

JISUANJI
FANGZHEN
JISHU 计算机
JICHU 仿真技术基础

● 李兴玮 邱晓刚 编著 ●

国防科技大学出版社

TP391.9

51

计算机仿真技术基础

李兴玮 邱晓刚 编著

国防科技大学出版社

·长沙·

内容简介

本书深入论述了系统仿真的基本概念和基本理论;介绍了连续动力学系统仿真建模的基本方法;详细论述了数值积分法、替换法和离散相似法等三类仿真方法;阐述了几个典型的半实物仿真系统,详细论述了仿真软件及其分类,特别是连续系统仿真语言的发展;讨论了离散事件系统仿真的一些策略;介绍了典型作战的仿真建模,探讨了作战仿真技术在国防领域中的具体应用;描述了计算机仿真技术在面向对象仿真、先进分布仿真、虚拟现实、定性仿真等方面的发展前景。

本书针对军事院校基础合训的学员编写,但也适合于从事系统仿真技术研究的相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机仿真技术基础/李兴玮编著. —长沙:国防科技大学出版社,2006.2
ISBN 7-81099-259-7

I. 计… II. ①李…②邱… III. 计算机仿真 IV. TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 004908 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:石少平 责任校对:唐卫藏

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×960 1/16 印张:13.75 字数:262 千

2006 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-3000 册

ISBN 7-81099-259-7/TP·22

定价:19.00 元

前 言

系统仿真是一门多学科综合的试验性学科,随着信息技术、系统技术,特别是计算机技术的发展,系统仿真技术得到了迅速的发展。仿真技术已从传统的航空、航天领域向其它工程领域、非工程领域扩展,并且正朝着更深入、更广泛的应用层面发展。本书针对军事院校基础合训的学员编写,但也适合于从事系统仿真技术研究的相关工程技术人员参考。

本书共分七章,主要介绍连续系统仿真和离散事件系统仿真的有关技术,针对部队的实际需要,还特别介绍了作战仿真的情况。第一章介绍了系统仿真的基本理论和基本概念,概括了仿真技术的应用;第二章探讨了仿真建模的基本要求和基本途径,介绍了动力学系统的几种典型数学模型以及这些数学模型之间的相互转化;第三章详细论述了连续系统仿真的三类方法:数值积分法、替换法和离散相似法;第四章阐述了仿真系统的基本组成,介绍了几个典型的半实物仿真系统,详细论述了仿真软件及其分类,特别是连续系统仿真语言的发展;第五章介绍了离散事件系统仿真的基本概念,论述了离散事件系统仿真的一些策略,并对离散事件仿真语言作了专门的讨论;第六章以兰切斯特方程为基础,介绍了典型作战的仿真建模,探讨了作战仿真技术在国防领域中的具体应用。第七章介绍了计算机仿真技术在面向对象仿真、先进分布仿真、虚拟现实、定性仿真等方面的发展前景。

本书第一、五、六、七章由邱晓刚教授编写,第二、三、四章以及附录由李兴玮副教授编写,全书由李兴玮副教授统稿。

本书是在总结多年教学实践的经验、结合作者近几年的科研成果,并参考国内外有关资料的基础上编写而成的。在编写过程中力

求作到基本概念清楚,既注重基本理论的论述,又注重理论和工程实践的结合;既总结仿真技术的现有成果,又关注仿真技术的最新发展;既介绍了仿真技术在民用各行各业中的应用现状,又兼顾了仿真技术在军事作战领域中的实际应用。

考虑到军事院校基础合训学员的实际情况,本书对于理论公式的具体推导不作过于详细的论述,而是强调和注重理论公式的实际应用。

由于时间仓促,只标注了部分引用的参考文献,特此致歉!

鉴于作者的水平有限、时间仓促,不当甚至错误之处,敬请领导、专家以及各位读者批评指正!

