

doi: 10.7690/bgzd.2015.07.001

某 ATP 训练模拟装置仿真实现技术

岳玉芳, 谢晓钢, 安建祝, 李有宽
(北京应用物理与计算数学研究所一室, 北京 100094)

摘要: 为满足提高训练模拟效果的需要, 从某捕获跟踪瞄准系统的实际特点出发, 设计了训练模拟装置的分布式实现模式。以该模式为基础, 对模拟装置的实现模式、软件结构框架、ATP 系统各模块仿真模型、基于 HLA/RTI 的时间管理和多种人机交互形式等关键技术的实现进行研究, 并采取与实装一致的交互面板和完全实时的时间同步。结果表明: 该装置能实现对实装系统的单杆跟踪、电视跟踪等科目的模拟和训练, 保证训练效果, 提升训练质量。

关键词: 捕获跟踪瞄准系统; 虚拟训练; 软件结构; 人机交互; 时间管理

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Simulation Realization Technology of Certain Type ATP Training Equipment

Yue Yufang, Xie Xiaogang, An Jianzhu, Li Youkuan

(No. 1 Research Center, Institute of Applied Physics & Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to satisfy the requirement of better training simulation effects, based on actual features of certain type ATP system, design a distributed realization mode of an acquisition, training and pointing (ATP) training simulation equipment. Based on the mode, research on realization mode, software framework, ATP system mode simulation model of simulation equipment, time management based on HLA/RTI, and other several man-machine interaction types. Adopt actual interact panel and time synchronization with real time. The result shows that the equipment can realize simulating and training of actual system single bar tracking and TV tracking.

Keywords: acquisition, training and pointing system; virtual training; software structure; human-computer interaction; time management

0 引言

随着虚拟现实技术的不断发展, 虚拟驾驶和虚拟仪表相关的技术取得了长足的进步, 各种以训练为目的的虚拟仿真系统被开发出来, 比如针对汽车驾驶、坦克操纵等的系统。在光电跟踪领域, 在实验室中仿真出外场环境, 使用虚拟目标代替真实目标, 对光电跟踪平台操作开展训练是一种重要的操作培训手段。根据实际装置的结构和功能特点, 某捕获跟踪瞄准(acquisition, training and pointing, ATP)训练模拟装置采用实装操控面板为人机接口, 训练过程全部基于计算机真实感图像实时生成技术在计算机内部构建, 并分布于采用 HLA/RTI^[1-2]建立的各网络节点上, 受训人员与网络上的虚拟装置进行交互操作, 由训练模拟系统对操作过程给出评分, 具有经济性、集成性和逼真性的优点。本文详述了该模拟装置的分布式模式、软件框架和时间同步、人机接口等仿真技术。

1 某 ATP 训练模拟装置实现模式

1.1 实装结构的要求

在实装操作中, 尤其在捕获跟踪操作时, 需要

2 名操作手分别在 ATP 操控计算机界面、操控面板上协调配合完成方向(高低角、方位角、滚转角)捕获/跟踪、时间修正和调光调焦等操作^[3-4]。

1.2 提高训练效果的需要

在虚拟训练模拟装置中, 目标位置信息由导演台节点生成, ATP 系统的电视图像模拟、图像处理和闭环控制等工作均由 ATP 操控号位节点模拟完成, 为保证捕获跟踪操作响应及时, 将目标捕获跟踪号位的面板操控信息及时与 ATP 操控号位的计算机界面操控信息进行综合。

基于 HLA/RTI 的分布式虚拟仿真训练系统, 如图 1 所示。整个系统包括运行平台(由导演台和态势显示构成)、ATP 训练模拟装置(由 ATP 操控号位和目标捕获跟踪号位构成)、指挥控制分系统、其他分系统 4 个部分。导演台负责对整个系统进行联合训练的仿真管理, 态势显示负责进行 ATP 转台三维可视化显示, ATP 操控号位节点接收导演台时间管理, 接收指控分系统节点发来的预报文件, 向态势显示节点发送转台指向信息。ATP 模拟系统 2 个节点之间的联系是与实装一致的 ATP 操控面板和 RS422

收稿日期: 2015-03-16; 修回日期: 2015-04-04

基金项目: 中国科学院光束控制重点实验室基金(2014LBC003)

