

基于 HLA 和 VEGA 的海基靶场半实物 视景仿真系统研究

杨志菊¹, 刘宝华²

(1. 中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125000; 2. 海军航空兵学院, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为了在导弹试验任务中给指挥员提供决策支持, 设计了一种基于 HLA 和 VEGA 的海基靶场半实物视景仿真系统; 将三轴飞行转台、目标模拟器、负载模拟器等实物接入仿真系统, 采用高层体系结构规范构建仿真系统的联邦架构, 设计了联邦对象模型, 建立了关键联邦成员的数学模型, 解决了反射内存网与 HLA 的时间推进冲突问题, 有效提高了仿真系统数据传输的实时性; 采用 Multigen-Creator 软件建立了各个仿真实体的 3D 模型, 利用 Vega 软件实现模型的渲染、场景驱动、声音仿真等; 通过系统测试, 结果表明: 该视景仿真系统能够实时驱动各个仿真实体运行, 视景画面流畅, 图像刷新速率达到 30 帧/s 以上, 满足系统实时性要求。

关键词: 高层体系结构; 半实物仿真; 视景仿真系统; 导弹试验

Research on Hardware-in-the-loop Visual Simulation System of the Oceanic Range Based on HLA and VEGA

Yang Zhiju¹, Liu Baohua²

(1. PLA of Unit 92941, Huludao 125000, China; 2. Institute of naval aviation, Huludao 125001, China)

Abstract: In order to provide decision support for the commander in the missile experiment, a hardware-in-the-loop visual simulation system of the oceanic range based on HLA and VEGA is designed. The physicals such as the fly turntable with three axis, target simulator, load simulator, etc. are joined up the simulation system, the federal structure of simulation system is established by adopting high level architecture specification, the federal object model is designed, the mathematical models of the pivotal federal members are erected, the conflict problem of time advance between reflective memory network and HLA is resolved, which improves the real-time capability of data transmission in the simulation system. The 3D models of each simulation entity are established by adopting Multigen-Creator software, Vega software is utilized to realize the model rendering, the scene driving, and sound simulation, etc. Through the system testing, the results demonstrate that the visual simulation system can real-timely drive each simulation entity running, the visual picture is fluent, and the ratio of picture updating is more than 30 frames per second, which meets the demand of the real-time performance of the system.

Keywords: high level architecture (HLA); hardware-in-the-loop simulation; visual simulation system; missile experiment

0 引言

为了提高导弹系统的精度, 将仿真技术应用到导弹性能鉴定试验中, 是导弹研制过程的重要手段^[1]。半实物仿真与纯数字仿真相比, 由于半实物仿真将导弹系统的关键实物部分直接接入到仿真回路, 避免了纯数字仿真建模困难和模型不准确的缺陷, 使得仿真结果更能真实地反映导弹系统的实际工作情况, 大大提高了试验结果的可信度。

在实际的导弹试验中, 由于各个试验单元呈现物理分布广、数据异构、协议复杂、控制策略多样等现实问题, 而高层体系结构 HLA^[2] (high level architecture, HLA) 可以通过其运行时间支撑框架 RTI (run-time infrastructure, RTI) 将各个分布式异构型单元有效地整合到一个平台, 实现各单元的信息交互与共享。本文将 HLA 技术应用到海基靶场试验中, 建立一个基于 HLA 的海基靶场半实物视景仿真系统, 实时采集导弹的三轴飞行转台、目标模拟器、负载模拟器等实物的数据,

并通过导弹飞行仿真建模, 实现对导弹飞行试验的半实物仿真, 同时采用 Multigen-Creator 和 Vega 软件对各个仿真实体进行建模和渲染, 逼真地展现导弹飞行试验的场景, 为现场指挥人员提供决策支持。该仿真系统也可以应用于人员培训, 提高参试人员的实战化水平。

