

CHUAN BO DONG LI ZHUANG ZHI
FANG ZHEN JI SHU

船舶动力装置仿真技术

翁史烈 主编

上海交通大学出版社

11607.1
W68

350858

船舶动力装置仿真技术

翁史烈 主编



上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍船舶动力装置和动力机械的数字和数模混合计算机动态仿真的基本理论、基本知识及其应用。全书分成三篇。第一篇为数字计算机仿真,介绍了数值积分法仿真的算法、仿真程序的编制原理、典型程序和仿真语言;详细介绍离散相似法仿真的原理、算法、典型程序和函数发生等问题;又讨论了数字仿真的快速算法和并行处理。第二篇为数模混合仿真,系统讨论了模拟计算机和数模混合计算机的基本原理,运算部件和仿真方法;以某数模混合仿真系统为主要例子具体介绍了混合计算机的构成、原理、操作、应用软件和多变量函数发生器等。第三篇介绍了船用燃气轮机、柴油机及推进系统的数学模型、仿真方法、国内外应用情况以及仿真在动力机械其他方面应用的情况。本书在第一、二篇中都附有习题。在本书附录中有常见的数字仿真程序及其用法,DO960系统、软件结构及操作系统。本书可作为高等学校热动力机械与装置及其他类似专业本科生和研究生计算机仿真教材,也可供计算机、自动控制、动力机械与装置的工程技术人员参考。

2578/17



船舶动力装置仿真技术

出 版: 上海交通大学出版社
(淮海中路1984弄19号)
发 行: 新华书店上海发行所
印 刷: 常熟市印刷二厂
开 本: 787×1092(毫米) 1/16
印 张: 23
字 数: 568000
版 次: 1991年8月 第一版
印 次: 1991年8月 第一次
印 数: 1—840
科 目: 250—307
ISBN 7—313—00871—6/ U·66
定 价: 6.25元

前 言

计算机仿真是利用研究对象的数学模型在计算工具上对真实系统或设想中的系统进行性能测试的一门综合性技术。作为计算工具可以是模拟、混合或数字计算机,仿真技术相应地可分为模拟仿真、混合仿真和纯数字仿真。

80年代以来,由于采用了宽频带集成运算放大器、数字系数器、多变量函数发生器、高性能数/模、模/数转换器,混合仿真系统日趋完臻,这为混合仿真技术的发展提供了条件,而以并行处理原理为基础的专用数字仿真计算机的出现以及数字机技术普及与价格下降,使全数字仿真也得到迅速的发展。当前,国内外许多有名的学校、公司、研究中心,特别在航天航空、动力机械、核能领域中,都配备有大型的混合仿真系统或/和数字仿真系统。

仿真技术发展的主要原因可以归结于:

1. 热力系统日益复杂,试验消耗十分可观。仿真技术能使部分试验工作在计算机上完成,从而可以大幅度地降低试验消耗;

2. 热力系统和其数控软件的调试常常受到温度、速度、振动……等气动、热力、机械方面的限制,超过这些限制会导致运行上的不安全,甚至发生事故。在计算机上运用仿真技术来调试,可以确保安全;

3. 复杂对象的故障诊断系统的建立以及自适应控制的实施往往需要仿真技术的支持。

鉴于仿真技术应用的逐步广泛,科技工作者需要有一本结构比较完整、内容比较新颖的参考书。惜乎现在还没有一本既有数字仿真又有混合仿真、既有基本仿真原理又有硬件介绍、既有理论又有应用实例的书籍。本书作者企图在这方面作一些努力,结合多年来教学和研究工作的实践,以某些仿真系统为典型编写成本书。本书结构和内容由主编确定,其中第一篇着重介绍数字仿真的算法,仿真程序编制原理,典型程序的用法和仿真语言,由赵国光教授编写。第二篇着重介绍数模混合计算机的基本原理、运算部件和仿真方法,由黄善衡副教授编写,其中多变量函数发生器内容由张佰年副教授编写。第三篇为计算仿真在动力机械与装置中的应用,第七章由张佰年编写,第八章由赵国光编写,其中§8-2由吴寿民副教授编写,第九章由黄善衡编写。在编写过程中,主编审阅了全稿,对内容作了修改或提出了修改意见。全书最后由主编定稿。

