

DOI: 10.7652/xjtuxb201312002

仿真模型组合的验证方法研究

冯晓宁¹, 王卓², 王金娜¹

(1. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 150001, 哈尔滨;
2. 哈尔滨工程大学水下机器人技术国防科技重点实验室, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对提高复杂仿真系统的开发效率和降低开发成本的问题,提出了基于模型组合验证的仿真模型开发框架,将系统开发过程分解为模型的发现、组合和组合后的验证等阶段,通过数据类型验证和动态行为验证来实现仿真模型的重用。给出了基于标签转移系统(Labelled Transition System, LTS)的模型行为验证方法,将模型的行为序列表示为 LTS,通过强模拟及语义相似度关系来判断组合后模型的动态行为与请求模型的符合程度。导弹对抗仿真模型组合实验结果表明,该方法能够半自动地完成仿真模型的组合验证,对模型有效性的验证能够满足实际应用的要求。

关键词: 仿真模型组合;数据类型验证;行为验证;标签转移系统

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)12-0007-06

Validation Method for the Combination of Simulation Models

FENG Xiaoning¹, WANG Zhuo², WANG Jinna¹

(1. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A simulation model development framework is proposed based on validation of model combination to improve the development efficiency of complex simulation systems and to reduce development costs. The development process is divided into model discovering, model combination, and validation of combination. The reuse of simulation modes is realized through data type validation and dynamic behavior validation. A Labelled Transition System (LTS)-based behavior verification method for combinations is given and the behavior sequences of models are represented as LTS. The consistency between the dynamic behaviors of the combined model and the request is judged through strong bisimulation and semantic similarities. Experiments on missile combat simulation models show that the proposed method can semi-automatically complete the validation to the combination of simulation models, and the validation meets the need of practical applications.

Keywords: combination of simulation model; data type validation; behavior verification; labelled transition system

随着仿真技术的不断发展,在各个应用领域都存在着大量的已经开发完成的仿真模型,为提高复杂仿真系统的开发效率、降低开发成本,仿真模型重用是最有效的方法之一。如何对已有仿真模型进行组合重用,从而快速构造仿真模型系统,即仿真模型可组合问题成为当前面临的问题,而仿真模型组合

也需要解决验证问题,就是组合后的仿真模型是否满足用户需求,即是否是有效模型。

目前在仿真模型可组合验证方法研究方面,美国弗吉尼亚大学 VMASC 仿真建模中心的 Petty 和 Weisel 等提出了语义可组合理论 (Semantic Composability Theory, SCT)^[1-3]。国防科技大学的王维平等在此基础上,根据不同领域仿真模型的组合和重用需求,对仿真模型可组合问题进行了系统的研究^[4-6]。

1 模型开发框架

基于模型可组合和重用理论的仿真模型开发框架如图 1 所示。模型开发人员根据用户需求创建概念模型,以概念模型为依据向仿真模型库发送资源需求的请求^[7]。

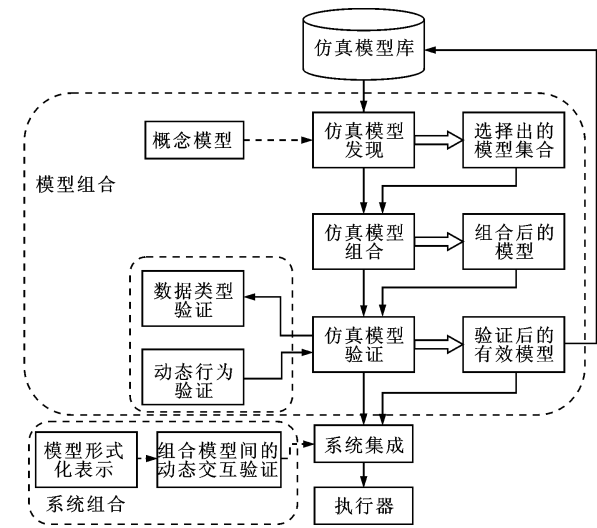


图 1 仿真模型的开发框架

仿真模型库是一个带有索引值的层次型数据库,其中包含基础型和重用型两种仿真模型。重用型可由基础型组合而成,或是作为整体加入。当仿真模型库接收到请求后,首先在重用层查找,如果存在结构相同的重用模型,则将该模型返回并结束;若没有找到,则需要将请求模型简单分解成为一个集合,根据该集合在仿真模型库中进行查找,查找过程依然分层执行。当请求集合中的元素都能在模型库中查询到结果时,就要对结果集合中的各模型元素进行组合,组合的规则根据各个仿真模型的输入输出数据以及接收关系,并以请求模型的最终实现为依据制定。

