

G F G Y G B S

# 火控系统的数字仿真

HUOKONG XITONG DE SHUZI FANGZHEN

朱元昌 主编

朱元昌 单甘霖 胡建旺 朱如玲 编著

国防工业出版社

## 前 言

目前,有三种途径来分析火控系统:一种是通过火控制系统的实战结果;另一种是通过火控制系统的靶场试验和综合测试;再一种就是通过火控制系统的仿真试验。第一种方法可以分析、评估和检验火控系统在战斗条件下的综合性能,它的结果反映了系统总体的技术战术水平,是一种可信度最高、结果最有价值的方法。但是,这种实战分析方法一般情况下是难以实施的。第二种方法是基于对实际目标而进行的系统软件和硬件测试,可以反映特定条件下的系统性能,具有一定的可信度。然而,出于安全、试验方案可行性等方面的考虑以及目标性能的约束,这种方法只能分析系统的一部分或局部的结构和性能。第三种方法在试验条件、系统构造和环境方面可以说是“无约束的试验”,具有很大的灵活性。而且试验的费用相对前两种方法要低得多。因此,火控制系统的仿真研究变得十分重要,火控系统仿真研究已成为一种越来越被人们所接受的、比较理想的方法。

近十年来,火控制系统的仿真研究有了较大发展。人们结合仿真技术和计算机技术,研制和开发了一些火控系统模拟器和专用仿真软件,取得了一定成果。但是,作为成果资料进行系统地总结却比较少。特别是,目前还没有整理出火控系统仿真领域的一本专门书籍供本学科的学生学习以及供工程技术人员参考。为满足教学和科研的需要,我们编写了这本教材。

全书在内容上分成三个主要部分:第一、数字仿真的理论、方法和技术;第二、一种交互式动态系统仿真软件的介绍;第三、火控系统仿真建模方法和应用举例。第二和第三部分是本书的核心。其中,第二部分介绍的动态系统仿真软件是一种面向对象的可视化仿真软件,具有国际 90 年代初最先进的水平。目前,国内关于这方面的资料较少,尚未见到使用它进行开发和应用研究的报告。第三部分是根据作者多年从事火控系统及仿真教学和科研工作总结出来的材料。它详细论述了火控系统数学模型和仿真模型的建立过程,并给出了一些火控系统仿真实例。因而,具有较大的应用参考价值。

本书第一章由朱如玲教授编写,第二章由单甘霖副教授编写,第三章和第五章由朱元昌副教授编写,第四章由胡建旺讲师编写,全书由朱元昌副教授主编。

由于水平有限,书中可能存在一些我们没有发现的错误,敬请读者批评指正。

作 者

1996 年 4 月于石家庄

## 内 容 简 介

本书主要介绍火控系统的仿真研究方法。

全书共分五章。第一章概述了系统仿真的基本概念,发展概况和火控系统研究中应用仿真技术的方法;第二章重点介绍了连续系统的数字仿真基础;第三章以几种典型系统为例,介绍了火控系统仿真模型的建立方法和思路;第四章介绍了一种动态系统仿真环境;第五章是应用举例,列举了几种典型火控系统应用动态系统仿真软件的建模和分析方法。

本书是为火力指挥控制系统专业高年级学生开设火控系统仿真课程编写的,也可以作为本专业硕士研究生的选修教材和有关技术人员的参考书。

# 目 录

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪 论</b> .....                    | 1   |
| § 1-1 系统仿真技术 .....                      | 1   |
| § 1-2 系统仿真技术发展概况 .....                  | 6   |
| § 1-3 火控系统仿真的研究方法 .....                 | 11  |
| <b>第二章 连续系统的数字仿真基础</b> .....            | 17  |
| § 2-1 几种常用的数值积分方法 .....                 | 17  |
| § 2-2 面向传递函数的连续系统仿真 .....               | 28  |
| § 2-3 面向系统结构图的连续系统仿真 .....              | 29  |
| § 2-4 离散相似法 .....                       | 32  |
| § 2-5 随机数的产生及蒙特卡罗法 .....                | 39  |
| <b>第三章 火控系统的仿真模型</b> .....              | 45  |
| § 3-1 目标航迹模拟 .....                      | 45  |
| § 3-2 雷达天线控制系统 .....                    | 48  |
| § 3-3 指挥仪综合系统 .....                     | 51  |
| § 3-4 火炮随动系统 .....                      | 56  |
| § 3-5 人机闭合半自动跟踪系统 .....                 | 57  |
| <b>第四章 动态系统的仿真程序</b> .....              | 64  |
| § 4-1 MATLAB 与 SIMULINK .....           | 64  |
| § 4-2 SIMULINK 的结构组成 .....              | 65  |
| § 4-3 仿真模型建立的一般步骤 .....                 | 67  |
| § 4-4 S 函数的建立 .....                     | 77  |
| § 4-5 MATLAB/SIMULINK 与 C 语言的连接方法 ..... | 92  |
| <b>第五章 应用举例</b> .....                   | 99  |
| § 5-1 应用举例和分析 .....                     | 99  |
| § 5-2 火控系统仿真模型的有效性检验 .....              | 111 |
| <b>参考文献</b> .....                       | 118 |

