

● 傅 柱, 王曰芬, 孙铭丽 (南京理工大学 经济管理学院, 江苏 南京 210094)

本体存储技术研究综述*

摘 要: 随着计算机技术的发展与应用, 起源于哲学的本体逐渐在信息科学领域受到广泛关注, 其应用的重要性已在许多方面表现出来, 而本体合理有效的存储是保证其共享利用的前提。文章在对国内外现有的本体存储技术研究进行文献调研和定量分析的基础上, 分别介绍了现有的几种本体存储方法, 其中重点叙述了本体在关系数据库中的几种存储模式; 对比分析了主要的本体存储方法及本体存储管理系统; 总结了现有方法中存在的局限性, 并展望了本体存储技术的发展趋势。

关键词: 本体; 存储技术; 数据库; 综述

Abstract: With the development and application of computer technology, the ontology originated from philosophy has gradually attracted extensive attention in the field of information science, and the importance of its application has been displayed in many aspects, while the reasonable and effective storage of the ontology is the premise of the assurance of the sharing and utilization of ontology. Based on the literature survey and quantitative analysis of the research on the present ontology storage technology at home and abroad, this paper introduces several existing ontology storage methods with the focus on the description of several storage models of ontology in relational databases. The paper compares and analyzes the main ontology storage methods and ontology storage management systems. Finally, the paper summarizes the limitations of the present methods, and predicts the development trend of the ontology storage technology.

Keywords: ontology; storage technology; database; review

近年来, 随着海量信息的不断涌现和知识复杂性的提高, 如何更自动化地管理和维护海量信息, 更智能化地表示和组织知识, 成为研究的热点。其中, 给信息赋予明确的含义, 使计算机能自动处理与集成可用信息, 并支持关联知识自动推理的语义网, 成为未来网络的设想与研究重点。本体作为语义网发展的支撑技术之一, 其相关研究伴随着语义网的研究热潮而逐渐在 Web 技术领域发展。目前, 国内外关于本体的研究及应用日趋成熟, 主要研究大都集中在本体的基础理论、构建技术及本体应用研究方面。

但是, 随着本体构建研究的深入, 大量复杂的大型本体被不断开发出来, 构建的本体能否得到完好的保存, 将会直接影响到后期的本体管理和复用。因此, 关于本体存储技术的研究不仅是本体理论研究的深化与延伸, 而且是应用研究的基础与前提。

本文通过对国内外的本体存储技术研究进行综合分析, 旨在为把握相关研究现状与技术特点, 明晰重点研究方向与未来发展趋势提供参考与借鉴。

* 本文为国防科技工业局基础科研重点项目“基于语义的馆藏资源深度聚合与可视化展示研究”的成果, 项目编号: 11&ZD152。

1 国内外研究现状与主要技术方法

1.1 国内外研究现状分析

1) 国内研究现状。选取中国期刊全文数据库 (CNKI) 作为统计的数据来源; 检索策略: 题名 = 本体 并且 存储 或者 关键词 = 本体 并且 存储; 时间为 1979.1—2012.7; 精确匹配, 中英文扩展; 检索结果共返回 391 条记录 (检索时间: 2012.7.30)。人工剔除不符合检索策略且与本体存储无关的文献, 然后对所得到的 89 篇文献进行统计分析。

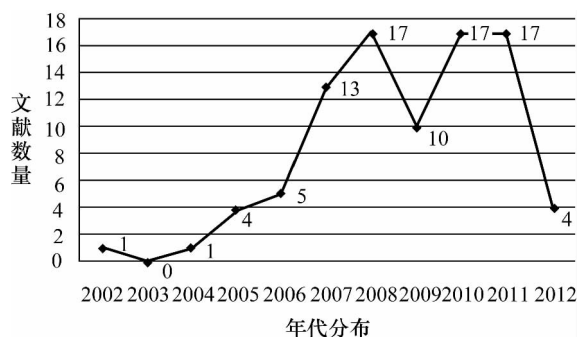


图1 国内文献的年代分布图

从图1可见, 国内关于本体存储的研究最早始于2002

年,研究初始发展较为缓慢,随着本体研究的发展,本体存储的研究才逐步呈现上升趋势。从总体来看,国内关于本体存储的研究总量仍较少,研究者对于本体存储的研究力度不够。

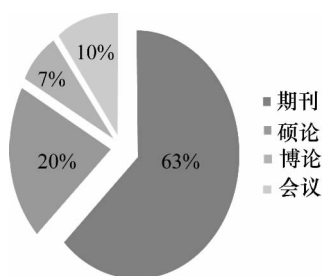


图2 国内文献的来源分布图

从图2可见,国内关于本体存储的研究来源较为丰富,其中所占比例最多的是期刊文献,其次是硕士论文,会议论文和博士论文也有部分,但是数量比较少,从一个侧面说明,这方面的研究还没有形成一定的独立性与系统性。