编 者

2005 年 12 月

目 录

第1章 导论	(1)
1.1 系统仿真的基本概念	(2)
1.1.1 系统	(2)
1.1.2 模型	(4)
1.1.3 仿真	(8)
1.2 系统仿真的分类	(11)
1.2.1 根据模型的种类分类	(11)
1.2.2 根据仿真计算机类型分类	(12)
1.2.3 根据仿真时钟与实际时钟的比例关系分类	(12)
1.2.4 根据系统模型的特性分类	(13)
1.3 计算机仿真	(14)
1.3.1 计算机仿真定义的分析	(14)
1.3.2 计算机仿真方法的特点	(16)
1.3.3 计算机仿真方法的作用	(17)
1.3.4 计算机仿真的步骤	(18)
1.4 仿真技术的应用	(19)
1.4.1 仿真技术在系统设计中的应用	(21)
1.4.2 仿真技术在产品开发及制造过程中的应用	(21)
1.4.3 仿真技术在教育与训练中的应用	(22)
思考题	(23)
参考文献	(23)
第2章 连续系统建模方法	(24)
2.1 仿真建模的基本要求	(24)
2.1.1 清晰性	(24)
2.1.2 切题性	(24)
2.1.3 精密性	(24)
2.1.4 集合性	(24)
2.2 仿真建模的基本途径	(25)

2.2.1 机理建模法	(25)
2.2.2 实验建模法	(25)
2.2.3 综合建模法	(25)
2.3 动力学系统的数学模型	(25)
2.3.1 连续时间系统模型	(26)
2.3.2 离散时间系统	(27)
2.3.3 连续-离散混合模型	(28)
2.3.4 实用建模举例	(28)
2.4 数学模型之间的相互转化	(30)
2.4.1 微分方程转化为状态方程	(30)
2.4.2 结构图转换成状态方程	(34)
2.4.3 传递函数转换成状态方程	(34)
2.4.4 状态方程转换成传递函数	(36)
练习题	(37)
参考文献	(37)
第3章 连续系统仿真	(38)
3.1 数值积分法	(38)
3.1.1 数值积分法基本原理	(38)
3.1.2 Runge-Kutta 积分法	(43)
3.1.3 线性多步法	(46)
3.1.4 积分方法的选择	(48)
3.1.5 积分步长的确定	(49)
3.1.6 数值积分法稳定性分析	(51)
3.2 替换法	(53)
3.2.1 简单替换法	(54)
3.2.2 双线性替换法	(56)
3.3 离散相似法	(59)
3.3.1 离散相似概念	(59)
3.3.2 Z域离散相似法	(61)
3.3.3 时域离散相似法	(63)
3.3.4 离散相似模型的精度与稳定性分析	(66)
3.4 数字控制系统的仿真	(70)
3.4.1 数字控制系统的组成	(70)

3.4.2 数字控制系统的仿真方法	(71)
3.4.3 数字控制器采样周期的调整	(74)
3.4.4 差分方程的仿真	(76)
3.4.5 纯延迟环节的仿真	(77)
3.4.6 数字式 PID 调节系统的仿真	(78)
练习题	(78)
参考文献	(80)
第 4 章 仿真系统与仿真软件	(81)
4.1 仿真系统	(81)
4.1.1 仿真系统的定义	(81)
4.1.2 仿真系统的分类	(81)
4.1.3 半实物仿真系统的组成	(82)
4.1.4 几个典型的半实物仿真系统	(82)
4.2 仿真软件及其分类	(85)
4.2.1 国外仿真软件	(86)
4.2.2 国内仿真软件	(87)
4.2.3 仿真软件的发展阶段	(87)
4.2.4 仿真软件的分类	(88)
4.3 连续系统仿真语言	(88)
4.3.1 仿真程序 S35	(88)
4.3.2 仿真语言 CSSL	(90)
4.3.3 仿真语言 ACSL	(92)
4.3.4 YFSIM 一体化仿真软件	(93)
4.3.5 MATLAB/simulink 仿真软件	(98)
4.3.6 其它仿真软件	(100)
4.4 仿真软件的现在	(102)
4.4.1 仿真软件在航空、航天领域中发挥得淋漓尽致	(102)
4.4.2 仿真软件在兵器、船舶领域的应用继续深化	(103)
4.4.3 仿真软件在电子、电力领域的应用如火如荼	(103)
4.4.4 仿真软件在通讯领域取得了广泛的应用	(104)
4.4.5 仿真软件在化工领域的应用日趋成熟	(105)
4.4.6 仿真软件在建筑领域的应用已经全面展开	(105)
4.4.7 仿真软件在军事作战领域的应用后来居上	(106)

