

[美] M. 阿坦斯等著 宗孔德等译

系统、网络与计算： 多变量法



人民教育出版社

系统、网络与计算: 多变量法

[美] M. 阿坦斯等著

宗孔德等译

人民教育出版社

1979 · 12 · 北京

MICHAEL ATHANS

MICHAEL L. DERTOUZOS

RICHARD N. SPANN

SAMUEL J. MASON

Department of Electrical Engineering

Massachusetts Institute of Technology

**Systems, Networks,
and Computation
MULTIVARIABLE METHODS**

McGraw-Hill, Inc. 1974

2P88/31

系统、网络与计算: 多变量法

[美]M. 阿坦斯等著

宗孔德等译

责任编辑 农植伟

*

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

浙江洛舍印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 26 字数 590,000

1979年12月第1版 1982年6月第2次印刷

印数 7,801—10,400

书号 15012·0221 定价 2.20 元

译者的话

本书连同它的姐妹篇(《系统、网络与计算: 基本概念》, 原文本于 1972 年出版, 中译本于 1979 年出版) 是美国麻省理工学院电工程系于 1966 年开始课程改革之后形成的。经过六年的试验演变成现在的样子。它曾经是电工程和计算机科学诸专业二三年级学生的教材, 后来又曾为其他一些工程学科所采用。

这本书虽然常常从电网络开始研究如何分析和设计一个系统, 但作者的目的是力图给读者一个统一的方法去处理各种不同的系统, 希望读者不把眼界局限于一种学科的范围之内。

本书和它的姐妹篇(《基本概念》) 都采用状态变量法。但本书研究的是多变量的问题, 从而通篇都使用线性代数这一数学工具。

本书对于连续时间的与离散时间的多变量动态系统都作了分析, 内容比较丰富。对系统的计算提出了系统化的方法并在第三章、第九章讨论了数值计算法, 第八章讨论了状态变量法与输入输出法之间的连系。所有这些都有一定的参考价值。第五章的内容是以美国经济问题作为离散系统的一个例子, 其数学分析方法也可供参考。

参加本书翻译的有下列同志: 王先冲(原书序言及第一章)、肖达川(第二章)、杨福生(第三章)、江缉光(第四、五章)、陈允康(第六章)、宗孔德(第七章)、唐统一(第八章)、夏明玉(第九章、附录 B 及附录 C) 及周礼杲(附录 A)。由宗孔德对全书译文进行了校对。在翻译过程中对原书的个别错误作了订正。

限于译者水平, 译文中难免有不妥和错误之处, 欢迎读者批评指正。

前 言

本书是为学习电工程及计算机科学的大学生所开设的一个学期课程的产物。内容是在麻省理工学院过去六年的教学中逐步形成的。虽然原来选定的内容是针对电工程系大学二、三年级学生,近来由于吸引了许多其它学科(数学、经济、管理等)的学生,课程的性质有了些变化。

课程的先修要求是:大学二年级水平的线性代数和初等网络分析。为了使教材能在一学期中教完,线性代数的先修要求是必不可少的。电路知识方面的要求较少,设想学生对于列写简单网络的微分方程是熟习的。

本书的基本目标是介绍系统分析中的一些课题。近十年来,不仅在传统的工程应用中,而且在具有强烈跨学科性质的领域中,复杂系统日益显得重要。复杂系统的分析迅速地广泛流行起来,除了技术的及社会经济的推动力量之外,还受到数字计算机模拟应用不断增长的巨大影响。

虽然发生了系统革命,怎样按照大学本科水平对系统进行教学还是有些不清楚。迄今学生是通过学习内容比较狭窄的、实用观点的科目而认识系统的。学生可以学过关于网络系统、机电系统、化学过程控制系统、运输系统、航天系统、经济系统、城市系统等方面很出色的课程。但是分析和设计这些系统时能用共同的概念及解析和算法的工具,这一事实却是或多或少靠学生自己领悟出来的。

当前学生中增长着对相互联系的寻求,这是不能忽视的。现在大学本科学学生进行科研的机会增多了,跨学科的实验室雨后春笋般地出现了,这些也都促进了在本科课程中需要早一点对系统有更为统一的处理。本书就是试图满足这种需要。

