

一种数据模型的范畴论建模方法^{*}

苗德成¹, 奚建清², 苏锦钊²

(1. 韶关学院 数学与信息科学学院, 广东 韶关 512005; 2. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广州 510640)

摘要: 针对数据模型复杂语义建模的应用需求, 以及目前数据模型范畴论建模方法理论研究与工程实践方面存在的不足, 建立了一种素描数据模型。该模型在模型范畴的形式化框架内, 用与特定数据库建模语言无关的范畴论对数据库状态的一致性转换进行了形式化描述, 扩展了传统 ER 模型的表示与处理功能。基于素描对图形化建模规范的支持, 设计了 ER 模型向素描数据模型转换的算法, 以精确的语义联系保证模型转换的语义完整性, 并通过实验与对比分析了素描数据模型与算法的优势, 为数据模型的范畴论建模方法研究提供便利、高效的形式化理论框架。

关键词: 数据模型; 素描; 范畴论; 语义; 数据库

中图分类号: TP301

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)09-2744-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.046

Categorical approach for making model of data model

MIAO De-cheng¹, XI Jian-qing², SU Jin-dian²

(1. School of Mathematics & Information Science, Shaoguan University, Shaoguan Guangdong 512005, China; 2. School of Computer Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To satisfy the application demands of modeling for complex semantics of data model, and to overcome the drawbacks of the existing modeling methods of data model based on category theory both in theoretical research and engineering practice, this paper made a sketch data model. The model described formally the consistency transformation of database states by category theory independent of particular database modeling languages in the framework of model category, which extended the expressive and process functions of traditional ER model. Based on the support of sketch for graphical modeling specification, it also provided an algorithm of translating ER model to sketch data model. Besides, it compared and analyzed the advantages of sketch data model and the algorithm through experiments so as to provide a convenient and efficient formal theory framework for categorical method of data model.

Key words: data model; sketch; category theory; semantics; database

0 引言

数据模型是数据库技术发展的主线, 是数据库系统的核心与基础。数据结构、数据操作和完整性约束是数据模型的三个基本要素。数据结构描述数据库系统静态特征的对象类型, 构成数据库的基本组成成分; 数据操作描述数据库系统动态特性, 定义数据库允许执行的操作集合, 明确数据操作的确切含义、操作符号与操作规则; 完整性约束是数据模型中数据及其联系的语义约束和依存规则, 限定数据库状态及其变化, 保证数据库中数据的正确、有效、相容。

ER 模型是一种重要的关系数据模型, 自然且易于理解的图形化规范使其成为关系数据库系统概念建模的重要工具。基于关系代数的关系数据库理论与应用经过几十年的发展与完善已经十分成熟, 而利用范畴论与泛代数工具研究数据模型建模理论是当前一个研究热点^[1-11]。范畴论在软件系统形式化理论、形式语义学与程序设计方法等计算机理论科学领域有广泛应用, 对理解计算机体系结构、软件规范和程序设计间

联系提供一种通用的理论工具、思维方法与研究手段。

当前, 广泛应用的数据模型的范畴论建模方法^[1-9, 11, 12]侧重于不同抽象层次间具体数据模型实现技术的研究, 缺乏统一的概念和系统的形式化描述, 在数据库状态的一致性转换、模型转换的语义完整性等方面缺乏坚实的理论基础, 导致数据模型理论研究与工程实践的不完善, 难以满足实际需要。语义完整性是数据模型正确转换的重要标准, 形式语义准确描述的贫乏难以支持模型的正确转换与代码自动生成。模型转换的语义完整性仍是一个尚未解决的难题, 目前还没用成熟的理论支持与有效的验证工具。

笔者所在课题组和实验室在数据模型理论研究与工程实践结合方面做了大量的研究工作, 应用范畴论方法建立一种基于素描^[13]的数据模型 SDM, 对数据库状态的一致性转换和模型转换的语义完整性两个主要课题进行了许多基础性理论研究工作, 并以 SDM 为基本数据模型设计并实现了企业级协作互动平台 Wetoband。在 SDM 的形式化理论框架内统一描述 Wetoband 的业务逻辑, 而 Wetoband 用户群体协作行为和业务