国内关于本体存储的研究主要集中在基于数据库的方式上。陈光仪采用本体存储于关系数据库中的一般原则,设计并实现了一种混合存储模式——基于关系数据库的本体存储模式(Rdb_based Ontology Storing Pattern, ROSP),并且基于Jena 2和Oracle 10g设计并实现了一个模型系统,该系统实现了ROSP的自动创建,将解析得到的本体数据存储于ROSP关系模式中^[1]。

李华强基于关系数据库的本体存储模式,提出并实现了一种存储大规模本体的混合模式^[2],采用LUBM本体进行本体存储的性能测试^[3],实验证明这种模式具有较高的性能。

仇利克研究了领域Ontology的4种存储方式,包括Triples存储、Graph存储、垂直存储和水平存储^[4]。对大型Ontology以及面向语义Web的Ontology,提出了分布式的构建思想,并深入研究了分布式Ontology的管理问题,给出两个实例来进一步说明子Ontology之间如何保持一致性的问题。

陶皖在分析现有模式的基础上,针对OWL本体类和属性的特点,通过单独设立类关系表、添加关系约束表T-restrict等方法改进已有模式,使其能比较方便地实现OWL本体中类、属性及复杂关系的信息存储^[5]。

黄宇采用RDBMS作为大规模人造目标解译本体底层的存储模式,利用RDBMS存储机制解决本体同RDBMS映射的模式问题^[6]。通过分析现有的本体映射模式方法存在的不足,提出了一种改进的混合本体映射模式,用于生成存储大规模人造目标解译本体的数据库存储模型,该

模型支持本体的演化及更新,并以实验结果证明该方法的有效性。

2) 国外研究现状。分别选择SCIE引文数据库、ELSEVIER ScienceDirect和Springer期刊全文数据库进行外文文献的检索,由于这3个数据库的检索项不一致,所以本文统一选择了“标题”检索项进行检索统计:在SCIE中的检索式为“标题=ontology AND 标题=stor*, all years”,并经过人工筛选后得到相关文献36篇;在ScienceDirect中的检索式为“ontology in title AND stor* in Title, all years”,只返回了3条结果;在Springer中的检索式为“ontology storage in TITLE ONLY, all years”,得到8篇相关文献。从图3可见,国外关于本体存储的研究始于2000年,比国内早,但是总体的研究量比国内少。这可能来源于两方面原因:①国外对本体的研究更多关注于其应用,如基因本体等在国外的研究很热,对本体的基础研究关注较少。②国外已经开发出一系列本体存储管理系统,所以对基本的存储方法的研究不多。

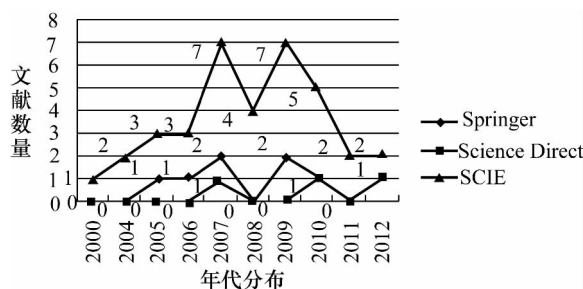


图3 国外本体存储文献的年代分布

国外本体存储的研究主要是根据应用而开展的。如Eric提出了一种基于稳定的、常用的关系数据库的有效本体文件存储系统,设计了一种使用OWL文件的关系数据库模式,然后研究出一种从OWL文档向关系型模式转换的机制^[7]。Adnan提出了一系列关于如何将OWL文档转移到数据库中的规则,还提出了一个“OntRel”的关系模式,并将OntRel的加载时间、查询性能和完整性等与其他索引技术进行对比分析^[8]。Jinhyung提出了一种基于XPath结构的存储模型(XPOS),该模型将类或属性之间的层级信息作为XPath结构,并能进行直观的、有效的信息检索^[9],主要对XPOS模型、Sesame和基于XML文档系统的存储模型(XFSS)在查询过程和本体更新方面进行定量实验,从而对各个模型进行对比评价。Martin在4个可获取的XML数据系统上(从20中选出的4个,eXist, MonetDB/XQuery, Sedna, Oracle Berkeley DB XML)进行了大量的测试,通过这些测试发现最好的可用于知识和本体存储的XML数据库^[10]。从XMark的结果以及定义

