踪与驾驶行为的实验建模	363
参考文献	370
习题	370
第14章 燃气轮机	372
14.1 喷气发动机的基本类型及其工作	372
14.2 轴动力涡轮的低频、线性化和小信号的半经验模型	375
14.3 涡轮喷气发动机的低频、线性化和小信号的半经验模型	377
14.4 结束语	379
参考文献	382
习题	383

第 1 篇

系统响应的估计

第1章

系统研究的基本原理与方法

1.1 关于复杂度问题

虽然本书的目的是在中高级水平上对系统进行研究,并假设读者对这方面的基本概念已有一定的了解(例如已学习过笔者早期所著的有关系统的基础教材中¹⁾的内容),但我们仍将在书的开始部分介绍一下工程中系统方法的基本范围、主要目的和研究方法。这种简介不仅是对已学过的概念进行复习,也是为在以后的章节中进一步深化这些概念作好准备。

为了阐明本节标题:“关于复杂度问题”的含义,我们把诸如弹性理论、流体力学和传热学等传统的重点工科课程和最近出现的系统分析法进行比较和对照。这里的“复杂度”一词是特指机器及过程(即“系统”)的设计与应用中所存在的明显趋势,即它们所包含的元部件日益增多,联接方式也越来越复杂。当然,任何熟悉近代物理或化学的人都知道,如果严格推敲的话,任何一种表面上看起来比较简单的元部件或物理现象也包含有大量的复杂问题。但是在系统方法中所说的复杂度不是指对元部件物理细节的描述,而是指大量元部件之间的互相连接关系;而每个元部件的特性则可用一个比较简单的模型来描述。

为此可用几个例子来说明“复杂度”含意的这种差异。在有关对流传热的近代课程中,人们可以对流体力学边界层现象进行详细的解析研究,以了解其中的物理机制,并根据基本几何形状与流体性质来预测热传导系数的数值。为了得到精确的热传导系数的预测值,在简化假设的数目为最少的情况下,即使对于简单的物理结构来说,研究工作也是十分复杂的。但是这种相当繁琐的计算方法最终却只得出一个简单的数字,即单位为 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 的有效导热系数。当所分析的是由一个或多个换热器所组成的热系统时(这个问题将在以后的章节中讨论),导热系数只不过是影响系统状态的诸参数中的一个。因此一个系统分析人员或设计者就必须从全面的观点来考虑热传导现象,并在不深究计算方法的情况下为热传导系数设定一个数值。

我们务必看到,这种做法有一定的危险性,即由于系统分析人员对基本现象的物理实质缺乏足够的了解,因而过分地简化了实际情况。出现这种差错对于以数学为主要专长的人来说更为突出:系统分析中的难题,有赖于他们去解决,但他们却又缺少正确评价实际课题所必需的其他基本知识。鉴于这种情况,在系统分析中,必须把数学问题的难度限制在系统分析所需要的水平,同时承认人们理解的深度与广度有一定的限度。在系统分析中必须在现象与元部件一级进行简化。为了换取对整个系统的透彻了解,就只得容许在细节问题的精度上蒙受一些损失。当然,假如系统的元部件确实已经存在,而不只是数学概念的话,则系统设计者可以通过实验方法,对所假设的系统中的各种现象之间的联系形式和设定的系数数值是否切合实际进行验证。事实上,为了对复杂的或了解甚少的现象获得建立基本

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

关系式所必需的信息,在进行解析研究之前,可能需要先对比例模型或全尺寸原型进行实验。由此可见,系统工程师要能更有效地工作,应不断努力,使自己在有关物理细节、系统分析手段与实验方法等方面的知识和技能达到适当的平衡。

