

5-25-2022

Cross Level Switching Technology for Multi-resolution Model of Complex Products

Wei Li

Department of Automation, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China,; li-w20@mails.tsinghua.edu.cn

Wenjia Zhang

Department of Automation, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

Heming Zhang

Department of Automation, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China,; hmz@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.

Cross Level Switching Technology for Multi-resolution Model of Complex Products

Abstract

Abstract: In the R&D of complex products, different design stages have different design goals and different simulation tasks, which need different resolution complex products simulation models. The models and interfaces for the multi-resolution characteristics are defined and thus the resolution control mechanism is studied. *The description mechanisms for the system structure status and model resolution state are established separately, the control mechanism for the system resolution is proposed, and a cross level switching technology is sorted out.* The experimental results show that the method can effectively solve the problem of model resolution switching, which ensures the simulation accuracy, improves the simulation efficiency and saves the required simulation resources. The method has simple structure, and can be popularized in the future.

Keywords

complex products, multi-resolution, model resolution, control mechanism, switching technology

Recommended Citation

Wei Li, Wenjia Zhang, Heming Zhang. Cross Level Switching Technology for Multi-resolution Model of Complex Products[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(5): 944-953.

复杂产品多分辨率模型跨层次切换技术

李玮, 张文嘉, 张和明*

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 在复杂产品研发设计过程中, 不同设计阶段有不同的设计目标, 并依据仿真目标有不同类型的仿真任务, 需要不同分辨率的复杂产品仿真模型参与仿真。针对多分辨率特性对模型与接口进行定义, 在此基础上研究模型分辨率的控制机制, 对系统结构状态和模型分辨率状态分别建立描述机制, 提出系统分辨率的控制机制, 梳理出一种跨层次切换技术。经过实验验证, 该方法可有效解决模型分辨率切换问题, 在保证仿真精度的同时, 提升仿真效率, 节省所需的仿真资源。该方法结构简单, 有望在未来进一步推广使用。

关键词: 复杂产品; 多分辨率; 模型分辨率; 控制机制; 切换技术

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2022) 05-0944-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1314

Cross Level Switching Technology for Multi-resolution Model of Complex Products

Li Wei, Zhang Wenjia, Zhang Heming*

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

Abstract: In the R&D of complex products, different design stages have different design goals and different simulation tasks, which need different resolution complex products simulation models. The models and interfaces for the multi-resolution characteristics are defined and thus the resolution control mechanism is studied. *The description mechanisms for the system structure status and model resolution state are established separately, the control mechanism for the system resolution is proposed, and a cross level switching technology is sorted out.* The experimental results show that the method can effectively solve the problem of model resolution switching, which ensures the simulation accuracy, improves the simulation efficiency and saves the required simulation resources. The method has simple structure, and can be popularized in the future.

Keywords: complex products; multi-resolution; model resolution; control mechanism; switching technology

引言

复杂产品制造业是国民经济、科技创新和国防安全的重要支柱, 是国家工业化的战略性产业。复杂产品具有客户需求多变、产品结构复杂、涉及的技术原理多样、制造过程复杂、产品影响因素多等一系列特点^[1]。

世界各国都非常重视智能制造技术与应用的发展。美国在 2000 年提出了未来制造领域的重大挑战和关键技术领域^[2], 在 2011 年和 2018 年又发布了关于先进制造业的相关战略^[3-4]。由于复杂产品所具备的高度复杂性和不确定性, 应用仿真手段成为关键分析方法^[5], 建模仿真技术也被视为应对制造业领域挑战的关键技术之一^[6]。

收稿日期: 2021-12-19 修回日期: 2022-04-09

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFB1701600)

第一作者: 李玮(1994-), 男, 硕士, 研究方向为复杂系统多分辨率建模仿真。E-mail: li-w20@mails.tsinghua.edu.cn

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: hmz@tsinghua.edu.cn

在复杂产品研发设计过程中, 产品模型会经历概念设计、总体设计、详细设计、集成校验和生产制造等多个不同阶段, 在不同设计阶段会有着不同的设计目标, 依据仿真目标有着不同类型的仿真任务, 需要不同分辨率的复杂产品仿真模型参与仿真^[7]。一般而言, 高分辨率模型描述更低层次的系统模型, 细节较多, 更消耗仿真资源; 低分辨率模型描述更高层次的系统模型, 细节较少, 但是更节省仿真资源^[8]。

多分辨率建模思想出现后, 研究人员针对不同研究领域和对象, 进行了许多验证。在作战仿真领域, 根据实体对象的层次结构可以进行分辨率的划分, 同时由于作战仿真本身的复杂性, 多分辨率建模方法在作战仿真领域得到了许多应用^[9-11]。比如, 基于 multi-Agent 的建模仿真(multi-Agent based modeling and simulation, MABMS)是目前最流行的作战仿真方式, 但其传统的 Agent 算法却难以对体系级别的作战仿真复杂行为进行建模, 主要由于用 Agent 进行决策时, 其交互产生的信念集会呈指数级别的增长。而多分辨率建模恰好可以化简 Agent 的交互。主要是对低层次高分辨率的 Agent, 可仅由其功能来构建协作机制; 而对高层次低分辨率的 Agent, 可由其全局信息发布指令并将决策结果反馈到低层。可以在不降低模型真实性的基础上, 实现 multi-Agent 决策与协作行为的有效化简^[12]。

