

# 语义化互联网的关键技术

Research on Key Techniques of Semantic Web

李青山 陈 平

(西安电子科技大学软件工程研究所 西安710071)

**Abstract** Semantic Web is the next generation of the Web, which characterizes machine-understandable and machine-operable information. In semantic Web, machine reasoning will be ubiquitous and devastatingly powerful. The final goal of semantic Web is validation, inference, proof, formalization of Web knowledge. The development of semantic Web means the evolving of multiplayer languages and technologies of machine-understandable and machine-operable information in the Web. Based on the analysis of the hierarchical architecture of semantic Web, this paper discusses deeply several key technologies about semantic Web, such as data model, type system, ontology modelling, logical exchange model and underlying technologies. Finally, the research status and direction of semantic Web are summarized.

**Keywords** Semantic Web, RDF (Resource Description Framework) data model, Ontology, Ontology interchange language

## 1 引言

互联网的发展经历了三个阶段,第一代互联网以静态的HTML页面信息发布为特点,促进以Web为媒介,实现人与人之间信息交流和共享。第二代互联网以提高Web内容发布和组织能力为目标,以Web内容的机器动态生成为特点,使得人与人之间不仅可以在互联网上实现信息互通,人与机器也可以互动交流。互联网主要通过不同层次上的标准协议或语言来实现人与人、人与机器、机器与机器之间的互操作,但前两代的Web主要以TCP/IP和HTTP/HTML为基础支持人与人、人与机器、机器与机器之间的语法上的互操作,很少也很难支持语义互操作。这就形成了第三代互联网发展的背景。第三代互联网亦被称之为“语义化互联网(Semantic Web)”<sup>[1]</sup>,它以Web中的信息是机器可处理信息为目标,以机器可以理解互联网中的信息和知识以及实现不同机器之间文档或数据语义互操作为特点<sup>[2]</sup>,进而实现互联网信息不仅可以动态生成,而且可以进行语义校验、机器推理、形式证明,真正让Web形式化和语义化。

Web语义化后,将促使诸如信息代理、搜索代理、信息过滤器等智能设备从以前各自独立工作到协作工作,实现相互之间的基于知识的互操作。语义化互联网主要应用领域涉及到资源发现中查找引擎;网站页面或图书组织系统中的描述内容和内容关系的编册目录<sup>[3]</sup>;在智能软件代理中促使知识共享和交换;在一个逻辑文档的多个页面中实现内容编序;在网页或其他领域中描述智能化的属性权限;电子商务中的信息交换和共享等等<sup>[4]</sup>。

语义化互联网的发展,本质上就是不同层次上表达机器可理解、可处理的信息的语言的发展。TCP/IP协议给出了物理上字节流传输的统一标准,HTTP和HTML提供了超文本文档传输和呈现标准方式。XML通过定义特定领域的标记为不同应用系统之间定义可以实现内容交换和共享的文档结

构,为Web上信息互操作提供简单的、功能强大的语法上的标准<sup>[5]</sup>。但是在表达Web上的知识方面,XML不具有提供信息语义互操作的能力。RDF为描述Web上的资源提供了一种元数据表达标准<sup>[6]</sup>。基于RDF的有向标记图数据模型,可以表达Web上各种资源之间内在的语义关联,同时,在推理规则的支持下,可以进行这些元数据之间的关系推理,产生新的知识,真正实现语义化互联网的目标。在表达语义方面,RDF提供了一种统一的数据模型,这种模型为Web上的知识表达、知识推理和知识校验提供了底层的标准。同时,RDF Schema<sup>[7]</sup>为RDF数据模型提供了类型系统支持,可以定义不同领域的核心词汇及它们之间的关系,为领域知识的表达、共享和交换提供了语义支持。由于RDF和RDFS都可以用XML语法来表达,这也从语法上保证了Web上信息互操作的标准化。

要实现语义化互联网的目标,即信息机器可理解和处理以及信息在语义层次上的互交换和互操作,仅仅有XML、RDF和RDFS底层语言支持是不够的。在这些语言之上,还应该表达领域模型以及推理和逻辑的语言或者标准。传统知识表示领域中的本体(Ontology)概念<sup>[8]</sup>及其相关模型和技术可以映射到Web中来,使得互联网更加逻辑化。向Web文档加入逻辑,可以支持使一类文档演绎出另一类文档的规则,可以支持基于一套约束规则的文档语义检查以及支持从语义级查询而不仅仅是字符匹配。本体一般定义为“特定领域中共享的一套概念的表达”,它需要人们理解和应用系统之间进行交流的领域以达成共识的理解。当前在逻辑层语言和标准的研究是语义化互联网研究的主要方面。