收稿日期: 2013-01-12; 修回日期: 2013-03-05 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61103038); 韶关市科技局资助项目(2011CX/K20)

作者简介: 苗德成(1979-), 男, 黑龙江伊春人, 博士, 主要研究方向为数据库与网络计算、形式化方法、范畴论(tony10860@126.com); 奚建清(1962-), 男, 江苏无锡人, 博导, 教授, 博士, 主要研究方向为数据库与网络计算、软件体系结构; 苏锦钊(1980-), 男, 广东潮州人, 副教授, 博士, 主要研究方向为形式化方法、双代数。

执行过程则是 SDM 形式系统谓词演算和形式推导能力的扩展。Wetoband 是笔者实验室多年的一个研究课题,其数据模型形式化描述、形式语义高效处理、系统访问控制机制、形式语言语法识别与语义计算、底层数据通信与数据传播都已成熟。目前,Wetoband 已成功运行于多家企业和政府部门。

1 相关研究工作

文献[1]提出函数式实体的概念,列举的九类函数式实体涵盖了自动问答系统实例主导、值主导和连接主导三种主要类型,设计的函数实体联系图 FERD 扩展了传统 ER 图的语义处理功能,完善了类型范畴^[12]的数据建模理论。文献[2]基于文本标签解释语义方法提出一种知识表示的范畴论模型 Olog,用函子将范畴 Olog 连接为 Ologs 处理复杂信息系统数据建模问题,但 Ologs 理论的完善及 Ologs 通信等问题有待于进一步解决。文献[2,3]基于范畴论模型 Olog 对生物蛋白原料的概念交互的语义规则进行了严密的形式化描述,并与社会网络等复杂层次结构的现存模型进行了比对分析,指出 Olog 在描述复杂层次系统结构与功能联系方面的优势。以上文献在数据模型范畴论建模方面取得了一些理论研究成果,文献[1]在类型范畴上的建模工作、文献[2,3]以函子语义作为基本工具建立 Olog 模型表述复杂层次系统结构与功能联系,为本文的研究提供了有益的借鉴。

文献[4]用范畴论的素描概念描述 ER 建模的设计过程,基于数据库状态和状态转换的应用环境建立 EA 素描模型,在 2-范畴^[4,5]框架内研究数据库查询和更新问题。文献[6]提出三种方法研究数据库系统的不完备信息问题,基于相同范畴模型构造了三种 EA 素描模型 E_R^+ 、 R_pE 与 E_R^- ,并证明了范畴 $\text{Mod}(E_R^+)$ 、 $R_p - \text{Mod}(E)$ 与 $\text{Mod}(E_R^-)$ 两两 Morita 等价,但存在 R_pE 态射无法完全定义和 E_R^- 部分函数定义域子对象不明确两个局限性。文献[7]利用类型范畴理论,结合面向特征技术提出一种软件体系结构模型的形式化描述方法,为模型驱动开发提供一种支持。文献[8]提出一个模型变换与程序生成的范畴框架,并通过一个数据访问程序模式的应用说明其实现方式。文献[4,6]做了大量数据模型范畴论建模方法的理论研究工作,目前还没有发现其理论研究成果转换为实际的软件工程项目;文献[7,8]在范畴论建模方法与软件工程结合方面取得了一些研究成果。文献[4]建立 EA 素描模型研究数据库查询和更新问题,文献[6]对于数据库系统不完备信息问题的研究、文献[7]在模型转换一致性验证方面的研究及文献[8]参数化的泛型模型为本文的研究工作起到了指导作用。

Johnson 等人^[5]对其前期研究进行了完善,提出 SkDM 模型改进数据库设计和视图集成,并基于 Java 环境开发系统 EASIK 对 SkDM 进行了实现,但在商用 DBMS 测试方面存在局限性。同时,文献[5]并没有形成一个完整的 ER 模型向 SkDM 转换的算法,遍历全部规则空间寻求最优解生成 SkDM 的过程增大了模型转换代价。

