

## 面向应急管理计算实验的模型构建和模型管理\*

张鹏, 陈彬, 孟荣清, 张烙兵, 邱晓刚  
(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**基于人工社会的计算实验使应急管理的定量分析与研究成为可能。然而,应急管理模型涉及多个学科与领域,具有多层次、非线性和多粒度等特点,需要一套规范的流程来指导人工社会的模型建立和模型管理。论文梳理了面向应急管理的模型体系,提出了基于领域特定建模的人工社会建模方法,解决了多领域建模问题;研究了模型的形式化描述与编码问题,并实现了模型的有效管理;结合“甲型H1N1”病程模型,详细论述了模型的构建方法与管理问题,为面向应急管理的计算实验提供一体化的模型服务。

**关键词:**人工社会建模;模型管理;应急管理

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)03-173-06

## Model development and management in the computational experiment oriented to emergency management

ZHANG Peng, CHEN Bin, MENG Rongqing, ZHANG Laobing, QIU Xiaogang

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Computational experiments based on artificial society make it possible to study and quantitatively analyze the emergency management process. However, emergency management refers to multi-disciplines and multi-domain, and models have the characteristics of multi-hierarchy, nonlinearity and multi-granularity, so a standard workflow is needed to guide the modeling development and management of artificial society. The model architecture of emergency management was carded, and the artificial society modeling method based on domain specific modeling was introduced to solve the multi-domain modeling problems. Moreover, the formal description methods as well as model encoding were implemented, which promoted the effective management of models. The development methods and management problems were discussed in details in the case study of H1N1 models, which provided the integrative model services for computational experiments oriented to emergency management.

**Key words:** artificial society modeling; model management; emergency management

非常规突发事件应急管理的研究已经成为现代社会关注的一个重点,合理利用应急管理的研究成果能够保证大量人员安全,避免巨大的经济损失<sup>[1]</sup>。为此,国家自然科学基金委员会于2009年启动了“非常规突发事件应急管理研究”。范维澄院士的公共安全三角形理论<sup>[2]</sup>指出突发事件、承灾体和应急管理是公共安全研究的主要内容。根据王飞跃教授的ACP方法<sup>[3]</sup>,可以建立一个虚拟的人工社会并进行计算实验,研究非常规突发事件的应急管理问题。

结合公共安全三角形理论和ACP方法,国防科技大学邱晓刚课题组承担了“基于平行应急管理的非常规突发事件动态模拟与计算实验集成升华平台”的研究。平台建设需要解决三大关键技术问题:人工社会人口地理基础数据的生成、多领

域应急管理模型的开发与管理、千万级人口的大规模并行仿真。

本文旨在解决面向应急管理的多领域模型构建与模型管理问题。针对多领域模型的构建问题,提出了基于领域特定建模(Domain Specific Modeling, DSM)的人工社会建模方法,并研究了模型的代码生成技术。针对多领域模型的管理问题,通过模型形式化描述和模型编码实现了模型的高效管理和部署。

### 1 应急管理模型的构建与管理问题

#### 1.1 面向应急管理的模型体系

面向应急管理的计算实验以人工社会为基础,通过加载突发事件和干预措施来实现对突发

\* 收稿日期:2014-10-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91024030,61403402,71303252,71373282)

作者简介:张鹏(1987—),男,重庆南川人,博士研究生,E-mail:zhangpeng\_yes@163.com;

邱晓刚(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:13874934509@139.com

事件的应急管理。根据公共安全三角形理论,模型体系主要包含人工社会基础模型、突发事件模型和干预措施模型。如图 1 所示,承灾体也是人工社会的重要组成部分,而突发事件和应急管理构成了“情景—应对”的核心环节。