的知识和本体基准来看, Monet DB/XQuery 和 Sedna 数据库表现很好, 是知识和本体系统的最佳选择。其中 Monet DB/XQuer 对于大型文档有很好的性能, 而 Sedna 具有很多优先的特性。

1.2 本体存储的主要方法

目前国内外关于本体存储方法的研究并不是很多, 主要是因为本体存储的方法较为固定, 少有创新。按照本体存储介质的不同, 本体的存储方法大致分为基于内存的存储方式、纯文本存储方式、基于数据库的存储方式和专门的管理工具方式 4 种, 其中研究最多、应用最广的就是基于数据库的存储方式。根据数据库的不同又可细分为基于关系数据库的存储、基于面向对象数据库的存储和基于 Native XML 数据库的存储 3 类。

1.2.1 基于内存的存储方式 基于内存的本体数据管理的特点是将本体数据全部导入内存, 按照某种数据结构进行组织, 在内存结构上执行数据的查询、更新等操作。此方法具有很高的运行效率, 但只能处理有限规模的数据。由于是内存数据管理, 所以不存在磁盘更新的问题。典型的基于内存的本体存储管理系统有 OWLim^[11] 和 OWLJessKB^[12]。

1.2.2 纯文本存储方式 该方式是将本体以文件的形式存储在本地文件系统中, 系统启动时将本体数据从文件中读入内存, 然后在内存中操作本体库^[13]。这种方式在每次系统退出时需要重新将本体库以文件流的形式写回文件中, 其本体可以采用多种文件形式, 如 XML, RDF (S), OWL 等。

OWL 本体使用纯文本的方式存储既简单又复杂。简单是因为使用本体编辑工具如 Protégé 可以直接生成 OWL 文件, 并且可以直接使用工具对生成的 OWL 文件进行管理; 复杂是因为对 OWL 本体的进一步分析管理如查询推理等比较麻烦, 且存储效率低, 很难适应大数据量的情况, 所以必须运用其他的工具进行支持和开发^[13]。

目前, 这种方式主要用来编辑和构建数据量较少的本体, 并不适用于大规模本体数据的存储和查询管理服务, 常用的开发工具有 OntoEdit 和 Protégé。

1.2.3 基于数据库的存储方式 主要有以下 3 种。

1) 基于关系数据库的存储。由于关系数据库技术已经发展成熟, 关系模式容易建立查询、便于事务处理和备份, 所以国内外关于本体存储方法的研究绝大部分都是基于关系数据库进行的^[14]。大多数的本体存储系统也都以关系或对象—关系数据库管理系统为后台存储, 代表系统包括 Sesame, Jena, 3store 和 Minerva 等^[13]。

本体可以转换成关系模式, 关系数据库的表结构可用来存储本体, Protégé 和 Jena 等工具也支持将本体导入数

据库, 但是利用关系数据库来存储本体也具有一定的弊端。最主要的是模型不匹配的问题: 数据库采用的是相对简单的关系模型, 以二维表的形式来表示数据; 而 OWL 本体有很多基于语义的描述, 其模型是 N 维的^[15]。基于关系数据库的存储需要将复杂的 N 维模型的本体图分解成简单的二维模型的关系存储, 将基于图的查询转换成大量的关系查询, 所以基于关系数据库的本体存储的重点在于对本体—关系的映射模型进行研究, 即进行本体存储模式的研究。基于关系数据库存储本体的主要存储模式有水平模式^[16]、垂直模式^[16]、分解模式^[17-18]和混合模式^[19] 4 种, 其中分解模式又可分为基于类的分解模式和基于属性的分解模式。

