

# 基于 HLA 的无人战斗机巡航高度仿真系统设计

赵辉<sup>1</sup>, 胡杰<sup>1</sup>, 黄长强<sup>1</sup>, 王治军<sup>1</sup>, 崔亮<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 94857 部队 77 分队, 安徽 芜湖 241007)

**摘要:**基于 HLA(High Level Architecture)提供的通用框架和开放标准,对无人战斗机的仿真方法进行了研究,介绍了无人战斗机作战仿真系统联邦结构,给出了联邦对象模型/成员对象模型设计和管理方法,从实时 RTI 终端系统、通讯保证体系和增强型可预测的 RTI 服务等 3 个方面,解决了该半实物仿真系统的实时性要求,建立了影响巡航高度因素的数学模型,对各因素进行了详细的分析,并通过软件在整个系统中实现了各联邦成员。根据仿真流程,采用 MÄK Technologies 公司的 MÄK RTI,借助 Visual C++6.0 实现联邦仿真平台的设计。通过对无人战斗机巡航高度的仿真可知,结论真实可信,丰富详实,该系统为下一步完成无人战斗机作战任务的模拟奠定了理论及应用基础,并为今后类似仿真系统的研制提供了借鉴。

**关键词:**HLA; 无人战斗机; 巡航高度; 实时

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)06-0016-06

无人战斗机是未来战场上的主力军和杀手锏,已经成为各国研究的热点。如何在非真实战场环境中对其进行模拟训练是最关键的问题。因为它不仅可以避免无谓的伤亡,更可以通过无人战斗机的任务推演(Mission Rehearsal),在交互式的作战模拟环境中,对作战任务和影响任务成功的关键环节进行循环演练,从而达到对无人战斗机的训练目的。

1995年,美国国防部发布了建模与仿真主计划(M&S Master Plan, MSMP),技术框架的核心是高层体系结构(High Level Architecture, HLA)<sup>[1-2]</sup>。HLA是一个开放的、支持面向对象的体系结构,它的显著特点就是联邦范围内联邦成员的互操作性和重用性。基于高层体系结构,国内学者设计出了多种仿真应用平台:陈家照等提出了一种导弹发射训练仿真系统的开发框架<sup>[3]</sup>;康凤举等提出了一种基于高层体系结构的可扩展、可重构的鱼雷武器作战仿真开放式应用体系结构的设计方法<sup>[4]</sup>;解放军理工大学的江汉等人使用基于HLA的代理联邦将分布在广域网上的各个实装系统连接到C<sup>4</sup>ISR仿真系统中,并通过HLA/RTI完成仿真系统与实装系统间的交互<sup>[5]</sup>。

在借鉴上述平台的设计思想的基础上,基于对高层体系结构为建模与仿真提供的通用的技术框架和开放标准的研究和理解,通过军内局域网平台,结合某型无人战斗机的结构组成和功能、作战使用方法以及战场环境等因素,突出互操作性和重用性,着重于实时性要求,以提高无人战斗机在真实作战环境下的作战和航迹规划能力等为目的,开发了无人战斗机仿真系统,并在此系统上,就无人战斗机航迹规划中巡航段飞行高度问题进行了仿真分析。

## 1 系统总体框架结构设计

### 1.1 仿真联邦系统组成及功能

按照实战要求,整个联邦系统主要包括无人战斗机(不包括电视导引头)成员、电视导引头成员、地面控

\* 收稿日期:2008-06-02

基金项目:国家“863”计划资助项目(2007AXX208)

作者简介:赵辉(1973-),男,甘肃兰州人,副教授,博士,主要从事机载制导武器系统技术与运用研究。

E-mail:jackyhoooo@163.com

制站成员、作战环境模拟(包括地形地物)成员、作战目标成员、敌方防空武器(包括地空导弹和高炮)成员、仿真引擎成员等顶层模块。其中,无人机地面控制站实物作为联邦成员加入仿真系统,主要对无人战斗机作战过程和实时航迹规划进行控制和显示。仿真引擎(Simulation Engine)成员由仿真调度器、仿真控制器以及数据记录器组成,使用基于时间序和事件序的层次式仿真调度算法控制整个系统的运行,在系统中负责时间推进、调度运行、仿真控制、数据存储。这些顶层模块分别作为仿真系统中的联邦成员,实现具体的仿真应用。无人战斗机作战仿真联邦体系拓扑结构如图1所示。整个仿真联邦由中央RTI组件(CRC)负责协调管理,给本地RTI组件(LRC)分配工作;本地RTI组件负责与中央RTI进行通讯,完成联邦成员间的数据交换。