# 第一章 绪 论

“仿真”是由英文 SIMULATION 一词翻译而来,过去曾译为“模拟”。模拟的概念及技术在古代已经被采用,如:大型宫殿、桥梁的建造。近年来,随着计算机技术的发展,仿真的概念范畴基本上已包含了模拟的概念,具有了更为广泛和深刻的内涵。仿真作为一种系统研究的实验方法始于 60 年代,并率先在那些用真实系统进行实验不经济、不安全、甚至不可能的宇航系统、飞行控制系统、制导系统和核电站控制系统研究中应用。1961 年,摩根索特 G W 首次对“仿真”一词作了技术性的解释,其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。目前,系统仿真技术成为航天、航空、武器、交通,乃至社会、经济、生态等各种工程和非工程领域对系统进行研究、设计、分析、决策、鉴定及训练等工作的重要工具。仿真理论和方法的研究已形成规模,仿真实验系统技术本身也发展为高技术产业,成为一门建立在系统工程、电子技术、控制工程、计算技术和人工智能基础上的新兴综合性技术学科。

## § 1-1 系统仿真技术

### 一、系统仿真的定义和分类

系统仿真,就是研究并建立系统的硬件或软件的有效模型,通过模型在实验系统上的运行来研究真实的或假想的动态系统在其所处环境中的性能的过程。也有人把它定义为“用模型代替真实系统进行实验研究,以获取所需信息的实验方法”或“按模型完成的实验”。

按照上述定义,系统、模型和实验系统是系统仿真的三要素。

系统是人们所关心的客观世界的一部分,是相对于研究目的而定义的研究对象的集合;模型是对所研究系统本质部分的信息的复现、描述或抽象,经过验证具有足够置信水平则称为有效模型;实验系统一般由仿真计算机和物理效应模拟器组成,模型在这样的实验系统上运行,从而获得所需要的信息。概言之,系统仿真的内容是在某种系统定义之下研究模型,进行模型试验和分析。“建模-实验-分析”,这就是仿真基本概念框架。

按照模型和实验系统的性质,系统仿真分成下列几类:

**数学仿真** 建立系统的软件模型并在计算机上进行模型试验,称为数学仿真。其中,实验系统为模拟计算机的称模拟机仿真;实验系统为数字计算机的称数字仿真;实验系统为数模混合计算机的称混合仿真。数字仿真是本书介绍的核心内容。

**物理仿真** 建立系统的硬件模型并在物理实验系统上进行试验,称为物理仿真。例如机翼或导弹模型的风洞试验是典型的物理仿真。习惯上,常常把实验系统中不含仿真计算机的仿真称之为物理模拟。

**混合仿真** 建立系统的硬件、软件混合模型。在由仿真计算机和物理效应模拟器组成

的实验系统上进行试验的,称为混合仿真。其中硬件模型包含被仿真系统的真实部件的实时仿真,称半实物仿真。既有系统真实部件,又有人作为一个系统环节参与的仿真,称为硬件和人在回路中的仿真或人机回路仿真,例如测手或炮手半自动跟踪训练装置。

## 二、模型和建模方法学

### (一)模型

根据仿真的定义,研究并建立系统的模型是仿真的基础。明斯基 M 所作的模型定义是“作为系统(S)和实验(E)的模型(M),它能使(E)的运行回答有关(S)的问题”。这里所指的模型,准确地说是仿真模型,即适合于特定系统上运行的模型。

仿真模型,包括硬件模型和软件模型。硬件模型通常指物理模型,它可以是真实系统的部件,也可以是基于广义相似原理的模拟实体,如某些模拟器。软件模型则分为两级:第一级是分析和建模阶段研制的数学模型或数学/逻辑模型,称为概念模型;第二级是根据数学模型建立起的在计算机或实验系统上可执行的模型,在数学仿真中,通称仿真模型。

数学模型是系统仿真的基本依据,数学模型的准确性是极为紧要的。建立系统的数学模型,对某些系统可通过基本定律,如牛顿定律、克希霍夫定律等来建立模型;而对于一些复杂系统,则必须利用实验统计的方法,通过系统辨识技术,建立数学模型。对数学模型的要求可以归纳为两点:一是有足够的精度满足研究目的;二是在保证精度的前提下,力求结构简单以便于使用。

下面,我们介绍一种通用的数学模型形式。一个系统的数学模型可以定义为下面的集合结构:

$$S = \{T, u, \Omega, x, y, \delta, \lambda\}$$

式中  $T$ ——时间基;

$u$ ——输入集合;

$\Omega$ ——状态转移函数;

$x$ ——内部状态集合;

$y$ ——输出集合;

$\delta$ ——输入函数;

$\lambda$ ——输出函数。

根据时间基  $T$  是属于实数集合还是整数集合(不连续),可将数学模型分成连续时间模型及离散时间模型。在连续时间模型中,根据输入函数在时间上是连续变化还是离散变化,分为连续模型与离散事件模型。而连续模型又可根据输出函数在空间上是否连续,分成分布参数模型和集中参数模型。这种分类可表示成如下关系:

离散时间模型

$$\begin{array}{l} \text{连续时间模型} \left\{ \begin{array}{l} \text{离散事件模型} \\ \text{连续模型} \left\{ \begin{array}{l} \text{集中参数模型} \\ \text{分布参数模型} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array}$$

对于集中参数连续模型,具体形式为:

$$\begin{cases} S = \{T, u, \Omega, x, y, \delta, \lambda\} \\ \dot{x} = f(x, u) \\ \dot{y} = g(x, u) \end{cases}$$

若  $f, g$  为线性函数, 则

$$\begin{cases} S = \{T, u, \Omega, x, y, \delta, \lambda\} \\ \dot{x} = Ax + Bu \\ \dot{y} = Cx + Du \end{cases}$$

其中,  $A, B, C, D$  为常数矩阵。

一般情况下, 连续时间系统用连续时间模型描述, 离散时间系统用离散时间模型描述。所以, 有的文献往往将系统与模型的称谓混用。但有时由于数据采集原因, 或者由于采用数字计算机进行系统仿真, 也常用离散时间模型来描述连续时间系统, 通常把这种模型称为离散化模型。