有人会争论说:复杂动态系统分析不属于大学二、三年级的课程。我们不同意这个说法。如果只和二阶 RLC 网络打交道,确实是体会不到用数字计算机来模拟系统和算法求解的威力的。重要的是使学生知道,具有不同物理特性的系统可以用共同的解析方法或算法来分析和设计,这件事做得越早越好。重要的是使学生知道,大型的互相联接的系统能够出现与直觉判断相反的响应,这是不能用直观的、围绕外表的分析来预测的。最后,重要的是向电工程的新生介绍一般系统概念的有关应用。现在的学生非常关切污染系统、社会问题、经济系统、运输系统等等。他们了解并期待着电工程师将要协助解决这些迫切的全国性问题。因此应该用这些有关的例子启发对一般系统理论概念的要求。我们发现,学生对于这种联系多种专业的训练反应很好。

在引导学生研究动态系统的数学分析和设计方法之前,必须用他们所熟习的东西来激发他们对这种进展的需要。我们采用的一般办法是从熟悉的到新颖的这样一条途径。

在第一章中我们提供一些关于系统分析和动态系统等概念的一般叙述,主要是为以后各章内容打好基础。

下面把各章的顺序、基本目的、关键性概念及主要结论列为一个表。现在详细地说明这个顺

序的理由,特别是各章主旨之间的联系。

表 I 各章间相互关系表

章 次	目 的	关键性内容	结 论
2	如何建立多变量静态系统的平衡方程	线性及非线性电阻网络的系统分析方法: 节点法; 割集法; 线性化	需要求解下列形式的向量方程组 $Ax=b$ 或 $x=f(x)$
3	如何解向量方程组 $x=f(x)$ (来自第二章)	迭代法: 匹卡德法及牛顿法; 最佳化法: 最速下降法, 共轭梯度法, 弗莱彻-鲍威尔法	向量差分方程组的形式为 $x(k+1)=f(x(k))$, 式中 k 为迭代次数
	提出静态最佳化问题和需要求解的方程组		收敛条件 收敛速度
4	方程组 $x(k+1)=f(x(k))$ 另外的一些性质 (来自第三章); 社会经济系统的分析	线性及非线性向量差分方程的理论; 稳定性引论; 本征值的作用; 线性化的概念; 反馈的应用	离散时间动态系统的一般分析和设计方法
5	提供一个中等复杂程度的离散时间系统例子	美国经济的宏观经济模型的描述	动态系统用途的一般性了解
6	建立连续时间网络的方程组	应用割集法系统地推导线性及非线性 RLC 网络的状态变量方程组	形式为 $\dot{x}(t)=f(x(t), u(t))$ 及 $\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)$ 的向量微分方程组
7	向量微分方程组的性质 (来自第六章); 非电的动态系统的方程组	线性及非线性向量微分方程的理论; 稳定性引论; 本征值的作用; 线性化及反馈的应用	连续时间动态系统的一般性分析及设计的方法
8	线性系统的输入-输出及状态变量模型的一致性	状态变量模型与输入-输出系统或传递函数模型之间的往复变换	模拟线性系统的两种主要方法之间的关系
9	如何获得向量微分方程的数值解 (来自第六至八章)	数值积分的算法 (欧拉法, 梯形法, 辛普生法则); 微分方程的数值解 (欧拉法, 霍恩法, 四阶龙格-库塔法, 隐式迭代法)	各种数值方法的精确度、灵敏度和复杂程度的比较

第二章讨论大型的无记忆系统。对含源的和具有线性或非线性电阻的网络, 着重有系统地用节点法或割集法求出网络方程组。从实用上说, 这一章是做为工具, 使学生熟习矩阵及向量在

方程组中的实际应用。从目的上说,我们用电阻网络来说明求解线性向量方程组(具有 $Ax+b=0$ 形式)及非线性向量方程组(具有 $x=f(x)$ 或 $g(x)=0$ 形式)的必要性。从效果上说,对学生加强关于电阻网络的知识,并介绍线性化的概念(这个概念将要反复使用),用这个方法便可以按照处理线性系统的方法去近似地分析非线性系统的性能。最后,做为附带的目的,简短地介绍一下流体网络。

第三章讨论迭代法和其它算法的解法。联立代数方程组算法求解的基本目的在第二章中已经提到了。本章一开始就强调,迭代算法产生有指导的猜试向量序列 $\{x_k\}$,其中 k 为迭代次数;迭代算法的一般性结构为: $x_{k+1}=f(x_k)$,在此我们希望学生了解,有些其它类型的系统问题也会导致同样的一般性结构 $x_{k+1}=f(x_k)$ 。因此,我们花费一些时间来讨论非约束性的最佳化问题,也就是找出多变量数量函数的极大或极小值的问题。这样,我们努力运用了概念的节约,即某种特定类型数学问题的分析和解答能够应用于许多领域这样一个客观事实。其次,向学生介绍求解非线性向量方程组的匹卡德法和牛顿法,以及求解非约束性最佳化问题算法的最速下降法、共轭梯度法和弗莱彻-鲍威尔法。从效果上看来,这时学生已经掌握了求解静态无记忆问题的一些常用算法。从理解能力上已经提出了解答的存在、唯一性、收敛性、收敛速度等问题。最后,算法结构 $x_{k+1}=f(x_k)$ 提供了出色的工具,促进了对用向量差分方程及状态变量法描述的离散时间动态系统的研究。

