

面向虚拟试验的 虚拟环境构建技术

林连雷 孙 超 许永辉 姜守达 等 / 著

Virtual Environment
Construction Techniques
for Virtual Tests

非外借



科学出版社

面向虚拟试验的虚拟环境 构建技术

林连雷 孙 超 许永辉 姜守达 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对武器装备虚拟试验的需求,介绍了面向虚拟试验的虚拟环境构建技术。本书的主要内容分为两部分:虚拟综合自然环境和虚拟环境效应。在虚拟综合自然环境构建方面,主要介绍了虚拟大气、虚拟地形两类自然环境的构建方法,并给出了具体的基于 SEDRIS 的大气、地形环境数据的表示与交换方法。在虚拟环境效应模型方面,介绍了常用的典型天气下电磁波和激光在大气中的传输效应以及车辆在多类地形中的通过效应。本书不仅讲述了各类虚拟环境和环境效应的建模方法,更面向应用详细叙述了各类环境资源在虚拟试验体系中的实现方法。

本书对从事虚拟试验、虚拟环境建模等相关领域的科研人员有参考价值,亦可作为高等院校虚拟试验和仿真建模等相关专业的高年级本科生或研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

面向虚拟试验的虚拟环境构建技术 / 林连雷等著. —北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-058618-6

I. ①面… II. ①林… III. ①虚拟技术—应用—武器装备—武器试验
IV. ①TJ01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 198832 号

责任编辑: 王喜军 / 责任校对: 贾伟娟
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 壹选文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 18

字数: 360 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来, 试验与测试领域的一个重要的发展方向就是“虚拟试验技术”。随着仿真建模技术、计算机软硬件技术的发展, 利用虚拟试验代替真实试验的情况已日益增加。尤其是在国防领域, 近年来国家提出了“武器装备要具备复杂环境条件下的作战能力”, 某些特定的复杂环境(尤其是复杂自然环境)在实际试验中很难遇到, 物理模拟又非常困难, 所以虚拟试验技术就成为实现武器装备复杂环境条件下试验验证的重要技术手段。虚拟试验体系结构、虚拟环境是虚拟试验领域两项重要研究内容, 它们与具体试验无关, 属于支持虚拟试验的通用核心技术。

本书作者所在的科研团队是由哈尔滨工业大学姜守达教授带领的试验与测试技术团队, 我们在近十年来一直从事虚拟试验技术相关的研究工作。在虚拟试验体系结构方面, 我们在借鉴 HLA、TENA 等先进体系结构的基础上, 结合我国试验训练领域发展现状, 提出并开发了通用虚拟试验体系结构 HIT-TENA。它是一个通用的虚拟试验软件支撑平台, 能够支持从试验前的试验资源封装接入、试验系统构建, 到试验中的运行控制、数据采集、数据观察显示, 再到试验后的数据分析存储等全过程。目前, 该体系结构已经成功应用于航天、船舶、海军靶场等多个试验系统中。本书构建的虚拟环境资源就是针对该虚拟试验体系结构的。

本书是近年来作者所在科研团队在虚拟环境方面研究的总结, 从虚拟环境建模方法、虚拟环境资源构建方法, 到虚拟试验系统中的具体应用多个层面来阐述虚拟环境构建技术, 主要讲述了两类自然环境及典型的环境效应的构建方法。第 1 章、第 6 章和第 7 章由林连雷负责, 讲述了虚拟试验中常用的电磁波传输环境效应和激光传输环境效应资源的构建方法; 第 2 章由杨京礼负责, 讲述了综合自然环境数据表示与交换规范 SEDRIS, 它是构建通用化、标准化的虚拟环境资源的基础; 第 3 章和第 4 章分别由魏长安、许永辉负责, 讲述了虚拟大气环境和虚拟地形环境的构建方法; 第 5 章由孙超负责, 讲述了由基础环境和特殊环境合成复杂环境的方法。另外, 本书部分内容还得到本团队指导的研究生的帮助, 他们是吴扬、闫芳、李玲玉、丁蔚、苏文圣、赵晓斌、董昊。书中的部分研究内容得到了国家自然科学基金等项目的支持和资助。在此, 向这些老师、学生以及相关资助项目表示诚挚感谢。

