

# 系统仿真技术及其发展

文传源                      王正中                      熊光楞  
(北京航空学院)      (北京信息控制研究所)      (清华大学)

## 摘 要

本文讨论了仿真技术的定义、分类、功效及仿真模型、仿真实验、仿真工具、仿真方法和仿真应用,同时展望了仿真技术的发展。

“仿真”一词译自西文Simulation,另一个曾用的译名是“模拟”。1961年G.W. MORGENTHLER首次对仿真一词作了技术性的解释,认为“仿真”意指在实际系统尚不存在的情况下,对于系统或活动本质的复现。近二十年来,仿真技术的发展使人的认识与概念得以深化。这种演变过程在A. Alan, B. Pritsker写的《仿真定义的汇编》一文中得到了集中反映。目前,比较流行于工程技术界的技术定义是:仿真是通过系统模型的实验,研究一个存在的或设计中的系统<sup>[3, 21]</sup>。

现代仿真技术的发展是与控制工程、系统工程及计算技术的发展密切联系的。正是控制工程和系统工程的发展促进了仿真技术的广泛应用,同时计算机的出现以及计算技术的发展,为仿真技术提供了强有力的手段和工具。由于在计算机上建立系统的数学模型并运转和实验这个模型是十分经济、方便和灵活的,因而计算机仿真在仿真中越来越占有重要的地位。

第二次世界大战末期,飞行控制动力学系统的研究促进了模拟仿真技术的发展,1947年研制成第一台通用电子模拟计算机。五十年代末期至六十年代,由于洲际导弹和宇宙飞船的姿态及轨道控制动力学研究,促使了混合仿真技术的发展,1958年第一台混合计算系统用于洲际导弹的仿真,1964年生产出第一台商用混合计算机系统。六十年代,阿波罗登月计划的成功使系统工程的研究受到重视。七十年代,系统工程被运用于社会、经济、生态、管理等非工程系统的研究和预测,促进了系统动力学及离散事件系统仿真技术的发展。由于微电子学和计算技术的飞速发展,数字计算机运算速度的提高和价格的下降,使得连续系统数字仿真技术得到了推广,研制出大量的仿真程序包和仿真语言。同时,基于并行处理原理的专用全数字仿真计算机系统的研制也取得了显著成果<sup>[2, 4, 6, 7]</sup>。

仿真技术得以发展的主要原因是由于它所带来的社会效益。使用仿真技术可以降低系统的研制成本;提高系统实验、调试及训练过程中的安全性,这对于类似航空、航天、反应堆、潜艇等系统是十分重要的。对于社会、经济等非工程领域,不能直接进行实验,所以仿真技术则成为研究的必要手段。

仿真可以按不同原则分类：1) 按所用模型的类型（物理模型、数学模型、物理-数学模型）分为：全物理仿真、计算机仿真、半实物仿真；2) 按所用计算机类型（模拟计算机、数字计算机、混合计算机）分为：模拟仿真、数字仿真及混合仿真；3) 按仿真对象中的信号流（连续的、离散的）分为连续系统仿真和离散系统仿真；4) 按仿真时间与实际时间的比例关系分为：实时仿真、超实时仿真、亚实时仿真；5) 仿真还可以按对象的性质分类，如：宇宙飞船；化工系统；社会、经济系统仿真等。

### 一、仿真模型与仿真实验

建立模型是仿真的第一步，也是十分重要的一步。仿真模型可以是一个物理模型，也可以是一个数学模型。实际上，只有在工程系统（技术系统）中才可能使用物理模型。如风洞实验中的比例模型，属于静态物理模型。又如电网仿真中的相似模型，属于动态物理模型。对于计算机仿真，需要在计算机上建立起对象的数学模型。一般来说，系统的数学模型都必须改写成适合于计算机处理的形式，称为仿真数学模型。系统数学模型是系统的一次近似模型，仿真数学模型则是系统的二次近似模型。

建立计算机模型（即仿真数学模型）很重要的一点是要具有实验的性质，即模型与对象的功能及参数之间所具有的相似性和对应性。这种相似关系和对应关系不应被数学演算过程所掩盖，否则就仅仅是一次数值求解。

