

基于泛关系模型表示的层次化模型管理框架

邢英*, 张宏军, 张睿, 何健

(解放军理工大学 指挥信息系统学院, 南京 210007)

(*通信作者电子邮箱 dawei19831984@163.com)

摘要:针对常见模型表示方法缺少对多阶段建模过程支持,造成不同建模阶段模型难以统一管理、共享和重用的问题,提出基于泛关系模型表示的层次化模型管理框架。分析现有模型表示方法特点和多阶段建模过程中模型表示及管理需求,采用泛关系模型表示建立概念模型和数学模型表示方法之间映射关系,建立一体化模型表示方法和层次化模型管理框架;研究层次化模型管理框架中概念层模型和泛关系层模型的模型库设计逻辑,并基于泛关系理论,研究了物理层模型的动态生成方法,实现了不同建模阶段模型的一体化表示和统一管理。

关键词:模型表示;泛关系;模型库;模型管理;模型重用

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Hierarchical model management framework based on universal relation model representation

XING Ying*, ZHANG Hongjun, ZHANG Rui, HE Jian

(College of Command Information Systems, PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: The existing model representation cannot meet the requirements of multistage modeling, so model share, reuse and management can hardly achieve in multistage modeling process. Therefore, a hierarchical model management framework based on universal relation model presentation was presented. Firstly, the requirements of model representation in model management and the limitations of exiting model representation were analyzed, then a model representation based on universal relation was investigated to set the mapping relation between layers of conceptual model and mathematical model, and the integrative model representation and the hierarchical model management framework including conceptual model, mathematical model and physical model were set up. At last, the logic of modelbase in management framework was designed and the physical model generation based on universal relation was investigated. The model of different modeling process could be managed uniformly based on an integrative model representation.

Key words: model representation; universal relation; modelbase; model management; model reuse

0 引言

模型作为一种知识必须进行高效的组织和管理,便于不同的用户使用。模型表示是模型库构建和模型管理的基础,模型表示决定了用户建模过程中建模的方式、模型的存储表达方式和模型库的逻辑结构,是用户基于模型库进行模型操纵的基础,决定了模型构建和模型操纵的全过程^[1],涉及到模型知识的表达,包括模型参数的定义、模型结构的定义、模型文档、模型目的、边界、假设以及与其他模型的关系和数据等^[2]。但是在实际建模过程中,由于建模领域、内容、目的、范围及建模阶段的差别,出现了不同的模型表示方法和相应的模型管理方法。这些模型表示方法在其各自应用范围内有其自身的优点,多针对某一建模阶段模型的表示,多阶段建模过程中基于不同模型表示方法的模型管理、共享和重用难以实现。

从多阶段建模过程一体化模型表示的角度,分析不同建模阶段模型表示方法,研究不同建模阶段模型表示方法之间映射关系,建立一体化表示方法和统一模型管理框架是模型

高效组织和管理的关键。

1 模型表示需求及常见模型表示方法

模型管理除了实现对模型创建、存储、检索、运行和维护这些基本的功能外,还必须支持模型操纵和知识处理,要求模型表示方法必须满足以下需求:

- 1) 支持模型、方法、数据独立管理,用户在修改模型时不需去考虑数据库的结构、内容以及求解模型的方法,提高模型、方法、数据管理的灵活性。
- 2) 模型在具有独立性的同时还应具有相关性,便于通过模型组合自动生成求解用户求解问题的模型序列。
- 3) 模型表示方法能够表示模型多层次组合所需的信息。模型的组合和重用层次包括语法层次、语义层次、语用层次和概念层次等^[3-6]。

随着网络技术、分布式计算、模型驱动体系结构(Model Driven Architecture, MDA)等相关技术的发展,模型的应用范围更加广泛,方式更加多样,产生了新需求:

收稿日期:2012-09-25;修回日期:2012-11-21。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(70971137)。

作者简介:邢英(1982-),男,江苏徐州人,博士研究生,主要研究方向:军事建模、作战模拟;张宏军(1963-),男,江苏泰州人,教授,博士生导师,主要研究方向:军事建模、仿真工程;张睿(1977-),男,山东文登人,副教授,博士,主要研究方向:军事建模、仿真工程;何建(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向:军事建模、作战训练仿真。

