

2-20-2021

## Preliminary Research on Verification and Validation for CGF Behavioral Modeling

Jianbing Tang

*College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*

Zhang Qi

*College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*

Jiao Peng

*College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*

Yabing Zha

*College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Preliminary Research on Verification and Validation for CGF Behavioral Modeling

### Abstract

**Abstract:** Building computer generated force model is a very important job in combat simulation. Its core content is modeling of complicated human behavior, including cognition behavioral modeling and physical behavioral modeling. The credibility is vital for behavioral model. Verification and validation (V&V) in all life circle of behavioral modeling can insure the credibility of behavioral model. *On the basis of explaining V&V of behavioral modeling and other conceptions, the process model of behavioral modeling is proposed. The V&V process of CGF behavioral modeling is studied emphasisly. Many effective V&V methods for CGF behavioral modeling are explored.*

### Keywords

behavioral modeling, Verification and Validation (V&V), behavioral model, Computer Generated Forces (CGF), verification, validation

### Recommended Citation

Tang Jianbing, Zhang Qi, Jiao Peng, Zha Yabing. Preliminary Research on Verification and Validation for CGF Behavioral Modeling[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(2): 288-294.

## CGF 行为建模校核与验证初探

唐见兵, 张琪\*, 焦鹏, 查亚兵

(国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 构建计算机生成兵力(Computer Generated Force, CGF)模型是作战仿真的一项十分重要的工作, 其核心内容在于对战场中的各种人类复杂行为进行建模, 包括认知行为建模和物理行为建模。可信性是行为模型的至关重要的品质。在行为建模的全生命周期中进行校核与验证(Verification and Validation, V&V)能够确保行为模型的有效性和可信性。在阐释行为建模 V&V 及其相关概念的基础上, 建立 CGF 行为建模的过程模型; 伴随行为建模的过程, 重点研究相应的 CGF 行为建模 V&V 过程; 根据现有的仿真 V&V 方法, 探索 CGF 行为建模有效的 V&V 方法。

**关键词:** 行为建模; 校核与验证; 行为模型; 计算机生成兵力; 校核; 验证

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 02-0288-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0949

## Preliminary Research on Verification and Validation for CGF Behavioral Modeling

Tang Jianbing, Zhang Qi\*, Jiao Peng, Zha Yabing

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Building computer generated force model is a very important job in combat simulation. Its core content is modeling of complicated human behavior, including cognition behavioral modeling and physical behavioral modeling. The credibility is vital for behavioral model. Verification and validation (V&V) in all life circle of behavioral modeling can insure the credibility of behavioral model. *On the basis of explaining V&V of behavioral modeling and other conceptions, the process model of behavioral modeling is proposed. The V&V process of CGF behavioral modeling is studied emphazisly. Many effective V&V methods for CGF behavioral modeling are explored.*

**Keywords:** behavioral modeling; Verification and Validation (V&V); behavioral model; Computer Generated Forces (CGF); verification; validation

## 引言

由于作战仿真过程具有可控、低耗费、无破坏性、可重复实验等突出优势, 被广泛用于各层级的人员演训、决策支持、国防采办及战法研究。在作战仿真中, 计算机生成兵力(Computer Generated Force, CGF)通常扮演实际战场环境中敌我友各方中的武器装备或人员, 通过其引入能有效降低仿真成本扩大仿真规模, 且生成的虚拟兵力灵活多样。

为了逼真模拟实际战场作战实体, 构设 CGF 的核心在于对其战场中的各种复杂行为进行建模<sup>[1-2]</sup>。

目前传统的 CGF 行为建模方法有有限状态机、规则脚本等知识工程方法。它们主要针对具体的作战任务, 收集作战条令、行动规程等领域专家知识, 直接描述行为输出, 但由于领域专家和建模人员之间“知识鸿沟”的存在, 需要耗费大量的时间和重复性迭代工作, 且产生的行为缺乏适应性。采用学习方法进行 CGF 行为模型的自动生成越来越

收稿日期: 2020-11-30 修回日期: 2020-12-17

基金项目: 湖南省自然科学基金(2016JJ4006, 2017JJ3371)

第一作者: 唐见兵(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为仿真 VV&A 及可信性评估。E-mail: tangjbgfd@sina.com

通讯作者: 张琪(1988-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为系统仿真、智能行为建模。E-mail: zhangqiy123@nudt.edu.cn