仿真模型可以按图 1 所示的方法分类。

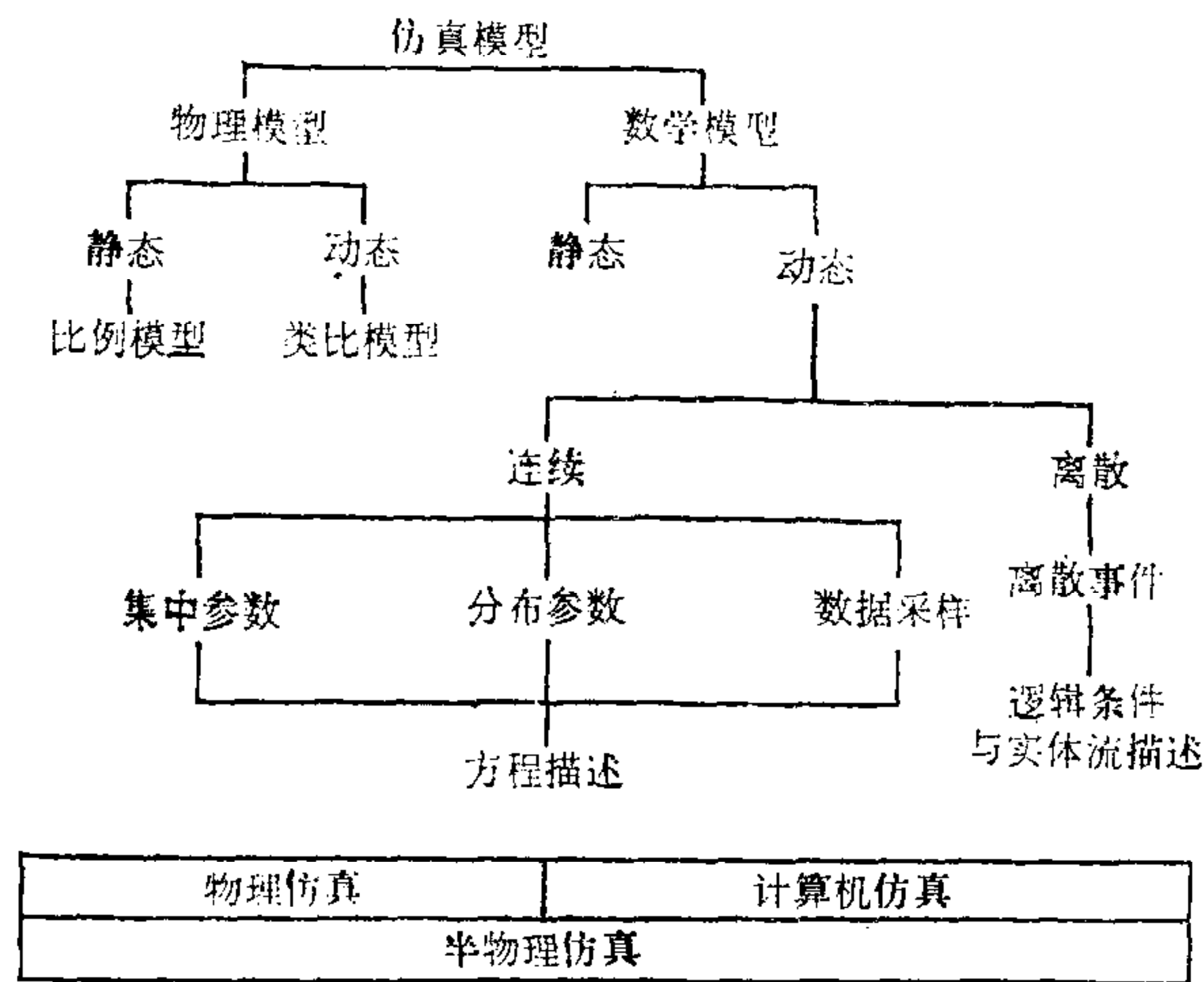


图 1 仿真模型分类

仿真基本上是一种通过实验求解问题的技术。通过仿真实验，了解包含在系统中变量之间的关系，观测系统模型变量变化的全过程。为了对仿真模型进行深入研究和优化结果，还必须进行多次运行、参数优化等仿真研究。因此，良好的人-机交互性是系统仿真的重要特性。图 2 给出仿真实验的一般过程。