4)平台无关性,模型表示内容、机制和采用的建模语言必须独立于具体硬件、操作系统和具体编程语言,便于模型不同平台的移植和重用。

5)在运行环境支撑下模型之间基于业务逻辑的组合;与运行环境支持服务模型的之间的组合。

6)多阶段建模过程中不同抽象层次和范围的模型表示支持,支持不同阶段建模过程的无缝链接,实现不同建模阶段模型资源重用。

本文对当前常见的模型表示方法从以上几个方面进行对比研究。常见模型表示方法从模型对象实体关系、数据化、结构化建模、知识表示等不同视角和方式对模型进行表示,具有不同的表示能力。如表 1 所示,本文从模型表示是否支持模

型/数据/方法之间独立性表示、模型之间独立性和相关性、模型表示层次、模型表示平台无关性和可移植性、可组合性及模型表示对多阶段建模过程支持七个方面进行分析可知:常见模型表示方法的模型表示能力能够解决模型某一方面的模型表示问题,但是仍难以满足当前模型管理的表示需求。面向对象表示方法相对其他表示方法有较好的表示能力,可以通过模型类和方法类实现模型与方法的独立管理和匹配^[7],但是模型与数据匹配困难;面向对象能很好表示模型语法接口信息,但是模型语义、语用及概念知识仍需借助其他知识表示方法描述;常见的模型表示方法缺少面向多阶段建模过程表示能力,多阶段建模过程中采用模型表示方法相对独立,导致不同建模阶段模型统一管理、共享和重用困难。

表 1 常见模型表示方法表示能力分析

表示方法	模型/数据/方法	独立性/相关性	表示层次	平台无关性	可移植性	可组合性	多阶段建模
子程序	无	高/低	语法	无	差	差	无
实体关系 ^[8]	无	低/高	语法	无	差	差	无
宏命令 ^[9]	无	高/低	无	无	无	无	无
谓词逻辑 ^[10-11]	无	低/高	语义	无	差	差	无
语义网络 ^[12]	无	高/低	语义	无	差	差	无
模型抽象	支持	低/高	语义	无	差	一般	无
结构化 ^[13-14]	无	低/高	语法	无	差	差	无
数据表示 ^[15]	无	低/高	语法	无	差	差	无
面向对象 ^[16-18]	有限支持	高/高	语法	有限支持	有限支持	有限支持	无

2 多阶段建模过程中一体化模型表示

2.1 多阶段建模过程中模型表示问题

如图 1 所示,以军事仿真模型为例,模型构建是由不同建模人员参与的多阶段过程,体现了建模人员对建模对象抽象层次和范围。面向对象模型表示方法接近建模人员的思维方式,抽象层次较低,友好性较好,便于具有不同领域知识的建模人员之间的交流。以面向对象思想为核心的通用建模语言提供对一般系统的结构、行为和功能进行建模的建模元素,支持建模人员以实现无关的方式定义系统规范、建立系统模型,对各种程序设计语言进行了平台无关抽象,合理地分离了建模过程中的抽象层次,给出了领域专家和系统分析人员概念建模的图形化语言和模型元素之间定性的描述,常作为概念建模阶段的模型表示方法。

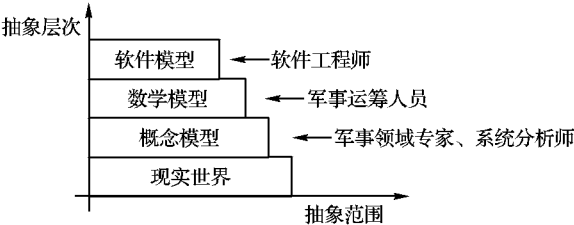


图 1 军事仿真模型多阶段建模过程

对于模型中变量转换、约束条件等定量描述属于数学建模阶段。数学模型多以模型文档或者算法包、可执行文件、动态链接库等软件模型形式表示,这种定量描述的数学模型知识没有完全从代码层次独立出来,数学模型的表示和存储具有较强的平台相关性,不利于数学模型重用和移植。为了在计算机及网络上交流数学表达式,出现了多种数学标记语言,比如 OpenMath^[19]、MathML^[20]等,为数学模型平台无关性表示、存储和管理奠定了基础。但是这些数学标记语言只是对