最后,举一个取材于汽车动力学方面的例子(在后面的章节中将深入地讨论这个问题),以有助于读者进一步理解系统分析方法中对复杂度问题的处理。图 1.1 为一辆汽车的悬挂系统的原理图,这种表示方法对研究汽车的侧滑、方向性或“驾驶”品质(侧向-定向性能或驾驶性能)都很有用。减振器或机械阻尼器 B 的作用之一是控制车体纵摇角(车身侧倾角) ϕ 的振荡。在根据牛顿定律建立的绕纵摇轴的力矩方程中,一般的线性动力学模型都把阻尼力矩表示为 $-B_r\dot{\phi}$, 式中 B_r 为两只阻尼器的阻尼系数,其量纲为 $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$ 。尽管不同类型与大小的汽车可以采用种类繁多的阻尼器,它与车架之间有许多不同的几何连接形式,但其总效应总可以用 $-B_r\dot{\phi}$ 来表示,当然 B_r 的数值应选择适当。虽然系统分析本身不要求了解这些细节,但对于图 1.1 所示具体结构的 B_r 值,则可用下列公式²⁾进行计算:

$$B_r = \frac{6\pi\mu L_p L_R^2}{h^3} \left[\left(R_0 - \frac{h}{2} \right)^3 - R_0^3 \right] \left[\frac{(R_0^2 - R_1^2)}{R_0 - h/2} - h \right] \quad (1.1)$$

尽管在(1.1)式的推导中已经包含了许多近似和简化的假设,但 B_r 仍和五个几何尺寸与流体粘度 μ 有关,且关系比较复杂。如果对系统中的所有元部件都这样仔细推敲的话,则会使我们陷入一堆不可思议的参数之中。所以,系统设计与分析人员需要知道估计参数数值的现有公式[例如(1.1)式];并且还必须明确怎样适当构造系统中一个元部件的总物理效应的模型,但是把探讨元部件细节的工作留给具体设计人员。

在图 1.1 中,道路对于充气轮胎的侧向力是影响汽车驾驶性能与稳定性的主要作用力。

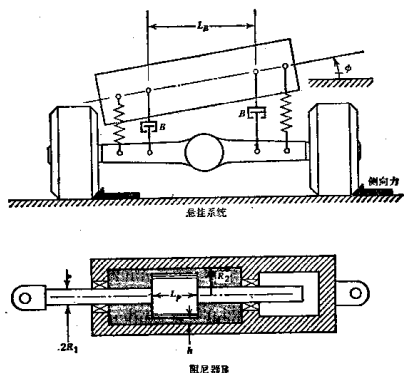


图 1.1 汽车悬挂系统中的阻尼元件

2) Doebelin, E. O., *System Dynamics*, C. E. Merrill, Columbus, Ohio, 1972, p. 59.

虽然轮胎和汽车工业的有关研究人员始终在竭尽全力研究轮胎的性能,但是仍然不可能根据轮胎的尺寸与材料性能来预测未来的新轮胎结构的“受力系数”。所以在汽车动力学(系统分析工作中,有关轮胎性能的数据,仍靠对现有轮胎进行试验而确定或测量得到。因此,把这类实验数据和“理论”建模方法结合起来,是有效的系统分析方法的必然特征。

为了不致因作者对系统分析方法的竭力推崇,使读者误以为这种方法能解决生活中的一切技术、经济与社会系统的问题,在此还要做一些附加说明。当系统分析法用于某些确定的工程项目时,它的确显得卓有成效。但如果工程技术人员或非工程技术人员欲将这些方法扩展到技术领域以外的其它场合中去,则基本上是收效甚微³⁾。为了说明这一点我们引用参考文献中的一段话:“当把它(系统分析法)从通常的工程任务与课题、从军事、外层空间领域转移到城市生活及其有关的问题上来时,系统分析法也就丧失了它在传统应用领域中所具有的严谨性……,这是由于工程技术人员不理解他们的社会使命所造成的吗?由于学位授予典礼上鼓励人们去承担更多的社会义务和有更多的学者提倡献身于社会福利,被要求工程技术人员用他们的知识去发挥新的作用。结果使他们处于进退两难的地步,即一方面要求他们去更好完成自己的职责,否则就有可能丧失已经取得的资格;而另一方面却不得不抛弃他们自己的专长,去从事一般的社会公益活动……,应当鼓励工程技术人员具有社会责任感,但这决不意味着要他们笨拙地向社会问题发起进攻,而应当是更好地去完成本职工作,在技术领域中发挥更有益的作用。对于“大众技术”的更为确切的概念,事实上应该理解为在工程技术人员参与下,使公众不致因有些人滥用系统科学的名义而遭受不必要的损失。工程技术人员最崇高的职责应当是使社会认识到科技的真正限度。

