

中图分类号: TP 391.9 文献标识码: A

基于 UML 的作战仿真 VV&A 过程形式化建模

唐见兵¹, 查亚兵²

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 可信性是作战仿真的生命线, 对作战仿真的全生命周期进行校核、验证与确认 (Verification, Validation and Accreditation, VV&A) 是确保其可信性的重要途径。建立合适的 VV&A 过程形式化模型是开展作战仿真 VV&A 过程研究的前提和基础。基于统一建模语言 (Unified Modeling Language, UML) 分别从用例、静态结构、动态行为及交互等方面对 VV&A 过程进行形式化建模, 建立了作战仿真 VV&A 过程的用例、类图、活动图及顺序图模型, 并给出相应的形式化定义。实践表明: 作战仿真 VV&A 过程形式化建模可以使 VV&A 的描述规范化、标准化及形式化, 便于不同领域人员的相互沟通与交流, 以及 VV&A 工程化应用, 促进了 VV&A 工作顺利开展。

关键词: 作战仿真; 校核、验证与确认 (VV&A) 过程; 形式化建模; 统一建模语言 (UML) 语言; 可信性

Formalization Modeling on VV&A Process for Warfare Simulation by UML

TANG Jianbing¹, ZHA Yabing²

(1. College of Basic Education for Commanding Officers, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The credibility is the lifeline of warfare simulation. To execute verification, validation and accreditation (VV&A) is an important approach to insure the credibility of warfare simulation system through out the life circle. It is the precondition and foundation to make the right formal model of VV&A process for warfare simulation. In this paper, the formal models of VV&A process is carried out in which the details of use case, static construction, dynamic activities and interactions are modeled based on UML, and their formalization definitions are put forward. The practice shows that the formalization modeling on VV&A process for warfare simulation by UML can make it standardization, regularization and formalization, which can help the researchers in different domains to communicate with each other. The research of VV&A can be used in engineering, which help the job of VV&A is developed expediently.

Key words: warfare simulation; VV&A (verification, validation and accreditation) process; formalization modeling; UML (unified modeling language); credibility

1 引言

作战仿真是研究作战最有效的方法之一, 在

各层次作战的分析、训练以及测试与评估中发挥着越来越重要的作用。作战仿真具有多层次性、多要素性、多领域性、整体涌现性、不确定性、病态性及模型粒度多样性等复杂性特点^[1-2], 这些

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60904055); 国防预研重点基金资助项目 (9140A04010110KG0110)

特点必将影响到作战仿真的可信性。作战仿真的可信度能否达到要求,直接关系到它的应用成败^[3-4],进而影响到国防和军队的建设。因此,可信性是作战仿真的关键要素,值得重点关注和深入研究^[5]。

作战仿真的可信性主要体现在三个方面:建模与仿真(M&S)过程的正确性、仿真结果反映作战系统的有效性,以及有关人员对M&S过程与仿真结果的信心,这些都可以由仿真全过程的校核、验证与确认(Verification, Validation and Accreditation, VV&A)来保证。所以,应该对作战仿真全生命周期进行VV&A研究^[6-9]。

模型是研究的工具,建立合适的VV&A过程模型是进行作战仿真VV&A过程研究的前提和基础。VV&A过程模型能够为VV&A研究提供蓝图,它可以是结构性的,强调VV&A的静态组织结构;也可以是行为性的,强调VV&A的动态方面。对作战仿真VV&A过程进行形式化建模可以使VV&A过程的描述可视化、规范化、标准化及形式化,便于不同领域人员的相互沟通与交流,帮助VV&A人员更好地开展VV&A工作,也便于VV&A的工程化应用。

本文在描述作战仿真VV&A过程的基础上,基于统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)分别从用例、静态结构、动态行为及交互等方面对VV&A过程进行形式化建模,并给出相应

