



航天科技图书出版基金资助出版

# 雷达电子战系统 射频注入式半实物仿真

刘佳琪 吴惠明 饶 彬 等 著

王鹿受 审



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

# 雷达电子战系统 射频注入式半实物仿真

刘佳琪 吴惠明 饶 彬 等 著

王鹿受 审



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

雷达电子战系统射频注入式半实物仿真 / 刘佳琪等著. --北京:中国宇航出版社, 2016. 9

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0843 - 4

I. ①雷… II. ①刘… III. ①雷达电子对抗—半实物仿真系统 IV. ①TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 288076 号

责任编辑 曹晓勇 彭晨光

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版  
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号

邮编 100830

(010)60286808

(010)68768548

网址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com)

经销 新华书店

发行部 (010)60286888

(010)68371900

(010)60286887

(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部

(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2016 年 9 月第 1 版

2016 年 9 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230

开本 1/32

印张 12

字数 345 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0843 - 4

定价 98.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助20~30项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010) 68767205, 68768904

## 前 言

20 世纪 80 年代以来,面向雷达电子战的射频注入式半实物仿真技术逐步成熟。在战机作战,导弹突防,防空和导弹防御,以及电子对抗设备,电子支援措施和雷达告警接收机的研制、试验和定型鉴定等方面得到广泛应用。这项仿真技术具有多项优势:可按照设置的战情,以蒙特卡罗方式运行,试验数据的获取、统计和分析便捷、高效;可进行多种条件下的试验,包括靶场飞行试验的对比试验,以及飞行试验难于实现的极限条件仿真试验;系统构建和试验成本较低,只需要普通实验室环境,对参试设备无损伤。应当提及,射频注入式和射频辐射式半实物仿真技术,各有特点,相互补充,共同构成了雷达电子战实验室试验和评估(T&E)的支撑技术。

本书由中国航天科技集团公司一院十四所、南京长峰航天电子科技有限公司和国防科学技术大学相关科技人员共同编著,是历时近 20 年系统研制和工程应用实践的初步经验总结。全书共分 8 章:第 1 章、第 2 章由刘佳琪编写,第 3 章、第 4 章由吴惠明编写,第 5 章由王娟、于瑞亭编写,第 6 章由金科编写,第 7 章由尹光编写,第 8 章由饶彬编写。全书由刘佳琪统稿,王鹿受审阅了全稿。

编写过程中,中国航天科技集团公司一院十四所孟刚、周岩、宋扬东、陈福泰、赵政、任斌、刘向荣,南京长峰航天电子科技有限公司王文海、朱永前、寿文伟、孙永飞,国防科学技术大学肖顺平、王雪松、王伟、李永祯、冯德军、丹梅、刘进、艾小锋,中国电子装备试验中心周颖等同志,从篇章结构到具体技术内容,提供了翔实的技术资料,提出了宝贵的意见和建议。中国宇航出版社曹晓勇为本书的编辑出版付出了辛勤的努力。在此一并致以衷心的

感谢!

本书可供从事雷达和雷达电子战装备研究、设计、试验和评估的工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业教师和研究生的参考用书。由于雷达技术、电子侦察技术、电子对抗技术快速发展,新理论、新技术日新月异,加之作者技术水平有限,书中难免存在不足和错误之处,诚恳希望广大读者批评指正。

