

4-19-2022

## A DEVS-based Formal Description Method for Complex Product Behavior Models

Qingquan Lin

*Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;* lqq\_adcefot@163.com

Jiaran Yang

*Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

Heming Zhang

*Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;* hmz@mail.tsinghua.edu.cn

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 Invited Papers & Special Columns 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.

---

## A DEVS-based Formal Description Method for Complex Product Behavior Models

### Abstract

**Abstract:** For the online optimization of pedestrian flow control in subway station, *an algorithm frame for pedestrian flow control in subway station based on machine learning is designed.* The pedestrian flow control process of a subway station during morning rush hour is selected, and the agent-based model is built to simulate the control process. *The training data is collected through the multiple runs of the model, which is used as the input of deep reinforcement learning network, and the mature net is obtained through adequate training to provide the optimizing scheduling policy. Linking the actual data with the mature net to realize the real-time schedule optimization of subway pedestrian flow control.* Simulation experiments show that the framework of the deep reinforcement learning can realize the on-line optimization and the performance is better than traditional algorithm.

### Keywords

deep reinforcement learning, pedestrian flow control, scheduling strategy in subway station, online simulation, real-time optimization

### Recommended Citation

Qingquan Lin, Jiaran Yang, Heming Zhang. A DEVS-based Formal Description Method for Complex Product Behavior Models[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(4): 661-669.

# 一种基于离散事件系统规范的复杂产品行为模型描述方法

林清泉, 杨佳然, 张和明

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 基于离散事件系统规范(discrete event system specification, DEVS)的多分辨率形式化描述具有层次化、结构化的描述能力, 但对模块内部智能行为描述相对匮乏, 而基于 Agent 的建模可以刻画个体的感知行为、通信协作和学习进化。在多分辨率建模框架下, 结合 DEVS 和 Agent 模型描述以提供对事件、行为、机理等的描述能力; 基于多分辨率 DEVS 模型描述, 提出了一种具有耦合封闭性的形式化模型描述方法, 其包含多分辨率实体级原子模型描述、多分辨率系统级耦合模型描述; 根据该框架特点规范了建模流程并结合实际案例验证了描述框架的有效性。

**关键词:** 复杂产品; 多分辨率建模; 行为建模; 离散事件系统规范; 形式化描述

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)04-0661-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1318

## A DEVS-based Formal Description Method for Complex Product Behavior Models

Lin Qingquan, Yang Jiaran, Zhang Heming

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The multi-resolution formal description based on discrete event system specification (DEVS) has the ability of hierarchical and structured description, but the description of the intelligent behavior inside the module is relatively lacking, while Agent-based modeling can describe the characteristics of individual perception, behavior, communication, cooperation, learning and evolution. Under the framework of multi-resolution modeling, DEVS and Agent model descriptions are combined to provide the description capabilities for events, behaviors, mechanisms, etc. Based on the description of multi-resolution DEVS models, a formal model description method with coupling closure is proposed, which includes the description of the multi-resolution entity-level atomic model and the description of the multi-resolution system-level coupling model. According to the characteristics of the framework, the modeling process is standardized and realistic modeling cases are used to verify the effectiveness of the description framework.

**Keywords:** complex product; multi-resolution modeling; behavior modeling; discrete event system specification (DEVS); formal description

## 引言

复杂产品是指高成本、大规模、高技术、工程密集型的产品、子系统、系统或设施。涵盖汽车、船舶、航空航天飞行器、机器人等领域, 具有组成

复杂、功能复杂、行为复杂的特点<sup>[1]</sup>。在产品设计过程中, 需完成方案验证、性能检验、细化迭代、优化设计等多种仿真任务。多分辨率建模提供了不同分辨率模型切换和一致性控制机制, 能很好应对

收稿日期: 2021-12-20 修回日期: 2022-02-25

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFB1701600)

第一作者: 林清泉(1998-), 男, 土家族, 硕士生, 研究方向为多分辨率建模, 强化学习。E-mail: lqq\_adcefot@163.com

通讯作者: 张和明(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能制造, 复杂系统建模与虚拟仿真。E-mail: hzm@mail.tsinghua.edu.cn

其多领域、多层次、多阶段、多类型的建模需求，对复杂产品的设计开发具有重要意义<sup>[2]</sup>。

多分辨率建模能满足系统在多个层次建立模型的需要<sup>[3]</sup>，在复杂产品设计领域得到了广泛应用。文献[4]基于高层体系架构(high level architecture, HLA)构建了火车控制系统的多分辨率模型，并提出了模型解聚聚合方法；文献[5]将多分辨率建模方法与多智能体相结合，用于大规模决策仿真，大大降低了模型计算复杂度；文献[6]提出了一种多分辨率模型构建理论方法，用于航保系统效能预测可信度研究。

