

# 面向航空装备顶层论证的连续性体系行为建模



臧精\*

中国航空工业发展研究中心 航空总体论证航空科技重点实验室, 北京 100029

**摘要:**本文阐述了航空装备顶层论证的主要工作,分析了体系设计和虚拟验证及确认对体系行为建模的需求。为弥合体系架构模型和任务仿真模型间的差距,实现体系行为连续性建模,提出了两种模型转换方法。基于接口定义的行为模型转换实现了架构设计工具与任务仿真工具的互联,使架构模型直接驱动任务仿真中的实体。基于格式转换的行为模型转换使运行/系统状态图转换为任务仿真系统中对应组织/系统的行为模型以实现模型的传递。应用案例演示了两种模型转换方法,取代了人工重复建模,缩短了建模和仿真迭代周期。

**关键词:**体系架构; 系统工程; 建模与仿真; 顶层论证; 行为建模

中图分类号:V21

文献标识码:A

DOI:10.19452/j.issn1007-5453.2020.12.013

航空装备的顶层论证是研制流程中的首个阶段,需要提出该装备在体系(system of systems, SoS)运行中的功能和性能需求<sup>[1]</sup>。顶层论证的核心工作是通过体系建模进行装备运行概念(ConOps)分析。架构建模是描述体系的主要方法,而任务仿真通常用于体系架构逻辑验证后的效能评估。基于模型的系统工程(MBSE)<sup>[2-4]</sup>、模型中心工程(MCE)<sup>[5]</sup>、数字孪生/数字线索<sup>[6-8]</sup>等系统工程概念都强调连续的虚拟验证和确认,这对模型的传递提出了很高的要求。为了提高体系架构模型到任务仿真模型的连续性,本文提出一种连续性体系行为建模方法,以满足航空装备顶层论证对行为模型的需求。

## 1 航空装备顶层论证中的体系行为建模

航空装备顶层论证位于系统工程V模型<sup>[9]</sup>的左上角(见图1),该阶段包括场景分析、体系设计、虚拟验证与确认等活动,其可以表示为一个小的V模型。基于场景分析运行概念,使用架构方法进行体系设计,通过任务仿真进行体系架构的虚拟验证和确认,梳理出体系中航空装备的需求,支持后续的系统设计。

航空装备顶层论证涉及的任务仿真涵盖战役、任务和

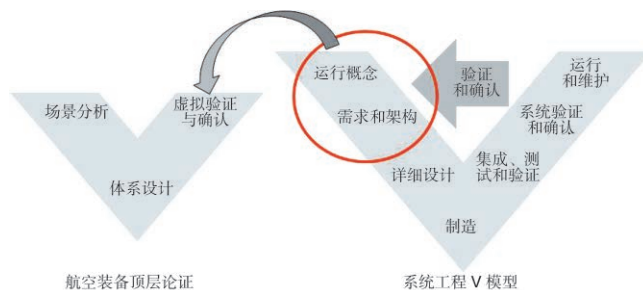


图1 系统工程中的顶层论证

Fig.1 Top-level demonstration in system engineering

交战三个层级,对应传统建模与仿真金字塔<sup>[10]</sup>的上三层(见图2)。从建模与仿真金字塔自顶向下,仿真关注的对象从体系转向单个系统。与之对应的是,建模的关注点从行为模型转向物理模型,模型的颗粒度也由粗到细。战役级仿真更关注全局的指挥和控制行为,单个系统的模型可以非常简化并可能被聚合模型所替代。而工程级仿真在航空装备的工程研制阶段应用广泛,更关注单个系统或关键子系统,此时物理模型是研究的重点。因此,航空装备顶层论证中任务仿真的建模重点偏向于行为模型,因此本文将重点研究行为的连续性建模。

行为是物理系统组件对环境条件的反应和交互或人

收稿日期: 2020-11-02; 退修日期: 2020-11-10; 录用日期: 2020-11-20

\*通信作者: Tel.: 010-57827743 E-mail: zangjing2006@163.com

引用格式: Zang Jing. Continuous SoS behavior modeling for aircraft top-level demonstration[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(12): 90-94. 臧精. 面向航空装备顶层论证的连续性体系行为建模[J]. 航空科学技术, 2020, 31(12): 90-94.