越受到关注,如案例推理、基于上下文推理(CxBR)等模仿学习方法和强化学习、进化算法等经验学习方法。这些方法能大大降低知识工程的工作量,但面临模型可解释性差、校验困难、不可控等挑战<sup>[3]</sup>。

因此,人类行为决策过程本身的复杂性和行为建模过程中人员、知识结构和协调交互的复杂性对 CGF 行为模型的可信性提出巨大的挑战。如何实现对 CGF 行为模型的有效 V&V,是当前作战仿真技术研究的重点与难点<sup>[4-8]</sup>,也是 CGF 行为建模的重要环节,直接决定了仿真系统的可信性和效益。

## 1 基本概念

### (1) 计算机生成兵力(CGF)

由计算机生成和控制的自主或半自主的虚拟智能体,用来扮演实际战场环境中敌我友各方中的武器装备或人员,其需要模拟作战实体在战场中的各种复杂行为,表现出与客观世界仿真对象一致的“拟人性”。

构建 CGF 的核心任务是对战场环境中 CGF 的行为进行建模,其本质是人类行为建模。行为建模主要分为物理行为建模和认知行为建模。

### (2) 行为模型

行为模型是指一类实体能够根据输入的观察态势输出应该执行的行动或动作的模型。CGF 行为模型主要分为物理行为模型和认知行为模型。物理行为模型指实体直接作用于外部环境,并改变环境状态的外部行为表现;认知行为模型主要模拟人的各种理性或非理性思维过程<sup>[8-9]</sup>。

### (3) 行为建模

行为建模是指对在作战仿真中对需要表示的人的行为或表现进行建模<sup>[8]</sup>,主要包括认知行为建模和物理行为建模。

物理行为建模根据物理学原理,建立反映作战实体为实现其特定目标与环境发生的直接交互过程的模型,如感知、通信、运动、火力打击等,相对容易;认知行为建模主要对 CGF 根据作战目标和感知态势输出行动动作的思维或心智过程进行

建模,如态势评估、决策规划等,机制复杂、建模困难,是行为建模研究的主要方向<sup>[8]</sup>。

### (4) 行为建模校核与验证

伴随行为建模全过程,将不断增长的评审、分析、评估和测试用于行为建模和行为模型,以提高其可信度的过程。其主要元素是校核和验证。

行为建模 V&V 主要包括需求与设计开发过程校核、概念模型与仿真模型结果验证。

因此,行为建模 V&V(Behavioral modeling V&V, BMVV)可以定义为一个五元组<sup>[10-11]</sup>,即  $BMVV = (S, I, f, S_0, F)$ ,其中:  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  为有限状态集,包含所有行为建模 V&V 活动的状态;可令:  $S_1 = Req\ Ver$  为行为模型需求校核的活动状态;  $S_2 = Con\ Val$  为概念模型验证的活动状态, ...;  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  为行为建模 V&V 活动输入事件集;  $f$  为状态转换函数,它是一个从  $S \times I$  到  $S$  的映射,即  $f: S \times I \rightarrow S$ ;  $S_0$  为行为建模 V&V 唯一的一个初始状态;  $F$  为终态集。若  $f(S_1, I_1) = S_2$ ,  $f(S_2, I_2) = S_3, \dots, f(S_{n-1}, I_n) = S_n = F$ , 则行为建模所有的校核与验证工作结束。

校核是指确定行为建模或行为模型是否准确地表达了开发人员的概念描述和设计规范的过程,回答“是否正确地开展行为建模?”。校核是一个反复迭代的过程,贯穿于行为建模的全生命周期。

验证是指从行为模型预期应用的角度出发,确定模型是否准确地表示真实军事世界的程度的过程,回答“是否建立了正确的行为模型?”。验证主要行为模型的结果与真实军事世界或参考值的一致性程度。