在交通仿真领域, 列车设备之间、设备与整车、多车之间的关系都是列车控制关心的问题, 采用多分辨率建模方法对列控系统进行了相关研究^[12-13]。在城际铁路快速发展的今天, 可以选用多分辨率模型与高层体系结构相结合的技术手段, 建立起符合城际铁路系统运营特点的仿真模型。其可根据仿真培训系统的整体框架, 构建路网级-列车群追踪模型、单车级-单车自动运行模型和设备级-设备交互与功能实现模型。在其中, 列车群区间追踪模型主要反映宏观状态, 突出了列

车在追踪过程中运行状态的变化; 单车自动运行模型主要反映微观状态, 突出各子系统功能交互以及单辆列车的运行控制; 设备交互与功能实现模型属于中间模型, 侧重关键设备的信息交互等。这样的多分辨率建模可根据聚合解聚算法实现相互转换, 既简化了各个层次的信息复杂度, 又使得不同层次模型间可以相互关联, 使最终的仿真系统有更好的适应性^[13]。

多分辨率建模也可应用在各种流程工业^[14]、系统分析^[15]、数学分析优化^[16]等领域, 在此不再赘述。

依据形式化描述的程度, 多分辨率建模方法目前主要分为非形式化建模和形式化建模 2 种。非形式化方法主要有聚合解聚法 (aggregate and disaggregate, AD)^[17]、多重表示实体法 (multi-resolution entity, MRE)^[18]、选择视点法 (selective view, SV)^[19] 和子模型替代法 (atomic model substitution, AS)^[19] 等, 非形式化的方法比较容易理解, 但不具有通用性。

形式化方法在动态结构模型的描述理论包括 DSDEVS (dynamic structure discrete event system specification)^[20]、dynDEVS (dynamic DEVS)^[21] 等。但动态结构模型没有描述不同分辨率模型之间的关系, 由此又发展了专门的多分辨率建模方法, 主要包括 MRMS (multi-resolution model system specification)^[22]、MR-DEVS (multi-resolution DEVS)^[23] 等。其中, MR-DEVS 是一种较为完善的多分辨率建模描述理论, 但是, 其对于分辨率模型的表达在实际建模过程中仍无法准确定义。

本文针对多分辨率特性对模型与接口进行定义, 并在此基础上研究模型分辨率的控制机制, 对系统结构状态和模型分辨率状态分别建立描述机制, 并提出系统分辨率跨层切换机制。

1 模型定义

依据分辨率层级概念与模型特性, 可将模型分

为 4 类：基础模型、链接模型、引用模型和可变模型。基础模型是最基本的由机理构建而得的模型，链接模型是由父级库而得的模型，引用模型是通过引用已有模型或子系统而得的模型，可变模型则是由不同可变组件共同组成的模型。这些不同类别的模型对应着不同的定义方式。这种分类方式与现今商业仿真软件(如 Simulink)中的模型层次架构保持一致，通过这种分类方式，可以较为清晰地描述模型之间的关系。

1.1 基础模型

基础模型是最普遍的模型，通常组成分辨率层次较低的模型，可以被定义为

基础模型： $\{I, P, B, S, N\}$

其中基本信息 I 包含模型名称，模型路径以及用户读写权限。所有类别模型的基本信息均与之类似，之后不做赘述。模型端口 P 主要包含输入端口与输出端口。系统行为 B 主要指可以完整刻画模型行为的状态机或活动序列图。而仿真接口 S 包含在指定采样间隔与仿真模式下仿真开始、暂停、继续与停止的控制接口。注释说明 N 包含对模型信息的补充说明。

1.2 链接模型

作为源于父级库的模型，链接模型被定义为链接模型：

$\{I, FI, P, L-state, L-veri, param, S, N\}$

父级库信息 FI 包含父级库名称及版本，以及指向父级库的链接或路径。该链接可以使得链接模型实时随着库的更新而更新。模型端口 P 包含输入与输出端口，与基础模型类似。链接状态 $L-state$ 主要包含以下几种：有效链接，参数化链接，禁用链接以及锁定链接。有效链接是指链接正常且未经修改的链接模型，参数化链接是指链接正常且对参数进行了一定修改的链接模型，禁用链接是指暂时断开与父级库之间链接的链接模型，此时可对其进行结构性更改，而锁定链接是指禁止进行一

切修改的链接模型。链接确认 $L-veri$ 是对修改后的链接模型状态进行确认，可将修改推进到自定义库或进行还原。最后参数列表 $param$ 包含可变参数名称及对应值，更改的信息将作为链接数据保存在模型中。

1.3 引用模型

引用模型是将一个已有模型或子系统作为模块包含在模型内部，被包含的模型称为被引模型，包含被引模型的新模型称为引用模型。引用模型应包含与被引模型顶层输入输出端口对应的输入输出，并通过这些端口与其他模型连接。具体可定义为

引用模型： $\{I, CI, P, S, N\}$

引用信息 CI 包含被引模型的模型基本信息，如名称、类型与路径。被引模型的类型通常可以是基础模型、链接模型或引用模型，其路径可反映模型引用层次，避免循环引用。引用模型的端口 P 依旧包含输入端口与输出端口，但其输入端口需要对应被引模型的根级别输入端口、使能及触发模块的输入端口，其输出端口需要对应被引模型的根级别输出端口。