4.4.8 针对教育和培训的仿真软件方兴未艾	(106)
4.4.9 针对车辆的仿真软件崭露头角	(107)
4.4.10 仿真软件开始进入嵌入式软件测试领域	(108)
4.4.11 仿真软件开始涉足一些其它工业领域	(108)
4.5 仿真软件的未来	(109)
4.5.1 仿真软件向应用的全生命周期发展	(109)
4.5.2 仿真软件向简单易用的方向发展	(109)
4.5.3 仿真软件向集成多媒体、虚拟现实技术的方向发展	(110)
4.5.4 仿真软件向一体化、系列化的方向发展	(110)
4.5.5 仿真软件向融合智能化技术的方向发展	(110)
4.5.6 仿真软件向采用面向对象方法的方向发展	(110)
4.5.7 仿真软件向大量采用网络技术的方向发展	(111)
4.5.8 仿真软件向大纵深、大范围的方向发展	(111)
4.5.9 仿真软件向大集成、大融合的方向发展	(111)
4.6 小结	(112)
思考与练习题	(112)
参考文献	(112)
第5章 离散事件系统仿真	(114)
5.1 基本概念	(114)
5.1.1 离散事件系统仿真的基本思想	(114)
5.1.2 描述离散事件系统模型的基本概念	(115)
5.1.3 描述离散事件系统仿真模型的基本概念	(117)
5.1.4 离散事件系统仿真程序的结构	(119)
5.2 事件推进策略	(120)
5.2.1 事件调度法(Event Scheduling)	(121)
5.2.2 活动扫描法(Activity Scanning)	(122)
5.2.3 进程交互法(Process Interaction)	(122)
5.3 离散事件系统仿真语言	(123)
5.3.1 离散事件系统仿真语言的分类	(124)
5.3.2 常见的离散事件系统仿真语言与软件	(125)
5.3.3 GPSS 仿真语言举例	(129)
思考与练习题	(131)
参考文献	(132)

第 6 章 计算机作战仿真	(133)
6.1 概述	(133)
6.1.1 思维模拟	(134)
6.1.2 沙盘模拟	(134)
6.1.3 实兵演习	(134)
6.1.4 计算机作战仿真	(134)
6.2 典型作战行动建模	(135)
6.2.1 作战仿真建模的途径与特点	(136)
6.2.2 射击过程的建模	(138)
6.2.3 机动过程的建模	(139)
6.2.4 目标观察过程的数学建模	(143)
6.3 兰切斯特方程	(147)
6.3.1 兰切斯特线性律与平方律方程	(148)
6.3.2 兰切斯特方程的军事含义	(155)
6.3.3 兰切斯特方程的发展	(157)
6.3.4 小结	(161)
6.4 计算机作战仿真在军事领域应用	(162)
6.4.1 训练仿真器	(163)
6.4.2 作战指挥模拟训练	(164)
6.4.3 作战概念评估与验证	(166)
6.4.4 基于仿真的采办	(167)
思考与练习题	(170)
参考文献	(170)
第 7 章 计算机仿真的发展	(171)
7.1 发展回顾	(171)
7.2 面向对象仿真	(174)
7.2.1 概述	(174)
7.2.2 面向对象的基本概念	(175)
7.2.3 面向对象仿真的基本方式	(177)
7.2.4 面向对象仿真软件	(181)
7.3 先进分布仿真	(184)
7.3.1 起因与发展	(184)

7.3.2	SIMNET	(186)
7.3.3	分布交互仿真 DIS	(187)
7.3.4	聚合级仿真协议 ALSP	(188)
7.3.5	高层体系结构 HLA	(189)
7.4	虚拟现实	(190)
7.4.1	虚拟现实的定义与特征	(190)
7.4.2	VR 系统的类型与组成	(192)
7.4.3	虚拟现实系统中的关键技术	(193)
7.5	定性仿真	(195)
7.5.1	定性仿真方法的产生和发展	(195)
7.5.2	定性仿真方法	(196)
7.5.3	定性仿真的应用	(199)
参考文献		(201)
附录 A L 变换与 L 反变换		(202)
附录 B Z 变换与 Z 反变换		(204)
附录 C 状态空间方程表示		(207)

第 1 章 导 论

计算机仿真是建立需研究系统的模型,进而在计算机上对模型进行实验研究的过程。计算机仿真方法是以计算机仿真为手段,通过在计算机上运行模型来再现系统的运动过程,从而认识系统规律的一种研究方法。计算机仿真以计算机作为实验的平台,其产生和发展与计算机的发明和计算机技术的发展紧密相关。

计算机仿真技术是以计算机科学、系统科学、控制理论和应用领域有关的专业技术为基础,以计算机为工具,利用系统模型对实际的或设想的系统进行分析与研究的一门新兴技术。现代计算机仿真技术综合集成了计算机、网络、图形图像、多媒体、软件工程、信息处理、自动控制等多个高新技术领域的知识,是系统分析与研究的重要手段。计算机仿真技术具有良好的可控性、无破坏性、安全、可靠、不受外界条件(如气象条件和场地空域)的限制、可多次重复、高效和经济性等特点,近年来发展十分迅速,已经成为当今众多领域技术进步所依托的一种基本手段。