第四章处理由向量差分方程描述的,线性及非线性的时不变离散时间系统的分析和设计方法。除了迭代法之外,说明上述目的的例子中包括了社会经济问题。详细讨论了线性的离散时间系统,并导出了常用的叠加性质及用系统矩阵本征值检验稳定性的方法。提出非线性离散时间系统的稳定状态及平衡点的分析,是为了引出扰动法分析的必要性。我们用扰动法来研究一个平衡点的稳定或不稳定的性质。又一次采用线性化方法(前一次在第二章中),以说明怎样把线性系统中发展起来的方法用于非线性系统。除了这些分析工具外,学生们还接触了应用状态变量反馈的设计方法,可以用反馈改进离散时间系统的性能或者使之稳定。

第五章包括简单的和复杂的宏观经济模型的讨论。包括这个内容是由于经济系统的数学表示几乎总是以离散时间形式出现的,同时也是对于如何把经济计量学模型由通常的输入-输出差分方程转换为状态变量形式的示范。最后,提出美国经济计量学线性模型,包括28个状态变量、3个输入变量的详细的方程组。通过这个例子生动地说明:在社会经济的应用中,由于数学模型是用以预见并帮助决定政策的,它的相对准确度就具有头等的重要性。

到此学生已经接触了在离散时间动态系统的分析和设计中所必需的基本概念和方法。由于差分方程中数学的抽象较少,用脑筋较多的是在了解线性、叠加性质、系统矩阵的本征值及本征向量的作用、稳定性、线性化及反馈等关键性的概念上。从教学法观点上看,我们认为,让学生再一次接触系统的这一套关键性概念,可帮助他们体会到其普遍重要性。但是从实用的观点上看,绝大多数的工程系统都很自然地是以微分方程而不是以差分方程描述的。因此,着重点开始转移到连续时间系统的分析上。

第六章再一次从电工程师熟习的基础上开始。本章的目的是说明,在分析线性及非线性

RLC 网络时, 怎样出现线性向量微分方程[具有 $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t)$ 形式] 及非线性向量微分方程[具有 $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), u(t))$ 形式]。这为以后的内容提供了目的性, 即第七章中结合着连续时间动态系统而提出的一般系统概念和第九章中的数值积分算法。从实用的观点看来, 网络微分方程是由割集法(在第二章中讨论过)和状态变量法导出的。这里状态变量法的关键在于寻找那些最自然地描述网络中能量的变量。因此, 对线性网络我们经常将电容电压及电感电流作为状态变量。对非线性网络, 我们用电容电荷及电感磁链作为状态变量。

第七章包括有关连续时间动态系统的基本的系统概念。系统概念的发展与第四章中的思路类似, 在该章中我们曾将同样的概念贯穿在离散时间系统之中。我们认为有必要作这样的重复揭示。虽然概念确属相同, 但所得到的结果却有某些不同的解析特性, 并且由于向量微分方程比差分方程更深奥些, 重复的揭示对理解和应用仍是有益的。另外的例题取自航天、运输和生态学中的应用, 以进一步强调许多很不同的系统都遵守向量微分方程的规律。线性系统的分析包括矩阵指数函数及叠加性质、求解向量微分方程中本征值及本征向量的作用、线性系统的稳定性、主本征值的作用。对于以非线性微分方程描述的动态系统, 我们提出了一些基本的证明如: 解答的存在及唯一性、平衡状态、在平衡点附近的线性化方法及平衡状态的局部稳定性(采用线性系统稳定性检验方法)等。最后, 我们提出关于系统设计的简短介绍, 采用了状态及输出反馈的概念(极点分布问题)。

第八章是单输入单输出线性时不变系统的输入-输出分析法与状态变量分析法之间的桥梁。学生大体上已经接触过系统函数的概念(用复指数激励)与/或传递函数的概念(用拉普拉斯变换)。因此, 也已经接触过极点和零点和它们对于系统过渡响应特性及系统稳定性的极端重要性。由于在第六章和第七章中对连续时间动态系统都是用状态变量法来研究的, 迄今为止对学生说来这两种方法还没有联系, 故第八章的目的是使它们成为一致的。因此, 在第八章中采用标准的可控制的和标准的可观测的表示方法, 研究由状态变量表示方式转换到输入-输出表示方式及其反变换的途径。在这个过程中我们证明系统矩阵的本征值就是系统函数或传递函数的极点, 这就使两种分析方法统一起来了。