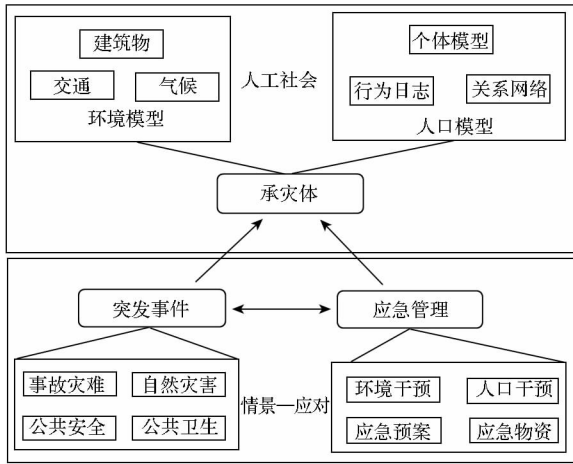


图 1 公共安全三角形理论与人工社会

Fig. 1 Public security triangular theory and artificial society

人工社会由一系列基础模型组成,主要包含人口模型和环境模型<sup>[4]</sup>。人口是人工社会的基本元素,人口模型主要包含个体模型、关系网络模型和行为日志模型。环境提供了人口活动所需的基本条件,比如位置、空间和天气等。环境模型包含建筑实体、气候、交通等。

应急管理模型能够破坏人工社会的内在平衡,它主要分为突发事件模型和干预模型。突发事件模型能够影响系统的正常运行状态,使人工社会呈现病态特征。干预模型能够修正该状态并确保人工社会的健康、有序运行。

### 1.2 面向应急管理的人工社会建模问题

非常规突发事件的作用机理模式多变、涉及面广,因此面向应急管理的人工社会建模面临以下困难和挑战<sup>[5]</sup>:

(1) 多学科多领域建模问题。人工社会模型体系涉及自然、人口和社会系统,包含个体心理、行为等许多方面。由于层次多、节点多、关系复杂,难以用单一的形式化方法去描述,需要研究协调一致的多学科、多领域建模方法。

(2) 多层次异质模型综合集成问题。非常规突发事件复杂多变,具有多层次、非线性、变尺度特征。因此,需要研究多层次、异质模型的集成方法,支持面向应急管理的计算实验。

### 1.3 面向应急管理计算实验的模型管理问题

面向应急管理的计算实验涉及的模型种类众

多、层次复杂,模型管理需要解决以下问题:

(1) 多领域、多层次模型的形式化描述问题。模型描述是进行模型检索、模型维护以及模型管理的基础,如何实现应急管理模型的规范描述对于模型管理相当重要。

(2) 多批次、多样本计算实验的模型管理与部署问题。面向应急管理的计算实验涉及的模型种类多、数量大,模型的高效管理与部署直接影响计算实验的性能和效率。

## 2 基于 DSM 的人工社会建模方法

DSM 是领域特定软件工程的核心,它包含两方面内容<sup>[6]</sup>:一是基于领域特定建模语言(Domain Specific Modeling Language, DSML)对领域问题进行建模,采用领域特定概念体系来提高建模抽象层次;二是在领域特定模型的基础上生成解决方案,提高系统产品的开发效率。利用元建模方法来构建面向应急管理的 DSML,为人工社会的构建提供建模支持。然后,基于 DSML 建立领域模型,通过代码生成技术获得可执行程序,支持面向应急管理的计算实验。

### 2.1 人工社会元模型的设计

元模型用比较精确的语义来表达领域知识,加速了领域知识的积累<sup>[7]</sup>。元模型是 DSML 的载体,基于 DSM 的人工社会建模关键在于元模型的设计。下面以甲型 H1N1 公共卫生事件应急管理的元模型构建为例进行说明。

#### 2.1.1 人工社会建模元素分析

人工社会基本建模元素主要有:个体 (Agent)、事件 (Event)、组织 (Group)、环境 (Environment)、交互 (Interaction)。这些建模元素能够刻画人工社会的基本特征和运行规律,比如人口、环境、资源以及相应的行动序列,它们的相互关系如下所示:

Agent 能够动态加入不同的 Group,并且扮演不同的社会角色;每个 Group 具有自己的结构和特点,并且能够约束 Agent 的行为和角色;Environment 为 Agent 活动提供所需的地理服务、交通服务、天气服务等;Event 由一系列子事件组成,实体之间的 Interaction 由一系列的动作组成,它们能够演化出人工社会的多样性和复杂性。