本文将数据模型范畴论建模方法的理论研究与数据库工程实践结合起来,建立素描数据模型 SDM,研究数据库状态的一致性转换问题;设计 ER 模型向 SDM 转换的算法 ER2SDM,分析模型转换的语义完整性问题。同时,本文参考了 EA 素描模型^[4-6]及 SkDM 模型^[5]的相关建模方法和思路,这些都为本文的研究工作提供了基础。

2 素描与模型范畴

范畴论是刻画系统内部结构关系的有力工具。范畴将许

多具有相似特征的不同应用对象和态射高度抽象为统一的观念,而函子是范畴间保结构的一种态射。函子、极限等基本观念参见文献[14],引入几个概念的形式化定义。

定义 1 如果范畴 $\mathcal{C}$ 的有限个图表 $D_1, D_2, \dots, D_n$ 都有极限,则 $\mathcal{C}$ 有有限极限,称 $\mathcal{C}$ 为有限完备范畴。

图表与函子是范畴论中描述范畴间映射关系的不同侧面,本质上均为一类图同态^[13]。图表交换反映一种代数的同态关系,是范畴论表达等式的方式。有限完备范畴存在拉回^[15]和终对象^[15],以有限完备范畴为域的函子保持有限极限。有限余极限是有限极限的对偶概念。

定义 2 如果范畴 $\mathcal{C}$ 有有限极限、有限不相交与泛余极限,则称 $\mathcal{C}$ 为词范畴(extensive category)。

词范畴的积与和彼此满足分配律运算,在理论计算机科学领域有许多应用,其不相交与泛性质广泛用于程序设计语言语义的范畴论方法研究中^[16]。素描扩展初始代数语义,是具有相同结构的形式系统一类形式化规范,以函子作为表达语义的基本工具,为形式系统建模提供一种有效的范畴论研究方法^[13]。素描的定义较多,本文给出一种形式化定义。

定义 3 素描 S 是一个四元组, $S = (G, D, L, K)$ 。其中: G 是有限非循环有向图,称为 S 的基础图; D 是 G 中有限交换图表集; L 与 K 分别是 G 中锥集和余锥集。

定义 4 素描 S 在词范畴 $\mathcal{C}$ 中的模型 $M: G \rightarrow \mathcal{C}$ 是一个图同态,将 G 中节点与边分别映射为 $\mathcal{C}$ 中的对象与射, D 中的交换图表等价于 $\mathcal{C}$ 中射的复合, L 中锥的像是 $\mathcal{C}$ 中的极限锥, K 中余锥的像是 $\mathcal{C}$ 中的余极限余锥。

定义 5 M 与 M' 是素描 S 在词范畴 $\mathcal{C}$ 中的任意两个模型, $\varphi: M \rightarrow M'$ 是模型态射,以模型为对象, φ 为射构成词范畴 $\mathcal{C}$ 中素描 S 的模型范畴,记为 $\text{Mod}(S, \mathcal{C})$ 。

定义 4 描述素描 S 基础图 G 与词范畴 $\mathcal{C}$ 两个形式系统间一种保结构的映射关系。素描生成的理论涵盖素描所刻画系统的全部语法结构,但通常情况下,素描理论的显示描述是递归不可解的。本文基于数据模型范畴论建模方法的研究角度,在模型范畴 $\text{Mod}(S, \mathcal{C})$ 的形式化框架内给出素描理论的一种形式化定义。

定义 6 给定素描 S , 存在范畴 $\text{Th}(S)$, 称为 S 的理论。 $\text{Th}(S)$ 由 S 的基础图 G 生成并受图表 D 约束,利用函子 $F: G \rightarrow \text{Th}(S)$ 将 G 的节点与边映射为 $\text{Th}(S)$ 中的对象与射, S 的锥与余锥映射为 $\text{Th}(S)$ 中的锥与余锥。

