

8-5-2020

## Model Granularity Control Oriented Multi-Resolution Modeling

Huachao Mao

*1. National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ;*

Gongzhuang Peng

*1. National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ;*

Heming Zhang

*1. National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ;*

Jiixin Zhao

*1. National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ;*

*See next page for additional authors*

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.

---

## Model Granularity Control Oriented Multi-Resolution Modeling

### Abstract

**Abstract:** Multi-resolution modeling and simulation has been widely applied in various fields, but the current multi-resolution modeling and simulation methods cannot effectively, systematically and comprehensively address four key issues: resolution control, model consistency, information loss and cross resolution interaction. Addressing these four issues, *Model Granularity Control Oriented Multi-Resolution Modeling* was proposed. This modeling approach has two core modeling components: resolution state chart and resolution connecting bridge, *the former is to use UML state diagram to control granularity changes triggered by cross-resolution interaction, human-computer interaction and resource optimization model, and the latter is to model the relationship between different resolution models independently and thoroughly, and to realize consistency maintenance based on information difference.* The system variable order problem was used to validate the modeling method.

### Keywords

multi-resolution modeling, resolution control, resolution state chart, resolution connecting bridge, consistency

### Authors

Huachao Mao, Gongzhuang Peng, Heming Zhang, Jiabin Zhao, and Minghui Li

### Recommended Citation

Mao Huachao, Peng Gongzhuang, Zhang Heming, Zhao Jiabin, Li Minghui. Model Granularity Control Oriented Multi-Resolution Modeling[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2630-2637.

# 面向模型粒度控制的多分辨率建模方法

毛华超<sup>1</sup>, 彭功状<sup>1</sup>, 张和明<sup>1</sup>, 赵佳馨<sup>1</sup>, 李明辉<sup>2</sup>

(1.清华大学国家 CIMS 工程技术研究中心, 北京 100084; 2.中国矿业大学, 北京 100083)

**摘要:** 多分辨率建模仿真技术已经广泛应用在各个领域, 目前的多分辨率建模仿真方法不能有效、系统、全面地解决 4 个关键问题: 分辨率控制、模型一致性、信息损失和跨分辨率交互。针对复杂系统多分辨率建模的 4 个问题, 提出了一种面向模型粒度控制的多分辨率建模方法。该建模方法的核心是 2 个建模组件: 分辨率状态图和分辨率连接桥, 前者利用 Unified Modeling Language (UML) 状态图控制由模型交互、人机交互和资源优化等触发的模型粒度变化, 后者对多分辨率模型之间的关系进行独立全面的解耦建模, 实现了基于信息差的解聚聚合以及一致性维护。利用系统变阶问题验证面向模型粒度控制的多分辨率建模本文的建模方法。

**关键词:** 多分辨率建模; 模型粒度控制; 分辨率状态图; 分辨率连接桥; 一致性

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 11-2630-08

## Model Granularity Control Oriented Multi-Resolution Modeling

Mao Huachao<sup>1</sup>, Peng Gongzhuang<sup>1</sup>, Zhang Heming<sup>1</sup>, Zhao Jiaxin<sup>1</sup>, Li Minghui<sup>2</sup>

(1.National CIMS Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Multi-resolution modeling and simulation has been widely applied in various fields, but the current multi-resolution modeling and simulation methods cannot effectively, systematically and comprehensively address four key issues: resolution control, model consistency, information loss and cross resolution interaction. Addressing these four issues, *Model Granularity Control Oriented Multi-Resolution Modeling* was proposed. This modeling approach has two core modeling components: resolution state chart and resolution connecting bridge, the former is to use UML state diagram to control granularity changes triggered by cross-resolution interaction, human-computer interaction and resource optimization model, and the latter is to model the relationship between different resolution models independently and thoroughly, and to realize consistency maintenance based on information difference. The system variable order problem was used to validate the modeling method.