作 者

2014 年 12 月

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 概论 .....                  | 1  |
| 1.1 仿真的分类 .....                 | 1  |
| 1.2 雷达电子战仿真分类 .....             | 2  |
| 1.3 半实物仿真技术 .....               | 4  |
| 1.3.1 半实物仿真的定义与特点 .....         | 4  |
| 1.3.2 半实物仿真系统中的相似性原理与相似方法 ..... | 5  |
| 1.3.3 半实物仿真系统的组成 .....          | 9  |
| 参考文献 .....                      | 11 |
| 第 2 章 雷达电子战 .....               | 12 |
| 2.1 电子战概述 .....                 | 12 |
| 2.1.1 电子攻击 .....                | 12 |
| 2.1.2 电子侦察 .....                | 14 |
| 2.1.3 电子防护 .....                | 15 |
| 2.2 雷达系统 .....                  | 16 |
| 2.2.1 雷达类型 .....                | 16 |
| 2.2.2 雷达的原理框图 .....             | 17 |
| 2.2.3 雷达距离方程 .....              | 19 |
| 2.2.4 影响雷达作用距离的主要因素 .....       | 24 |
| 2.2.5 雷达调制 .....                | 30 |
| 2.2.6 脉冲调制 .....                | 31 |
| 2.2.7 连续波和脉冲多普勒雷达 .....         | 38 |
| 2.2.8 合成孔径雷达 .....              | 42 |
| 2.2.9 逆合成孔径雷达 .....             | 45 |

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| 2.3 组网雷达 .....                       | 55        |
| 2.3.1 组网雷达的定义 .....                  | 55        |
| 2.3.2 组网雷达的特点 .....                  | 56        |
| 2.3.3 双/多基地雷达 .....                  | 57        |
| 2.3.4 双基地雷达特点 .....                  | 59        |
| 2.3.5 双基地雷达探测性能分析 .....              | 62        |
| 2.3.6 双基地雷达的目标特性 .....               | 63        |
| 2.4 雷达电子战 .....                      | 65        |
| 2.4.1 雷达电子战概述 .....                  | 65        |
| 2.4.2 雷达侦察 .....                     | 67        |
| 2.4.3 雷达干扰 .....                     | 68        |
| 2.5 雷达电子战效能仿真与评估 .....               | 74        |
| 2.5.1 概述 .....                       | 74        |
| 2.5.2 雷达电子战效能的检测和评估技术 .....          | 76        |
| 参考文献 .....                           | 81        |
| <b>第3章 雷达电子战射频注入式半实物仿真总体技术 .....</b> | <b>83</b> |
| 3.1 概述 .....                         | 83        |
| 3.2 射频注入式半实物仿真试验系统的优势及应用 .....       | 85        |
| 3.2.1 试验系统的优势 .....                  | 85        |
| 3.2.2 试验系统的应用 .....                  | 86        |
| 3.3 雷达电子战态势和交战要素分析 .....             | 90        |
| 3.3.1 针对雷达的交战模拟需求说明 .....            | 90        |
| 3.3.2 针对 ESM 系统的交战模拟需求说明 .....       | 98        |
| 3.3.3 针对 ECM 系统的交战模拟需求说明 .....       | 108       |
| 3.4 射频注入式半实物仿真试验系统组成 .....           | 110       |
| 3.5 模拟各要素所需要的关键技术 .....              | 114       |
| 3.5.1 雷达目标模拟关键技术 .....               | 115       |
| 3.5.2 雷达发射信号模拟关键技术 .....             | 115       |
| 3.5.3 雷达无源干扰模拟关键技术 .....             | 116       |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 3.5.4 雷达接收机模拟关键技术 .....     | 116        |
| 3.5.5 雷达电磁环境辐射源模拟关键技术 ..... | 116        |
| 3.5.6 天线波束模拟关键技术 .....      | 117        |
| 3.6 典型工程案例 .....            | 117        |
| 3.7 小结 .....                | 118        |
| 参考文献 .....                  | 120        |
| <b>第4章 真实电磁环境模拟技术 .....</b> | <b>121</b> |
| 4.1 概述 .....                | 121        |
| 4.2 真实电磁环境模拟对象的特征 .....     | 121        |
| 4.2.1 雷达辐射源信号 .....         | 122        |
| 4.2.2 雷达有源干扰信号辐射源 .....     | 125        |
| 4.2.3 通信信号源 .....           | 126        |
| 4.3 典型电磁环境模拟系统组成 .....      | 132        |
| 4.4 信号产生及合成技术 .....         | 134        |
| 4.5 到达方向模拟技术 .....          | 138        |
| 4.6 到达幅度模拟技术 .....          | 142        |
| 4.6.1 天线方向图 .....           | 142        |
| 4.6.2 天线扫描方式模型 .....        | 145        |
| 参考文献 .....                  | 149        |
| <b>第5章 目标模拟技术 .....</b>     | <b>150</b> |
| 5.1 概述 .....                | 150        |
| 5.2 目标雷达截面积建模与计算 .....      | 150        |
| 5.2.1 目标雷达截面积 .....         | 151        |
| 5.2.2 定标体及典型目标的 RCS .....   | 159        |
| 5.2.3 复杂目标的 RCS .....       | 162        |
| 5.2.4 雷达目标极化特性 .....        | 167        |
| 5.2.5 目标 RCS 起伏模型 .....     | 174        |
| 5.3 雷达目标信号模拟的技术及途径 .....    | 176        |