对于工程系统仿真，在系统的设计或分析阶段，往往进行计算机仿真，它提供了修改、更换模型的灵活性和经济性。而在研制阶段，常常用已研制出的实际部件或子系统代替部分

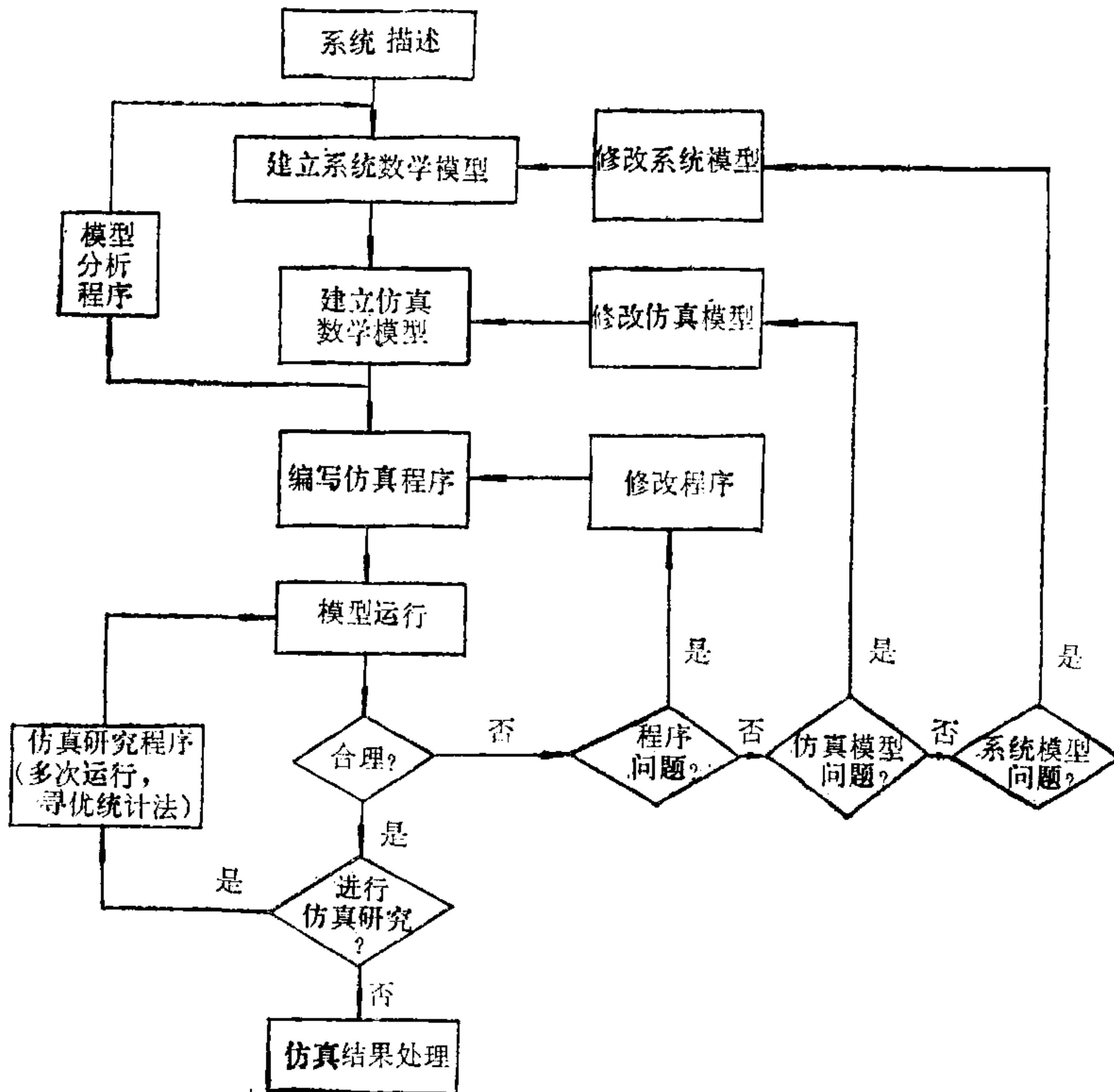


图 2 仿真实验的一般过程

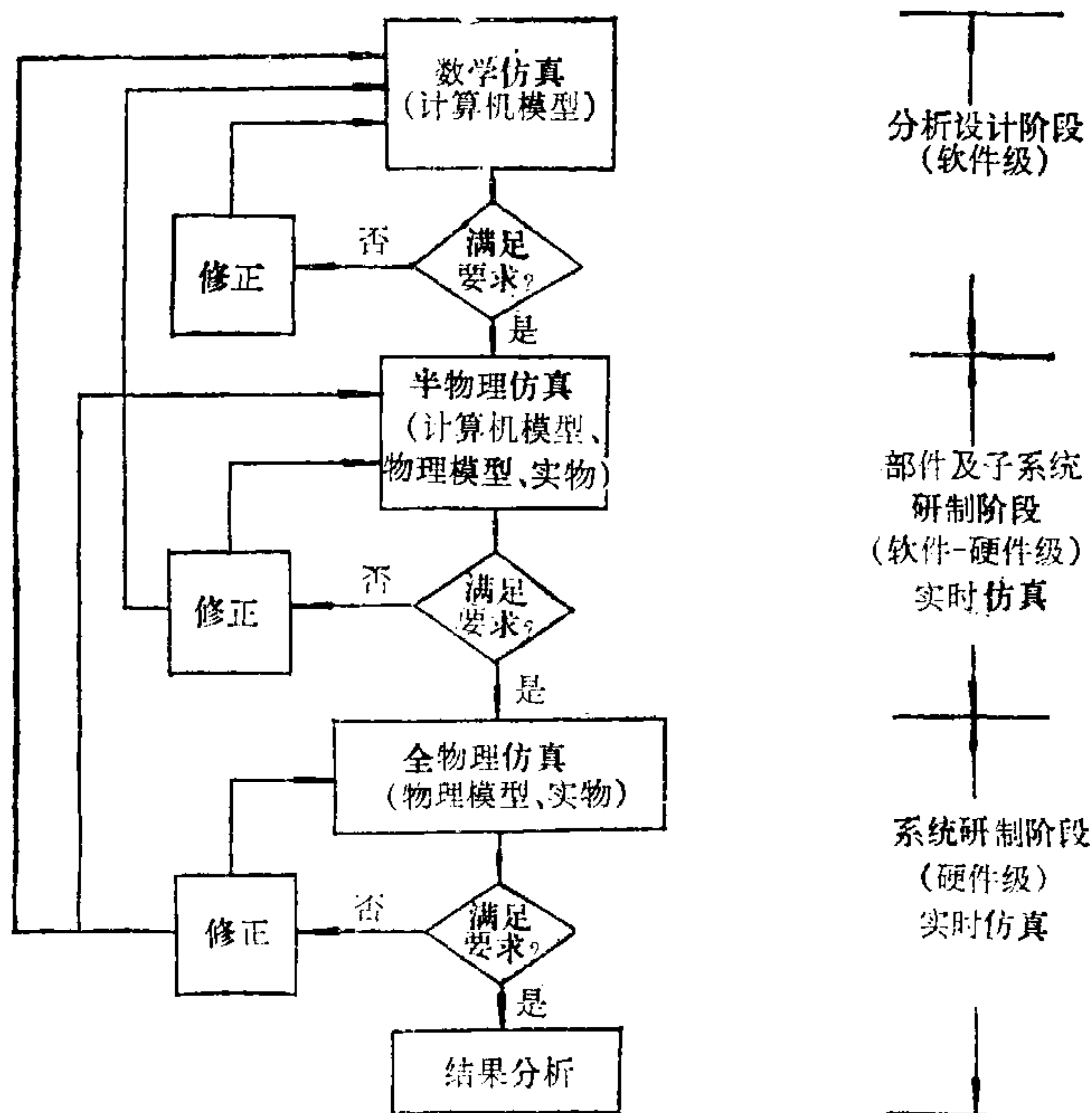


图 3 仿真实验分级

计算机模型,以提高仿真实验的可信度。并用以对实际部件或子系统进行功能测试,即进行半实物仿真实验。少数情况下,为了全系统的功能性研究还可以进行全实物仿真实验,这时原有的计算机模型已经全部被实物和物理模型所代替,一般来说,全实物仿真有较高的可信度,但价格昂贵。图3给出了数学仿真(即计算机仿真)、半实物仿真、全实物仿真在工程系统研究中各个阶段的分级和关系。在半实物仿真和全实物仿真中,由于实物接入仿真回路而具有实时操作的性质,因此也被称为实时仿真<sup>[12, 28]</sup>。

对于社会、经济等系统,通过仿真实验可以建立或完善系统模型。这些系统往往只知道系统的“输入”和“输出”,而不知道系统的内部结构,即所谓的“黑盒子”。实际上由于某种先验知识,可以给出一个假定的概念模型,然后利用这个概念模型进行仿真试验,并在实验中按照一定的方法修正模型的参数和结构,使之最后满足“输入”与“输出”的关系。其结果将是建立起与系统特性相似的数学模型<sup>[30]</sup>。

