



国防电子信息技术丛书

# 空间环境 虚拟试验平台构建

许永辉 陈寅生 孙超 等著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>



## 国防电子信息技术丛书

随着计算机软、硬件技术的飞速发展，虚拟试验技术逐渐成为研究热点。虚拟试验能够有效减少人力、物力损耗，大幅度降低试验费用和开发成本；能够生成任意试验环境，具有复杂环境条件下的产品试验能力，可以实现对被试品全方位的考察。正因如此，虚拟试验的研究与开发日趋成熟，受到越来越多的关注，在机械、电力、汽车、航空、军事等相关领域的应用也越来越广泛。

本书全面、详细地介绍了空间环境虚拟试验验证平台构建的关键技术。内容包括综合自然环境数据库构建、航空空间虚拟大气环境构建、临近空间虚拟大气环境构建、空间辐射虚拟环境构建、虚拟场景显示软件开发以及以联合试验平台为核心的虚拟试验验证平台构建等。本书根据作者多年的研发经验，给出了实际研发的过程和工程实例，重点解决应用设计中的关键技术问题，并解析了虚拟试验验证平台设计中遇到的难点和解决方法。

本书内容丰富新颖，所举实例具有典型性，具有较强的实用性与指导性，可以作为高等学校测试专业、飞行器设计专业和计算机仿真专业等高年级学生及研究生的教学参考书，也可供从事飞行器设计、虚拟试验验证的工程技术人员参考。

其他相关图书  
请扫二维码↓



策划编辑：竺南直  
责任编辑：竺南直  
责任美编：孙焱津



欢迎登录 **免费** 获取优质教学资源  
<http://www.hxedu.com.cn>

ISBN 978-7-121-35712-1



9 787121 357121 >

定价：49.00 元

国防电子信息技术丛书

# 空间环境虚拟试验平台构建

许永辉 陈寅生 孙超 等著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

随着计算机软、硬件技术的飞速发展,虚拟试验技术逐渐成为研究热点。虚拟试验能够有效减少人力、物力损耗,大幅度降低试验费用和开发成本;能够生成任意试验环境,具有复杂环境条件下的产品试验能力,可以实现对被试品全方位的考察。正因如此,虚拟试验的研究与开发日趋成熟,受到越来越多的关注,在机械、电力、汽车、航空、军事等相关领域的应用也越来越广泛。

本书全面、详细地介绍了空间环境虚拟试验验证平台构建的关键技术。内容包括综合自然环境数据库构建、航空空间虚拟大气环境构建、临近空间虚拟大气环境构建、空间辐射虚拟环境构建、虚拟场景显示软件开发以及以联合试验平台为核心的虚拟试验验证平台构建等。本书根据作者多年的研发经验,给出了实际研发的过程和工程实例,重点解决应用设计中的关键技术问题,并解析了虚拟试验验证平台设计中遇到的难点和解决方法。

本书内容丰富新颖,所举实例具有典型性,具有较强的实用性与指导性,可以作为高等学校测试专业、飞行器设计专业和计算机仿真专业等高年级学生及研究生的教学参考书,也可供从事飞行器设计、虚拟试验验证工程的技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

空间环境虚拟试验平台构建/许永辉等著. —北京:电子工业出版社, 2019.1

ISBN 978-7-121-35712-1

I. ①空… II. ①许… III. ①外层空间—计算机仿真—研究 IV. ①P156-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第281021号

策划编辑:竺南直

责任编辑:竺南直 特约编辑:李秦华

印刷:北京虎彩文化传播有限公司

装订:北京虎彩文化传播有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:12.5 字数:320千字

版次:2019年1月第1版

印次:2019年1月第1次印刷

定 价:49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: [davidzhu@phei.com.cn](mailto:davidzhu@phei.com.cn)。

# 前 言

虚拟试验技术是由系统工程、建模仿真技术、可视化与虚拟现实技术、信息处理技术、现代数学和计算机技术等多种学科交叉应用的新兴技术。虚拟试验技术可以在虚拟的条件下完成对被试品的测试和试验，能够大大缩短设备的研制、测试周期，节约测试经费，因而得到广泛应用，已成为系统分析、优化设计、性能评测的强有力的工具。

作者所在的课题组承担了国家重大项目中涉及虚拟试验环境资源构建、联合试验平台开发、虚拟试验场景显示等方面的课题，对于虚拟试验验证平台的构建具有较丰富的开发经验。作者希望针对虚拟试验验证平台构建的关键技术，结合课题组已经公开发表的论文和科研过程中积累的技术资料编写以实践应用为目标的专著，可以在技术人员开发虚拟试验验证平台时给予有益的借鉴作用。

本书分为 7 章。第 1 章概述了虚拟试验技术、虚拟试验的基础和支撑框架、虚拟试验空间环境资源构建以及虚拟试验场景显示技术；第 2 章介绍了综合自然环境数据库构建，重点分析了综合环境数据表示与交换规范（Synthetic Environment Data Representation and Interchange Specification, SEDRIS）；第 3 章介绍了航空空间虚拟大气环境构建方法，利用 MMS（Mesoscale Model version 5）中尺度大气数值模式生成包括温度场、湿度场、风场和压力场等在内的复合航空空间大气环境；第 4 章介绍了临近空间虚拟大气环境构建方法，利用 TIMED 卫星上 SABER 探测器的原始大气环境数据进行临近空间大气环境资源的构建；第 5 章介绍了空间辐射虚拟环境构建方法，利用 ACE 卫星原始地球辐射环境数据进行空间辐射环境资源的构建；第 6 章介绍了虚拟自然环境集成技术，根据需求快速生成复杂、想定的自然环境数据；第 7 章和第 8 章介绍了虚拟场景显示软件开发，针对虚拟试验验证平台开发二维场景显示软件和三维场景显示软件；第 9 章介绍了虚拟试验验证支撑软件以及虚拟试验验证平台的构建实例，读者学习这些内容后，可以对虚拟试验验证平台构建的关键技术有基本的了解，初步具备开发虚拟试验验证平台的能力。