由于作者水平有限,以及所做研究和开发工作的局限性,书中难免出现疏漏,恳请广大读者批评指正。

林连雷

2018年5月

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 综合自然环境建模与仿真	2
1.2.1 综合自然环境的定义	2
1.2.2 综合自然环境建模的发展历程	4
1.3 虚拟试验体系结构	6
1.3.1 HLA 体系结构	6
1.3.2 TENA 体系结构	7
1.3.3 HIT-TENA 体系结构	9
1.4 HIT-TENA 中的虚拟环境构建	10
参考文献	12
第2章 综合自然环境的数据表示与交换	14
2.1 SEDRIS 概述	14
2.1.1 SEDRIS 目标	14
2.1.2 SEDRIS 组成结构	15
2.1.3 SEDRIS 运行原理	18
2.1.4 SEDRIS 应用现状	19
2.2 SEDRIS 环境数据表示	20
2.2.1 DRM	20
2.2.2 EDCS	24
2.2.3 SRM	34
2.3 SEDRIS 环境数据交换	36
2.3.1 STF	36
2.3.2 API	37
2.4 SEDRIS 工具	39
2.4.1 SEDRIS Focus	39
2.4.2 SEE-IT	44
参考文献	50

第3章 虚拟大气环境构建技术	51
3.1 虚拟大气环境发展历程	51
3.2 虚拟大气环境构建思路	53
3.3 大气数值模式	54
3.3.1 中尺度大气数值模式	54
3.3.2 MM5 模式的组成	55
3.3.3 MM5 模式的运行	63
3.3.4 MM5 模式辅助软件	66
3.4 基于 SEDRIS 的大气环境数据表示与交换	67
3.4.1 基于 SEDRIS 的大气数据表示	67
3.4.2 大气环境数据插值计算	71
3.4.3 基于 SEDRIS 的大气环境数据交换技术	72
3.5 虚拟大气环境资源生成软件	74
3.5.1 大气环境数据高度计算流程	74
3.5.2 需求分析	75
3.5.3 静态模型	77
3.5.4 动态模型	77
3.6 虚拟大气环境资源构建实例	79
3.6.1 基于 MM5 模式的大气环境数据生成	79
3.6.2 符合 SEDRIS 的虚拟大气环境资源生成	79
参考文献	83
第4章 虚拟地形环境构建技术	85
4.1 虚拟地形环境发展历程	85
4.2 虚拟地形环境数据源及预处理方法	86
4.2.1 地形环境数据源	87
4.2.2 地形环境数据预处理	88
4.3 基于 SEDRIS 的地形环境数据表示与交换	89
4.3.1 基于 SEDRIS 的地形环境数据表示	89
4.3.2 基于 SEDRIS 的地形环境数据交换	93
4.4 地形通过环境效应构建	95
4.4.1 直线行驶性能分析	95
4.4.2 转向行驶性能分析	97
4.4.3 稳定性性能分析	100
4.4.4 克服垂直壁性能分析	100
4.4.5 克服壕沟性能分析	102

4.4.6 路径规划方法分析	103
4.5 虚拟地形环境资源软件开发	105
4.5.1 虚拟地形环境构建软件	105
4.5.2 地形环境资源组件	111
4.5.3 地形通过环境效应组件	116
4.6 虚拟地形环境构建实例	123
4.6.1 虚拟地形环境构建	124
4.6.2 虚拟地形环境服务	128
4.6.3 地形通过效应服务	130
参考文献	135
第5章 复杂环境数据合成技术	137
5.1 特殊环境数据生成方法	137
5.1.1 特殊大气环境数据生成方法	138
5.1.2 特殊电磁环境数据生成方法	164
5.1.3 特殊地形环境数据生成方法	166
5.2 基础环境数据与特殊环境数据合成方法	168
5.2.1 虚拟自然环境想定空间构建方法研究	168
5.2.2 环境数据在空间上的三维插值方法	171
5.2.3 环境数据在不同空间上的平移方法	173
5.3 环境数据合成软件设计	174
5.3.1 环境数据合成思路	174
5.3.2 用例分析	175
5.3.3 静态模型	177
5.3.4 动态模型	178
5.4 环境数据交互组件设计	180
5.4.1 需求分析	180
5.4.2 静态模型	182
5.4.3 动态模型	183
5.5 复杂环境合成应用实例	184
5.5.1 应用实例描述	184
5.5.2 环境数据生成	184
5.5.3 环境数据交互	190
参考文献	193
第6章 电磁波传输环境效应构建技术	195
6.1 虚拟试验中的电磁波传输模型发展历程	195