1 系统总体结构

仿真系统的总体结构如图 1 所示。系统由半实物仿真平台、仿真控制计算机、数据采集计算机、模型生成与解算计算机、虚拟现实仿真计算机等组成。在半实物仿真平台中, 负载模拟器、三轴飞行转台、惯组模拟器、目标模拟器以及引导头等实物完成导弹飞行过程的模拟, 其中: 负载模拟器用于模拟导弹在飞行过程中作用在舵机上的各种力矩; 三轴飞行转台用于模拟导弹在空中的偏航、滚转、俯冲等运动姿态; 惯组 (惯性测量组合) 模拟器包括加速度计和激光陀螺, 用于模拟弹体的惯性测量数据。仿真控制台是整个视景仿真系统的控制中心, 在控制台内安装 RT-LAB 软件, 负责整个系统的任务调度和管理。数据采集计算机通过专用总线和 I/O 接口实时获取导弹输出的姿态角、方位角、舵偏角等实测信息, 并送给数据处理计算机进行飞行弹道解算, 通过模型库、场景库的匹配,

收稿日期: 2014-08-30; 修回日期: 2014-09-28。

作者简介: 杨志菊 (1972-), 女, 辽宁葫芦岛人, 硕士, 高级工程师, 主要从事计算机仿真技术和信息管理等方面的研究。

采用虚拟现实技术进行 3D 渲染, 完成整个靶场真实环境的虚拟再现。为确保仿真的实时性, 系统采用 VMIC 反射内存网^[3], 实现全网内存共享。该网以光纤为传输介质, 将物理位置分散的内存块映射为逻辑的全局共享地址空间, 实现全网内存数据的实时更新。

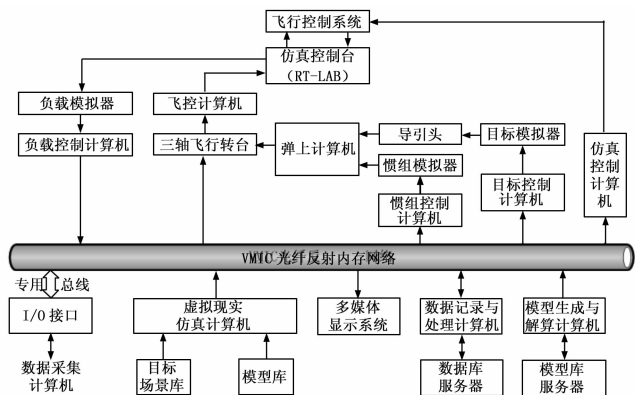


图 1 系统的总体结构

2 基于 HLA 的仿真联邦开发

2.1 联邦成员及关系

该半实物仿真系统的联邦成员可以分为: 导弹飞行仿真模型、仿真控制计算机、视景仿真系统、实物仿真成员 (包括实物仿真控制台、三轴飞行转台、惯组测量装置等) 以及其它仿真节点等, 其联邦架构如图 2 所示。仿真时, 设定导弹的初始速度与位置, 结合导弹的飞行模型实时解算出导弹的姿态和位置参数, 并根据舰船的运动模型实时解算出发射导弹的舰船运动数据, 最后将导弹飞行数据和舰船运动数据送视景仿真系统进行处理和显示。整个仿真过程的数据均通过 HLA 的运行时间支撑框架 RTI 和反射内存网 VMIC 进行传输。

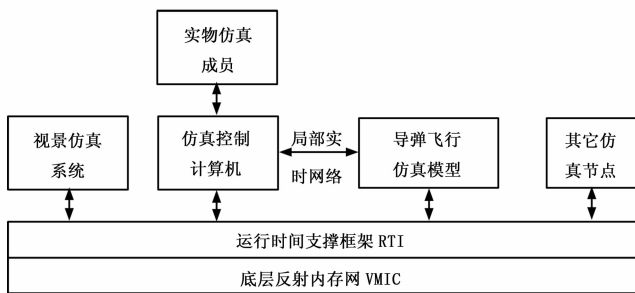


图 2 系统的联邦架构

2.2 对象模型设计

联邦成员及其关系确立后, 为了提高仿真模型的可重用性, 需要设计各联邦成员的对象模型。对象模型的设计包括联邦对象模型 FOM (federation object model, FOM) 设计和仿真对象模型 SOM (simulation object model, SOM) 设计。每个 SOM 描述相应联邦成员的属性、对象、交互等信息, 且由一组 SOM 构成一个 FOM。RTI 的数据传输方式分为尽力传输 (Best-Effort) 和可靠传输 (Reliable) 两种^[4], 在执行仿真过程中, 导弹和目标的数据是不能丢失的, 故在对象类中的导弹和目标的相关数据采用可靠传输方式, 而舰船等仿真环境对象