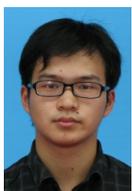
**Keywords:** multi-resolution modeling; resolution control; resolution state chart; resolution connecting bridge; consistency

## 引言

随着多分辨率建模仿真技术的发展, 多分辨

率建模仿真技术已经广泛应用在众多领域: 工业制造<sup>[1-2]</sup>、作战仿真<sup>[2-3]</sup>、系统仿真<sup>[4-5]</sup>、环境科学<sup>[6]</sup>和自然科学<sup>[7]</sup>等。多分辨率建模仿真技术应用广泛的原因则是多分辨率建模刻画了复杂系统所共有的特性: 多层次、多尺度和多分辨率等, 这也吸引了学者们的广泛关注。

目前在多分辨率建模基础理论、建模方法、工程实现和应用方面都有大量的研究。就多分辨



收稿日期: 2013-09-21 修回日期: 2013-12-04;  
基金项目: 国家基础科研项目(0420110104);  
作者简介: 毛华超(1988-), 男, 四川自贡, 硕士, 研究方向为复杂系统建模、多分辨率建模; 张和明(1966-), 男, 浙江仙居, 博士, 教授, 研究方向为并行工程, 虚拟样机, 网络化制造, 复杂系统建模与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2630 •

率建模方法而言, 学者们提出了大量的多分辨率建模方法。由于出发点和应用的不同, 这些多分辨率建模方法侧重于多分辨率问题的不同方面: 解聚/聚合法<sup>[1,8]</sup>和选择视点法<sup>[8]</sup>试图利用解聚聚合函数来解决多分辨率问题; 分布式组件替换法<sup>[9]</sup>和混合分辨率建模<sup>[10]</sup>着重控制多分辨率模型的切换运行; CAVR(Composable Architecture for Variable Resolution)法<sup>[11]</sup>跨分辨率交互问题, 一体化层次变分辨率法<sup>[12]</sup>提出面向过程的多分辨率建模方法; 实体多重表示法<sup>[13]</sup>和基于优化的建模法<sup>[14]</sup>重点解决多分辨率模型之间的一致性问题; 基于 DEVS(Discrete Event System Specification)的建模法<sup>[15]</sup>旨在为多分辨率建模方法提供坚实的理论支撑, BOM(Base Object Model)建模法<sup>[16]</sup>关注多分辨率模型的可组合性和互操作性。

在这些多分辨率建模方法里, 很少有多分辨率建模方法能够同时系统地考虑分辨率控制、一致性维护、模型切换时的信息损失和跨分辨率交互等问题。大部分的多分辨率建模方法研究都集中在一致性建模和模型解聚聚合上, 对分辨率切换控制和切换时的信息损失研究则是相对较少。为解决当前建模方法中对分辨率控制和信息损失考虑不足, 同时提高多分辨率一致性和跨分辨率交互等主要问题的建模能力, 本文提出一种面向模型粒度控制的多分辨率建模方法。

该方法的核心思想是通过建立分辨率状态图统一地控制多分辨率模型的仿真粒度, 并且在模型粒度变化过程中, 利用分辨率连接桥描述模型之间的关系, 实现在模型粒度变化(即分辨率切换)时保持多分辨率模型的一致性, 减少模型粒度变化时的信息损失。

## 1 模型粒度控制

一般而言, 高分辨率模型精度较高, 呈现细节信息较多, 但是需要较多的仿真资源; 而低分辨率则是在更高层次的建模, 所需的仿真资源相对较少。相比常规的单分辨率模型建模仿真中只

能选择其一的不足, 多分辨率模型的优势在于仿真过程中用户可以根据仿真环境选择最合适粒度的模型参与仿真, 控制切换模型粒度, 使仿真在效率和精度达到最优平衡<sup>[17]</sup>。

但是传统的多分辨率建模方法大多都是针对多分辨率模型之间的一致性、解决聚合等静态问题进行的建模<sup>[12-13,15]</sup>, 并且将模型和模型间的关系高度的耦合建模, 因此大大降低了单层模型的重用度, 增加了控制模型粒度的难度。为直观方便准确地描述模型粒度的动态变化, 本节提出分辨率状态图; 同时, 为保证仿真模型一致性, 降低多分辨率模型之间的耦合关系, 本节提出分辨率连接桥, 用以刻画模型之间的关系。

### 1.1 分辨率状态图

多分辨率建模的出发点是利用多分辨率建模的核心优势: 选择恰当的模型来适应仿真环境。因此, 一个有效的多分辨率建模方法需要提供一种描述模型粒度切换的机制, 并且允许分辨率在仿真过程中自适应的改变分辨率。尽管当前已提出十多种多分辨率建模方法, 但是较少有方法能够描述和控制模型粒度切换(亦即分辨率切换, 下同)。

A/D(Aggregation/Deaggregation)法仅仅处理了分辨率切换的实现函数, 而非聚合解聚的时机<sup>[8]</sup>; SV>Selective View)和 MRE(Multiple Representation Entity)基本上不允许分辨率切换<sup>[8,13]</sup>; Hooking (VRM)方法提出的分辨率控制机制只适用于时序仿真, 不具有广泛的应用; 分辨率切换的 DEVS 描述框架的复杂性和不明确性, 严重限制了基于 DEVS 的建模方法<sup>[15]</sup>的实际应用。