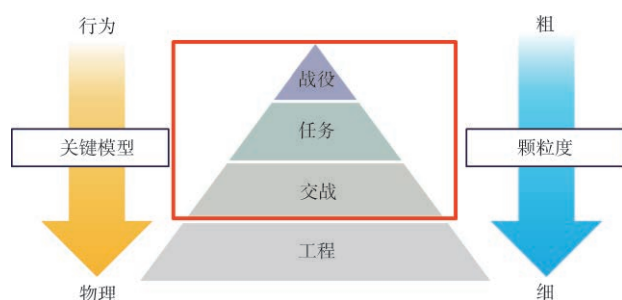


图2 航空装备顶层论证中的建模与仿真

Fig.2 Modeling and simulation in aircraft top-level demonstration

员、组织和社团的反应和交互<sup>[9]</sup>。行为模型可以描述各类任务中的OODA环(观察-判断-决策-行动)。

体系架构包括描述组织或系统活动的模型,可以从动态视角描述行为。体系架构模型是一种典型的概念模型,而概念模型可以在不需要技术细节的情况下描述一个系统或体系及其工作形态<sup>[10]</sup>,适合用于缺少技术细节的航空装备的顶层论证阶段。体系架构模型通常是由诸如SysML(系统建模语言)等规范化语言描述的概念模型<sup>[11]</sup>。

对于计算机生成兵力(CGF),行为模型用于驱动任务仿真系统中仿真实体的物理模型,因此任务仿真中的行为模型是可执行可仿真的,不同于概念模型。对于同一个体系作为描述对象,体系架构的行为模型和任务仿真中的行为模型有不同的表达形式。不经过任何模型转换的架构模型,不能在任务仿真系统中直接运行。

如果没有有效的模型转换机制,航空装备顶层论证的不同环节中需要人工进行重复的行为建模,导致建模仿真周期拉长。并且如果建模人员不同,还存在对模型理解出现歧义的风险。因此,为弥合航空装备顶层论证中的架构模型和仿真模型间的差异,连续性行为建模方法研究意义重大。

## 2 体系行为连续性建模方法

在体系架构开发和任务仿真中对体系行为进行人工建模的方式存在前文所述的诸多缺点,而且是一种不连续的建模方式,因此,需要通过模型间的转换取代人工重复建模。

### 2.1 转换需求分析

以美国国防部架构框架(DoDAF)为例,运行视图(OV)建模关注组织层级,建模重点是各个组织间的运行关系,运行节点是组织(如一支部队)而非系统。由于大部分任务仿真系统中的仿真实体是系统,因此该层级的架构模型不能与任务仿真系统中的仿真实体直接关联。而系统视

图(SV)的建模覆盖了体系中的主要系统,与任务仿真系统中的仿真实体都是系统层级,其对各个系统行为的描述与任务仿真系统的行为模型可以建立起映射。

任务仿真系统的行为建模通常也具有组织层面和系统层面,虽然不一定都做了区分。组织层面的行为模型可以描述任务中的指挥行为,体现战术战法,而系统层面的行为模型驱动系统的物理模型,实现仿真实体的运行。

由于组织层级架构模型不涉及系统,任务仿真中组织层级的行为模型颗粒度可以较粗,任务仿真可以对体系架构的运行视图进行时空验证,即检查体系运行中是否存在时空冲突问题。对于系统层级,任务仿真模型的颗粒度可以较细,能够采用不同的系统物理模型,只要行为模型进行了转换就可以对体系架构进行时空验证并开展效能评估。当实现体系架构和任务仿真中行为模型的快速转换,修改架构模型时任务仿真的结果也会改变,在对架构模型进行仿真验证的同时快速迭代体系架构设计。

将架构模型转化为任务仿真中的行为模型的方式在本文中有以下两种,即基于接口定义和基于格式转换。

### 2.2 接口定义

部分架构建模工具已经通过状态机支持概念模型生成代码的逻辑验证。另一方面,部分任务仿真系统以状态机的形式进行行为建模。因此,通过定义架构建模工具和任务仿真工具间的接口用于数据交换,体系架构中的状态图模型可以映射到任务仿真系统中的状态机。目前,已经实现通过体系架构的状态机模型直接驱动任务仿真中的实体<sup>[12]</sup>。

图3为体系架构模型通过数据分布式服务(DDS)软总线<sup>[13-14]</sup>直接驱动仿真实体的运行概念。在DDS接口管理界面中,左侧红框内定义了体系架构模型的输出数据,右侧红框内定义了任务仿真所需的输入数据。在外部接口升级后,当体系架构逻辑仿真和任务仿真可以同时运行时,二者通过DDS进行数据交换。当体系架构模型进行有限的修改时,接口可以不做更改。显然,与人工重复建模相比,这种方法能有效提高建模和仿真的效率。