本书由许永辉、陈寅生、孙超、林连雷和杨京礼等著。课题组的赵玺、杨俊超和罗宁参与了资料的收集和整理工作，成行、孙丽、丁蔚、董昊、付文青和闫芳参与了早期的研发工作，积累很多素材，对此表示感谢。本书的出版得到了姜守达教授的大力支持，在此向姜老师表示感谢。由于时间仓促和作者学识水平有限，书中难免存在疏漏或不妥之处，恳请广大读者批评指正。

许永辉

2018 年 11 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 虚拟试验技术概述	1
1.2 虚拟试验的基础和支撑框架	2
1.2.1 试验与训练使能框架 TENA	2
1.2.2 联合试验支撑框架 H-JTP	3
1.3 虚拟试验空间环境资源	4
1.3.1 大气环境建模与仿真	5
1.3.2 临近空间的大气环境建模	6
1.3.3 辐射空间环境建模	7
1.3.4 环境数据的表示与交互	8
1.4 虚拟试验场景显示	9
1.4.1 二维场景显示软件	9
1.4.2 三维场景显示软件	10
1.5 虚拟试验验证平台	11
1.6 本书主要内容	13
第 2 章 综合自然环境数据库构建	14
2.1 综合环境数据表示与交互规范	14
2.1.1 数据表示模型 DRM	16
2.1.2 空间参考模型 SRM	16
2.1.3 环境数据编码规范 ECDS	17
2.1.4 SEDRIS 传输格式 STF	18
2.1.5 编程接口 API	18
2.1.6 SEDRIS 的运作方式	18
2.2 基于 SEDRIS 的大气数据表示	19
2.2.1 基于 DRM 形成大气环境数据表示标准	19
2.2.2 基于 SRM 提供大气环境数据空间坐标系信息	21
2.2.3 基于 EDCS 规范大气环境对象属性	21
2.3 基于 SEDRIS 的综合自然环境的交互	22
2.4 本章小结	24
第 3 章 航空空间虚拟大气环境构建	25
3.1 虚拟大气环境构建的整体思路	25
3.2 大气数值模式	26
3.3 MM5 模式理论介绍	27

3.4	MM5 模式及相关辅助软件安装及编译运行过程	29
3.4.1	PC 安装基本条件	29
3.4.2	辅助软件	29
3.4.3	多核运算软件	29
3.4.4	可视化软件	29
3.4.5	MM5 模式运行	30
3.4.6	MM5 模式的自动化运行	32
3.5	虚拟大气环境资源生成软件	32
3.5.1	大气环境数据高度计算流程	33
3.5.2	需求分析	34
3.5.3	静态模型	35
3.5.4	动态模型	35
3.6	虚拟大气环境资源生成软件测试	36
3.6.1	MM5 模式运行结果	37
3.6.2	软件测试结果	39
3.7	本章小结	42
<b>第 4 章</b>	<b>临近空间虚拟大气环境构建</b>	<b>43</b>
4.1	临近空间虚拟大气环境资源构建方法研究	43
4.1.1	临近空间虚拟大气环境资源构建方案	43
4.1.2	SABER 探测数据分析	43
4.1.3	临近空间大气环境数据预处理	46
4.1.4	临近空间风场建模及数据插值算法	48
4.2	NRLMSISE-00 大气模型研究	50
4.3	临近空间虚拟大气环境资源构建总体方案	51
4.3.1	虚拟大气环境资源构建总体需求	51
4.3.2	临近空间虚拟大气环境资源构建软件	53
4.4	临近空间虚拟大气环境资源构建软件测试	55
4.5	本章小结	57
<b>第 5 章</b>	<b>空间辐射虚拟环境构建</b>	<b>58</b>
5.1	空间辐射环境构建方法研究	58
5.1.1	空间粒子辐射环境分析	58
5.1.3	空间辐射建模分析与实现	65
5.1.4	空间辐射环境模型可信度评价	78
5.2	空间辐射虚拟环境生成软件设计与实现	81
5.2.1	设计方案	81
5.2.2	需求分析	81
5.2.3	静态模型设计	83
5.2.4	动态模型设计	86
5.2.5	界面设计	88