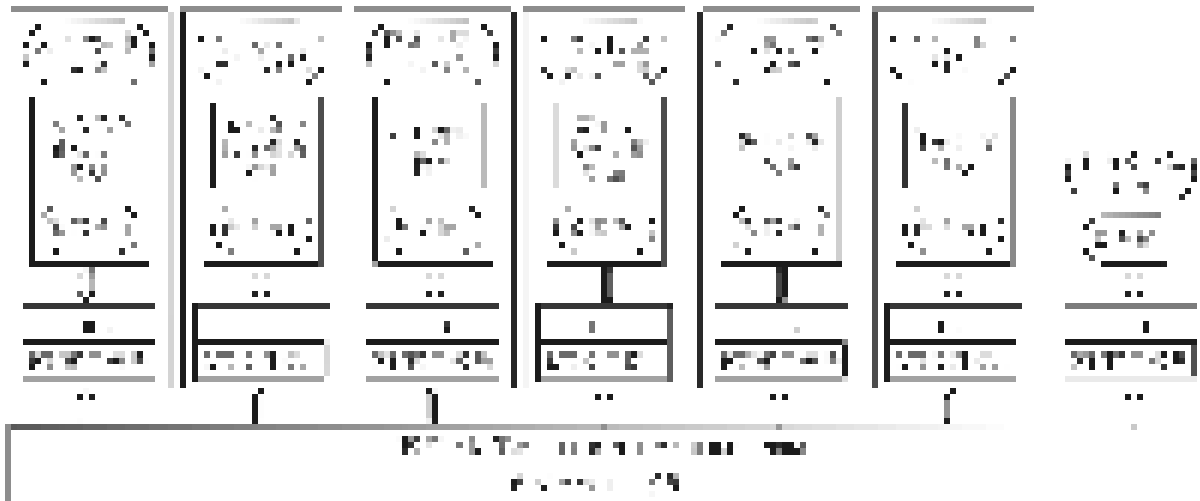


图1 无人战斗机作战仿真联邦体系拓扑结构图

Fig.1 Structure of UCAV's simulation system

本系统中还包含有一些不属于联邦成员的分系统,主要包括以下部分:

1) 作战想定脚本设计及转换分系统。该分系统采用一种与仿真平台无关的想定系统,主要用于仿真前的准备,它可以完成作战想定中联邦成员的对象类和交互类的编辑、存储与加载、模型的参数设置、仿真实验参数设置、仿真预定航路规划、目标轨迹规划等<sup>[6]</sup>。它主要分为与参加训练的人员相关的军事想定,面向仿真系统的模拟脚本,以及面向实际作战的作战脚本。文中主要用到模拟脚本。作战想定脚本设计分系统通过想定初始化及行动方案生成,产生公共格式的作战想定。作战想定包含了描述某个想定背景下的仿真运行的完备数据信息。通过相应的且各不相同的转换接口,可以把作战想定转换为符合特殊仿真系统要求的模拟脚本,转换流程如图2所示。

2) 仿真评估分系统。该系统主要用于对仿真数据的分析和处理,从而对无人战斗机作战(包括目标被击毁的概率以及无人战斗机自身毁伤等方面)和实时航迹规划效果和进行定量评估。

3) 实时计算机。作为测试进程的接口界面控制实时处理模块,实时计算机上有多个PCI总线接口,通过安装在PCI接口上的1553B总线接口板或ARINC429总线接口板对整个仿真系统的功能进行扩展,在用户控制界面中对待扩充的与无人机有关的真实设备或待测设备(如各种外挂物:导弹、炸弹、吊舱等)进行检测。