类可采用尽力传输方式, 不会对仿真效果带来影响。

联邦的对象类和订购关系如表 1 所示。其中, 舰船位置类 CuriseShip Position、舰船姿态类 CuriseShip Pose、导弹爆炸类 Missile Exposure 的数据由环境模拟仿真计算机计算产生, 导弹位置类 Missile Position、导弹姿态类 Missile Pose、目标位置类 Target Position、目标姿态类 Target Pose 的数据由相应的实物仿真计算机采集获得, 并将数据通过反射内存网传递给仿真控制计算机, 由仿真控制计算机在 HLA 联邦中公布。

表 1 联邦对象类的公布与订购关系

对象类名称	对象描述	公布(P)与订购(S)关系			
		仿真控制计算机	视景仿真系统	导弹运动学仿真模型	实物仿真成员
Federate State	联邦成员工作状态	S	P	P	P
CuriseShip Position	舰船位置数据	P	S	—	—
CuriseShip Pose	舰船姿态数据	P	S	—	—
Missile Exposure	导弹爆炸数据	P	S	S	S
Missile Position	导弹位置数据	P	S	S	P
Missile Pose	导弹姿态数据	P	S	S	P
Target Position	目标位置数据	P	S	S	P
Target Pose	目标姿态数据	P	S	S	P

2.3 联邦成员建模

在该仿真系统中, 需要建立的模型有: 导弹弹体模型、导弹制导与控制模型、导弹飞行模型、目标模型、环境模型等, 这里重点介绍导弹飞行模型的建立。由于导弹在飞行过程中, 需要进行飞行坐标系的转换, 所以首先建立坐标系转换模型, 再介绍导弹飞行模型。

2.3.1 坐标系转换模型

在导弹飞行中, 通常利用大地坐标系设置导弹发射点和目标的经纬度, 所以在仿真开始时, 需要将大地经纬度坐标转换为惯性坐标。以发射点的坐标转换为例, 设导弹发射方位角为 A_0 , 发射点的大地坐标为 (L_0, B_0, H_0) , 其中: L_0 为大地经度, B_0 为大地纬度, H_0 为大地程高, 发射点的惯性坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) , 则发射点的大地坐标转换为惯性坐标的过程如下:

$$\begin{cases} X_0 = (N_0 + H_0) \cos B_0 \cos L_0 \\ Y_0 = (N_0 + H_0) \cos B_0 \sin L_0 \\ Z_0 = [N_0(1 - e^2) + H_0] \sin B_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $N_0 = \frac{R_e}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_0}}$, 其中: R_e 为地球的长半径, e 为地球子午椭圆的第一偏心率^[5]。

在导弹飞行过程中, 需要将弹体质心坐标转换为惯性坐标。设在质心坐标系下, 飞行导弹的位置坐标为 (x^0, y^0, z^0) , 速度坐标为 (v_x^0, v_y^0, v_z^0) ; 在惯性坐标系下, 该导弹的位置坐标为 (x^E, y^E, z^E) , 速度坐标为 (v_x^E, v_y^E, v_z^E) , 则弹体质心坐标转换为惯性坐标的过程如下:

$$\begin{bmatrix} x^E \\ y^E \\ z^E \end{bmatrix} = G_E^{-1} \begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_x^E \\ v_y^E \\ v_z^E \end{bmatrix} = G_E^{-1} \begin{bmatrix} v_x^0 \\ v_y^0 \\ v_z^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在 (2)、(3) 式中, $G_E = \mathbf{L}_2[-(90^\circ + A_0)]\mathbf{L}_1[\mathbf{B}_0]\mathbf{L}_3[-(90^\circ - L_0)]$, 其中: \mathbf{L}_1 、 \mathbf{L}_2 、 \mathbf{L}_3 为坐标变换初等矩阵^[6]。

2.3.2 导弹飞行模型

导弹的飞行过程建模是一个复杂的过程, 为了研究方便, 这里做以下假设: 1) 认为导弹在飞行中只受到小扰动; 2) 认为导弹是刚体; 3) 进行参数固化, 即将特征点附近的质量、频率、惯量等参数看作常量; 4) 认为导弹是轴对称分布的, 可忽略导弹姿态运动的 3 个通道间的耦合性。导弹飞行过程分为主动段和被动段, 其中被动段包括自由段和再入段。这里只研究在惯性坐标系下导弹自由段和再入段的弹道方程。