离散事件系统规范(discrete event system specification, DEVS)是复杂动态系统建模与仿真的一种通用形式化建模描述规范，基于 DEVS 的多分辨率模型描述研究对于复杂产品的仿真分析具有普遍意义<sup>[3,7]</sup>。李元等在动态变结构 DEVS 的基础上提出了多分辨率形式化描述理论(multi-resolution DEVS, MR-DEVS)<sup>[3]</sup>。DEVS 提供了模块化、层次化的系统建模和仿真执行框架，但缺乏对于系统行为的抽象建模能力。对此，文献[8]结合离散事件仿真与基于 Agent 的建模和仿真(agent-based modeling and simulation, ABMS)构建混合仿真模型，并应用于紧急医疗服务系统规划与分析；文献[9]提出了一种基于 Agent 的离散仿真模型，用于自然灾害疏散规划；文献[10]提出使用 UML(unified modeling language)状态机作为 DEVS 执行前的行为分析方法；文献[11]将多分辨率建模引入其构建的 Agent-DEVS 建模规范，并用于应急保障建模。但该模型不具有耦合封闭性，限制了其构建大规模系统的能力。因此，研究多分辨率框架下能扩展 DEVS 建模能力且不限其层次化表达的形式化描述具有重要意义。

针对基于 DEVS 的多分辨率形式化描述缺乏系统智能行为抽象建模能力的缺陷，本文研究了其行为建模能力的扩展方法，并基于 MR-DEVS 结合 ABMS 对于个体的感知行为、通信协作、进化学习等的描述优势，提出了一种具有耦合封闭

性的复杂产品多分辨率模型描述框架，对建模流程进行分析并结合实际建模案例开展研究。

## 1 模型框架

### 1.1 建模方法比较

DEVS 是一种模块化模型描述方法，基于原子模型和耦合模型描述，将每个子系统看作具有独立内部结构的模块，通过定义端口通信机制和抽象函数实现互操作和系统响应。其优势在于对系统组成结构、通信机制、时间概念的支持<sup>[12]</sup>。但对模块内部的智能行为和模块间的协作缺乏相应的描述，实体行为相对简单，功能有限，缺少学习和认知推理相关机制<sup>[13]</sup>。

基于 Agent 的建模和仿真方法支持对主体行为的建模与仿真，其中 Agent 作为基本组成单位，是对复杂系统中的主动个体进行抽象建模所产生的模型<sup>[13]</sup>。支持对个体自主行为、感知控制、学习进化和个体间交流协作建模，既可从微观行为研究宏观的涌现现象，也支持对群体协作进行研究。

多分辨率建模不涉及具体模型构建，而是针对不同抽象层次的仿真任务需求，提供建模框架。多分辨率建模既包含系统、子系统、组件、子组件等多层次的建模，也包含对同一建模对象不同模型构建的建模，重点关注不同分辨率模型切换与控制、模型一致性维护。

### 1.2 模型描述框架

面对不同抽象层次仿真场景，基于多分辨率建模方法构建模型框架，实现模型分辨率切换和一致性维护。在具体模型构建上，将 ABMS 对 Agent 感知与行为、通信协作、学习进化的描述能力与 DEVS 模型结合，扩展 DEVS 的描述能力。在构建多分辨率模型时，需保证耦合封闭性，即可将耦合模型描述转化为原子模型描述，从而作为构建更大规模系统的基础。

图 1 为模型描述框架示意。其中虚线矩形表示结合 ABMS 和 DEVS 的基本模型描述，具有响

应外部事件, 处理消息, 并根据自身状态、外部环境、控制规则产生行为与交互的能力。当建模对象不具有主体特征时, 该模型退化为 DEVS 原子模型; 实线矩形表示多分辨率实体级的原子模型描述, 当实体只有一个分辨率时, 原子模型描述退化为基本模型; 平行四边形表示多个实体耦合形成的子系统, 当多个子系统耦合时构成系统级别的耦合模型。

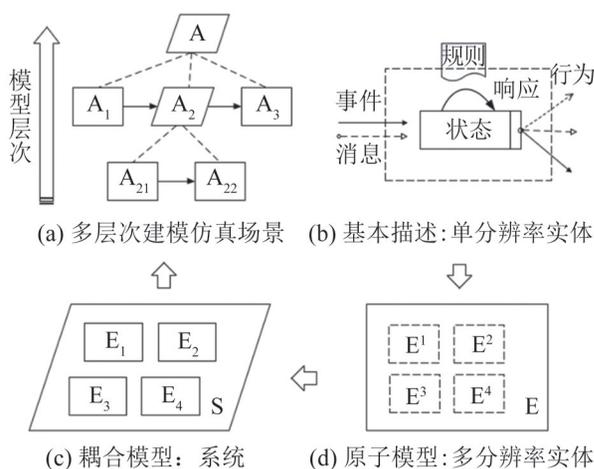


图 1 模型描述框架

Fig. 1 Model description framework

在该框架下, 多分辨率建模可应对复杂产品不同层次的建模仿真需求。在保留 DEVS 作为基本描述规范建模能力的同时, ABMS 方法扩展了 DEVS 对实体行为的描述能力并可结合专家知识和学习算法实现实体的智能学习和进化。此外, ABMS 中多个 Agent 也可聚合或组合形成更高级别的 Agent, 形成多层次 Agent 体系, 该特点与多分辨率建模一致, 并可结合分层强化学习等算法设计多个分辨率层面协同运算。从微观到宏观可基于此模型框架研究微观行为的涌现现象, 反之可从宏观层到微观层完成规划设计。