的形式化定义^[10-12]。

2 作战仿真 VV&A 过程描述

每一项VV&A工作都是仿真全生命周期中的一项活动,所有的VV&A活动联系起来可以看成是一个VV&A过程,即开展VV&A工作的流程。Balci等将仿真生命周期概括为10个阶段和提出了13个VV&A活动的过程模型,美国国防部《VV&A建议指导规范》提出了一个将一般仿真系统生命周期中的VV&A工作划分为七个主要阶段的过程模型,文献[13]等提出了分布交互仿真VV&A的九步参考模型,文献[14-15]针对IEEE1516.3版的FEDEP的八个阶段的VV&A过程进行了研究。这些VV&A过程模型都对作战仿真VV&A过程模型的研究具有参考价值。

作战仿真的VV&A过程是伴随作战仿真系统建设全过程而产生的,覆盖仿真系统建设的每一个阶段^[16-19],如图1所示。最上面的虚线框是作战仿真系统开发过程,分为定义需求、开发概念模型、系统设计(包括概要设计和详细设计)、系统开发、集成与测试以及系统运行与验收五个阶段;中间实线框是作战仿真系统的V&V过程,包含六个具体的V&V工作;最下面的实线框是作战仿真系统的确认过程。

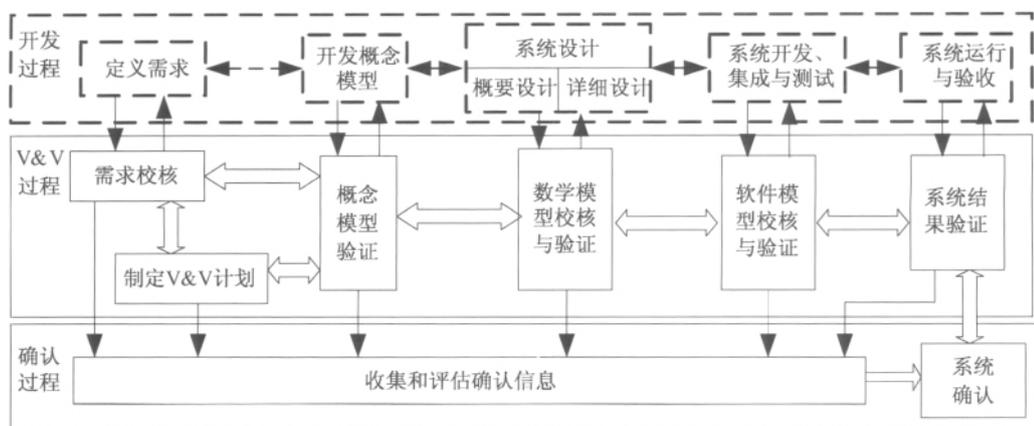


图1 作战仿真系统的开发及其VV&A过程

Fig. 1 Process of development and VV&A for warfare simulation system

因此,作战仿真的 VV&A 过程可以形式化定义为:

定义 1(作战仿真 VV&A 过程,WSVP):作战仿真系统的 VV&A 过程(WSVP)可以形式化定义为:WSVP:=(VVP,AP) 其中:

$VVP = \{ Req\ Ver, VV\ Plan, MCM\ Val, MM\ VV, SM\ VV, Result\ Val \}$ 表示 V&V 过程集合,即需求校核、制定 V&V 计划、概念模型验证、数学模型 V&V、软件模型 V&V、作战仿真系统结果验证等;

$AP = \{ Model\ Accreditation, System\ Accreditation \}$ 表示确认过程集合,包括作战模型确认和仿真系统确认。

3 基于 UML 的作战仿真 VV&A 过程建模

UML 是一种用于详细描述复杂系统的形式化语言,由事物、关系和图组成。其中,最常用

的图有用例图、静态图、行为图、交互图、实现图共五大类 10 种。通过这些事物、关系和图可以将作战仿真 VV&A 过程非常清晰地形式化描述:利用其静态模型可以方便地描述作战仿真 VV&A 过程中各元素之间的关系,利用其动态模型可以清晰地描述 VV&A 过程中各活动的时序关系^[11-12]。

基于 UML 的作战仿真 VV&A 过程形式化建模步骤如图 2 所示,可以分为以下几个步骤:

(1) 分析 VV&A 过程,识别用例,建立过程的用例图。

(2) 分析 VV&A 过程中的关键性元素及元素之间的关系,进行静态结构建模,建立 VV&A 过程的类图。

(3) 描述 VV&A 过程及产品之间的时序关系和交互关系,进行动态行为建模,建立 VV&A 过程的活动图或时序图。

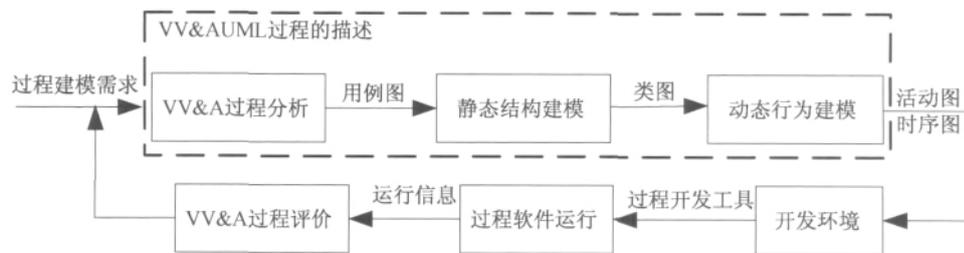


图 2 基于 UML 的 VV&A 过程形式化建模的步骤分析

Fig. 2 Analysis step for modeling the formal models VV&A process based on UML

3.1 VV&A 过程用例建模

基于 UML 的 VV&A 过程用例建模就是通过用例图(Use Case Diagram)来描述 VV&A 过程的用户模型。VV&A 用例图适合于对 VV&A 过程进行需求建模,表示 VV&A 活动与 VV&A 关键角色及其相互关系,并指出各功能的操作者。

作战仿真 VV&A 过程的用户模型如图 3 所示,它可以用一个三元组来结构化定义,即:UCD: = <UC, A, CR>。

其中:UC 表示作战仿真 VV&A 过程的用户(Use Case)集合,它由下列元素组成:需求校核、

制定 VV&A 计划、概念模型验证、数学模型校核与验证、软件模型校核与验证,以及模型确认与作战仿真系统确认,即

$UC = \{ Req\ Verification, VV\&A\ Planning, CM\ Validation, MM\ V\&V, SM\ V\&V, Accreditation \}$;

A 表示执行者 Actor 集合(即 VV&A 关键角色集合),它由六个基本元素组成,这六个角色是执行者的泛化,即 $A = \{ User, V\&V\ Agent, Accreditation\ Agent, SME, Developer, Estimator \}$;

CR 表示通信关系集合,即 VV&A 角色与用例之间的关系集合。

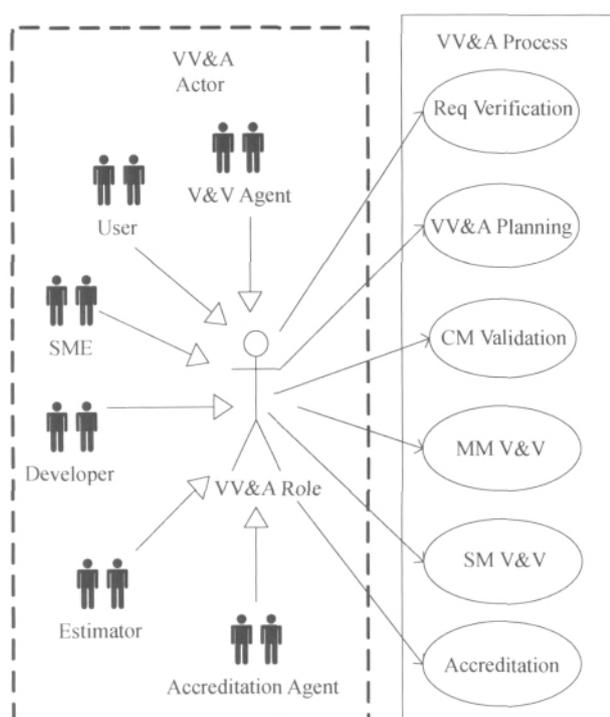


图3 作战仿真 VV&A 过程的用例模型
Fig. 3 Use case models of VV&A process for warfare simulation system