为了明确、简洁、有效地解决分辨率切换的描述和控制问题, 本文提出一种基于 UML 状态图的描述方法, 即“分辨率状态图”(Resolution State Chart, ReS Chart)。

本文先定义几个分辨率状态图相关的概念:

- 分辨率状态

一个二进制数  $s = (b_n, \dots, b_2, b_1)$ ,  $b_i$  的值表示第  $i$  层粒度的模型是否在运行, 若值为 1 表示运行, 值为 0 则表示没有运行。这种二进制的分辨率状态表示有几个优点: 1) 可以统一集中的将系统的分辨率模型的运行情况完全表示; 2) 一般而言, 由于模型分辨率越高, 其消耗的资源越大, 那么该二进制数的值可以反映资源消耗的相对大小, 比如状态  $S_{110}$  比状态  $S_{001}$  耗资源。同时, 我们可以得到建模对象的分辨率状态总数:

$$|S| = 2^n \quad (1)$$

模型分辨率层次是有限的, 就建模经验来看, 一般不大于 4 层, 因而分辨率状态数也是有限的。

• 分辨率状态转移类型

如表 1 所示, 根据触发条件的不同, 将分辨率状态的转移分为 3 类: 跨分辨率交互 (Cross Resolution Interaction)、人机交互 (Human-Machine Interaction) 和 计算资源优化 (Computational Resource Optimization)。下表是各转移路径的触发源以及对应的优先级。从仿真精度来看, 跨分辨率交互 CRI 事件直接影响了仿真的逻辑, 对仿真的正确性有直接的影响; 人机交互 HMI 事件响应人工查看某分辨率信息时的需求; 而计算资源优化 CRO 则是从仿真资源角度给出优化资源的模型粒度切换建议。所以, 3 种路径的优先级应为:

$$CRI > HMI > CRO \quad (2)$$

表 1 分辨率状态转移类型

分辨率状态转移类型	触发源	优先级
CRI	跨分辨率的交互事件触发, 与建模背景相关	1
HMI	仿真中, 人工查看某分辨率	2
CRO	可用资源超出预定阈值范围	3

• 分辨率状态图

分辨率状态图是指描述多分辨率对象在仿真中分辨率状态及其之间相互转移的有限状态机, 图 1 即为一个分辨率状态图的例子。

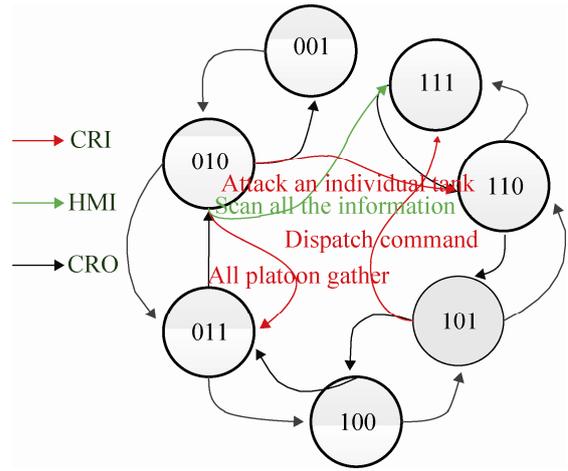


图 1 分辨率状态图

分辨率状态图的工作原理就是通过实时获取仿真中与分辨率切换相关的系统状态信息, 据此检测分辨率状态转移条件是否满足, 当某条分辨率状态转移路径被激活时, 分辨率状态图调用分辨率连接桥的解聚聚合函数实现模型粒度转移, 并将分辨率状态转移到相应的目标分辨率状态上。

为规范分辨率状态图的建立, 本文使用状态机的形式化来描述分辨率状态图, 即分辨率状态图可表示为六元组:

$$ReS\ Chart = \{\Sigma, \Gamma, S, s_0, \delta, \omega\} \quad (3)$$

该 6 个元素描述了分辨率状态图的 6 个方面, 如表 2 所示。

表 2 分辨率状态图的形式化含义

元素	含义
$\Sigma$	触发条件集合, 即 $\Sigma = \{CRI, HMI, CRO\}$
$\Gamma$	分辨率状态图的输出, 可用于构建层次 ReS Chart
$S$	所有分辨率状态的集合, $S = \{(b_n, \dots, b_2, b_1)   b_i \in \{0, 1\}\}$
$s_0$	分辨率状态图的初始状态, 一般都是 0
$\delta$	状态转移函数: $\delta: S \times \Sigma \rightarrow S$ , 该函数有 2 个作用: 1) 转移分辨率状态; 2) 调用解聚聚合函数
$\omega$	输出函数, 即 $\omega: S \rightarrow \Gamma$