本文的研究重点是组合模型验证过程,分为数据类型验证和动态行为验证。数据类型验证是组合

验证的基础,动态行为验证保证了组合模型与请求模型的行为一致。

2 模型数据类型验证

数据类型验证用于保证组合模型与请求模型的数据类型具有一致性。模型具有“黑盒”结构,接口是模型与外界交互的唯一通道,因此验证模型组合的数据类型匹配情况就是验证接口集的数据类型匹配情况。组合模型只有通过了数据类型验证,才有可能最终成为具有期望功能的目标系统。

2.1 接口的数据类型匹配

将模型的接口 I 用 $(t_1, \dots, t_{n-1}) \rightarrow t_n$ 的形式表示, $t_1, \dots, t_{n-1}$ 是接口的输入参数类型, t_n 是接口的返回值类型。令 (I_1, I_2) 表示组合模型与请求模型中存在对应关系的一对接口。将接口的数据类型匹配分为以下 5 种类型:精确型 M_E 、换名型 M_V 、粒度转换型 M_G 、重排序型 M_S 和非柯里转换型 M_{UC} 。

$$M_E(I_1, I_2): I_1 = I_2 \quad (1)$$

$$M_V(I_1, I_2): V(I_1) = I_2 \quad (2)$$

$$M_G(I_1, I_2): G(I_1) = I_2 \quad (3)$$

$$M_S(I_1, I_2): S(I_1) = I_2 \quad (4)$$

$$M_{UC}(I_1, I_2): U_C(I_1) = U_C(I_2) \quad (5)$$

式中: V 表示换名操作; G 表示粒度转换操作^[8]; S 表示重排序操作; U_C 表示非柯里转换操作。

令接口的数据类型匹配精确度为 D , 组合仿真模型与请求模型的接口集中的一个存在对应关系的接口对为 (I_1, I_2) , 则它们的数据类型匹配精确度 D 定义为

$$D = 1 - |I_1 - I_2|, \quad D \in [0, 1] \quad (6)$$

D 值需遵循一定的规则,文献[9]根据大量实证得到一组精确度丢失值,用整数 1 减去信息丢失的精确度值,得到的即为两个数据类型的相似度值,也就是匹配精确度值。根据上述方法得到表 1。

表 1 按接口数据类型匹配方式分类的 D 值

接口数据类型匹配方式	D
精确型	1.0
换名型	0.7
无/有损粒度转换型	1.0/0.5
重排序型	1.0
非柯里转换型	1.0

2.2 仿真模型的匹配

令 A 表示组合仿真模型的接口集合, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, m 为 A 中接口个数, $a_1, a_2, \dots, a_m$ 分别

表示 A 中的 m 个接口的数据类型。令 B 表示请求模型的接口集合, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, n 为 B 中接口个数, $b_1, b_2, \dots, b_n$ 分别表示 B 中 n 个接口的数据类型。将仿真模型数据类型的匹配情况分为精确型、富余型和缺失型 3 种。

(1) 精确型 $m = n$ 。 A 中的每个接口类型都唯一地与 B 中的一个接口构成一一对应关系。对应关系可表示为 $C = \{(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_m, b_n)\}$, 则此时模型匹配精确度 D_t 的计算方法为

$$D_t = (D_{(a_1, b_1)} + D_{(a_2, b_2)} + \dots + D_{(a_m, b_n)}) / n, \\ D_t \in [0, 1] \quad (7)$$

(2) 富余型 $m > n$ 。 B 中的每个接口类型都与 A 中的一个接口类型构成一一对应关系, A 中剩余 $m - n$ 个接口类型在 B 中无对应。对应关系可以表示为 $C = \{(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_n, b_n)\}$, 则

$$D_t = (D_{(a_1, b_1)} + D_{(a_2, b_2)} + \dots + D_{(a_n, b_n)}) / n, \\ D_t \in [0, 1] \quad (8)$$