## 2 模型描述规范

本文在多分辨率建模框架下, 结合 DEVS 和 ABMS 优势, 构建多分辨率实体级原子模型和多分辨率系统级耦合模型。

### 2.1 原子模型

多分辨率建模方法为仿真模型构建提供框架, 但不涉及基本模型描述。本文基于并行 DEVS 原子模型和 Agent 元模型构建基本模型描述, 并纳入多分辨率建模框架以构建原子模型。

定义 1: Agent 具有自治性, 能感知并对环境改变作出反应, 可通过消息进行交互的计算实体<sup>[13]</sup>。

定义 2: 消息是 Agent 之间进行通信的说明。其形式化定义为:

Message = < MsgID, From, To, MsgType, Content, SendTime, ValidTime, TransTime >

其中, MsgID 为消息编号; From 为消息发送源; To 为消息接收方; MsgType 为消息类型; Content 为消息内容; SendTime 为消息发送时间; ValidTime 为消息有效时间; TransTime 为消息传递时间。

定义 3: Agent-DEVS 基础模型。不关注模型分辨率, 采用 Agent 元模型对 DEVS 原子模型扩展的模型描述。结构如下:

Basic = < X, Y, S, s<sub>0</sub>, δ<sub>int</sub>, δ<sub>con</sub>, δ<sub>ext</sub>, λ, ta, C, AG, CG >

其中, 输入集 X 是输入事件与输入消息的集合; X = X<sub>e</sub> ∪ X<sub>m</sub>, X<sub>e</sub> 为输入事件集, X<sub>m</sub> 为输入消息集; 同理, 输出集 Y = Y<sub>e</sub> ∪ Y<sub>m</sub>, Y<sub>e</sub> 为输出事件集, Y<sub>m</sub> 为输出消息集; S = S<sub>s</sub> ∪ S<sub>a</sub> 为原子模型状态特征集, 由静态属性标识 S<sub>s</sub> 和状态变量 S<sub>a</sub> 组成; s<sub>0</sub> 为初始状态; δ<sub>int</sub>: S<sub>a</sub> → S<sub>a</sub> 为内部状态转移函数; δ<sub>con</sub>: S<sub>a</sub> X<sub>e</sub><sup>b</sup> → S<sub>a</sub> 为并发冲突处理函数, 上标 b 表示并发事件; δ<sub>ext</sub>: QX<sub>e</sub> → S<sub>a</sub> 为外部状态转移函数, 其中 Q = {(s, t) | s ∈ S<sub>a</sub>, 0 ≤ t ≤ ta(s)} 为总状态集, t 为实体保持在状态 s 的时间; λ: S → Y<sup>b</sup> 为系统输出函数; ta: S → R<sub>0,∞</sub><sup>+</sup> 为时间推进函数, 由其产生时间序列 T。

本文基于文献[14]中的 Agent 元模型结合 DEVS 原子模型作为基础模型描述, 由 < C, AG, CG > 和 S 共同组成 Agent 模型集合。其中 C 为 Agent 规则集合, 也即 Agent 所拥有的知识库; CG: (TXS → C) ∪ (TS → C) 为控制律生成算子; AG: (TC → S) ∪ (TC → Y) ∪ (TC → II) 为动作生成算

子刻画了 Agent 对外行为生成方式,  $II$  表示内部信息反馈。

基础模型描述对应的模型结构如图 2 所示, 主要由 2 部分组成, 分别为响应事件与输出事件的 DEVS 基本结构和 Agent 控制论结构。Agent 控制论结构包含感知器、控制器、效应器和控制规则。其中: 感知器负责获取外部环境感知信息和接收内部反馈; 控制器为规则处理系统, 负责操作控制规则库, 处理控制规律生成算子  $CG$ , 从而实现规则生成、规则选择和规则评价, 体现了进化与学习能力; 效应器根据控制律和动作生成算子的要求改变自身状态, 产生输出并执行动作, 影响环境及其他 Agent。

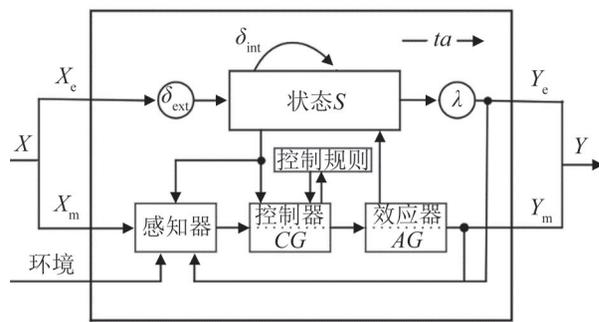


图2 Agent-DEVS 基础模型  
Fig. 2 Basic model of Agent-DEVS

定义 4: MR-Agent-DEVS 原子模型。具有反射性和 Agent 特性的动态结构 DEVS, 是多分辨率实体描述的元模型。该模型描述所对应的多分辨率实体结构如图 3 所示。