我们知道, 连续模型(包含离散时间模型)可以用一组方程式(微分方程、差分方程或代数方程)来表示, 而离散事件模型则只能用流程图来描述。由此, 从仿真的角度, 称前者为连续系统仿真, 后者为离散事件系统仿真。本书主要介绍连续系统仿真方法。

数学模型可以分解成三个部分, 即框架、结构和参数。

框架: 指模型的输入集合  $u$ , 状态集合  $x$ , 输出集合  $y$ , 时间基  $T$  和输入函数  $\delta$ 。

结构: 指状态转移函数  $\Omega$  及输出函数  $\lambda$ , 对集中参数连续模型, 就是指  $f, g$ , 或  $A, B, C, D$ 。

参数: 指状态转移函数及输出函数的具体参数。

由此, 所谓建模就是确定框架、确定结构、确定或估计参数(收集数据)。

建立数学模型的信息来源, 首先是建模目的, 不同的目的可有不同的模型形式; 其次是已知的定律、定理一类的知识和经验, 亦称先验知识; 最后是试验数据, 即为模型结构提供的信息。

## (二) 建模方法学

数学模型的定义、作用、性质与分类, 建立数学模型的信息来源、方法与途径, 以及模型的分解、变换、简化理论和方法, 仿真模型置信水平分析、检验等构成了建模方法学的研究内容。

最基本的建模方法有两种。一种是理论分析推导法, 即根据先验知识推导出机理模型或称理论模型, 通称“白箱”模型, 这种方法也叫演绎法。另一种是通过对系统输入输出信号的数据测试和分析来建立数学模型, 所得模型称“黑箱”模型, 这种方法叫系统辨识。实际使用时, 两种方法常常互相补充。

建立数学模型的一般步骤如下:

- (1) 确定模型的使用目的和性能要求;
- (2) 确定系统及其环境条件;
- (3) 确定系统的组成环节或单元;
- (4) 研究各组成单元间的相互关系;
- (5) 对各单元用先验知识或定律推导其模型;
- (6) 根据对象的试验数据, 对系统参数或包含在模型中的未确定元素进行辨识;
- (7) 根据所得模型进行模拟研究, 验证模型与实际系统的对应关系, 即置信水平分析;
- (8) 假如不合适, 重复(2)~(7)步骤, 直到满意为止。

上述前 4 项统称系统分析, 其中(3)、(4)叫结构辨识;(6)为系统或参数辨识;(7)为模

型验证。

对于诸如火控系统、电子线路、过程控制、导航与制导等有足够先验知识的系统,一般可以通过数学和逻辑演绎建立模型。但有时由于系统内部结构复杂,仅仅通过理论分析建模困难很大,即便可以建立理论模型,结构和参数也要借助于试验数据,这就要进行系统辨识。而对于气象、经济、社会一类系统,只能根据观测数据进行归纳或外推建立模型。这两类问题通称为“黑箱”问题。

所谓系统辨识,就是根据实际系统的输入输出数据,从给定的模型类中,确定与这个系统等价的模型。参数估计,则为在已知系统数学模型结构时,估计其参数的方法。系统辨识步骤如图 1-1 所示。

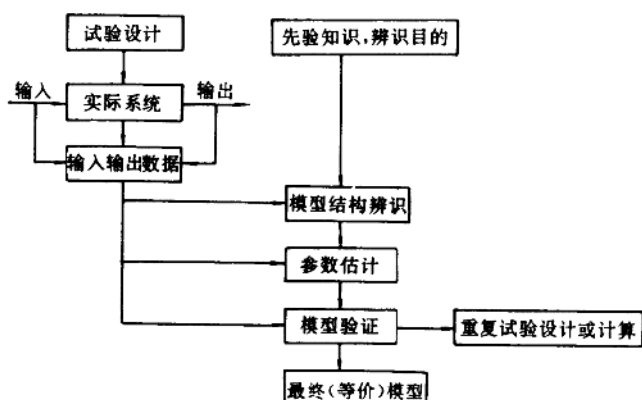


图 1-1 系统辨识步骤框图

应当指出,建模是非常复杂的过程,除了实验、收集数据、正确推演和归纳之外,还须依赖于模型研究者的知识、经验和技巧。而要得到“有效”模型,必须经过反复检验和验证,这一点后面将进一步叙述。所以说,模型研究过程贯穿于整个仿真过程。即便如此,对虽属“白箱”系统,但含复杂非线性部件,如导弹敏感头系统,建立精确而又便于在计算机上运行的模型仍然很困难,这就是人们宁肯耗资建设半实物仿真实验系统的动机和原因之一。

### 三、系统仿真的一般实施步骤

进行一次完整的仿真试验,一般要经过如下步骤:

(1)系统定义:根据研究目的,描述要研究的问题,规定系统的边界和约束条件,包括初始条件、干扰和环境条件,并尽可能给出系统性能评估准则。

(2)建立模型:根据现有理论、经验、知识和实验或观测数据推演、辨识或归纳数学模型,表示成方程式或流程图。

(3)试验设计:根据被仿真系统与实验系统的特点,确定试验方案和内容。一般情况下,按数学仿真——部分实物部件与实体模型的半实物仿真——人机系统半实物仿真次序进行。

(4)模型变换与检验:将数学模型转变成可在实验系统上运行的仿真模型。这里所指仿真模型,包括计算机软件模型和硬件模型(实体部件和模拟器)。对计算模型及其执行精

度检验,对硬件模型和模拟器分别进行测试或标定。

(5)试验运行:根据仿真方案进行仿真运行,获取系统的行为数据和所需的各种信息。实际上,模型试运行、验模过程中的调试运行是反复进行的。

(6)结果分析和模型验证:按试验方案要求,对仿真结果的输出图形、曲线、动画和数据进行分析处理。例如施加随机干扰或者输入随机初始误差条件的结果的蒙特卡罗统计分析,给出示性数的区间估计等。通过仿真模型输出与实际系统输出性能数据的比较(例如导弹飞行仿真数据与靶场飞行试验数据比较)验证模型的正确性,从而量化确定仿真或模型的置信水平。对结果满意,则仿真结束。