## 二、仿真工具

### 1. 仿真计算机

用于仿真的计算机基本可以分三类:模拟计算机、数字计算机及混合计算机。其中数字计算机也可分为通用数字计算机和专用数字计算机。

电子模拟计算机出现于四十年代末期,曾被广泛应用。模拟计算机在仿真过程中是并行工作的,输出结果连续变化,有很高的运算速度,适合于连续系统实时仿真。

早期的数字计算机,运算速度低、交互性差,限制了在仿真中的应用。但现代的数字计算机已具有很高的运算速度,某些专用数字计算机的速度更高,已能满足大部分系统的实时仿真要求。同时,由于软件、接口和终端技术的发展,人-机交互能力也有很大提高,因此,数字计算机已经成为现代仿真的主要计算工具<sup>[4, 12]</sup>。

人们为了提高数字计算机的处理速度,以满足实时仿真的要求,研制了许多种基于并行处理原理的专用数字计算机,其中主要的有以数值积分为基础的数字微分分析器DDA;以并行流水线处理机为基础的外围阵列处理机PAP。1980年配置了专门仿真软件的几种PAP系统已被推广使用。典型的系统如ADI公司的SYSTEM10-PLUS;FPS公司的AP120B。由于微处理机的大规模生产和价格下降,近几年来,对于多微处理机全并行仿真计算机的研究也引起了广泛的重视和兴趣。正在研究中的系统如G471,其微处理机阵列部件的数量可从16个到1024个,处理能力可达到64—10000MIPS。此外以超大规模集成电路技术为基础的微型外围阵列处理机MPAP,如TI-TM8320及INTEL-2920的研制是值得注意的。<sup>[11, 16-19]</sup>

混合计算机是在六十年代发展起来的一种仿真工具。顾名思义,混合计算机是把模拟计算机和数字计算机联合在一起工作,以充分发挥模拟计算机的高速度和数字计算机的高精度、存贮能力大和具有逻辑功能的优点。现代混合计算机已发展成为一种混合多处理机系统。1984年EAI推出了SIMSTAR系统,它包含了一台超小型计算机、多台外围阵列处理机PAP、几台具有自动编排题目能力的模拟处理机。在各类处理机之间通过一个混合分时接口完成数据和控制的通讯。这种系统价格昂贵,但处理能力很强,因此只有在一些模型复杂、速度要求严格的系统仿真中使用<sup>[14, 26]</sup>。

由于计算技术的发展，现代仿真计算机系统的可选类型分布在一个相当宽的型谱上，如图 4 所示。

微型 小型 计算机	$10^4-10^5$	0.5—2	•FORTRAN •高级仿真软件 MICRODARE EARLYDESIRE	•APPLE •DEC LSI •IBM PC
超级小型 计算机	$10^4-10^6$	10—20	•FORTRAN •CSMP, CSSL •GASP	•DEC VAX •GOULD SEL
超级小型计算机 + PAP	$10^4-10^7$	20—30	•APPRTRAN •MPSIO, ADSIM •仿真程序库	•FPS AP •ADI SYSTEM10 •CSPI MAP
混合多处理机 超级小型机 + PAP + ANP	$10^4-10^8$	300—400	•FORTRAN •自动编排系统 •STARTRAN	•FAI SIMSTAR
仿真计算机系统	处理能力 (操作次数/秒)	价格 (万美元)	编程能力	代表机型

图 4 现代仿真计算机系统型谱

## 2. 仿真软件

五十年代末期和六十年代初期，由于数字计算机仿真的发展导致仿真软件的研究。目前，为通用数字计算机研制的仿真软件已有许多种，其中有代表性的有：

- 通用计算机连续系统仿真语言 MIMIC, CSMP, CSSL, DSL/VS, ACSL<sup>[1, 9]</sup> 及用于微型小型机的连续系统仿真语言 MICRODARE 及 EARLYDESIRE<sup>[13, 20]</sup>。
- 离散事件系统仿真语言 GPSS, SIMSCRIPT<sup>[22, 28]</sup>。
- 连续/离散系统仿真语言 GASP, SLAM<sup>[10]</sup>。
- 系统动力学仿真语言 DYNAMO<sup>[28]</sup>。

此外还有为混合计算机仿真发展的专用软件，如 HYTRAN, ECSSL, STARTRAN<sup>[14, 16]</sup>；为全数字并行处理系统 PAP 系统发展的专用仿真软件 MPS 及 ADSIM<sup>[16]</sup>。