作者简介: 岳玉芳(1974—), 女, 河南人, 博士, 副研究员, 从事激光系统建模与仿真、跟踪算法研究。

串口，区别在于实装系统中目标捕获跟踪号位将数据直接作用于实装转台各电机执行机构，而虚拟装置的目标捕获跟踪号位将数据提供给 ATP 操控号位节点的闭环控制模拟软件。这种设计不需要目标捕获跟踪号位节点首先采集自己的 ATP 操控面板数据，再通过网络和 RTI 接口传递给 ATP 操控号位节点，使得目标捕获跟踪号位的操作能抛开网络延时、及时有效地应用于跟踪控制模拟过程，确保操作的实时响应，同时也避免了可能的网络数据传输错误。

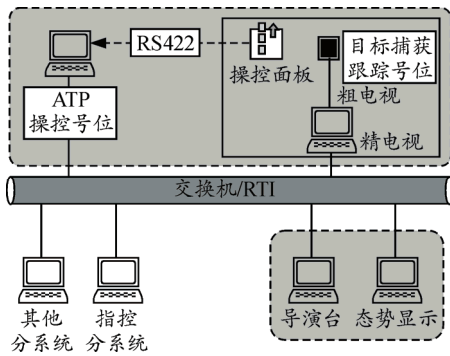


图 1 某 ATP 训练装置分布式结构

实现图 1 所示的分布式虚拟训练系统需要研究多项关键技术，由于篇幅所限，这里只对系统软件结构框架技术、ATP 系统仿真软件技术、基于 HLA/RTI 的分布交互技术和虚拟装置的人机交互技术进行讨论。

2 训练模拟装置软件结构框架设计

某 ATP 训练模拟装置软件结构框架如图 2 所示。系统软件结构框架的主体由消息通信、人机交互处理、训练操作管理界面、科目执行评估和 RTI 发送接收数据管理等公共模块，以及与具体训练任务直接相关的 ATP 系统各仿真模块构成。

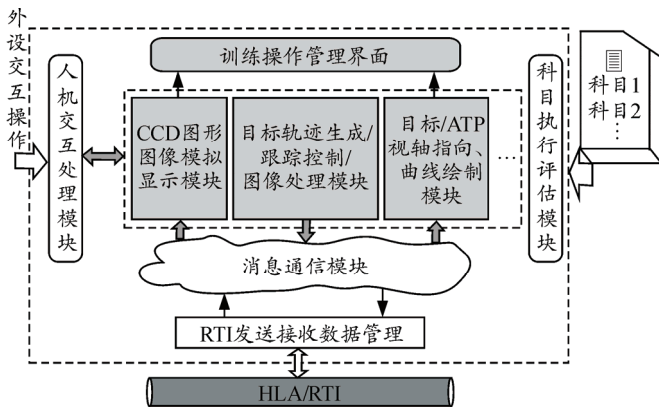


图 2 ATP 训练装置软件结构框架

虚拟训练的实施是在公共模块与各仿真模块的

互相协作下共同完成的。消息通信模块是框架的核心部分，在框架中，任务相关的仿真模块之间通过消息通信模块从一方转发到另一方；同时，与 RTI 发送接收数据管理模块配合，实现网络各节点间的交互。人机交互处理模块则实现了基于实装操控面板、基于虚拟面板、以及基于鼠标和键盘标准外设的人机交互。训练操作管理界面模块根据系统状态提供训练类型列表、训练科目列表，并在用户执行训练过程中显示仿真时间、提示训练模拟系统当前状态和用户操作名称等。其中，训练类型包括科目训练和联合训练 2 种类型，选用不同的仿真时间推进方法。

在科目训练类型下，科目执行评分方法实现了科目训练的通用性和可扩展性。

3 训练系统仿真模型

图 2 中内层虚线框为与具体训练任务直接相关的 ATP 系统各模块，本节简要分析它们的仿真模型。

3.1 目标轨迹生成/跟踪控制/图像处理

3.1.1 目标轨迹生成仿真模型

在卫星轨道直角坐标系中，卫星轨道是对应时刻某椭圆轨道上的点，根据开普勒要素确定卫星位置，已知仿真时刻 t_0 、跟踪系统的经度 λ 和纬度 φ ，大地高度 H ，通过坐标转换获得卫星相对于跟踪系统原点的方位角 A 、俯仰角 h ^[5-6]。