1.2 输入-系统-输出的概念

由于系统分析的重点是研究相互连接的元部件或子系统,所以它基本上是着重用“信号”与“系统”来描述工程课题。所谓系统是指具体设备中的各个部分,及由它们构成的各种机器或过程,而信号则是指在互相连接的系统之间“流动”着的物理变量。(应当注意,对“系统”一词的用法看起来可能不一致,我们既用它表示一个较小的“构造单元”又用它表示一个较大的组合件,虽然可以用“元部件”或“子系统”这两个术语来避免混淆,但大多数作者仍是不加区别地用“系统”一词来表示,所以只能根据上下文来区分这个词的含义,讲清楚这一用法后,应当不致产生误解。)

当把一个系统作为相互联系的元部件所构成的组合件来观察时,每一个元部件都有一个或数个来自其他元部件的信号,称之为输入;同时有一个或数个从这个元部件流向其他元部件的信号,称之为输出。图 1.2 a⁴⁾ 为一种蒸气发生器的示意图,它用于计划中的增殖型反应堆的核电站,而图 1.2 b 则详细示出了在该系统中互相连接的各种元部件。在此将着重于分析蒸气发生器子系统(见图 1.2 a)并建立一组方程式(数学模型);在系统的参数与输入为已知的情况下,这组方程式能预测所选取的输出量。在本例中,系统的六个输入量为:给水的流速与温度、钠的流速与温度以及中间的喷射流速与温度。而五个输出量

3) Hoots, Ida R., "Can Systems Analysis Solve Social Problems?" *Datamation*, June 1974, p. 82.

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

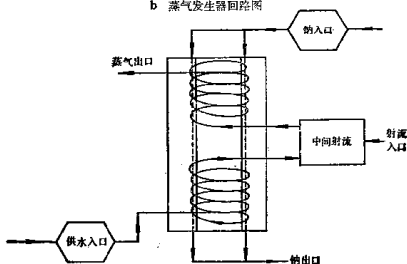
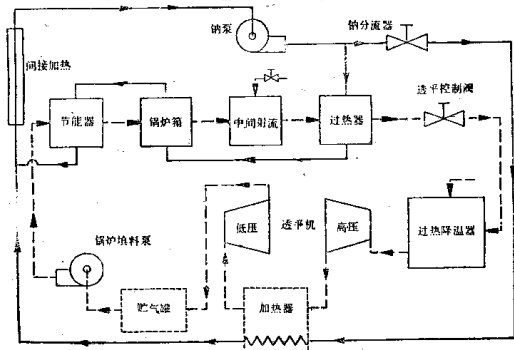
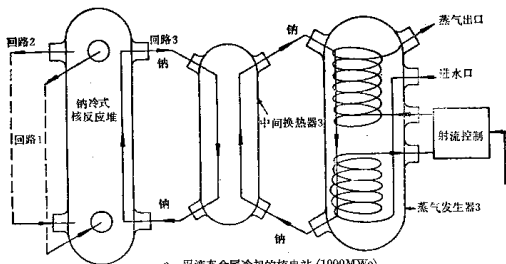


图 1.2 核电站的输入-输出模型

(响应): 主蒸汽流的流速与温度、锅炉出口的流速与温度、钠的出口温度。系统的参数(确定系统状态的物理特征量)包括几何参数(锅炉管道的数目、长度、直径等), 材料特性(比热、密度等)和导热系数等参数; 导热系数与材料特性或工作条件两者有关。为了建立图 1.2a 所示系统的模型, 总共约需 44 个方程式和 90 个参数。

1.3 输入信号的分类

在上一节中, 我们把输入看作是流入系统的信号(也常看作是来自其他系统的输出)这里通常把输入信号定义为能激起系统响应的作用。因为第 1 章主要是对本书的主题做一综述, 所以有必要把各种输入分成不同的类型, 并尽可能包括那些在具体应用中可能出现的所有情况, 以便能用来建立起系统分析方面的相关体系。