#### 2.1.2 元模型设计

本文将利用通用建模环境 (General Modeling Environment, GME) 工具来设计元模型。GME 具有以下优点<sup>[8]</sup>:①提供了完整的元建模能力,包括抽象语法和具体语法;②提供了“所见即所得”

的元模型编辑器;③具有规则和语义描述机制,具有模型检查和模型转换的能力。

如图2所示,面向公共卫生事件应急管理的元模型主要包含人口元模型、环境元模型和应急管理元模型。其中,应急管理元模型中的疾病病程元模型刻画了一般传染病的主要特征以及演化规律。如图3所示,病程元模型主要包含:疾病的病程状态、病程持续时间以及病程状态间的切换条件。

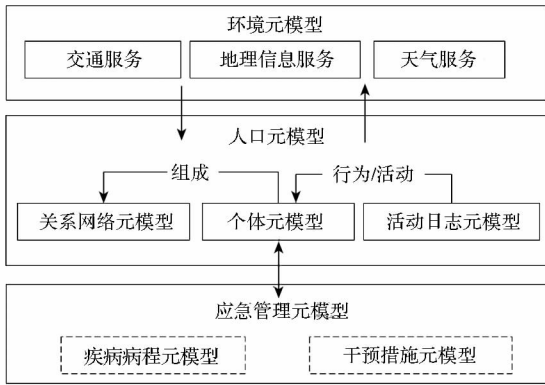


图2 公共卫生事件应急管理的元模型体系

Fig.2 Meta-models of public health emergency management

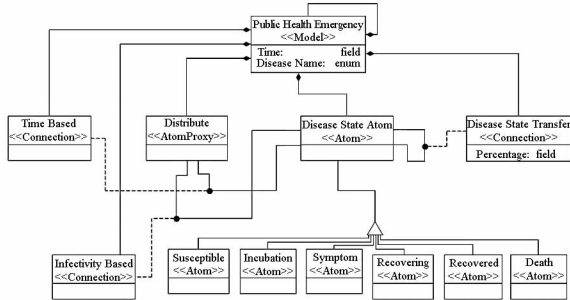


图3 传染病的病程元模型

Fig.3 Meta-models of infectious disease course

其中,病程状态(disease state atom)包含易感期、潜伏期、凸显期、康复期、康复状态、死亡六个状态;病程周期持续时间的分布参数(distribute)包含泊松分布、指数分布、威布尔分布等;病程的切换条件(disease state transfer)可以根据时间(time based)或感染状态(infectivity based)确定。利用这些建模元素可以构造出各种传染病模型,比如SIR模型、SEIR模型。

同理,根据该方法可以设计人口元模型、环境元模型、活动日志元模型以及干预措施元模型等。基于这些元模型,可以构建人工社会的建模语言,支持面向应急管理的建模活动。

## 2.2 应急管理模型的构建

### 2.2.1 模型建立

基于传染病的病程元模型,可以构建甲型H1N1的SEIR模型。如图4所示,它包含易感期(susceptible)、潜伏期(incubation)、症状凸显期(symptomatic)和康复期(recovering)四个阶段。

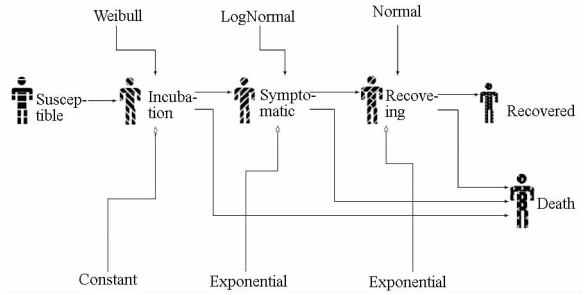


图4 甲型H1N1的SEIR模型

Fig.4 SEIR models of H1N1 influenza

根据文献[9],甲型H1N1的潜伏期持续时间服从形状参数1.8、尺度参数1.21的威布尔分布,这个阶段患者没有症状;凸显期持续时间服从平均数1.9、方差0.31的对数正态分布;康复期持续时间是染病时间的指数函数,采用指数分布描述。填充相应模型参数,就得到甲型H1N1的疾病模型,它包含疾病病程以及各个阶段的持续时间和传染率。