## 2 语义化互联网体系结构

语义化互联网是由多种语言和应用形成的一个层次化的体系结构。图1描述了语义化互联网的整体架构<sup>[9]</sup>。这个层次化架构从最基础的URIs和Unicode开始,由XML提供

李青山 博士研究生,讲师,主要研究领域为互联网应用模型、网络语言、面向对象软件工程和逆向工程。陈平 博士生导师,教授,主要研究领域为电子信息系统软件开发理论与技术、软件体系结构和面向对象软件工程。

Web 上信息共享和交换的语法互操作性支持,而数据的语义互操作性 XML 无法很好地实现<sup>[10]</sup>,RDF 充当着一般性的公共模型,以便各种不同类型的应用能映射到这种模型上,支持语义级的互操作。但正是因为一般,所以也简单,没有 RDF 数据模型之上的其他层次语言和标准的支持,RDF 本身没有很强的功能。RDF 定义了基本的断言以及关于断言的断言,但关于表达领域概念的词汇,只能借助于 RDF Schema。RDFS 定义了一个类型系统以支持 RDF 数据模型来表达不同领域的词汇。在模式层上,定义了本体层,用本体以及本体之间语义关系来描述一个领域的概念化体系,这种概念化体系具有 Web 上应用系统之间的概念共享性、公共可理解性以及抽象性(形式化描述),但是它不具有基于这种关系之上的可计算能力。逻辑层在本体层之上,使得互联网上新的知识可以在已有知识和推理规则基础上由演绎系统推导出来。数字签名跨越了这个层次化结构。通过数字签名,在每一个阶段,上层的内容都来自于底层的标记为可信的结果。数字签名不仅对数据提供可信度的支持,对本体和演绎推论也提供可信度支持,这保证了整个 Web 的可信性。数字签名对语义化互联网和信息交换中的 XML 应用都至关重要。在具体实现过程中,数字校验系统一般与推理引擎绑定在一起。

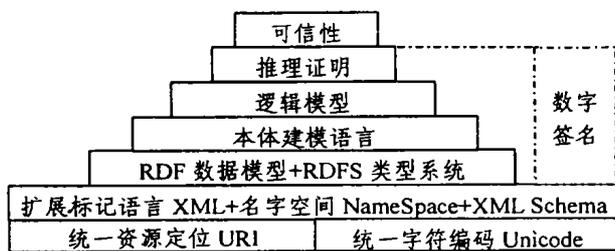


图1 语义化互联网整体架构

### 3 语义化互联网的数据模型 RDF(S)

#### 3.1 RDF 数据模型研究背景

互联网最初作为一种人类信息消费媒介服务于人与人之间的人可理解的信息交流,这类信息只能在机器上呈现而机器无法理解和做深入的语义处理。由于互联网中所有的信息定位都可以通过 URI 来描述,它是一类元数据。通过对元数据的描述和处理来理解和处理互联网中大量的有一定语义关联的信息资源是自动处理这些信息的一种方法和手段<sup>[11]</sup>。而且,数据与元数据的界定在不同场合下可以互换,这也为互联网中一般数据的机器自动处理提供了方向。

RDF 是一种描述和交换元数据的框架,它提供了在互联网中交换机器可理解信息的应用系统之间的互操作性,强调了对互联网资源的自动处理。RDF 主要目标是为了解决互联网中信息的语义化和机器可理解和处理化,它支持对元数据语义的描述以及元数据之间的互操作性,在应用中也支持基于推理的知识发现而不是全文匹配检索。在将来的发展中,RDF 会加强对资源发现的统一查询能力的支持。一般而言,RDF 会为在互联网中创建、操纵和查找机器可理解的数据提供基础的数据模型支持,以促进把互联网转换为机器可处理的信息库。