|                         |                        |            |
|-------------------------|------------------------|------------|
| 5.3.1                   | 雷达目标回波模型 .....         | 176        |
| 5.3.2                   | 目标信号幅度模拟技术 .....       | 181        |
| 5.3.3                   | 目标时域特性及其模拟技术 .....     | 181        |
| 5.3.4                   | 目标频率特性及其模拟技术 .....     | 186        |
| 5.4                     | 小结 .....               | 190        |
| 参考文献 .....              |                        | 191        |
| <b>第6章 雷达模拟技术 .....</b> |                        | <b>192</b> |
| 6.1                     | 概述 .....               | 192        |
| 6.1.1                   | 雷达概念 .....             | 192        |
| 6.1.2                   | 雷达功能及应用 .....          | 196        |
| 6.1.3                   | 模拟雷达方法 .....           | 198        |
| 6.2                     | 射频注入式雷达模拟系统的组成 .....   | 201        |
| 6.2.1                   | 系统主要功能 .....           | 201        |
| 6.2.2                   | 组成部分说明 .....           | 202        |
| 6.2.3                   | 工作原理 .....             | 205        |
| 6.3                     | 射频注入式雷达模拟系统的实现方式 ..... | 207        |
| 6.3.1                   | 雷达发射信号模拟单元的实现方式 .....  | 208        |
| 6.3.2                   | 雷达天线波束模拟单元的实现方式 .....  | 209        |
| 6.3.3                   | AD变换和数字下变频器的实现方式 ..... | 212        |
| 6.3.4                   | 雷达数字信号处理单元的实现方式 .....  | 215        |
| 6.3.5                   | 本振信号产生单元的实现方式 .....    | 220        |
| 6.4                     | 常用雷达信号样式 .....         | 223        |
| 6.5                     | 雷达信号处理技术 .....         | 226        |
| 6.5.1                   | AD变换及AGC调整 .....       | 227        |
| 6.5.2                   | 数字下变频与滤波抽取 .....       | 227        |
| 6.5.3                   | 匹配滤波与脉冲压缩 .....        | 228        |
| 6.5.4                   | MTI/MTD处理 .....        | 231        |
| 6.5.5                   | 脉冲积累 .....             | 231        |
| 6.5.6                   | CFAR及目标检测 .....        | 232        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 6.5.7 距离测量 .....                             | 233        |
| 6.5.8 速度测量 .....                             | 235        |
| 参考文献 .....                                   | 236        |
| <b>第7章 无源干扰模拟技术 .....</b>                    | <b>237</b> |
| 7.1 概述 .....                                 | 237        |