为跟踪过项目标，避免盲区问题，某 ATP 装置采用的是三轴转台^[7]。图 3(a)为视轴偏心三轴跟踪机架示意图，它存在跟踪轴 3 个转角(α, β, γ)与大地坐标系下方位和俯仰角(φ, σ)之间多对一的关系，在训练操作模拟过程中，既有固定方位轴 α ，转动俯仰轴 β 和滚转轴 γ 跟踪目标的情况，也有固定 γ ，转动 α 和 β 跟踪目标的情况。对于后者，三轴转台驱动方式与两轴地平式转台驱动方式一致。对固定方位轴 α 角的情况，经过分析推导，得到预测位置 P 的方位、俯仰指向与三轴转台俯仰轴、滚转轴转角的对应关系，如图 3(b)所示。

$$\begin{cases} \beta = \arctan\left(\frac{\sin \sigma}{\cos \alpha \cos \sigma \cos \varphi + \sin \alpha \cos \sigma \sin \varphi}\right) & (-90^\circ < \varphi - \alpha < 90^\circ) \\ \beta = \arctan\left(\frac{\sin \sigma}{-(\cos \alpha \cos \sigma \cos \varphi + \sin \alpha \cos \sigma \sin \varphi)}\right) & (-90^\circ \geq \varphi - \alpha \text{ 或 } \varphi - \alpha \geq 90^\circ) \\ \gamma = \arcsin(\cos \alpha \cos \sigma \sin \varphi - \sin \alpha \cos \sigma \cos \varphi) & (-90^\circ < \varphi - \alpha < 90^\circ) \\ \gamma = \pi + \arcsin(\sin \alpha \cos \sigma \cos \varphi - \cos \alpha \cos \sigma \sin \varphi) & (\varphi - \alpha \geq 90^\circ) \\ \gamma = -\pi + \arcsin(\sin \alpha \cos \sigma \cos \varphi - \cos \alpha \cos \sigma \sin \varphi) & (-90^\circ \geq \varphi - \alpha) \end{cases}$$

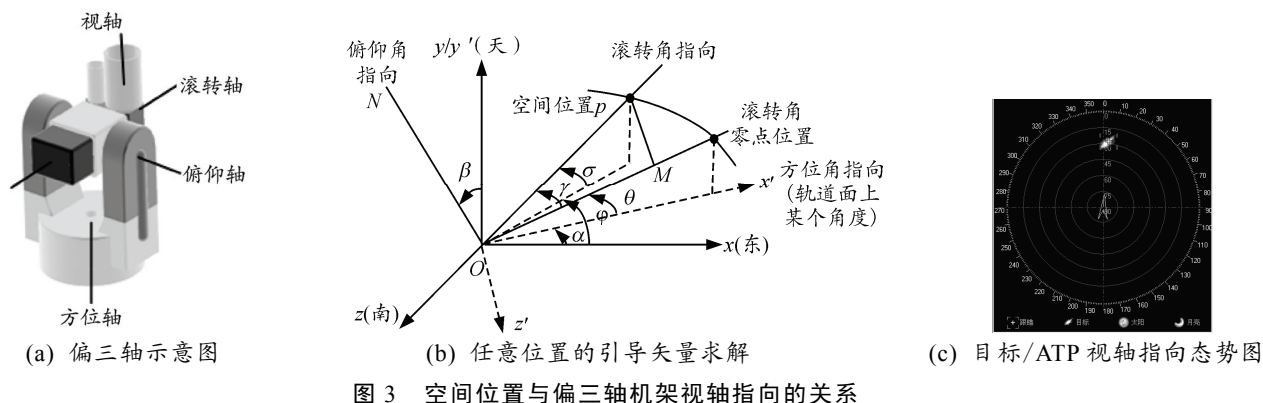


图 3 空间位置与偏三轴机架视轴指向的关系

3.1.2 单杆跟踪和电视跟踪、图像处理仿真模型

采用 Matlab 的控制工具箱，根据实际闭环系统得到传递函数对应的差分方程，闭环跟踪过程的模拟是在仿真时间段内基于用户对模拟系统的跟踪控制操作，迭代计算跟踪动态响应、得到跟踪误差曲线的过程。