(7)仿真试验报告。

从仿真技术来看,上述七步可归纳为四个主要阶段。我们把这四个阶段的划分及其对应的技术内容用框图表示,见图 1-2。

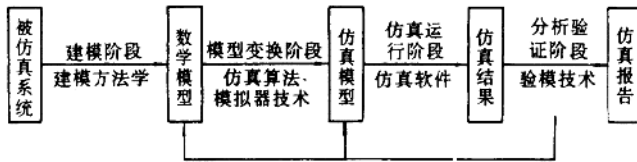


图 1-2 系统仿真阶段划分及其技术内容框图

需要说明的是,上述仿真步骤或阶段只是一个大致顺序。实际上许多工作往往是交错或并行进展的。而半实物仿真还有很多特殊的内容未能概括进来。

#### 四、仿真置信水平与模型验证技术

仿真用户最关心的问题之一是仿真试验结果的置信水平。置信水平是用示性数据的区间估计来衡量的。仿真置信水平与数学模型、仿真方法、仿真模型、算法、实验系统及数据处理方法等都有密切关系。从仿真即模型试验的角度看,仿真结果即是模型输出,仿真置信水平主要取决于模型的精度。如果确认模型的输出性能相对于研究目的或预期应用的范围内具有足够的精度,我们说该模型是有效模型。为此,在模型研究及仿真试验过程中,必须对模型的性能进行检验和评价,这就是模型检验和验证,通称验模。

验模的内容主要包括:

数学模型的有效性检验:确认它所依据的理论和假定是正确的,且问题整体的模型表达是适合于模型的预期应用的;

仿真(计算)模型的有效性检验:确认对数学模型的编程和执行是正确的;

仿真模型的验证:确认它的输出性能相对于研究目的或预期应用的范围内具有足够的精度,即仿真模型有效地模仿了所研究真实系统的行为;

数据有效性验证:确认建模、模型评价和检验、模型运行中所需的数据是合适的和正确的。

必须强调,第一,模型检验和验证本身是一个过程;第二,这种检验并非确认在所有应用范围内绝对有效。而是在预期应用的范围内获得的足够的精度就可以了。不然的话,要么不可能建立这么一个“绝对有效”的模型,要么费用过大。图 1-3 和图 1-4 分别示意仿真过程的验模环节和模型置信水平与费用之间的关系。

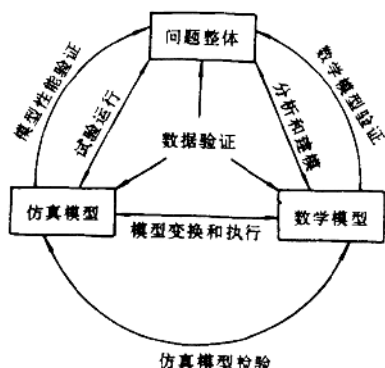


图 1-3 验模环节示意图

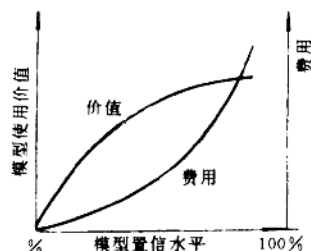


图 1-4 置信水平与费用关系示意图

验模的程序和技术是仿真中一个重要而困难的研究课题，有关的著述很多。限于篇幅，这里不作详细阐述。从实用的观点看，最基本的程序是：

(1) 基础有效性模型验证：通过对建模所依据的理论和假设的考核与实验检验、对系统观测数据的审查、有直接经验的专家的直观鉴定等，保证模型的基础合理性。

(2) 最终有效性模型验证：通过对模型输出与实际系统输出的性能比较，例如用图形和动画比较法、现代频谱分析法、灵敏度检验法、假设检验、现场试验验证、预测系统未来行为能力检验及历史数据验证等方法，对所用模型的置信水平进行量化确定。

本书在第五章中介绍了一种火控系统仿真计算精度的有效性检测方法。

## § 1-2 系统仿真技术发展概况

### 一、仿真计算机

当今，仿真技术的应用在深度和广度上都达到了很高的水平，这是同计算机的发展直接相关联的。

60 年代初期用于仿真的都是模拟计算机。模拟机实际上是并行工作的。速度快，但精度和逻辑控制功能差，实现多变量函数比较困难。60 年代中叶，数字/模拟混合计算机问世以后，就一直在仿真领域占据着很重要地位。其后的发展趋势是采用新的线性和数字集成电路，将混合计算技术与多处理机技术相结合以提高性能，变人工编排为先进的全自动编排。

数字机用于仿真，特别是实时和超实时仿真中的最大障碍是速度问题。解决这个问题迄今所努力的有效途径是：巨型机及小型机、外围阵列处理机、多处理微机网络。

巨型机在体系结构上的特点是采用向量处理、并行处理、数据流和 RISC 技术。据此，第一代巨型机首推 70 年代初研制、计划用于气象预报的 ILLIAC-IV。虽然这是一个失败的尝试，但却促进了流水线向量处理机技术的发展。其后 CDC 公司的 STAR-100 和 Texas 公司的 ASC 相继诞生。第二代巨型机的骄子是著名的 CRAY-1，采用向量多重流水线阵列处理技术，兼有高速、矢量运算功能，并且在分布参数系统仿真中得到了成功的应用。80 年代中后期，巨型机进入第三代，典型产品如 CRAY-2，日立 S-810 等。如今，速度最快的巨型机多采用多重处理、自动并行处理和自动向量处理技术，具有大主存容量，如 CRAY/Y-