6.2 电磁波传输环境效应模型	196
6.2.1 理想空间传输模型	196
6.2.2 晴天传输模型	198
6.2.3 雾天传输模型	199
6.2.4 雨天传输模型	200
6.2.5 雪天传输模型	202
6.2.6 电磁波传输环境效应模型测试	203
6.3 电磁波信号模型	205
6.4 电磁波传输环境效应组件设计	209
6.4.1 需求分析	209
6.4.2 概要设计	210
6.4.3 界面设计	211
6.5 电磁波传输虚拟试验系统	213
6.5.1 系统组成	213
6.5.2 虚拟导弹组件设计	217
6.5.3 虚拟舰船组件设计	221
6.5.4 系统运行	229
参考文献	234
第7章 激光传输环境效应构建技术	236
7.1 虚拟试验中的激光传输模型发展历程	236
7.2 激光传输环境效应模型	237
7.2.1 中低散射介质传输效应模型	238
7.2.2 高散射介质传输效应模型	245
7.3 激光传输环境效应组件设计	250
7.3.1 需求分析	250
7.3.2 静态模型	252
7.3.3 界面设计	254
7.4 激光传输虚拟试验系统	257
7.4.1 系统组成	257
7.4.2 激光照射器组件	260
7.4.3 虚拟坦克组件	264
7.4.4 激光制导导弹组件	267
7.4.5 系统运行	272
参考文献	276

第1章 绪 论

1.1 概 述

进入 21 世纪以来,各种技术快速发展,信息化和虚拟测试技术被引入军工测试领域,并被不断开发应用,现代军事武器测试系统在智能化、网络化、虚拟化等方面不断取得突破进展。在各项技术中,虚拟试验技术成为测试领域的关键技术,在军工产品研制和试验过程中,虚拟试验成为与实物试验同样重要的一种试验方法^[1]。现在的虚拟试验已经不单指由全虚拟的试验资源构成的试验系统,而是包含虚拟试验资源在内,由实物、半实物等试验资源构成的联合试验系统。虚拟试验技术是一门新兴学科,结合了现代数学、系统工程以及计算机技术相关知识,是美国国防部公布的 22 项关键技术之一,并被美国列为国防科技七大牵引技术之一^[2]。虚拟试验技术是以建模与仿真技术、计算机网络通信技术、可视化与虚拟现实技术为基础,在虚拟的条件下完成对被试品测试、试验的一类技术^[3]。随着现代科技的深入发展,作战环境的逐渐复杂化,仅仅依靠理论数据分析和真实的试验分析已经不能满足当前作战系统的需求。尤其是在军事测试的实物试验中,存在着自然环境因素复杂不可控制、人物力成本消耗大、测试周期长、测试环境和参数不利于保密等缺点^[4],因此通过真实的作战试验来验证作战效能已经十分困难。资料显示,在成本和试验周期两方面,采用虚拟试验技术,研制成本可减少 10%~40%,试验数量可降低 30%~60%,研制周期可缩减 30%~40%^[5]。与传统试验相比,虚拟试验技术存在着诸多优点,因此利用虚拟试验技术构建虚拟试验系统,开展对各种武器作战效能研究及作战测试,已成为当前研究测试过程中一条便捷、高效的途径^[6]。

技术先进国家在虚拟试验技术方面都投入了大量的人力和物力。自 20 世纪 60 年代起,欧洲的军事强国及美国都开始了对虚拟试验技术的研究,并建立了相关的实验室,进行虚拟试验系统的研制开发。美国建立了埃格林空军基地光电仿真试验系统、基于空军电子战评估系统(air force electronic warfare system, AFEWS)的光电仿真试验系统等先进的虚拟仿真系统^[7]。美国国防部提出了系统级的联合体系结构(joint modeling and simulation systems, JMASS),该体系结构提供一个仿真支持环境,能很好地支持电子战环境下的武器系统试验和评估^[8],已形成一批可应用于实用工程的成果。进入 21 世纪以来,美国国防部在 FI2010

工程中提出了试验与训练使能体系结构 (test and training enabled architecture, TENA), 为试验靶场、训练靶场及其他建模与仿真活动提供一个能够实现互操作、重用和可组合的公共体系结构, 代表该领域的最高水平。