电视波门跟踪模拟中，采用了开放式图形库 (open graphic library, OpenGL) 的 glLookAt(), 以及开源场景图 (open scene graph, OSG) 的 setViewMatrixAsLookAt(), 根据跟踪仿真过程中目标、ATP 模拟视轴的方向生成电视图像^[6,8]。

在目标跟踪训练中，操控面板上的单杆操作的横、竖 2 个方向的偏移角度量化后用于单杆修正的闭环融合跟踪过程模拟。根据模拟电视图像，将提取的目标脱靶量作为电视闭环跟踪控制的输入信号进行仿真计算，对用户的目标特征提取操作和电视闭环操作进行训练。在电视调光、电视调焦等训练科目中，基于点扩展函数和亮度调整方法，还实现了电视操作过程的模拟。

3.2 渲染到纹理技术的应用

为便于观察，实装系统每个电视输出的数字信号可以连接多个监视器，各监视器上图像大小不同，屏幕越大目标图像越模糊。在模拟系统中，如果采用计算机图形学不同视场角模拟，会出现错误的图形分辨率。为此采用了特殊技巧：应用渲染到纹理相机 (render to texture camera, RTTC) 技术，直接将一次投影渲染的二维图像缩放到各个显示器上，保证了合理的图像分辨率，实现起来又非常简洁。

3.3 目标/视轴指向的显示

在 ATP 操控界面模拟显示中需要将图 3(c) 中 (α, β, γ) 指向转换为 (φ, σ) 的表示，与目标实际指向进行比较。经过推导，可知

$$\begin{cases} \sin^2 \sigma = \sin^2 \beta \cos^2 \gamma \\ \sin^2 (\varphi - \alpha) = \frac{\sin^2 \gamma}{1 - \sin^2 \beta \cos^2 \gamma} \end{cases}$$

根据该公式，采用 Windows MFC 绘图方式模拟 ATP 操控界面中目标/ATP 视轴指向态势图 (图 3(c))。

4 基于 HLA/RTI 的时间管理

HLA 具有时间管理准确、事件发生与显示的顺序不会因为网络问题而因果错乱的优点，且提供了透明灵活的时间管理功能，允许联邦中存在多种时间管理机制^[9-10]。训练模拟系统各节点之间发送接收数据采用 HLA/RTI。不同的训练任务对实时性的要求不同：对于科目训练类型只需要确保事件的因果顺序；对于联合训练类型则要求交互必须达到完全的实时性。因此，在邦员根据不同训练任务采用了不同的时间管理策略。

4.1 科目训练

导演台成员和各邦员均设置为既不时间调节 (time regulating) 也不时间受限模式 (time constrained)。仿真开始前各邦员对准时钟，运行中各邦元采用时间步长累积模式推进仿真时间。消息发送采用时戳顺序^[3]。

ATP 操控号位节点采用 2.5 ms 为一个时间步长 (精跟踪帧频为 400 Hz)，完成精电视 CCD 图像模拟、图像处理 and 跟踪控制算法执行等的相关计算；由于粗跟踪帧频为 50 Hz，每 8 倍的 ATP 时间步长完成一次粗电视 CCD 模拟、图像处理 and 跟踪控制算法执行等计算。

4.2 联合训练

导演台成员设置为时间调节模式，各邦员为既不时间调节也不时间受限模式。

仿真开始前各邦员对准时钟，运行中导演台按

照机器时钟每 1 000 ms 推进一次, 并与其他邦员周期性地对准(间隔 1 000 ms 对准一次), 即其他邦员运行中周期性地接收导演台时钟数据推进自身仿真时间。ATP 操控号位节点按照时间修正跟踪的模拟实现方法, 对粗跟踪和精跟踪均采用 50 Hz 帧频执行相关仿真。

值得一提的是: 简化模拟实现的差分方程也由 Matlab 的控制工具箱的连续-离散转换函数给出, 精跟踪差分方程模型与 400 Hz 时的模型必须保持同样的闭环系统幅频、相频特性。

5 虚拟训练装置的人机交互技术

虚拟训练装置中的人机交互技术直接影响着训练效果和训练质量。该训练装置采用了基于实装设备、基于 Flash 虚拟面板和基于计算机标准外设 3 种技术。基于实装设备的训练, 如 ATP 实装面板的单杆操作, 使操作人员训练过程中得到真实的触觉感受, 提高了训练质量。基于 Flash 虚拟面板的训练作为备份, 保证了训练能够在其他计算机节点上安装执行。基于标准外设的交互用于模拟实际系统计算机界面上的操作。无论是实装设备还是标准外设, 对他们的处理模型都具有设备数据获取、操作对象识别和交互消息处理 3 个功能, 分别完成数据采集、分类和应用 3 个环节。