行为建模 V&V 是相互相成的,二者相互迭代进行。校核确保行为建模过程规范正确,验证确保建立的概念模型和仿真模型正确可信。

## 2 CGF 行为建模校核与验证过程

### 2.1 CGF 行为建模过程

基本的行为建模流程主要涉及军事领域专家、设计开发人员和用户三类人员,包括行为建模需求

分析、概念建模、仿真模型设计与开发、行为模型测试结果分析四个阶段<sup>[8]</sup>,如图1所示。

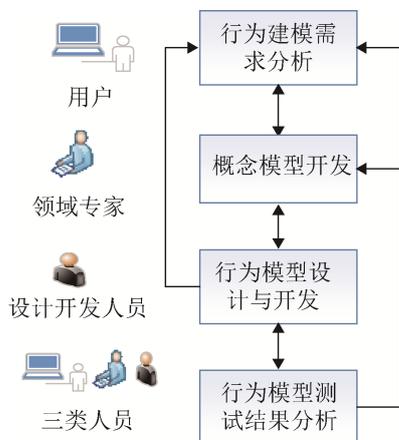


图1 CGF行为建模过程  
Fig. 1 Process of CGF behavior modeling

具体的行为建模过程可以分为4个步骤:

#### step 1: 需求分析

在需求分析阶段,用户根据训练、方案分析等具体应用目标提出相关行为模型的需求。如在空战战术训练仿真系统中,教练员根据训练目标,对受训仿真环境中涉及对手或队友模型能力提出要求;如要考察受训人员对导弹拦截和规避的能力,需要蓝方战机针对受训战机表现出导弹攻击行动。

#### step 2: 概念建模

针对CGF需要表现的行为过程,领域专家熟悉具体的军事活动过程和客观要求。在概念建模阶段,结合用户对行为模型的要求和说明,领域专家结合作战条令、军事行动规程和自身专业知识,将这些需求和说明细化形成更详细规范的军事任务或行动的概念模型规范。

#### step 3: 行为模型设计与开发

在这个阶段,建模人员根据概念模型规范和要求,采用一定的建模方法,如脚本、规则、有限状态机、行为树甚至机器学习方法,设计CGF行为模型的具体逻辑并进行代码开发,形成可执行的计算模型。通常需要开发人员与领域专家进行反复迭代细化形成最终模型。其中往往会由于领域、背景

等差异形成所谓的知识鸿沟,需要耗费大量时间精力多方协同进行反复多轮的调整修正。

#### step 4: 行为模型测试结果分析

行为模型的测试过程是一个非常复杂困难的工作,需要最终用户、领域专家、开发人员等多方人员进行协同确认,反复交互,最终成果需要专家进行审查、测试,并对结果进行分析。如审查模型静态结构和行为逻辑、审查开发过程的记录说明、运行仿真模型观察行为表现、采集行为数据进行统计性比对。最后将经过确认后的仿真模型,根据想定需求,部署到目标仿真系统。

## 2.2 CGF行为建模V&V过程

伴随CGF行为建模过程开展V&V是确保行为模型可信性的重要途径。行为建模V&V过程(V&V procedure, VVP)可以形式化定义为 $VVP=(P,I,O,A,R)$ 。其中 $P$ 为V&V参与人员集,主要指V&V人员、用户及领域专家; $I$ 为V&V的输入信息集,指每个V&V活动前的输入材料,包括需求文档、各类设计开发文档及计算机程序等; $O$ 为V&V完成后的输出产品集,主要指各类评审意见、校核与验证报告及程序测试结果分析等; $A$ 为V&V活动集,即行为建模的若干个校核与验证活动; $R$ 为V&V活动需要消耗的资源集合,包括场地、经费及第三方服务等<sup>[11-12]</sup>。