### 2.3 格式转换

当任务仿真系统需要独立运行时,架构模型到任务仿真模型的转换可以以格式转换的方式进行。以DoDAF为例,视图OV-6b/SV-10b是运行/系统状态转移描述模型<sup>[15-16]</sup>。这些概念模型可以由SysML等规范化建模语言描述。因此,体系架构建模工具输出的数据,可以通过转换为任务仿真系统所需的输入数据。

在典型的任务仿真系统中,依附于物理实体的组织单元

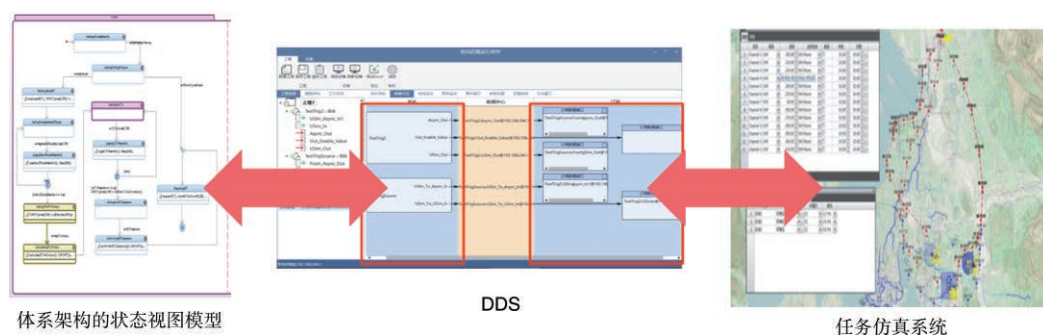


图3 架构模型通过DDS直接驱动仿真实体

Fig.3 Driving the entities directly by architecture models through DDS

与物理系统一样,也具有行为。OV-6b可以转换为组织的指挥行为,而SV-10b可以转换为系统的控制行为(见图4)。当仿真开始时,组织单元的状态机将驱动系统实体的状态机并间接驱动各个系统的物理模型,仿真想定由此得到执行。

模型格式转换的实现过程可以分为两个阶段。在模型开发准备阶段,需要进行架构模型输出与行为模型输入的定义并开发格式转换工具;在建模阶段,进行体系架构状态机建模并转换格式后,就可以用于任务仿真的运行。

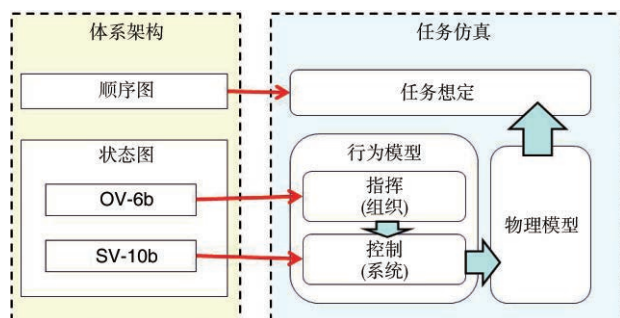


图4 状态机模型转换

Fig.4 State machine model transformation

需要说明的是,由于每个系统的行为都必须建模才能驱动各个实体运行,任务仿真的行为模型通常比体系架构的状态图具有更细的颗粒度。因此,只有相同颗粒度的行为模型才适合进行格式转换。体系架构中没有细节描述的更细颗粒度的模型,应该在任务仿真系统中单独建模。例如,一个体系架构描述了一架飞机在特定条件下会发射导弹但没有导弹的行动建模,而这是任务仿真系统中驱动导弹实体运行所必需的。这些细节较多的行为模型,多数可以来自于早先的工程项目积累而非新设计的系统。

### 3 应用案例

下面用两个例子分别介绍上文两种行为模型转换方式

的应用。

#### 3.1 接口定义

首先,基于运行概念(ConOps)进行场景分析并完成体系架构的建模。接着,在DDS软总线中分别定义和映射体系架构设计工具的输出数据和任务仿真工具的输入数据。通过DDS软总线,用体系架构模型中系统视图状态机模型取代任务仿真系统中的对应的行为模型状态机(见图5)。由架构模型直接驱动仿真实体,避免了在任务仿真系统中进行重复的行为模型建模。同时,任务仿真中实体状态的变化,也会反馈到体系架构设计工具并驱动逻辑仿真的运行。体系架构不涉及的仿真行为模型,可以充分利用不同任务仿真系统中已有的模型资源。该案例通过有限的开发工作,实现了架构设计工具和任务仿真系统间的行为模型转换。