这里的分类方式是笔者对早期著作⁵⁾所作分类的扩充。第一种分类把输入分为三组, 即

1. 外部驱动。
2. 初始贮存能量。
3. 参数激励。

图 1.3 所示电路图是用以说明这些概念的简例。图中的固定电容器、电感与可变电阻等均无源器件, 它们不可能连续提供能量。所谓外部驱动是从外部输入能量作用在系统上, 例如一个理想的电压源 $e_1(t)$ 。它将使系统产生一输出电流 i_o 。假若没有任何外部能源的作用[用导线代替 $e_1(t)$], 但线路中有一定的初始贮存能量, 则系统仍然能产生一定的电流 i_o 。在这种电路中(也可以更普遍地说在所有型式的系统中), 贮存的能量可以表现为“位能”或“动能”形式。若开始用某个外部电源(然后再把它移去)对电容器进行充电(“位”能), 显然, 电容放电时将释放出能量, 使电路产生电流。同样地, 若用电压源 $e_1(t)$ 使电感中产生一个电流,

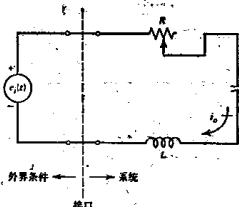


图 1.3 具有三种输入型式的电路

然后使 $e_1(t)$ 短路(阻止 e_1 继续向电路供电), 则电路也将显示出动态响应, 即流经 R 、 L 与 C 的电流 i_o 和其上的电压将随时间而变化。最后, 假如 e_1 稳定不变, 而使 R 值随时间变化(例如移动 R 上的滑动触点), 也能够使 i_o 与电路电压产生动态变化。这种输入型式称为参数激励。它由一稳定电压源来提供能量(可把它看作为系统的一部分), 但能源中的动态变化是由于外部控制使系统内部参数发生变化所造成的。

另一种分类方法涉及到外部驱动输入和

参数激励输入的时间变化(初始贮存能量定义为常数, 而不是时间函数)。这种分类方式对于实际系统的具体工作条件和为求解系统数学模型的方程式所必需的方法都很有意义。这种分类方式把输入分为下列几种类型, 即:

1. 确定性的
 - (a) 周期的;
 - (b) 瞬态的;

5) Doebelin, op. cit., p. 7.

(c) 特殊情况(调制与解调信号等)。

2. 随机的

(a) 平稳的;

(b) 非平稳的。

在讨论输入类型时,称它们为输入模型更为确切;因为正如不可能精确地描述任何一个真实世界的系统,而只能分析一个经过简化了的系统模型的情况一样,我们在此也无法精确地描述一个实际输入量,而只能研究一个近似量。

确定性输入模型是指一个可以用数学公式、曲线图或数据表来明确表示和“随意”重复其时间历程的模型。例如火车轨道的“不平整度”(用相对于水平面的垂直偏差来描述),是对高速运行火车的一个重要输入。这个输入对于描述为“乘客舒适性”的输出有相当大的影响。在一段给定的轨道上,其外形的逐日变化甚微,火车可以在上面反复行驶,因此可以认为传给车辆的垂直输入运动具有重复性。然而,航空运输中的类似情况则会出现随机输入。如有一架飞机以平直航线穿过大气紊流,并受到使机身垂直运动和使乘客感觉不舒适的“垂直阵风速度”的输入力作用。只要飞机上装备有适当的仪表,飞机飞了一段航程后,就能够得到垂直空气作用力的时间历程;但如果使飞机调头,并完全重复先前的飞行航线,则仪表告诉我们空气作用力不再重复前面的时间历程。事实上,前面那个时间历程将永远不会再现,因为这是一种随机现象。

下面再详细描述一下确定性输入模型。其中有一类周期输入在实际应用中很重要,因为很多以额定转速等速运行的机器都与周期信号有关。让我们来看一下恒速工作的往复或旋转发动机、泵、透平、压缩机等等。当它们在稳态工作情况下,各种力、应力、速度、温度、压力、流速等都呈现某种重复性与周期性的循环。但由于所有恒速机器也必须时常启动和停机,而且由于这种不稳定工作状态代表了一种临界状态,所以工程师们也非常关心这种瞬态输入。当机器从一种稳定速度改变为另一种稳定速度时,也包含有瞬态工作状态,例如汽车刹车或加速,以及由于安全阀的爆裂或汽车轮胎的突然漏气而出现的意外事故或故障等情况。此外,如一个事件的出现具有周期性,但两次事件之间的间隔时间要比事件本身持续的时间长得多时,也是用瞬态输入模型描述为妥。例如一台冲压压机,在下次冲压出现之前,上一次冲压的作用可能早已消失。