1.2 综合自然环境建模与仿真

各种武器装备都要在一定的自然环境中运行和使用, 武器装备所处的自然环境会对其作战效能产生复杂的影响。随着当今科技水平的提高, 武器装备的性能和作战效能日渐提高, 高技术武器受自然环境的制约和影响变得越来越突出。为此, 自然环境对高技术战争的影响是关键甚至决定性的, 它不仅直接影响到战争中武器的选择和战术使用, 而且会直接影响到战争的进程和走向, 这在海湾战争、科索沃战争和伊拉克战争中都已明显地体现出来。像作为自然环境的重要组成部分的大气环境, 由风、气温、气压、云、雾等诸多基本要素构成。在大气环境中使用的武器装备会受风、云、雨、雪等常规气象要素和宏观天气环境的影响, 如飞行器的飞行路线、飞行姿态会因风而产生变化; 发动机的动力会受到大气温度的影响, 进而影响飞行器的飞行安全、准确入轨以及命中精度; 大气中武器装备的能见度会受到云、雾的影响^[9]。此外, 高技术武器装备, 如光电武器、巡航导弹、超视距雷达等, 还对云雨粒子、气溶胶、低空风切变、大气湍流等大气环境要素和天气现象的影响十分敏感^[10]。图 1.1 给出了综合自然环境的组成示意图。

在虚拟试验中, 为了获取更符合实际情况的试验结果, 需要为被试品建立虚拟环境, 以能够提供与真实情况相近的环境数据; 还有一些试验, 直接以研究环境对被试品的影响为目的^[11], 在这种情况下更加需要建立一个灵活、多样的虚拟环境, 为被试品提供各种不同的环境条件, 甚至是自然界中罕见的极端环境条件。虚拟试验运行过程中若没有运行自然环境的支持, 只能模拟极为理想的试验条件, 试验结果对实际效果的参考价值明显降低, 因此, 为提高虚拟试验对真实作战情景模拟的逼真度和可信度, 在虚拟试验中, 必须添加自然环境的支持。综合自然环境 (synthetic natural environment, SNE) 包括大气、海洋、空间、地形四大部分^[12], 应用于虚拟试验的综合自然环境建模与仿真技术已经成为国内外先进分布仿真领域的一项关键技术, 是众多武器装备仿真中一个必不可少的重要组成部分。