#### 3.2 格式转换

这个案例是一个空对面打击任务建模与仿真中的格式转换。如图6所示,右侧为任务仿真系统中一架飞机的行为模型,其再现了左侧经过逻辑验证的体系架构模型。该行为模型与体系架构的状态机同样具有三个状态,分别是巡航、靠近目标和发射导弹。图中的红色箭头表示了这些状态在两种模型间的映射关系。而状态转移条件也同步转换为不同的模型表现形式。通过这种体系架构到任务仿真的状态机模型转换,行为的设计和验证可以快速迭代。相较于传统的人工行为建模,本案例省去了相同状态机的重复建模。另一方面,与接口定义方式的模型转换方法相比,本案例中任务仿真系统可以独立于体系架构建模工具用于仿真试验。

### 4 结论

航空装备顶层论证需要体系行为模型的连续性验证与确认。为取代传统人工方式的重复建模,通过接口定义和格式转换,能够实现体系架构到任务仿真的行为模型转换,



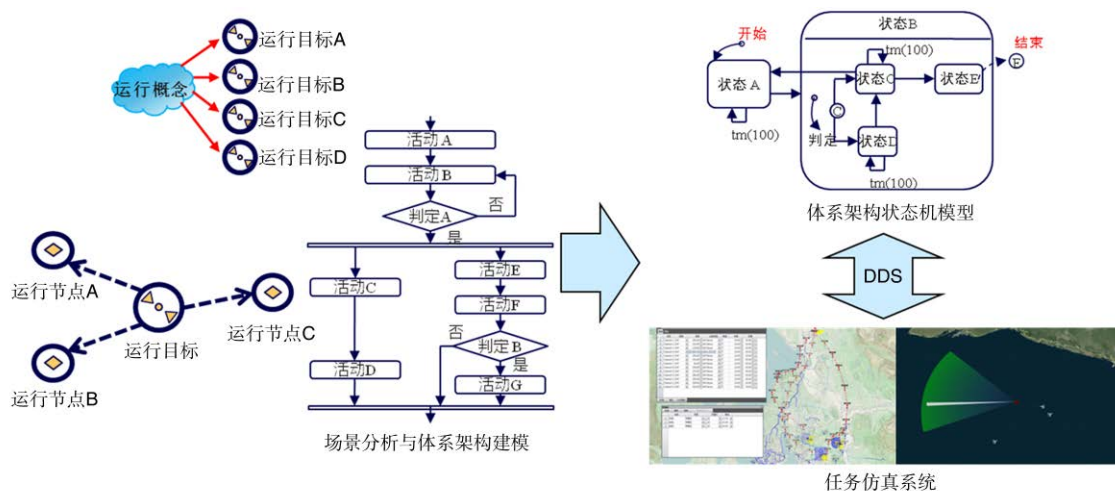


图5 基于接口定义的状态机模型转换

Fig.5 State machine model transformation based on interface definition

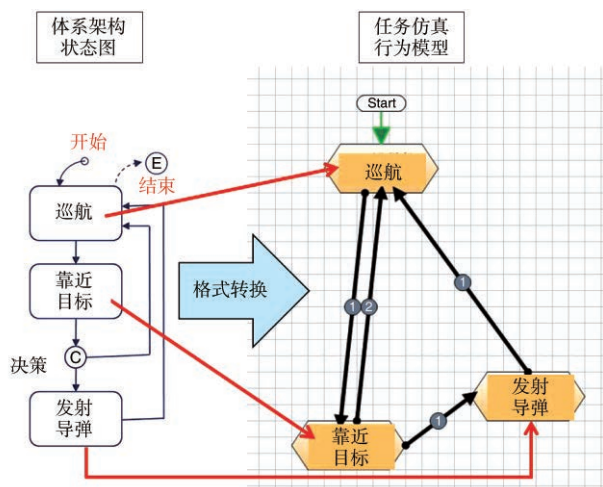


图6 一架飞机的状态机转换

Fig.6 State machine transformation of an aircraft

满足航空装备顶层论证中的时空验证和效能评估需求。通过接口定义,体系架构中的状态机模型能直接驱动任务仿真中的实体;通过格式转换,体系架构中的状态机模型能转为任务仿真中可以运行的相应状态机。这两种方法能够部分解决连续性体系行为建模问题,未来还需要进一步开展体系架构与任务仿真统一的行为模型的元模型定义,拓展模型转换的普适性。