本书由上海电力学院翁思义教授主审,并提出宝贵意见,借此表示衷心感谢。

仿真是一门新的学科,可供参考的资料不多。本书编写中不足之处,衷心希望得到广大读者的指正。

翁史烈 1990年7月

主要符号

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>A 状态矢量方程中的系数矩阵</p> <p>B 状态矢量方程中的输入矩阵</p> <p>C 状态矢量方程中的输出矩阵</p> <p>C_f 放大器反馈电容(μF)</p> <p>$C(s)$ 补偿器传递函数</p> <p>D 螺旋桨直径(m)</p> <p>E 基准电压(V)</p> <p>u_i 放大器输入电压(V)</p> <p>u_o 放大器输出电压(V)</p> <p>G 放大器开环增益, 质量流量(kg/s)</p> <p>g_c 柴油机循环喷油量(kg/(循环·每缸))</p> <p>g_e 柴油机有效耗油率(kg/kW·h)</p> <p>$G(s)$ 连续系统或环节的传递函数</p> <p>$G(z)$ 离散系统或环节的脉冲传递函数</p> <p>$H(s)$ 保持器传递函数</p> <p>I 转动惯量(kg·m²)</p> <p>K 常数, 系数, 传递系数, 增益, 状态变量(矢量)的导数值</p> <p>k 脉冲序列的序号</p> <p>M 扭矩(N·m)</p> <p>m 质量(kg)</p> <p>M_K 涡轮增压器的压气机阻力矩(N·m)</p> <p>M_T 涡轮增压器的涡轮扭矩(N·m)</p> <p>M_t 时间比例尺</p> <p>M_y 幅值比例尺</p> <p>N 功率(kW), 有效功(kJ)</p> <p>n 转速(r/min), 状态矢量的维数或系统的阶数</p> <p>p 压力(Pa), 螺旋桨有效推力(N)</p> <p>p_K 柴油机进气管空气压力(Pa)</p> <p>p_r 柴油机排气管废气压力(Pa)</p> <p>R 阻力(N)</p> <p>R_f 放大器反馈电阻(Ω)</p> <p>R_i 放大器输入电阻(Ω)</p> | <p>s 拉氏变换产生的算子</p> <p>T 计算步长(s), 温度(K), 推力(N)</p> <p>T_s 时间常数(s)</p> <p>T_P 螺旋桨敞水推力(N)</p> <p>t 仿真时间(s), 推力减额系数</p> <p>U 控制矢量</p> <p>u 控制变量, 电压(V)</p> <p>V 容积(m³)</p> <p>v 速度(m/s)</p> <p>v_s 船速(m/s)</p> <p>v_p 螺旋桨处水的进速(m/s)</p> <p>W 燃油量(kg/s)</p> <p>w 伴流系数</p> <p>X 状态矢量</p> <p>x 状态变量, 输入变量</p> <p>Y 输出矢量</p> <p>y 输出变量</p> <p>z Z变换产生的算子</p> <p>α 柴油机空气过量系数</p> <p>β 燃料系数</p> <p>γ 相角补偿系数</p> <p>ϵ 压力比</p> <p>λ 幅值补偿系数</p> <p>π 膨胀比</p> <p>ρ 密度(kg/m³)</p> <p>σ 总压恢复系数</p> <p>τ 模拟机机器变量(s), 温度比</p> <p>ω 角速度(rad/s)</p> <p>下角标:</p> <p>分轴燃气轮机</p> <p>1 压气机进口</p> <p>2 压气机出口, 燃烧室进口</p> <p>3 燃烧室出口, 高压涡轮进口</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

- 4 高压涡轮出口, 动力涡轮进口
 - 5 动力涡轮出口
- 三轴燃气轮机
- 1 低压压气机进口
 - 2 低压压气机出口, 高压压气机进口
 - 3 高压压气机出口, 燃烧室进口
 - 4 燃烧室出口, 高压涡轮进口
 - 5 高压涡轮出口, 低压涡轮进口
 - 6 低压涡轮出口, 动力涡轮进口
 - 7 动力涡轮出口

- H 高压
- L 低压
- T 涡轮, 船舶
- O 压气机
- P 动力, 螺旋桨, 负荷
- s 船舶
- in 进口
- out 出口
- max 最大值