1.2.1 综合自然环境的定义

综合自然环境就是大气、海洋、空间、地形四个领域以及它们之间内部动态的物理环境在计算机中的表示, 既包括表示自然环境要素以及它们对军事系统影

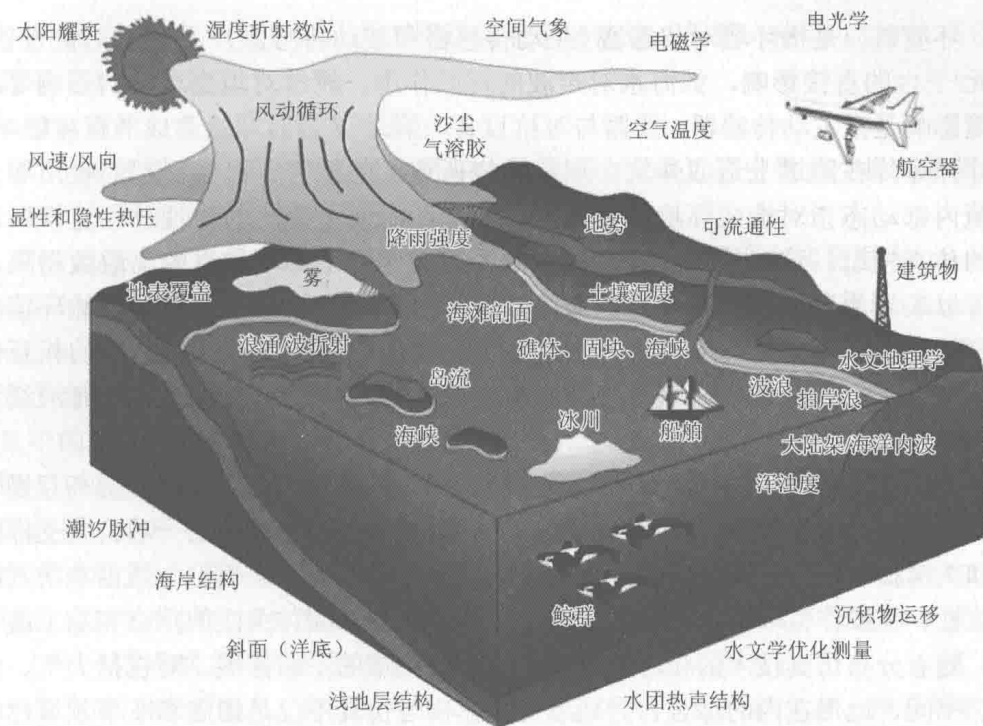


图 1.1 综合自然环境的组成

响的数据和模型，还包括军事系统对环境变量影响的模型^[12, 13]。图 1.2 定义了一个全功能的综合自然环境参考模型。其中，虚拟环境包括环境效应、环境影响和环境内部动态三部分。

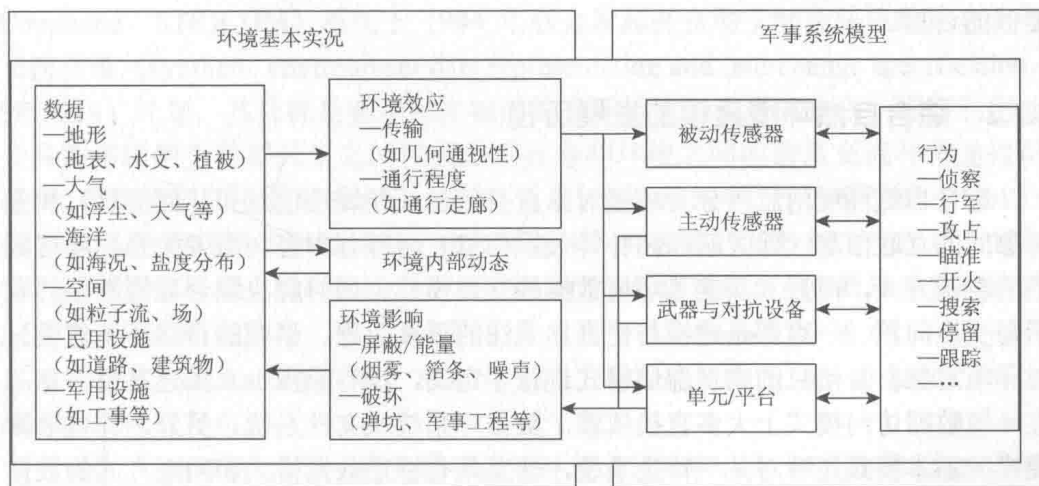


图 1.2 综合自然环境参考模型

环境效应是指环境对传感器（主动传感器和被动传感器）、武器与对抗设备、单元/平台的直接影响，如海水对声波的耗散作用、泥地对坦克运动的影响等。环境影响是指主动传感器、武器与对抗设备、单元/平台对环境造成的直接影响，如炸弹爆炸在跑道上造成弹坑、坦克燃烧所造成的烟雾、民船引起的噪声等。环境内部动态指对造成环境状态变量在空间和时间上变化的物理过程建模所得到的仿真模型，这些物理过程可以表示为时间序列上环境状态的离散数据集，也可以表示为确定性或随机性的微分或差分方程形式的数学模型。自然环境的内部动态包括环境某一领域内部的动态变化，包括环境不同领域之间的相互作用，如降水会造成地表土壤湿度和强度变化，海面风力的变化会造成海浪级别变化，等等。

综合自然环境建模是分布式建模与仿真的必然需求，也是实现和提高互操作性、可重用性和可信性的关键，已经成为现代先进建模与仿真的一项公共支撑技术和关键核心技术。对于现代先进的建模与仿真技术而言，模型、数据和仿真的可信性、互操作性以及可重用性一直都是建模与仿真团体关注的焦点和追求的目标。随着分布仿真技术的相对成熟和仿真应用领域的不断拓展，对包括大气、海洋、空间、地形在内的综合自然环境进行建模与仿真不仅是国防和军事领域建模与仿真的迫切应用需求，而且是获得和提高建模与仿真可信性、互操作性以及可重用性技术的关键。为此，美国国防部建模与仿真办公室（Defense Modeling and Simulation Office, DMSO）在 1995 年发布的建模与仿真总体计划（modeling and simulation master plan, MSMP）中，将获得权威的综合自然环境描述和表示列为国防部建模与仿真的主要目标之一^[14]。北大西洋公约组织（North Atlantic Treaty Organization, NATO）（简称北约）在其建模与仿真领域计划中也定义了类似的目标。