(3) 缺失型 $m < n$ 。 A 中的每个接口类型都与 B 中的一个接口类型构成一一对应关系; B 中剩余 $n - m$ 个接口类型在 A 中无对应。对应关系可表示为 $C = \{(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_m, b_m)\}$, 则

$$D_t = (D_{(a_1, b_1)} + D_{(a_2, b_2)} + \dots + D_{(a_m, b_m)}) / m, \\ D_t \in [0, 1] \quad (9)$$

一般很少应用缺失型, 因为组合仿真模型所提供的接口集个数不能够满足请求模型的接口集个数, 会导致请求模型所需的一些接口功能还需要补充开发, 这样就会增加额外开销和工作量。仿真模型组合的数据类型验证, 就是通过计算组合仿真模型与请求模型的数据类型的匹配精确度 D_t , 如果精确度 D_t 大于给定的一个阈值 λ , 则验证通过, 否则该组合模型为无效模型。

3 模型动态行为验证

对于一个给定的初始条件和一组输入值, 一个仿真模型表现出来的行为应该与请求模型的行为非常接近。

3.1 验证方法流程

验证方法主要分为 4 个步骤: ①行为展开, 将仿真模型的行为统一表示, 并按照仿真模型的平均执行时间和执行任务次数展开。②行为组合, 根据模型执行时间上的约束条件得到一组满足执行过程的时间解。③将行为表示为标签转移系统 (Labelled Transition System, LTS), 按步骤 2 算出的时间值得到仿真模型的执行过程的行为序列并将其表示为

LTS。④仿真模型的有效性验证, 有效性验证过程分为两个步骤, 比较组合仿真模型与请求模型的 LTS, 如果两者存在强等价关系, 则组合仿真模型有效; 如果不存在强等价关系, 则进入步骤 2。本文定义了一种弱化的带有参数 ϵ 的语义相似度关系 V_ϵ 。由于该验证方法基于仿真模型中时间和语义这两个重要因素, 所以该方法具有较高的可信性。如图 2 所示, 前 3 个步骤均在组合仿真模型与请求模型上独立执行, 步骤 4 为组合仿真模型与请求模型共同参与。

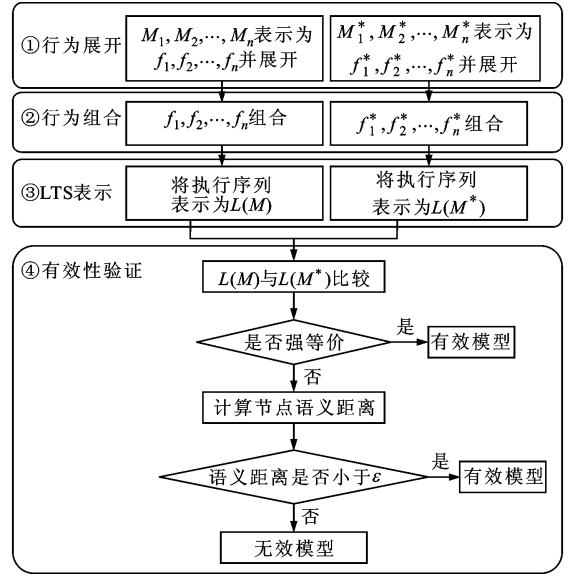


图 2 仿真模型组合的验证过程

3.2 仿真模型表示

在开发仿真模型时, 开发者对仿真模型会有一个概念描述, 这种概念描述称为元模型, 元模型描述仿真模型的属性和行为, 并应用于仿真模型发现以及仿真模型的验证框架中。元模型中以一个状态机的形式表示仿真模型的行为。验证方法的第 1 个步骤行为展开过程基于仿真模型的执行时间, 展开形式为

$$f_i(I, S_p, t) \rightarrow (O, S_t, t + \Delta t) \quad (10)$$

式中: f_i 代表仿真模型 M_i 的形式化表示; I 表示输入数据集合; S_p 是当前状态; S_t 是转换后的状态; O 是状态转换后的输出数据集合; t 为状态开始转换时的时刻, 经过 Δt 的转换时间间隔, $t + \Delta t$ 为状态转换后的时刻。为了避免状态爆炸, 每个仿真模型都只考虑影响状态转换的通信状态和属性。