近几年来，仿真软件发展的趋势是：

1) 以工程数据库为核心，将环境软件及应用软件组装成一体化的仿真系统软件。如 PRISKER 发展的 TESS 系统，以数据库为核心，把建模、仿真、分析等程序模块组装在一起，用以支持 SLAM 语言<sup>[25]</sup>。

2) 将仿真技术与人工智能技术相结合，发展仿真或辅助控制系统设计的专家系统，如 C. GOME 研究的用于随机控制系统设计及分析的专家系统，系统包括建模、仿真、分析三个知识库和问题求解推理软件。在人-机交互方面采用了半自然语言的智能接口软件<sup>[81, 82]</sup>。

## 3. 专用物理仿真设备

专用的物理仿真设备有运动仿真器、目标仿真器、负载仿真器、环境仿真器等。用以和计算机、实物及接口设备组成复杂的仿真系统。专用物理设备与对象之间具有物理特性上的相似性，因此一般具有专用性质。

三轴飞行运动转台是飞行仿真中常见的专用物理设备。采用液压伺服控制的飞行转台具有高的动力学特性。如用于导弹仿真中的液压伺服控制飞行转台，负载为 50 磅，其俯仰及偏

航加速度可达 $46000$ 度/秒<sup>2</sup>。滚动加速度可达 $200000$ 度/秒<sup>2</sup>。采用机电伺服控制的飞行转台应用也很广泛,如用于宇宙飞船仿真的三轴机电式飞行转台,负载为 $250$ 磅,三个轴的加速度为 $160$ 度/秒。三轴飞行转台的定位精度约在 $\pm 0.05$ 至 $\pm 0.1$ 毫弧度。为了提高精度,采用了数字控制和混合控制技术。

用于飞行训练仿真器的运动仿真设备是三自由度或六自由度运动系统,由三个协同动作的液压作动筒组成,可以提供俯仰、倾侧、偏航三个姿态运动的感觉及纵向、侧向、升降线加速度的感觉。为了扩大加速度的变化范围和持续时间,发展了大行程运动系统,升降行程达 $20$ 米;侧向行程达 $6$ 米;纵向行程达 $1$ 米。

在卫星仿真中,利用气浮轴承支承的单轴或三轴气浮台,可复现卫星在轨道飞行时的零重力及微弱扰动力矩的状态,用于姿态控制全物理仿真。气浮台运动仿真器的主要特性包括负载能力、转动角度、动态平衡力矩、扰动力矩、测量精度等。在进行同步轨道卫星运动仿真时,要求动态平衡力矩及扰动力矩量级小于 $10^{-5}$ 牛顿米,负载能力大于 $500-1000$ 公斤,但技术上不易实现,需要采用特殊的仿真技术来解决。

目标及环境仿真设备在系统仿真中也很重要,如导弹仿真中的射频目标仿真器、红外目标仿真器、光学目标仿真器;卫星仿真的太阳目标仿真器,地球目标仿真器,各种驾驶训练仿真器(如飞机、船舶、坦克、汽车等)中的视景仿真设备。一般的视景仿真常采用比例模型和光学闭路电视系统实现,现在则发展为计算机成像技术。由于每种专用仿真设备都涉及许多专门的技术,只能在专门的文章中再叙述<sup>[23, 33-35]</sup>。

### 三、仿真方法

仿真方法是指在计算机上建立仿真模型及进行仿真研究的方法。可以分为两大类,即连续动态系统的仿真方法和离散(事件)系统的仿真方法。

连续动态系统数学模型一般是以微分方程描述的。在模拟计算机仿真中,仿真方法主要是建立模型框图、编写机器方程和进行幅值及时间比例尺变换。在数字仿真中连续系统的仿真方法主要指数值积分方法。传统的数值积分方法为欧拉法、预测校正法、龙格库塔法、阿达姆斯法等。其基本原理都是把微分方程转换为差分方程求解。现代数值积分方法的塔斯汀法及状态转移法是直接从传递函数及状态方程导出离散化方程,因此也称为离散相似法。在实时仿真的情况下,由于涉及对输入实时变量采样值的计算,不是所有的积分公式都能适用,因此又发展了各种类型的实时积分方法,如实时预测校正法和实时龙格库塔法等。在许多系统(如电力网、核反应堆、血液循环等)的仿真中,常常遇到病态系统,因此也发展了用于病态系统的积分方法,其多数都属于隐式方法,如吉尔法<sup>[12, 30]</sup>。