5.3	空间辐射虚拟环境生成软件测试	88
5.3.1	空间辐射环境生成软件功能测试	88
5.3.2	空间辐射环境生成软件性能测试	91
5.4	本章小结	93
<b>第6章</b>	<b>虚拟自然环境集成</b>	<b>94</b>
6.1	概述	94
6.2	虚拟自然环境想定空间构建方法研究	95
6.3	背景环境数据生成方法研究	97
6.3.1	工程模型生成方法研究	98
6.3.2	数值模型生成方法研究	100
6.4	典型环境数据生成方法研究	101
6.4.1	大气扰动环境数据生成方法研究	101
6.4.2	电磁扰动环境数据生成方法研究	104
6.5	虚拟自然环境数据生成软件设计与开发	105
6.5.1	需求分析	105
6.5.2	静态模型	106
6.5.3	动态模型	107
6.5.4	单元测试	109
6.6	本章小结	116
<b>第7章</b>	<b>二维场景显示软件开发</b>	<b>117</b>
7.1	需求分析	117
7.1.1	功能需求	117
7.1.2	用例分析	117
7.2	二维场景显示软件开发关键技术	119
7.2.1	与中间件数据交互技术	119
7.2.1	标注及设备信息绘制技术	120
7.3	软件设计	122
7.3.1	显示方案节点结构及数据结构设计	122
7.3.2	静态模型设计	123
7.3.3	动态模型设计	125
7.3.4	主要界面设计	130
7.4	功能测试	131
7.4.1	二维场景显示软件功能测试	131
7.4.2	在雷达制导导弹虚拟试验系统验证	132
7.4.3	在激光制导导弹虚拟试验系统系统验证	135
7.5	本章小结	137
<b>第8章</b>	<b>三维场景显示软件开发</b>	<b>138</b>
8.1	需求分析	138

8.1.1	功能需求	138
8.1.2	用例分析	138
8.2	三维场景显示软件开发关键技术	140
8.2.1	用例分析地形文件构建技术	141
8.2.2	模型及观察者视角控制驱动技术	143
8.2.3	天气及特效渲染技术	145
8.3	软件设计	147
8.3.1	显示方案节点结构及数据结构设计	147
8.3.2	静态模型设计	149
8.3.3	动态模型设计	151
8.3.4	主要界面设计	155
8.4	软件测试与验证	156
8.4.1	三维场景显示软件功能测试	157
8.4.2	在雷达制导导弹虚拟试验系统验证	158
8.4.3	在激光制导导弹虚拟试验系统验证	161
8.5	本章小结	165
<b>第9章</b>	<b>虚拟试验验证平台构建</b>	<b>166</b>
9.1	虚拟试验系统支撑软件	166
9.1.1	术语定义	166
9.1.2	软件主界面	166
9.1.3	新建试验成员工程	167
9.1.4	打开试验成员工程	173
9.1.5	编辑试验成员工程	175
9.1.6	运行试验成员工程	182
9.1.7	切换界面风格	182
9.1.8	控制工具栏显示	183
9.2	虚拟试验验证平台方案构建	183
9.2.1	虚拟试验验证平台组成	183
9.2.2	虚拟试验验证平台方案	184
9.2.3	场景显示组件运行效果	187
9.5	本章小结	188
	<b>参考文献</b>	<b>189</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 虚拟试验技术概述

随着计算机软、硬件技术的飞速发展,虚拟试验技术逐渐成为研究热点,正得到越来越广泛的应用和推广,用来补充或部分替代传统物理试验。广义上讲任何不使用或部分使用硬件来建立试验环境,完成实际物理试验的方法和技术都可称为虚拟试验,它是在虚拟环境中进行的一个数字化模拟试验过程,以虚拟数字样机代替真实物理样机,如同在真实环境中一样完成预定试验分析取得的试验效果接近或等价于在真实环境中所得的效果。

相比传统试验,虚拟试验具有诸多的优势,它不仅可以作为真实试验的前期准备工作还可以在在一定程度上替代传统的试验,具体优点如下所述。

(1) 虚拟试验能够大幅减少甚至避免真实试验,可以有效减小人力物力损耗,大幅度降低试验费用和开发成本。

(2) 虚拟试验基本不受时间空间等因素的制约重复利用率高可操作性强,可以生成任意试验环境,具有复杂环境条件下的产品试验能力。

(3) 虚拟试验易于改进能够使试验者在产品研发的各阶段都实现交互式设计,在产品研发阶段就能对产品的性能进行评价或试验验证。

正因如此,虚拟试验的研究与开发日趋成熟受到越来越多的关注,在机械、电力、汽车、航空、军事等相关领域的应用也越来越广泛。虚拟试验的应用涉及机械电子控制测量及计算机等多学科领域,实现手段更是包含虚拟样机技术、虚拟现实技术、虚拟仪器技术多学科建模与仿真技术等多种技术。虚拟试验验证是一种基于数字样机模型的复杂产品关键系统试验数据产生、获取和分析的系统工程过程,它以建模仿真、虚拟现实和知识工程方法为基础,在一个由性能模型、耦合环境、流程引擎和可视化交互机制构成的数字化试验平台中模拟真实产品的物理试验过程。

虚拟试验验证是一种贯穿于复杂产品研制中全生命周期的,涉及关键系统数据产生、获取、分析和评价的系统工程过程。和国外先进技术相比,我国的虚拟试验验证技术还存在较大差距。国外的虚拟试验验证技术在近年来发展迅速,已经应用在产品研制周期的全过程中。2006年12月7日,波音787举行了虚拟首发式。整个波音787采用了完全的数字化设计、试验、装配,没有实物样机,总共16TB的设计、试验数据,并且是在全世界协同研制的。虚拟试验验证技术作为核心技术之一发挥了重要作用,波音787大型试验均在虚拟环境中进行,使得研制风险大大降低,研制周期也从5年缩短到4年。

近年来,虚拟试验验证技术在军工产品研制过程中的应用研究逐渐兴起,虚拟试验验证技术的理念和方法已经得到初步认可,并取得了一些阶段性的技术成果和应用成果。若干与虚拟试验相关的研究课题对提高军工产品研制过程中虚拟试验验证技术的整体水平起到了带动作用。经过多年研究,我国已经构建了火箭全程飞行虚拟试验验证平台、鱼雷虚拟试验平台、飞机结构强度虚拟试验平台等系统级虚拟试验验证系统,取得了良好的示范效果,为进