1.4 可变模型

可变模型中每个组件 C 表示一个变体组件，变体组件中最多只能有一个是用于仿真的组件。可变模型可以同时包含基础模型、链接模型、引用模型作为变体组件，它是其他组件的一种容器，所包含的组件之间没有连接。可变模型可被定义为

可变模型： $\{I, C, P, Control, S, N\}$

对于可变模型的端口 P ，一般可变模型和内部变体组件的输入输出端口相同。若变体组件之间的输入输出端口数量不同，则变体组件的输入输出端口需要是可变模型端口的子集，仿真期间将禁用可变模型中的非活动端口。其控制器 $Control$ 负责选择在仿真时所激活的变体组件，可细分为控制模式与控制条件两部分。

2 端口定义

在多分辨率建模环境中,模型端口可分为 2 种,分别是流端口与服务端口^[24]。流端口传输的内容是信号或事件,而服务端口传输的内容是请求服务与操作服务。将这二者分开,可使得系统结构更加明晰,仿真效率更高。对于流端口,除去其端口 ID 与名称外,还应包含其传输内容。例如对于某一信号 S ,在其传输过程中应包含信号名称、标签、信号类型、数据类型、单位、维度、采样时间、插值类型、信号范围等等。而对于服务端口,除去基本信息还应包含其服务接口集合,如接口类型、操作及对应接收数据描述。在以上模型定义和端口定义的基础上,可进行多分辨率模型分辨率控制机制的方法研究。

3 复杂产品多分辨率模型切换技术

3.1 系统分辨率状态描述

为实现系统结构的统一集中控制,首先需对系统结构状态进行描述。为了解决在多分辨率建模中模型分辨率的切换和控制问题,本文提出了一种基于状态图的描述方法,具体如下。

在多分辨率模型中,用耦合容器来表示高系统层次模型和低系统层次模型的聚合解聚关系。以图 1 为例, C_i 表示耦合容器, m_i 表示不同系统层次的模型。在对系统结构进行表示时,传统的控制方式要求同一系统层次模型必须同时处于运行状态或不运行状态。若将每个模型的运行状态直接组合来描述系统整体的状态,则缺少对系统上下层次模型之间耦合关系的表示。因此,对每个耦合容器都给予一个变量 S 来表示该耦合容器是否参与到仿真过程中,0 表示未运行状态,1 表示运行状态。

可以用一个二进制 $SSS = \langle S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n \rangle$ 表示系统结构状态(system structure state)^[25], S_i 表示第 i 个耦合容器的运行状态。这种系统分辨率状

态表达方式能够统一集中的将运行的系统结构完全表示,用以后续在分辨率控制中对系统结构状态的定义。其中,有 2 种特殊的系统结构。第 1 种结构 $SSS = \langle 0, 0, \dots, 0, \dots, 0 \rangle$ 表示所有模型都不运行,第 2 种结构 $SSS = \langle 1, 1, \dots, 1, \dots, 1 \rangle$ 表示所有模型都参与运行。在图 1 所示的结构中,如果系统结构为 $SSS = \langle 1100 \rangle$ 则表示 C_0 和 C_1 在运行状态中,而 C_2 和 C_{13} 不在运行状态中,此时参与仿真的模型有 m_0 、 m_1 、 m_2 、 m_{11} 、 m_{12} 和 m_{13} 。由此可见,系统结构状态能够确定不同层次参与仿真的模型。

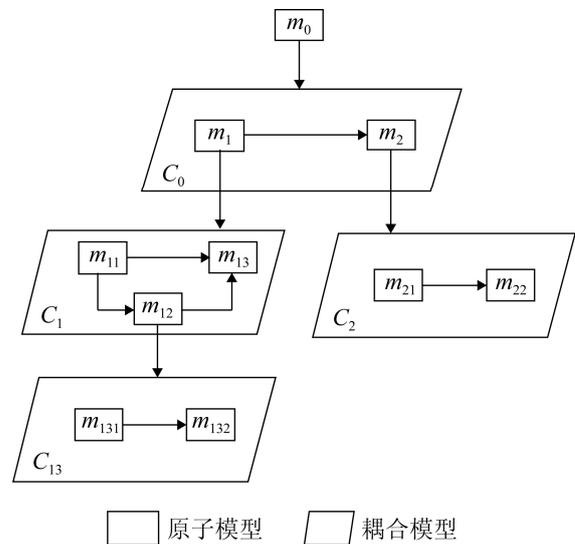


图 1 多分辨率模型系统结构
Fig. 1 System structure of multi resolution model

系统结构状态描述了不同系统层级模型参与仿真的情况,对于每一个模型来说,具有不同的模型分辨率状态。图 2 展示了模型不同分辨率状态的运行情况。

其中, m_{11} 具有 2 种分辨率状态 m_{11-1} 和 m_{11-2} , m_{12} 具有 4 种分辨率状态 m_{12-1} 、 m_{12-2} 、 m_{12-3} 和 m_{12-4} , m_{13} 具有 3 种分辨率状态 m_{13-1} 、 m_{13-2} 和 m_{13-3} 。

可以用一个二进制 $MRS = \langle s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n \rangle$ 表示模型分辨率状态(model resolution state), s_i 表示第 i 个分辨率模型的运行状态,0 表示模型分辨率不在运行状态,1 表示模型分辨率在运行状态。由于在多分辨率模型中与模型发生交互的可能有