数学表达式的显示及结构语义信息进行描述,再结合自然语言建立模型文档而非真正意义上形式化的数学建模语言。

软件模型是对概念模型和数学模型中定性及定量描述的计算机实现,是一种以软件方式存在的模型。基于 MDA 的思想,在概念建模阶段和数学建模阶段建立完善的平台无关模型(Platform Independent Model, PIM),通过模型变换和代码映射可以实现不同平台的平台相关模型(Platform Specific Model, PSM)和软件模型。本文主要研究建立概念模型和数学模型一体化模型表示方法和管理方法,模型变换和代码生成成本文暂不涉及。

通常采用不同的模型表示方法支撑不同建模阶段模型表示,没有考虑不同建模阶段建模活动的内在联系,造成不同建模阶段模型表示方法相对独立,不同建模阶段模型资源难以共享和重用,导致多阶段建模过程难以无缝链接,多阶段建模过程中模型一体化管理难以实现;模型表示层次信息隐含在多阶段建模过程中,导致不同层次模型重用和组合难以判定。如何实现不同建模阶段模型表示方法的无缝链接,构建一体化的模型表示方法,是实现不同建模阶段模型的统一管理、共享和重用的关键,也一直是模型构建标准化、规范化的重要研究内容。

2.2 基于泛关系的模型表示方法

2.2.1 泛关系概念

泛关系^[21]假设数据库系统中只有一个包含了数据库中的所有属性的关系模式。通过数据库中关系模式的连接运算构造泛关系,参与连接运算的关系模式必须满足连接依赖。但是模型库中模型对应的数据库模式是经常变化的,难以满足连接依赖而不损失任何信息,所以在模型库中数据模式的基础上采用构建对象体和最大对象体的方式实现泛关系^[22]的构建。

下面给出对象体及最大对象体定义:

定义1 对象体是泛关系中具有完整意义的最少属性集合。最大对象体是由对象体组成,最大对象体中的对象体之间满足连接依赖,每增加一个对象体都满足连接无损,最大对象体的构造方法可以通过某一对象体与其他对象体函数依赖和多值依赖进行判定。

根据泛关系的定义^[23],泛关系中的对象体满足必须连接依赖,每个对象体必属于存在于数据库中实际存在的某一关系模式。

2.2.2 泛关系模型表示方法

在给出泛关系模型表示之前,假设模型满足如下两个假设:

假设1 模型中的所有输出变量和输入变量在数据库模式中均以非主属性出现。

假设2 模型中变量转换关系和变量转换规则集中所涉及的所有属性变量至少包含在一个最大对象体中。

假设1给出了模型库中对对象体的声明方式,参考 System/ U^[24]中对对象体的定义方法,对象体由关键字加上一个非主属性构成,当一个对象体只有关键字而无其他属性,关键字也可以直接构成对象体,每个声明的对象体都是数据库中实际存在的某个数据模式的子集。这样就在数据库模式层次上建立由对象体构成的泛关系层,对象体可以作为模型运行中数据存储的中介,便于数据的查询、模型生成和运行。假设2说明由每个变量转换关系及变量转换规则集所涉及的属性的若干个最大对象体就可以构成这个模型的子模型,即通过最大对象体可以对模型进行分解。

由以上假设,基于泛关系的模型可以定义如下:

定义2 基于泛关系的模型可表示为一个四元组:

$$M = \{MO, OB, RL, RU\}$$

其中:MO为包含模型中变量转换关系及变量转换规则集涉及属性的最大对象体集, $MO_i \in OM (i = 1, 2, \dots, n)$; OB为模型中变量转换关系及变量转换规则集所涉及属性的对象体集, $OB_{ij} \in OB (i, j = 1, 2, \dots, n)$; RL表示模型中变量转换关系集合, $RL = \{OB_{in}, r, OB_{out}\}$; r为RL中变量转换数学表达式集合,采用 MathML 表示, OB_{in} 为输入对象体集, OB_{out} 为输出对象体集, $OB_{in} \subset OB, OB_{out} \subset OB$; RU为变量转换规则集, RU中的每个属性变量对应一个对象体。