3.2 VV&A 过程静态建模

静态图可以对作战仿真 VV&A 过程的静态逻辑结构进行描述,从而建立 VV&A 过程的静态模型。静态图主要包括类图、对象图和包图,其中类图描述 VV&A 过程的静态关系,存在于 VV&A 过程中的整个生命周期,适合于作战仿真 VV&A 过程的概念建模。

建立基于 UML 的 VV&A 过程的类图,首先要对它进行面向对象的类设计:

(1) 将 VV&A 过程及其组成部分看作为具有广泛意义上的对象。

(2) 上述各个对象之间的通信称为消息,即要求某个对象执行类中定义的某个方法的说明。

(3) 将上述各个对象的共同行为和属性进行抽象,便得到了类,如作战仿真的 VV&A 过程可以抽象成类。为了研究的方便,还可以将这些类进行层次结构细化,得到它的子类;有时为了表示的需要,子类还可以细分为子类。相比之下,上层的类被称为父类,下层的类被称为子类,子

类与父类之间具有某种关系。

作战仿真 VV&A 过程的类图(Class Diagram)主要描述 VV&A 过程中的类、属性、操作及类之间的静态关系,如图 4 所示,可以用一个四元组 $\langle CN, Att, O, R \rangle$ 来表示:

CN 表示 VV&A 过程中所有类名的集合,作战仿真 VV&A 过程可以看作是父类,它包含三个子类 $\{ Verification, Validation, Accreditation \}$,即校核、验证和确认;每一个子类又有子类,如类 $Verification$ (校核)有四个子类元素,即需求校核、数学模型校核、软件模型校核和一致性校核。

$Att = \{ name, condition, state, cost, time, role \}$,表示类的属性集合,这些属性分别为 VV&A 的过程名称、进行 VV&A 过程所需要的条件、活动的当前状态、所需成本、时间,以及参与 VV&A 过程的角色。

$O = \{ start, consume, produce, exit \}$,表示类的操作集合,每一项 VV&A 活动都至少需要进行以下操作:开始、消费 VV&A 资源、输出 VV&A 产品和退出。

R 表示类之间的关系集合,包括依赖、关联、泛化和聚合关系等,图 4 中只标出了聚合关系。

3.3 VV&A 过程行为建模

基于 UML 的行为图可以对作战仿真 VV&A 过程进行行为(如 VV&A 过程的动态模型与组成对象之间的交互关系)建模,包括状态图和活动图。状态图(Statechart Diagram)又称状态机,是对类图的补充,它描述类的对象所有可能的状态以及事件发生时状态的转移条件;活动图(Activity Diagram)描述满足用例要求所要进行的活动以及活动间的约束关系。由于类图已经能够清楚描述作战仿真 VV&A 过程的静态结构关系,故本文只建立 VV&A 过程的活动图,如图 5 所示。

作战仿真 VV&A 过程的活动图可以表示为一个五元组,即 $AD = \langle S, V, f, S_0, F \rangle$,其中:

$S = \{ S_1, S_2, \dots, S_n \}$ 表示有限状态集,包含动作状态和活动状态。动作状态不能再进行分解,

活动状态是指可以再分解的状态。这里,可以令 $S_1 = Req\ Verification$ $S_2 = Con\ Verification ; \dots$ 。