第九章导出用数字计算机求解线性及非线性微分方程组的数值算法。对于数值积分我们介绍了欧拉法、梯形法和辛普生法。对微分方程的数值解法我们介绍了欧拉法、霍思法、四阶龙格-库塔法和隐式法。除了明显的实用内容之外, 本章还提供了连续时域与离散时域之间的桥梁。

三个附录提供关于向量、矩阵、线性代数、泰勒级数等有用的性质及拉普拉斯变换的简短介绍。我们极力主张学生在学习第二章之前去阅读附录 A, 以复习向量和矩阵的定义、概念及运算等, 因为从一开始就使用向量和矩阵。

标有星号的节次在初次阅读时可以略去而不破坏连贯性。

家庭作业的重要性是怎样强调也不过分的。本书每章后面附有练习题, 按节次顺序安排。有些需要用到全章中大部分概念的题目放在最后。

练习题包括三种类型。第一类用以或多或少地阐明正文中已有的内容。第二类要求学生所学过的理论内容有所推广; 这类问题中有些难度较大, 甚至对最好的学生也是困难的。我们在练

习题中提到很多重要的系统理论中的概念,例如:可控性、可观测性、状态重建器及观察器等。第三类习题要求使用数字计算机。我们给了每个学生分批计算的充分上机时间。建议在一个学期中最少给学生指定四次不轻的计算机作业,从第三章结束后就可以开始。

本书和我们的第一本书^①是从1966年开始的教学试验的产物。由大学二年级两个学期的讲义发展成为这两本书。课程是为电工程系的有志于通讯、计算机、控制等领域的学生设置的。

在《基本概念》中,我们着重用很简单的网络和逻辑系统揭示基本概念和方法;还通过求解数量方程阐明计算中一些关键性的概念。我们发现只要从不同的领域中提出简单的例题,大学二年级的学生是能够掌握非常一般性的观点、概念和方法的。

这本书的目的之一是使学生懂得:一旦有了数学表示的适当工具(例如线性代数)之后,简单概念、简单算法及简单系统分析工具不难加以推广,来分析很复杂的、描述系统的变量数及方程式数都增加了的系统。因此,我们试图强调概念的节约,就是说,人们不必只是由于研究更复杂的系统,就要再学新的系统分析概念或新的算法概念。

这样,虽然这两本书都可以单独使用,但是贯穿着按照顺序使用的统一原理。已经学过《基本概念》的学生会发现两书中标题的次序是很对应的。在《基本概念》中以数量形式展示的多数概念在本书中推广了。《基本概念》中逻辑网络及有限状态机的讨论在本书中换为离散时间系统的研究。其余如迭代概念、状态变量、动态网络、积分法等都完全是从简单到复杂平行对应的。

两本书都包括了四位作者的共同努力。本书定稿工作基本上由M.阿坦斯负责。

(以下志谢略——译者)

M.阿坦斯 M.L.德陶佐

R.N.斯潘 S.J.梅森

^① M. L. Dertouzos, M. Athans, R. N. Spann, and S. J. Mason, "Systems, Networks and Computation: Basic Concepts," McGraw-Hill, New York, 1972(中译本: M. L. 德陶佐等著, 江缉光等译《系统、网络与计算: 基本概念》, 人民教育出版社, 1979年)。以下简称《基本概念》。

目 录

前言	6
----------	---

第一章 动态系统引论

1.1 动态系统的概念	1	1.2 施加影响于动态系统	4
1.1.1 原因与结果	1	1.3 定量方法的作用	5
1.1.2 时间的作用	2	1.4 线性和非线性系统	6
1.1.3 静态和动态系统	3	1.5 输入-输出法和状态变量法	7

第二章 电阻网络和无记忆系统

2.1 引言	9	2.7 讨论	36
2.2 网络拓扑定义初步	10	2.8 非线性电阻网络	36
2.3 任意网络中节点电压、支路电压及支路电流 之间的关系	11	2.8.1 引言	36
2.4 线性时不变电阻网络的节点分析	15	2.8.2 非线性电阻元件	37
2.4.1 目的	15	2.8.3 网络分析	38
2.4.2 局部网络描述	16	2.8.4 线性化方法及小信号分析	39
2.4.3 完整网络描述	17	2.9 一类流体系统的分析	41
2.4.4 例题	19	2.9.1 引言	41
*2.4.5 计算机辅助节点分析	20	2.9.2 基本元件	42
*2.5 阻抗网络的节点分析	27	2.9.3 流体系统的拓扑以及同 KVL 和 KCL 的 类比	43
2.6 割集分析和网络拓扑方程	18	2.9.4 讨论	44
2.6.1 目的	28	2.9.5 支路约束简介	44
2.6.2 定义	28	2.10 结束语	44
2.6.3 网络的割集分析	30	参考文献	45
2.6.4 割集分析的一般化	33	练习题	45
2.6.5 线性时不变(LTI)电阻网络	34		