1) 自由段弹道方程:

设导弹在发动机关机时的速度为 V_0^E 、高度为 h_0 , 在关机点的初始倾角为 θ_0 , 关机点在 x 轴的位移分量为 x_0 ; 只考虑地球重力作用, 且地球重力加速度为: $\mathbf{g} = [0, 0, -g]^T$, g 为常数, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。在自由段空气阻力可以忽略不计, 导弹的运动轨迹可简化为抛物线, 此时导弹的弹道方程为:

$$\begin{bmatrix} v_x^E(t) \\ v_y^E(t) \\ v_z^E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_0^E| \cos\theta_0 \\ 0 \\ |V_0^E| \sin\theta_0 - gt \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x^E(t) \\ y^E(t) \\ z^E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + |V_0^E| \cos\theta_0 \times t \\ 0 \\ h_0 - |V_0^E| \sin\theta_0 \times t - 0.5gt^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2) 再入段弹道方程:

在再入段, 导弹主要受到地心引力和空气阻力, 设再入段导弹的入射角为 θ , 导弹的质量为 m , 导弹质心速度为 $V^E(t)$, 空气阻力为 F , 则导弹的弹道方程为:

$$\frac{dV^E(t)}{dt} = g - \frac{F}{m} \quad (6)$$

$$\frac{dz^E(t)}{dt} = -|V^E(t)| \sin\theta \quad (7)$$

$$\frac{dx^E(t)}{dt} = \frac{R_e |V^E(t)| \cos\theta}{R_e + z^E(t)} \quad (8)$$

2.4 联邦执行与冲突管理

利用 OMDT 工具^[7]记录联邦交互对象类及其属性、路径空间等信息, 并生成联邦执行数据文件 FED。在仿真运行时, RTI 根据 FED 中的数据创建相应的联邦执行, 并在整个联邦执行期间协调各个联邦成员之间的信息交互。在系统中, 反射内存网 VMIC 要实时传输各联邦成员产生的数据, 所以反射内存网的多媒体时钟设置的优先级较高。在系统仿真运行中, 仿真控制计算机接收到一个联邦成员的采集数据后, 执行 Time Advance Request 和 Tick 函数调用, 通过 RTI 将数据发布给网内各个联邦成员。在这个过程中, 如果网内有另一联邦成员向反射内存网发送数据, 由于反射内存网的多媒体时钟优先级较高, 就会导致新到数据对前面采集数据的冲突, 使得 RTI 工作异常。系统采用两种策略解决这种冲突, 一是在 HLA 的时间推进之前采用 CCriticalSection 对象加锁, 确保在 RTI 执行过程中能独占系统 CPU, 并在执行 Tick 和 CCriticalSection 对象解锁之间加入 1ms 延时, 确保 RTI 能顺利完成时间推进请求; 二是采用多线程机制, 在系统程序中设置一个先

入先出数据缓冲队列, 当有新的采集数据送入反射内存网时, 将该数据放在数据缓冲队列的队尾, 仿真控制计算机每次只从缓冲队列的队首取数据, 处理后通过 RTI 发布给各个联邦成员, 这样既提高了数据处理的效率, 又有效避免了冲突的发生。

3 基于 Vega 的视景仿真开发

为产生逼真的靶场试验环境, 采用美国 Multigen-Paradigm 公司的 Multigen-Creator 和 Vega 软件^[8]建立视景仿真系统, 其中利用 Creator 软件建立导弹、舰船、海洋环境等仿真对象的 3D 模型, 使用 Vega 软件实现模型的渲染、场景驱动、声音仿真等。

3.1 3D 视景系统的软件设计

3D 视景系统的实现过程大致分 3 步: 1) 利用 Multigen-Creator 建立导弹、舰船、海洋环境、目标等仿真对象的 3D 模型; 2) 利用 Vega 软件的图形用户界面 Lynx 定义仿真实体、视点特征、海洋环境、导弹、舰船等仿真对象的属性; 3) 在 Visual C++ 环境中, 采用面向对象的程序设计方法, 首先加载 Vega 的头文件和库, 建立链接并定制 adf 文件, 然后利用 Vega 的 API 函数对实体属性、海洋环境、视点参数等进行控制, 最后接收数据并驱动仿真程序运行, 实现海上靶场的 3D 动画效果。整个视景系统软件由 3D 建模、环境效果、数据驱动与接口等 3 个部分组成, 其软件结构如图 3 所示。