根据泛关系定义,设 u 是属性集 $U = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 上的泛关系, u 适合连接依赖 $\bowtie [X_1, X_2, \dots, X_n]$, 则

$$u = u[X_1] \bowtie u[X_2] \bowtie \dots \bowtie u[X_n]$$

设 $OB_{i1}, OB_{i2}, \dots, OB_{ik}$ 是其上一组对象体,且它们构成 U 上的一个最大对象体 OM_i , 而且 OM_i 包含了在泛关系上查询的属性集 $X, OB_{ij} \subseteq X_i (j = 1, \dots, k)$, 则

$$\prod_X(u) = \prod_X OB_{i1} \bowtie OB_{i2} \bowtie \dots \bowtie OB_{ik}$$

其中: $k = 1, 2, \dots, n$ 。

定理 设子模型 M 中变量转换关系、变量转换规则集涉及的属性集为 X , 包含 X 的最大对象体为 $MO_1, MO_2, \dots, MO_i, \dots, MO_n$, 则:

$$\prod_X(u) = \bigcup_{i=1}^n \{ \prod_X [\bowtie \prod_{OB_{ij}}(u)] \}$$

其中: $OB_{ij} \in MO_i; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$ 。

若 F 是变量转换关系或一组约束条件, 则:

$$\sigma_F \prod_X(u) = \sigma_F \bigcup_{i=1}^n \{ \prod_X [\bowtie \prod_{OB_{ij}}(u)] \}$$

其中: $OB_{ij} \in MO_i (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$ 。

设 X_{out} 是子模型求解结果涉及的属性集, 定义 $[X_{out}]$ 为 X_{out} 子模型 M 运算结果值集, 则

$$[X_{out}] = \prod_{X_{out}} \sigma_F \prod_X(u) = \prod_{X_{out}} \sigma_F \bigcup_{i=1}^n \{ \prod_X [\bowtie \prod_{OB_{ij}}(u)] \}$$

其中: $OB_{ij} \in MO_i; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$ 。

将变量转换关系看作泛关系查询的变量转换约束, 则上式将变量转换关系运算都集中在 $[X_{out}]$ 运算中。本文采用 MathML 表示变量转换数学表达式, 便于实现对表达式的解析计算; 通过构建变量转换关系网络来实现对象体间变量转换关系的组织和管理, 变量转换关系的定义及基于变量转换关系网络的模型生成方法参考文献^[25-26]。

2.3 一体化模型表示方法

多阶段建模过程一体化模型表示的关键是建立不同建模阶段模型表示方法所表示的模型元素之间的映射关系。泛关系模型表示中模型元素是对象体、最大对象体、变量转换关系及约束条件, 同面向对象表示方法中模型元素之间映射关系如表2所示。

表2 面向对象表示和泛关系模型表示之间映射关系

面向对象表示	泛关系模型表示
类	多个变量转换关系所构成的变量转换关系网络
对象	基于变量转换关系网络生成的数学模型
属性	变量转换表达式和约束条件表达式中对对象体的非主属性, 包括变量和常量
操作	一个或多个变量转换表达式构成的变量转换表达式链
事件	变量值集合, 变量转换约束条件, 待触发的变量转换关系
依赖关系	变量转换关系的相互引用和嵌套
泛化关系	新的属性变量及变量转换关系加入变量转换关系网络
组合关系	变量转换关系子网的组合
聚合关系	变量转换关系子网的聚合
实现关系	对应于相同输入变量的多个变量转换关系

3 层次化模型管理框架

表2给出了概念建模阶段和数学建模阶段建模元素之间的映射关系, 构成链接概念建模阶段和数学建模阶段的一体化模型表示方法。本章基于该一体化模型表示方法建立层次化模型管理框架。

图2所示, 层次化模型管理框架包括概念模型层、泛关系模型层、物理模型层三个层次。 L_1 层为概念模型层, 对应通用建模语言和面向对象模型表示方法; L_{21} 层为泛关系模型层中的属性层, 也称对象体层, 对应 L_1 层属性和操作中涉及的非主属性; L_{22} 层为 L_{21} 层为非主属性和实体关键字构建的对象体和变量转换关系; L_{23} 为 L_{22} 层变量转换关系所构建的变量转换关系网络层, 存储和管理对象体和对象体间的变量转换关系, 支持基于变量转换关系网络的模型生成。 L_3 为物理模型层, 由泛关系层模型根据数据库中数据模式, 在模型库系统