前面所列举的随机输入可再分为平稳与非平稳两类,下面我们对它们进行区别。在飞机扰动的例子中,虽然一个具体的时间历程永远不会重复出现,但输入量的统计特征,例如幅值分布、均方值与频率成分等,从一个样本到下一个样本则是可以复现的。举例来说,假如有十架彼此水平距离相当大的飞机同时穿越大气紊流;这时每一架飞机的时间历程虽各不相同,但十个记录的统计数据却是一致的。事实上,可以从全部记录的数据中得出一个在统计学上更为可靠的信息来表征随机输入,这个信息称之为总体平均。另一种办法是只用一架飞机,但要飞过长十倍的路程,以便采集到长十倍的数据记录。把这个较长的记录均分为十个等长度的子样本,可计算出每个子样本的统计数据。假如十个子样本的统计数据相同的话,则随机输入称为平稳随机输入,其统计特征不随时间而变化。如果输入是平稳的,则可将十个子记录样本当作一个长记录来处理,以提高统计可靠性(时间平均)。假如各子记录样本的统计数据变化很大,则随机输入称为非平稳随机输入。非平稳随机输入的数学处理比较困难;不过许多实际课题都可满意地按平稳随机输入的方法进行处理,即把整个时间

记录分为适当选择的小段,并假设各段都具有平稳性质。

在本节结束前,要再一次提请读者注意,这里所讨论的输入分类是与分析人员为了描述某些物理现象所选用的模型类型有关。所有真实世界的输入都是非平稳随机信号(最为复杂的类型),因为没有一种现实中发生的事件是完全可以预计的或完全可以重复出现的。在所有工程应用中,分析人员总是力图用最简单的方式来模拟真实世界的情况,并希望所得结果的精度能充分满足研究工作的要求。

1.4 系统模型的分类

根据定义,所谓物理系统的数学模型,就是适当选择数学关系式或方程式来描述系统的状态。从某种程度上讲,由于对真实世界情况的数学描述必定总是不完善的;所以对一个给定的系统而言,永远也不会只有一个模型,而是有一系列模型。当分析或设计尚处于初始阶段时,工程师常常是先从该模型系列中挑选出一种比较简单的模型,在不必作太多的分析工作的情况下,就能对主要的决定性因素有所了解。这种简单模型的精度较差,但这是为了能迅速对系统的主要性能有一全面的了解而必须付出的代价。在从这种模型中获得对系统的基本了解同时,也暴露了这种模型的局限性;这时就可以对该模型适当地增加一些复杂的细节来提高其精度。这种有计划地、逐步提高模型复杂程度的步骤已经成为处理疑难问题的合乎逻辑的惯用方法。

为了使过去未接触过模型分类的读者学习方便,这里再做一些简单的介绍⁶⁾。由于模型类型的差异在于所用方程式的性质不同,所以对模型类型的讨论实质上就是对方程式类型的讨论。为了使这种讨论具有实用价值,我们将以工程师的观点(而不是数学家的观点)来进行,并对所涉及的范围与细节加以限制,即限制在系统动力学的实际应用中经常用到的主要方程式类型的范围内。虽然各类方程式在实际应用中各有其自己的用途,但这里把重点放在常微分方程与偏微分方程上。

由于物理研究对象扩及三维空间,及我们所感兴趣的主要是动态响应(时间为自变量),所以系统研究中的未知量(输出量)将取决于四个自变量。比如说,一个振动结构的运动状况取决于我们在哪里观察它(空间坐标 x, y, z),和在何时观察它(时间坐标 t)。在模拟各个工程技术领域中的问题(液体流动、导热和振动等)时,所采用的“最精确”的宏观观点都把事物看作为无结构的连续体,因此未知量能“平滑地”在整个空间变化。把这些变量联系起来的物理定律都包含了相对于空间或时间的变化率,这就很自然地导出了微分方程;又因未知量的变化取决于多达四个自变量(x, y, z 与 t),所以表达式应为偏微分方程。