#### 3.2 RDF 数据模型及其类型系统 RDFS

RDF 基础模型通过描述资源的属性来表达互联网中数据之间的关系。RDF 数据模型以语法无关的形式来描述 RDF

表达式。由于同一个数据模型可以用多种语法形式来表达,这就意味着在 RDF 模型中同一个表达式可以有多种语法表达方式。RDF 数据模型的三种描述方式(标记有向图、三元组、XML)是完全等价的。考虑到互联网的特性,一般用 XML 语法来描述 RDF 数据模型。RDF 数据模型的核心概念主要包括三类对象,即资源、属性和陈述句。在 RDF 表达式中,所有被描述的对象都被称之为资源。一个资源可以是一个页面、一组页面、一个文档或文档中部分信息。资源用 URI<sup>[12]</sup>来描述。属性描述了特定资源的特性以及和其他资源的关系。每个属性定义了它能取得基本的值、它能描述的资源类型以及与其它属性的关系。在 RDF 模型中,属性是第一位的,不象大多数对象建模语言中属性仅仅是类的属性。尽管 RDF 中也存在类的概念,但属性能独立于类而被定义和使用。属性以及属性值都可以是资源,都可以拥有自己的属性和属性值,这就为描述复杂数据提供了可扩充的基础。

RDF 数据模型定义了非常有限的基本的建模原语,它既没有给出定义新的属性词汇的机制,也没有给出定义这些属性以及资源之间新的关系的机制。RDF Schema 不仅能定义资源的属性词汇,还能定义这些属性词汇可以描述那些类型的资源以及其取值的范围约束。从职能范围上讲,RDFS 本身并没有定义与应用领域有关的词汇,它仅仅是提供了一组核心概念(类型系统)和一套机制,这种机制为后续的进一步领域建模提供基础支持。本质上讲,RDFS 是一套模式规范语言。它不仅定义了可以扩充到不同领域的核心概念以及这些概念的层次和实例关系,充当元模型,而且提供了扩充机制,可以由核心模型中的层次化类型系统派生出特定领域的主要词汇以及词汇关联和附加在这些词汇本身以及词汇关联上的约束,进行领域建模,形成可以定义和描述特定的一类应用领域的领域建模语言,充当模型。这种建模语言可以以实例化的形式描述具体应用领域中的本体、本体关联以及相关约束。

#### 3.3 RDF 模型与 E-R 模型的关系

RDF 既是实体-关系模型的基础,又比实体-关系模型应用更普遍。在数据建模方面,RDF 可以看作 Web 上开放的 E-R 模型。在典型 E-R 模型中,包含有实体类型和实体之间的各种关系<sup>[13]</sup>。RDF 模型中,只不过实体关系是第一位的,而不是实体。实体关系通过 URI 来定位实体,这使得互联网中的任何人可以说关于任何事情的任何事情,这是互联网的根本特征。由于 RDF 是以属性(property),即实体关系,为第一位的,这就意味着两个实体本身的存储可以和实体之间任何关系的存储分开。这与实现 E-R 模型的面向对象系统不同。在 OO 系统中,实体属性是与实体一起存储在表示实体的对象内部的,定义类的同时也隐含定义了它的属性。

#### 3.4 RDF 对互联网中语义互操作性的支持

XML 数据交换格式的标准化为互联网中数据描述和互交换提供了一定程度的支持。尽管 XML 允许用户定义含有领域信息的标记,并且基于 XML 树形结构,应用系统之间可以对不同数据源的数据进行访问和操作,但标记规则仅仅给出了语法定义,并没有界定标记之间的语义关联以及这种语义可以被不同数据源的应用系统理解,要真正实现互联网中信息语义的共享和互交换,还需要更高层次的标准。RDF 数据模型提供了这一支持。

RDF 数据模型的语义单元通过对象-属性对来提供,存在着一种描述能力。一个领域中的词汇和词汇关联可以用 RDF 描述,相应的约束也可以反映在 RDF 中,这为数据的语

义推演提供了基础,可以帮助多个信息源之间互相理解信息。从语义建模角度看,XML 是一种过程性语义,一个表达式的语义需要在一个过程执行结束后,其语义才能表达出来。RDF 是一种说明性语义,一个表达式的语义通过映射到另一个已经明确定义的词汇来实现语义解释。一般来讲,说明性语义比过程性语义能更好地表达信息和知识的共享与扩充。

互联网环境中不同信息源之间信息集成和信息交换已经越来越重要,在语义集成方面 RDF 比 XML 能提供更好的语义互操作性支持,而 XML 主要可用来提供语法互操作性支持。两者在不同层次都对互联网的语义化进程作用重大。

## 4 语义化互联网的形式化和逻辑化

### 4.1 本体对互联网语义集成的支持

计算机系统的全球网络化使得数据、信息和知识的交换支持机制至为重要。本体支持对一个领域共享的和公共的理解,促使这种共识能在人们之间以及应用系统之间进行交流。在许多领域的信息交换处理方面,本体将扮演重要的角色。已经研究并应用本体的领域涉及到知识工程、自然语言处理、协作信息系统、智能信息集成和知识管理。当前本体研究的进展可以参考文[8,14~19]。在信息交换的结构和语义描述方面,本体能提供共享的和公共的领域结构,促进信息机器可理解的语义呈现,实现信息自动处理。