支持下,在模型运行过程中生成。对象体是模型运行数据存储中介,物理模型层是模型运行数据最终存放地。

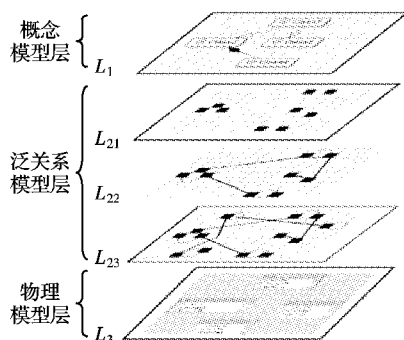


图2 层次化模型管理框架

3.1 概念模型层

该层次的模型专指基于 UML 的描述的概念模型。本文在该层次建模过程中基于域的建模描述建立概念模型,使模型能以高内聚性主题域的方式得到复用,而主题域之间的关系则是松耦合的,主要涉及建模元素包括域 (Domain)、类 (Class)、操作 (Operation)、属性 (Attribute)、桥 (Bridge)、终端类 (Terminator) 等。限于篇幅,以静态类图为例说明模型库中概念模型层模型存储逻辑。

如图3所示,Domain 中属性 IhaveBridge 是一个布尔值变量,表示这个域是否是组合域,即该域是否由其他域通过桥接器组合而成。域、类、桥及终端类中属性 Post 表示模型库图形界面上模型元素的位置。关系 (Relationship) 中属性 StartClass 和 EndClass 表示该关系类型 (RelationshipType) 连接哪两个模型元素。关系 (Relationship) 中属性变量转换关系 (Variable Conversion Relation, VCR) 表示变量转换表达式。根据上文分析,概念模型层中模型元素属性和操作可以映射到泛关系模型表示的对象体和变量转换关系。

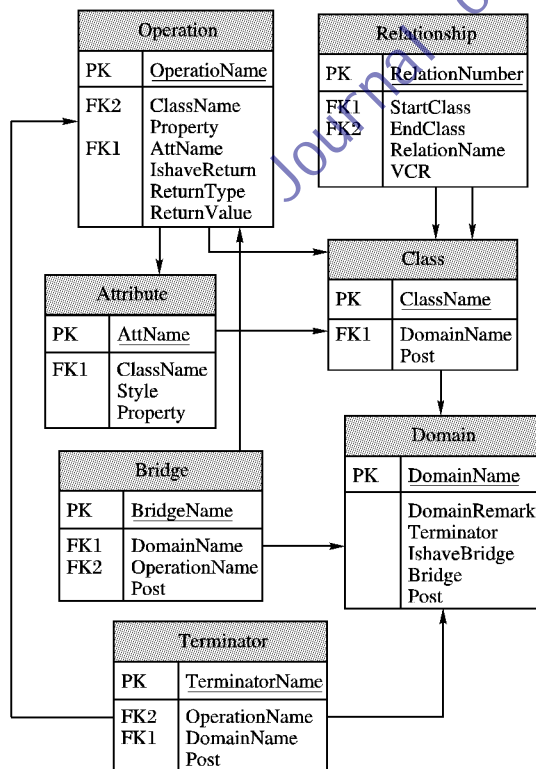


图3 模型库中概念模型层模型的存储逻辑

3.2 泛关系模型层

泛关系模型层中存储基于泛关系模型表示的模型,用于描述系统实体间变量转换关系及约束。本文通过构建元字典描述泛关系模型层模型存储与管理,图4所示为泛关系模型层模型存储逻辑。

通过构建实体索引表 EntityIndex 和实体属性表 EntityAttribute 分别管理系统实体和实体属性,在这里将关系也看作实体进行管理,很容易建立系统 ER 图同表 EntityIndex 及表 EntityAttribute 的映射关系。通过构建对象体索引表 ObjectIndex 管理建模用户声明的对象体,表 Objects 则描述了声明的对象体同相应实体之间的关系;而对象体表则是系统中随用户声明而动态创建的,包含关键字、非主属性和参与构成的模型名称(用于鉴别对象体参与某个模型运行所产生的数据)三部分信息,以非主属性名 + ## 主属性名的方式命名,能够保证对象体表在系统中唯一性;对象体索引表 ObjectIndex 中的 FD 字段描述了声明对象体对应的数据库关系模式中数据依赖模式,便于通过数据依赖构建最大对象体。VCRE 表描述对象体之间的变量转换关系表达式,其中 VCR 字段存储变量转换表达式的逆波兰表达式;表 Model 记录了泛关系层模型信息,包括模型名 (ModelName)、输入对象体 (InputObject)、输出对象体 (OutObject)、关系描述 (relationDsp) 等字段。