一步开展军工产品关键系统的虚拟试验验证应用技术研究奠定了基础。通过虚拟试验和其他试验手段的结合,能有效地开展全系统性能评价和验证,而采用虚拟试验验证技术则是进行大系统总体综合性能验证的重要发展趋势。

## 1.2 虚拟试验的基础和支撑框架

国外发展的经验表明,虚拟试验的基础和支撑框架研究是引领整个虚拟试验验证系统快速有效发展的核心。如美国提出的 JTEM (联合试验与评价方法), TENA (Test and Training Enabled Architecture, 试验与训练使能框架) 以及 JTA (联合试验框架) 等已经成为指导整个军工产品行业内虚拟试验验证的基础和支撑性框架,并且伴随着框架的研究还出现了成熟的商用软件基础设施。

### 1.2.1 试验与训练使能框架 TENA

为充分调用各靶场试验任务资源,基于仿真的采办 (Simulation Based Acquisition, SBA) 和网络中心战 (Network-Centric Warfare, NCW) 环境下的试验和训练的实现,美国国防部通过了基础计划 FI2010 (Foundation Initiative 2010, FI2010), 试图构建一个能克服当前以军种和武器为中心的传统建设的“烟囱式”试验与训练的靶场设施,对分布在各地域的靶场进行资源整合,以期能实现靶场试验任务资源之间的互操作、可重用与可组合。TENA 就是基于这种建设思想的产物。TENA 的目的是开发试验与训练领域的公共体系结构,以快速、高效益的方式实现用于试验和训练的靶场、设施和仿真之间的互操作,促进这些资源的重用和可组合。TENA 从技术、运作、软件、应用与产品线体系结构等方面定义了逻辑靶场资源开发、集成与互操作的总体技术框架。TENA 提供了逻辑靶场运作概念、建立与运行逻辑靶场应遵循的规则和标准、公共元模型、公共对象模型、公共基础设施,以及工具和实用程序。

TENA 的核心包括三个部分,即 TENA 对象模型、TENA 中间件以及一系列指导 TENA 逻辑靶场建立与运行的规则。各种逻辑靶场资源通过 TENA 中间件进行通信。TENA 建立在 HLA 基础之上,针对试验和训练领域的特定需求对 HLA 进行了扩展,提供了试验和训练所需的更多特定的能力。

TENA 体系结构对 TENA 系统进行了描述,它确定了 TENA 的主要组成部分,以及它们各自的功能、接口和相互之间的关系。TENA 体系结构如图 1-1 所示,主要由 5 个部分组成。

(1) TENA 应用 (包括靶场资源应用和 TENA 工具): 靶场资源应用是指与 TENA 兼容的逻辑靶场仪器、软件或系统,它是每个逻辑靶场的功能核心。TENA 工具是可重用的 TENA 应用,其功能是为了高效地管理整个逻辑靶场生命周期。靶场资源应用在美军 TENA 中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: 这是为达到 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 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。靶场资源应用、TENA 工具、TENA 实用程序、TENA 对象模型等均存储于 TENA 仓库中,由 TENA 资源管理器负责数据维护、版本更新、访问权限控制。

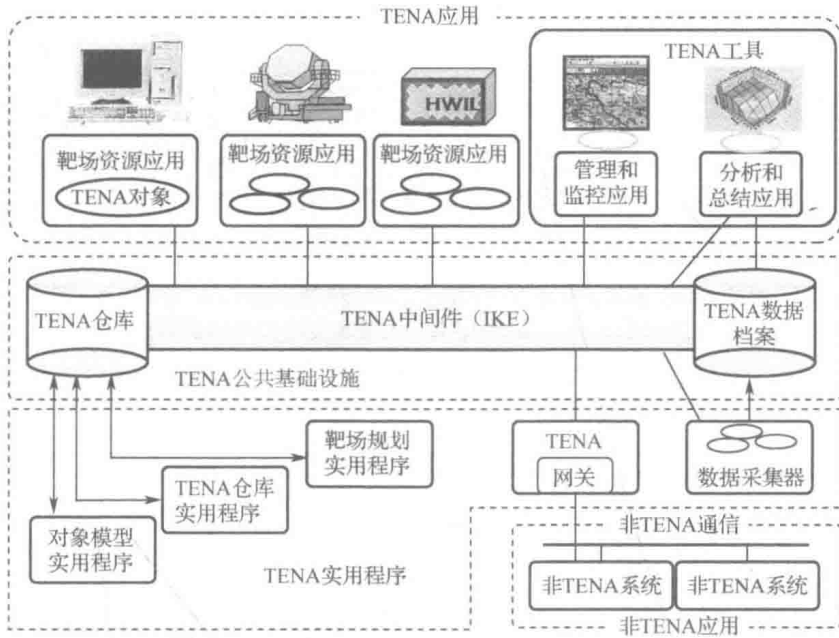


图 1-1 TENA 体系结构

(3) TENA 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。

(4) TENA 实用程序：是解决 TENA 逻辑靶场的使用和管理而专门开发的软件，是整个 TENA 产品线的组成部分。

(5) 非 TENA 应用：非 TENA 应用是指不符合 TENA 规范的靶场设备和系统，如基于 DIS 和 HLA 构建的仿真系统等，但是非 TENA 应用可通过相应的 TENA 网关实现与 TENA 体系结构的兼容。