| 7.2 杂波 .....                                 | 238        |
| 7.2.1 杂波简介 .....                             | 238        |
| 7.2.2 面杂波 .....                              | 239        |
| 7.2.3 体杂波 .....                              | 258        |
| 7.2.4 杂波信号模拟 .....                           | 267        |
| 7.3 箔条干扰的一般特性 .....                          | 279        |
| 7.3.1 箔条干扰概述 .....                           | 279        |
| 7.3.2 箔条的有效散射面积、遮挡效应以及尺寸<br>对有效散射面积的影响 ..... | 281        |
| 7.3.3 箔条的极化效应 .....                          | 287        |
| 7.3.4 箔条的频率响应及回波信号频谱 .....                   | 291        |
| 7.4 杂波和箔条模拟工程实现 .....                        | 295        |
| 7.4.1 信号采集模块 .....                           | 297        |
| 7.4.2 长延迟组件 .....                            | 300        |
| 7.4.3 高分辨延迟组件 .....                          | 300        |
| 7.4.4 多普勒调制组件 .....                          | 302        |
| 参考文献 .....                                   | 304        |
| <b>第8章 雷达电子战对抗效果评估技术 .....</b>               | <b>306</b> |
| 8.1 概述 .....                                 | 306        |
| 8.2 雷达电子战对抗效果评估的内涵和基本准则 .....                | 307        |
| 8.2.1 雷达电子战效果评估的内涵 .....                     | 307        |
| 8.2.2 雷达电子战效果评估的基本准则 .....                   | 308        |
| 8.3 雷达电子战射频注入式仿真试验数据的预处理 .....               | 312        |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 8.3.1 | 仿真数据录取 .....             | 313 |
| 8.3.2 | 仿真数据预处理 .....            | 314 |
| 8.4   | 单部雷达电子战系统对抗性能评估 .....    | 319 |
| 8.4.1 | 搜索阶段评估指标的模型 .....        | 322 |
| 8.4.2 | 确认阶段评估指标的模型 .....        | 325 |
| 8.4.3 | 跟踪阶段评估指标的模型 .....        | 326 |
| 8.4.4 | 失跟与再截获阶段评估指标模型 .....     | 330 |
| 8.4.5 | 多假目标评估指标模型 .....         | 331 |
| 8.5   | 组网雷达电子战系统对抗性能评估 .....    | 333 |
| 8.5.1 | 组网雷达的固有评估指标 .....        | 334 |
| 8.5.2 | 搜索阶段评估指标 .....           | 341 |
| 8.5.3 | 确认阶段评估指标 .....           | 345 |
| 8.5.4 | 跟踪阶段评估指标 .....           | 346 |
| 8.5.5 | 识别阶段评估指标 .....           | 349 |
| 8.6   | 双/多基地雷达电子战系统对抗性能评估 ..... | 350 |
| 8.6.1 | 双/多基地雷达的固有评估指标 .....     | 350 |
| 8.6.2 | 搜索阶段评估指标的模型 .....        | 351 |
| 8.6.3 | 跟踪阶段评估指标的模型 .....        | 352 |
| 8.6.4 | 识别阶段评估指标 .....           | 353 |
| 8.7   | 雷达电子战对抗系统评估实例 .....      | 353 |
| 8.7.1 | 单部雷达评估系统 .....           | 354 |
| 8.7.2 | 组网及双/多基地雷达评估系统 .....     | 364 |
| 参考文献  | .....                    | 370 |