词范畴 $\mathcal{C}$ 中素描 S 的模型 M 可扩张为一个函子 $\text{Ext}M: \text{Th}(S) \rightarrow \mathcal{C}$, 将 S 中 L 与 K 的锥与余锥分别映射为 $\mathcal{C}$ 中的极限锥和余极限余锥。泛模型是应用素描理论研究程序设计语言形式语义的一种重要工具, $\text{Th}(S)$ 的泛模型 $M'_v: S \rightarrow \text{Th}(S)$, 对任意其他模型 $M: S \rightarrow \mathcal{C}$, 存在唯一的扩张函子 $\text{Ext}M: \text{Th}(S) \rightarrow \mathcal{C}$, 使得 $M = \text{Ext}M \circ M'_v$ 成立,该等式对应的图表交换称为 M_v 的泛映射性质。泛映射在数据模型的范畴论方法研究中具有普适意义,对 S 中任意射 f , 泛模型 M_v 取每个节点到其自身,取 f 到 $\text{Th}(S)$ 中 f 的同余类 $[f]$, 取每个图表到 $\text{Th}(S)$ 的一个交换图表。

定义 5 的模型态射 $\varphi: M \rightarrow M'$ 是从扩张函子 $\text{Ext}M$ 到 $\text{Ext}M'$ 的自然转换^[15], 模型范畴 $\text{Mod}(S, \mathcal{C})$ 是一种 2-范畴。本文所研究的 $\text{Th}(S)$ 与 $\mathcal{C}$ 都是小范畴^[14], $\text{Mod}(S, \mathcal{C})$ 是函子范畴^[15] $[\text{Th}(S), \mathcal{C}]$ 的满子范畴^[15]。

3 素描数据模型 SDM 的建立

素描数据模型是一种新型的语义数据建模规范,与 ER 模

型和关系模型密切相关,而范畴的许多良好性质使其在数据语义建模及软件规约形式化说明中得到了广泛应用。Johnson等人^[4-6,9,11]在词范畴内建立EA素描模型,较为系统地研究了数据库视图更新、数据库互操作等问题。基于前人的相关研究工作,本文将词范畴作为构建素描数据模型的基础,应用范畴论方法对数据模型的语义建模问题进行研究。

本文建立的素描数据模型SDM是词范畴 $\mathcal{C}$ 中的素描 S ,即 $SDM = (G, D, L, K)$,SDM是词范畴素描在数据建模应用研究中的扩展。

有限非循环有向图 G 描述SDM静态特征的数据结构,锥集 L 与余锥集 K 描述SDM动态变化的数据操作,其生成的操作结果与交换图表集 D 共同支持SDM完整性约束的语义条件。SDM的锥集 L 有一指定的顶点是终对象1的空锥, G 中域是1的射称为元素,记为element。属性是余极限离散余锥中内射为元素的顶点, G 中不是属性和1的节点是实体。

本文用词范畴 $\mathcal{C}$ 约束SDM的定义,降低素描 S 不一致问题出现的可能性,即 S 产生的平凡模型 M 使得 $\mathcal{C}$ 中零对象^[15]0与终对象1同构,导致 $Mod(S, \mathcal{C})$ 为空或词范畴 $\mathcal{C}$ 与1同构。 S 的平凡模型 M 不产生新的语义,本文不考虑素描 S 的不一致问题。

如果SDM的每个实体 E 有一个指定的单射 $f: E \rightarrow A_K, A_K$ 为 E 的码,称SDM为键控SDM^[9]。词范畴 $\mathcal{C}$ 中SDM确定的一个数据库状态 St 是 $\mathcal{C}$ 中SDM的一个模型 M ,数据库状态间的转换 $\varphi: St \rightarrow St'$ 是自然转换,SDM确定的数据库状态集是 $\mathcal{C}$ 中SDM的模型范畴 $Mod(SDM, \mathcal{C})$ 。在 $Mod(SDM, \mathcal{C})$ 的形式化理论框架内分析数据库状态的一致性转换可归结为定理1。

定理1 SDM是词范畴 $\mathcal{C}$ 中的键控SDM, E 是SDM中实体, A_K 为 E 的码, St 是模型范畴 $Mod(SDM, \mathcal{C})$ 的任一数据库状态, St' 是 St 的一致转换状态, $\varphi: St \rightarrow St'$ 为一自然转换,则 $\varphi_E: St(E) \rightarrow St'(E)$ 是被 A_K 确定的单射。