## 1.2.2 联合试验支撑框架 H-JTP

我国军工产品虚拟试验验证系统的构建一般针对特定的应用需求，按照型号特点进行系统构建，这就造成了虚拟试验资源的可重用性和交互性差，限制了系统的扩展性，造成了虚拟试验资源的浪费。有鉴于此，哈尔滨工业大学提出适用于我国的虚拟试验验证的试验支撑框架 H-JTP（见图 1-2）。H-JTP 体系结构是在参考美军 TENA 的基础上，结合我国靶场试验技术的发展现状而提出的用于联合试验的支撑体系结构，它能够支持试验方案设计、试验运行支撑、试验过程管控等，可以将功能上分离、结构多样的实物、半实物或仿真的试验资源有效地整合到统一的联合试验系统中，大幅度提高试验系统构建效率和开发效率。

(1) H-JTP 体系结构支持多系统、多靶场联合的信息化开放式靶场体系。

(2) H-JTP 体系结构可以实现靶场内部系统之间的各类试验资源的互操作和组合式应用，综合集成支持武器装备试验。

(3) H-JTP 体系结构可以实现跨靶场各类资源授权条件下的互操作、数据共享及组合式应用，支持联合作战试验。

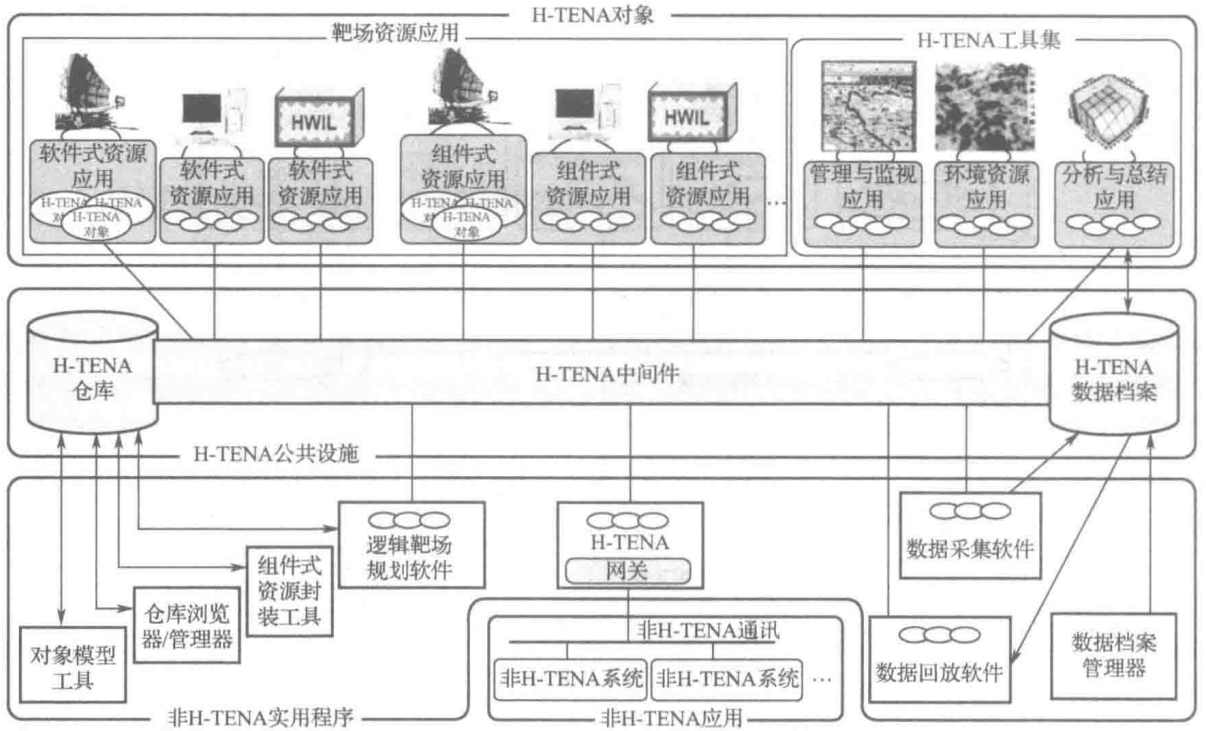


图 1-2 H-JTP 体系结构概览图

### 1.3 虚拟试验空间环境资源

虚拟试验的运行过程中若没有添加自然环境的支持，只能模拟极为理想的试验条件，试验的结果对实际效果的参考价值大大降低，因此，为提高虚拟试验对真实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。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，是众多装备仿真中的一个必不可少的重要组成部分。利用仿真与建模手段深入研究自然环境的特征，并在此基础上建立合理的仿真模型和提供正确的自然环境数据，开展自然环境及其对武器装备影响研究，是深入认知自然环境对武器装备影响机制和提高武器装备环境适应性的重要技术途径，对于优化武器装备的设计、提高其环境适应能力及在复杂环境下的作战效能都具有非常重要的意义。

空间环境虚拟自然环境包括大气环境和辐射环境两大部分。大气环境可以根据气温的垂直分布、大气扰动程度、电离现象等特征，由地面向上可以分为对流层（0~20km）、平流层（20~50km）、中间层（50~85km）、热层（85~300km）和散逸层（300~500km）。而地球中性大气的气体主要集中在 0~50km 的高度范围内，约占地球大气总量的 99.9%，而在高度大于 100km 的空间仅占 0.0001% 左右。人们通常把距离地面 100km 以上的航天器运行的空间范围称为航天空间；通常航空飞机飞行的高度上限为 20km，将 20km 以下的空间称为航空空间；距离地面 20~100km 的空间范围称为临近空间，即国际民航飞机飞行高度以上、卫星轨道维持高度以下的空间区域。空间高能粒子辐射是引发航天器风险的最主要环境因素之一。空间环境中的辐射粒子到达航天器后，与元器件及材料发生相互作用，导致多种粒子辐射效应，包括单粒子效应、总剂量效应、位移损失效应以及低剂量率增强效应等。其中单粒子效应和总剂量效应对航天器带来的风险最为严重。