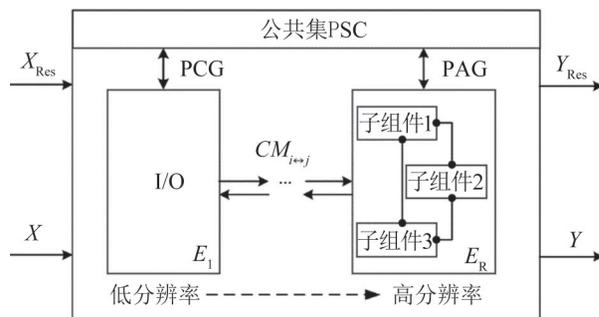


图3 多分辨率实体模型描述  
Fig. 3 Model description of multi-resolution entity

结构如下:

$$Atomic = \langle X_{Res}, Y_{Res}, R, \psi, \varphi_0, \{m_{\varphi_0}\}, \{M_r\}, \{CM_{i \leftrightarrow j}\}, Z_{\varphi}, PSC, PCG, PAG \rangle$$

其中,  $X_{Res}, Y_{Res}$  为分辨率端口, 用于实体间收发分辨率变化信息;  $R$  为实体多个分辨率的 Agent 标识集合;  $\psi = \{2^R - \phi\}$  为分辨率模式集合;  $\varphi_0 \in \psi$  为初始分辨率模式;  $m_{\varphi_0}$  为该分辨率状态下的实体模型;  $M_r$  为分辨率为  $r$  时的实体的模型集合;  $CM_{i \leftrightarrow j}: S_{m_i} \rightarrow S_{m_j}$  为模型一致性映射函数;  $Z_{\varphi}$  为分辨率模式  $\varphi$  下同一分辨率不同模块之间的关联;  $PSC = PS \cup PC$  为实体公共集, 其中  $PS$  为公共状态集, 表示不同分辨率模型间实体级状态,  $PC$  为公共控制律, 为同一对象不同分辨率 Agent 共有的知识集合;  $PCG: \bigcup_r C_r \rightarrow PC$  为公共控制律生成算子, 表示实体级别的控制规律生成;  $PAG$  为公共动作生成算子。实体级性质及其操作反应了实体在更高抽象层次上的 Agent 特征。

$m_{\varphi_0}$  为多分辨率建模框架下分辨率模式为  $\varphi_0$  时的 Agent-DEVS 模型描述, 相比 Agent-DEVS 基础模型, 增加了模型分辨率相关描述。

多分辨率框架下分辨率为  $r$  的 Agent-DEVS 基础模型描述:

$$m_r = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{con}, \delta_{ext}, \lambda, ta, C, AG, CG, \{\rho_{r \rightarrow i}\}, \lambda_{\rho} \rangle$$

其中,  $r$  为模型分辨率;  $\rho_{r \rightarrow i}: S_r \times X_{Res} \rightarrow M_i$  为分辨率切换函数, 完成不同分辨率间的模型切换, 保持模型连续性;  $\lambda_{\rho}: S \rightarrow Y_{Res}$  为分辨率变化通知函数, 用于产生并向外发送分辨率变化信息。

## 2.2 耦合模型

定义 5: MR-Agent-DEVS 耦合模型。具有反射性和 Agent 特性的动态网, 是多分辨率系统描述的元模型。结构如下:

$$Coupled = \langle X_{NRes}, Y_{NRes}, n_{init}, N \rangle$$

其中,  $X_{NRes}, Y_{NRes}$  为网络分辨率端口,  $X_{NRes}$  接收其他网络分辨率信息并转达至内部所有实体。当网络内部实体发生分辨率变化时, 在网络内部通过

其  $Y_{Res}$  端口通知其他实体分辨率变化, 同时通过  $Y_{NRes}$  端口发送至其他网络的  $X_{NRes}$  端口, 传递分辨率变化信息;  $n_{init} \in N$  为初始网络配置。  $N$  为成员组成的网络结构的最小集, 其元素的描述为

$$n = \langle X, Y, D, \{M_d\}, \{I_d\}, Z_{i,d}, \rho_N, \lambda_N, \Sigma, G_\Sigma, \Sigma_G \rangle$$

以 self 表示耦合模型本身,  $X, Y$  为结构化输入输出事件与消息集合;  $D$  为结构网中的实体名称集合,  $self \notin D$ ;  $M_d$  为实体  $d$  的 MR-Agent-DEVS 模型, 可以是原子模型, 也可以是耦合模型;  $I_d$  是所有受到实体  $d$  影响的组件的集合, 反映了系统结构信息;  $Z_{i,d}, i \in D \cup self, d \in I_d$  为组件  $i-d$  的输出-输入转换算子, 包含事件转换算子和消息传递算子, 反映了组件间输出输入耦合关系;  $\rho_N: S^n \rightarrow X_{NRes}$  为网络分辨率结构转移函数, 其中  $S^n = \prod_{i \in D} Y_{Res}^i$  表示网络中所有实体的分辨率变化事件的笛卡尔积;  $\lambda_N: S^n \rightarrow Y_{NRes}$  为分辨率变化输出函数;  $\Sigma$  为网络层性质, 为单个原子模型不具有的性质;  $G_\Sigma: \{M_d\} \rightarrow \Sigma$  为网络性质生成算子;  $\Sigma_G: self \rightarrow self$  为网络层操作算子, 用于网络模型层级的学习、控制与重组。网络层的性质与算子反映了耦合系统级各个分辨率状态所具有的特征。