图2为V&V过程模型示意图。

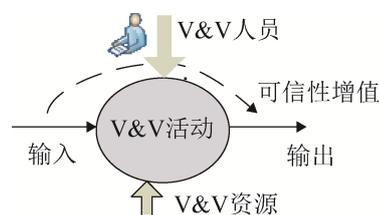


图2 V&V过程模型示意图  
Fig. 2 Process model of V&V

由图1可知CGF行为建模过程分为四个阶段,相应地,CGF行为建模V&V过程也分为四个阶段,其过程如图3所示。

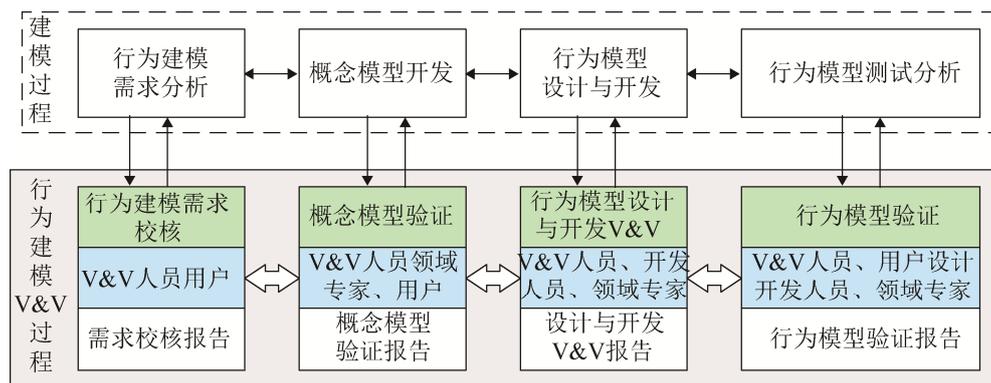


图 3 CGF 行为建模 V&V 过程  
Fig. 3 V&V process of CGF behavior modeling

(1) 行为建模需求校核

从行为模型应用目的及用户需要出发, 对照需求分析文档, 从问题域、用户域及仿真域三个方面校核建模需求, 评估建模需求是否正确反映用户需要、是否满足需求的一致性、正确性、清晰性、无二义性、可测试性、可行性及逻辑上的完备性等要求、以及需求能否在行为建模设计、开发及实现等全过程中可追溯。参与行为建模需求校核主要有 V&V 人员及用户。

这个阶段的输入资料是行为建模需求分析报告或需求规格说明, 输出产品是需求校核报告或需求校核结果清单。

(2) 概念模型验证

CGF 行为建模需要有一个概念抽象和计算机软件化的过程<sup>[10]</sup>, 如图 4 所示。

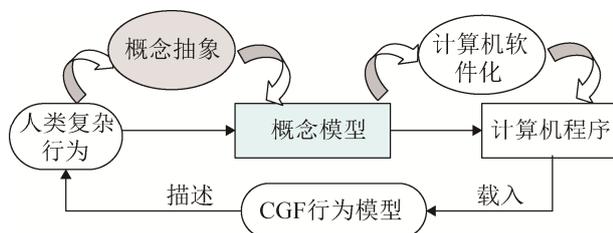


图 4 行为建模的抽象过程  
Fig. 4 Abstract process of behavior modeling

概念抽象是对现实空间的人类复杂行为至概念空间的逻辑映射与表述, 经过概念抽象后成为概念模型, 也被称为使命空间功能描述、任务空间概

念模型等。因此, 概念模型为领域专家、用户和设计开发人员提供一座相互沟通的桥梁。

对照需求分析文档, 评估行为建模需求是否转换为概念模型, 并从语法、语义和语用及其一致性四个维度分别进行验证<sup>[11]</sup>。

概念模型验证参与人员有 V&V 人员、领域专家及用户。这个阶段的输入资料是行为建模需求分析报告或需求规格说明、概念模型设计文档及需求校核报告, 输出产品是概念模型验证报告或概念模型验证结果清单。

(3) 行为模型设计与开发 V&V

概念模型经过验证后, 能够满足一定的可信度要求, 其后可以开展行为模型设计与开发 V&V。这一阶段, V&V 内容繁多, 工作量非常巨大。

1) 校核行为模型设计的所有特点、功能、行为、算法和交互是否都正确地、完全地包含在设计报告和设计文档中, 检查行为模型设计是否与概念模型一致, 是否可以追踪到行为建模需求。重点检查行为模型的基本框架结构、具体逻辑、引用的数据源、核心功能和接口设计是否正确合理。

2) 校核行为模型从设计到代码的转换、软件配置及初始化数据, 开展代码测试分析及模型调试与单元及部件级测试。

行为模型设计与开发 V&V 参与人员有 V&V 人员、设计开发人员及领域专家。这个阶段的输入资料是行为建模需求分析报告或需求规格说明、概

念模型设计文档、行为模型设计与开发文档及前面两个阶段的 V&V 报告，输出产品是行为模型设计与开发 V&V 报告或清单。

#### (4) 行为模型验证

行为模型验证主要通过运行仿真模型开展功能和性能等方面的测试，观察行为模型的输出表现，以评估行为模型输出结果的正确性及逼真度，以及评价行为模型是否能够满足仿真系统的研制要求与用户预期需求<sup>[8]</sup>。