5.1 基于实装部件的人机交互技术

在实装工作中, 作为目标捕获跟踪号位 ATP 操控面板上的部件, 单杆是 SAKAE 三轴带弹簧自动复位的直线式电位器, 提供横、竖、旋转 3 个轴的偏移角度。由于单杆操作是对触觉真实感要求特别强的操作内容, 在模拟训练装置中作为人机接口予以保留, 增强了训练的沉浸感, 保证了训练质量。

5.1.1 实现技术

基于实装部件的交互包括硬件和软件 2 部分。硬件部分包括操控台和串口卡, 软件部分包括通信卡驱动程序、串行通信控件 MSComm^[11]和数据处理模块。软件部分承担对采集信号的计算机系统接入和解算任务, 实现实装部件的即插即用功能。

操控面板由一个 DSP 管理, 经过信号放大, 将 SAKAE 的三路模拟信号、2 个 16 位数字信号, 按照 RS422 串口协议以 50 Hz 的频率向模拟系统计算机发送信号。计算机使用研华 PCI1602A 串口卡接收信号, 使用 MSComm 的 OnComm 事件获取按照串口协议发送的模拟信号和数字信号。数据处理模块对 -12~+12 V 电压表示的模拟信号首先进行零

点漂移处理, 再识别各个轴数据量化后用于单杆操作训练; 对数字信号按照串口协议规则识别它们表示的多个状态数据(例如开关按钮、时间修正的“+”、“-”按钮等)。

5.1.2 完全实时的仿真操作

数字信号处理有 2 个要点: 1) DSP 连续、重复发送信号, 软件上每次与上次数据比较, 只对变化的数字量进行处理, 否则会造成串口数据拥堵, 不能对变化的操作及时处理; 2) 通过设置定时器事件负责串口信号检测, 通过开辟新线程负责指示灯报警, 以使模拟软件及时对来自交互面板的用户操作消息做出反应。

在模拟系统的“联合训练”类型中, 在导演台下达“开始训练”命令, ATP 训练模拟装置还要在完全实时的真实时间步长内根据交互面板上时间修正量完成对相应卫星预报数据的提取, 以及对该步长内跟踪控制响应的模拟计算。设计了如下方法:

① 采用由跟踪控制系统闭环传递函数导出的差分方程形式的公式用于跟踪控制计算, 并开辟新线程专门保证资源不被占用。

② 由于差分方程只能模拟等间隔计算步长(50 Hz), 而且在每次同步(1 Hz)时仍有可能未完成计算就被终止, 故每次同步时执行如下步骤: 导演台新的仿真时间到来时, 则强制停止跟踪控制计算线程, 确保严格同步, 同时, 比较前一次成功完成跟踪计算的仿真结束时间与当前同步时间的时差; 计算该时差对 20 ms 的倍数; 执行该倍数次差分模型计算。

以上方法虽然存在小范围(≤ 20 ms)时间内的仿真模拟误差, 但实现了时间修正跟踪模型的合理近似, 在实践中取得了较好的效果。

5.2 基于 Flash 虚拟面板的交互技术

为使训练操作能在脱离实装面板的计算机上应用, 专门设计了基于 Flash 虚拟面板的人机交互模块。在人机交互过程中, 鼠标操作的是 Flash8.0 制作的虚拟面板动画文件。Flash 文件制作简单, 表现力较强, 生成的文件小, 把 Flash 制作的虚拟面板作为人机接口时, 系统需要添加 Flash 控件(shockwave flash object)播放 Flash。当操作人员点击 Flash8.0 制作的虚拟面板动画上的按钮和拖动模拟的单杆图标时, Flash 制作时动作脚本中预设的函数 fscommand(...)的参数与控件消息处理函数 OnFSCCommandShockwaveflash1(...)的参数自动匹