仿真行为展开的过程就是将每个仿真模型按任务执行数 τ 以及平均执行时间 Δt 展开, 得到表示仿真模型执行行为的表达式的全过程。展开需要依据

的两个因素是任务执行数 τ 和仿真模型的平均执行时间 Δt 。

验证方法的第 2 个步骤为仿真模型行为组合, 主要考虑 3 点约束规则: ①任意相互组合的两个仿真模型, 后者需求输入的时间必须大于等于前者产生输出的时间; ②“连接件的传输时间”, 它是一个概念上的名词, 表示相互组合的两个仿真模型数据从一方传输到另一方的时间延迟; ③对于同一个基础仿真模型, 执行第 2 个任务的开始时间必须大于等于前一个任务的结束时间。

步骤 3 为将仿真模型的执行序列表示为 LTS。起始时刻从 0 开始, 根据组合时间约束, 得出组合仿真模型 M 的任务交错执行序列。将该序列表示为一个标签转移系统 $L(M): L(M) = (N, A_{ct}, \rightarrow)$, 其中 N 表示节点的集合, N 中的每个节点都表示一个带有注释的组合状态, 该组合状态是一个三元组 $S = (\text{state}(f_i), f_{in}, f_{out})$ 。 $\text{state}(f_i)$ 是仿真模型 f_i 的状态, f_{in} 是经过 LTS 进入该节点的仿真模型, f_{out} 是经过 LTS 离开该节点的仿真模型。 A_{ct} 表示转换标签的集合, A_{ct} 集合中的每一个标签也是一个三元组 $\langle \text{name}(f_{out}), \text{duration}(f_{out}), \text{output}(f_{out}) \rangle$, 三元组中的 $\text{name}(f_{out})$ 表示经过 LTS 离开该节点的仿真模型名称, $\text{duration}(f_{out})$ 表示经过 LTS 离开该节点的仿真模型的执行时间间隔, $\text{output}(f_{out})$ 表示该仿真模型的输出。 $\rightarrow$ 表示节点间转换的集合, 即经过 LTS 进入该节点或者离开该节点的仿真模型名称。一个组合仿真模型 M 的仿真行为序列和与它对应的标签转移系统 $L(M)$ 如图 3 所示。

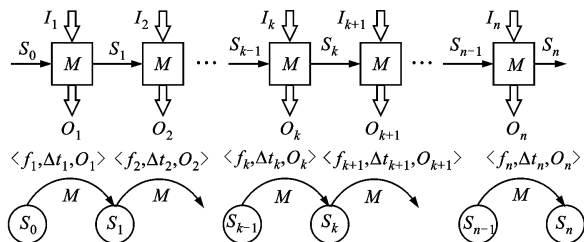


图 3 模型执行序列和对应的 LTS

3.3 模型组合有效性验证

将仿真模型的行为序列表示为 LTS, 通过比较 LTS 之间的关系, 可以得到组合仿真模型的行为与请求模型是否一致, 若两者的 LTS 是强等价关系, 则证明组合仿真模型有效。

定义 1 仿真模型强模拟 令 $L(M^*) = (N^*, A_{ct}, \rightarrow)$ 和 $L(M) = (N, A_{ct}, \rightarrow)$ 分别为请求模型行为序列与组合仿真模型行为序列的 LTS, 关系 $R \subseteq$

$N^* \times N$, 对于所有的 $(n^*, n) \in R, \sigma \in A_{ct}$, 若在 $L(M^*)$ 中存在 $n^* \xrightarrow{\sigma} n'^*$ 这样的转换, 在 $L(M)$ 中就存在 $n \xrightarrow{\sigma} n'$ 这样的转换, 且 $(n'^*, n') \in R$ 。如果这样的关系 R 存在, 就称关系 $R \subseteq N^* \times N$ 是仿真模型强模拟关系, 也称 M 仿真模型强模拟 M^* 。