4) 配线矩阵及信号调理模块。通过配线矩阵和信号调理连接不同的真实设备。

5) 错误注入及中断模块。由软件控制提供故障注入,提供硬件的测试与分析 and 故障的监测与分析。

### 1.2 FOM/SOM 设计

在HLA的对象模型模板中,HLA定义了2类对象模型<sup>[2,7]</sup>,一类是描述联邦的联邦对象模型(Federal Object Model, FOM),它主要描述了在仿真过程中将参与联邦成员信息交换的对象类、对象类属性、交互类、交互参数的特性;另一类是描述联邦成员的成员对象模型(Simulation Object Model, SOM),它是单一联邦成员的对象模型,描述了联邦成员可以对外公布或需订购的对象类、对象类属性、交互类、交互参数的特性,根

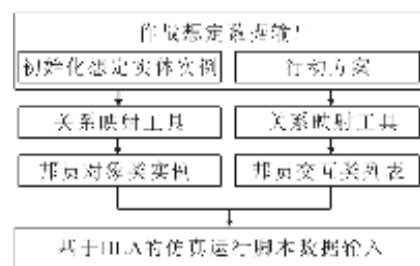


图2 作战想定转换流程图

Fig.2 Flow chart of combat scheme

据对该系统的分析,确定联邦系统属性表和参数表部分内容见表1、表2。

表1 属性表

Tab. 1 Attributes Table

对象类	属性	数据类型	基数性	精度	重新类别
WRJ (无人机对象类)	SD(速度属性)	Unsigned short	1	Perfect	Conditional
	GD(高度属性)	Unsigned short	1	Perfect	Conditional
	WZ(位置属性)	Short	1	Perfect	Conditional
	ZT(姿态属性)	Float	1	Perfect	Conditional
DSDYT (电视导引头对象类)	ZYJL(作用距离属性)	Short	1	Perfect	Periodic
	SCJD(视场角度属性)	Float	1	Perfect	Periodic
ZZHJ(作战环境对象类)	HJGD(环境高度属性)	Unsigned short	1	Perfect	Conditional
ZZMB(作战目标对象类)	WZ(位置属性)	Short	1	Perfect	Conditional
FKWQ (防空武器对象类)	DKDDLD_FXJL(地空 导弹雷达_发现距离属性)	Unsigned short	1	Perfect	Periodic
	GP_SSGL (高炮_杀伤概率属性)	Float	1	Perfect	Periodic

表2 参数表

Tab. 2 Parameters Table

交互类	参数	数据类型	可用维数	传送类型	顺序方式
GJ(攻击交互类)	QF(起飞参数)	Boolean	NA	HLAreliable	TimeStamp
	XH(巡航参数)	Boolean	NA	HLAreliable	TimeStamp
	GB(规避参数)	Boolean	GB_dim	HLAreliable	TimeStamp
	FC(俯冲参数)	Boolean	NA	HLAreliable	TimeStamp
	GJMB(攻击目标参数)	Boolean	GJ_dim	HLAreliable	TimeStamp
GDGH (高度规划交互类)	DSDYT_GD(与高度 有关的电视导引头参数)	Unsigned short	GD_dim1	HLAreliable	TimeStamp
	DKDD_GD(与高度 有关的地空导弹参数)	Unsigned short	GD_dim2	HLAreliable	TimeStamp
	GP_GD(与高度 有关的高炮参数)	Unsigned short	GD_dim3	HLAreliable	TimeStamp
	DXDW_GD(与高度 有关的地形地物参数)	Unsigned short	GD_dim4	HLAreliable	TimeStamp

### 1.3 时间管理

联邦成员的逻辑时间管理策略<sup>[2]</sup>分为时间控制(Time Regulating)和时间受限(Time Constrained)两类,两两组合后,可以有4种状态。文中的仿真引擎成员为仅“时间受限”,它的时间推进受其他成员的影响而不影响其他成员的时间推进;其他成员设为既“时间控制”又“时间受限”,它们的时间推进既受其他成员的影响又影响其他成员的时间推进。

消息的传递机制<sup>[2]</sup>包括2方面的内容:一是消息传输方式,二是消息传递顺序。其中,消息的传输方式分为“可靠”(Reliable)和“快速”(Best Effort)2种。由于在本系统所需传输的数据繁多,所以传输方式为“可靠”;消息的传递顺序基本分为接收顺序(Receive Order)和“时戳”顺序(Time Stamp Order)。文中采用“时戳”顺序进行消息传输。