行为模型验证工作参与人员有 V&V 人员、用户、设计开发人员及领域专家。这个阶段的输入资料是行为建模需求分析报告或需求规格说明、概念模型设计文档、行为模型设计与开发文档、行为模型程序代码及前面三个阶段的 V&V 报告，输出产品是行为模型验证报告或行为模型测试结果。

### 3 CGF 行为建模 V&V 技术与方法

美国 DMSO VV&A 建议实践指南 (VV&A RPG)总结了可用于建模与仿真的 76 种 V&V 技术与方法,这些方法可以应用于 CGF 行为建模 V&V。另外,有关软件测试的技术与方法也可以吸纳进来,用于 CGF 行为建模 V&V<sup>[13-14]</sup>。

因此,行为建模 V&V 技术与方法分为非正式方法、静态方法、动态方法和形式化方法。

#### (1) 非正式方法

这类方法实施过程简单,比较实用,是一种最常用的 V&V 方法。非正式方法主要有:审核法、检查法、表面验证法、图灵测试及预演等方法。非正式方法大多是定性方法,依赖于主题专家对行为模型或相关产品的主观评价,如图 5 所示。

在 CGF 行为建模 V&V 各个阶段中,非正式方法使用最多,可以贯穿于行为建模 V&V 过程,特别适用于需求校核、概念模型验证及行为模型设计与开发 V&V 等三个阶段。

#### (2) 静态方法

这类方法主要用于评估行为模型的结构设计、

模型内的数据流和源代码,不需要运行模型。静态方法主要有:因果关系图、控制分析、数据分析、接口分析、语法分析、语义分析、结构化分析及可追溯性评估等。

在 CGF 行为建模 V&V 过程中,静态方法主要应用于行为建模需求校核、概念模型验证及行为模型设计 2 个阶段。文献[8-9]给出了基于领域本体校核需求的方法。

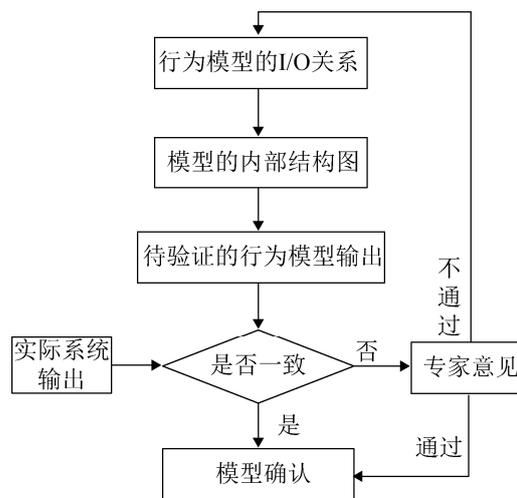


图 5 CGF 行为模型专家表面验证流程

Fig. 5 Expert face validation flow of CGF behavior model

#### (3) 动态方法

这类方法需要运行行为模型并评估模型产生的输出。动态方法主要有:灵敏度分析、预测验证、比较检验、回归分析、假设检验、接口测试、功能测试、性能测试、一致性测试及统计技术等。

在 CGF 行为建模 V&V 过程中,动态方法主要应用于行为模型开发及行为模型验证两个阶段。

#### (4) 形式化方法

形式化方法是基于正确性的形式化数学证明,是最精确的最可靠的方法,但使用该方法的费用很高。成功应用形式化方法的前提是要有良好定义和结构化的建模过程。由于当前的正式证明技术的局限性,这种方法难以应用于复杂行为模型的 V&V。形式化方法分为基于证明和基于模型两种。形式化方法主要有:归纳断言、谓词演算、推理、逻辑演

绎、正确性证明等。

在 CGF 行为建模 V&V 过程中, 形式化方法主要应用于行为建模需求校核、概念模型验证及行为模型开发三个阶段。文献[8-9]给出了模型功能的形式化验证案例。

综上所述, 根据行为建模的不同阶段, 采用的 V&V 技术与方法的分类总结如表 1 所示。

表 1 CGF 行为建模 V&V 技术与方法分类  
Tab. 1 Category of technology and method for CGF behavior modeling

V&V 阶段	非正式方法	静态方法	动态方法	形式化方法
行为建模需求校核	✓	✓		✓
概念模型验证	✓	✓		✓
行为模型设计与开发 V&V	✓	✓	✓	✓
行为模型验证	✓		✓	