定义 2 仿真模型强等价 令 $L(M^*) = (N^*, A_{ct}, \rightarrow)$ 和 $L(M) = (N, A_{ct}, \rightarrow)$ 分别为请求模型行为序列与组合仿真模型行为序列的 LTS, 关系 $R \subseteq N^* \times N$, 对于所有的 $(n^*, n) \in R, \sigma \in A_{ct}$: ①若在 $L(M^*)$ 中有 $n^* \xrightarrow{\sigma} n'^*$ 这样的转换, 那么在 $L(M)$ 中就有 $n \xrightarrow{\sigma} n'$ 这样的转换, 且 $(n'^*, n') \in R$; ②若在 $L(M)$ 中有 $n \xrightarrow{\sigma} n'$ 这样的转换, 那么在 $L(M^*)$ 中就有 $n^* \xrightarrow{\sigma} n'^*$ 这样的转换, 且 $(n'^*, n') \in R$ 。

如果这样的关系 R 存在, 就称 M 与 M^* 间存在仿真模型强等价关系, 也称为仿真模型强互模拟, 表示为 $L(M) \leftrightarrow_R L(M^*)$ 。

组合仿真模型与请求模型的执行行为序列的 LTS 之间的强等价关系的验证过程可以用 CADP^[10] 工具中的 BISIMULATOR 这样的互模拟工具自动验证。当表示组合仿真模型与请求模型的执行序列的 LTS 不存在强等价关系时, 如何判断组合仿真模型有效, 这是一个需要解决的问题。为此, 作者提出了语义相似度关系 V_ϵ 。

定义 3 语义相似度关系 V_ϵ 令组合仿真模型的 LTS 表示为 $L(M) = (P, A_{ct}, \rightarrow)$, 请求模型的 LTS 表示为 $L(M^*) = (Q, A_{ct}, \rightarrow)$, P 和 Q 分别表示 $L(M)$ 和 $L(M^*)$ 中带注释的状态集合, 集合中的每个元素都是一个三元组, 且任意 $p \in P, q \in Q$ 可表示为 $p = [s(p), f_{in}(p), f_{out}(p)]$, $q = [s^*(q), f_{in}^*(q), f_{out}^*(q)]$, $s(p)$ 和 $s^*(q)$ 代表仿真模型的状态, $s(p) = [\text{state}(f_1), \dots, \text{state}(f_n)]$, $s^*(q) = [\text{state}(f_1^*), \dots, \text{state}(f_n^*)]$, 则语义相似度关系为

$$V_\epsilon \subseteq P \times Q: V(p, q) = \{(p, q) \in P \times Q$$

$$\text{且 } \|p - q\| \leq \epsilon\}$$

其中, $\|p - q\|$ 为语义相似度距离

$$\|p - q\| = \{D_s(s(p), s^*(q)) +$$

$$[D_F(f_{in}(p), f_{in}^*(q)) +$$

$$D_F(f_{out}(p), f_{out}^*(q))] \times 2^{-1}\} \times 2^{-1} \quad (11)$$

$D_s(s(p), s^*(q))$ 表示组合状态间的语义距离, $D_F(f_i, f_j^*)$ 表示仿真模型函数名之间的语义函数距离。

语义状态距离用于度量仿真模型属性间的语义

距离,它的计算方法为

$$D_s(s(p),s^*(q)) = \left\{ \sum_{i=1}^n |d_s(\text{state}(f_i),\text{state}(f_i^*))| \right\} n^{-1} \quad (12)$$

其中, $d_s(\text{state}(f_i),\text{state}(f_i^*))$ 的计算方法为

$$d_s(\text{state}(f_i),\text{state}(f_i^*)) = \left(\sum_{a_i \in A(f_i), a_j^* \in A(f_i^*)} d(a_i, a_j^*) \right) m^{-1} \quad (13)$$

$A(f_i)$ 是仿真模型 f_i 的属性集合, $m = |A(f_i)|$ 且 $d(a_i, a_j^*)$ 的定义为

$$d(a_i, a_j^*) = \begin{cases} 0, & (a_i, a_j^*) \text{ 相关且相等} \\ 0.5, & (a_i, a_j^*) \text{ 相关且不等} \\ 1, & A(f_i^*) \text{ 不存在使 } a_i, a_j^* \text{ 相关的 } a_j^* \end{cases} \quad (14)$$

式中: (a_i, a_j^*) 相关是指在组件的建模与仿真本体 COSMO(Component Simulation and Modeling Ontology)中相关^[11-12]。语义相似度关系 V_e 主要考虑 COSMO 本体的组合状态间关系,它以仿真模型属性为依据。