目 录

概 论	1
第一篇 数字计算机仿真	9
第一章 数值积分法	10
§ 1-1 系统的状态矢量方程	10
§ 1-2 微分方程的单步数值解法和编程原理	13
§ 1-3 面向微分方程的仿真程序	22
§ 1-4 面向系统结构的仿真程序	26
§ 1-5 面向结构图的非线性系统仿真程序	29
§ 1-6 多步法仿真	35
§ 1-7 数字仿真语言	37
习 题	40
第二章 离散相似法	42
§ 2-1 离散相似法的初步概念	42
§ 2-2 采样过程和采样定理	44
§ 2-3 保持器和恢复过程	45
§ 2-4 Z 变换	49
§ 2-5 脉冲传递函数	53
§ 2-6 离散系统的 z 域分析	56
§ 2-7 相似于连续环节的脉冲传递函数	59
§ 2-8 离散相似系统仿真法	65
§ 2-9 脉冲传递函数的简捷推导法	71
§ 2-10 状态矢量方程解的离散化及其仿真法	72
§ 2-11 一个离散相似法通用仿真程序的介绍	75
§ 2-12 函数发生和特殊功能的仿真	82
§ 2-13 采样控制系统的仿真	88
习 题	89
第三章 仿真速度问题和快速数字仿真	91
§ 3-1 仿真的精确性、快速性和实时性	91
§ 3-2 置代法	92
§ 3-3 根匹配法	95
§ 3-4 可调补偿法	98
§ 3-5 非线性系统快速仿真算法	105
§ 3-6 用并行处理提高仿真速度	109
§ 3-7 仿真与优化	114

习 题	115
第一篇参考文献	116
第二篇 数模混合计算机仿真	117
第四章 数模混合计算机概述	118
§ 4-1 模拟计算机与数字计算机的比较	118
§ 4-2 数模混合计算机的出现	119
第五章 模拟计算机基本原理及仿真方法	121
§ 5-1 模拟计算机及其工作原理简介	121
§ 5-2 模拟计算机的线性运算部件	123
§ 5-3 模拟计算机的非线性运算部件	133
§ 5-4 模拟计算机的仿真方法	152
习 题	171
第六章 数模混合计算机基本原理及仿真方法	173
§ 6-1 数模混合计算机的组成与特点	173
§ 6-2 数模混合计算机的结构及信号的传递	176
§ 6-3 数模混合计算机的线性运算部件	185
§ 6-4 数模混合计算机的非线性运算部件	196
§ 6-5 数模混合计算机的逻辑部件	209
§ 6-6 数模转换器(DAC)和模数转换器(ADC)	215
§ 6-7 数模混合计算的误差及其补偿的方法	219
习 题	224
第二篇参考文献	225
第三篇 计算机仿真在动力机械与装置中的应用	226
第七章 仿真在燃气轮机中的应用	227
§ 7-1 燃气轮机动态性能数学模型	227
§ 7-2 燃气轮机非线性仿真模型	233
§ 7-3 燃气轮机线性化仿真模型	237
§ 7-4 燃气轮机准非线性化仿真模型	246
§ 7-5 燃气轮机瞬态扭矩仿真模型	252
习 题	254
第八章 仿真在船舶推进系统中的应用	255
§ 8-1 船桨系统的数学模型	255
§ 8-2 增压柴油机数学模型	263
§ 8-3 传动设备的模型和仿真特点	279
§ 8-4 变距控制模型及其仿真特点	282
§ 8-5 推进系统动态仿真的示例	286
第九章 数模混合仿真在其他方面的应用	294
§ 9-1 用CSDT法求解瞬态温度场	294
§ 9-2 流动问题的数模混合求解	298

第三篇参考文献.....	302
附 录.....	304
I. 数字计算机仿真部分.....	304
II. 数模混合计算机仿真部分.....	327

概 论

计算机仿真是把研究对象的数学模型在计算机上进行性能测试的新兴综合性技术，以估计或预测真实对象的性能。也可以更全面地说，计算机仿真(以下简称仿真)是应用系统模型结合实际或模拟的环境，或用实际的系统或其子系统结合模拟的环境进行分析和实验的一种科学方法。它可以用在系统设计、训练教学、发展和估计等方面。利用这种技术可以去研究一个尚未建立或实现(或虽然已实际建成但正待改进，而这种改进的系统尚未建立时)的系统的性能。可以用来比较很多种方案以确定最佳方案，可以用来检验某种或某些技术措施、设计意图是否达到预期的效果，或估计会不会发生某些问题和情况。这些问题和情况也许在事先已有所怀疑，或者从未预计到的。可以较充分地检验这个系统在各种可以设想到的不同环境中表现的行为，以便制订适当的技术策略使其行为满足运行的需要。也可以为这个系统投运前的调整作出估计，并提供有实际参考价值的建议。仿真是很经济合算的，不像作真实的实验(或试车、台架试验等)那样需要花费很大的人力、财力、时间。仿真还可以完成实际试验中无法做到的或者十分危险的实验。

仿真技术不仅在工程设计和制造中使用，它也可用在医学卫生、商业、生产管理、社会经济、生态发展等方面。仿真尚广泛用于人员的训练，例如飞机、船舰、汽车的驾驶训练，化工、电力等工业中技术工人的训练以及其他各种训练教学中。