MP/CDC/ETA-10 等,峰速达 3~5 吉浮点数每秒,含 4~8 个处理机,主存 64B~2GB。值得一提的是,CRAY 在世界巨型机市场独占鳌头,约占 50%~70%,而且系统软件率先采用 UNIX 操作系统。90 年代初,峰速达 100 吉浮点数每秒的巨型机行将面世(如 CRAY-4, CDC/ETA-100)。同时一种称为高度并行机的巨型机由成百上千个处理机构成,正向 CRAY 发起挑战。

然而,巨型机价格昂贵,而且软件开发工具及应用可转移性差。这就导致小巨型机的发展。小巨型机吸取了巨型高速并行技术,具有大内存、高速通用 I/O 接口,有较为通用的软件设计环境,而且价格适中。有代表性的小巨型机是 ELXSI6560、CONVEX C-240、ALLIANT FX/80(唯一提供 VAX 计算机和 workstation 环境的机器)、FLEXIBLE FLEX/32 等。其中,FLEX32 和 NP1 都是大型分布参数(偏微分方程描述)系统和大型宽频集中参数(常数分方程或差分方程描述)系统仿真中性能/价格比较好的机型。有人预言,小巨型机将成为新一代仿真环境的主要支柱。应当看到,巨型机虽然速度惊人,但普通程序获得的实际有效速度可能有限。这里主要的问题是算法是否可充分向量化,程序设计技术中对并行处理的适应性等。

外围阵列处理机 PAP(Peripheral Array Processor)是一类由主机装载运行程序,采用并行操作原理和流水线技术,可编程的专门目的计算装置。PAP 的出现首先是由于高速信号处理的需要,在 70 年代后期进入仿真领域,并且由于其功能强、性能/价格比好而受到仿真用户的普遍欢迎。PAP 的一般结构包含:与主机作数据、逻辑电平转换和同步的主机接口部件;用于各模块间并发数据交换的共享总线或多总线;独立的程序存储器、数据存储器、表存储器以及高速缓存;采用流水线工作方式的运算器;专门的直接 I/O 处理器以适应实时仿真需要;用于同步控制的时钟等。影响较大的外围处理机有 Control Data Co. 的 MAP-III, Floating Point Sys. 的 AP-120B, FPS-164, FPS-5000, ADI 的 AD-10、AD-100, Star Tech. Inc. 的 ST-100 等。

值得一提的是,ADI 公司最近提出一种称之为 ADRTS(AD Real-Time Station)的远距离智能化全分布式 I/O 系统,它由数字 I/O 板、模拟 I/O 板、各种专用接口板、一个实时通信控制器和一个实时系统控制器组成,系统与 VME 总线兼容。ADRTS 通过光纤网连到 AD-100 的通信网络处理器 CLP。光纤可长至 100m,这就使得 ADRTS 可置于远景的仿真硬件或模拟装置附近。每台 AD-100 可支持 2 个 CLP,每个 CLP 可连多至 4 台 ADRTS。这种基于 68040 微处理器的准同构多机实时工作站,不仅使专用仿真机 AD-100 跨入网络领域,也可单独作为仿真机使用。

除了异构型外围阵列处理机外,目前兴起用单片机组成同构型外围阵列处理机。随着芯片性能不断提高、价格下降,这种方案显示出良好的前景。

从数字计算角度来看计算机的发展趋势,60 年代的特征是批处理。70 年的主流则是分时处理。到了 80 年代,分时控制方式走下坡路,因为微型计算机的发展势如破竹,其主要性能赶上当今超小型机,价格却便宜到了称为“个人计算机”的程度。特别是 workstation 环境的兴起,驱使人们探索所谓多处理微机网络(分布式 workstation 局部网)仿真系统。事实上,专用实时分布式仿真工作站已经问世。随着存储量增加,越来越快的光纤连接器件用于传递数据、图像等信息,在“网”上研究分布系统仿真问题已指日可待。

最后,以专家系统为核心的智能计算机正在孕育。因此,人们有理由期望一种不仅高

效处理数值计算和数据,而且能处理知识的智能化、一体化、交互式建模/仿真/分析的软硬件系统在不远的将来成为现实。

## 二、仿真软件

仿真软件是一类面向问题、面向用户的专用软件。其功能可概括为:

- (1)模型的描述和验证;
- (2)仿真试验的执行、控制和监测;
- (3)试验数据处理、结果分析和显示;
- (4)对模型、数据、图形、实验程式乃至知识的存储、检索与管理。

有时把模型描述与其它功能分别称之为仿真主体软件和仿真支持软件。仿真软件的发展主要集中在改善模型描述能力,改善对建模、试验、分析和模型检验的功能,也就是不断改善面向用户、面向问题的能力。

在用模拟机的仿真中,首先按数学方程或结构图编排模拟仿真排队图,即建立仿真模型,然后选择时间和幅度比例尺,计算初值、调整非线性函数、设置系数、连接实物、进行静态和动态检查、试验运行。数字机进入仿真领域后,仿真软件发生了并正经历重大的变革。