## 2.3 模型描述特点

### (1) 耦合封闭性

文献[3]给出了 MR-DEVS 的耦合封闭性证明: 任何由 MR-DEVS 原子模型耦合得到的系统网络模型即为 MR-DEVS 耦合模型, 可以通过将各部分系统级描述转化为对应的实体级描述, 从而转化为一个 MR-DEVS 原子模型。本文中的 MR-Agent-DEVS 模型耦合封闭性证明只需在此基础上证明 Agent 特性在原子模型和耦合模型中相关描述的耦合封闭性即可。网络层性质  $\Sigma$  与实体公共集  $PSC$ 、网络性质生成算子  $G_\Sigma$  与公共控制律生成算子  $PCG$ 、网络层操作算子  $\Sigma_G$  与公共动作生成算子  $PAG$  分别相对应, 可实现由耦合模型描述向原子模型描述转化。此外, 基本模型描述中与 Agent 相关的描述与耦合封闭性证明无关。模型描述的耦合封闭性仍然成立。

### (2) 变结构建模能力

子组件级别的结构变化可以用原子模型的内部转移函数  $\delta_{int}$  和外部转移函数  $\delta_{ext}$  来表达。在组件级别和系统级别的结构变化有 2 个层面: ①由分辨率变化引起的结构变化, 由网络结构转移函数刻画; ②耦合模型中原子模型组成变化引起的结构变化, 如 Agent 构成新的协作编队, 可由  $\Sigma$  及其操作算子刻画。

### (3) 多分辨率建模能力

MR-Agent-DEVS 模型描述可以看作 MR-DEVS 模型描述的特例, 继承了其多分辨率建模能力: 一方面, 通过分辨率切换控制相关函数  $\lambda_\rho, \rho_{r \rightarrow i}, \lambda_N, \rho_N$  和一致性维护函数  $C_{i \leftrightarrow j}$  实现的多分辨率模型构建; 另一方面, 耦合封闭性保证了多层次建模能力, 可以构建更大的系统。

### (4) Agent 建模能力

ABMS 提供了对 Agent 行为建模、通信协作、知识获取与更新的能力。Agent 通过感知器接收并处理环境状态、消息、内部状态等信息; 通过规则处理系统操作控制规则  $C$  及  $CG$  生成新的规则, 从而具有学习与进化能力; 根据控制规则、当前信息, 由动作生成算子  $AG$  产生动作并向外部传递信息。此外, 控制规则  $C$  的获取可由专家根据现有知识制定, 也可经学习获取。

### (5) 模型继承与重用

在实体多分辨率模型构建中, 针对不同模型共有同一实体的特征与行为特点, 建立了实体级描述  $PS, PC$  及其操作算子  $PCG, PAG$ , 减少仿真资源占用的同时便于采用面向对象语言实现。此外, ABMS 面向对象的特性也使得模型易于实现继承与重用。

## 3 建模流程

### 3.1 模型抽象

#### (1) 系统层次划分

面对具体仿真场景, 可从数据分辨率、过程分辨率和结构分辨率等维度<sup>[2]</sup>明确各分辨率层次仿

真需求, 对系统进行层次划分。

### (2) 各层次建模对象抽象

依据不同层次的仿真任务需求, 建立各层实体抽象模型, 确定各实体的分辨率及Agent特征。

### (3) 模型关系抽象

根据多分辨率建模需求分为: ①确定同层模型对象之间的逻辑、结构、交互关系; ②确定不同层次分辨率模型间的映射关系; ③确定同一实体不同分辨率模型构建方法和一致性维护策略。

## 3.2 模型构建

### (1) 消息协议构建

根据仿真需求, 定义Agent间的消息传递机制和协议, 进而定义消息格式。

### (2) 模型对象构建

根据实体的分辨率特征和Agent特征, 构建各实体模型描述。对于具有Agent特征的实体, 各分辨率模型构建中可进行行为建模和控制规则生成及知识更新。

### (3) 模型映射关系构建

基于模型抽象中步骤(3)构建的抽象映射关系, 构建不同层次模型之间及同一实体不同分辨率模型之间在结构、功能、数据、过程、属性等维度的映射关系。

### (4) 分辨率控制器构建

构建系统结构分辨率控制器和模型分辨率控制器。

## 3.3 模型校验

### (1) 逻辑校验

各层次校验: 检验模型是否满足抽象模型关系及能否满足各层次仿真目的; 聚合校验和解聚校验: 检验高分辨率模型聚合和低分辨率模型解聚后是否满足抽象模型关系; 一致性校验: 检验各多分辨率实体的一致性维护关系。

### (2) 仿真运行

运行仿真以检验模型能否满足不同层次的仿

真需求。若能则可进入仿真环节, 否则需考虑抽象层次或模型关系调整, 返回模型抽象环节继续建模。

## 4 应用案例

汽车作为一种典型的复杂产品, 其设计开发及应用过程中, 不同仿真场景往往涉及多个不同层次的模型构建。本文根据文献[15]中基于MR-DEVS的车路协同多分辨率模型描述案例, 以具有车车交互的无人驾驶汽车为例, 考虑交通系统层、车路协同层的多分辨率模型和典型应用场景, 验证建模方法的有效性。