### 1.4 实时性要求设计

实时性是保证整个联邦以及各个联邦成员协调一致的按照事先想定逐步完成系统仿真功能的重要因素。系统对实时性的要求<sup>[8]</sup>有:根据模型化及动态化仿真过程设计的仿真程序必须依据真实世界的时间进行执行;RTI必须在限定的反应时间内为各成员提供服务;联邦所有的组成部分为了满足实时性这方面的约束,必须处于一种可预见的运行模式中。

文中采用了一种从以下3个方面满足实时仿真系统要求的新方法。这3个方面包括:

1) 实时 RTI 终端系统(包括动态进程模型,全局规划服务,固定优先级的分发机制)。诸如在各个联邦成员中的本地 RTI 组件(LRC),实时 RTI 终端系统对于管理 RTI 过程模型是非常必要的。它不仅可以提供标准的接口规范,还可以在更高层次上指定实时性的要求;它可以有效地对约束系统中的有限资源进行处理和分配。文中联邦系统结构采用了 LRC 结构,见图 1。

2) 增强型可预测的 RTI 服务。当 RTI 的行为可以被预测时,整个联邦中的所有联邦成员互相之间的信息通讯便可以实时地进行。在这里,为了达到对 RTI 服务进行预测的目的,我们使用动态节点数据分发方案,对联邦数据分发管理方式进行了算法优化,提高其运行效率。对于其他 5 种联邦管理方式,我们也进行了相应的算法优化改进。

3) 通讯保证体系。这种体系采用了一种特殊的传输层,它能够提供可预测的通讯网络性能,从而可以保证信号时间延迟限值不随时间的推移而变大,更可以扩大各个联邦成员之间数据通讯的带宽。

## 2 影响巡航高度的联邦成员模型分析

影响飞行高度的因素很多,如电视导引头成员的视场、敌方防空力量成员(包括地空导弹和高炮成员)、地形地物成员、气象条件、燃料和时间限制、无人机成员的飞行速度等。在这里主要分析前文所述的 3 个联邦成员对飞行高度的影响。联邦创建及各成员实现加入联邦的程序如下。所有成员对飞行高度的具体影响将体现在程序之中:

```
RTI: :RTIambassador rtiAmb//RTI 代理
ucavfightFederateAmbassador fedAmb//成员代理
rtiAmb. createFederationExecution( ucavfight, " ucavfight. fed" )//创建联邦执行,以联邦执行名和 Fed 文件名作为参数
federateId = rtiAmb. joinFederationExecution( DSDYT ) //电视导引头成员加入联邦
federateId = rtiAmb. joinFederationExecution( DKDD ) //地空导弹成员加入联邦
federateId = rtiAmb. joinFederationExecution( GP ) //高炮成员加入联邦
federateId = rtiAmb. joinFederationExecution( DXDW ) //地形地物成员加入联邦
.....
```

### 2.1 电视导引头成员

对于电视导引头来说,识别距离和飞行视场是 2 个重要指标。飞行视场是指导引头瞬时视场形成的锥体被地面切割形成的区域。由于导引头的最大识别距离有限(一般来说,在十几 km 左右),当飞行高度定得太高时,地面视场变小,对搜索目标不利。

$$B_2 = \frac{H \sin 2\alpha}{\cos(\arccos \frac{H}{D} - 2\alpha)} \quad (1) \quad S = \sqrt{D^2 - H^2} + H \tan(\arccos \frac{H}{D} - 2\alpha) \quad (2)$$

设  $D$  为导引头的最大识别距离, $H$  为飞行高度, $S$  为地面视场纵深, $B_1$ 、 $B_2$  为地面视场的前后沿的宽度,导引头瞬时视场为  $\pm\alpha$ ,并设俯仰和偏航方向导引头瞬时视场角度相同。

地面视场面积<sup>[9]</sup>为

$$A = \frac{1}{2}(2D \sin \alpha + B_2)S \quad (3)$$

### 2.2 敌方防空力量成员

#### 2.2.1 地空导弹成员

地空导弹成员对巡航高度的影响因素<sup>[9-10]</sup>可以分为 2 个部分:雷达发现飞机以及单发地空导弹击毁飞机。由于飞行高度的变化对单发导弹的杀伤概率影响不大,所以,本文主要讨论雷达发现飞机因素对巡航高度的影响。