### 1.3.1 大气环境建模与仿真

大气环境建模是指针对大气环境状态(要素)在时间和空间上的变化建立数学、物理模型,从而客观、有效地反映大气环境的基本变化规律。开展虚拟试验中大气环境资源的构建,为虚拟试验提供有效可靠的虚拟大气环境资源,需要对大气环境仿真对象中的温度、压强、大气密度、空气湿度、风场、大气组成成分等进行建模。目前,国内外应用较为广泛的大气环境建模的方法主要有三种:①通过分析大气的基本特征以及进行数学简化来提出理想化的模型;②基于大量观测资料和观测事实进行分析和统计,建立的统计特征模型;③按照流体力学和大气运动规律建立并求解大气运动的非线性方程组,并进行数值模拟,从中给出的大气模型。

当前,国内外有关大气环境的理想化模型有很多,较为常用的有USSA-1976模型、MET模型、HWM93模型、CIRA86模型等,这些模型一般在武器系统的研究中使用,但是只能描述大气变化的简单规律,不能描述大气环境的复杂变化。例如,USSA-1976是一个平均模型,只能给出大气环境垂直方向的平均分布特征,不能表示出大气随时间和经纬度的变化情况。CIRA86大气模型是由空间研究委员会(COSPAR)建立的高层大气模式,1990年,Hedin等人利用不相干散射雷达和卫星质谱仪测量资料,在半经验公式的基础上进行拟合处理后提出了MSISE90大气密度模型。NRLMSISE-00大气模型是由美国海军研究实验室(US Naval Research Laboratory)在MSISE90模型基础上开发改进而来的全球大气经验模式,描述了从地面到热层的中性大气密度、温度等大气物理特性,能够反映高层大气密度的基本变化特征。根据统计学进行大气环境建模,主要是基于历年收集的各种大气环境观测资料,例如NECP再分析资料、卫星资料等,通过对这些资料进行质量控制后将数据进行融合分析,根据研究问题和试用领域的不同选择不同的数理统计和概率论方法建立相关的统计模型,最终形成统计分析数据库。自1991年开始,美国高层大气研究卫星(UARS)上搭载的仪器对大气环境进行探测,在这些观测数据的基础上,UARS参考大气计划(UARP)已经建立了从地表到低热层的平均大气参考模式。国内的马瑞平等首次较全面地分析了我国上空20~80km高度大气温度的分布特征,根据利用Nimbus-7卫星探测数据计算的高空大气分布与CIRA86相比有一些差别,研究和改善的空间较大。利用TIMED卫星上搭载的多普勒干涉仪测量风场,对中间层和低热层的大气风场进行了研究,与当前通用的中性大气经验模式有较好的一致性,但在热带区域有显著不同。文献利用某航天靶场近三十余年的气象观测资料对两个月份的水平风场进行了统计分析。这种利用观测资料进行大气环境数据统计建模的方法具有较好的真实性,但由于观测数据样本量的制约等原因,统计建模的方法也有一定的局限性。大气环境建模的数值模型法是根据热力学和流体力学规律建立并求解方程,进行数值模拟的大气环境建模方法。对于大气环境仿真数值模型的研究,如美国国家环境预报中心用于商务预报的ETA模式,科罗拉多州立大学(CSU)开发的区域大气模拟系统——RAMS(Regional Atmospheric Modeling System),在20世纪80年代美国组织实施了“中尺度外场观测试验STOM计划”,研究出了MM5(Mesoscale Model version 5)模式,MM5模式由美国宾州大学(PSU)和美国大气研究中心(NCAR)在MM4基础上联合研制发展起来的中尺度数值预报模式,已经被广泛应用于各种中尺度现象的研究。ETA模式虽然作为NCEP的业务预报模式,但是难以吸收各所科研部门和大学的优秀研究成果,因此其推广也受到限制。美国国家大气研究中心(NCAR)于2000年开发出了WRF模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF Model),

该模式集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体的模式系统，能够更好地改善对中尺度天气的模拟和预报。目前，国外对 WRF 模式的应用日趋广泛、研究也愈加深入，WRF 模式的版本也陆续更新，国内基于 WRF 模式的应用也逐渐广泛，沈桐立等利用 WRF 模式对 2006 年 6 月 6~7 日福建特大暴雨进行了数值模拟和诊断分析，成功地模拟出了强降水中心的分布和演变；苗春生等运用 WRF 中尺度数值模式对 2009 年 7 月 27 日长江下游地区的一次 6 小时累计降水 226mm 的暴雨过程进行数值模拟，利用模式输出资料。许多学者都展开了 WRF 模式对于风场、暴雨、气温等的研究，发现该模式对于中国地区天气过程有较好的模拟能力。

综上所述，通过对大气环境建模的分析，可以了解到不同方法和模式之间的区别和优缺点，在应用时要根据具体问题进行分析，针对具体虚拟试验或虚拟战场环境的需要、仿真对象的需求，选择不同的建模方式对大气环境资源进行构建，为虚拟试验提供合适、合理的虚拟大气环境资源。