## 4 结论

CGF 行为建模已成为作战仿真研究的热点和难点问题<sup>[8]</sup>。人类行为决策过程本身的复杂性与行为建模人员的知识结构、协调交互的复杂性等因素对 CGF 行为模型的真实可信性提出了巨大的挑战<sup>[9]</sup>。因此, 需要对行为建模全过程开展 V&V, 以确保行为模型的有效性、可信性和效益。

本文阐释了行为建模 V&V 相关概念, 针对行为建模的过程, 重点提出了相应的 V&V 过程, 并初步探讨了行为建模 V&V 的技术与方法。实践表明, 本文提出的 V&V 过程与方法切实可行。通过研究, 不难发现行为建模 V&V 与一般模型 V&V 的区别主要在于 V&V 过程集中、阶段少, V&V 技术与方法以非正式方法和静态方法为主, 领域专家的作用明显。例如, 行为建模中, 行动过程的概念模型描述简单, 一般通过数据获取方法获得, 因此行为建模的概念模型验证主要由领域专家, 采用非正式方法或静态方法进行验证评估比较有效。

## 参考文献:

- [1] Vishwakarma S, Agrawal A. A Survey on Activity Recognition and Behavior Understanding in Video Surveillance[J]. The Visual Computer (S0178-2789), 2013, 29(10): 983-1009.
- [2] 王昌金, 龚光红. 计算机生成兵力[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
Wang Changjin, Gong Guanghong. Computer Generate Forces[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [3] 刘博, 李蜀瑜. 基于 NuSMV 的 AADL 行为模型验证的探究[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(2): 110-113.  
Liu Bo, Li Shuyu. Research on Verification Method of AADL Behavior Model Based on NuSMV[J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(2): 110-113.
- [4] U.S DoD, Defense Modeling and Simulation Office (DMSO). Verification, Validation and Accreditation Recommended Practice Guides (RPG)[EB/OL]. (2016-08-10) [2020-10-20]. <http://www.dmsomil.com>.
- [5] Balci O, Ormby W F, Carr, et al. Planning for verification, validation, and accreditation of modeling and simulation applications[C]// 32nd conference on Winter simulation. San Diego, CA, USA: Society for Computer Simulation International, 2000.
- [6] IEEE 1278.4. IEEE Trial-Use Recommended Practice for Distributed Interactive Simulation Verification, Validation, and Accreditation[Z]. 1997.
- [7] 总装备部电子信息基础部. 美国校核、验证与确认实践指南(上、下册)[M]. 徐学文, 译. 北京: 海潮出版社, 2001.  
Electronic Information Foundation Department of General Equipment Department. Verification, Validation and Accreditation (VV & A) recommended practices guide[M]. Xu Xuewen, translated. Beijing: Haichao Press, 2001.
- [8] 张琪. 学习驱动的 CGF 决策行为建模方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.  
Zhang Qi. Learning Driven Behavior Modeling Methods for Decision Making of CGFs[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [9] 郭齐胜. 计算机生成兵力导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
Guo Qisheng. An Introduction of Computer Generated Forces[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

- [10] 唐见兵, 查亚兵. 作战仿真校核、验证与确认及可信度评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.  
Tang Jianbing, Zha Yabing. Verification, Validation and Accreditation and Credibility Evaluation for Warfare Simulation System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [11] 唐见兵. 作战仿真系统可信性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.  
Tang Jianbing. Research on the credibility for warfare simulation system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [12] 唐见兵, 查亚兵. 基于 UML 的作战仿真 VV&A 过程形式化建模[J]. 系统仿真技术, 2013, 9(1): 14-20, 44.  
Tang Jianbing, Zha Yabing. Formalization Modeling on VV & A Process for Warfare Simulation by UML[J]. System Simulation Technology, 2013, 9(1): 14-20, 44.
- [13] 叶丽君. 基于 UML 描述的概念模型校验技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2008.  
Ye Lijun. Research on the V&V Technology of the Conceptual Model Described by UML[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2008.
- [14] 李振松, 顾斌. 基于 UPPAAL 的 AADL 行为模型验证方法研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(2): 159-161.  
Li Zhensong, Gu Bin. Research on Verification Method of AADL Behavior Model Based on UPPAAL[J]. Computer Science, 2012, 39(2): 159-161.