根据分辨率状态图 6 方面的内容, 结合模型建立的主要流程, 总结出分辨率状态图的构建流程见表 3。

表 3 分辨率状态图的构建流程

构建流程
1) 识别仿真对象层次结构, 确定其分辨率状态维数。该步骤可以参考 SES <sup>[18]</sup> , 一个形式化的系统结构描述方案。
2) 列表所有分辨率相关变量, 建立所有的 CRI。分辨率相关变量可由 MRE 建模方法中的 ADG <sup>[13]</sup> 来识别。
3) 评估仿真环境的计算资源和多分辨率对象模型所需资源。其评估方法主要是相对评估, 即将每个模型都进行单独测试, 得出其相对运行所需资源; 该数据用于构建 CRO。
4) 定义人工查看类型 HMI, 该部分可由计算机生成。
5) 建立状态转移函数和解聚聚合函数之间的映射关系。

## 1.2 分辨率连接桥

由于多分辨率模型描述的是同一个研究对象, 不同分辨率模型之间具有较强的耦合关系, 比如: 抽取、聚合、综合、合并等关系<sup>[19]</sup>, 这是多分辨率模型区别于其他多模型的最大特点。当前的多分辨率建模方法<sup>[18,11-13]</sup>对模型之间的关系做了大量的研究。UNIFY 方法<sup>[13]</sup>将一致性函数集成在 MRE 实体中, MR-DEVS<sup>[16]</sup>扩展了单层模型的模型表示用以描述一致性关系等。但是, 这类强

耦合的模型关系描述不利于模型的重用和模型粒度的动态控制, 并且现有方法忽略了解聚聚合时的信息损失、解聚聚合的调用频率、解聚聚合相关的变量值检测等关键问题。

因此, 多分辨率建模方法在处理模型之间的关系时, 应该满足以下几个要求:

### 1) 聚合解聚

可以用来实现模型之间的相互推演和映射

### 2) 一致性维护

能够检测到不同分辨率模型之间的不一致, 并提供算法消除和维护一致性

### 3) 检测分辨率切换条件

能够实时地检测当前的仿真状态, 并检测模型粒度切换的条件

但是传统的多分辨率建模方法对上述的几个要求并不能都满足, 为此, 基于上述约束, 本文设计一个独立的组件: 分辨率连接桥(Resolution Connecting Bridge), 来对模型之间的关系进行建模, 如图 2 所示。

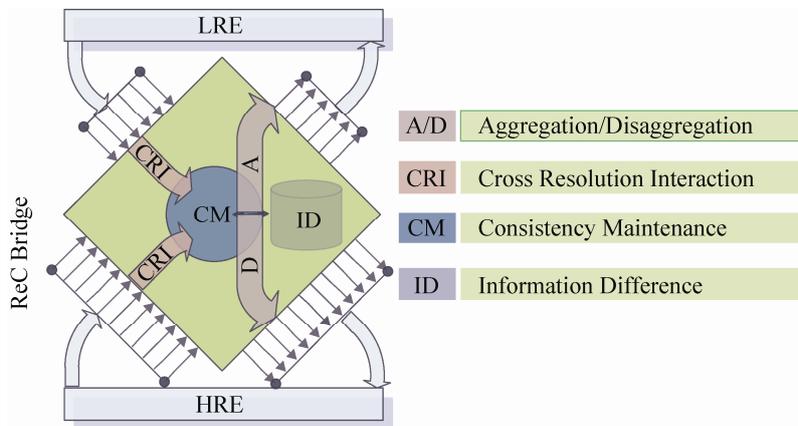


图 2 分辨率连接桥(ReC Bridge)结构

为满足上述 3 个要求, 分辨率连接桥 ReC Bridge 有 4 个关键的功能元素:

1) CRI 感知器: 感知检测分辨率相关属性的更新。当分辨率相关属性更新时, 可能会触发跨分辨率交互事件; CRI 感知器的功能则是检测属性更新, 同时触发跨分辨率交互和分辨率切换。