$V = \{ V_1, V_2, \dots, V_n \}$ 表示输入事件集。图中箭头旁边标出了输入事件。

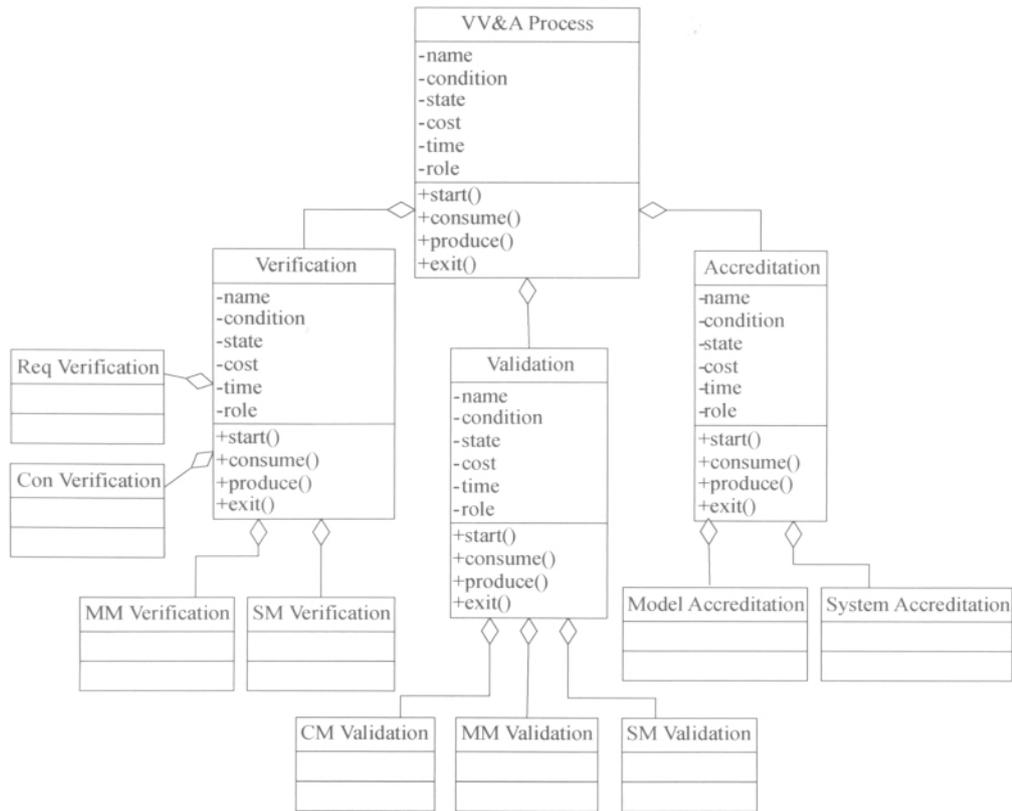


图4 作战仿真 VV&A 过程的类图模型

Fig.4 Class diagram models of VV&A process for warfare simulation system

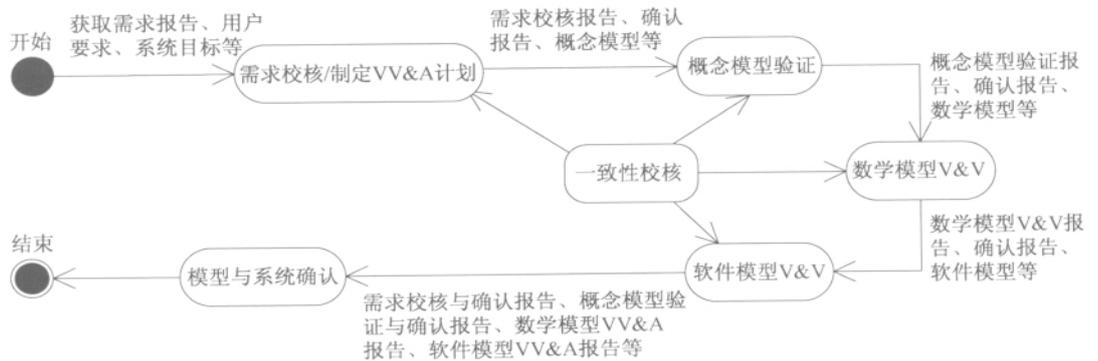


图5 作战仿真 VV&A 过程的活动图

Fig.5 Activity diagram models of VV&A process for warfare simulation system

f 表示状态转换函数,它是一个从 $S \times V$ 到 S 的部分映射,即 $f: S \times V \rightarrow S$,图中用有向箭头表示。

S_0 是唯一的一个初始状态。

F 是终态集。若 $f(S_1, V_2) = S_2$ $f(S_2, V_3) =$

$S_3 ; \dots f(S_{n-1}, V_n) = S_n = F$,则此 VV&A 过程结束。

3.4 VV&A 过程交互建模

作战仿真 VV&A 过程的交互建模主要描述对象间的交互关系,包括顺序图和合作图。其

中, 顺序图强调交互对象之间消息发送的时间和顺序关系, 合作图强调交互对象之间的上下级关系(即组织结构), 用两种方式建立的交互图具有等价的语义。由于本文只是关心 VV&A 过程中对象的消息发送的时间和顺序, 因此用顺序图对作战仿真 VV&A 过程进行建模即可, 如图 6 所示。