不同分辨率的模型，即存在跨分辨率交互，因此允许多个分辨率模型同时运行。

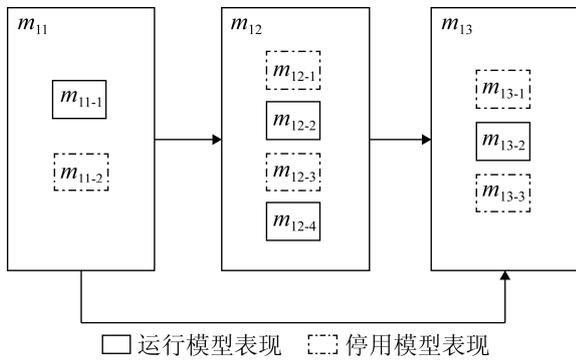


图 2 模型分辨率状态
Fig. 2 Model resolution status

图 2 中， m_{11} 的运行状态是 $MRS_{m_{11}} = \langle 10 \rangle$ ，即分辨率模型 m_{11-1} 在运行状态。 m_{13} 的运行状态是 $MRS_{m_{13}} = \langle 010 \rangle$ ，即分辨率模型 m_{13-2} 在运行状态。模型 m_{12} 中与分辨率模型 m_{11-1} 交互的是 m_{12-2} ，与分辨率模型 m_{13-2} 交互的是 m_{12-4} ，则它的运行状态是 $MRS_{m_{12}} = \langle 0101 \rangle$ 。只有在系统结构状态表示中，模型处于激活状态的模型分辨率状态表示才有意义。通过系统结构状态和模型分辨率模型状态，能够完备得描述多层次多分辨率模型的系统分辨率状态。

3.2 系统分辨率的跨层切换机制

为了对系统分辨率状态转移过程进行更好的描述和控制，本文提出一种系统分辨率跨层切换机制。将系统结构状态的控制与模型分辨率状态控制进行分层实现。

面对不同的仿真任务和仿真环境，系统结构会发生转变，有如下 3 种常见的系统结构转移类型。

(1) 设计阶段改变 在复杂产品多分辨仿真模型的设计过程中，设计阶段的改变将会引起系统结构的改变。

(2) 仿真目标切换 复杂产品系统完成多分辨率建模后，同样的系统模型可以完成不同的仿真目标。针对不同的仿真目标，选用不同的系统结构进

行仿真运算。

(3) 人工查看事件 在仿真过程中，可以根据建模人员的需要对系统结构进行动态的调整，以更好地辅助建模仿真人员分析。

为规范系统结构状态以及在不同状态之间转移过程。采用状态图的方式进行形式化描述，即系统结构状态图可以用如下的六元组进行表示：

$$\text{System Structure State Chart} = \langle \Sigma, \Gamma, SSS, SSS(0), \delta, \omega \rangle ?$$

Σ 是系统结构状态转移触发条件的集合，包含设计阶段改变、仿真目标切换和人工查看事件 3 种类型。

Γ 是状态图的输出，激活相应的模型进入仿真。
 SSS 是所有系统结构状态的集合， $SSS = \{ \langle S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n \rangle | S_i \in \{0, 1\} \}$ 。

$SSS(0)$ 是系统结构状态的初始状态，一般为 $SSS = \langle 0, 0, \dots, 0, \dots, 0 \rangle$ 。

δ 是状态转移函数， $\delta: SSS \times \Sigma \rightarrow SSS$ ，描述系统结构转移过程。

ω 是输出函数，即 $\omega: SSS \rightarrow \Gamma$ 。

图 3 显示了一个系统结构状态图。

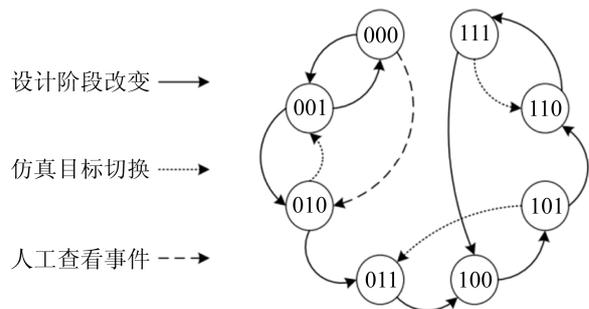


图 3 系统结构状态图
Fig. 3 State diagram of system structure

在一定的系统结构下，模型的分辨率在运行过程中也会根据模型运行的状态而发生改变，有如下 3 种常见的模型分辨率转移类型。

(1) 跨分辨率交互。不同分辨率模型之间进行仿真可能会直接影响仿真运行的精度，因此可调整模型所运行的分辨率。

(2) 仿真资源优化。对可完成同一仿真任务类型但分辨率状态不同的模型, 在高分辨率模型和低分辨率模型之中进行动态切换, 平衡仿真效率和仿真精度。

(3) 人工查看事件。在仿真过程中, 可以根据建模人员的需要查看不同分辨率模型的运行状态, 以更好地辅助建模仿真人员分析。

为规范模型分辨率状态以及在不同状态之间转移过程。采用状态图的方式进行形式化描述, 即模型分辨率状态图可以用如下的六元组进行表示:

$$\text{Model Resolution State Chart} = \langle \Sigma, \Gamma, MRS, MRS(0), \delta, \omega \rangle?$$