关系数据库的 5 种存储模式各有优缺点, 分别从适用条件、结构可读性、结构稳定性和查询效率等几个方面来对这些存储模式进行对比 (见表 1)。

表 1 不同存储模式之间的对比

模式名称		适用条件	结构可读性	结构稳定性	查询效率
水平模式		小规模	较高	较低	较高
垂直模式		中小规模	较低	较高	较低
分解模式	基于类的分解模式	中小规模	较高	较低	较高
	基于属性的分解模式	中小规模	较高	较低	不确定
混合模式		中小规模	不确定	较低	不确定

2) 基于面向对象数据库的存储。面向对象的存储方法以对象数据库作为底层存储, 以对象数据模型为基础的存储模式^[20]。面向对象的方法首先要利用 DTD 或 XML Schema 建立 XML 数据的 OODB 模式, 再按照一定的规则将文档的元素映射为对象数据库中的一系列对象^[21]。面向对象数据库 (OODB) 吸收了面向对象程序设计语言的思想, 如支持类、方法、继承等概念, 直接以对象方式存储, 可避免将本体拆分为三元组^[22]。

目前, 国内外基于面向对象数据库进行本体存储的研究较少, 大多只停留在方法的介绍上。其中, 李常友对基于面向对象数据库的本体存储方法进行了比较深入的研究^[22], 该研究利用了开源工具包 Jena, 对其中的支持关系数据库存储的接口代码进行了修改, 使其与关系数据库的查询关联转移到对象数据库中来, 并且在 Jena 与对象数据库之间建立一个数据处理层, 使只提供基于关系数据库存储方式的 Jena 可以通过中间层处理后将本体持久化的存储到对象数据库中。

3) 基于 Native XML 数据库的存储。XML 数据库是近年的研究热点, XML 数据库主要有 3 种类型^[23]: ①XML

Enabled Database (XEDB), 即能处理 XML 的数据库。② Hybrid XML Database (HXDB), 即混合 XML 数据库。③ Native XML Database (NXDB), 即纯 XML 数据库。其中, 前两者都是在成熟的关系数据库系统上通过增加 XML 映射层, 从而扩充对 XML 数据的处理功能, 其主要还是利用成熟的关系数据库技术。由于大多本体描述语言 (如 RDF, OWL 等) 都是基于 XML 的, 所以已有学者尝试利用 Native XML 数据库进行本体的存储研究。Native XML 数据库以 XML 文档作为其基本存储单位, 数据库内部的数据模型是依据 XML 特性建立的, 利用其对本体进行存储、查询和更新可以提高系统效率, 也能降低实现的复杂度^[15]。

与基于文件系统的存储方式相比, 将本体以 XML 文档的格式存储在 Native XML 数据库中, 不但具有前者所具有的那些优点, 还弥补了前者在查询效率上的不足。而与 RDB 相比, 以 Native XML 格式存储本体也具有一些优势, 如对本体的描述能力较强, 能完整保存本体所具有的语义信息, 并且操作简单方便, 无需进行数据结构等的转换且系统的可扩展性和灵活性较强^[13]。但是 Native XML 数据库的发展技术还不成熟, 而且在事务处理方面的能力也不及关系数据库, 所以目前关于这种存储方法的研究也不是很多。沈洪良提出使用 NXDB Xindice 来存储本体文档, 并根据 XML 数据库的特点设计了一种查询本体的方法^[24]。

1.2.4 专门的管理工具方式 专门的管理工具方式即通过特殊的数据存储模型和映射机制支持对本体进行存储管理。譬如开源软件 OMM 就支持对 RDF, OWL 的存储管理, 还提供各种接口, 可以使用查询语言对 RDF 或者 OWL 进行查询等, 但其模型难以具有普遍性和一般性, 扩展性较差, 不是 W3C 组织关注的发展方向^[13]。

2 几种主要本体存储技术的分析比较

围绕本体存储技术的研究, 从本体存储方法和已有的本体存储系统两个方面分别进行对比分析, 从而了解本体存储技术方面存在的不足及其今后的发展方向。

2.1 本体存储方法的对比分析

针对目前研究涉及的本体存储方法, 从优缺点、研究现状与应用几个方面进行了概括和对比分析, 如表 2 所示。

2.2 本体存储管理系统的对比分析

在对本体存储方法研究的基础上, 国内外学者开始了对本体存储管理系统的研究与开发。最初的一些本体工具只使用内存和文件两种存储介质, 如 Jena 的早期版本只支持内存存储介质, Sesame 的早期版本只支持内存和文件