在互联网中信息集成和交换包括技术集成、语法集成和语义集成三个层次。技术集成的任务涉及到网络技术与通信协议,保证不同的信息源能在物理层上通信。互联网已经建立了稳定的用于交换大量信息的基础架构,这些共享的和稳定的协议(TCP/IP, HTTP, FTP 等)使得来自于 Web 页面、Web 连接的数据源以及互联网环境下运行程序的信息能容易被访问和操作。信息源彼此之间要交换信息,它们必须遵守公共的信息交换语法规则。在互联网中,HTML 和 XML 提供完成这一目的的语法集成统一语法标准。遵守共同的语法规则保证了信息的统一交换格式,但不同信息源中含有特定语义的词汇之间的映射也必须也有公共的和共享的协议或规则来保证,最终才能达到不同信息源之间信息的语义级的集成。本体正是提供了这样一种机制,为信息之间的高层次语义级的集成提供了基础的概念化体系,基于这种特定领域中共识的词汇体系,信息源之间的信息可以实现完全的共享和交流。

本体的概念从知识表示和知识获取的研究中提出,它当初提出的目的是为了促使知识的共享和重用<sup>[20]</sup>。从内涵角度看,本体是一个概念化的规范。从实用角度看,一个本体是一套有正式词汇的定义,这个定义可以被大家都接受和共享,以便于信息的理解和交流。从结构上看,本体把实体的名字和对其描述关联在一起,它往往和层次化的包容关系对应,而且,关于本体的描述也包括一些约束规则,用于完整地描述这一套概念体系。

### 4.2 本体交换语言

既然本体可以实现信息源之间真正的语义集成,但是本体如何定义和描述?用于描述和呈现本体的建模原语如何定义?本体本身的语义如何定义?本体之间交换的公共协议如何定义?这些问题的解决需要本体描述语言。

OIL 是一种基于 XML 和 RDF 标准之上用于表达本体的推理层语言<sup>[21,22]</sup>。它是在描述逻辑、框架和互联网标准协议的基础上构造的。由于它建立在描述逻辑 DL 基础上,本身能提供形式化语义描述和高效的推理支持。基于本体本身的

信息共享和公共性特点,本体建模语言应用到互联网中信息描述和交换是一个自然的思路。如果用 OIL 来完成语义化互联网中逻辑层所要求的功能,就可以把 OIL 本身所具有的丰富的框架原语和强大的语义表达能力运用到互联网中,提高 RDF 模型在表达语义和支持推理方面的不足。

OIL 与语义化互联网的结合点存在于可以把 OIL 作为 RDFS 类型系统的扩充,即把 OIL 作为 RDFS 的一个应用实例。RDFS 提供了一套机制用于定义表达描述互联网资源的元数据的词汇、结构和约束规则,但它没有定义这些建模原语的形式化语义,因此这些原语的表达力不足以用到语义化的本体建模和推理。在 RDFS 模式层上,需要定义由更强表达语义能力的语言来描述和交换互联网中的语义信息。在语义化互联网的层次模型中,模式层之上应该是逻辑层,用于提供语义和推理支持。OIL 通过 RDFS 整合到逻辑层,这种结合充分地把 OIL 的能力集成到基于 RDF 模型的语义化互联网环境中,为互联网的语义化提供了更高层次的支持。

OIL 对语义化互联网的形式化支持基于其三大支柱:描述逻辑的形式化语义和高效推理支持、框架的丰富的建模原语以及互联网中用于语法交换的标准协议。描述逻辑用概念和角色约束描述知识<sup>[23,24]</sup>,作为一种术语逻辑,它形成了一类功能强大的基于逻辑的知识表示语言。描述逻辑来自于早期的语义网络的工作并且为其定义了形式化语义。描述逻辑试图引用具有强大表达能力的一阶逻辑的一部分能力以实现高效推理过程并具有可决定能力<sup>[25]</sup>。已经实现的系统包括 BACK, CLASSIC, CRACK, FLEX, K-REP, KL-ONE, KRIS, LOOM 以及 YAK。描述逻辑的一个显著特点在于:能以描述的形式定义概念(类),这些描述指明了对象的一些满足于概念约束的属性。这些描述用语言来表达,包含对象的构造关联以及基于角色的二元关系的限制。尽管描述逻辑的理论复杂性很高,但仍然有一些 DL 语言的实现<sup>[26~28]</sup>,比如 DLP 和 FaCT 系统<sup>[29]</sup>。OIL 继承了描述逻辑的形式化语义和推理支持。在 OIL 中,包容关系是可判定的,利用 FaCT,还能实现基于此的高效推理。OIL 并入了基于框架系统中基本的建模原语到它的语言中,它基于类、属性等概念。一个框架提供了建模某一领域的某一方面的某种环境。建模原语和它们的语义仅仅是一个本体交换语言的一个方面,我们必须给出这种交换语言的语法规则。在互联网环境中要实现本体的信息交换,这种语言的语法也必须采用已经存在的表示信息的互联网标准。XML 语法为互联网中的信息交流提供了最基础的数据格式的语法支持。加上 RDF,互联网的标准为 OIL 中本体定义和交换提供了可达成共识的支持。