本章要介绍仿真的基本含义和功用，仿真用的工具，仿真的分类和模型的分类。

§ 1 仿真的含义

仿真就是用一个能代表所研究对象的模型去完成的某种实验，以前常称为模拟。这种实验技术很早以前就已经有了。计算机的发明、推广和计算技术的发展，使人们能够用一个“可以计算的模型”去完成实验，就是说能够以计算机为工具，对被仿真对象(系统及其环境)的数学模型进行处理或实验，获得相近于实际对象的性能。现在讲的仿真，多数指的是这一类仿真，或称之为计算机仿真。它们主要是在第二次世界大战后发展起来的，首先出现模拟计算机仿真，然后为数字计算机仿真。

仿真的重要特点是实验性。一个具体的物理系统可以用它本身或其模型去做实验。一个系统可以用能有效表示其某些方面性能的模型去近似。例如一台安排在弹性支承上的柴油发电机组具有一定的质量，它受到自己工作中所造成的干扰的作用，在带有阻尼的减震器上作振动，可以用图 1 那样的物理模型代替上述系统(图中 f 和 x 都是 t 的函数)。

利用这个模型可以进行试验。例如观测在某个激振力 $f(t)$ 下，由弹簧常数为 K 的弹簧支承，阻尼油缸阻尼系数为 D 的质量 M 的运动规律 $x(t)$ ，以及由弹簧传到下面地面(刚性基础)的力。此地面即为环境。

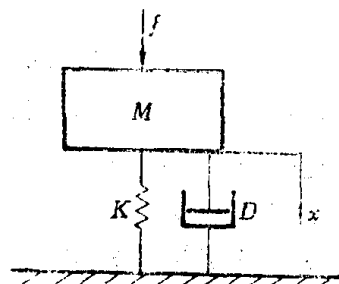


图 1 简单的物理模型

由此物理模型可写出它的数学模型

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + Kx = f \quad (1)$$

这是一个普通的二阶系统。我们知道典型的二阶系统为

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = \omega_n^2 f \quad (2)$$

利用数学解析的方法可以知道此系统运动规律。只要已知 $f(t)$ ，即可解出 $x(t)$ 。在任一本自动控制原理的教科书中都讲到 $x(t)$ 与 ζ 有关，当 $f(t) = 1(t)$ ，并

$\zeta \geq 1$ ， $x(t)$ 为单调收敛；

$0 < \zeta < 1$ ， $x(t)$ 为振荡收敛；

$\zeta = 0$ ， $x(t)$ 为等幅振荡。

上述结论是由数学解析法得出的。首先解出式(2)所示系统特征方程的根

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

由根的实、虚两部分可判别系统的运动特征。这种结论也可通过模型试验的方法得出。例如改变模型阻尼油缸的阻尼，观察干扰力 f 为阶跃时质量 M 的运动 $x(t)$ 。经多次试验就可总结出 ζ 与 $x(t)$ 之间的关系。实验的特点是结论来自试验的结果。仿真就是利用模型进行实验的过程，按模型为物理模型还是数学模型可以把仿真分成物理仿真和数学仿真。

当然如图 1 那样的模型可用简单的解析法去研究。但如果数学模型更复杂， $f(t)$ 也不是可用简单算式表达时，数学解析法就不是那样容易做到，对于这种情况，模型试验就有很大实用价值。

物理仿真是常用的方法，砂盘也许是最为古老的物理仿真了，但至今还在使用，例如在军事，水文等方面。所谓物理仿真是用一个与实际系统物理本质相同的模型去完成试验。例如利用船模去完成船舶阻力的试验，船模的水下部分与实船有同样的几何比例，船模拖曳时与实船有相似的水动力学性质。涡轮机叶片，汽车模型、舰船模型等在风洞中吹风试验也是物理仿真，进行物理仿真必须遵守一些相似准则，如几何相似、弗劳德数相似、或/和雷诺数相似等。

而数学仿真就不必要有物理本质相同的模型系统，而只要求数学模型相同。例如可用图 2 那样的电路去模拟图 1 所示系统。电路由电阻 R 、电容 C 和电感 L 组成，激励电压为 $E(t)$ 。

可以方便地写出

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = E(t)$$

由于 $\int i dt = q$ ，故

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E(t) \quad (3)$$

可以看出，它与式(1-1)是相似的，并存在下面的对应关系

$$L \leftrightarrow M, D \leftrightarrow R, K \leftrightarrow 1/C, x \leftrightarrow q, f \leftrightarrow E(t)$$

因此利用图 2 的电路去做试验，则它表现出来的运动特性与图 1 的机械系统相似。由于制造这样一个电路，以及调整电路中各元件的参数比较方便，因此可代替机械模型的试验，这种方法必须要建立另一个性质不同的物理系统，此系统与被仿真的系统有对应的参数。故这种方法称作直接仿真，亦称作类比、比拟。