表 2 本体存储方法的对比分析

存储方法	优点	缺点	研究现状及其应用
内存存储	具有很高的运行效率, 不存在磁盘更新的问题。	处理很少量的数据, 记忆能力差	主要应用于小规模本体的高效存储管理
纯文本方式	简单快捷、管理方便、可扩展性好; 能完整保留语义信息; 具有较好的工具支持	查询性能差; 系统效率较低, 很难适应大数据量的存储	主要用于本体的编辑和建立, 以及小规模的本体存储管理, 在本体存储方面的研究和应用较少
基于数据库的存储方式	基于关系数据库	技术成熟, 较好的事务处理能力和访问机制; 能充分利用 SQL 语言的优势	与本体之间存在模式不匹配问题; 存储模式的设计复杂, 可扩展性和语义支持较差
	基于面向对象数据库	与面向对象技术能很好对接; 不需要对本体进行拆分或转换, 语义完整性较高; 本体查询效率高	目前本体存储管理的主要方式, 是国内外的研究重点; 应用于很多本体存储系统的后台存储
	基于 Native XML 数据库	系统设计简单, 可扩展性好; 能完整保存语义信息; 系统效率较高; 潜力巨大	已有相关研究, 但研究不多, 具有一定的研究潜力; 在本体存储系统中也有部分应用
专门的管理工具方式	实现简单, 查询方便	模型难以具有普遍性和一般性; 扩展性较差	已有部分研究, 具有一定的发展潜力
			只有提及但无相关研究, 不是本体存储的研究方向

存储介质。近年来, 本体存储管理系统的发展也开始支持关系数据库的存储, 例如 Jena 支持市场上常用的 MySQL, Oracle 和 SQL Serve 等关系数据库存储; IBM 公司的 Minerva 和 Snobase 则使用 DB2 数据库实现持久化存储; 而 HAWK 支持基于 Access 和 MySQL 数据库的存储^[11]。

国内也有一些关于本体存储管理系统的研究, 如浙江大学的 DartGrid 研究组就关系数据库和语义网之间的映射进行了研究, 其所开发的 DartMapper 工具允许用户定义从关系数据库到 RDF 本体的映射^[25]。但目前应用比较广泛的本体存储管理系统都来自于国外, 对当前几种主要本体存储管理系统的特点的概括和分析见表 3^[26-32]。

表 3 主要本体存储系统的对比分析

工具	开发语言	存储类型	推理能力	查询语言	支持本体语言
Jena	Java	基于文件/关系数据库持久存储 (支持 PostgreSQL/Oracle/MySQL 和嵌入式数据库 Berkeley DB)	内嵌了基于规则的推理机	SPARQL/RDQL	RDF (S) /DAML + OIL/OWL
Sesame	Java	基于文件/对象—关系/关系数据库 (支持 PostgreSQL/MySQL/ Oracle/ Microsoft SQL Server)	内嵌了基于规则的推理机	SeRQL/ RDQL/ SPARQL	RDF (s)
3store	C 语言	基于对象—关系/关系数据库 (支持 MySQL /嵌入式 Berkeley DB)	内嵌了基于规则的推理机	RDQL/ SPARQL	RDF
HAWK	Java	基于文件/对象—关系/关系数据库 (支持 Access \ MySQL)	支持描述逻辑推理机	RDQL	RDF (s) /OWL
KAON	Java/ Python	基于文件/关系数据库存储 (支持 MSSQL \ MySQL)	支持逻辑编程方法的推理	KAON Query / RDQL/ SPARQL	RDF (s) /FLogic /OWL
SOFA	Java	基于文件/关系数据库存储 (仅支持 MySQL)	提供推理机接口	提供查询接口	RDF (s) /OWL/DAML + OIL
Minerva	Java	基于关系数据库存储 (支持 DB2/ Derby /HSQldb)	内嵌了基于规则/描述逻辑的推理机	SPARQL	RDF (s) /OWL

3 研究的不足与展望

3.1 现有研究存在的不足

现有的研究对本体的存储方法和存储模式进行了很大的改进，提高了本体的管理效率，但是目前的方法仍然存在一些问题。主要体现在：

1) 存储方法的制约。基于文件系统的存储方法受到本体规模的限制，不适用于大规模本体的存储。基于数据库的存储方法中，面向对象数据库和 Native XML 数据库在访问机制和事务处理方面的技术还不够成熟；关系数据库虽然技术成熟，但却与本体存在模式不兼容问题，在一定程度上制约了基于关系数据库的方法处理大规模本体数据的能力。