求解上述偏微分方程的精度与难度,取决于分析人员建立真实世界情况的数学模型时所使用的简化假设条件。如果想使模型更精确地再现实际的物理性质,应尽量少引入简化假设条件,因而模型比较复杂。在求解时(如果它们确实可解的话),就需要应用更复杂的数学技巧。为了能显示出在各种假设条件下所得到的一系列模型,最好还是采用下述两种粗略的分类方法;即根据介质的性质和系统参数的时间变化来分类。其中每一大类又如表 1.1 所示分为许多小类。表中前 24 项(“场论问题”)与上述偏微分方程模型相对应,现在让我们讨论表 1.1。

6) Doebelin, E. O., *System Dynamics*, O. E. Merrell, Columbus, Ohio, 1972, p. 10.

表 1.1 系统模型的分类

模型		建模对象的介质的性质						系统参数的时间变化			
型号	连续性		方向性		均匀性		线性		随机 变量	确定性 变量	确定性 常量
	连续	离散	各向异性	各向同性	非均匀	均匀	非线性	线性			
1	×		×		×		×		×		
2	×		×		×		×			×	
3	×		×		×		×				×
4	×		×		×			×	×		
5	×		×		×			×		×	
6	×		×		×			×			×
等等	×										
20	×			×		×	×			×	
21	×			×		×	×				×
22	×			×		×	×	×			
23	×			×		×	×		×		
24	×			×		×	×				×
25		×					×		×		
26		×					×			×	
27		×					×				×
28		×					×	×			
29		×					×		×		
30		×					×				×

↑
随机性—离散模型
随机性—连续模型
↓

为了理解表 1.1 的普遍意义, 再结合一个具体实例进行讨论。图 1.4 示出了一个任意形状的固体, 它是由具有惯性和弹性的材料做成的, 因此能够振动。假如外力(驱动输入)和初始变形(贮能)已经给定, 要了解振动情况就要求解位移 u, v, w , 它们是坐标 x, y, z 与时间 t 的函数。应用适当的物理定律和一定的假设条件, 可得到一组联立的偏微分方程⁷⁾ 其中之一为

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

上述方程是应用一定的假设条件, 即把系统模型归入表 1.1 中的第 24 类而得到的。表中的方向性是指材料在不同的方向上是否具有不同的性质, 如应力与应变之间的关系在不同的方向上是否不同。举例来说, 合成纤维材料在沿纤维方向上与横断面方向上的特性差异甚大, 而大多数钢材在各个方向上的性能则非常相近。具有方向性的材料叫作各向异性材料, 而没有方向性的材料则叫作各向同性材料。

另一种描述材料性质的指标是材料内各处的均匀性。比如整个物体的质量密度 ρ 是否

7) Timoshenko, S., Theory of Elasticity, McGraw-Hill, 1951, N. Y. p. 463.

相同? 匀质的介质称为均匀介质, 不均匀质的介质称为非均匀介质。同一个物质或介质的一种

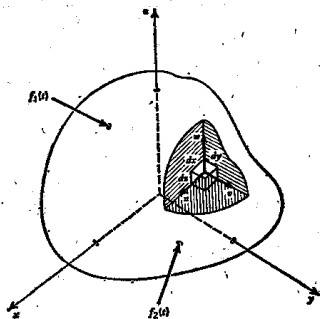


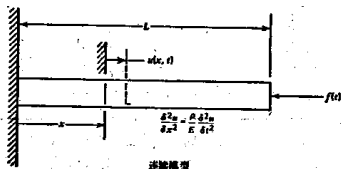
图 1.4 振动物体

性质可以是均匀的(例如密度), 而另一种性质又可以是非均匀的(例如弹性模数 E)。最后, 在“介质的性质”一项中, 特性可以是线性的或非线性的。这是指变量之间数学关系的性质而言, 例如应力/应变关系。在(1.2)式中使用了最简单的假设条件(即各向同性、均匀性与线性)。