确实，不同的物理系统，它们的参数存在着各种类比关系，如

$F = Bv$ (机械系统, F 为力, B 为阻尼, v 为速度),

$V = Ri$ (电路, V 为电压, R 为电阻, i 为电流),

$H_h = R_h q_h$ (液压系统, H_h 为压力差, R_h 为液阻, q_h 为流量),

$T = R_r q_r$ (传热系统, T 为温差, R_r 为热阻, q_r 为热流量),

$F = m \frac{dv}{dt}$ (机械系统, m 为质量),

$V = L \frac{di}{dt}$ (电路, L 为电感),

$H = L_h \frac{dq_h}{dt}$ (液压系统, L_h 为液感),

$F = K \int v dt$ (机械系统, K 为弹簧刚度),

$V = \frac{1}{C} \int i dt$ (电路 C 为电容),

$H_h = \frac{1}{C_h} \int q_h dt$ (液压系统, C_h 为液容),

$T = \frac{1}{C_T} \int q_r dt$ (传热系统, C_T 为热容),

$E = v^2 B$ (机械系统, E 为阻尼损失功率),

$P = i^2 R$ (电路, P 为电阻耗散功率)。

因此可以选择一种便于实现、便于调整的物理系统去仿真待研究的系统。这种模拟装置往往是专用的。

另一种办法是间接仿真, 它是一个解算装置, 能对被仿真系统的数学模型作数学处理, 处理的结果与实际系统在受到同样数学规律的激励下作出的响应是相似的。例如对于式(1)可改写成

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{D}{M} \frac{dx}{dt} - \frac{K}{M}x + \frac{f}{M} \quad (4)$$

并注意

$$x = x_0 + \int_0^t \left(\frac{dx}{dt} \right) dt$$

$$\frac{dx}{dt} = \left(\frac{dx}{dt} \right)_0 + \int_0^t \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) dt$$

故可以构成图 3。即只要有一些能实现某些功能的器件: 三个“乘系数”的器件, 一个“加法”器件, 两个“积分”器件即可按模型的表达式(1)正确处理模型的输出与输入间的关系。也就是说, 只要有一个能进行这种运算的装置, 即可对上述模型进行仿真。

这种情况下, 用作仿真系统的运算装置, 其物理性质、结构与被仿真的实际系统不同, 而只是具有同样的数学规律。通常这种仿真系统为计算机。

所以说仿真就是用对于仿真对象(系统和环境)有效的数学模型, 并以适当的运算工具实现的一种实验。从这种实验中可以得出此数学模型所表现出的动态性能或行为, 这个动态性能

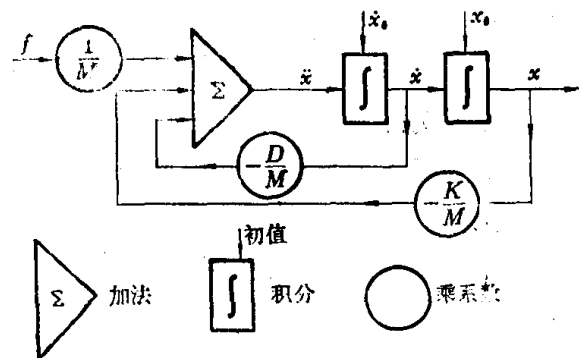


图 3 间接仿真图

和行为与实际对象的动态性能和行为是近似的。或者说可以用数学模型的实验去预测实际对象的动态过程。一个实际系统在不同的环境中其动态性能会有不同的表现,在仿真时可以模拟各种环境,以预测实际系统对不同环境的适应情况。当然也可以用实际的环境与仿真的模型或仿真的环境与实际的系统进行仿真试验。

由于系统和环境可用适当的数学模型去仿真,因此就可以方便地变更各种方案,用较短的周期,少的投资完成多种设计方案的比较,找到合理的设计参数。另外还可以完成实际物理系统实验中无法做到和难以做到的项目。例如要预测实际系统的非常工况,危险工况,故障工况,对操作人员有生命威胁的工况,用仿真方法去完成则不会造成生命、财产的任何损害。

由于以上特点仿真技术主要用于:

1. 工程设计。利用仿真找最佳的设计方案,最合理的参数,最恰当的功能。因此仿真技术成为 CAD 的一个重要部分。

2. 研究。用以验证新的理论和技术,例如研究新的控制规律;也可以用来考核新研制的控制器,或预调控制器。

3. 教育与训练。通过仿真实验可以增进学生的感性认识,并在较短时间内完成多种不同方案的试验。利用仿真训练器可对工厂生产过程的操纵人员,飞机船舰的驾驶员,船舶轮机的管理人员等进行训练,既安全又能在室内进行。