语义函数距离是用于确定进入和离开 LTS 的函数是否相关。假设 $f_i(p)$ 、 $f_j^*(q)$ 分别是标签转移系统 $L(M)$ 和 $L(M^*)$ 中对应的进入节点 p 和离开节点 q 的函数,则语义函数距离

$$D_F(f_i(p),f_j^*(q)) = \begin{cases} 1, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (15)$$

4 验证方法实验

4.1 实验环境

当前各个领域的仿真模型库对外公开,该实验从相关网站上搜索到 98 个相关仿真模型作为备选模型库,以导弹攻击防守对抗模型的 10 个子模型作为请求模型,以此来验证本文所提出的模型组合验证方法的准确性和可用性。

本实验应用工具 BISIMULATOR,它是 CADP 中包含的一个互模拟验证工具。它以两个 LTS 作为输入,输入文件是扩展名为 bcg 的二进制编码图,若两个 LTS 强等价,则返回结果为 true;否则,返回 false。

4.2 实验过程

对备选的 98 个模型首先进行数据类型验证,通过该验证的候选模型为 12 个。按照动态行为验证的验证步骤,取任务执行次数 $\tau = 4$,根据各个模型的平均执行时间,将 10 个请求模型与通过数据类型

验证的 12 个候选模型的行为序列都表示为 LTS,应用 BISIMULATOR 工具对这 12 组 LTS 进行比较。验证结果中有 3 组的返回值为 true,即存在强等价关系,分别为第 1 组预警卫星模型、第 3 组信息拦截分析模型和第 10 组导弹防御指挥模型。剩余 9 组请求模型与候选模型序列的 LTS 经 BISIMULATOR 工具验证返回结果为 false,这就需要计算请求模型与候选模型的语义相似度,从而判断两者是否存在语义相似度关系。

以第 7 组预警雷达模型为例,根据请求模型搜索到的可重用模型个数为 0,故将该请求模型分解为一个扫描卫星模型 Scanning* 及一个导弹飞行计算模型 Calculate*。这两个请求子模型的描述见表 2。

表 2 预警雷达模型的请求子模型描述

子模型的描述	Scanning*	Calculate*
属性	$\Delta\text{scanTime} = \text{genetic}$	$\Delta\text{calcuTime} = \text{genetic}$
输入约束	$I, \text{genetic}$	$I, \text{genetic}$
输出约束	$O, \text{genetic}$	$O, \text{genetic}$
状态机	$I_1 S_1 (\Delta\text{scanTime}) \rightarrow S_1 O_1 [A_1]$	$I_1 S_1 (\Delta\text{calcuTime}) \rightarrow S_1 O_1 [A_1]$
输入约束	$I, \text{genetic}$	$I, \text{genetic}$

根据请求子模型的需求进行搜索,搜索到的备选子模型首先也需要进行数据类型验证,得到一组通过验证的 Scanning 与 Calculate 的组合模型,描述信息见表 3。

表 3 备选的预警雷达子模型描述

实体	属性	数据	状态机
Scanning	$\Delta\text{scanTime} = 2$	Input Constraints type=String Range=[0, 2 500] Output Constraints type=String	$I_1 S_1 (\Delta\text{scanTime}) \rightarrow S_1 O_1 [A_1]$
Calculate	$\Delta\text{calcuTime} = 4$	Input Constraints type=String/int Output Constraints type=String[]	$I_1 S_1 (\Delta\text{calcuTime}) \rightarrow S_1 O_1 [A_1]$

预警雷达模型的请求模型与备选模型的执行序列表示成的 LTS,如图 4 所示。

验证语义相似度关系 V_e ,这里令 $\epsilon = 0.3$ 。首先根据式(12)计算对应状态的语义状态距离值。对于状态 (S_1, S_1^*) , $n = 2$, $D_s(s(S_1), s^*(S_1^*)) = 0.5$ 。接着计算输入输出模型名之间的语义距离。由于