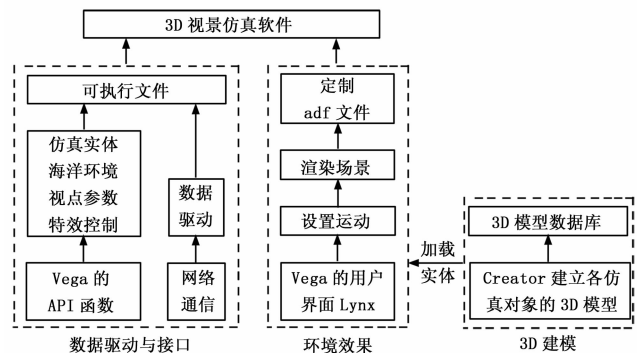


图 3 视景仿真系统软件结构

3.2 视景系统的联邦实现

为了使得视景仿真系统作为一个联邦成员加入到 HLA 半实物仿真系统中, 需要在视景仿真系统的应用程序代码中嵌入 RTI Ambassador 类和其它头文件。在仿真运行时, 视景仿真系统作为联邦成员加入到整个半实物仿真系统中, 接收来自导弹仿真模型、实物仿真成员等联邦成员的数据, 并驱动整个场景中各个仿真实体的运动。

视景仿真系统的联邦工作流程如图 4 所示。在仿真开始时, 视景仿真系统首先创建并加入联邦, 成功加入联邦后, RTI 为视景仿真系统创建联邦对象类型, 然后由视景仿真系统向 HLA 订购驱动其 3D 模型运动的对象数据。当视景仿真系统与其它联邦成员同步后, 便启动 Vega 主循环, 由 Vega 应用程序调用 RTI 的 Time Advance Request 接口函数, 向整个联邦提出仿真时间推进请求。当导弹飞行仿真模型邦员完成仿真后, 视景仿真系统的时间推进请求得到许可, Vega 应用程序更新视景仿真系统中各个 3D 模型的姿态和位置数据, 完成仿真场景的渲染。如果时间推进请求没有得到允许, 那么 Ve-

ga 应用程序会根据当前仿真时间，通过插值计算的方法获得视景仿真系统中各个 3D 模型的姿态和位置数据，从而保证了整个仿真系统的图像流畅。仿真结束后，视景仿真系统退出仿真联邦，并删除对象类实例。

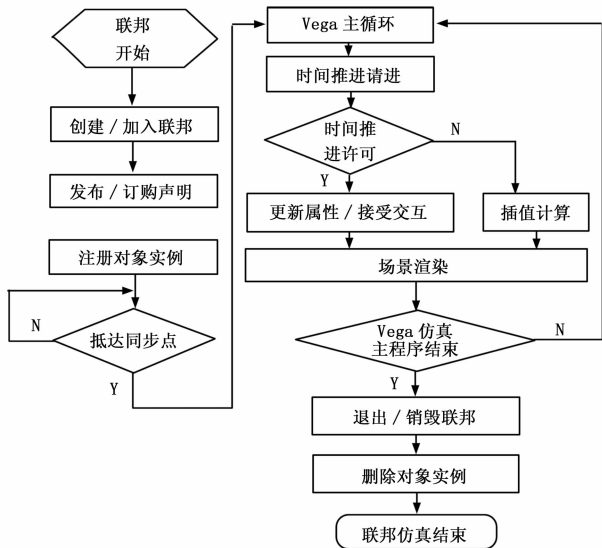


图 4 视景仿真系统的联邦工作流程

4 系统运行与测试

采用 VC++ 平台开发视景仿真系统，通过系统联试，视景仿真系统与各联邦成员能够正确进行信息和数据交换，实现各个仿真实体的实时驱动，视景图像更新帧速率达到 30 帧/s 以上，画面运行流畅，满足系统实时性要求。