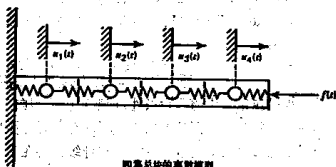
另一主要类别是“系统参数的时间变化”, 这个类别涉及到是否可以把模型某些参数随时间的变化看作已知的; 而方向与位置的变化(各向异性与非均匀性)则作为未知的, 假如图 1.4 所示的振动物体的温度按已知规律随时间变化, 则可把它并入密度 ρ 、模数 E 与泊松比

ν 的值为时变量的模型中去。在真实世界中, 所有系统参数由于受温度、湿度、空气压力等环境条件波动的影响, 而随时间随机地变化; 但这种随机变化与可预测的(确定性)变化或恒定均值相比通常很小, 所以, 这类较简单的模型得到广泛的使用。(1.2)式中仍假设具有最简单的情况, 即参数 E 、 ν 与 ρ 为常量。

虽然表 1.1 中的偏微分方程(“场论”)模型(型号 1~24)可能十分精确, 但是在有限几种情况下(主要是第 24 项)能得到解析解; 而且也仅限于几种简单的几何形状、输入和边界条件。为了解决更多实际问题, 就不得不放弃连续介质的观点, 而代之以一个离散化的、集总的或网络模型。为了进一步说明这个概念, 我们将在后面详细介绍一些方法(物理集总参数、有限差分法和有限元法); 这里先引用一个在许多大学工科课程中都常用到的物理集总参数的例子。在这里我们不再是把物理定律应用于无穷小元素 $dx dy dz$ 在求极限过程



连续模型



离散集总的高阶模型

图 1.5 一维空间的连续模型与离散模型

中趋于一个几何点, 并允许未知量在空间作平滑的变化, 而是开始把介质表示为离散的、有限数量的弹簧与质量的联接体(见图 1.5 中一维空间的例子)。这时所得到的不再是一个包含空间变化 $\partial^2 u(x, t)/\partial x^2$ 项的偏微分方程, 而是一组联立的常微分方程。空间变化由一组

有限数目的未知位移 $u_1(t)$, $u_2(t)$ 等离散近似量来表示。

现在就可以用更简单的近似方式来处理表 1.1 中的各向异性和非均匀性, 即只需略为调节各个集总单元的数值, 使之与空间变化参数的局部值相一致即可。也就是说, 假设密度 ρ 实际是随 x 变化的, 其规律为 $\rho = \rho_0(1 + 2\alpha/L)$, 则在集总质量位于 $x = L/2$ 处的高离散模型中, 只要假设密度为常数即 $2\rho_0$ 。和在连续模型中一样, 我们可选择系统的变量之间为线性关系或非线性关系, 系统的参数可以是随机变量、确定性变量或是常量。因此真实世界的基本性质都可以模拟, 只是用的是近似的方式。当然, 由损失精度而得到的好处是简单, 常微分方程要比偏微分方程简单得多。

最后, 作为对表 1.1 的总结, 应当指出, 所谓“系统分析”的理论基础是第 30 类中的线性、常定系数方程加上对应的第 24 类偏微分方程。唯有这些方程(特别是常微分方程)不仅能扩展其复杂程度而用于大型系统, 并可按系统的和常规的方式用解析方法预测其特性。当然, 在求一个具体问题的具体解时(与发展统一的基本理论相对比), 也可以寄望用计算机数值解法。这种解法适用于表 1.1 中的所有类型, 实质上, 这些解法是把所有问题都简化为离散模型来处理了。大型高速计算机和不断完善的离散化方法能给出极为精确的计算结果; 但这并不意味着必须采用这些方法。在决定具体应达到什么精度和怎样做在经济上更合理的问题上, 仍然要靠一定的实践经验来判断。