第三章 解联立方程组的迭代法及最优化问题

3.1 引言	52	3.2.6 解析解法	60
3.2 无约束的静态最优化问题	53	3.3 算法求解的基本原理	61
3.2.1 一个简单的解析例题	53	3.3.1 必须回答的几个基本问题	62
3.2.2 最优化问题的定义	55	*3.4 某些数学性质	63
3.2.3 关于最优化问题的解法	58	3.5 匹卡德算法	64
3.2.4 二阶导数信息的利用	59	3.5.1 数量情况	64
*3.2.5 充分条件	59	3.5.2 向量情况	66

3.5.3 收敛速度	68	3.7.1 基本问题	85
3.5.4 关于应用匹卡德算法的一些说明	70	3.7.2 用牛顿法求函数极小化	85
3.6 牛顿法	73	3.7.3 用最速下降法求函数极小化	86
3.6.1 数量情况	74	*3.7.4 共轭梯度法	90
3.6.2 向量情况:问题的定义	75	*3.7.5 弗莱彻-鲍威尔算法	92
3.6.3 解法的原理	75	3.7.6 用二次插补法确定最佳步距	92
3.6.4 正式的陈述	78	3.8 最优化算法的比较	95
3.6.5 对于牛顿算法的某些说明	79	参考文献	97
3.6.6 改进的牛顿算法	80	练习题	98
3.7 函数极小化的迭代法	84		

第四章 离散时间动态系统

4.1 引言	106	4.7.1 平衡偶	126
4.2 离散时间系统的输入-状态-输出描述	107	4.7.2 平衡状态的稳定性	128
4.2.1 关于时间的概念	107	*4.7.3 线性化	128
4.2.2 输入-输出描述	108	4.7.4 一个生态学的例子	130
4.2.3 离散系统的基本元件	108	*4.8 稳定性的结果应用于迭代算法	133
4.2.4 离散时间动态系统的内部状态变量表示	109	4.9 反馈的介绍	134
4.3 一个例题	111	4.9.1 一般概念	134
4.4 线性离散时间系统	113	*4.9.2 线性系统的反馈原则	136
4.4.1 无强制的 LTI 离散时间系统	114	*4.9.3 输出反馈	138
4.4.2 强制的 LTI 离散时间系统	116	4.9.4 非线性系统的反馈控制	141
4.5 利用本征值的解法	119	4.10 结束语	143
4.6 离散时间系统的稳定性	122	参考文献	144
4.7 非线性系统的静态线性化和平衡的稳定性	126	练习题	145

第五章 离散时间线性系统的一个例子: 美国经济的(按季度的)一个经济计量学模型

5.1 引言	156	5.3.2 三个基本的控制变量	163
5.2 简单的宏观经济定性模型的一个例子	158	5.3.3 状态变量的列写	164
5.2.1 一个典型的宏观经济模型	158	5.3.4 状态变量模型的结构	166
5.2.2 状态变量表示式	159	5.3.5 经济计量学模型与实际数据的比较	167
5.2.3 用方框图形象化	162	5.4 为什么数学的经济模型有用?	169
5.3 美国经济的一个定量宏观经济模型	162	5.4.1 开环控制	169
5.3.1 十个基本经济变量	162	5.5 结束语	170

第六章 连续时间动态网络

6.1 引言	172	6.2.3 线性和非线性电容	175
6.2 定义	173	6.2.4 线性和非线性电感	175
6.2.1 物理变量	173	6.3 通过割集分析法得出的 LTI LC 网络的状	
6.2.2 线性和非线性电阻	174	态变量方程组	176

6.3.1 假定	176	6.4.3 符号和术语	184
6.3.2 支路结构	177	6.4.4 割集分析的含意	189
6.3.3 完整的方程组	178	6.4.5 支路约束	186
6.3.4 讨论	179	6.4.6 状态向量方程组	186
6.3.5 在纯 LC 网络中的能量	180	6.4.7 结束语	192
6.4 LTI RLC 网络的状态变量描述	183	6.5 非线性 RLC 网络的状态变量方程组	192
6.4.1 一般任务	183	参考文献	195
6.4.2 假定	183	练习题	196