同理,可以建立相应的领域模型,比如人口、环境以及干预措施等。这些模型能够共同刻画人工社会的情景和应急管理过程。

### 2.2.2 代码生成

面向应急管理的计算实验主要涉及三类人员:①领域专家,利用背景知识来描述领域问题,建立领域概念之间的联系而不关心模型的具体实现过程<sup>[10]</sup>;②建模人员,把概念模型变成形式化模型,研究模型的静态特性和内部作用机制;③仿真人员,将形式化模型变为可执行代码,分析模型的运行特性,研究人工社会的运行特征。因此,建模人员利用元模型构建的领域模型不能直接支持仿真执行,还需要仿真人员通过代码生成来获得问题的解决方案。如图5所示,领域模型通过代码生成转换为可执行程序,它们能够在并行仿真引擎上运行,支持面向应急管理的计算实验。

GME为用户提供了BON代码生成框架,该框架基于COM组件开发,集成于GME主界面。BON提供了一系列的获取元模型语法元素的功能函数,表1列出了其中部分功能函数的作用。

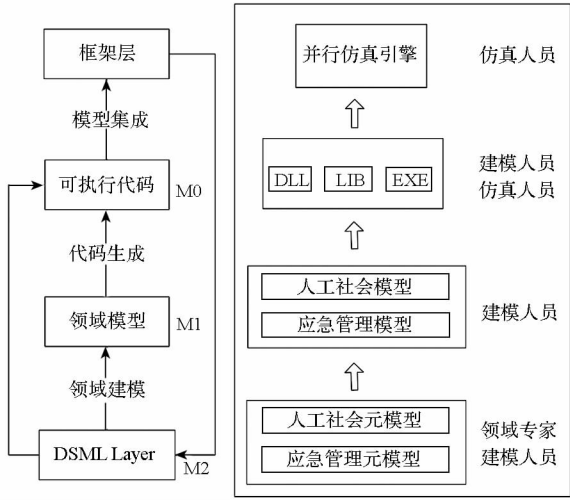


图 5 代码生成框架

Fig. 5 The framework of code generation

表 1 BON 框架中的主要函数

Tab. 1 The main function of BON framework

函数名称	作用
Component::invokeEx	BON 的入口函数
Project::getRootFolder	获取当前页面文件
getChildModels	获取当前模型集合
getChildAtoms	获取原子模型集合
getChileConnections	获取模型间连接关系

采用模板映射的方式进行代码生成,通过在 BON 框架下加入模板映射规则,就可以生成用户所需的目标代码。映射规则根据不同元模型的特点来设计,并尽量提取共同模式,增强代码生成的通用性。其中,甲型 H1N1 模型生成的代码包含了各个病程的持续时间、传染概率和病程切换条件。生成的代码加入引擎调度信息后可以支持仿真执行,并用来研究甲型 H1N1 的疫情扩散和防控措施。

### 2.3 方法合理性与科学性分析

基于 DSM 的人工社会构建方法的合理性和科学性体现在以下几方面:①应急管理人员参与了元模型的设计,使人工社会建模语言符合领域确切的建模需求;②适当的抽象层次掩盖了系统中与领域无关的而与计算耦合很紧的具体细节,让领域人员把精力放在更重要的模型方面;③支持模型到代码的自动生成,降低了开发者的建模门槛,能够方便快速建立起问题的解决方案。

当然,该方法还有以下几方面需要加强和完善。第一,人工社会元模型体系需要不断完善。目前,元模型描述能力还相当有限,因此必须确

保元模型具备丰富的语义信息,能够满足不断增长的领域建模需求。第二,代码自动生成功能需要加强。目前,生成的代码还需要手工加入一些引擎调度的信息。在以后的工作,代码生成框架将把这两部分融合起来,使生成的代码能够直接支持仿真执行。