离散(事件)系统一般是一个排队系统,仿真所研究的问题是关于拥挤现象和如何提供服务。对于离散(事件)系统的描述包括:到达模型、服务模型及排队规则三个部分。一般说来,到达模型和服务模型是用一组不同概率分布的随机数来描述的,而包括排队模型在内的系统的活动则由一个运动程序来描述。因此离散(事件)系统仿真方法的基础,是产生不同的概率分布的随机数和建立描述系统活动的程序系统。因为具有均匀分布的随机数可以用来产生其它概率分布的随机数,因而是十分重要的。已经有许多种产生均匀随机数的方法,其中得到最广泛应用的是同余法。对于系统活动的描述建模有两种不同的方法,一种是面向

过程的，另一种是面向事件的，因而它们的程序系统也不一样<sup>[22, 30]</sup>。

还有一些用于仿真的特殊方法，如蒙特卡罗法，它是一种具有随机数的实验采样方法，常常用于多变量的积分中。

仿真的工作不仅在于建立仿真模型，而且还需要进行仿真实验。这种实验的方法称为仿真研究方法。它包括求解的多次运行、交互寻优及统计实验等。

#### 四、仿真应用与效益

五十年代和六十年代仿真应用的主要领域限制在航空、空间、电力、化工、工业过程控制等工程领域。其经济效益已是十分显著。在航空工业，大型客机的设计与研制由于采用仿真技术而使研制周期缩短20%。利用训练仿真器训练飞行员，每年可节约汽油近十吨，飞行次数减少5%，费用减少30%。在电力工业，采用仿真系统对核电站进行调试，维护及排除故障，一年即可收回仿真系统的成本，总效益约为投资总额的10%。在空间工业，采用仿真实验代替实弹试验，使得实弹试验的次数减少80%，从而大大降低了成本。

七十年代至八十年代，仿真技术不仅应用于传统的工程领域，而且日益广泛地应用于社会、经济、生物等非工程领域。如在交通控制、城市规划、资源利用、环境污染、市场预测、生产管理、人口控制等方面都是得益甚多的领域。目前，随着系统规模的增大和日趋复杂，仿真系统的规模和复杂程度也在增加。如美国陆军高级仿真中心属于目前最高级、最完备、规模最大的导弹仿真中心之一。仿真中心由四大部分组成：射频仿真系统；红外仿真系统；光电仿真系统；ASC混合计算机群。仿真中心设计起始于1971年，于1975年投入使用，投资近亿美元。其中仅射频仿真系统一项，就耗资4,500万美元。混合计算机群的处理能力达到每秒500万至10亿次的操作<sup>[3, 4]</sup>。

随着仿真模型和实验系统规模及复杂程度的增长，使模型和实验系统的有效性及可置信度的研究显得十分重要。同时，建立适用的基准对系统进行评估的工作也受到重视<sup>[15]</sup>。

#### 结 束 语

从1946年出现第一台电子模拟计算机，1949年出现第一台飞行仿真器以来，系统仿真技术已经显示出巨大的社会经济效益，它作为一门实验科学，形成了自己独有的技术内容，包括：仿真模型建立和实验方法学；仿真工具；仿真计算机；仿真软件和仿真方法等。近几年来，仿真技术发展的一个特点是工具的改进和应用领域的扩大，其中值得注意的动向是：