第七章 连续时间动态系统

7.1 引言	201	7.10 LTI 强制的向量微分方程的解	234
7.2 连续时间系统的抽象想象	203	7.10.1 解的性质	234
7.2.1 无记忆子系统的描述	204	7.10.2 叠加性质	237
7.2.2 有记忆子系统的描述	204	*7.10.3 时移性质	238
7.2.3 动态系统的完整描述	205	7.11 LTI 系统的稳定性	240
7.3 连续时间动态系统另外的一些例子	205	*7.12 主本征值的概念	247
7.3.1 直线运动	205	*7.13 非线性向量微分方程:一般概念与假定	248
7.3.2 运输系统	206	7.13.1 关于输入向量 $u(t)$ 的一些假定	249
7.3.3 力学系统	208	7.13.2 关于函数 $f(x, u)$ 的一些假定	250
7.4 生态学系统与人口动力学	210	7.13.3 讨论	251
7.4.1 单一物种动力学	210	*7.14 存在和唯一性	251
7.4.2 有竞争对手时物种的人口增长	211	7.14.1 基本原理	251
7.4.3 弱肉强食情况下的人口动力学	212	7.14.2 解的存在	252
7.5 一些基本的数学定义	213	7.14.3 解的唯一性	254
7.5.1 线性向量微分方程	214	7.15 静态的线性化	255
7.5.2 边界条件	214	7.15.1 平衡偶	256
7.5.3 微分方程的解	215	7.15.2 小信号分析	257
7.5.4 解的存在和唯一性	215	7.15.3 泰勒级数	257
7.5.5 讨论	216	7.15.4 结论	258
7.6 LTI 无强制的向量微分方程 $\dot{x}(t) = Ax(t)$ 的解	217	7.16 非线性 RLC 网络的小信号分析	259
7.6.1 矩阵指数函数	217	7.16.1 非线性网络	259
7.6.2 $\dot{x}(t) = Ax(t); x(0) = \xi$ 的解的存在	218	7.16.2 平衡值	260
7.6.3 $\dot{x}(t) = Ax(t); x(0) = \xi$ 的解的唯一性	220	7.16.3 小信号分析	261
7.6.4 小结	221	7.17 线性化分析的另一个例子:一个旋转的航天飞行器	264
7.6.5 叠加性质	222	7.18 应用状态变量反馈的补偿	268
7.6.6 时移性质	223	7.18.1 固有的线性系统	269
7.7 求矩阵指数函数 e^{At} 的值	224	*7.18.2 推广到跟踪系统	274
7.7.1 用级数求值	224	7.18.3 推广到非线性系统	275
7.7.2 通过本征值和相似变换求值	224	7.19 结束语	276
7.7.3 用 A 矩阵的本征值和本征向量求解	226	参考文献	277
7.8 例题	228	练习题	277
7.9 线性系统的一个有趣的例子:节拍的产生	231		

第八章 线性时不变动态系统的状态变量和 输入-输出描述方式之间的关系

8.1 输入-输出法.....294	8.4 状态变量表示方式的替换形式及其输入-输出的不变性.....306
8.1.1 输入-输出描述方式.....294	8.5 原理性的说明:系统函数、状态变量和模拟.....307
8.1.2 系统函数或传递函数表示法.....295	8.6 由系统函数到状态变量表示方式.....308
8.1.3 部分分式展开.....296	8.6.1 基本任务.....309
8.1.4 利用复指数信号推导系统函数.....296	8.6.2 模拟计算机的说明.....309
8.1.5 利用拉氏变换推导传递函数 $H(s)$297	8.6.3 不许使用微分器.....311
8.1.6 注释.....298	8.6.4 只具有极点的系统函数的状态变量表示方式.....312
8.2 共同的假定.....299	8.6.5 标准可控状态表示方式.....314
8.3 由状态变量到系统函数.....300	8.6.6 标准可观测的表示方式.....317
8.3.1 向量微分方程的求解.....301	8.6.7 结束语.....320
8.3.2 输出方程.....302	8.7 讨论.....321
8.3.3 结论.....302	参考文献.....321
8.3.4 用状态变量的量表示系统函数.....303	练习题.....321
8.3.5 极点与本征值:一回事.....303	
8.3.6 利用拉氏变换推导传递函数.....304	