1.2.2 综合自然环境建模的发展历程

综合自然环境信息可分为环境对象自身信息（即属性信息和几何信息）和各对象间的互联信息（即关联和拓扑等关系信息）两部分内容。前者关系到环境数据的表示方式，而后者决定了环境数据的交换模式。如何解决综合环境数据的表示与交换问题，一直都是建模与仿真界关注的重要问题。早期的自然环境建模只对环境对象自身信息的物理存储格式进行了定义，没有或极少来描述互联信息；在环境数据访问模式上大多直接依赖于数据库系统或文件系统。另外，环境数据建模的基本模式是针对某一特定系统，开发具有特定数据格式和实现方式的数据库，这种没有数据表示模型和统一规范的数据编码标准极大地阻碍了数据的共享，因而也导致了环境数据使用效率低、重复建设率高等问题的急剧凸显。

在 20 世纪 80 年代早期,美国国防部着手解决这一问题,启动了 2851 项目。2851 项目的目标是:

- (1) 重用以前生成的数据库系统;
- (2) 对于现有的各种仿真器数据库,尽量减少交换过程中数据交换的数量;
- (3) 能够为用户提供更好的服务。

作为 2851 项目的标志性成果,MIL-STD-1820 定义的通用变换数据库(generic transformed data base, GTDB)和 MIL-STD-1821 定义的标准仿真器数据库(standard simulator data base, SSDB)及 SSDB 交换格式(SSDB interchange format, SIF)提高了自然环境数据库的重用性和交换效率^[15]。其中,SSDB 是美国国防部训练仿真中的数据库中心存储,原始数据以 SIF 格式集成于 SSDB,用户从 SSDB 中提取 SIF 或 GTDB 格式的数据。SIF 的环境模型将综合环境数据分为模型数据、地物数据、地形数据和纹理数据四大类,并对数据物理存储格式和使用格式进行了严格的定义。后来美国陆军的近战战术训练(close combat tactical trainer, CCTT)系统将 SIF 标准扩充成为 SIF++标准。但是,无论 GTDB 还是 SIF 都有以下缺点:

- (1) 不具备数据模型和数据编码规范,无法进行扩充和修改;
- (2) 无法实现大气、海洋、空间、地形等基本环境数据和文本、声音等数据的表示;
- (3) 无法对各对象的关联性和拓扑信息进行表示;
- (4) 不满足环境数据的互操作性。

在认识到环境数据的表示和交换的重要性后,美国国防部建模与仿真办公室、美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)和美国军队模拟训练指挥(Simulation Training and Instrumentation Command, STRICOM)系统于 1994 年联合发起并资助了综合环境数据表示与交换规范(synthetic environment data representation and interchange specification, SEDRIS)计划,其目标是实现对完整的综合环境数据模型的建立,进而利用此公共数据模型为数据元素之间以及数据元素和环境之间的信息交流与传递提供机制,最终实现环境数据的表示、描述、重用、交换及共享^[16]。简单地说,SEDRIS 作为 MSMP 中环境表示目标的一项支撑技术,对各类环境数据进行表示,是各种不同环境数据格式的转换中介。SEDRIS 历经数据建模、API 原形开发和格式原形开发三个研发阶段,于 1996 年 6 月正式发布 Release 1.0 版本;1999 年 1 月正式发布 Release 2.0 版本;2000 年完成了标准化工作;2004 年发布了 4.1.0 版本的软件开发包。

如今,SEDRIS 作为一种完整有效的环境表述语言,与其配套的工具软件日趋成熟,成为欧美国家大规模联合作战系统的技术支持和重要组成部分,如美国陆军联合仿真系统(joint simulation system, JSIMS)、美国国防部主持的联合作战

仿真(joint warfare simulation, JWARS)系统、美军作战模拟(war simulation, WARSIM)系统等。2005~2006年, SEDRIS 被国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)和国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)纳为正式标准。在 TENA 体系中, 其综合自然环境的表示与交换也采用 SEDRIS 规范。