Σ 为模型分辨率状态转移触发条件的集合, 包含跨分辨率交互、仿真资源优化和人工查看事件 3 种类型; MRS 为所有模型分辨率状态的集合, $MRS = \{ \langle s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n \rangle | s_i \in \{0, 1\} \}$ 。

其他元素和系统结构状态图中基本一致, 图 4 为一个模型的分辨率状态图。从图 4 可以看出, 该模型一共有 2 个分辨率状态。

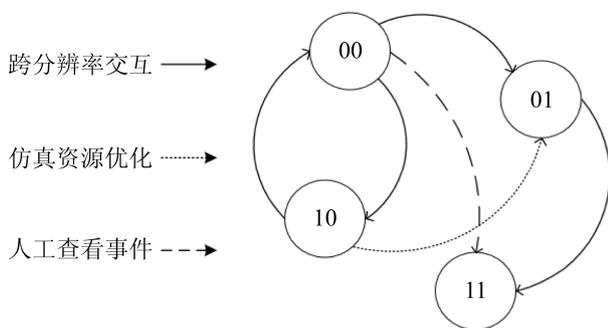


图 4 模型分辨率状态图

Fig. 4 State diagram of model resolution

根据以上对于系统结构状态图和模型分辨率状态图的构建, 提出如图 5 所示的系统分辨率跨层切换机制。在系统分辨率跨层切换机制中, 上层系统结构状态图确定系统结构, 并激活相应耦合容器和模型进入仿真状态, 下层各模型的模型分辨率状态图在激活状态下控制各模型分辨率的切换。

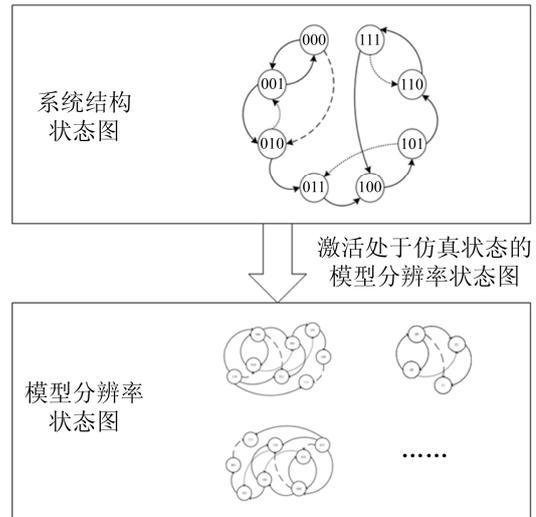


图 5 系统分辨率跨层切换机制

Fig. 5 Cross level switching mechanism of system resolution

3.3 多分辨率建模方法比较

本文的系统分辨率状态分为了系统结构状态图和模型分辨率状态图, 主要的优势是可以通过 2 个状态图的变化来确定仿真过程中参与的系统以及相应的模型分辨率状态, 并且二进制的表示一目了然, 应用十分方便, 资源消耗较少。而目前主流的建模方法有 Modelica、SysML、DEVS 等, 下面就本文的建模仿真方法与这些方法进行对比。

Modelica 是一种通用的建模方法, 是一个开放的物理建模语言, 目前在汽车领域使用最为广泛。其主要通过基于方程的非因果建模, 而这种基于方程的约束是 Modelica 建模的一大特点, 而多分辨率的建模过程有很多不是基于方程的建模, 而是基于结构的建模, 所以在多分辨率建模领域使用 Modelica 较少。

SysML 是一种系统建模语言, 其目的是统一系统工程中使用的建模语言。本文所使用的建模方法就是状态图的建模方法, 类比了 UML 中的状态图进行建模, 与 SysML 中的状态机图建模有着相似的形式。但是本文的建模过程更为简洁, 去掉了状态图建模的各种细节要求, 只以二进制表示其状态, 用箭头表示其状态转换过程, 更为简洁易懂, 也更容易与仿真的对接。

A/D (aggregation/disaggregation)法是最能直观体现多分辨率建模思想的一种常用方法,它分别建立低分辨率实体和高分辨率实体,然后对不同分辨率实体之间的聚合解聚函数进行建模。它使得建模人员容易理解建模理念和具体应用,但其缺点是缺乏对分辨率切换机制的描述,即它只是用函数解决了分辨率的切换,而没有解决聚合解聚的时机。

MRE(multiple representation entity)构建的模型实体包含了不同分辨率的模型。它重点关注不同分辨率模型在仿真运行过程中的一致性以及其他模型进行的并发交互。但是, MRE 方法没有对仿真运行实体进行控制,始终运行所有分辨率模型并维护相应的并发交互,造成仿真资源大量消耗。

DEVS 是一种典型的面向对象的层次化、模块化的描述方法,是现阶段普遍接受和支持的描述方法。DEVS 是一种开放的描述体系,具有很强的扩展性,能够根据建模仿真场景、系统特点进行扩展。DEVS 描述方法分为原子模型和耦合模型两部分。若干原子模型通过输入输出接口之间一定的连接形成耦合模型,耦合模型可以再看作等价的原子模型,即模型描述具有耦合封闭性,可以用来构建模块化、层次化的仿真模型。但是其描述框架过于复杂,且具有不确定性,这些问题限制了基于 DEVS 建模方法的实际应用。