随着计算机、网络、硬件和通信技术的发展，现代仿真系统正向大型化和复杂化的方向发展，大气环境仿真技术由简单的一维静态大气环境向复杂的四维动态大气环境发展，自 1995 年 DMSO 发布建模与仿真计划后，成立了专门的建模与仿真执行机构，负责陆地、海洋、大气等空间的建模与仿真。20 世纪 90 年代中后期，随着 HLA 技术的成熟，DMSO 资助开发 TAOS (Total Atmosphere Ocean Space) 系统，采用模块化的组件方法将大气海洋空间环境数据通过服务器向网络上的其他仿真节点发送。1993 年，美国国防部提出未来作战“拥有天气”的重要概念。1995 年 10 月，美国国防部颁布了“国防部建模与仿真主计划 (MSMP)”，对国防部计算机仿真的现状作出评估，并提出国防部建模仿真发展的基本设想、基本战略和努力目标。美国国防部建模仿真办公室所做的模拟研究计划、整个大气环境影响研究计划和集成自然环境 (INE) 计划等，进一步推动了大气环境仿真技术的发展。尤其在综合环境数据表示与交换规范 (SEDRIS)、动态大气环境 (DAE)、综合自然环境权威表述过程 (INEARP)、环境剧情生成 (ESG)、主环境库 (MEL)、基于 HLA 的环境联邦 (EnvironFed) 等技术方面，取得了很多具有实用价值的研究成果。目前，SEDRIS、DAE、ESG、MEL 和环境联邦等技术都已通过 DMSO 的技术鉴定，并推广到国防和军事的各个仿真应用领域。21 世纪以来，美国在大气环境仿真领域有较多的研究成果。2000 年，美军首次将大气环境仿真应用模块直接嵌入战斧巡航导弹的任务规划系统中；2003 年，美军作战气候中心凭借“高级气候模拟与环境仿真系统”对气象资料稀少的伊拉克创建了数千个虚拟气象站，为整个战争的作战时机选择和作战进程安排提供了极为重要的帮助。我国近年来在大气环境仿真的研究方面取得了一定的成果。推导出战场目标经过大气环境时的辐射传输方程，提出了基于 MAT 模块的战场大气环境仿真，并应用 MAT 模块对其进行了仿真。从应用和技术角度对基于 HLA 的大气环境联邦进行了功能设计和需求分析，然后针对环境数据生成、大气环境建模、大气环境数据存取与可视化等关键技术问题进行了深入研究，最后开发完成了大气环境联邦原型系统。

### 1.3.2 临近空间的大气环境建模

传统的大气环境研究主要关注对流层空域，主要原因是对流层中包含了整个大气层 75% 的质量以及几乎所有的水蒸气和气溶胶。而随着临近空间的独特优势和战略价值被逐渐关注，世界各国科研人员也逐渐开始关注这一区域的大气特性，并取得了一些研究成果。临近空间大气环境资源的构建，即对临近空间大气环境要素建立数学、物理模型，仿真再现临近空间环境条件，客观、定量地提供临近空间大气环境参数分布。对于临近空间的大气环境的探测，

主要包括天基探测、地基探测和原位探测,天基探测中的卫星探测方法几乎能够提供全球的温度、风场和各种化学成分等观测数据,通过对卫星探测到的气象观测资料进行统计分析和建模,这种方法具有较高的真实性和可靠性。

国内外对于临近空间大气环境的构建进行了很多研究,高层中性大气的数值计算经典的模式有MSIS系列模型、MET模式、HWM模式、CIRA模式等,其中的MSIS模式定义大气温度,考虑大气的混合、扩散过程,提供大气成分和密度。大气随地理和地方时的变化是建立在低量级球谐函数的基础上的,球谐函数的展开也反映了大气参数随太阳活动、地磁活动等变化情况。水平风场HWM(Horizontal Wind Model)是用来得到中高层大气中性风的经验模型,模型可给出指定高度、经度、纬度、时间和 $A_p$ 指数条件下的经向、纬向风的风速。目前,国际上比较常见的大气数值物理-化学模式有加拿大中层大气模式(CMAM)、全球热层-电离层-中间层-电动力学环流耦合模式(TIME-GCM)、整层大气的通用气候模式(WACCM)等,这些大气模式是展开虚拟大气环境资源构建的基础,通过这些模式的数值计算来获得临近空间大气环境的分布特征,进而实现大气环境资源的构建。

国内在临近空间大气模式方面也取得一些进展,但是国内自主构建比较全面的中高层大气物理模式还比较少,国内一些科研单位也对临近空间的大气环境做了一些相关研究,例如Zhu X等人对临近空间大气环境中的风场进行了研究,通过将空气压力和温度引入到风场预测模型,提高了模型的精度。中国科学院国家空间科学中心的肖存英等针对临近空间大气环境的动力学特性进行研究,并基于TIMED(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics)卫星上SABER(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry)探测器11年大气密度数据统计分析其变化规律,提出了临近空间大气密度表征为气候平均量和大气扰动量之和的建模方法,并建立了大气随机扰动自回归模型,通过仿真试验及数据比较,表明该方法可行。上海交通大学的张成对临近空间的大气模型的主要参数进行了建模,在一些基本假设的前提下利用流体力学和大气运动规律建立并求解大气运动的非线性方程组的方法对一些临近空间参数,如运动温度、平均分子量、临近空间大尺度风场进行了建模。