2) 存储模式的局限。现有基于关系数据库的本体存储研究中，学者们提出了很多不同的存储模式，但是这些模式主要关注的是本体的结构稳定性问题、本体查询效率以及本体支持语义完整性。各种模式都有其应用的适应性，不具有通用性，且这些模式都有其各自的局限性，在设计方面也都存在一定的不规范之处。

3) 对标准的本体描述语言 OWL 的支持不彻底。现有的存储模式大多是根据 RDF 特点来设计的，需要对 OWL 语言进行一定的转换，这会造成一定语义的丢失问题；一些针对 OWL 本体设计的存储方式也对 OWL 语言支持不彻底，大多只支持 OWL Lite 的构词，没有考虑 OWL DL 中增加的本体描述词汇。现有的本体存储系统大多也都只支持 RDF 语言，而对 OWL 语言的支持不够。

4) 缺少对存储优化的研究。使用关系数据库来存储本体的最大优势是可以充分利用已有的成熟关系数据库技术来实现对本体的高效管理和对本体信息的快速访问，然

而目前国内外现有的大多研究都没有对如何利用关系数据库技术优化本体存储这一问题进行深入探讨和实践，从而使得成熟完善的关系数据库技术，如视图、索引、存储过程、触发器、事务处理等，不能在本体存储中充分发挥其高效信息查询和管理等方面的作用。

总体来看，现有的存储方法还不够成熟，本体的存储规模受限，存储模式的通用性较差，对本体描述语言支持不够，缺乏存储的优化研究，等等。基于以上的不足，在未来的研究中应从这些问题入手，寻找出能够改进以上不足的新存储技术。

3.2 未来研究的发展趋势

从现有研究和应用来看，关系数据库和 Native XML 数据库在本体存储方面的优势最为明显。其中，关系数据库技术最为成熟，但却与网状结构的本体存在模式不兼容问题，而对本体结构有很好支持的 Native XML 数据库虽然弥补了关系数据库的不足，却又存在技术不成熟、事务处理能力不强等局限性。所以，若能将关系数据库与 Native XML 数据库两种技术相结合，取长补短，则必能出现一种更适合本体存储研究和应用的新方法。在关系数据库的技术上结合 XML 数据库的特点发展而来的 XML Enabled Database 和 Hybrid XML Database 则正是这两种技术的结合体，其已经在 XML 存储方面展现出一定的优势，只是目前尚未应用于本体存储领域。尤其是 HXDB，它利用系统集成技术，综合 NXDB 的优点，底层并没有一种统一的数据库模型，比 XEDB 具有更好的 XML 支持，能对 XML 数据提供完好的支持^[33]，将会是今后的研究热点和发展方向。Oracle9i (v2) /10g 中引入的 XML DB 技术是 HXDB 的典型代表，同时提供了存储和管理结构化和非结构化数据的独特能力。为此，笔者将会尝试利用 Oracle