## 3 人工社会的模型描述与管理

在面向应急管理的计算实验中,建立的领域模型需要进行规范描述和有效管理,才能更好地支持仿真执行。下面仍以甲型 H1N1 病程模型为例,论述模型描述和管理方法。

### 3.1 模型描述

模型描述是模型管理的基础,模型描述主要分为两个部分:一是模型的功能信息描述,二是模型的配置信息描述。功能信息描述主要用来刻画模型的功能、接口和规范。配置信息描述主要描述模型所支持的人工社会情景以及与之匹配的驱动数据等。

应急管理计算实验是以人工社会初始情景为基础的,因此模型描述信息除了其模型基本功能外,还包含所支持的人工社会情景等配置信息。比如,疾病模型的功能描述包含病程状态、持续周期和切换条件等;配置信息描述包含了模型所支持的情景类型、与之匹配的人口地理数据以及运行环境要求。

#### 3.1.1 模型功能信息描述

模型功能信息一般采用形式化方法来描述。其中,常见的形式化方法包含:Petri 网、事件图、DEVS、UML 和 FSM 等。下面以甲型 H1N1 疫情为例,利用 FSM 来形式化描述疾病的病程模型<sup>[11]</sup>。

表 2 病程模型形式化描述

Tab. 2 Formal description of disease course model

甲型 H1N1 疾病的病程模型 FSM 描述	
疾病状态	{易感、潜伏、感染、康复}
关键事件	{接触感染者、症状凸显、科学治疗}
状态迁移	<易感、潜伏::接触感染者> <潜伏、感染::症状凸显> <感染、康复::科学治疗> <康复、易感::社交活动>
初始状态	{易感、潜伏}
结束状态	{康复}

如上所述,甲型 H1N1 的 SEIR 模型具有四个

状态:易感状态、潜伏状态、感染状态和康复状态。它们之间的状态迁移可以用 FSM 来描述,如表 2 所示。因为,FSM 中存在可数的状态,事件发生时系统从一个状态转换成另一个状态,从而构造出系统的状态迁移图。

最后,可以把有限状态机描述的疾病病程模型以文档形式进行保存。模型描述文档的内容包含:疾病的病程状态、转换条件以及每个阶段的持续时间等信息。

### 3.1.2 模型配置信息描述

模型的配置信息主要描述模型的配置使用情况,它界定了模型所需要的驱动数据、运行环境和适用范围等。如表 3 所示,疾病模型的配置信息包含模型所支持的人工社会初始情景、所需的人口地理初始化数据以及模型的运行环境要求等情况。

表 3 疾病模型配置信息描述

Tab.3 Configuration information description of disease course model

功能项	甲型 H1N1 的疾病模型
适用范围	北京 H1N1 公共卫生事件情景
运行环境	Parallel Engine
驱动数据	北京市人口地理统计数据
模型参数	甲型 H1N1 病程参数
开发人员	张三
开发时间	2014 - 01 - 01

## 3.2 模型的管理

### 3.2.1 模型的编码

模型编码是按照一定规则对模型的唯一标

识,是实现模型管理的基础。编码规则一般根据应用领域和模型类别来确定,人工社会模型必须按照编码规则进行统一编码。

如图 6 所示,采用 8 位阿拉伯数字对人工社会模型进行编码,每两位表示 1 个字段,一共 4 个字段。每个字段代表模型在编码体系中所处的层次,第一个字段表示模型的类别,第二字段表示模型的领域,第三字段表示模型具体的实体类别,第四字段表示模型的实体编号。例如,公共卫生事件应急管理中的隔离措施模型表示为 03010204。其中,“030102”表示“应急措施模型”下面的“公共卫生措施”模型中的“非药物干扰”模型;“04”表示非药物干扰模型中自定义的隔离措施模型。

### 3.2.2 模型的管理

在面向应急管理的计算实验中,模型的动态管理主要包含以下方面:

(1) 版本管理。建模是一个不断深入的过程,会形成不同的仿真模型版本,需要对模型版本信息进行管理。

(2) 权限管理。主要对不同角色人员的模型操作权限进行限制,确保模型的安全性和可维护性。

(3) 配置管理。根据模型配置信息,能够有效组织模型及其运行所需的其他资源,完成仿真部署。

在进行计算实验时,根据“模型编码”对模型进行标识和检索,利用“模型功能描述”进行模型的组合与装配,并根据“模型配置信息”实现模型的部署和应用。



图 6 面向应急管理的人工社会模型编码

Fig.6 Model encoding of artificial society models oriented to emergency management

## 4 结论

论文提出了基于 DSM 的人工社会建模方法, 设计了面向应急管理的元模型, 研究了代码生成技术, 并讨论了模型的描述、编码和管理问题。论文具有一定的创新性和实用价值, 但是还有几方面的工作需要加强: 一是不断完善 DSML 的设计, 更好地为人工社会建模提供支持; 二是完善代码生成框架, 提高代码生成的有效性; 三是进一步加强模型的规范描述和高效管理, 为计算实验提供更好的模型服务。

## 参考文献 (References)

- [1] 钟永光, 毛中根, 翁文国, 等. 非常规突发事件应急管理研究进展 [J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32 (5): 911 - 918.  
ZHONG Yongguang, MAO Zhonggen, WENG Wenguo, et al. Process of study on unconventional emergencies management [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012, 32 (5): 911 - 918. (in Chinese)
- [2] 范维澄, 刘奕, 翁文国. 公共安全科技的“三角形”框架与“4 + 1”方法学 [J]. 科技导报, 2009 (6): 3.  
FAN Weicheng, LIU Yi, WENG Wenguo. Triangular framework and “4 + 1” methodology for public security science and technology [J]. Science & Technology Review, 2009 (6): 3. (in Chinese)
- [3] Wang F. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social economic systems [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1 (4): 25 - 35.
- [4] 葛渊峥. 基于 AGENT 的人工社会框架设计与生成方法 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.  
GE Yuanzheng. An AGENT-based framework and generation of an artificial society [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [5] 陈彬, 邱晓刚, 郭刚. 多范式人工社会建模与多智能体仿真平台框架 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23 (8): 1702 - 1707.  
CHEN Bin, QIU Xiaogang, GUO Gang. Multi-paradigm artificial society modeling and multi-agent simulation platform framework [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23 (8): 1702 - 1707. (in Chinese)
- [6] 李晓波. 基于 DSM 的效能仿真多范式组合建模方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.  
LI Xiaobo. A DSM-based multi-paradigm composable modeling method for effectiveness simulation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [7] 刘辉, 麻志毅, 邵维忠. 元建模技术研究进展 [J]. 软件学报, 2008, 19 (6): 1317 - 1327.  
LIU Hui, MA Zhiyi, SHAO Weizhong. Process of research on meta-modeling [J]. Journal of software, 2008, 19 (6): 1317 - 1327. (in Chinese)
- [8] Hoyos J R, García - Molina J, Botía J A. A domain-specific language for context modeling in context-aware systems [J]. Journal of Systems and Software, 2013, 86 (11): 2890 - 2905.
- [9] Brouwers L, Cakici B, Camitz M, et al. Economic consequences to society of pandemic H1N1 influenza 2009—preliminary results for Sweden [J]. Euro Surveill, 2009, 14 (37): 1 - 7.
- [10] 谢文才, 罗雪山, 罗爱民. 基于元模型的军事信息系统体系结构建模方法 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34 (1): 82 - 87.  
XIE Wencai, LUO Xueshan, LUO Aimin. Meta-model based modeling of military information system architecture [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34 (1): 82 - 87. (in Chinese)
- [11] 段伟. 基于异质随机 Agent 模型 的疾病传播建模与计算实验 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.  
DUAN Wei. Heterogeneous and stochastic agent based models and computational experiments for the spread of infectious disease [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)