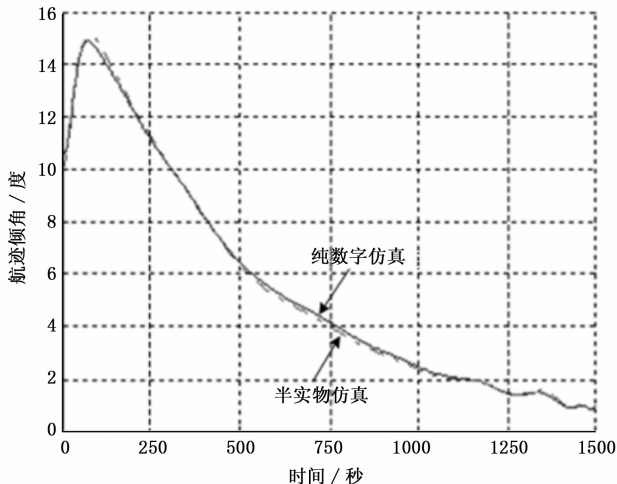


图 5 导弹飞行航迹倾角仿真对比

为了验证该半实物仿真系统的有效性和正确性。设置仿真初始条件为：某型导弹的初始速度为 260 m/s，弹体初始滚动角为 35°，航迹初始倾角为 10°，目标的初始速度为 260 m/s，目标机动为直线。在同一初始条件下，仿真运行 1 500 s，将半实物仿真与纯数字仿真的结果进行对比分析。图 5 为该导弹

的航迹倾角仿真对比情况，图 6 为该导弹飞行高度仿真对比情况。从图 5、图 6 的仿真对比情况看，该半实物仿真系统的仿真结果与纯数字仿真的结果基本一致，完全满足系统设计指标要求。从物理转台、视景仿真的总体效果看，该仿真系统真正实现了仿真控制计算机、视景仿真系统、三轴飞行转台等实体的实时一体化运行。

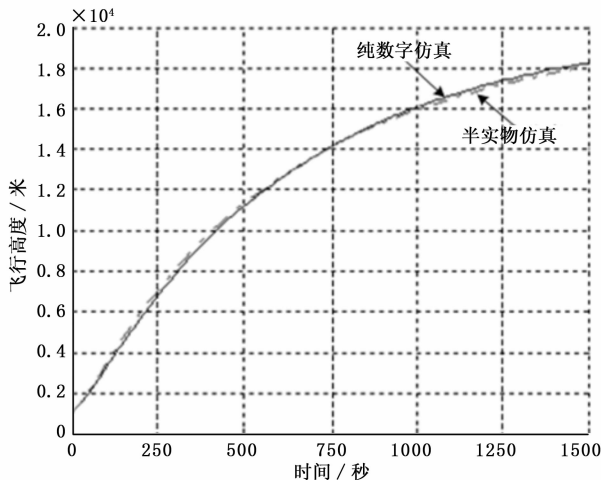


图 6 导弹飞行高度仿真对比

5 结束语

本文建立了一个基于 HLA 和 Vega 的海基靶场半实物仿真系统，逼真地展现了海基导弹试验任务的场景，为导弹试验任务提供了指挥决策平台。该系统具有良好的扩展性，能够实现各个仿真单元的“即插即用”。通过多次导弹试验任务检验，结果表明该系统能够实时、正确地解算导弹飞行的弹道数据，逼真展示导弹的飞行过程，视景仿真系统的图像流畅、立体感强，为试验任务中首长决策提供了良好的技术支撑。

参考文献:

- [1] 王莹. 图像未制导仿真技术的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2014.
- [2] 陈兴凯, 韩壮志, 封吉平, 等. 基于 HLA 的火控雷达网反侦察仿真系统的开发 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (1): 116-118.
- [3] 陆兆辉, 刘文利, 刘勇. 实时仿真系统用光纤反射内存卡的设计 [J]. 现代传输, 2013 (6): 74-76.
- [4] 梁洪波, 朱卫国, 姚益平, 等. 基于分布式共享内存的 RTI 通信机制研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25 (7): 1484-1489.
- [5] 王敏, 胡绍林, 安振军. 外弹道测量数据误差影响分析及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] 郝辉, 李雪瑞, 舒健生, 等. 导弹常用空间直角坐标系间转换方法 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34 (2): 38-40.
- [7] 沈楷, 郭建国, 卢晓东, 等. 基于 Simulink/RTW 的 RTX 系统仿真建模方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 566-569.
- [8] 张振伟, 刘党辉, 苏永芝, 等. 基于 Vega Prime 的运载火箭飞行仿真技术研究 [J]. 新技术新工艺, 2014 (4): 52-55.