2) A/D 解聚聚合: A/D 实现分辨率的切换, 同时维护不同分辨率之间的一致性。当分辨率需要切换时, 调用 A/D 可为新的分辨率模型实体的属性赋值; 在并发仿真中, 调用 A/D 维护分辨率模型之间的属性一致性等。

3) CM 一致性维护: CM 是维护不同分辨率模

型实体之间的属性一致性的策略调度中心。CM 会根据预定的策略调用 A/D，维护属性一致性。预定的策略一般包括：一定的频率触发、分辨率切换触发和超过误差阈值触发等。

4) ID 信息差存储：该部分用于存储不同分辨率模型之间的信息差。信息差是指高低分辨率属性之间所包含的信息量的差异，比如编队队形就是高分辨率坦克兵和低分辨率坦克排之间的信息差。

利用上述分辨率连接桥的结构，本文提出了一种可逆的解聚聚合方案，如图 3 所示。

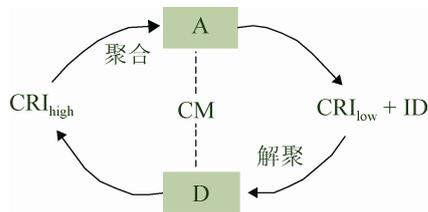


图 3 基于信息差的可逆解聚聚合

如图 3 所示，分辨率连接桥利用 CM 制定解聚聚合策略，调用解聚聚合函数 A/D；在聚合时，调用聚合函数 A，并将低分辨率的信息聚合为高分辨率信息，同时生成信息差 ID；在解聚时，调用聚合函数 D，利用信息差 ID，辅助生成高分辨率信息。信息差 ID 的引入使得系统具有记忆性，

在并行仿真系统的事件回溯等方面具有天然的优势，并且信息差可以用来辅助低分辨率的解聚，生成精确的高分辨率模型，即信息差的引入使得解聚聚合函数是可逆的，这也使得分辨率连接桥拥有解决解聚聚合中信息损失问题的能力。

从分辨率连接桥的 4 个组成元素上可以看出，分辨率连接桥本质是对多分辨率模型之间的关系的全方位建模，实现了模型建模和模型之间的关系建模的解耦，为模型粒度的动态控制提供支撑。

## 2 面向模型粒度控制的多分辨率建模方法

为解决多分辨率建模领域长期忽视的两大问题：分辨率切换和信息损失，以及该领域的 2 个主流问题：一致性维护和跨分辨率交互<sup>[13]</sup>，本文在分辨率状态图和分辨率连接桥技术的基础上，提出了面向模型粒度控制的多分辨率建模方法。

### 2.1 面向模型粒度控制的 4 步多分辨率建模方法

基于分辨率状态转移图和分辨率连接桥，本文提出了如图 4 所示的多分辨率建模方法。

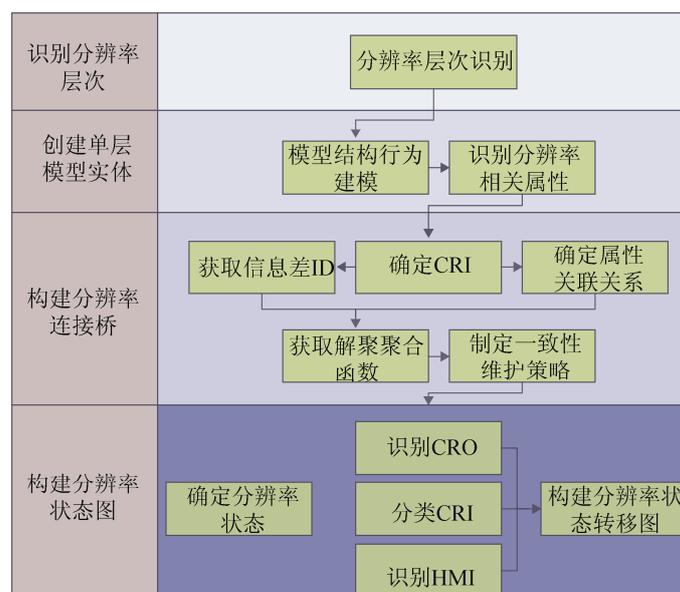


图 4 面向模型粒度控制的多分辨率建模框架

该建模方法主要由 4 个阶段构成:

1) 识别分辨率层次: 利用文献[18]提出的 SES 方法, 构建对象分辨率层次结构。

2) 创建单层模型实体: 利用单层模型相应领域知识, 创建单层实体模型, 同时识别该模型实体中与分辨率相关的属性。

3) 构建分辨率连接桥: 根据模型实体中的分辨率相关属性, 识别不同分辨率模型之间的属性关系与属性信息差; 根据属性关系, 获取分辨率模型之间的解聚聚合函数, 并制定一致性维护策略。

4) 构建分辨率状态图: 根据分辨率层次, 确定分辨率状态; 同时识别 CRO, CRI 和 HMI 三类触发事件, 最终构建分辨率状态图。

## 2.2 4 步建模方法优势

本文提出的建模方法较好的解决了多分辨率建模中的 4 大问题: 分辨率控制、模型一致性、信息损失和跨分辨率交互, 即保证了单层模型的独立性, 又维护了不同分辨率之间的关系, 同时建立了适应环境的分辨率控制机制。

统一的分辨率状态图控制了仿真过程模型的粒度, 可以兼顾仿真速度和仿真精度, 在有限的仿真资源里达到最佳的仿真精度。

独立的分辨率连接器保证了本文的多分辨率建模仿真方法具有易于建模、快速更新和分辨率模型解耦等优点; 其中模型与模型关系建模的解耦是分辨率连接桥的突出优势。

## 3 案例分析

在众多应用背景中, 复杂系统建模问题是多分辨率建模中较为典型的应用, 本文将复杂系统的变阶为例, 展示面向模型粒度控制的多分辨率建模方法, 利用数值仿真结果验证方法的有效性。

### 3.1 案例介绍: 系统变阶

大系统包含的元件众多, 元件间关联复杂,

输入和输出数目也较多。基于以下两个方面的原因, 大系统建模需要建立多分辨率模型: 1) 建立大系统的精确数学模型存在困难, 因此需要建立简化的数学模型, 需要将高维向量空间映射到一个尽可能保留了原系统主要特征的低维子空间, 还需要使设计分析低阶系统的某些或全部方法仍然有效; 2) 大量的状态变量使得高阶复杂系统面临仿真资源需求过大、维数灾难等问题, 但是低阶的模型可以较好的完成仿真任务。因而在仿真中, 多个阶数的模型都有涉及, 模型的详细粒度需要根据实际情况动态的改变。

### 3.2 建模流程

依据本文提出的面向模型粒度控制的多分辨率建模 4 个步骤, 建立系统变阶的多分辨率模型:

#### (1) 识别分辨率层次

系统变阶问题中有两层分辨率: 系统降阶前是高分辨率系统, 变量较多; 降阶之后是低分辨率系统, 变量较少。

#### (2) 创建单层模型实体

单层模型的建立可以重用以前的系统模型, 也可以建立新的模型, 本例中, 两层模型都是新建立的模型。

考虑一个三维的多输入多输出线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + D \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $A = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.2 & 0.01 \\ 0.01 & -0.2 & 0.01 \\ 0.001 & 0.002 & -0.5 \end{bmatrix}$ , 此三阶系统为高分辨率系统。

忽略结构矩阵的最小奇异值, 我们得到低分辨率的降阶系统:

$$R_1: \begin{cases} \dot{x}_1 = Ax_1 + Bu_1 \\ y_1 = Cx_1 + D \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $A = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.2 \\ 0.01 & -0.2 \end{bmatrix}$ 。

#### (3) 构建分辨率连接桥

CRI 感知器可以获取到低分辨率模型的变量  $x_1, x_2, y_1, y_2$ ，高分辨率模型的变量  $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ 。信息差是  $x_3, A_{11}, A_{12}, A_{22}$ 。解聚聚合函数为：

$$A \equiv \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, x \equiv \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$u \equiv \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, y \equiv \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

(4) 构建分辨率状态转移图

系统变阶问题中，分辨率层次有 2 个，故状态共有 4 个；根据分辨率状态图的建模流程建立如图 5 的系统变阶分辨率状态图。

3.3 数值结果

利用 Matlab 仿真软件，本文仿真了 3 种分辨率模式：仅有高分辨率、仅有低分辨率和混合分辨率，系统分辨率状态转移图如图 5 所示，仿真结果如图 6 所示。该数值结果显示混合分辨率模式精度高于低分辨率模型的精度且低于高分辨率模型的精度，同时其资源的消耗也是低于高分辨率