XML DB 对本体存储进行进一步的研究。□

参考文献

- [1] 陈光仪. 基于关系数据库的本体存储研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [2] 李华强. 本体存储与查询技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [3] YUANBO G, ZHENGXIANG P, JEFF H. LUBM: a benchmark for OWL knowledge base systems [J]. Web Semantics, 2005, 3 (2): 158-182.
- [4] 仇利克, 姚文琳, 等. 本体垂直存储中的部分索引 [J]. 计算机与现代化, 2008 (11): 73-76.
- [5] 陶皖, 姚红燕. OWL 本体关系数据库存储模式设计 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17 (2): 111-114.
- [6] 黄宇, 付琨, 吴一戎. 大规模目标解译本体存储映射模式的研究 [J]. 计算机工程, 2009, 35 (15): 79-81.
- [7] WANG E, KIM Y S, KIM H S, et al. Ontology modeling and storage system for robot context understanding [C] // Proceedings of the 9th International Conference of Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems (KES2005). Australia, Melbourne, 2005: 922-929.
- [8] KHALID A, SHAH S A H, QADIR M A. OntRel: an ontology indexer to store OWL-DL ontologies and its instances [C] // Proceedings of the 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SOCPAR2009). Malaysia, Malacca, 2009: 478-483.
- [9] KIM J, JEONG D, BAIK D. Performance evaluation of XPath form-based ontology storage model regarding query processing and ontology update [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology (ICCHIT2008), KOR, Busan, 2008: 1067-1074.
- [10] BUKATOVIĆ M, HORÁK A, RAMBOUSEK A. Which XML storage for knowledge and ontology systems [C] // Proceedings of the 14th International Conference of Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems (KES2010). UK, Cardiff, 2010: 432-441.
- [11] KIRYAKOV A, OGNYANOV D, MANOV D. OWL IM—a pragmatic semantic repository for OWL [C] // Proceedings of International Workshop on Scalable Semantic Web KnowledgeBase Systems (SSWS2005). USA, New York, 2005: 182-192.
- [12] KOPEAN J, REGLI W C. DAML JessKB: a tool for reasoning with the semantic Web [C] // Proceedings of International Semantic Web Conference (ISWC2003). USA, Sanibel Island, 2003: 628-643.
- [13] 李洁. OWL 本体存储模式研究 [J]. 中国科技信息, 2007 (21): 118-120.
- [14] 鲍文, 李冠宇. 本体存储技术研究 [J]. 计算机技术与发展, 2008, 18 (1): 146-150.
- [15] 乐超, 王晓军. 本体存储技术研究 [J]. 电信快报, 2010 (7): 33-36.
- [16] AGRAWAL R, SOMANI A, XU Y. Storage and querying of e-commerce data [C] // Proceedings of the 27th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB2001). Italy, Roma, 2001: 149-158.
- [17] HONDJACK D, PIERRA G, BELLATRECHE L. OntoDB: an ontology-based database for data intensive applications [C] // Proceedings of the 12th International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA2007). Thailand, Bangkok, 2007: 497-508.
- [18] ABADI D J, MARCUS A, MADDEN S R, et al. Scalable semantic Web data management using vertical partitioning [C] // Proceedings of the 33rd International Conference on Very Large Database (VLDB2007). Austria, Vienna, 2007: 411-422.
- [19] PAN Z, HEFLIN J. DLDB: extending relational database to support semantic Web queries [C] // Proceedings of the 1st International Workshop on Practical and Scalable Semantic Systems. Santa, Barbara (PSSS2003). USA, Sanibel Island, 2003: 43-48.
- [20] 王富军. 本体管理关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [21] 施伟斌, 孙未来, 施伯乐. XML 数据的结构化处理方法 [J]. 计算机研究与发展, 2002, 39 (7): 819-826.
- [22] 李常友. 面向对象数据库在本体存储中的应用研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [23] 冯建华, 钱乾, 等. 纯 XML 数据库研究综述 [J]. 计算机应用研究, 2006 (6): 1-7.
- [24] 沈洪良, 朱国进. 基于 Xindice 的本体存储查询研究 [J]. 计算机应用研究, 2005 (12): 36-38.
- [25] Semantic Web development in China [EB/OL]. <http://www.w3.org/2008/Talks/WWW2008-SW-China.pdf>, 2008.
- [26] 鲍文. 面向语义网的本体存储管理技术研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [27] 余翔宇. 语义桌面上的本体存储研究 [J]. 计算机科学, 2008, 35 (8): 158-160.
- [28] 雷霄. 语义网格中本体的管理策略 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [29] HARRIS S, SHADBOLT N. SPARQL query processing with conventional relational database systems [C] // Proceedings of WISE 2005 International Workshops (WISE2005). USA, New York, 2005: 235-244.
- [30] ZHOU J, MA L, LIU Q L, et al. Minerva: a scalable OWL ontology storage and inference system [C] // Proceedings of the 1st Asian Semantic Web Conference (ASWC2006). China, Beijing, 2006: 429-443.
- [31] HAWK 1.1 beta release [EB/OL]. <http://www.cse.lehigh.edu/~zhp2/hawk/readme.html>.
- [32] Intelligent data system lab [EB/OL]. http://ids.snu.ac.kr/wiki/Ontology_System.
- [33] 毛冰. 基于 Oracle XML DB 的学科知识库设计与实现 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

作者简介: 傅柱, 男, 1990 年生, 博士生。

王曰芬, 女, 1963 年生, 博士, 教授。

孙铭丽, 女, 1988 年生, 硕士生。

收稿日期: 2013-03-15