4. 生产管理。如流水线的生产、电话交换系统等方面。也可用于对发展的预测,如传染病的传播和控制、人口的发展、以至整个社会的工农业生产、人口、建设等相互促进和相互制约的发展过程的远期预测。

§ 2 仿真用的工具

首先出现的用于仿真的计算机是模拟计算机,这大约在 40 年代。模拟计算机由一些不同功能的模拟运算部件组成。使用时,先用导线把这些部件按题目要求连接起来,就可进行仿真运算。

现代模拟计算机的运算部件基本上由高增益集成直流放大器和一些无源运算网络组成。可以组成能实现不同运算功能的各种运算部件,常见的运算功能有加法、反相、积分、乘系数、乘法、函数的发生(包括常见的解析函数和任意函数)、某些非线性运算等。使用模拟计算机时,首先要按被仿真对象的数学模型画成排队图。这种排队图与图 3 近似,只是要考虑到模拟计算机的一些具体问题,例如反相,比例尺等问题。然后按排队图把各运算部件用专用的导线连起来。为了实际解题的需要,模拟计算机还可设置变量的初值。在模拟机进行仿真运行中,还可以把某些变量的动态历程用适当的形式显示,以便观察或记录。

模拟计算机各运算部件是并行工作的,而不像普通数字计算机那样只能进行串行运算,故其运算速度比数字机快。在计算机仿真时,有时需要把一些实物与计算机连接,构成一个仿真系统。例如由计算机仿真控制对象,而与实际的控制器相连,构成自动控制系统。这种情况下计算机的运算速度必须跟上这些实物的响应速度,否则就会发生仿真的严重失真,有时仿真系统中要有人介入,例如轮机员的仿真训练器。则计算机的仿真计算速度应与实际轮机系统的响应速度一致,否则人就感到不像实际的轮机在运行,这类情况下就要求实时仿真。显然在仿真响应速度相对较快的对象时,计算机运算速度不够快时就无法实现实时仿真。有时尚要

求仿真计算速度比实际对象的响应速度更高，因此实际对象的动态过程在计算机仿真时只要用短得多的时间去完成，这样就可以在较短时间内完成很多次的仿真运行，以便能很快地比较仿真对象各种不同方案的动态特性，从而实现优化。这种情况称为超实时仿真。由于模拟机运算速度高，对于实时和超实时仿真就十分有利。

模拟机仿真的另一优点是比较直观。

模拟机是依靠模拟电路工作的，它的运算精度不可能太高。一般说其仿真精度不及数字机高。关于数字机仿真精度，下面要作说明。

模拟机的逻辑判断能力弱，又无记忆功能，使它的仿真功能较差。故在60年代又出现了混合模拟机。这是在普通模拟计算机的基础上增加了一些数字逻辑部件和模拟存贮器。这样就可真正发挥模拟计算机的高速运算功能，能自动反覆解题或迭代运算。

数字仿真是随着数字计算机的发展和推广使用而发展起来的。60年代后数字仿真得到了长足的发展。由于数字机是把时间分成间隔用递推的办法一步、一步地计算的，因此算出的动态过程是状态变量的有序数列，即状态变量的离散时间值。实际上数字机不能直接求解微分方程，它只能作代数运算。所以数字机仿真就要使用某些数值计算方法，主要是数值积分法，或把微分方程转变为差分方程后再用递推算法解出动态过程。这些运算都编成相应的程序。现在常见的通用仿真程序多数采用数值积分法。后面的这种方法，可看作构成一个类似于原连续系统的离散系统。然后对此离散系统进行仿真运算。

例如一个一阶微分方程表示的系统

$$T_s \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

的输入端加一个采样开关和信号重构器，因此在 k 次采样时刻 $k+1$ 次采样前输入保持为采样时的 x_k 。于是由上述微分方程的解可知 $k+1$ 次采样时

$$y_{k+1} = e^{-T/T_s} y_k + K(1 - e^{-T/T_s}) x_k \quad (5)$$

此式即作为仿真运算的递推式，也即离散相似模型。

数值积分法是很久以前早就创造出来了，但只有在数字计算机出现后才真正得到广泛的使用。在有关计算方法的书籍中都可找到这种计算方法的基本原理。

数字计算机虽然精度高，但其精度也是有限的。首先实际数字计算机数据的有效位数不可能是无限的，因此总存在舍入误差。由于采用递推计算，误差随递推步数的增加，可能会积累。另外任何计算方法总是近似的。数值积分法总存在着高阶误差。而离散相似法，由于离散相似模型并不完全等同于原连续模型，故总带有一定误差。一般说仿真精度与仿真运算速度常存在矛盾。因此数字仿真中对算法就很有讲究，数字仿真方法的研究中有很多都是仿真计算方法的研究。目前已有很多各式各样的算法。