模型的资源消耗。由此，验证了多分辨率连接桥的 4 个作用，同时也验证了多分辨率模型的可行性。

需要指出的是，在混合分辨率仿真模式中，其分辨率的切换轨迹如图 7 所示。该图验证了分辨率状态转移图统一控制的可行性。

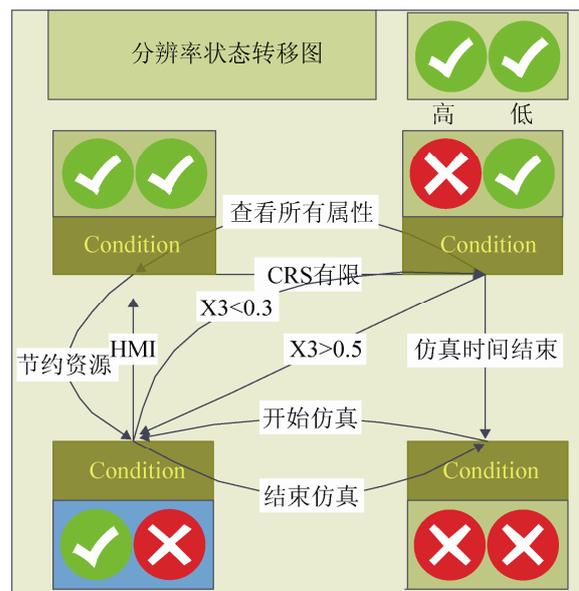
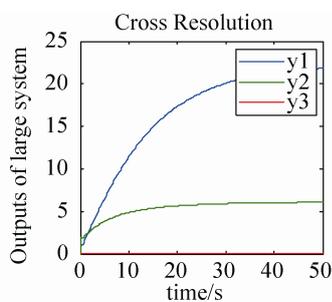
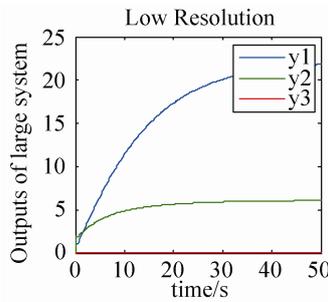