数字仿真软件的主体是仿真语言。60年代初,人们大多以通用程序设计语言(如FORTRAN)编写仿真程序包。例如连续系统仿真程序CSS(Continuous System Simulation),其中CSS1和CSS2分别是面向微分方程和面向结构图的线性系统仿真程序,CSS3是面向结构图的非线性系统仿真程序。这类程序功能较单一,并且使用需要较多的算法语言知识。60~70年代,完善的高级仿真语言进入兴盛时期。在“模型”一节中我们曾经提到,从仿真角度,系统仿真可分为连续系统仿真和离散事件系统仿真两大类。相应地,仿真语言也分成连续系统仿真语言、离散事件系统仿真语言和连续/离散混合仿真语言三类。

典型的连续系统仿真语言是美国仿真学会提出的标准语言CSSL(Continue System Simulation Language),以后又有CSSL III、CSSL IV版本。此外,比较流行的还有CSMP(Continue System Modeling Program),ASCL(Advanced Continuous Simulation Language)、DYNAMO(Dynamic Models)以及DAREP和MOMIC等。目前,功能最为完善的一种可视化仿真软件SIMULINK已经开始被人们使用,本书将在第四章对其做详细介绍。

离散事件系统仿真语言有以事件为基础的SIMSCRIPT、SIMLIB,以活动扫描为基础的CSL(Control and Simulation Language)和以过程为基础的GPSS(General Purpose System Simulation)、GPSSF、SIMULA等。

典型连续/离散混合仿真语言有SLAM(Simulation Language for Alternative Modeling)、GASP IV等。

各种数字仿真语言的构成,大体包括三部分:(1)系统描述及翻译部分,提供比较直观的系统模型、系统参数、仿真参数、输出方式及仿真过程控制的描述语句,并将用户按照这些语句编写的仿真程序翻译成某种机器的汇编语言或算法语言;(2)实用程序库,包含仿真运算的基本子程序,提供多种仿真算法;(3)输出模块。各种语言均各具各自特点,就其共同的功能特点而言,主要是方便模型输入、增加仿真算法、增强参数修改和多次重复运行的交互控制功能,目的是便于系统参数变化对系统性能影响的研究,便于优化设计和统计试验。

仿真软件的发展趋势,概括地说就是模块化、一体化、智能化。

模块化,顾名思义,就是要求模型描述、实验执行、结果分析和输出等独立地描述,便于用户以子模型复合成主模型;便于面向问题选择仿真方法、算法、分析程序等;便于实现更高级的人机交互,如图形方式输入和动画输出;尤其重要的是便于构造面向实时仿真的程序结构。

一体化,有两层含义:第一层是指建模、模型分析和验证、实验、结果分析处理软件组合为一个有机整体;第二层是系统仿真与系统分析、设计、参数寻优结合为一个整体。而这两个结合是所有功能独立的模块通过数据库管理系统(DBMS)管理起来,从而实现以工程数据库(DBE)为核心,将建模、仿真、分析、设计组合为一个有机整体的仿真软件系统,亦称一体化建模与仿真。与MATLAB软件及其工具箱相结合,SIMULINK就是这样一种可视化、模块化和一体化的动态系统仿真软件。图1-5表示这种一体化软件结构。

仿真软件的智能化,在现阶段具有现实意义的工作是发展专家系统。简略地说,仿真专家系统就是将建模和辨识所需的统计知识,仿真所需的算法、数值分析和概率论知识,优化所需的系统和控制方面的知识,以及验模方法、试验设计等方面的知识和专家结论,建立起相应的知识库和推理系统(即实现规则演绎和推理的控制程序),使仿真研究者可以通过用户接口(交互式会话界面)获得决策咨询的系统。这方面的努力已经或正在取得一些进展。

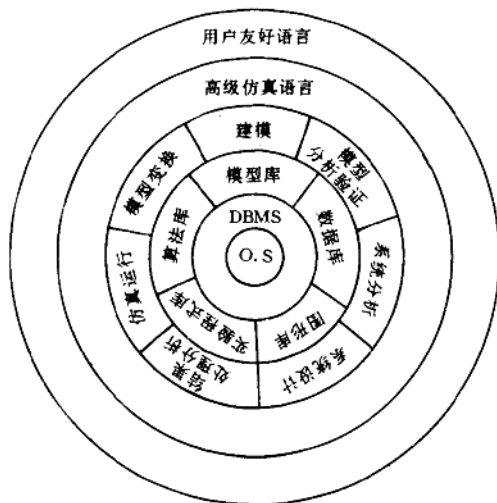


图 1-5 以工程数据库为核心的一体化仿真软件系统

### 三、仿真试验模拟器系统

仿真实验系统中除仿真计算机以外的专用设备统称为模拟器系统。数字仿真也用到一些外部专用设备。如仿真结果实时动画显示装置、实时图形输入输出装置等。但是模拟器系统主要是指半实物仿真和人机回路仿真中的各种模拟装置。

按用途分类,半实物仿真或人机回路仿真可分为工程仿真和训练仿真两大类。相应地,就有工程模拟器和训练模拟器之说。实际上,两者在原理和组成上基本类似,只是侧重

点不同。前者要求针对某个问题或某个环节有细致的模型描述(复现)及准确的静、动态特性,后者则主要着重于整体和环境模拟的逼真性,尤其是对被训练的动感、力感、视觉与听觉环境以及操作思维训练的逼真度。