1.3 虚拟试验体系结构

虚拟试验体系结构是构建虚拟试验系统的重要支撑, 它与具体试验内容和应用领域无关, 但规范了试验成员的接口、负责试验成员间的信息交互, 将各试验成员连接起来组成系统, 并提供通用的试验过程管理控制、试验数据采集分析、数据显示等功能。发展至今, 成熟的可用于虚拟试验的体系结构有高层体系结构(HLA)和 TENA。HLA 多用于纯仿真和全虚拟试验, 即系统的所有成员均为虚拟的仿真模型, 而 TENA 是在 HLA 的基础上发展起来的, 可以作为 HLA 在试验与训练领域的特殊应用。TENA 与 HLA 的最大区别在于 TENA 可以支持实物、半实物和虚拟试验资源的联合试验。

1.3.1 HLA 体系结构

仿真与建模 HLA 是美国国防部 MSMP 倡导建立的建模与仿真公共技术框架的一部分^[17]。HLA 是在 DSI、ALSP 的基础上发展起来的, 采用 HLA 的技术体制, 可以将单个仿真应用连接起来组成一个大型的虚拟世界。在这个虚拟世界中, 可以进行大规模的多对多部队对部队的战术、战略原则研究和演练仿真; 可以提供多武器系统的体系攻防对抗仿真和武器性能评估仿真; 还可以进行不同粒度、不同聚合度的对抗仿真和人员训练仿真。

为了支持各种领域系统的开发与集成, HLA 对具体应用实现的限制非常少, 所以, 对于某一领域的具体需求, 只能在该领域具体设计、具体解决。随着仿真技术特别是交互式仿真技术的发展, HLA 被广泛应用于建模与仿真系统的开发与集成。HLA 理论体系由三部分组成: HLA 规则、HLA 对象模型模板(object model template, OMT)和 HLA 接口规范。

HLA 仿真系统的结构分为三层: 联邦、联邦成员和对象。对象是针对某应用领域内待仿真的物体建立的模型, 是联邦的基本元素。每个联邦成员拥有若干个互相作用的对象, 若干相互作用的联邦成员构成联邦——为达到某一仿真目的分布仿真系统^[18]。其系统层次结构如图 1.3 所示。

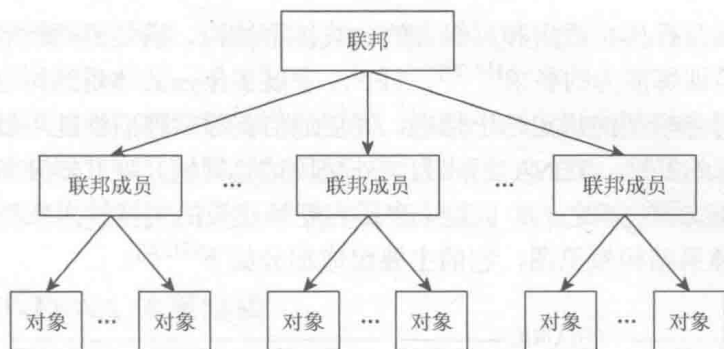


图 1.3 基于 HLA 的仿真系统层次结构

在一个联邦中，数据交互的内容是对象的信息，但对象与对象之间并不直接通信，通信只能由联邦成员发起，联邦成员可以是一个仿真子系统，也可以是一个可控制的仿真实体，还可以是连接现实中的实际物体和计算机的接口。

HLA 对于联邦成员是什么不加任何限制，它只通过 HLA 规则规定了联邦成员通用的行为规范。HLA 规则指出了联邦成员进行数据交互时必须遵守的规范以及联邦成员的职责，同时 HLA 规则是 HLA 对象模型模板和接口规范的设计标准。

HLA 对象模型模板定义了描述 HLA 对象模型信息的通用方法，提供建立 HLA 对象模型的标准格式。对象模型是对 HLA 中对象的归纳，HLA 仿真系统中的对象是对象模型的实例化。

HLA 接口规范定义了使联邦成员之间正确地进行交互所需的管理服务，其具体实现为应用程序——HLA 运行支撑环境（run-time infrastructure, RTI）。交互接口规范定义了运行支撑环境所有的服务函数和回调函数，运行支撑环境的设计必须与接口规范一致。HLA 接口规范定义了联邦管理、声明管理、对象管理、所有权管理、时间管理和数据分发管理六大类服务。