目标的发现距离与目标飞行高度的关系可表示为

$$D = -R'_g \sin \varepsilon_k + \sqrt{(R'_g \sin \varepsilon_k)^2 + 2HR'_g} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_k$  为雷达天线遮蔽角; $R'_g$  为考虑正常大气折射率式的假想地球半径,取 8 500 km。

### 2.2.2 高炮成员

这里主要研究防空高炮一次点射对飞机的杀伤概率与巡航高度的关系。高炮的一次点射概率  $P_g$  表达式为

$$P_g = \frac{S_\tau e_2(t) e_2(t'')}{2\pi\omega |\mathbf{K}_{ij}^t|^{1/2}} e^{-\frac{1}{|\mathbf{K}_{ij}^t|} (\mathbf{K}_{22}^t \alpha_1^2 - 2H\mathbf{K}_{12}^t \alpha_1 \alpha_2 + \mathbf{K}_{11}^t \alpha_2^2)} \quad (5)$$

式中:  $S_\tau$  为目标投影面积;  $\mathbf{K}_{ij}^t$  为各类误差的协方差矩阵元素; 其中  $i, j = 1, 2$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  为系统误差;  $e_2(t)$  为柯西计算法所需函数, 由查表得到。

### 2.3 地形地物成员

在比较复杂的地形环境中, 由于障碍物或地面的起伏会对导引头产生遮蔽作用, 且易造成坠机的危险, 因此, 飞行高度不宜太低; 相反的, 复杂的地形地物可以降低雷达发现飞机的概率, 所以飞行高度亦不宜太高。在具体问题中, 可以结合其他因素, 共同考虑合适的飞行高度。

## 3 仿真结果及分析

仿真平台采用的是 MÄK Technologies 公司的 MÄK RTI, 原型软件采用 Visual C++6.0 来实现。将由 Multigen Creator 创建的三维实体模型并用 Multigen Vega 进行仿真驱动加入联邦, 获得了如图 3 的视景图像。

根据前文所述的 3 个联邦成员对无人战斗机巡航高度的影响, 通过对整个系统的仿真, 得出以下结论:

①仅考虑电视导引头成员时, 飞行高度选择为 800 m 左右, 因为此时电视导引头可摄取到较清晰的战场图像; ②仅考虑防空高炮成员, 飞行高度选择为 800 m 或 1 000 m; ③仅考虑地空导弹成员, 可采用低空或超低空飞行, 飞行高度选择为 100 m 或 200 m, 可以减小防空雷达的发现概率, 提高低空突防能力; ④仅考虑地形地物成员, 飞行高度可设定为 800 m 或 1 000 m, 但一般来说, 在保证飞机自身安全的前提下, 可选择 800 m 或更低的高度, 充分利用地形对雷达的遮蔽作用, 使得飞机不易被防空雷达发现, 提高飞机的生存概率; ⑤如果综合所有成员对高度的影响时, 可以在无人机巡航阶段, 对于不同的影响采取变高度控制来提高突防能力; ⑥除此之外, 在射程允许范围内, 在选择航路点时, 可以采取航路规避, 尽量避开已知防空阵地或重点布防空域, 可有效降低敌防空体系的杀伤率; 经过防空阵地时也可以采用蛇行机动来降低地空导弹系统和高炮系统的射击精度; 在飞机飞行速度和导引头搜索速度范围内, 可以尽量提高飞机的飞行速度降低敌防空体系的杀伤率。

## 4 结论

在 HLA 通用框架的基础上, 设计了无人战斗机仿真平台。该平台是在填补半实物仿真系统实时性不足和数据冗余等缺点的情况下, 根据真实流程设计出的仿真平台, 能够很好地模拟无人战斗机的巡航过程; 三维视景显示增加了仿真过程的交互操作能力, 仿真结果真实可信。该平台的实现, 对于无人战斗机的作战训练的模拟有很大帮助, 并且为今后类似仿真系统的研制提供了借鉴。