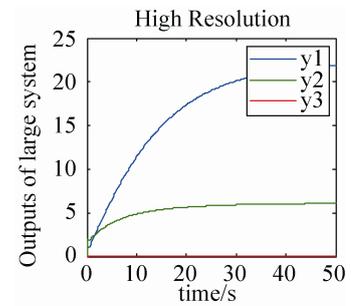
图 5 变阶系统分辨率状态转移图



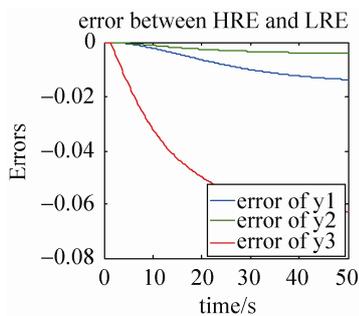
(a) 混合分辨率模式系统输出



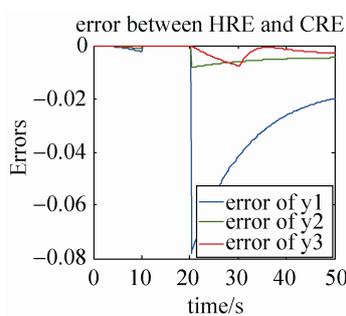
(b) 低分辨率模式系统输出



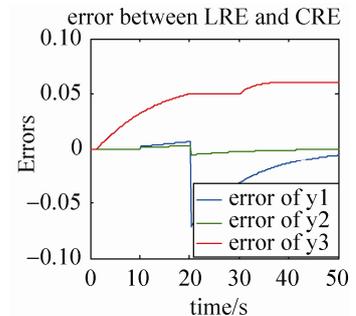
(c) 高分辨率模式系统输出



(d) 混合分辨率模式误差对比



(e) 低分辨率模式误差对比



(f) 高分辨率模式误差对比

图 6 3 种分辨率模式的仿真结果对比

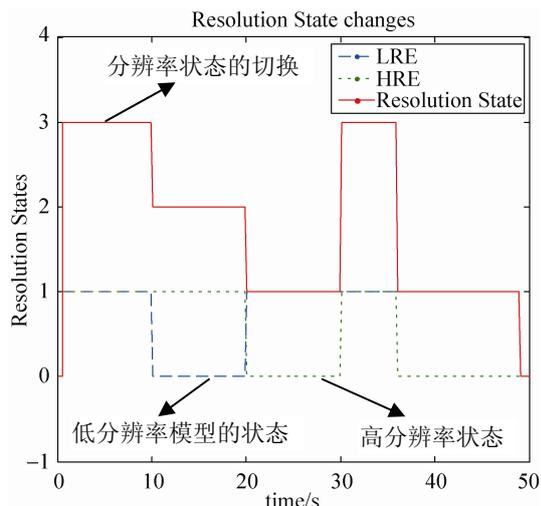


图 7 分辨率切换轨迹

## 4 结论

本文针对多分辨率建模的 4 个问题: 分辨率切换、信息损失、一致性维护和跨分辨率交互, 提出了基于分辨率状态转移图和分辨率连接桥的多分辨率建模方法。分辨率连接桥描述多分辨率模型之间的关系, 与单层的模型实体的建模解耦, 便于模型粒度的动态控制; 分辨率状态转移图集中统一地控制了对对象的分辨率状态, 使得系统在仿真中可以根据模型交互、仿真资源和人机交互等条件, 自适应地选择最优的分辨率进行仿真, 从而达到对模型粒度最优动态控制。本文以系统变阶作为例子, 验证了本文的多分辨率建模方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] Werther J, Heinrich S, Dosta M, *et al.* The ultimate goal of modeling-simulation of system and plant performance [J]. *Particology* (S1674-2001), 2011, 9(4): 320-329.
- [2] Moreira F A, Mart J R, Zanetta Jr L C, *et al.* Multirate simulations with simultaneous-solution using direct integration methods in a partitioned network environment [J]. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on* (S1549-8328), 2006, 53(12): 2765-2778.
- [3] Petty M D, Franceschini R W, Panagos J. *Engineering Principles of Combat Modeling and Distributed Simulation* [M]. Hoboken, USA: Wiley, 2012.
- [4] Zhang L, Ma J. A Study on Multi-Resolution Modeling of Mesoscopic-Microscopic Traffic Simulation Model [C]// *CICTP 2012@ sMultimodal Transportation Systems-Convenient, Safe, Cost-Effective, Efficient*. ASCE, 2012: 695-706.
- [5] Dada J O, Mendes P. Multi-scale modelling and simulation in systems biology [J]. *Integrative Biology* (S1536-2310), 2011, 3(2): 86-96.
- [6] Wirth B D, Odette G R, Marian J, *et al.* Multiscale modeling of radiation damage in Fe-based alloys in the fusion environment [J]. *Journal of Nuclear Materials* (S0022-3115), 2004, 329-333(A): 103-111.
- [7] Horstemeyer M F. *Multiscale modeling: a review* [M]// *Practical aspects of computational chemistry*. Germany: Springer, 2010: 87-135.
- [8] Davis P K. An introduction to variable-resolution modeling [J]. *Naval Research Logistics (NRL)* (S0894-069X), 1995, 42(2): 151-181.
- [9] Rao D M, Wilsey P. Multi-resolution network simulations using dynamic component substitution [C]// *Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, 2001. *Proceedings. Ninth International Symposium on*. USA: IEEE, 2001: 142-149.
- [10] Faulds A, McGraw R M. Using MRMAide to create wrappers for mixed resolution modeling [C]// *AeroSense 2003*. *International Society for Optics and Photonics*, 2003: 321-328.
- [11] Powell D R. *Control of entity interactions in a hierarchical variable resolution simulation* [R]. USA: Los Alamos National Lab., NM (United States), 1997.
- [12] Davis P K, Bigelow J H. *Experiments in MRM* [R]// *RAND MR-100-DARPA*, 1998. USA: RAND, 1998.
- [13] Natrajan A. *Consistency maintenance in concurrent representations* [D]. USA: University of Virginia, 2000.
- [14] Drewry D T, Reynolds Jr P F, Emanuel W R. *Optimization as a tool for consistency maintenance in multi-resolution simulation* [R]. USA: Virginia Univ. Charlottesville Dept. of Computer Science, 2006.
- [15] 刘宝宏. 多分辨率建模的理论及关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [16] 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.
- [17] Brooks R J, Tobias A M. Choosing the best model: Level of detail, complexity, and model performance [J]. *Mathematical and computer modelling* (S0895-7177), 1996, 24(4): 1-14.
- [18] Kim T G, Lee C, Christensen E R, *et al.* System entity structuring and model base management [J]. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* (S1083-4427), 1990, 20(5): 1013-1024.
- [19] Caughlin D, Sisti A F. A Summary of Model Abstraction Techniques. *Enabling Technology for Simulation Science (II)* [C]// *Proceeding of SPIE AoroSense*, 1998. USA: SPIE, 1998.