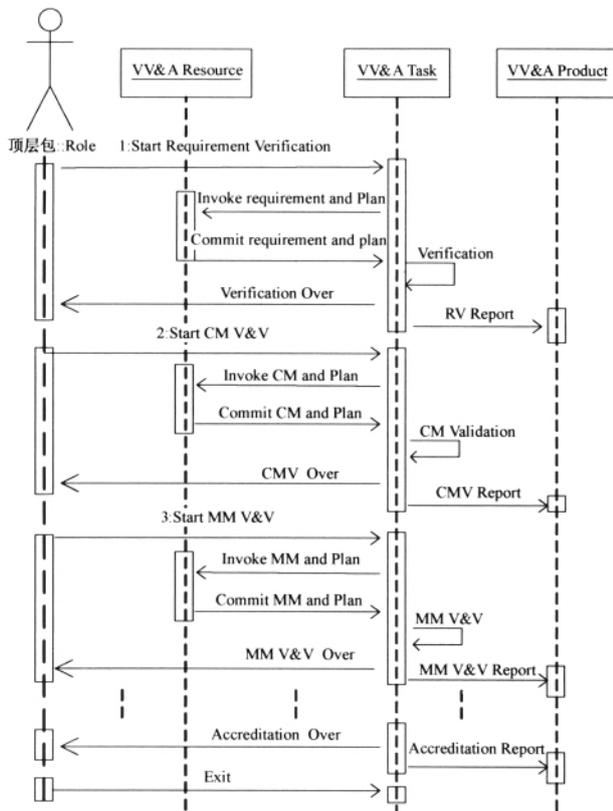


图 6 作战仿真 VV&A 过程的顺序图

Fig. 6 Sequence diagram models of VV&A process for warfare simulation system

图 6 中, 将 VV&A 角色、VV&A 资源、VV&A 任务及 VV&A 产品看作对象, 它们都与 VV&A 活动相关联。执行 VV&A 任务时, 要消耗 VV&A 资源, 产生 VV&A 产品。

VV&A 的顺序图(Sequence Diagram) 可以表示为一个四元组: $SD = \langle O, M, E, \rightarrow \rangle$ 。

其中:

$O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$ 是对象集合, 如 VV&A Resource, VV&A Task 和 VV&A Product 都是顺序图中的对象。

$M = \{msg_1, msg_2, \dots, msg_n\}$ 是消息集合, 如顺序图中的“Req Verification, Req Verification Oevr, CM Validation”等。

$E = M\{s, r\}$ 是事件集合, 即消息的发送和接收集合。对于消息 msg , 发送事件用 (msg, s) 表示, 接收事件用 (msg, r) 表示。顺序图中所有发送消息事件的集合记为 S , 所有接收消息事件的集合记为 R 。

\rightarrow 是消息集合 M 上的一个全序关系, 表示顺序图中的消息在纵向时间轴上的先后关系。如顺序图中的“需求校核→概念模型验证→数学模型 V&V→...”。

4 结 语

本文主要采用统一规范的 UML 语言对作战仿真 VV&A 过程进行形式化建模。形式化模型详细说明 VV&A 的结构、行为和流向, 明确 VV&A 活动的内容、方法及输入、输出产品等, 促使 VV&A 工作规范化、标准化、可视化、形式化和结构化, 从而促进军事人员、仿真技术人员、主题专家和 VV&A 人员等各方人员之间的沟通与协作, 方便 VV&A 工作顺利开展。文本的研究已成功应用于某作战仿真系统 VV&A 中。实践表明, 本文提出的基于 UML 对作战仿真 VV&A 过程进行形式化建模可以使 VV&A 的描述规范化、标准化、形式化及 VV&A 的工程化应用, 有力地促进了 VV&A 工作顺利开展。

参考文献:

- [1] 胡晓峰, 罗批, 司光亚, 等. 战争复杂系统建模与仿真 [M]. 北京: 国防大学出版社 2005.
HU Xiaofeng, LUO Pi, SI Guangya, et al. Modeling and simulation of warfare complex system [M]. Beijing: National Defense University Press 2005.
- [2] 胡晓峰, 杨镜宇, 司光亚, 等. 战争复杂系统仿真分析与实验 [M]. 北京: 国防大学出版社 2008.
HU Xiaofeng, YANG Jingyu, SI Guangya, et al. Analysis

- and experiment of warfare complex system [M]. Beijing: National Defense University Press 2008.
- [3] 王子才,张冰,杨明. 仿真系统的校核、验证与验收 (VV&A): 现状与未来[J]. 系统仿真学报, 1999, 11(5): 321-325.
WANG Zicai, ZHANG Bing, YANG Ming. Verification, validation and accreditation (VV&A) for simulation system: current status and future [J]. Journal of System Simulation, 1999, 11(5): 321-325.
- [4] 刘兴堂,梁炳成,刘力,等. 复杂系统建模理论、方法与技术[M]. 北京: 科学出版社 2008.
LIU Xingtang, LIANG Bingcheng, LIU Li, et al. The theory, method & technique for complex system modeling [M]. Beijing: Science Press 2008.
- [5] 查亚兵. 导弹系统仿真可信性研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 1995.
ZHA Yabing. Research on the credibility of missile simulation system [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 1995.
- [6] U. S. Defense Modeling and Simulation Office (DMSO). Verification, Validation and Accreditation (VV&A) recommended practices guide [EB/OL]. [http://vva.dmsomil.mil/Build 2.5 2004-03-02](http://vva.dmsomil.mil/Build%202.5%2004-03-02).
- [7] Defense Modeling and Simulation Office (DMSO). Verification, Validation and Accreditation recommended practice guides [EB/OL]. <http://www.dmsomil.com/2006-06-03>.
- [8] 徐学文. 美国校核、验证与确认实践指南[M]. 北京: 海潮出版社 2001.
XU Xuewen. Verification, Validation and Accreditation (VV&A) recommended practices guide [M]. Beijing: Haichao Press 2001.
- [9] 廖英,邓方林,梁加红,等. 系统建模与仿真的校核、验证与确认 (VV&A) 技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社 2006.
LIAO Ying, DENG Fanglin, LIANG Jiahong, et al. The Verification, Validation and Accreditation (VV&A) technology on modeling and simulation [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press 2006.
- [10] 唐见兵,黄晓慧,焦鹏,等. 复杂大系统仿真的 VV&A 理论及过程研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(3): 122-126.
TANG Jianbing, HUANG Xiaohui, JIAO Peng, et al. Research on the VV&A theory and process of large-scale complex system simulation [J]. Journal of National University of Defense Technology 2009, 31(3): 122-126.
- [11] 孙世霞. 复杂大系统建模与仿真的可信度评估研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院 2005.
SUN Shixia. Research on the credibility evaluation of modeling and simulation for the large-scale complex system [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology 2005.
- [12] 唐见兵. 作战仿真系统可信性研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院 2009.
TANG Jianbing. Research on the credibility for warfare simulation system [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology 2009.
- [13] Balci O. Verification, Validation and Accreditation [C]// Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. New York: Society for Modeling and Computer Simulation International, 1998: 41-48.
- [14] Dobey Virginia T, Lewis Robert O. Verification, Validation and Accreditation (VV&A) process overlay for the FEDEP [C]// 2003 Spring SIW. 03S-SIW-085, Orlando: Society for Modeling and Simulation 2003.
- [15] 曹星平. HLA 仿真系统的校核、验证与确认研究[D]. 长沙: 国防科技大学 2004.
CAO Xingping. Research on the verification, validation and accreditation (VV&A) for HLA simulation system [D]. Changsha: Graduate school of National University of Defense Technology 2004.
- [16] 唐见兵,李革. HLA 作战仿真的 VV&A 过程[J]. 计算机工程 2007, 33(14): 254-256.
TANG Jianbing, LI Ge. Research on VV&A process of warfare simulation based on HLA [J]. Computer Engineering 2007, 33(14): 254-256.
- [17] 唐见兵,查亚兵,焦鹏,等. 基于 HLA 的作战仿真系统的 VV&A 研究[J]. 系统仿真技术及应用, 2007, 9(9): 415-418.
TANG Jianbing, ZHA Yabing, JIAO Peng, et al. Research on VV&A for warfare simulation system based on HLA [J]. System Simulation and Application, 2007, 9(9): 415-418.
- [18] 唐见兵,查亚兵,黄晓慧,等. 基于 BOM 的 HLA 仿真系统可信性研究[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 131-134. (下转第 44 页)