### 参考文献:

- [1] 苗强, 吴德伟, 何晶, 等. 航空无线电导航系统仿真研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(3): 16-19.  
MIAO Qiang, WU Dewei, HE Jing, et al. Study in the Simulation of Aviation Wireless Navigation System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(3): 16-19. (in Chinese)
- [2] 周彦, 戴剑伟. HLA 仿真程序设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.  
ZHOU Yan, DAI Jianwei. Design of HLA Simulation Program[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [3] 陈家照, 何全明, 关正西. 基于 HLA 的某导弹发射训练仿真系统开发[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3393-3395, 3402.  
CHEN Jiazao, HE Quanming, GUAN Zhengxi. Development of Missile Launching Training Simulation System Based on HLA



图3 无人机三维视景图

Fig. 3 Three - dimensions view of UCAV

- [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(12):3393-3395, 3402. (in Chinese)
- [4] 康凤举, 顾浩, 吴宇, 等. 基于 HLA 的鱼雷武器系统仿真环境设计与实现[J]. 兵工学报, 2007, 28(3):382-384.  
KANG Fengju, GU Hao, WU Yu, et al. Design and Implementation of Simulation Environment for HLA-compliant Torpedo Weapon System[J]. Armamentarium, 2007, 28(3):382-384. (in Chinese)
- [5] 江汉, 尹浩, 李学军. C<sup>4</sup>ISR 半实物仿真系统互联设计及其互操作[J]. 计算机仿真, 2006, 23(5):21-23, 84.  
JIANG Han, YIN Hao, LI Xuejun. A Networking Design and Interoperability Analysis for Hardware-in-the-loop C<sup>4</sup>ISR Simulation System[J]. Computer Simulation, 2006, 23(5):21-23, 84. (in Chinese)
- [6] Robert W Franceschini. Specifying Scenarios Using the Military Scenario Definition Language[R]. 04F-SIW-0GB.
- [7] 林新, 贾荣珍. 联邦对象模型与仿真对象模型开发过程建模[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2):332-336.  
LIN Xin, JIA Rongzhen. Modeling of FOM/SOM Development Process[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(2):332-336. (in Chinese)
- [8] Azzeding Boukerche, Kaiyuan Lu. A Novel Approach to Real-time RTI Based Distributed Simulation System[C]//Proceedings of the 38th Annual Simulation Symposium. Washinton DC, USA: IEEE Computer Society, 2005.
- [9] 李永宾. 某型电视制导弹作战使用方式研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2002.  
LI Yongbin. Research on Combat Mode of TV-guided Missile[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2002. (in Chinese)
- [10] 李延杰. 防空导弹武器系统射击效率[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.  
LI Yanjie. Fire Efficiency of Aerial Defense Missile Weapon System[M]. Beijing: Publishing House of Beijing Aviation Institute, 1987. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

## Design of the Cruise Height Simulation System of UCAV Based on HLA

ZHAO Hui<sup>1</sup>, HU Jie<sup>1</sup>, HUANG Chang-qiang<sup>1</sup>, WANG Zhi-jun<sup>1</sup>, CUI Liang<sup>2</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. No. 77 detachment of Unit 94857, Wuhu 241007, Anhui, China)

**Abstract:** Based on the framework and standards provided by HLA (High Level Architecture), simulation method of UCAV (Uninhabited Combat Air Vehicle) was studied. The federation structure of the simulation system was introduced. FOM (Federation Object Model)/SOM (Simulation Object Model) and time management of the federation are designed. Three ways such as real-time RTI end-system, communication assurance system and enforced predictable RTI service are adopted to meet the real time requirements. Factors that affect cruise height are also analyzed, and the models of the factors are established. According to the simulation procedure, federation simulation platform is designed by adopting MÄK RTI and Visual C++ 6.0. The results obtained from the simulation on the cruise height of UCAV are believable and detailed. The simulation system prepared the ground for the simulation of the UCAV combat tasks and can be a reference for the future development of the similar system.

**Key words:** HLA; UCAV; cruise height; real time

### 本刊部分高贡献作者

根据中国期刊计量指标数据库 2008 版统计结果, 本刊 2008 年文章被引 4 次以上的第一作者如下:

作者姓名	被引次数	作者姓名	被引次数	作者姓名	被引次数
雷英杰	13	申卯兴	9	李建全	7
花文健	7	李应红	7	杨策	6
王远振	5	肖明清	5	蔡良才	4
陈绍顺	4	程红斌	4	韩俊杰	4
柳长安	4	王从侠	4	翁兴中	4

(编辑部)