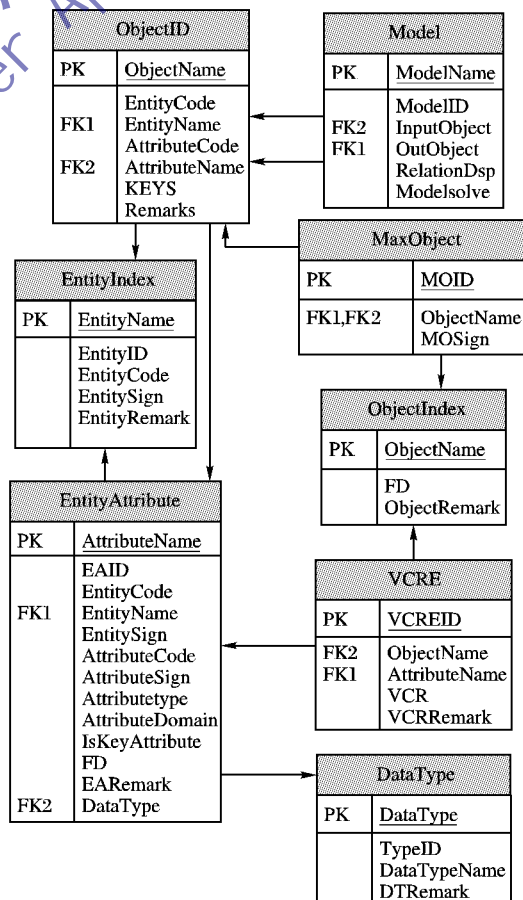


图4 泛关系模型层模型存储逻辑

由以上泛关系层模型存储逻辑可知,支撑模型运行过程的数据和模型运行产生的数据存储在对对象体中,但是对象体只是模型数据存储的中介,概念建模阶段的数据模型才是建模用户所真正关心的。我们将模型库中实际存储的建模用户

真正关心的数据称为物理层模型,它和概念层模型中数据模型有直接的映射关系。对象体作为数据存储中介管理模型数据,实现了模型数据的自动推理查询,便于数据的独立管理。

3.3 物理模型层

物理模型层由泛关系层模型根据数据库中数据模式,在模型库系统支持下,在模型运行过程中生成。物理模型层是模型运行过程中的数据最终存放地。在模型库中,物理模型具体表示为数据,但是模型库中的数据库与一般的数据库不同,主要体现在物理层模型动态生成,而且数据库中关系模式经常变化。

本文通过最大对象体中部分对象体自然联接的方式构造物理层模型和实现动态变化的关系模式。由对象体定义及其声明,对象体是最小的关系数据库模式,由联接依赖定义,设最大对象体 $MO_i = \{OB_{i1}, OB_{i2}, \dots, OB_{ij}\}$, 数据库 DB 上一组关系模式 Rm 由 MO_i 中部分对象体构成,由于 MO_i 中对象体满足联接依赖,即 $\bowtie[OB_{i1}, OB_{i2}, \dots, OB_{ij}]$, 则数据库 DB 上某一关系模式:

$$Rm_i = OB_{i1} \bowtie \dots \bowtie OB_{ik} \quad (1)$$

设 X 是物理层数据模型所对应的字段集和,则物理层模型可以表示为 $[X]$:

$$[X] = \prod_X(R_i) = \prod_X(OB_{i1} \bowtie \dots \bowtie OB_{ik}) \quad (2)$$

由式(1)可以看出,数据库中某一关系模式 Rm_i 也一定是某个最大对象体的子集。式(2)给出了泛关系模型层模型运行过程中物理模型层数据模型生成方法,建立了泛关系模型层模型向物理模型层模型的转换方法。模型运行过程中,对象体作为模型运行数据存储的中介屏蔽了不同数据库模式带来的差异,能够实现按照用户需求的数据查询,同时也解决了模型运行过程中数据失配的问题,实现了模型、数据和方法的独立。