3.4 基于控制机制的跨层次切换技术

基于系统分辨率切换机制提出一种跨层次切换技术框架,包括感知层、判别层和控制层,如图 6 所示。

感知层获取用以表征系统结构和模型分辨率转移的条件。对于系统结构中设计阶段改变、仿真目标切换等事件需要进行统一化描述,封装成统一的仿真任务格式。对于表征模型分辨率状态的属性,由于模型的系统模型层次、不同分辨率模型之间的异构性,用以表征模型当前分辨率状态的属性需进行标准化处理,根据模型属性判断仿真过程中是否存在跨分辨率交互等事件。

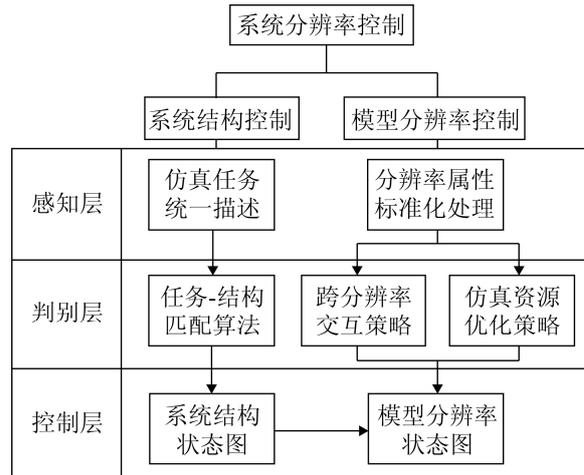


图 6 系统分辨率跨层次切换技术

Fig. 6 Cross level switching technology of system resolution

判别层基于感知层获取的当前系统结构和模型分辨率所处的状态输出模型分辨率转移的条件。在系统结构控制中依据仿真任务和系统结构的匹配算法确定系统结构。在模型分辨率的决策规则中,根据不同的模型分辨率方向有不同的跨层次交互策略,同时在这一层可设计仿真资源优化的策略。

控制层根据判别层得到的系统结构和模型分辨率信息,控制系统结构的转变方向以及需要进行模型分辨率转换方向。控制层的实现可参照状态图的描述方式。状态采用上文定义的系统分辨率状态表示,状态转移路径的激活条件由判别层的控制信息表示。

4 应用案例

复杂系统建模问题是多分辨率建模的典型应用,而系统变阶问题又是复杂系统建模问题的典型应用。本文以一个系统变阶和一个能控性系统的有向连接为例,展示多分辨率建模的过程并验证系统分辨率跨层次切换技术的有效性。

4.1 建模流程

本文一共考虑两个线性系统,这两个系统都只包含 1 个模型,两个系统都是单输入单输出的,第一个系统的输出可作为第二个系统的输入。这两个

系统的形式均如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + D \end{cases}$$

第一个系统有 2 个分辨率模型。分别为三阶的高分辨率模型和两阶的低分辨率模型。

三阶模型的系统矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 2 & 0.1 \\ 0.1 & -2 & 0.1 \\ 0.01 & 0.02 & -5 \end{pmatrix}$$

忽略系统矩阵的最小奇异值, 我们可以得到其低分辨率的两阶系统矩阵为

$$A_{11} = \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 0.1 & -2 \end{pmatrix}$$

第二个系统只有 1 个分辨率模型, 是二阶的模型, 其系统矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -4 & -3 \end{pmatrix}$$

因为这两个系统均只有 1 个模型, 我们假设第一个系统的模型为 m_1 , 第二个系统的模型为 m_2 。 m_1 有 2 个分辨率模型, m_2 有 1 个分辨率模型。

按照系统结构状态和模型分辨率状态进行建模。系统结构一共有 4 种情况, $SSS = \langle 11 \rangle$, $SSS = \langle 10 \rangle$, $SSS = \langle 01 \rangle$, $SSS = \langle 00 \rangle$ 。其中, $SSS = \langle 00 \rangle$ 表示两个系统都不运行, 不属于仿真的考虑范围, 我们只需考虑前 3 种情况即可。

在 $SSS = \langle 10 \rangle$ 时, 由于第二个系统不运行, 故不需要考虑 m_2 的状态, 此时 m_1 有两种运行状态, 分别为 $MRSm_1 = \langle 10 \rangle$ 和 $MRSm_1 = \langle 01 \rangle$, 前一种对应着 m_1 运行高分辨率模型, 后一种对应着 m_1 运行低分辨率模型。

在 $SSS = \langle 01 \rangle$ 时, 由于第一个系统不运行, 故不需要考虑 m_1 的状态, 此时 m_2 只有一种运行状态, 为 $MRSm_2 = \langle 1 \rangle$ 。

在 $SSS = \langle 11 \rangle$ 时, 表示两个系统均运行, 第一个系统的输出为第二个系统的输入。此时 m_1 有两种运行状态, 分别为 $MRSm_1 = \langle 10 \rangle$ 和 $MRSm_1 = \langle 01 \rangle$, m_2 只有一种运行状态, 为 $MRSm_2 = \langle 1 \rangle$ 。