证明 由定义6及 St 的函子性质可知,对 $\mathcal{C}$ 中任一终对象1,有 $St(1)$ 同构于1,记为 $St(1) \cong 1$,且 St' 是 St 的一致转换状态,有 $St'(1) \cong 1$,则 $St(1) \cong St'(1)$,即 $\varphi_1: St(1) \rightarrow St'(1)$ 是自然同构^[15]。码 A_K 是以 n 个1为基构成的离散余锥的顶点,即 $A_K = 1 + 1 + \dots + 1$,则在 $\mathcal{C}$ 中有 $St(A_K) \cong 1 + 1 + \dots + 1$ 。由 φ_1 的自然同构性质可得 $St(A_K)$ 与 $St'(A_K)$ 的等价性。

令 $f: E \rightarrow A_K$ 为实体完整性约束,则 f 是单射。以下为一拉回方形, φ_E 是 φ_{A_K} 沿 $St'(f)$ 的拉回,且 $St(f)$ 与 $St'(f)$ 均为单射,则 φ_E 保持 φ_{A_K} 的等价性,即 $\varphi_E: St(E) \rightarrow St'(E)$ 是被 A_K 确定的单射。

证毕。

$$\begin{array}{ccccc}
 St(E) & \xrightarrow{St(f)} & St(A_K) & & \\
 \downarrow \varphi_E & & \downarrow \varphi_{A_K} & & \\
 St'(E) & \xrightarrow{St'(f)} & St'(A_K) & & \\
 & \text{P.B.} & & &
 \end{array}$$

4 ER模型向SDM模型转换的算法

ER模型是记录信息系统结构并带有属性值的实体集,是一种结构化描述离散多类代数结构的数据类型规范。范畴论的素描概念支持ER模型的图形化建模规范,每个ER模型都可以转换为一个SDM。本文利用范畴论的素描工具给出ER模型向SDM转换的算法ER2SDM,形式化描述ER模型与SDM之间的映射关系,规范SDM的生成规则,以精确的语义

联系保证ER模型向SDM转换的语义完整性。

算法ER2SDM ER模型向SDM转换的算法

input: ER模型。

output: SDM模型。

a) 初始化。 G, D 为空, L 仅含顶点为1的空锥, K 中余锥为指向属性的element。

b) G 的生成。ER模型的实体 E 、属性 A 及1的不相交并构成 G 的节点集Node, element及 E 指向 A 的有向边构成 G 的边集Edge。

c) L 的生成。 E 取代 L 中空锥 c 的顶点1, E 及其属性的射构成 L 中新锥。根据ER模型中联系 R 的语义将 R 作为新的边加入步骤b)的Edge。

d) K 的生成。用 A 的数据类型替换 K 中离散余锥的基1。

e) D 的生成。ER模型完整性约束规则集构成交换图表集 D , D 由交换方形、交换三角形及锥构成, D 中各类约束生成的锥、余锥分别加入步骤c) d)的 K, L 中。

f) D 中不再添加由新的语义约束生成的交换图表, G 中Node与Edge不再加入新element,算法结束。

算法ER2SDM最终形成有限非循环有向图 G ,非空集合 L, K 与 D 构成的SDM,本文在处理ER模型实体完整性约束与参照完整性约束时,在ER2SDM步骤e)将锥作为最简单的交换图表加入 D 中。

图1是公司信息管理ER模型。为简化问题描述而又又不失一般性,图1只标注了经理与部门两个实体的属性,其余略去。运用算法ER2SDM生成的SDM的图 G 如图2所示。锥 k 为实体完整性约束,如经理、部门的码职工号、编号不能为空,锥 f 为参照完整性约束,实体经理的外码所在部门参照实体部门的码。余锥“职工 = 经理 + 工程师 + 工人”对应图1的四元联系组成,余锥顶点职工号的两个离散基表示职工号属性的数据类型为String与int的不相交并。积锥工程师 $\times$ 工人与实体职工构成拉回方形,射影 p_1, p_2 为单射isa的拉回。交换三角形manage = respondTo $\circ$ belongTo对应自定义完整性约束:“经理管理其部门负责的项目”,并增加锥belongTo、manage到锥集 L 。交换方形order $\circ$ belongTo = need $\circ$ manage对应自定义完整性约束:“部门经理订购其管理项目所需的零件”,并增加余锥order、need到余锥集 K 。