## 5 语义化互联网研究现状及发展方向

语义化互联网的研究近几年才刚刚起步,当前研究主要定位在两点。第一,以 RDF 数据模型和 RDFS 类型系统为基础,研究互联网中元数据和数据的定义、共享、交换以及基于语义的互操作实现。这个定位点包括了语义化互联网的层次化体系结构中下面的几层,涉及到 TCP/IP、HTTP、URI、Unicode、Namespace、HTML、XML、RDF 和 RDFS。这些都为互联网中信息互交换和互操作提供了不同层次标准的支持。通过 RDFS 核心类型系统,可以扩充形成若干与领域相关的个体建模语言,进行领域建模,为实现互联网中特定领域和特定应用之间的应用层次上的互操作打下基础。为了实现互联网的真正语义化,在 RDF(S)层次之上,需要引进逻辑、证明

和推理。第二个研究定位点在以本体为基础,把人工智能和知识表示中比较成熟的基于本体的信息描述、交换以及逻辑推理运用到互联网中来,让这些相对比较成熟的关于语义的研究方法、技术和理论可以借鉴到互联网的语义化过程中,促进对互联网语义化的形式化研究。互联网层次化体系结构中高的几个层次的发展要有成果可能需要10年左右,当前主要工作在本体层,而实际面临要解决的问题涉及到:用 XSLT 从 XML 生成 RDF;RDF 收敛;RDF 智能化检索;面向 RDF 的一般的和特殊的 GUIs<sup>[30]</sup>等。