随仿真对象和仿真目的不同,模拟器系统千差万别。卫星姿态控制系统、惯性导航系统、导弹制导系统和鱼雷控制系统等仿真装置各异;航天飞机、歼击机、地面车辆、水面舰船、潜艇驾驶训练设备,也迥然不同。虽然如此,还是具有某些共性。以军用仿真模拟器系统来说,大致归纳为三类设备。第一类实际上是被仿系统环节的实体模型,如飞行仿真中的六自由度运动系统、座舱模拟器或乘员站,卫星姿控系统和各类制导系统仿真中的姿态运动模拟器、窗外视景或目标背景模拟器等。第二类是系统的环境和作用于系统的“物理效应”模拟设备,包括从紫外线、可见光、红外线、直至毫米波的各种电磁光照环境,音响或水声环境,运动或振动等动感环境,操纵负荷力感环境,负载力或力矩效应,深水阻力、空间引力或失重环境,以及各种模拟的干扰环境、自动化威胁环境等等。上述两类有时混称为“物理效应模拟器”。第三类是辅助性设备,如训练仿真教员台、工程仿真监控台、接口装置、动画显示装置及博弈决策训练仿真大屏幕投影显示器等。

模拟器系统建设花费大。像全天候光照环境模拟、微波暗室这类实验室自不待言,即便是座舱模拟器、飞行运动模拟台、视景系统和负载模拟器等一类所谓非标设备,也都相当昂贵。另一方面,高技术的仿真对象自然需要高技术的仿真模拟设备。例如红外成像制导系统仿真,要求高质量的红外图像目标场景模拟器,这除了最先进的计算机实时图像生成系统外,还要有复杂的视频/红外转换与投射系统,于是红外液晶光阀、电阻列阵、VO<sub>2</sub>薄膜、激光调制等最新转换技术纷纷被研究和应用。可以说当代模拟器技术涉及现代控制、光、机、电、液及计算机和微电子技术等技术门类的最新成果,实现的目标都是高逼真度模拟。以各种运动模拟设备为例,现在广泛采用数字控制、自适应控制和电液直接伺服驱动,大幅度提高精度和动态性能;飞行仿真视景系统,从早期的沙盘式场景模型加摄像投射式发展为激光视盘和计算机实时成像系统;图形图像和显示技术几乎渗入到仿真的各个领域,作战训练仿真、武器系统效能仿真、电子对抗仿真、核电站故障或操作训练仿真、城市交通控制仿真等等,快速且形象逼真的高分辨率显示技术使人如身临其境。

概而言之,随着仿真技术应用的发展,内容广泛的模拟器系统也得到长足的发展。其基本趋势是:过去称之为“非标”的模拟设备,现在逐步向系列化、标准化过渡;从前以自研自用为主的局面正在向专业化研制和生产转变。事实上,发达国家已形成这个领域的高技术产业,有的厂家甚至有能力根据用户的不同需要,提供包括仿真计算机系统、模拟器系统、专用仿真软件在内的全套仿真实验系统的“交钥匙工程”。此外,90年代后期正在迅速发展的“虚拟现实(Virtual Reality)技术(又称灵境技术)”又开辟了仿真技术的新天地。

#### 四、仿真理论和方法

建模、验模的理论和方法一向是仿真理论研究中的核心问题。经验型的建模,验模技术已经不能适应日渐复杂的系统仿真要求。因此,以系统辨识建模法为主要内容的建模理论和方法研究得到深入开展。研究内容包括一般程式、实验设计、辨识软件和验证方法等。系统辨识的难点在于有效的参数辨识,因为这要求从系统仿真的角度获得足够精确度和采集密度(数据率)的数据。为此,需研究系统仿真对系统研制各个阶段的综合试验或飞行

试验的技术要求,研究对遥测、外测等参数精度、采样频率、记录格式、数据处理方法等特殊要求,以形成集仿真试验与系统设计、各种试验于一体的系统辨识建模、验模理论和方法。

模型库的结构研究及各类模型库的建立是模型研究的重点之一,其中包括环境或目标背景特性的测试及相应工程数据库的建立。规范化和标准化是当前模型库和工程数据研究的重要内容。

此外,在某些系统中,人就是一个直接的系统环节,例如驾驶员、武器系统射手、作战或对抗系统中的指挥员。所以,人的模型研究也颇受重视并已相当地深入。智能化建模、验模技术研究取得某种进展,与仿真软件发展趋势相呼应,目前还是以研究建、验模专家系统为主攻点。

我们所指“模型”是包含实验系统的实体模型的。这一点往往被有意或无意忽略。实际上,在仿真置信水平分析评估中,实验设备不应仅仅被看成单个简单误差源,而应看作组成系统的附加环节,从该环节乃至整个实验系统在整个系统仿真中的表现来分析它所带来的影响,才能正确分析仿真结果。

仿真方法的研究范围很广。各类仿真实验程序和规范的研究,系统实验层次及其与系统设计一体化的方法设计,仿真试验过程自动化研究,较全面的人机接口技术,仿真结果分析及置信水平定量评估的自动化、直观化、智能化研究,以及多媒体(光、声、图、文)仿真环境研究等,都是推动仿真试验向科学化、程式化和高层次化的方法和技术研究,对于促进仿真技术发展和应用具有重大价值。

### § 1-3 火控系统仿真的研究方法

#### 一、火控系统简介

在介绍火控系统研究中如何应用数字仿真技术之前,我们先对火控系统的基本概念进行简单介绍。我们以模拟式火控系统的一般工作原理和工作过程为例,这是因为在火控系统的数字仿真研究中遇到的大部分问题还是模拟系统的有关问题,即动态控制系统和模拟器件的仿真。

##### (一)火控系统定义

任何武器系统,其功能都是为了毁歼目标。因而提高现代武器系统全天候作战能力及其命中精度,是现代武器系统设计和研制的重要任务之一。为此,所有现代武器系统都配有性能极为优良的目标搜索跟踪、射击诸元计算、各种弹道条件和环境条件修正和控制火力兵器射击等仪器设备。这些仪器设备的总称称之为火力控制系统(Fire Control System),简称火控系统。也有把目标搜索跟踪子系统称为火视系统,而把数据处理系统和射击控制系统等称为火控系统。一般认为,火控系统应具有广义的定义,即把各种搜索跟踪子系统作为火控系统的传感器。火力系统与火控系统综合起来称为火力综合体。