计算机仿真技术经历了模拟计算机仿真、混合计算机仿真、专用数字计算机仿真、通用数字计算机仿真等阶段,目前已进入基于网络的分布仿真阶段。

计算机仿真在各种工程领域和非工程领域中有许多成功应用的范例,其成效十分显著,影响也很大。

在宇航工业中,有著名的“阿波罗”登月仿真系统。该系统包括混合计算机、运动仿真器、月球仿真器、驾驶舱、视景系统等,可实现在计算机上预先对登月计划进行分析、设计与检验,同时还可对宇航员进行仿真操作训练,从而大大降低了实际登月的风险系数。

在非工程领域,著名的例子有罗马俱乐部建立的“世界模型”仿真系统。该系统选择五个能影响世界未来发展的重要因素,即人口增长、工业发展、环境污染、资源消耗和食品供应,来预测世界未来发展的趋势并据此提出了“零增长方案”。尽管该模型仿真的最后结果引起了世界范围的广泛争论,但其研究方法却具有开创性。我国科学家建立的中国人口模型仿真系统也获得了很大的成功,在国内外学术界颇有影响。该仿真系统成功地预测了未来一百年我国人口发展的趋势,为制定科学的人口政策提供了理论依据。

计算机仿真方法的成功应用,大大提高了这一方法在科学研究和技术开发中的地位,引起科学界和工业界的广泛关注与重视。人们逐步认识到,系统仿真已成为继理论分析和实物实验(或演习)之后,认识客观世界规律性的强有力的手段。它可以把复杂系统的运行过程放在实验室中进行,在辅助决策、计划优化、管理调度、方案比较、规划制订、军事训练、投资风险分析、辅助设计以及谈判策略确定等方面均有巨大的应用潜力。

计算机仿真是系统仿真学科的重要分支。本章首先讨论系统仿真涉及的三个基本概念和系统仿真的分类,在此基础上重点分析计算机仿真的定义、特点、作用与步骤,最后简要介绍系统仿真技术的应用。

1.1 系统仿真的基本概念

对“仿真”一词的含义,人们有不同的理解。一般认为仿真就是对系统模型的实验研究,对计算机仿真而言,就是程序的运行。该程序表示一个抽象的模型,用以研究真实系统中的一些特征。

系统、模型和仿真是系统仿真学科首先要关注的三个基本概念。

1.1.1 系统

仿真技术应用的对象是系统。系统通常定义为具有一定功能,按某种规律相互联系又相互作用着的对象之间的有机组合。仿真所关注的系统是广义的,它泛指人类社会和自然界的一切存在、现象与过程。

系统可分为生命与非生命系统、工程与非工程系统等。如电气、机械、机电、水力、声学等属于工程系统;经济、社会、交通等属非工程系统。

一般认为,系统是真实世界的一部分,是几个相互作用的分系统的集合。在这个描述中,隐含了递归的概念:一个系统由若干个分系统组成,而每一个分系统又是另一些系统的集合,如此直至无穷。若用分解的观点来看待系统,则集合论是研究系统的最好工具。系统的定义符合建立抽象集合结构的要求。这个集合结构总是可以用若干个同类结构的集合来替换,从而不断地使其具体化。

任何系统的研究都需要关注三个方面的内容,即实体、属性和活动:

- (1) 实体——组成系统的具体对象;
- (2) 属性——实体所具有的每一项有效特性(状态和参数);
- (3) 活动——系统内对象随时间推移而发生的状态变化。

由于组成系统的实体之间相互作用而引起的实体属性变化,通常用“状态”的概念来描述。研究系统,主要就是研究系统状态的改变,即系统的进展或演

化。

从边界的因素来看,系统的活动可分为:

- (1) 内生活动——系统内部实体相互作用产生的活动;
- (2) 外生活动——系统外部环境影响产生的活动。

仅考虑内生活动的系统称为封闭系统;既考虑内生活动又考虑外生活动的系统称为开放系统。

任何系统都具有一定的结构,没有无结构的系统。作为系统论的一个基本范畴的结构,指的是系统内部各组成实体之间在空间(包括数量比例)或时间方面的有机联系与相互作用的方式或顺序。系统有序性愈高,结构愈严密。所以,任何系统所具有的整体性,都是在一定结构基础上的整体性,仅有实体,还不能组成系统,必须在实体的基础上,以某种方式和关系相互作用,才能形成系统结构。