总体而言,大气环境资源构建的临近空间范围的建模以及包括风场、压强、温度、大气密度、大气成分等较全面的虚拟大气环境的支持没有成熟的研究,缺少涵盖相对全面的大气环境要素的虚拟大气环境资源的开发,对于临近空间大气环境资源的构建还处于初级阶段。

### 1.3.3 辐射空间环境建模

为了解决空间辐射环境给飞行器造成的严重损害,美国于20世纪末提出NSWP计划,开始牵头研究空间辐射环境。随着研究资金和科研人才投入力度的不断加大,各个航天大国及空间环境相关机构的科学工作者对空间辐射环境特征、空间辐射机理、空间辐射效应及标准等有了更加深入的了解,并在此基础上开发出一系列空间辐射环境模型,极大地推动了空间辐射环境工程的发展。空间辐射环境主要包括粒子辐射环境和太阳电磁辐射环境。对于粒子辐射环境中的地球辐射带,根据其主要组成成分分别建立质子模型和电子模型。目前地球辐射带模型主要有NASA戈达得飞行中心专家开发的AP/AE系列模型,ESA开发的AE/AP模型,CRRESPRO质子模型和IGE-2006/POLE电子模型等。其中,随着多年探测时空及能量范围的发展,不断更新和完善而得的AE8和AP8模型被广泛使用。而最新一代的AE9和AP9模型则能大大提高能量和空间的覆盖率,并在一定程度上提升地球辐射带模型的准确性。除了地球辐射带,专家们也对粒子辐射环境中的银河宇宙射线(GCR)和太阳宇宙射线(SCR)

建立了一系列模型。大量高能量、低通量的太阳系外带电粒子形成了银河宇宙射线。其主要模型包括 Badhwar-O'Neill 模型、Nymmik 模型和 CREME86/CREME96 模型等。而太阳耀斑爆发期间发射的物质则形成太阳宇宙射线。King 模型、JPL 模型系列和 ESP 模型是应用较为广泛的三种太阳宇宙射线模型。这三种模型基于统计原理,分别用于预示任务周期内太阳质子注量、任务规划以及总剂量和最劣事件剂量的预测。太阳电磁辐射位于地球大气层外,是空间电磁辐射的主要来源。根据美国 ASTM490 标准,太阳电磁辐射绝大部分光谱能量集中于可见光和红外辐射波段,只有不到十分之一的能量在紫外波段和 X 射线。研究表明,在地球轨道上,光子能量较高的紫外波段是太阳电磁辐射引起材料退化的主要因素。因此,太阳电磁辐射模型的研究集中于紫外辐射环境。美国、俄罗斯及欧洲一些国家建立了太阳紫外辐射环境标准,并通过中高层大气研究卫星(UARS)等对地外辐射进行探测,进而分析和研究。随着科研工作者对空间辐射环境深入研究,各种空间辐射环境应用软件也陆续被开发出来。美国戈达得空间环境协调建模中心(CCMC)开发了空间辐射环境系统网站,收集了世界各地各个科研单位贡献的空间辐射环境模型,但并未建立模型之间的美好联系。

随着我国航天事业的迅猛发展,国内对空间辐射环境的研究也随之展开。如中国科学院利用自主观测数据研究空间环境特征,形成一套空间辐射环境建模方法,建立了国内第一个典型轨道辐射动态模型和空间辐射环境数据库。

### 1.3.4 环境数据的表示与交互

环境数据的无歧义表示与交互问题在环境仿真领域一直受到高度重视。早期采用“环境数据模型”的概念,来提高环境数据表示的一致性以及可重用性。环境数据模型是用于捕获、刻画和定义综合自然环境数据需求、内容、表示、关系和约束的逻辑数据模型。环境数据模型可用于进行需求定义和模型分析,提高和促进互操作性,并且有利于在数据驱动的综合自然环境数据库生成系统中实现快速自动化和高度重用性。为满足中、低精度地形仿真的需要,STOW、JSIMS 和 WARS 的开发人员自 1989 年起联合定义了地形公共数据模型(Terrain Common Data Model, TCDM),TCDM 中主要考虑了具有多态性和多分辨率的地形数据表示、地形数据库的编译生成和 CGF 功能应用需求三个方面的因素,而其后经过扩充用于支持具有高分辨率特征的构造仿真和虚拟仿真,并最终形成一个包含陆地、海洋、大气和太空的需求公共数据模型(Requirements Common Data Model, RCDM)。而美国陆军的下一代 CGF 建模与仿真系统 OneSAF 以及 C4ISR(Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance)领域的众多仿真系统也都定义和开发了各自的环境数据模型。虽然环境数据模型并非解决需求定义、互操作性和可重用性的充分条件,但却是一个必要条件。

虽然环境数据模型为数据需求定义、模型分析、提高互操作性和重用性提供了方法,但如果缺乏一致的描述方式、共同的规范框架和中立的表示方法,没有公共的语义基础和支持工具集,那么数据需求的捕获、互操作性分析、自动化和重用性仍将是不能从根本上解决的潜在问题。为了彻底解决环境数据的表示与交互问题,DMSO、STRICOM、DARPA 于 1994 年共同发起了综合环境数据表示与交换规范(Synthetic Environment Data Representation and Interchange Specification, SEDRIS)计划,并联合了 Boeing、Lockheed Martin、MITRE、MPI、RATHON、SAIC、SGI、E&S 等五十多家商业公司以及研究机构进行研究和开发。目前,SEDRIS 已经成功地应用于美国国防部资助的联合仿真系统(Joint Simulation System, JSIMS)、美国