图4为车路协同系统结构图, 系统由多分辨率车辆实体V和多分辨率路侧设备实体RS构成。U表示路侧单元, CC表示交通控制中心, L表示交通信号设备, C表示车路协同场景。

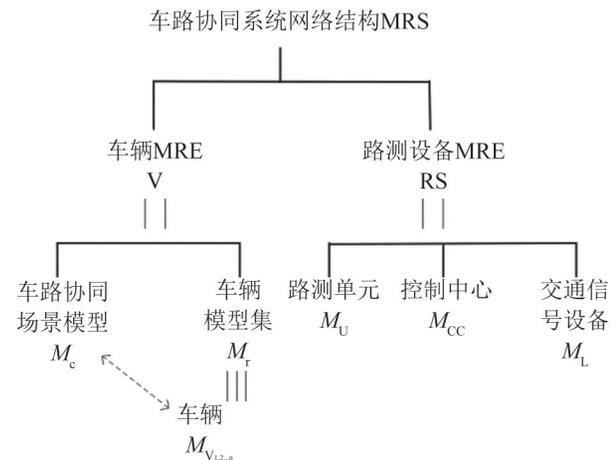


图4 车路协同系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of vehicle-road coordination system

## 4.1 多分辨率原子模型

### (1) 车辆多分辨率实体模型

#### 1) 车辆实体的MR-Agent-DEVS原子模型:

$$V = \langle X_{Res}^V, Y_{Res}^V, R_V, \psi_V, \phi_0^V, \{m_{\phi_0}^V\}, \{M_r^V\}, \{C_{r_c \rightarrow r_v}^V\}, \{Z_{\phi}^V\}, PSC_V, PCG_V, PAG_V \rangle$$

其中:  $X_{Res}^V = \{x^V | x^V \in \{C, V, CV\}\}$ , 为车辆实体接收分辨率变化端口, C, V, CV表示实体可能接收到的输入事件, 分别表示车路协同模式, 车辆模式及

二者并发模式;  $Y_{Res}^V = \{y^V | y^V \in \{DesRN, AggD\}\}$  为分辨率变化通知端口, DesRN, AggD 分别表示路网级系统解聚及交通控制设备聚合事件, 前者解聚为交通控制设备, 后者聚合为路网级系统;  $R_V = \{r_C, r_V\}$  为实体分辨率的集合, 其中,  $r_C$  为车路协同级,  $r_V$  为单车级;  $\psi_V = \{r_C, r_V, (r_C, r_V)\}$  为实体分辨率模式的集合;  $\phi_0^V = \{r_C\}$  为车辆实体的初始分辨率模式, 此处为车路协同模式;  $\{m_{\phi_0}^V\} = M_{r_{C_0}}$  为初始分辨率模式下实体模型的集合, 此处为车路协同模式;  $\{M_r^V\} = \{M_{r_C}, M_{r_V}\}$  为车辆实体在所有分辨率模式下的集合。  $M_{r_C} = \{M_{CM}, M_{FM}, \dots, M_{IM}\}$  为车路协同模式下的模型集合, 包括换道模型、跟驰模型、交叉口模型<sup>[16]</sup>等;  $M_{r_V} = \{M_{V_1}, M_{V_2}, \dots, M_{V_n}\}$  为车辆实体在单车模式下的模型集合, 此处为车辆 1, 2, ..., n 的模型集合。

### 2) 车辆高分辨率 Agent-DEVS 基础模型:

$$M_V = \langle X_V, Y_V, S_V, s_{V,0}, \delta_{V,int}, \delta_{V,ext}, \delta_{V,con}, \rho_{r_V \rightarrow r_C},$$

$$\lambda_{V,\rho}, \lambda_V, ta_V, C_V, CG_V, AG_V \rangle$$

其中:  $S_V$  表示单车信息, 可包含其位置、速度、加速度、状态等描述变量;  $\rho_{r_V \rightarrow r_C}: S_V \cdot X_{Res}^V$  为分辨率转换函数, 车辆间建立车车、车路协同关系时将实体分辨率将发生改变, 发生解聚或聚合;  $\lambda_{V,\rho}: S_V \rightarrow Y_{Res}^V$  为变分辨率事件通知函数;  $\lambda_V: S_V \rightarrow Y_V$  为输出函数;  $Z_\varphi^V: Y_{V_1} \rightarrow X_{V_2}, \varphi \in \{r_V, (r_C, r_V)\}$  为分辨率模式为  $\varphi$  时不同车辆模块间的耦合关系;  $C_V$  为无人车驾驶控制决策相关规则。  $CG_V$  为无人车驾驶规则生成算子, 可表示由深度神经网络、深度强化学习等方法产生的训练模型;  $AG_V: (T \cdot C_V \rightarrow S_V) \cup (T \cdot C_V \rightarrow Y_V) \cup (T \cdot C_V \rightarrow II_V)$  为无人车驾驶动作生成算子, 表示自动驾驶行为生成, 改变自身状态  $S_V$ , 产生外部输出  $Y_V$  与外部环境和其他车辆交互, 同时产生内部反馈信息  $II_V$ 。