(1) 并行处理原理，包括PAP技术，多微处理机并行处理技术将成为新一代仿真计算机的主流，同时仿真计算机将根据应用的不同要求分布在一个很宽的型谱和频谱上。

(2) 仿真软件的发展，将以工程数据库为核心，向一体化的系统仿真软件发展。

(3) 仿真技术与人工智能技术的结合将产生第一代具有专家系统功能的仿真软件。

(4) 随着仿真应用领域扩大到社会、经济、生物等非工程领域，随着系统的规模和复杂程度的增长，对模型和仿真系统的有效性、可置信度的研究将会受到重视。

## 参 考 文 献

- (1) Milchell, E.L. Advanced Continuous Simulation Language ACSL Simulation **26** (1976) .No. 3.
- (2) Karplus, W. J., The Spectrum of Mathematical Modeling and System Simulation 8th AICA Congress 1976.
- (3) Crosbie, R.E., Simulation is it Worth it?, 8th AICA Congress 1976.
- (4) Howe, R. M., Tools for Continuous System Simulation; Hardware and Software, 8th AICA Congress 1976.
- (5) Kleijnen, J. P. C., Discrete Simulation; Type, Applications and Problems, 8th AICA Congress 1976.
- (6) Rideout, V. C., Simulation in Life Sciences, 8th AICA Congress 1976.
- (7) Tomovic, Control of Large System, Proc. of the IMACS Symposium, 1978.
- (8) PAVLIK, Interdependence of Process Model and Simulation Tool, Proc. of the IMACS Symposium 1978.
- (9) Hay, J. L., Interactive Simulation on Minicomputers Part 1-ISIS, a CSSL Language, Simulation **31** (1978) , No. 1.
- (10) Pegden, C. D., SLAM; Simulation Language for Alternative Modeling, Simulation, **33** (1979) No. 1.
- (11) Koyama, S., and Miura, R., An All-Digital Dynamical System Simulator Using Parallel Processing, IFAC 7th Triennial World Congress, 1978.
- (12) Korn, G. A., Digital Continuous-system Simulation, prentice-Hall, 1978.
- (13) Korn, G. A., Early Desire; A Floating-point Equation Language Simulation System for Minicomputer and Microcomputer, Simulation, May 1982.
- (14) Landauer, J. Paul., Using a Multiprocessing Hybrid Computer for Flight Simulation, Simulation, July 1982.
- (15) Hidinger, R. M., Digital Computer Benchmarks of a Continuous System Simulation, Simulation, July 1982.
- (16) Karplus, W., Peripheral Array Processors; Selection and Evaluation, Proc. of the Conference on PAP, Oct. 1982.
- (17) Kushner, E. J., Recent Developments in the Hardware and Software Provided by Floating Point System, Proc. of Conf. on PAP, Oct. 1982.



- [18] Borgioli, R.C., Real Time Performance Considerations in Array Processing, Proc. of Conf. on PAP, Oct. 1982.
- [19] Fadden, E. I., The System 10 Plus; A Major Advance in Scientific Computing, Proc. Conf. on PAP, Oct. 1982.
- [20] Korn, G. A., Microdare/Labner; Software for Instrumentation, Control and Simulation. American Laboratory, February 1983.
- [21] Alan, A., Pritesker, B., Compilation of definition of Simulation, Simulation, **33** (1979) No. 2.
- [22] Alan, A., Pritsker, B., Discrete Simulation; Methods and applications.
- [23] Amico, G.V., Clgmer, A.B., Simulator Technology-forty Years of Progress.
- [24] Koskossidis, D. A., Brennan, C. J., A Review of Simulation Techniques and Modelling, Proceedings of the 1984. SCS.
- [25] Standridge, C. R., Alan, A., Pritsker, B., IESS A Simulation System, Proceedings of the 1984 SCS.
- [26] Embley, R. W., The Technology Behind SIMSTAR, an All-New Simulation Multiprocessor, Proceedings of the 1984 SCS.
- [27] Ural, S., Microprocessor Simulation, Modeling and Simulation on Microcomputers; 1984, SCS.
- [28] Gordan, G., System Simulation, Prentice-Hall, Inc 1978.
- [29] Spriet, J. A., Vansteenkiste, G. C., Computer-aided Modelling and Simulation, Academic Press Inc, 1982.
- [30] Karplus, W. J., Advances in Modelling and Simulation, University of California, 1984.
- [31] Vansteenkiste, G. C., Simulation in AI-Environment, 11th IMACS World Congress, 1985.
- [32] Gomez, C., Towards an Expert System in Stochastic Control Proceedings of Sixth ICAOS, 1984.
- [33] Sisle, M. E., Hardware-in-the-loop Simulation for an Active Missile, Simulation, No. v. 1982.
- [34] Holmes, W. M., Large-Scale Air Defense Weapon Simulation in the US Army's Advanced Simulation Center, UKSC, April, 1978.
- [35] Pastrivk, H. L., Hardware-in-the-loop Simulation of a Digital Autopilot, Proce. SCS, 1978.

---

**SYSTEM SIMULATION TECHNIQUE AND ITS DEVELOPMENT**

Wen Chuanyuan

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Wang Zhengzhong

(Beijing Institute of Information and Control)

Xiong Guangleng

(Tsinghua University)

Abstract

In this paper various aspects of simulation technique are discussed, its definition, classification, function and simulation models, simulation experiments, simulation facility, simulation methodology as well as simulation applications. A prospect on the development of simulation technique is also presented.