系统与外部环境相互联系和作用过程的秩序和能力称为系统的功能。系统功能体现了一个系统与外部环境之间的物质、能量和信息的输入与输出的变换关系。系统的结构与功能是一对不可分割的范畴,系统的结构是完成系统功能的基础。结构与功能分别说明了系统的内部作用和外部作用。功能是一个过程,它反映了系统对外界作用的能力,是由系统的结构所决定,由系统整体的运动表现出来的。

对于一个飞机自动驾驶系统,如图 1.1 所示,系统的实体是机体、陀螺仪及控制器。它的属性是航向、速度、陀螺仪及控制器特性等。它的活动则是机体对控制器的响应等。对于一个工厂系统,如图 1.2 所示,系统的实体是部门、原料、定单、产品。它的属性是原料类型、定单数量、各部门的设备数量。它的活动则是各个部门的生产过程。

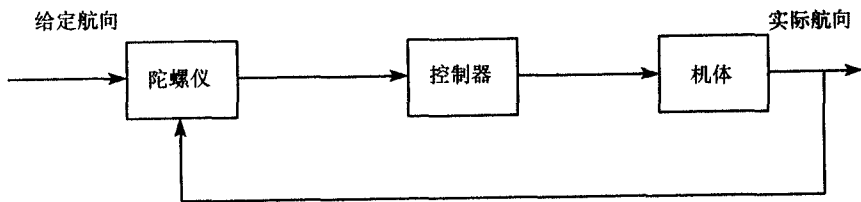


图 1.1 飞机自动驾驶系统

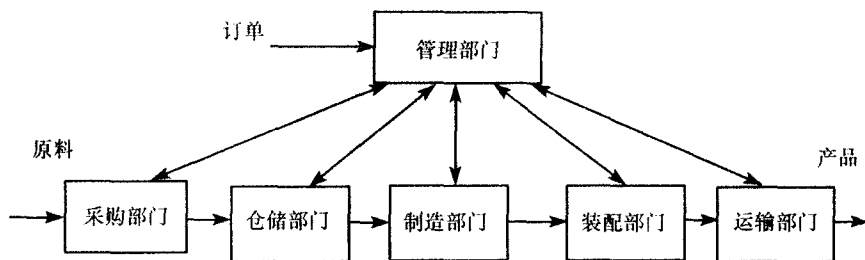


图 1.2 工厂系统

研究系统需要研究系统的实体、属性和它的活动,还需要研究系统的环境。环境是指对系统的活动结果产生影响的外界因素。自然界的一切事物都存在着相互联系和相互影响,而系统是在外界因素不断变化的环境中产生活动的,因此,环境因素是必须予以考虑的。应该注意到系统与环境的边界是不确定的,它们随研究的目的不同而异。例如,对于工厂系统的订货问题,既可将其视为环境对生产产生的影响,也可将销售纳入系统作为系统内的活动来考虑。

应注意的是,一次具体的研究不需要、也不太可能关注系统的所有实体、属性、活动及环境,而只需要关注与研究的目的有关的部分。

对于作为仿真对象的系统,有两个基本的假设,一是对于研究的目的,它至少是“部分可分解”的;另一个假设是状态的存在,即状态捕获了系统过去的历史状态以便在已知的输入作用下算出今后的状态。

1.1.2 模型

模型一词源于拉丁文 *Modulus*,意思是尺度、样本、标准。在科学方法论中,则把模型界定为人们为了特定的研究目的而对认识对象所做的简化描述。原型则是与模型相应的被认识对象。就模型与原型的关系而言,可以把模型看做是原型物质的或观念上的类似物。据此可以把模型分为实物模型和抽象模型两大类。实物模型是以某种程度上相似的实物去再现原型。它既可以是人工构造的,也可以是从自然界获取的,比如地球仪、船模、动植物标本等。抽象模型则是原型客体在人们思想中理想化、纯化的抽象性再现,如理想气体模型、原子的行星模型、分子的空间结构模型等。

模型方法是通过研究模型来揭示原型的形态、特征和本质的方法。在当代科学研究中,模型方法的重要性越来越为人们所认识,被看做是科学研究方法的核心。

要进行仿真,首先要寻找一个实际系统的“替身”,这个“替身”就是模型。它

不是原型的复现,而是按研究的侧面或实际需要进行了简化提炼,以利于研究者抓住问题的本质或主要矛盾。这种研究特别对预测问题,以及因种种原因不可能在原型系统上进行实验的问题尤为重要。