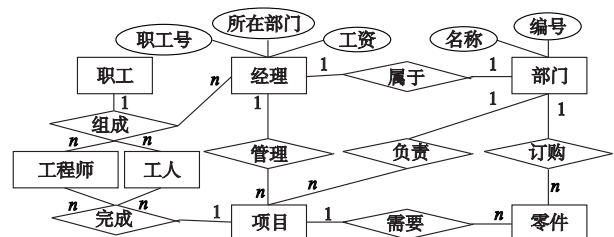


图1 公司信息ER模型

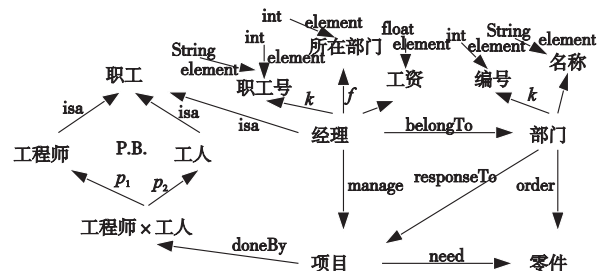


图2 公司信息SDM基础图G

5 相关工作比较

多类代数是数据建模的一种传统主流工具^[1-3,12]。在模型语义表示方面,本文建立的素描数据模型SDM与多类代数具有同样的表达能力,但比后者更强,如表1所示。SDM以词

范畴为基础,素描理论泛模型的泛映射性质增强对空锥等特殊数据类型的表达效果,如算法 ER2SDM 的步骤 c) 以 ER 模型的实体 E 取代空锥 c 的顶点 1。另外,SDM 图形化的描述简洁、直观、明确、完整地表述了图 1 的问题语义,而多类代数先将图 1 问题语义抽象为代数系统,再用相应形式语言描述,其描述局限于集合范畴^[14] Set,抽象程度的不足难以表达其他范畴的概念。

表 1 SDM 与传统数据建模工具的比较

类别	SDM	多类代数	泛 Horn 理论
语义表示	强	弱	弱
语义处理	强	弱	弱

SDM 在模型语义处理方面也优于多类代数。如图 1 的自定义约束:“经理管理其部门负责的项目”,多类代数用形式语言 OBJ 描述为:

```
Theory company-information-database is
  Sorts 经理 部门 项目
  Operator belongTo: 经理 → 部门
  Operator responseTo: 部门 → 项目
  Operator manage: 经理 → 项目
  Var x:经理
  Equation chargeIn(x) = responseTo(belongTo(x))
End Theory
```

OBJ 的形式化描述无法表达该语义约束,但图 2 的交换三角形 $\text{manage} = \text{respondTo} \circ \text{belongTo}$ 则完整地对该自定义约束的语义进行了处理。

相对于泛 Horn 理论^[10],素描理论可表示任何用泛 Horn 理论表示的概念^[13]。本文建立的 SDM 表述更多的语义信息,如图 2 指向积锥工程师 $\times$ 工人的等值子^[15] doneBy 揭示了拉回方形单射 isa 的子类结构,并形式化定义了 isa 核对^[14] (kernel pairs) 运算 (p_1, p_2) ,进一步明确职工各子类结构执行项目任务的等价性,而以上语义信息不能用泛 Horn 理论表示。同时,在语义处理方面,SDM 也优于泛 Horn 理论。

文献[4~6,9,11]应用范畴理论对数据库视图更新问题做了深入研究,以伴随函子^[15]为主要工具分析了插入与删除操作导致数据库模式的一系列更新问题,但文献[9,11]在数据库的空值、算术和集合查询处理方面还需要作进一步研究,特别是缺乏素描模型与关系数据模型的转换算法,难以对数据模型的完整性约束进行有效处理。另外,任一 ER 模型都可以转换为素描模型^[9],但目前并未发现 ER 模型向素描模型转换的算法。本文基于素描理论泛模型的泛映射性质在模型范畴的形式化理论框架内分析数据库状态的一致性转换,建立了素描数据模型 SDM,并设计了 ER 模型向 SDM 转换的算法 ER2SDM,以精确的语义联系保证 ER 模型向 SDM 转换的语义完整性,同时对数据模型的实体完整性、参照完整性和自定义完整性约束进行了有效处理。