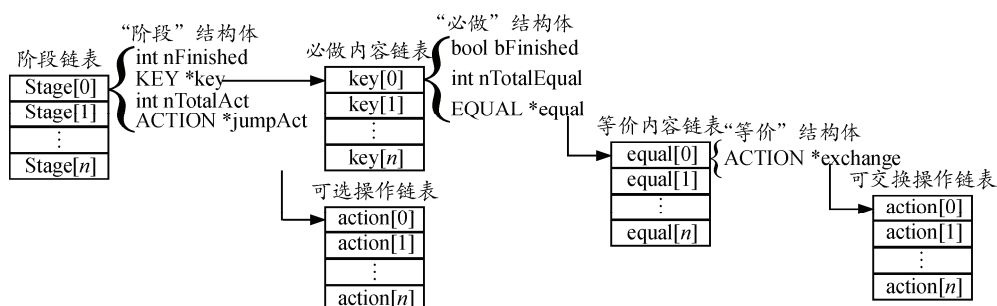
配，系统就可以对接收的数据进行识别和处理了。

5.3 基于标准外设的交互技术

随着实装工控机界面功能的丰富，基于标准外设包含了多种操作，例如实际系统中在精电视或粗电视的视频显示区的鼠标引导。在模拟装置中，基于鼠标消息事件，实现了对电视模拟图像指定区域的鼠标引导的操作训练。

6 评分方法

提出了具有普适性、可扩展性的科目训练评估



采用树形评分结构体链表的科目训练评估方法不仅对 ATP 训练模拟系统适用，还可以用于任何其他针对多级、多分支操作流程的训练评估，只需在软件的安装文件夹内提供独立于程序之外的科目操作标准流程.xml 文件，就可以对该科目进行用户操作流程的评估和打分。

7 结论

利用先进仿真技术实现捕获跟踪瞄准系统虚拟训练，具有经济性、逼真性等明显的优点。笔者对模拟装置的实现模式、软件结构框架、ATP 系统各模块仿真模型、基于 HLA/RTI 的时间管理和多种人机交互形式等关键技术的实现进行了研究。该装置实现了对实装系统的单杆跟踪、电视跟踪等科目的模拟和训练。笔者采取了与实装完全一致的操控面板作为人机交互接口，并且联合训练过程中按照机器时钟推进仿真时间，通过真实感强、完全实时性的跟踪操作训练，保证了训练效果和训练质量，达到了以虚拟式、分布式、真实感和实时性为主要特征的训练模拟系统设计目标。

参考文献：

[1] 梁炳成, 王恒霖, 郑燕红. 军用仿真技术的发展动向和

方法。采用图 4 所示的树形评分“结构体”链表，通过读取.xml 格式的科目标准操作流程首先初始化链表对象，然后在具体的科目训练过程中根据每步操作不断更新；对当前操作步依据操作项的名称搜索当前对象的各个结点，对名称匹配的结点，依据“当前阶段”、“必做内容是否完成”、“等价类型”、“可交换操作”和“可选操作”等特征判定该步是否为正确操作。在“交卷”和出现“阶段”、“必做”内容操作错误时根据此时链表对象的各个结构体记录内容给出训练成绩。

展望[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(1): 18-21.

- [2] 周彦, 戴剑伟. HLA 仿真程序设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 28-41.
- [3] 任戈. 复合轴结构的运动关系分析[J]. 光电工程, 1995, 22(6): 41-46.
- [4] 刘兴法, 马佳光, 刘顺发, 等. 视轴偏角对三轴光电跟踪系统跟踪过程的影响[J]. 光电工程, 2005, 32(5): 4-8.
- [5] 岳玉芳, 张飞舟, 张玉双, 等. 激光动态光束定向系统的跟踪识别过程仿真[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1270-1274.
- [6] 岳玉芳, 张玉双. 激光跟瞄仿真系统及两种跟瞄方法[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2575-2580.
- [7] 刘步权, 王怀民, 姚益平. 层次式仿真运行支撑环境 StarLink 中的关键技术[J]. 软件学报, 2004, 15(1): 9-16.
- [8] 岳玉芳, 安建祝, 张玉双. 运动目标识别与跟踪仿真系统的基本技术问题[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(8): 3170-3175.
- [9] 冯贵江, 李言俊, 张科, 等. 基于 HLA 光电对抗仿真系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(8): 2055-2058.
- [10] 谈斌, 赵军, 曲庆军, 等. 基于 HLA 的武器装备作战效能评估通用仿真框架研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 5021-5024.
- [11] 李现勇. Visual C++串口通信技术与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 56-78.