联邦实际上是 HLA 运行支撑环境根据 HLA 联邦的 FED 文件的内容及相关细节创建的一个虚拟世界，它并不对应一个实际的应用。对象是对实际物体的抽象仿真描述，在联邦成员的程序内定义。联邦成员对应实际的应用程序，联邦成员通过向 HLA 运行支撑环境发送一系列请求来实现创建联邦、加入联邦、注册对象实例、更新/发送实例数据、反射/接收实例数据、退出联邦、撤销联邦等功能。

1.3.2 TENA 体系结构

TENA 是美国国防部在 FI2010 工程中提出的，目的是为试验、训练活动提供

一个能够实现互操作、重用和可组合的公共体系结构，满足更高效的资源使用、提高联合试验训练能力的要求^[19, 20]。TENA 发展多年，其体系结构逐渐完善和成熟，TENA 对象模型的规定趋于稳定，底层通信支撑软件的性能不断提高。随着虚拟试验技术的发展，TENA 已成为国外靶场试验领域开展武器装备试验和训练所采用的主要支撑技术之一，也是未来国内靶场建设的关键技术依托。图 1.4 给出了 TENA 体系结构概览图，它的主要组成部分如下^[21, 22]。

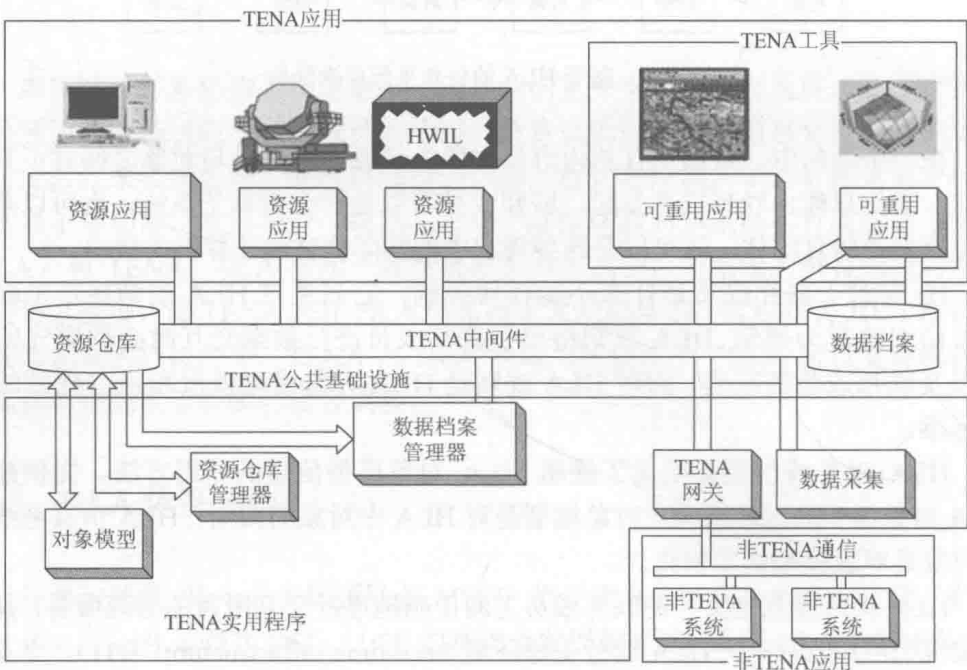


图 1.4 TENA 体系结构概览图

- (1) TENA 应用：包括资源应用和 TENA 工具。资源应用是指与 TENA 兼容的仪器、软件或系统，它是每个系统的功能核心。TENA 工具是可重用的 TENA 应用，其功能是高效地管理整个逻辑靶场生命周期。资源应用是独立开发的可执行程序，存储于 TENA 资源仓库中。
- (2) TENA 公共基础设施：是为达到 TENA 目标和驱动需求而提供基础服务的软件子系统，包括用于存储 TENA 应用、对象模型和逻辑靶场其他信息的 TENA 资源仓库，用于实时信息传输的 TENA 中间件，用于存储场景数据、运行过程中采集数据和总结信息的 TENA 数据档案。
- (3) 对象模型：靶场资源和工具之间进行通信的公共语言。每个逻辑靶场的对象模型集合称为 LROM，其中含有已经标准化的 TENA 对象模型定义和尚未标准化的对象模型定义。TENA 对象模型支持的服务主要有两类：一是在逻辑靶场