6 结束语

素描作为一种范畴论方法在文献[13,14]中已有陈述,Johnson 等人^[4~6,9,11]应用素描方法对数据库视图更新等问题进行了细致的研究。本文在前人研究工作的基础上将范畴论的理论研究与数据模型的工程实践相结合,建立了一种形式化的素描数据模型 SDM,扩展了传统 ER 模型的表示与处理功能,在模型范畴 $\text{Mod}(\text{SDM}, \mathcal{C})$ 的形式化框架内用与特定数据库建模语言无关的范畴理论对数据库状态的一致性转换进行

了形式化描述。同时,本文设计的算法 ER2SDM 规范了 SDM 的生成规则,以精确的语义联系保证 ER 模型向 SDM 转换的语义完整性,为数据模型的范畴论方法研究提供了一个便利、高效的形式化理论框架,进一步论证了素描方法在数据语义建模方面的优势,进而推广范畴论方法在计算机科学与工程领域的应用。

算法 ER2SDM 对数据模型三种基本的完整性约束,即实体完整性、参照完整性和自定义完整性进行了处理,完善算法 ER2SDM 对聚集、变迁等完整性约束的处理是笔者下一步研究工作的重点。同时, $\text{Mod}(\text{SDM}, \mathcal{C})$ 是词范畴 $\mathcal{C}$ 上的一种 2-范畴结构,利用 2-范畴理论工具深入研究 SDM 的形式语言, $\mathcal{C}(\text{SDM})$ 也是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] PIGOTT D J, HOBBS V J. Complex knowledge modeling with functional entity relationship diagrams[J]. *Vine*, 2011, 31(2):192-211.
- [2] SPIVAK D I, KENT R E. Ologs: a categorical framework for knowledge representation[J]. *Public Library of Science ONE*, 2012, 7(1):1-22.
- [3] SPIVAK D I, GIESA T, WOOD E, et al. Category theoretic analysis of hierarchical protein materials and social networks[J]. *Public Library of Science ONE*, 2011, 6(9):1-15.
- [4] JOHNSON M, ROSEBRUGH R, WOOD R. Entity-relationship-attribute designs and sketches[J]. *Theory and Applications of Categories*, 2002, 10(3):94-112.
- [5] JOHNSON M, ROSEBRUGH R. Implementing a category information system[C]//Lecture Notes in Computer Science, vol 5140. 2008: 232-237.
- [6] JOHNSON M, ROSEBRUGH R. Three approaches to partiality in the sketch data model[C]//Proc of Computing the Australasian Theory Symposium. Melbourne: Australasian Computer Science Week, 2003: 1-18.
- [7] 杨潇,马军,侯金奎.基于特征和范畴理论的体系结构模型形式化描述[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(7):1317-1322.
- [8] 王金全,郑宇军.基于范畴计算的多目标语言程序生成架构[J]. *计算机科学*, 2011, 38(4):185-187.
- [9] JOHNSON M, ROSEBRUGH R. Fibrations and universal view updatability[J]. *Theoretical Computer Science*, 2007, 388(1-3):109-129.
- [10] JACKSON M. Flat algebras and the translation of universal Horn logic to equational logic[J]. *Journal of Symbolic Logic*, 2008, 73(1): 90-128.
- [11] JOHNSON M, ROSEBRUGH R, WOOD R. Lenses, fibrations and universal translations[J]. *Mathematical Structures in Computer Science*, 2012, 22(1):25-42.
- [12] LU Ru-qian. Towards a mathematical theory of knowledge[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2005, 20(6):751-757.
- [13] 陈意云. 计算机科学中的范畴论[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1993:188-238.
- [14] BARR M, WELLS C. Category theory for computing science[M]. New York: Prentice-Hall, 1990:11-270.
- [15] 贺伟. 范畴论[M]. 北京:科学出版社, 2006:4-41.
- [16] CARBONI A, LACK S, WALTER R F C. Introduction to extensive and distributive categories[J]. *Journal of Pure and Applied Algebra*, 1993, 84(2):145-158.