数字仿真的优点之一在于：可以先行编出一套程序，然后输入一些反映仿真对象的数据，即可进行仿真运行。这比模拟计算机的应用要方便。另外，由于数字计算机有甚强的贮存数据和逻辑判断的能力，函数发生方便，所以往往能仿真模拟计算机难于实现的对象。尤其是现在仿真程序的发展，使功能愈来愈多样。因此也更能满足各种不同仿真对象的要求，或更能满足仿真对象特点的各种细节，以提高仿真的可信度。另外，现代的仿真往往与优化密切结合。通过仿真比较各种不同的方案，以找到最优的仿真对象方案。在数字计算机上实现寻优与仿真的程序是比较方便的。多次或批量仿真运行，变更每次仿真运行的要求，对于数字计算机都

是易于实现的。

由于键盘和 CRT 使仿真的操作人员和计算机间建立起联系,因此数字计算机有利于提高仿真的交互性,即操作者不仅可在键盘输入题目的数据,并在 CRT 上看到解答,还可以根据早期的仿真结果修改模型和对仿真运行的要求以在新的仿真运行中实验他的新设想。

现在已有很多仿真程序,包括专用和通用的。近 10 余年来发展到仿真语言,进一步增强了数字仿真的方便性。

但是正由于数字计算机的串行运算,使其运算速度不及模拟机。为了适应实时仿真和利用速度低的微型机仿真,人们研究各种快速的仿真算法。

既然模拟计算机和数字计算机用于仿真各有优缺点,那么就可以把模拟计算机与数字计算机联合成一个系统即混合计算机系统。两种计算机通过中接口交换信息。在混合计算机系统中,模拟机完成高速运算,而数字机则可实现对模拟机的自动管理、监督和控制,并完成一些高精度的运算(如高精度数值积分,多变量函数的产生等)。这样,混合计算机既具有模拟机的高速度,又具有数字机的高精度、存储能力大和逻辑功能强的优点,这是一种处理能力极强的仿真工具。近年来随着模拟机自动排题系统的采用,原来较费时的模拟程序的编制(排题)也可实现自动化,改变一次模拟程序只需几十毫秒,可实现分时操作,大大提高了系统的使用效率和功能。

数字仿真机的发展方向之一是多(微)机并行处理。这种系统中各计算机并行工作,但每台计算机仍串行运算。各台计算机间进行信息交换。由于多台计算机同时工作,故大大提高了运算速度。近年来国际上对并行系统的研制势头甚为突出。已出现了由数十甚至上万台计算机组成的系统,有些并行系统每秒可进行上亿次的运算。

本书将主要介绍数字仿真和数模混合仿真。

§ 3 仿真的用途

仿真可按实现的基本原理分成物理仿真和数学仿真。数学仿真按使用的工具不同而分成模拟、数字和混合仿真。这些在前两节中都已介绍过。

系统按状态变量是否连续变化而分成连续和离散。系统的状态变量随时间而连续变化的叫连续系统。在船舶动力装置中大部分的状态变量都是连续变化的,例如主机的油门、转速,燃气的压力、温度,螺旋桨的阻力矩和推力等。这种系统的数学模型通常用微分方程描述。对于非线性系统,则尚应加上参变量方程;后者为代数方程,或逻辑表达式。

有时人们只对连续系统状态变量在特定时间的量感兴趣。例如当使用巡回检测或计算机检测时只能知道采样时刻的状态变量瞬时值。但这样做并不改变这些变量连续变化性质。因此我们应把这类系统称为采样系统。采样系统的模型可用差分方程或离散状态方程描述,对于非线性系统同样应再加上参变量方程。

数字机仿真时要采取离散的算法,或正如上面介绍的要用离散模型去相似原连续模型。这种离散化了的模型称为二次模型。二次模型是由差分方程(组)描述的。正由于这样,用数字计算机实现采样系统的仿真与连续系统仿真没什么原则性区别。