### 3) 消息模型

车车、车路间会产生通信, 由对应的通信协议定义消息。以下是前车 Car30 给 100 m 范围内的后车 Car25 发送的紧急刹车信息, 信息编号为

1086, 其中消息类型定义为车到车, 发送时间即为生效时间 01:00, 消息传输存在 3 s 延时。其表达为

Message = < 1086, Car30, Car25, Car2Car, "Emergency Brake", 01:00, 01:00, 00:03 >

### (2) 路侧设备多分辨率原子模型

以 RS 表示路侧设备多分辨率原子模型, 限于篇幅, 本文不对其进行智能行为描述, 其 MR-Agent-DEVS 模型描述退化为 MR-DEVS 模型, 详细描述参见文献[15]。RS 解聚产生路侧单元  $M_U$ 、交通控制中心  $M_{CC}$ 、交通信号设备  $M_L$ 。

## 4.2 多分辨率车路协同系统模型

车辆实体与路侧设备实体耦合行程车路协同系统网络模型。耦合模型由 MR-Agent-DEVS 耦合模型描述:

$$VR-S = \langle X_{NRes}, Y_{NRes}, n_{init}, N \rangle$$

其中:  $X_{NRes}$  为系统分辨率变化输入端口, 对应车辆实体和路侧设备实体分辨率模式变化;  $Y_{NRes}$  为系统分辨率变化输出端口, 本场景种取空集;  $N$  为变结构网络最小集合;  $n_{init}$  为初始网络模型, 且  $n_{init} \in N$ 。

$N$  中元素描述为

$$n = \langle X_N, Y_N, D, \{M_d\}, \{I_d\}, \{Z_{ij}\}, \rho_N, \lambda_N, \Sigma, G_\Sigma, \Sigma_G \rangle$$

其中:  $D = \{V, RS\}$  为网络中的实体索引集合;  $\{M_d\}$  为网络中各实体对应的 MR-Agent-DEVS 原子模型集合,  $d \in D$ ;  $\{I_d\}$  为网络中受实体  $d$  影响的模型集合, 模型成员也会影响网络本身;  $\{Z_{ij}\} = \{Z_V, Z_{RS}, Z_S\}$  为模型间的耦合关系, 车辆、路侧设备和网络本身三者之间两两相互耦合;  $\lambda_N = \emptyset$  为耦合网络自身不对外产生分辨率变化事件;  $\rho_N$  为分辨率结构转移函数, 包含系统级解聚函数和实体级聚合函数;  $\Sigma$  为车路协同系统级性质, 如车辆通行效率, 事故发生概率等;  $G_\Sigma$  为网络级性质生成算子;  $\Sigma_G = \emptyset$  为网络结构变化算子, 案例中不考虑实体增减导致的网络结构变化。

图5为车路协同系统解聚聚合过程示意图。系统VR-S由车辆V和路侧设备RS耦合,经解聚产生更高分辨率模型,其中多分辨率车辆实体V解聚生成车路协同车辆 $M_{rc}$ 和其他行驶车辆 $M_v$ ,RS解聚产生路侧单元 $M_U$ 、交通控制中心 $M_{CC}$ 、交通信号设备 $M_L$ 。对于 $M_v$ ,车辆数 $n$ 取1,因而原子模型退化为Agent-DEVS基础模型。

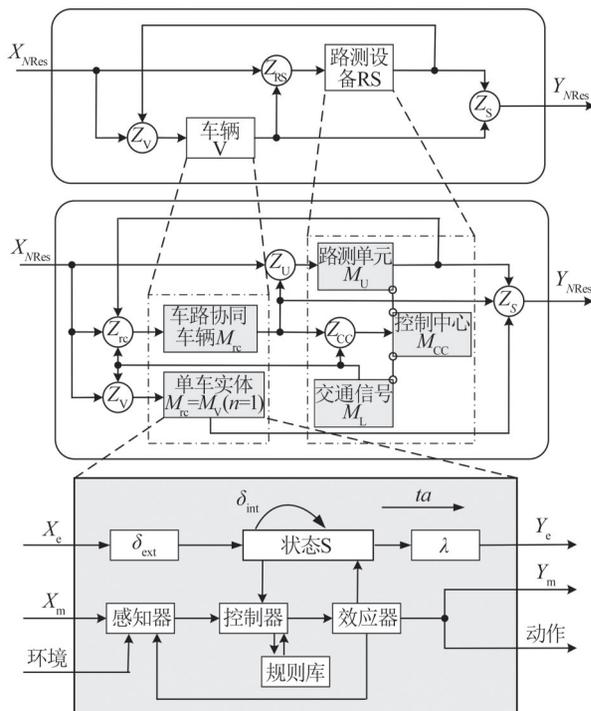


图5 多分辨率模型解聚聚合过程示意图

Fig. 5 Aggregation-Disaggregation process of multi-resolution model

## 5 结论

多分辨率建模通过具体模型描述语言中提供建模框架,对复杂产品设计开发过程中多层次、多领域、多阶段、多类型的仿真需求建模具有重要意义。DEVS作为一种通用形式化建模描述规范,对于开展多分辨率研究具有普遍意义。但DEVS缺乏对模块内的智能行为与协作的建模能力,而基于Agent的建模可以刻画个体的感知行为、通信协作和学习进化。本文在多分辨率,建模框架下,综合DEVS和Agent模型描述以提供对