1.1.2.1 建模活动

实际上,科学研究的绝大部分工作就是建立形式化的模型。科学家企图通过观察和实验,建立抽象的表示方法和定律。这些方法和定律是对现实世界中已被证明的假设进行形式化。这些“形式化”模型,只有在概括了实际系统的基本性质时才有可能被用来进行推论、分析、设计,从而在某种意义上给人们提供控制能力。

人与外部世界的相互作用,基本上是由认识世界和利用、改造世界两个不同的步骤组成的。这就是:

(1) 认识和建立“形式化”模型。人类通过建立一种抽象的表示方法,来获得对自然的充分理解,产生一个现实世界的模型。这个阶段是面向科学的。

(2) 分析和利用“形式化”模型。科学研究的目的是按照人类的意志,对现实世界进行控制。这一步骤显然具有工程的特点。

人在抽象思维上的功能,使它有能力进行模式识别,进行综合、计算和记忆等。人所用的建模方法是各种能力特殊结合的结果。但是,对于建模活动,人的能力是有限的。人的局限性对建模研究的发展产生影响,这就促使人们有必要去探求一些有益于弥补这些局限性的方法和工具。例如,测量仪器可以扩展人的传感能力。特别是计算机,它可在模型建立和模型利用方面发挥重要的作用。计算机仿真是计算机在这方面作用的重要表现。

模型集中反映了系统的某些方面的信息。它是对相应的真实对象和真实关系中那些有用的和令人感兴趣的特性的抽象化。因此,模型描述可视为是对现实世界中的物体或过程相关的信息进行形式化的结果。

模型是对系统某些本质方面的描述,可采用各种可用的形式提供被研究系统的信息。模型在所研究系统的某一侧面具有与系统相似的数学描述或物理描述。

应该着重强调的是,模型是按研究目的的实际需要和侧面,寻找一个便于进行系统研究的“替身”。因此,在较复杂的情况下,对于由许多实体组成的系统,由于研究目的不同,对同一个系统可以产生相应于不同层次的多种模型,这就是多面性。例如:

(1) 一些模型反映了整个实际系统的部分属性,而另一些模型则提供了系统更全面的描述;

(2) 一些模型包括了实际系统的全部组成实体,另一些模型则是强调了系

统的某些侧面,而忽略了另外一些方面,从而只包括实际系统的部分组成实体。

这些现象表明,根据系统研究的实际需要,可对模型进行粗化(简化)或精化(详细化),也可以对模型进行分解或组合。

模型作为系统的原型在研究时的“替身”,在选择模型时,要以便于达到研究的目的为前提。虽然对特定的建模目标与模型构成之间的关系知道得很少,但对模型的描述经常可以采用下述一些原则:

(1) 相似性

模型与所研究系统在属性上具有相似的特性和变化规律,这就是“原型”与“替身”之间具有相似的物理属性或数学描述。

(2) 切题性

模型只应该针对与研究目的有关的方面,而不是系统的一切方面。也就是对于一个系统,其模型不是惟一的,模型结构的选择应针对研究目的。

(3) 吻合性

选择的模型结构,应尽可能对所利用的数据作合理的描述。通常,其实验数据应尽可能由模型来解释。

(4) 可辨识性

模型结构必须选择可辨识的形式。若一个结构具有无法估计的参数,则此结构就没有实用价值。

(5) 简单化

从实用的观点来看,由于在模型的建立过程中,忽略了一些次要因素和某些非可测变量的影响,因此,实际上的模型已是一个被简化了的近似模型。一般而言,在实用的前提下,模型越简单越好。

(6) 综合精度

它是模型框架、结构和参数集合等项精度的一种综合指标。若有限的信息限制了模型的精度,最有效的模型就应是各方面精度的平衡和折衷。

若上述原则间出现冲突,则要寻求合理的折衷,但特定的折衷方案都依赖于模型的对象,因而没有固定的程式。

1.1.2.2 模型描述的层次

模型可以在不同的抽象层次上来描述一个系统。一般来讲,存在着以下三种层次的描述:

(1) 行为层次

在这个层次上描述系统,是将它看成一个黑盒,并且对它施加一个输入信号,然后对它的输出信号进行测量与记录。为此,至少需要一个“时间基”,它一般是一个实数的区间(连续时间),或者是一个整数的区间(离散时间)。一个基