## 参考文献

- Berners-Lee T, Fischetti M. Weaving the Web: The Original Design and Ultimate Destiny of the World Wide Web by its Inventor. Harper, San Francisco, 1999
- Heflin J, Hendler J. Semantic Interoperability on the Web. Proc. Extreme Markup Languages 2000, Graphic Communications Assoc., Montreal, 2000. 111~120
- Melnik S, Garcia-Molina H, Paepcke A. A Mediation Infrastructure for Digital Library Services. In: Proc. of the ACM Digital Libraries Conf., June 2000
- Lassila O. Web Metadata: A Matter of Semantics. IEEE Internet Computing, 1998, 2(4): 30~37
- Khare R, Rifkin A. XML: A Door to Automated Web Applications. IEEE Internet Computing, 1997, 1(4): 78~87
- Weibel S. Metadata: The Foundations of Resource Description. D-Lib Magazine, July 1995. <http://www.dlib.org/dlib/July95/07weibel.html>
- Brickley D, Guha R V. Resource Description Framework (RDF) Schema Specification 1.0, W3C Candidate Recommendation, World Wide Web Consortium, 2000. <http://www.w3.org/TR/rdf-schema>
- Uschold M, Gruninger M. Ontologies: Principles, Methods and Applications. The Knowledge Engineering Review, 1996, 11(2): 93~136
- Berners-Lee T. Semantic web road map. Internal note, World Wide Web Consortium, 1998. <http://www.w3.org/DesignIssues/Semantic.html>
- Decker S, et al. The semantic web - on the respective roles of XML and RDF. IEEE Internet Computing, 2000
- Weibel S. Metadata: The Foundations of Resource Description. D-Lib Magazine, July 1995. <http://www.dlib.org/dlib/July95/07weibel.html>
- Berners-Lee T, Fielding R, Masinter L. Uniform Resource Identifiers (URI): Generic Syntax, Internet Draft Standard RFC 2396, Aug. 1998; [www.isi.edu/in-notes/rfc2396.txt](http://www.isi.edu/in-notes/rfc2396.txt)
- Barker R. Entity Relationship Modelling. Addison-Wesley Pub Co; ISBN: 0201416964, 1990
- van Heijst G, Schreiber A T, Wielinga B J. Using Explicit Ontologies in KBS Development. Int. Journal of Human-Computer Studies, 1997, 46: 293~310
- Studer R, Benjamins V R, Fensel D. Knowledge engineering: Principles and methods. Data and Knowledge Engineering (DKE), 1998, 25(1-2): 161~197
- Benjamins V R, Fensel D, Decker S, Gomez-Perez A. (KA) 2: Building Ontologies for the Internet: a Mid Term Report. International Journal of Human-Computer Studies (IJHCS), 1999, 51: 687~612
- Perez A G, Benjamins V R. Applications of Ontologies and Problem-Solving Methods. AI-Magazine, 1999, 20(1): 119~122
- Fensel D, et al. OIL & UPML: A Unifying Framework for the Knowledge Web. In: Proc. of the Workshop on Applications of Ontologies and Problem-solving Methods, 14th European Conf. on Artificial Intelligence ECAI'00, Berlin, Germany Aug. 2000. 20~25
- Heflin J, Hendler J. Dynamic ontologies on the web. In: Proc. of the Seventeenth National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-2000), AAAI/MIT Press, Menlo Park, CA, 2000. 443~449
- Gruber T R. A translation approach to portable ontologies. Knowledge Acquisition, 5(2): 199~220
- Horrocks I, et al. OIL: The Ontology Inference Layer. [Technical Report IR-479]. Vrije Universiteit Amsterdam, Faculty of Sciences, Sept. 2000. <http://www.ontoknowledge.org/oil/>
- Bechhofer S, et al. An Informal Description of OIL-Core and Standard OIL: A Layered Proposal for DAML-O. [www.onto-knowledge.org/oil/download/dialects.pdf](http://www.onto-knowledge.org/oil/download/dialects.pdf)
- Brachman R J, Schmolze J G. An overview of the KL-ONE knowledge representation system. Cognitive Science, 1985, 9(2): 171~216
- Baader F, et al. Profitlich: Terminological knowledge representation: A proposal for a terminological logic. Technical Memo TM-90-04, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI), 1991
- Nebel B. Artificial intelligence: A computational perspective. In G. Brewka, editor, Principles of Knowledge Representation, Studies in Logic, Language and Information. CSLI publications, Stanford, 1996
- Borgida A, Patel-Schneider P F. A semantics and complete algorithm for subsumption in the CLASSIC description logic. J. of Artificial Intelligence Research, 1994, 1: 277~308
- MacGregor R M. A description classifier for the predicate calculus. In: Proc. of the Twelfth National Conf. on Artificial Intelligence, Seattle, Washington, USA, 1994. 213~220
- Horrocks I, Patel-Schneider P F. Optimising description logic subsumption. Journal of Logic and Computation, 1999, 9(3): 267~293
- Horrocks I. Benchmark analysis with FaCT. In: Proc. TABLEAUX 2000, vol. 1847 of LNAI, 2000
- Berners-Lee T. Semantic web road map. Internal note, World Wide Web Consortium, 1998. <http://www.w3.org/DesignIssues/Semantic.html>

(上接第93页)

的一个关键应用,被喻为第三代网络革命,尤其是对于分布式企业。P2P 技术将实现互联网的大部分潜力,将互联网从一个基于文件的网页和电子邮件网络转变成一个动态的、颗粒状网络,在网络中,特定的信息组件可被有效地放置和分享。P2P 网络的应用对于企业内、外组织机构间的协调与合作将会产生巨大的影响。P2P 计算革命正在进行,而且已经初具规模。开创性 P2P 应用的成功证明,分布式计算对于广大用户而言具有很大的吸引力,并对应用程序开发人员而言具有众多好处。作为下一代 Web 一部分的 P2P 网络,存在许多挑战但更有许多机会。

## 参考文献

- Clark D. Face to face with peer-to-peer networking. Computer, January, 2001. 18~21
- Fox G. Peer-to-peer Networks. IEEE COMPUTING IN SCIENCE & ENGINEERING. MAY/JUNE 2001. 75~77
- [www.w3.org/2001/sw](http://www.w3.org/2001/sw)
- [www.peer-to-peer.org](http://www.peer-to-peer.org)
- [www.openp2p.com](http://www.openp2p.com)
- Iwao T. A framework for the next generation of E-commerce by peer-to-peer contact: virtual private community. Tenth IEEE International Workshops on, 2001. 340~341