# 第 1 章 概 论

仿真技术是以相似原理、信息技术、系统理论及其他有关应用领域的专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型（物理的，数学的或非数学的）对实际的或者设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。它为进行实际系统的研究、分析、决策、设计，以及对专业人员的培训提供了一种先进的方法。

系统仿真技术作为分析和研究系统行为、揭示系统运动规律的一种重要手段，随着 20 世纪 40 年代第一台计算机的诞生而迅速发展起来。特别是近些年来，随着系统科学研究的深入，控制理论、计算技术及信息处理技术的发展，计算机软件、硬件技术的突破，以及各个领域对仿真技术的迫切需求，使得系统仿真技术有了很多突破性的进展，在理论研究、工程应用、仿真工程和工具开发环境等许多方面都取得了令人瞩目的成就，形成了一门独立发展的综合性学科。

半实物仿真作为系统仿真技术的一个分支，涉及的领域非常广泛，包括机电技术、控制技术、计算机及其接口技术等。半实物仿真是工程领域内一种应用较为广泛的仿真技术，是对计算机仿真回路中接入部分实物进行的试验，因而更接近实际情况。这种仿真试验需要将对象实体某组成部分的动态特性通过建立数学模型和软件，在计算机上运行，与另外组成部分的实物构成回路。

## 1.1 仿真的分类

根据不同的分类标准，可将系统仿真进行不同的分类。

根据被研究系统的特征可分为两大类：连续系统仿真及离散事

件系统仿真。

连续系统仿真是指对那些系统状态量随时间连续变化的系统的仿真研究,包括数据采集与处理系统的仿真。这类系统的数学模型包括连续模型(微分方程)、离散时间模型(差分方程等)及连续-离散混合模型。

离散事件系统仿真是指对那些系统状态只在一些时间点上由于某种随机事件的驱动而发生变化的系统进行的仿真试验。这类系统的状态量是由于事件的驱动而发生变化的,在两个事件之间状态量保持不变,因而是离散变化的,称为离散事件系统。这类系统的数学模型通常用流程图或网络图来描述。

根据系统仿真所采取的模型划分,可将系统仿真分为以下三类:物理仿真、半实物仿真和数学仿真。

1) 物理仿真(又称实物仿真)。它是以几何相似或物理相似为基础的仿真。

2) 半实物仿真(又称数学-物理仿真)。它是把数学模型、物理模型(或实际分系统)联合在一起的仿真。

3) 数学仿真。它是以数学模型为基础的仿真,即用数学模型代替实际的、设计中的或概念中的系统进行试验,模仿系统实际情况的变化,用定量化的方法分析系统变化的全过程。

## 1.2 雷达电子战仿真分类

雷达电子战仿真分为如下三类:全实物物理仿真、半实物物理仿真和数学(计算机)仿真。

1) 全实物物理仿真就是参加试验的设备,包括试用设备和被试设备都是物理存在的、实际的设备。

2) 半实物物理仿真就是被试设备是实际设备,而试验环境则是通过仿真设备用物理方式生成的。

在半实物物理仿真中按照射频信号注入的方式不同可以分为注

入式射频仿真和辐射式射频仿真。

注入式射频仿真模拟器把每个仿真的脉冲数据集变换为射频信号，并注入到被测试系统的射频级。这种类型的模拟器主要用于测试以下接收系统：比幅测向系统，比相测向系统，天线扫描、频率分集系统，以及频率调谐系统等。注入式射频仿真模拟器要求使用昂贵的射频组件。虽然输出信号电平相对较小，但是多波段多端口的配置要求耗资可观的功率衰减和合成器件，增加了对信号放大器的要求。另外，每个频段的每个端口都要求可编程的衰减器。

辐射式射频仿真模拟器通过天线辐射射频脉冲，能用于所有类型的天线和接收系统。因为没有直接的连接，所以接口问题比较小。但是，受接收、发射天线位置的限制，辐射源在方位和仰角上的运动是不容易仿真的。与注入式射频仿真模拟器一样，辐射式射频仿真模拟器也要求昂贵的射频组件。如果与被测试系统之间的距离比较远，还要受到功率放大的严重影响。另外，外场的辐射也会带来一些安全性和保密性的问题。

3) 数学(计算机)仿真就是试验环境和参试设备的性能和工作机理，都是由数学模型和各种数据表示的，试验过程则由计算机软件控制，并通过计算机的演算得到试验结果。在计算机上建立数学模型，模拟雷达电子战系统中的雷达电磁信号环境、雷达分系统和干扰系统等，按照仿真时间的要求分为非实时信号仿真和实时信号仿真两种。实时信号全数字仿真模拟器采用可编程的脉冲序列生成器，实时产生数字脉冲序列数据。产生的数据集通过脉冲数据总线与被测试系统接口，每个数据集包括了被描述脉冲的参量。这种方法在有频率调谐和天线扫描的功能要求时稍复杂，但是对于训练用模拟器，此方法又具有体积小、灵活性好及通用性强的明显优势。

雷达电子战系统数学仿真一般有两种方法：一种是功能仿真；一种是信号仿真。功能仿真中要仿真雷达发射、目标、回波、杂波和干扰等信号的幅度信息，而信号仿真不仅包括幅度信息，还包括相位信息。实现雷达电子战系统功能仿真的主要理论基础是雷达距