AST

## 参考文献

[1] 李清,闫娟,朱家强,等. 航空武器装备顶层论证技术发展现状与趋势[J]. 航空学报,2016,37(1):1-16.  
Li Qing, Yan Juan, Zhu Jiaqiang, et al. State of art and

development trends of top-level demonstration technology for aviation weapon equipment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2016, 37(1):1-16. (in Chinese)

[2] MacCalman A, Lesinski G, Goerger S. Integrating external simulations within the model-based systems engineering approach using statistical metamodels[J]. Procedia Computer Science, 2016, 95: 436-441.  
[3] Acheson P, Dagli C, Kilicay-Ergin N. Model based systems engineering for system of systems using agent-based modeling [J]. Procedia Computer Science, 2013, 16: 11-19.  
[4] Ruijven L C. Ontology and model-based systems engineering. Procedia Computer Science[J]. 2012, 8:194-200.  
[5] Blackburn M, Bone M. Transforming systems engineering through model-centric engineering[R]. SERC-2016-TR-109, 2016.  
[6] West T D, Blackburn M. Is digital thread/digital twin affordable? A systemic assessment of the cost of DoD's latest manhattan project[J]. Procedia Computer Science, 2017, 114: 47-56.  
[7] Uhlemann T H, Schock C, Lehmann C, et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 9: 113-120.  
[8] Helu M, Hedberg T, Feeney A B. Reference architecture to integrate heterogeneous manufacturing systems for the digital thread[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and

- Technology, 2017, 19:191-195.
- [9] 沈腾, 孟繁鑫, 张浩驰. 需求工程方法在机载系统研发中的应用研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(12):23-29.
- Shen Teng, Meng Fanxin, Zhang Haochi. Application research of requirement engineering method in airborne system development[J]. Aeronautical Science & Technology. 2019, 30(12):23-29. (in Chinese)
- [10] Loper M L. Modeling and simulation in the systems engineering life cycle[M]. Springer, 2015.
- [11] 浦乐, 王西超, 杨艺. 基于MBSE与SysML的空空导弹系统架构建模研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(2):54-59.
- Pu Le, Wang Xichao, Yang Yi. Research on architecture modeling of air to air missile system based on MBSE and SysML[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(2):54-59. (in Chinese)
- [12] Zang Jing, Wang Qian, Zhu Jiaqiang. Continuous modeling in aircraft top-level demonstration[C]// 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2018), 2018.
- [13] Kim D, Oh H, Hwang S W. A DDS-based distributed simulation for anti-air missile systems[C]// 2016 6th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH), 2016.
- [14] Park Y, Min D. Distributed traffic simulation using DDS-communication based HLA for V2X[C]// 2015 Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks, 2015.
- [15] Guo Jing, Lin Qi. The research on requirement analysis of electronic information equipment SoS based on DoDAF[C]// 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011.
- [16] Wang Junxiang, Zou Jie, Yang Feng, et al. Research on architecture modeling of the strategic early-warning system based on DoDAF[C]// 32nd Chinese Control Conference, 2013.
- (责任编辑 陈东晓)

#### 作者简介

臧精(1987-)男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 航空领域的体系架构设计、建模仿真和效能评估。

Tel: 010-57827743

E-mail: zangjing2006@163.com

## Continuous SoS Behavior Modeling for Aircraft Top-level Demonstration

Zang Jing\*

*Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Integrated and Systematic Demonstration, Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China*

**Abstract:** The main work of aircraft top-level demonstration is introduced. The requirement of modeling and simulation for SoS design and virtual verification and validation in aircraft top-level demonstration is analysed. To fill in gaps between SoS architecture models and mission simulation models for achieving continuous SoS behavior modeling, two model transformation methods are proposed. Based on interface definition, the interconnection between architecture design tool and mission simulation tool is realized and the architecture models can drive the entities in mission simulation directly. Based on format conversion, the operational/ system state diagrams can be transformed to the corresponding organizations/ systems behavior models in the mission simulation system to achieve the models transformation. A sample case is provided to illustrate the two model transformation methods. Instead of manual repetitive modeling, the iterative cycle of modeling and simulation is shortened.

**Key Words:** SoS architecture; system engineering; modeling and simulation; top-level demonstration; behavior modeling

Received: 2020-11-02; Revised: 2020-11-10; Accepted: 2020-11-20

\*Corresponding author. Tel.: 010-57827743 E-mail: zangjing2006@163.com