有些系统的状态变量只能在离散时刻发生变化,并且在数值上只能间断地变化。例如产品的数量、人口数量等。这些变量的变化规律往往服从一定的统计规律,而无确定性规律。这

类系统称为离散事件系统。像电话交换系统,商品流转系统,车票的零售系统都属这类系统。我们把这类系统称为离散事件系统。

一个生产流水线中,某一个工位每开始一个新部件的安装;一个售票处每进入一位顾客;一个工厂每接受一批订货;这些都称为发生了一个事件。事件发生的规律是统计性的。例如我们只知平均多少时间发生一次某个事件,但每个具体事件的发生时间与前一事件发生时间之间的间隔是随机的,有一定的概率分布。后者就是此事件的模型。离散事件仿真程序能从这个概率分布模型算出每个事件发生的时间,从而观察到是否发生这种事件的“拥挤”情况等。这样就可以研究如何改善这个流水线或售票处的管理。因此离散事件系统的仿真与连续系统仿真是不同的。现在也有不少这类仿真的程序和语言。但应注意,离散系统与连续系统间并无严格的分界线。现在仿真语言发展出现了把这两种系统的仿真放在一起实行的新趋势。

系统模型还可分成静态与动态。平衡状态时,各状态变量之间关系的数学描述,即为静态数学模型。因此静态模型与时间无关。从一个静态转移到另一静态的过程是动态过程,描述此过程的数学关系为动态模型,动态模型的时间为自变量。通常把动态过程的仿真称“系统仿真”。本教材涉及的就是系统仿真。

机电工程等系统都有惯性,这种惯性多数来自系统中的储能(广义的能)容器,例如质量,热容量,气、液容积和电容等。这种惯性表现为状态变量变化的滞后。但是滞后并不仅由惯性引起的,例如介质在管道中流通时,下游的介质温度变化滞后于上游。不论何种原因引起的滞后都造成了系统的动态过程,或动态行为。这种概念也可推广到其他学科的系统,例如医学生物工程、社会工程等。因此现在这些学科中系统仿真也很有用处。

本书只涉及工程连续(包括采样)系统的数字和数字模拟混合仿真。这类仿真课题应用面很广,在船舶动力装置中也有很多方面需要应用此种技术。下面列举实例简述其应用。

仿真可以应用在内燃机调速系统的研究上。现代中、大功率柴油机多采用机械液压调速器,这些调速器一般都可调整其补偿时间(即调整针阀开度以改变积分时间),补偿度和负荷限制等。可以利用仿真研究这些参数对调速过程的影响。锅炉给水和燃料控制系统可以用简单的单冲量控制,但对于大型、参数高的系统就要采用较复杂的控制系统,例如采用三冲量(水位、汽流量、给水量)的水位控制,和三冲量(汽鼓压力、主蒸汽压力、汽流量)的燃料控制系统,有时尚可能加入正微分或负微分信号,或者增加负载的前馈信号。这就可以用仿真方法研究不同的控制回路方案的动态特性,以决定选用方案^[1]。

有些船舶上主机通过倒顺摩擦离合器带动螺旋桨,当改变转向,例如由正转变成反转时,正车离合器先脱开,然后使倒车离合器结合。在后者刚开始结合时,螺旋桨由于惯性仍在正向旋转,于是造成倒车离合器打滑,直到螺旋桨逐渐降速、反向、跟上倒车转速。在此期间离合器由于打滑,摩擦功全转变成热量,使离合器摩擦面材料温度上升。可以用仿真方法研究离合器换向时温度的升高是否超出了允许极限。这可以用来解决离合器的设计问题和倒顺车控制程序设计。

自适应控制系统中必须不断检测被控对象的输出变量并辨识其当时的模型,按模型确定最佳的控制规律。这种辨识应是实时的,一般采取递推算法,即在以前的辨识中得到的模型参数估计的基础上,再加入新测量到的数据,通过递推算法刷新参数估计。当被控对象模型参数为时变时,辨识算法必须使参数估计跟踪实际的变化。这可以用增加最新检测数据的重视程度,减少旧数据的重视程度的办法,也即用加权的方法去解决。新旧程度不同的数据有不同

的权。用仿真方法就可以找到最恰当的权,使辨识既有高的跟踪能力,又有较高辨识精度,并能抑制测试噪音的干扰。仿真技术可以用来研究新的控制规律或算法。

动力装置的机动性与可靠性往往有矛盾,这是由于高的机动性常意味着动态载荷的增加。例如柴-燃联合推进装置中必须对柴油机、燃气轮机、传动机组和调距桨都加以控制。主机的油门、转速、传动设备的离合状态和螺距共同确定了推进装置的动载荷、舰船的机动性。因此对主机、传动机组和调距桨的控制必须相互配合相互制约,才能既保证好的机动性又不使动载荷超出允许值。由于整个推进装置动态模型的复杂性,根本无法用解析方法得出最适宜的控制规律,而必须应用仿真的办法去研究。因此推进系统及其自动控制的动态仿真已成为控制系统设计的必要步骤^[2]。

以上只是举一些例子说明仿真的用途。但可以看出仿真的用途是很广泛的。