1.5 子系统的耦合

在结束本章有关概论性的内容前, 再扼要介绍一下关于子系统耦合这个重要课题。在系统研究中, 当处理复杂过程时强调采用“模块”法或“结构单元”法是有许多原因的, 其中最明显的原因是因为人的头脑每次只能领会有限的复杂度, 所以必须把一个大问题分解为若干个易于处理的小块来加以处理。即便是计算机也会受到上述原因的限制; 因此也需要有一种模块式表示方法。模块化除了易于理解以外, 还能提高效率。这就是说, 假如我们所建立的元件模型能够在输入端与输出端上方便地与其他兼容装置相连接, 则这种建模工作只需进行一次即可; 当这种元件再次在不同部分出现时, 就不必再重复这项工作。最后, 一套真实的系统, 经常是由许多部件组成。这些部件可能是由分散在各地的若干家独立的小工厂或一家大公司下面的许多子公司制造的。为了尽量减少在最后总装阶段上出现意外问题, 最为有效的方法是在每个元件离开生产场地之前, 对它进行周密考虑的试验来检验它与配套子系统的兼容性。这种试验的设计、实现与解释方法主要就是建立在子系统耦合的概念上。

过去, 在许多关于系统分析的实际应用中, 都是用传递函数⁸⁻¹⁰⁾来表示子系统耦合的概念

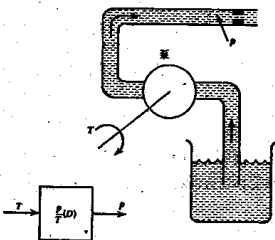


图 1.6 液压泵的传递函数模型

8) Doebelin, R. O., *Dynamic Analysis and Feedback Control*, McGraw-Hill, N. Y., 1962.

9) Doebelin, R. O., *Systems Dynamics*, C. E. Merrill, Columbus, Ohio, 1973.

10) Doebelin, R. O., *Measurement Systems* (Rev. Ed.), McGraw-Hill, N. Y., 1976.

念(也许将来还要继续用它)。虽然本书是一本中高级水平的教课书,读者已具备了有关传递函数方法的知识;但为了便于不熟悉这一内容的读者阅读本书,我们仍准备在第二章中扼要复述一下有关这方面的内容。这一节的目的,是定性讨论图 1.6 与图 1.7 中所示的具体例子,借以介绍在第七章将详细研究的基本观点。图 1.6 表示一台液压泵,它和一个特定负载相连接,并由已知输入力矩 $T(t)$ 来拖动。只要作一些适当的假设,就可导出把输入力矩 T 与输出压力 p 联系起来的微分方程,并确定出传递函数 $(p/T)(D)$ 如图中方块图所示。由于所作的假设和所用的建模方法都具有局限性,所以这种描述泵的方法实际上是不完善的;它用于图中的特定情况,但当泵的连接方式与图 1.6 不一样时,它所包含的信息就不能满足模拟泵机的特性的需要。

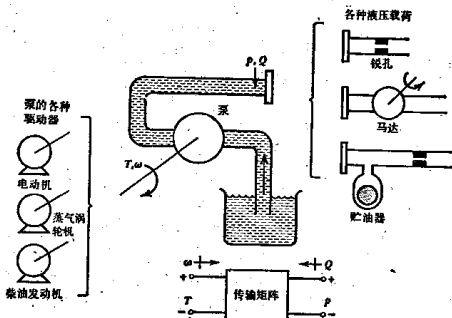


图 1.7 液压泵传输矩阵模型

为了克服传递函数方法的这种局限性,工程师们发展了种种建模方法,例如阻抗与导纳,传输矩阵和键合图等。尽管这些方法在细节上有所不同,但基本上都认为不可能只用单一的耦合变量(例如图 1.6 中的力矩 T 或压力 p)来严谨地描述两个子系统在它们连接界面上的相互作用。更确切地说,在涉及到功率传输(它用于描述子系统之间的能量流)时必须每个耦合端上考虑两个变量。选择这些变量时,应使两个变量的乘积等于通过端口传输的瞬时功率。我们以后还要说明,虽然基于这种原理的建模方法需要花费较大的功夫,但却能用比传递函数方法更为通用的方式把子系统连接起来。所以在图 1.7 中,一旦用理论或实验推导出泵的传输矩阵模型,就可以把它与各种不同种类的“上游”或“下游”装置的类似模型相结合,以便精确地预测出系统的总性能。

参 考 文 献

1. Beachley, N. H. and H. L. Harrison, *Introduction to Dynamic Systems Analysis*, Harper and Row, N.Y., 1978.
2. Berlinski, D., *On Systems Analysis: An Essay Concerning the Limitations of Some Mathematical Methods in the Social, Political, and Biological Sciences*, The MIT Press,