火控系统的基本功能为:

- (1) 获取战场态势和目标的有关信息;
- (2) 计算射击参数,提供射击辅助决策并且显示作战参数;
- (3) 控制火力兵器射击,并且评估射击效果。

## (二)火控系统分类

火控系统按照控制射击兵器的性质分为:舰面火控系统、航空火控系统和地面火控系统。

地面火控系统有:

牵引高炮火控系统;

自行高炮火控系统;

地空导弹火控系统;

地炮火控系统;

坦克火控系统。

火控系统在结构上一般有两种形式,即模拟式和数字式,由于数字计算机技术的飞速发展,数字式火控系统将逐步取代模拟式火控系统。

一般将牵引和自行高炮武器系统称为高射火力综合体,简称高射综合体。本书的重点是该综合体中火控系统的仿真研究方法。

## (三)高射综合体的基本组成与一般工作原理

### 1. 高射综合体的基本组成

高射综合体主要由以下几部分组成:

目标搜索和跟踪系统;

火控计算机或称指挥仪;

火炮;

电源、牵引车及通信设备。

目标搜索和跟踪系统包括炮瞄雷达、光学测距机及跟踪系统、激光测距系统、红外热成像系统和电视跟踪系统。其任务主要用来发现目标、跟踪目标,向指挥仪连续不断地传输目标当前坐标和其它状态参数。

指挥仪主要功用是根据目标搜索跟踪系统传输来的目标现在坐标和其它状态参数,计算目标航迹参数,判定目标航迹,采用外推技术预测射弹与目标相遇点,求出相应的火炮射击参数,控制火炮射击。对于数字式指挥仪而言,因其具有记忆和逻辑判断能力,还可以实现多目标处理、目标航迹记录、目标威胁程度分析和提供射击辅助决策等功能。

### 2. 高射综合体一般工作过程

高射综合体对空中快速运动目标射击有以下三个特点:

第一,空中目标具有体积小、速度快、机动性强的特点。因此要求火控系统反应快、计算准确;

第二,由于目标是运动的,因而火炮射击时,炮管应指向“提前点”。所谓提前点,即目标与射弹相遇点。在炮弹发射瞬间,火控系统应向火炮提供与提前点位置相对应的射击参数;

第三,为确定提前点,除要测定目标现在坐标外,还要确定在射弹飞行时间 $t_f$ 内,目标运动的方式,以便为预测提前点确定目标运动假定。

高射综合体一般工作过程可分为以下各阶段:

第一,确定目标运动假定,即假定目标在射弹飞行时间内运动的轨迹。例如,假定目标在射弹飞行时间 $t_f$ 内作直线等速运动。

第二,依据假定确定目标运动参数。在一定假定条件下,确定描述目标运动规律的一些参数,我们把这些参数称为目标运动参数。如在直角坐标系中,上述假定条件下对应的运动参数是:

$$V = (v_x, v_y, v_z)$$

其中,  $(v_x, v_y, v_z)$  是目标运动速度的直角坐标分量。

第三,建立解相遇问题方程组。火控系统解相遇问题的作战态势,如图 1-6 所示。

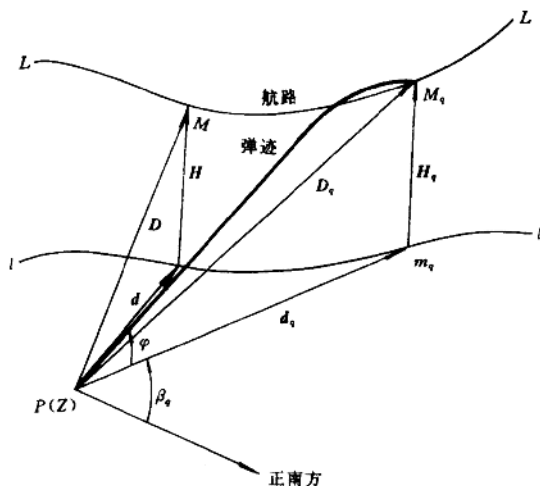


图 1-6 解相遇问题原理图

在上述假定条件下,得确定提前点  $M_q$  的矢量方程为:

$$D_q = D + V \cdot t_f \quad (1-1)$$

式中  $t_f$  为  $D_q$  的弹道函数,有

$$t_f = f(D_q) \quad (1-2)$$

方程(1-2)称为弹道方程,方程(1-1)和式(1-2)组成解相遇问题的矢量方程组。即

$$\begin{cases} D_q = D + V \cdot t_f \\ t_f = f(D_q) \end{cases} \quad (1-3)$$

第四,求解相遇问题的数量方程组。通常解相遇问题是由指挥仪来完成的。指挥仪并不直接解相遇问题的矢量方程,而是将矢量方程(1-3)投影到某一投影坐标系中,获得相应的数量方程组,通过解数量方程组,求得提前点坐标  $(\beta_q, e_q, t_f)$ 。因弹道方程(1-2)为单调函数,在收敛域内,其解唯一。

大多数情况下,采用直角坐标系作为解相遇问题矢量方程投影坐标系,所得数量方程组见(1-4)式。

模拟式指挥仪是通过机电模拟器件和解算随动系统自动求解数量方程组(1-4);数字式指挥仪则是通过数字计算机采用迭代法求解的。

第五,计算射击参数。对于采用触发引信炮弹作为射弹的火炮,其射击参数为:提前方位角  $\beta_q$  和射角  $\varphi$ 。

所需射击参数由指挥仪自动求得,并传至火炮。