离方程,其实质就是在数字计算机上,对一个已知概率的随机事件,用蒙特卡罗统计试验法进行试验,从而得到该随机事件的一个模型。信号仿真就是要逼真地复现既包含幅度又包含相位的信号,复现这种信号的发射、传输、反射,杂波与干扰信号叠加以及在接收机内进行的滤波、抗干扰、信号处理直至门限检测这一全过程。这里的“信号”是指零中频信号,或者是经零中频处理或等效零中频处理的信号,既包括幅度信息,又包括相位信息。

### 1.3 半实物仿真技术

半实物仿真技术是在第二次世界大战以后,伴随自动化武器系统的研制而迅速发展起来的。由于导弹武器系统的实物试验代价高昂,而半实物仿真技术能为导弹武器的研制提供最优的手段,在不做任何实物飞行的条件下对导弹全系统进行综合测试。因而从20世纪60~70年代起,以美国为首的西方发达国家建立了一批半实物仿真实验室。根据美国的统计,采用仿真技术后,导弹的试验周期缩短了30%~40%,节约实弹数43%左右。

计算机技术的高速发展为半实物仿真提供了技术上的支持。半实物仿真使用的计算机经历了从专用仿真计算机到通用数字仿真计算机的发展过程。

#### 1.3.1 半实物仿真的定义与特点

所谓半实物仿真(HILS, Hardware in the Loop Simulation)是指在仿真实验系统的仿真回路中接入部分实物的实时仿真。半实物仿真是系统仿真的一个重要分支,这种仿真中的仿真时间标尺必须与实际系统标尺相同。

半实物仿真同其他类型的仿真方法相比,具有实现更高真实度的可能性,是仿真方法中置信度最高的一种仿真方法。从系统的观点来看,半实物仿真将部分真实的设备与器件实物接入系统中,从

而使仿真在更加真实的环境中进行,也使功能部件在满足系统整体性能指标的环境中得到检验,因此半实物仿真是提高系统设计可靠性和保证产品研制质量有力的、必要的手段。

半实物仿真是实时仿真理论的一种典型应用。其显著特点之一是“硬件在回路中的仿真”。由于仿真计算机与实际部件相连,所以仿真计算机就必须在与实际系统同步的条件下获取动态的输入信号、数据,并实时产生动态的输出响应。这个特点强调了仿真的实时性,因此实时性是进行半实物仿真的必要前提。半实物仿真的实时性分析也是半实物仿真的重要研究课题,主要包括以下几个方面。

1) 实时仿真算法。主要是指在仿真计算中用到的实时积分算法、快速函数插值算法等。数学界在这方面的研究已经比较成熟。

2) 仿真系统的时序分析。时序分析主要研究仿真中各步操作的次序和时间约束的关系。实时仿真从本质上讲是多帧时的仿真,所以,处理好仿真帧时之间的关系,合理分配仿真任务,可以提高仿真系统的实时性。

3) 硬件引起的时间延迟和补偿。这种延迟是指由于对连续系统离散化处理,对 A/D 数据采样采取零阶保持,这些都相当于引入了时间的延迟。这些延迟是由数据采集硬件的性能决定的。

4) 分布式计算机仿真系统中的数据通信延迟。这部分延迟是在各个仿真节点之间传输数据、信号的过程中造成的,在多节点的分布式仿真系统中,如果处理不好各节点之间的实时通信问题,这部分时间延迟将给仿真的实时性带来严重影响。现在复杂的仿真系统都是多节点的分布式仿真系统,因此,如何减少这部分的时间延迟成为了研究复杂仿真系统的关键。光纤反射内存网是目前采用比较多的网络,可以实现系统的实时性。

### 1.3.2 半实物仿真系统中的相似性原理与相似方法

相似理论是系统仿真学科最主要的基础理论之一。相似是广泛存在而又十分重要的现象。计算机仿真模型的选择、建造和计算,