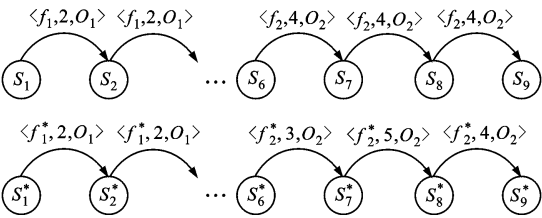


图 4 预警雷达备选模型和其请求模型的 LTS

S_1 和 S_1^* 都为各自 LTS 的初始状态,均没有进入该状态的模型名,故 $D_F(f_{in}(S_1), f_{in}^*(S_1^*))=0$ 。离开 S_1 和 S_1^* 状态的模型名分别为 f_1 和 f_1^* ,由式(15)得 $D_F(f_{out}(S_1), f_{out}^*(S_1^*))=0$ 。最后依据式(11)得到 (S_1, S_1^*) 的语义相似度距离 $\|S_1 - S_1^*\| = 0.25$ 。同理,分别计算 $\|S_2 - S_2^*\|$, $\|S_3 - S_3^*\|$, $\dots$, $\|S_9 - S_9^*\|$ 的值,计算结果均为 0.25。得到参数 $\epsilon=0.3$ 的语义相似度关系 $V_\epsilon = \{(S_1, S_1^*), (S_2, S_2^*), (S_3, S_3^*), (S_4, S_4^*), (S_5, S_5^*), (S_6, S_6^*), (S_7, S_7^*), (S_8, S_8^*), (S_9, S_9^*)\}$,即 Scanning 和 Calculate 的组合模型与请求模型间存在语义相似度 V_ϵ 关系, Scanning 和 Calculate 的组合模型为有效模型。

表 4 模型验证结果

请求模型	备选模型	有效模型	备选子模型	有效组合模型
预警卫星模型	7	1		
射击目标探测模型	13	1		
信息拦截分析模型	0		15	1
发射装置模型	11	3		
战场气象模型	4	1		
战场地形模型	0		3	0
预警雷达模型	0		12	1
拦截导弹模型	9	1		
交战控制模型	0		19	1
导弹防御指挥模型	5	1		

按照同样的方法,对非强等价的 9 组请求模型与备选模型执行序列的 LTS 进行验证,验证结果有 8 组存在语义相似度关系。根据第 6 组战场地形模型需求没有找到相似功能的可重用模型,将需求分解再进行搜索得到的子模型,经验证也不满足请求模型需求。这种情况下,或者重新开发出满足需求的模型;或者将请求模型分解的子模型再进一步分解,由此可见,应用仿真模型可组合技术开发仿真模型是一个递归的过程。整个实验的验证结果见表 4。

5 结 论

本文提出了基于组合验证的仿真模型开发框架和相应的模型组合验证方法。将模型组合验证分为数据类型验证和动态行为验证两个方面。通过定义不同数据类型之间的匹配程度实现模型的数据类型验证,通过 LTS 的互模拟定理和语义相似度关系实现模型的动态行为验证,形成了一个通用的仿真模型组合验证方法。实验结果表明,该方法可以半自动化地完成仿真模型组合的验证过程,提高仿真模型的可重用性,实现仿真模型系统的快速构建。

参考文献:

[1] PETTY M D, WEISEL E W, MIELKA R R. A formal approach to composability [C]// Proceedings of the 2003 Interservice Industry Training, Simulation and Education Conference. Arlington, VA, USA: NTSA, 2003: 1763-1772.

[2] WEISEL E W, PETTY M D, MIELKE R R. Validity of models and classes of models in semantic composability [C]// Proceedings of the 2003 Simulation Interoperability Workshop. Orlando, FL, USA: SISO, 2003: 03F-SIW-073.

[3] PETTY M D, WEISEL E W. A composability lexicon [C]// Proceedings of the 2003 Simulation Interoperability Workshop. Orlando, FL, USA: SISO, 2003: 181-187.

[4] 王维平, 朱一凡. 仿真模型有效性确认与验证 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.

[5] 周东祥, 仲辉, 李群, 等. 复杂系统仿真的可组合问题研究综述 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8), 1819-1823.

ZHOU Dongxiang, ZHONG Hui, LI Qun, et al. Survey of simulation composability of complex systems [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8): 1819-1823.

[6] 周东祥. 多层次仿真模型组合理论与集成方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.

[7] SZABO C, TEO Y M. An approach to semantic-based model discovery and selection [C]// Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 3054-3066.

[8] 由延军, 康凤举, 张森. 基于组合的水下武器对抗仿真系统开发研究 [J]. 计算机测量与控制. 2011, 19(10): 2462-2471.

(下转第 122 页)