第九章 数值积分方法

9.1 引言.....325	9.4.2 霍恩法.....335
9.2 定积分的数值计算.....326	9.4.3 四阶龙格-库塔(FORK)法.....336
9.2.1 时间间隔的分割.....326	9.4.4 解方程 $\dot{x}(t) = Ax(t)$ 的积分方法示例.....336
9.2.2 欧拉法.....327	9.5 用不同积分方法解范德波方程所得数值结果的比较.....338
9.2.3 梯形法.....327	*9.6 求微分方程数值解的闭式方法.....341
9.2.4 辛普生法则.....328	9.6.1 为什么要迭代?.....341
9.2.5 更复杂的算法.....329	9.6.2 一些困难.....342
*9.2.6 数值积分的精度.....330	9.6.3 数值积分法的利用.....342
9.3 向量微分方程的数值解介绍.....332	9.6.4 初始猜试值.....343
9.3.1 主要问题.....332	9.6.5 收敛性.....343
9.3.2 等效的积分方程.....333	9.6.6 迭代至何时停止?.....344
9.3.3 时间的离散化.....333	9.6.7 小结.....345
9.3.4 一般方法.....334	参考文献.....345
9.4 求微分方程数值解的开式方法.....334	练习题.....346
9.4.1 欧拉法.....335	

附 录

A 向量、矩阵和线性代数.....348	A.7 逆矩阵.....361
A.1 目的.....348	A.8 相似矩阵.....364
A.2 列向量:定义和算术运算.....348	A.9 本征值和本征向量.....365
A.3 线性相关和线性无关.....351	A.10 关于本征值、本征向量和相似变换的其它一些性质.....370
A.4 几何解释.....352	A.11 欧氏空间中的数量积.....376
A.5 矩阵及其基本的算术运算规则.....354	A.12 二次型和定矩阵.....379
A.6 关于方阵的一般定义.....361	

A.13 时变向量和矩阵	380	B.2 n 个变量的数量值函数	390
A.14 梯度向量和雅可比矩阵	382	B.3 n 个变量的向量值函数	391
A.15 向量和矩阵的范数	385	C 拉普拉斯变换摘要	394
参考文献	388	C.1 定义:数量情形	394
B 泰勒级数展开	389	C.2 定义:向量和矩阵情形	394
B.1 单个数量变量的数量值函数	389	C.3 拉普拉斯变换的一些重要性质	395
译名对照表	397		

第一章 动态系统引论

提 要

本章给出关于研究多变量动态系统的一些概念及方法的定性综述。

1.1 动态系统的概念

在工程、经济、管理科学的若干分支中,动态系统的概念是十分重要的。因为我们将花费相当多时间来分析几种类型的动态系统,所以需要先简短地考察一下它们比较重要的直观性质,然后过渡到能用以描述这些系统的恰当的数学模式。

1.1.1 原因与结果

动态系统的概念,是不能脱离表示其性能的一些变量来说明的。一般地说,按照相当抽象的概念,我们必须区别两类变量:

1. 原因变量,即外界施加于、或者作用到系统上的变量;
2. 结果变量,即紧密地联系着系统如何动作的变量。

图 1.1.1 给出了原因和结果的抽象直观关系。可以肯定,这种表示对实际应用是太抽象了。不过,它是一个容易被理解的出发点。对图 1.1.1,注意一下以下几点是很有意思的:

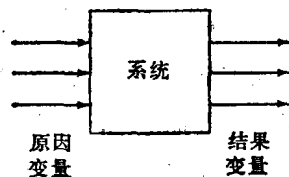


图 1.1.1 抽象示意图

1. 原因变量可以不止一个。每个原因变量由一个箭头代表;箭头指到系统,表明每个原因变量直接影响着这个系统,而这个系统不可避免地要对它作出某种响应。

2. 结果变量也可以不止一个,它的个数可以大于或者小于原因变量的个数。每个结果变量也由一个箭头代表;注意到箭头是离开系统的,这表明结果变量在一定意义上是由系统自身所产生的。

为了不陷于过分抽象,我们用一些例子来说明上述涵义。表 1.1 给出一些例子。

读者稍加思索就会相信,有时在确定同一个系统中哪一个是原因哪一个是结果的时候,是可以选择的(比较表 1.1 中电阻的例子)。通常的选择要依当时所遇到的具体问题而定,不过我们总是同实际的系统打交道,在确定原因及结果的时候,则必须相当审慎。例如,若把“跨越的电压”、“飞机”、及“出汗量”当做一组,就成为荒谬的因果关系。

表 1.1 因果关系之例

原因变量	系统	结果变量
跨越的电压	电 阻 器	通过的电流
通过的电流	电 阻 器	跨越的电压
油门的位置 刹车踏板的位置 变速杆的位置 方向盘的位置	汽 车	前进的速度 侧向的速度 在公路上的位置
升降舵的偏斜 副翼的偏斜 尾舵的偏斜	飞 机	俯仰角 滚动角 侧滑角
空气的温度 湿度 步行速度	人 体	出汗量
货币供应 政府开支 税率	联邦经济	全国总产值 失业率 通货膨胀率 利率