事件、行为、机理等的描述能力,提出了具有耦合封闭性的模型描述规范,规范了建模流程,以实际案例验证了描述框架的有效性。后续将在此基础上,开展模型运行机制研究,并进一步完善建模规范。

## 参考文献:

- [1] 熊光楞,范文慧,陈晓波. 复杂产品开发的仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 194-201.  
Xiong Guangleng, Fan Wenhui, Chen Xiaobo. Simulation Technology of Complex Product Development[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(2): 194-201.
- [2] 杨佳然,林清泉,张和明,等. 复杂产品多分辨率模型聚合解聚框架[C]// 第三十三届中国仿真大会论文集. 北京: 中国仿真学会, 2021: 103-108.  
Yang Jiaran, Lin Qingquan, Zhang Heming, et al. Multi-Resolution Model Aggregation and Disaggregation Framework for Complex Products. [C]// 33rd China Simulation Conference. Beijing: China Simulation Federation, 2021: 103-108.
- [3] 李元. 多分辨率建模形式化与通用方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.  
Li Yuan. On Formalized and General Methods for Multi-Resolution Modeling[D]. Beijing: Beihang University, 2011.
- [4] Gou Chenxi, Cai Baigen. Multi-Resolution Entities Aggregation and Disaggregation Method for Train Control System Modeling and Simulation Based on HLA [C]// 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). New York: IEEE Press, 2014: 2367-2372.
- [5] 闫雪飞,李新明,刘东,等. 基于多分辨率的Multi-Agent武器装备体系作战仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(1): 136-143, 153.  
Yan Xuefei, Li Xinming, Liu Dong, et al. Battle Simulation Study on Multi-Agent Weapon System-of-Systems Based on Multi-Resolution [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 136-143, 153.
- [6] 刘敬,罗永亮,李海旭,等. 航空指挥和保障系统多分辨率模型构建方法[C]// 第三十三届中国仿真大会论文集. 北京: 中国仿真学会, 2021: 126-130.  
Liu Jing, Luo Yongliang, Li Haixu, et al. Multi Resolution Model Construction Method of Aviation Command and Support System[C]// 33rd China Simulation Conference. Beijing: China Simulation Federation, Beijing: China Simulation Federation, 2021: 126-130.
- [7] Bernard P Zeigler, Alexandre Muzy, Ernesto Kofman.

- Theory of Modeling and Simulation [M]. 3rd ed. New York: Academic Press, 2018.
- [8] Masoud Fakhimi, Anastasia Anagnostou, Lampros Stergioulas, et al. A Hybrid Agent-Based and Discrete Event Simulation Approach for Sustainable Strategic Planning and Simulation Analytics[C]// 2014 Winter Simulation Conference (WSC '14). New York: IEEE Press, 2014: 1573-1584.
- [9] Hyeong Suk Na, Amarnath Banerjee. Agent-Based Discrete-Event Simulation Model for No-Notice Natural Disaster Evacuation Planning, Computers & Industrial Engineering(S0360-8352), 2019, 129: 44-55.
- [10] A Gonzalez, C Luna, R Abella. UML State Machine as Modeling Language for DEVS formalism[C]// 2016 XLII Latin American Computing Conference (CLEI). New York: IEEE Press, 2016: 1-12.
- [11] 曹琦, 侯文华. 基于Agent-DEVS的应急物资保障多分辨率建模研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(7): 58-65.  
Cao Qi, Hou Wenhua. Research on Multi-resolution Modeling of Emergency Material Supply Based on Agent-DEVS[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(7): 58-65.
- [12] 刘晨, 王维平, 朱一凡. 状态机嵌入DEVS的组合建模方法研究[J]. 国防科技大学学报, 2005(5): 60-65.  
Liu Chen, Wang Weiping, Zhu Yifan. Research on a Composable Modeling Approach of Embedding the State Machine into DEVS[J]. Journal of National University of Defence Technology, 2005(5): 60-65.
- [13] W K V Chan, Y Son, C M Macal. Agent-Based Simulation Tutorial-Simulation of Emergent Behavior and Differences Between Agent-Based Simulation and Discrete-Event Simulation[C]// 2010 Winter Simulation Conference. New York: IEEE Press, 2010: 135-150.
- [14] 廖守亿. 复杂系统基于Agent的建模与仿真方法研究及应用[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.  
Liao Shouyi. Research of Methodology of Agent-Based Modeling and Simulation for Complex System and Application[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [15] 李四辉. 基于HLA的车路协同系统仿真方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
Li Sihui. Research on the Simulation Method of Vehicle-Road Collaborative System Based on HLA [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [16] Zhang B, Chan W K V, Ukkusuri S V. On the Modelling of Transportation Evacuation: an Agent-Based Discrete-Event Hybrid-Space Approach, Journal of Simulation (S1747-7778), 2014, 8(4): 259-270.