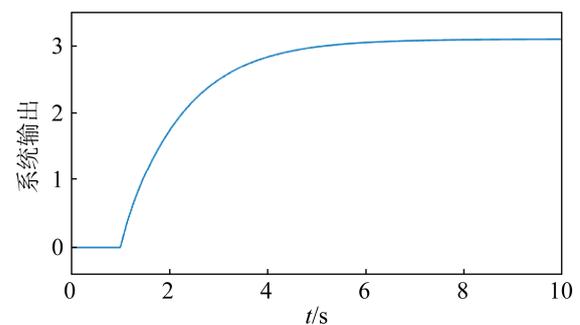
当 $MRSm_1 = \langle 10 \rangle$ 和 $MRSm_2 = \langle 1 \rangle$ 一同运行时, 表示第一个系统的高分辨率模型输出作为第二个系统模型的输入; 当 $MRSm_1 = \langle 01 \rangle$ 和 $MRSm_2 = \langle 1 \rangle$ 一同运行时, 表示第一个系统的低分辨率模型输出作为第二个系统模型的输入。

4.2 数值结果

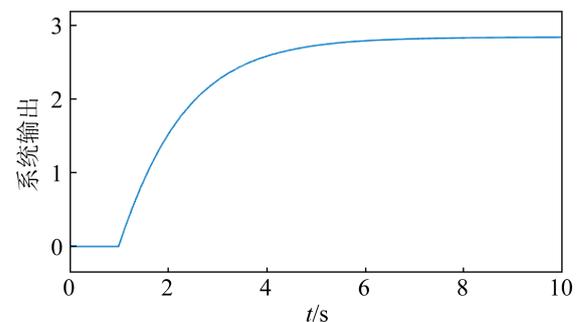
利用 Matlab 和 simulink 的仿真平台, 首先搭建了这两个有向连接的系统, 之后对于 $SSS = \langle 11 \rangle$, $SSS = \langle 10 \rangle$ 两种系统状态进行仿真。

在 $SSS = \langle 10 \rangle$ 时, 输入为阶跃函数, 直接连接模型 m_1 。阶跃函数在 $t=1$ s 时从 0 变为 1, 模型 m_1 初始值为 0。仿真结果如图 7(a)、(b)所示。图 7(a)为高分辨率模型仿真结果, 图 7(b)为低分辨率模型仿真结果。

在 $SSS = \langle 11 \rangle$ 时, 输入为阶跃函数, 直接连接模型 m_1 , 然后模型 m_1 连接到模型 m_2 。阶跃函数在 $t=1$ s 时从 0 变为 1, 模型 m_1 初始值为 0, 模型 m_2 初始值为 2。仿真结果如图 7(c)、(d)所示。图 7(c)为高分辨率模型仿真结果, 图 7(d)为低分辨率模型仿真结果。



(a) $SSS=10; MRSm_1=10$



(b) $SSS=10; MRSm_1=01$

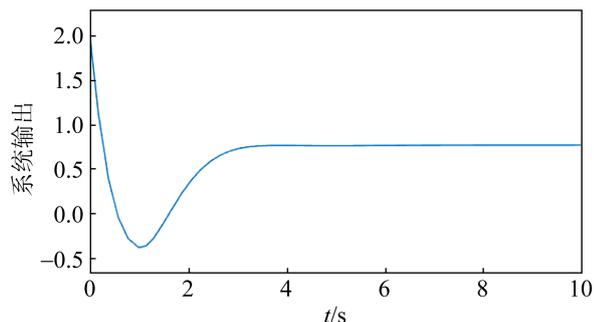
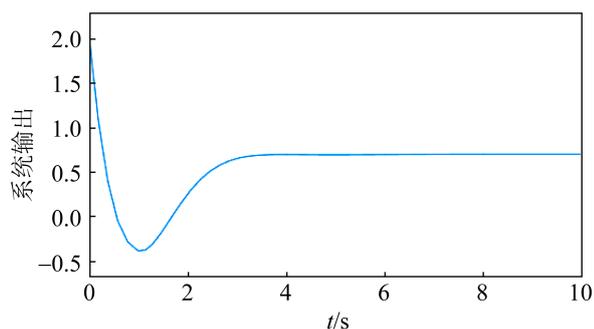
(c) $SSS=11; MRSm_1=10, MRSm_2=1$ (d) $SSS=11; MRSm_1=01, MRSm_2=1$

图7 数值仿真结果

Fig. 7 Numerical simulation results

从图7可以看出, m_1 的2种分辨率状态对于两个系统的输出有所影响,但是在个位数上几乎没有影响,在10分位上开始影响。所以可以根据对于精度的要求来调整 m_1 的分辨率状态,这样在精度要求不高时,用低分辨率进行仿真可以缩短仿真时间。

上述仿真验证说明,系统结构和模型分辨率建模可行,通过系统结构来控制模型分辨率的跨层次切换技术可行。而且因为系统结构和模型分辨率都为二进制的数组,所以使用起来非常方便,有望在未来进行进一步的推广使用。

5 结论

本文针对多分辨率仿真模型面对不同仿真任务需选择不同系统结构以及相应模型分辨率状态的需求,在模型定义与接口定义的基础上,用系统结构状态和模型分辨率状态共同描述系统分辨率状态的方式来满足了这一实际需求。本文根据系统结构和模型分辨率共同控制系统分辨率状态的要

求,提出了一种基于状态图的系统分辨率跨层切换机制,并以此提出了一种系统分辨率的跨层次切换技术。本文以两个线性系统为例,验证了本文所提出的复杂系统多分辨率跨层次切换技术的有效性。

参考文献:

- [1] 范文慧,肖田元. 复杂产品协同设计、仿真、优化一体化平台[J]. 科技导报, 2007, 25(4): 15-24.
Fan Wenhui, Xiao Tianyuan. Integrated Platform for Collaborative Design, Simulation and Optimization of Complex Products[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(4): 15-24.
- [2] Council N. Technology for the United States Navy and Marine Corps, 2000-2035 Becoming a 21st-Century Force: Volume 9: Modeling and Simulation[M]. 1997.
- [3] Kracke M A. Overview of the Advanced Manufacturing Partnership[C]// Aeromat 23 Conference and Exposition American Society for Metals. Charlotte, North Carolina USA: American Society for Metals: 2012.
- [4] Adamick J. A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing[J]. Journal of Applied Clinical Pediatrics (S1003-515X), 2012, 35(5): 267-268.
- [5] 姚咏,范文慧,熊光楞. 复杂产品开发过程仿真及其优化方法研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 726-730.
Yao Yong, Fan Wenhui, Xiong Guangleng. Research on Simulation of Complex Product Development Process and Its Optimization Method[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 726-730.
- [6] 张霖,周龙飞. 制造中的建模仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 1997-2012.
Zhang Lin, Zhou Longfei. Modeling and Simulation Technology in Manufacturing[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 1997-2012.
- [7] 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 for Complex Product Development[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(2): 194-201.
- [8] 刘宝宏,黄柯棣. 多分辨率建模的研究现状与发展[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 1150-1154.
Liu Baohong, Huang Kedi. Research Status and Development of Multi-Resolution Modeling[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(6): 1150-1154.
- [9] 程旺迟,许瑞明,张最良. 多分辨率建模理论方法研究的现状与发展[J]. 军事运筹与系统工程, 2003(3):

- 58-61.
Cheng Wangchi, Xu Ruiming, Zhang Zhuiliang. Research Status and Development of Multi-Resolution Modeling Theory and Method[J]. Military Operation Research and Systems Engineering, 2003(3): 58-61.
- [10] 周小媛. 基于 LVC 的多分辨率模型聚合解聚关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
Zhou Xiaoyuan. Research on Key Technologies of Polymerization and Depolymerization Based on LVC Multi-Resolution Model[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [11] 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): 136-142, 153.
Yan Xuefei, Li Xinming, Liu Dong, et al. Simulation Research on Systematic Operation of Multi-Agent Weapon Equipment Based on Multi-Resolution[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 136-142, 153.
- [12] 苟晨曦. 列车运行控制系统多分辨率建模理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
Gou Chenxi. Research on Multi-Resolution Modeling Theory and Method of Train Operation and Control System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [13] 李浩钊. 基于多分辨率模型的城际铁路列控仿真培训系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Li Haozhao. Research on Train Control Simulation Training System of Intercity Railway Based on Multi-Resolution Model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 王荣泽. 常减压装置的多分辨率建模技术的思考[J]. 当代化工研究, 2017(12): 9-10.
Wang Rongze. Thoughts on Multi-Resolution Modeling Technology of Atmospheric and Vacuum Distillation Unit[J]. Contemporary chemical research, 2017(12): 9-10.
- [15] 吴文兵. 雷达信号处理系统多分辨率建模与仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
Wu Wenbing. Research on Multi-Resolution Modeling and Simulation of Radar Signal Processing System[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [16] Benjamin P, Karen W, Max G. Survey of Multifidelity Methods in Uncertainty Propagation, Inference, and Optimization[J]. SIAM Review (S0036-1445), 2018, 60(3): 550-591.
- [17] Davis P K. An Introduction to Variable-Resolution Modeling[J]. Naval Research Logistics (S0894-069X), 1995, 42(2): 151-181.
- [18] [1] Ringler T, Petersen M, Higdon R L, et al. A Multi-Resolution Approach to Global Ocean Modeling[J]. Ocean Modelling (S1463-5003), 2013, 69: 211-232.
- [19] Davis P K, Bigelow J H. Introduction to Multiresolution Modeling (MMR) with an Example Involving Precision Fires[J]. Proc Spie (S0277-786X), 1998.
- [20] Barros F J. Dynamic Structure Discrete Event System Specification: A new Formalism for Dynamic Structure Modeling and Simulation[C]// 1995 Winter Simulation Conference. USA: IEEE, 1995: 781-785.
- [21] Uhrmacher A M. Dynamic Structures in Modeling and Simulation: A Reflective Approach[J]. Acm Transactions on Modeling & Computer Simulation (S1049-3301), 2001, 11(2): 206-232.
- [22] 刘宝宏. 多分辨率建模的理论与关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
Liu Baohong. Research on the Theory and Key Technologies of Multi-Resolution Modeling[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [23] 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. Research on Formalization and General Method of Multi-Resolution Modeling[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [24] 彭功状, 毛华超, 张和明. 基于组件的多分辨率动态结构建模与仿真[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2016, 56(9): 974-979, 984.
Peng Gongzhuang, Mao Huachao, Zhang Heming. Multi-Resolution Dynamic Structure Modeling and Simulation Based on Components[J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2016, 56(9): 974-979, 984.
- [25] 毛华超, 彭功状, 张和明, 等. 面向模型粒度控制的多分辨率建模方法[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(11): 2630-2637.
Mao Huachao, Peng Gongzhuang, Zhang Heming, et al. Multi-Resolution Modeling Method for Model Particle size Control[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2630-2637.