1.1.2 时间的作用

对系统的分析中, 时间概念是十分重要的。在本书中我们考查两种引入时间的方法。在用连续时间的描述中, 可以发现每个原因变量和每个结果变量都是用时间函数描述的。这与我们所习见的多数实际系统是一致的。对于这些系统可以看到, 有一组时间函数是原因变量, 另一组时间函数是结果变量, 如图 1.1.2 的例子所示。

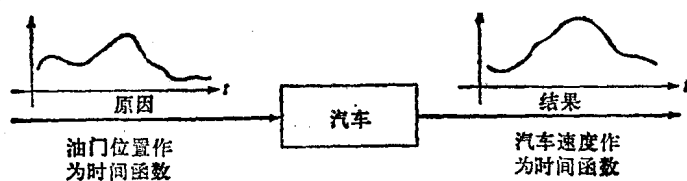


图 1.1.2 连续时间动态系统的例子

但是还有很多类型的系统, 用连续时间的描述来分析它们, 就过于琐细了。对这些问题, 仅仅描述一些离散时刻的原因和结果, 已经可以令人满意。因此, 有所谓系统的离散时间描述。这种描述, 在经济的和管理的系统中极为常见, 因为这类问题中存在着天然的时间单位(日, 周, 月等), 用这些单位分析系统的响应是恰当的。在离散系统中, 处理的是时间序列而不是时间函数。图 1.1.3 所示就是一个例子。

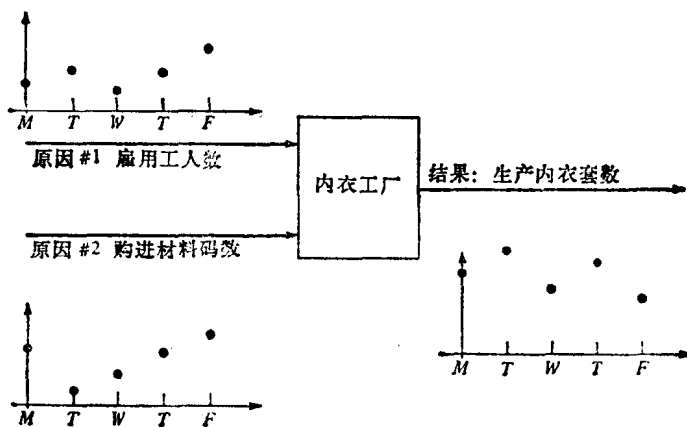


图 1.1.3 离散时间动态系统

现在我们能提出什么样的问题。一个典型的系统分析问题如下：

给定了系统，并给定了原因变量的时间函数（或时间序列），我们能不能找出结果变量的时间函数（或时间序列）呢？

显而易见，在很多应用中，上述问题是很典型的。我们来研究必须按照什么步骤进行分析，以便定量地回答这个问题。

在进行数学分析之前，先缩小所研究的系统的范围是有益的。我们要研究的系统，属于因果系统的类型。形象地说，因果系统就是“不推不动”。换句话说，在因果系统里结果不会发生在施加原因之前。读者应注意到，因果系统的概念，本身就要求有原因变量及结果变量的时间描述。显然，把讨论范围限于因果系统不会使所研究的实际系统的类型受到局限，因为从本质上说，实际系统都是因果性的。

1.1.3 静态和动态系统

现在我们来区别一下静态系统（或者说无记忆系统）与动态系统（或者说有记忆系统）。这两种系统都属于因果系统的类型。

直观地说，一个静态系统具有下述性质：在任意时刻 t ，它的结果变量仅仅依赖于在同一时刻 t 的原因变量的值。按照因果律，结果变量不会依赖于原因变量的未来数值。在静态系统中，结果变量也不会依赖于原因变量的过去数值；所以静态系统是不能记忆过去的原因的，这也正是为什么称之为无记忆系统的道理。

静态系统的一个常见的例子是线性的固定电阻，它的原因变量是跨越的电压 $v(t)$ ，它的结果变量是通过的电流 $i(t)$ 。这个系统可用欧姆定律来描述

$$i(t) = \frac{1}{R} v(t)$$

式中 R 是电阻值。注意在任何时刻 t 的电流数值仅依赖于同一时刻的电压瞬时值。

静态系统并不使人惊异，因为在施加原因与出现结果之间没有时间滞后。而在所谓动态系