4 结语

模型表示方法是模型管理的基础。针对多阶段建模过程中模型表示问题,本文通过分析不同模型表示方法特点和多阶段建模过程中模型表示的局限性,研究了不同建模阶段模型表示方法中模型元素之间的映射关系,提出链接不同建模阶段的一体化模型表示方法,建立了层次化模型管理框架,实现不同建模阶段模型统一管理。通过本文的研究,能够实现不同建模人员建模成果的共享、重用,提高建模效率和模型的有效性,进而实现模型快速构建。本文在理论上给出了不同建模阶段模型的一体化表示方法和层次化管理框架,相关应用还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] KRISHNAM R, CHARI K. Model management: survey, future research directions and a bibliography[J]. *Interactive Transactions of ORMS*, 2000, 3(1): 399–413.
- [2] 许向东, 张全寿. MBMS 中模型表示方法研究[J]. *决策与决策支持系统*, 1997, 7(2): 17–22.
- [3] 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.
- [4] 王维平, 周东祥, 李群, 等. 基于 MDA 的多层次框架式组合建模仿真方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(19): 4358–4362.
- [5] 周东祥, 李群, 王维平. 联合装备体系对抗仿真可组合问题的概念框架[J]. *计算机仿真*, 2007, 25(4): 9–12.
- [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: 国防科学技术大学, 2007: 29–37.
- [7] LEE K W, HUH S Y. A model-solver integration framework for autonomous and intelligent model solution[J]. *Decision Support Systems*, 2006, 42(2): 926–944.
- [8] BLANNING R W. An entity-relationship approach to model management[J]. *Decision Support Systems*, 1986, 2(1): 65–72.
- [9] WANG M S. A cceptable architecture for generalized decision support system[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1984, 14(5): 701–711.
- [10] BONCZK R H, HOLSOPPLE L W, WHINSTON A B. Foundation of decision support system[M]. New York: Academic Press, 1981: 341–347.
- [11] DUTTA A, BASU A. An aartificial intelligence approach to model management in decision support system[J]. *Computer*, 1984, 17(9): 89–97.
- [12] KONSZYNSKI B R, KOTTEMANN L E, FUNAMAKER J F, et al. Plexsys-84: An integrated development environment for information systems[J]. *Journal of Management Information Systems Research*, 1984, 1(3): 64–104.
- [13] GEOFFRION A M. An introduction to structured modeling[J]. *Management Science*, 1987, 33(5): 547–588.
- [14] GEOFFRION A M. The SML language for structured modeling: levels 3 and 4[J]. *Operation Research*, 1992, 40(1): 58–75.
- [15] LENARD M L. Representing models as data[J]. *Journal of Management Information Systems*, 1986, 2(4): 36–48.
- [16] HUH S. Model base construction with object-oriented constructs[J]. *Decision Sciences*, 1993, 24(2): 409–434.
- [17] LAZIMY R. Object-oriented modeling support system: model representation and incremental modeling[C]// *Proceedings of the 26st Hawaii International Conference on System Sciences*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1993: 445–459.
- [18] LENARD M L. An object-oriented approach to model management[J]. *Decision Support Systems*, 1993, 9(1): 67–73.
- [19] The openmath standard 2.0[S/OL]. [2010-10-10]. <http://openmath.activemath.org/standard/om20>.
- [20] Mathematical markup language version 3.0[S/OL]. [2010-10-10]. <http://www.w3.org/TR/2010/REC-MathML3-20101021/>.
- [21] FAGIN R, ULLMAN J D. A simplified universal relation assumption and its properties[J]. *ACM Transactions on Database Systems*, 1982, 7(3): 343–360.
- [22] MAIRE D, ULLMAN J D. Maximal objects and the semantics of universal relation[J]. *ACM Transactions on Database Systems*, 1983, 8(1): 1–14.
- [23] MAIRE D, ULLMAN J D, VARDI M Y. On the foundation of the universal relation model[J]. *ACM Transactions on Database Systems*, 1984, 9(2): 283–308.
- [24] KORTH H F, KUPER G M, FEIGENBAUM J, et al. System/U: a database system based on the universal relation assumption[J]. *ACM Transactions on Database Systems*, 1984, 9(3): 331–347.
- [25] XING Y, ZHANG H J, ZHANG R. Model representation and generation based on NVCR[J]. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 2012, 11(1): 177–181.
- [26] XING Y, ZHANG H J, ZHANG R, et al. Model generation based on network of variable conversion relationship[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 24(1): 202–207.