参考文献:

- [1] 吴延林,邱晓刚,刘宝宏.基于 Web 仿真模型系统的设计[J].计算机工程与设计 2006 22(27):11-23.
WU Yanlin, QIU Xiaogang, LIU Baohong. The web-based database design of simulation model [J]. Computer Engineering and Design 2006 22(27):11-23.
- [2] 黄柯棣,邱晓刚.建模与仿真技术[M].长沙:国防科学技术大学出版社 2010.
HUANG Kedi, QIU Xiaogang. The technology of modeling and simulation [M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology 2010.
- [3] 胡晓峰,司光亚,吴琳,等.战争仿真引论:下[M].北京:国防大学出版社 2004.
HU Xiaofeng, SI Guangya, WU Lin, et al. The discuss of combat simulation [M]. Beijing: Press of the Defence University 2004.
- [4] 张新宇.联邦式仿真运行数据处理的支持框架研究[D].长沙:国防科学技术大学 2009.
ZHANG Xinyu. The uniform framework of operation data in federation environment [D]. Changsha: The National University of Defense Technology 2009.
- [5] 胡鹏.仿真综合集成环境中资源描述方法与技术研究[D].长沙:国防科学技术大学 2010.
HU Peng. The description of simulation resource under the comprehensive environment [D]. Changsha: The National University of Defense Technology 2010.
- [6] 文明. HLA 仿真资源描述与管理方法研究[D].长沙:国防科技大学 2006:12-20.
WEN Min. The management and description of simulation resource in HLA [D]. Changsha: The National University of Defense Technology 2006:12-20.
- [7] 彭琼芝,刘晨,李群,等. SRML 一种基于 XML 的仿真模型描述语言[J]. 计算机仿真. 2005, 22(12): 266-269.
PEN Qiongzhi, LIU Chen, LI Qun, et al. A type of xml-based language in description simulation models-SRML [J]. Journal of Computer Simulation 2005 22(12):266-269.
- [8] 杨山亮.基于 MSDL 和 C-BML 的想定形式化描述[J]. 系统仿真学报 2011 23(8):1724-1727.
YANG Shanliang. The novel description of conceive based on the MSDL and C-BML [J]. Journal of System Simulation 2011 23(8):1724-1727.
- [9] 宫民,王行仁,贾荣珍.基于模型库/数据库的面向对象综合仿真环境框架[J]. 系统仿真学报,2000,12(6):656-659.
GONG Min, WANG Xinren, JIA Rongzhen. The framework of the model database under the comprehensive environment [J]. Journal of System Simulation 2000, 12(6):656-659.



蔡迎女(1969-),北京人,工程师,主要研究方向为数据处理。



张鹏男(1987-),重庆人,博士生,主要研究方向为分布式仿真系统的设计、面向对象仿真实论、知识工程。

(上接第20页)

- TANG Jianbing, ZHA Yabing, HUANG Xiaohui, et al. Research on credibility of HLA simulation system based on BOM [J]. Journal of National University of Defense Technology 2008 30(5):131-134.
- [19] 唐见兵,焦鹏,黄晓慧,等.基于基本对象模型的 HLA 仿真系统 VV&A 过程探究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12):3495-3498.
TANG Jianbing, HUANG Xiaohui, HUANG Xiaohui, et al. Research into VV&A process for HLA simulation system based on base object model [J]. Journal of System Simulation 2009 21(12):3495-3498.



唐见兵男(1974-),湖南祁东人,副教授,博士,主要研究方向为建模与仿真 VV&A、软件测试及装备可靠性评估。



查亚兵男(1968-),江西九江人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为仿真网格、系统仿真、建模与仿真 VV&A。