

doi: 10.7690/bgzdh.2015.07.014

基于 C⁴ISR 系统能力需求的语义 Web 服务发现技术

牛小星, 王智学, 张婷婷, 禹明刚
(解放军理工大学指挥信息系统学院, 南京 210007)

摘要: 针对传统 Web 服务体系结构不能完全满足部队构建分布式复杂 C⁴ISR 系统需求的问题, 首先构建了面向服务的 C⁴ISR 系统能力需求核心元素及关系模型, 之后提出一种基于结构化层次覆盖网的语义 Web 服务体系结构, 定义了体系结构中的相关本体。然后结合层次覆盖网的优点, 描述了其工作原理, 并基于 OWL-S 研究了 Web 服务功能匹配算法。最后对比了与注册中心结构的服务查询算法的效率。分析结果表明: 该方法明显提高了服务查询的效率, 有一定的先进性。

关键词: 能力需求; Web 服务; 服务注册中心; 服务簇; 本体

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Semantic Web Services Discovery Technology Based on C⁴ISR Capability Requirements

Niu Xiaoxing, Wang Zhixue, Zhang Tingting, Yu Minggang

(Institute of Command Information Systems, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Traditional Web services architecture cannot meet the requirements to construct distributed and large-scale C⁴ISR systems for the army, in order to solve this problem, the paper first constructs a model of service-oriented C⁴ISR system capability requirements core elements and relationships. Then, it proposes a semantic Web services architecture based on structured hierarchical overlay network, it also defines relative ontology in the architecture. After that, combined with advantages of hierarchical overlay network, the paper describes the service discovery process, studies Web services functional matching algorithm based on OWL-S description. Finally, it compares service discovery efficiency with registry center structure. The result shows that the method improves service discovery efficiency significantly, and has some advantages to some extent.

Keywords: capability requirements; Web service; service registry; service cluster; ontology

0 引言

C⁴ISR^[1](command, control, communication, computing, intelligence, surveillance, resonance)系统能力需求是指系统需求分析人员从作战的使命任务出发, 将使命任务分解为作战任务, 为有效完成这些任务, 要求 C⁴ISR 系统应该具备的能力集合^[2]。能力需求属于一种业务与系统交叉的用户需求, 它关注于目标系统在所处环境中支持用户实现使命所必须具备的素质和技能。与一般的信息系统需求不同的是, 能力需求不仅要描述系统功能及运行环境约束, 而且关注能力执行的效果, 即是否达到了预期的目标。

国外研究机构提出了基于能力的规划方法^[3]对国防装备系统的规划及需求开发过程产生了影响。英军的国防部体系结构框架 MoDAF1.2^[4]率先引入战略视角, 用以描述系统能力。为描述和支持“网络中心战”的作战概念, 实现从“基于威胁”转向“基于能力”转变的未来战略, 针对 DoDAF1.5^[5]

在描述网络化作战过程中存在的不足, 美国国防部在 2008 年 12 月发布了 DoDAF2.0^[6], 作为 C⁴ISR 系统体系结构描述框架, 用于规范 C⁴ISR 系统体系结构描述框架的规范文件, DoDAF2.0 将能力、服务等新元素和相关视图加入体系结构描述中。

Web 服务作为一种新型的分布式构建模型, 以其完好的封装性、松散耦合、使用标准协议规范和高度可集成性获得了广泛的应用^[7-8]。

但是 C⁴ISR 系统在技术体系结构、功能结构和安全机制等方面, 远比民用企业信息系统复杂。直接在商业 Web 服务平台上构建 C⁴ISR 系统应用还存在以下问题: 1) 当前服务注册中心由于采用集中式索引结构, 存在单点故障和服务器成为性能瓶颈等方面的不足, 无法适应网络中心战的发展趋势; 2) 商业 Web 服务没有使用 C⁴ISR 领域词汇来更加清晰描述问题领域, 也就无法基于特定领域进行建模, 无法使用特定领域语言来描述系统; 3) 由于缺乏对服务资源语义方面的描述, 基于关键词的索引服务发现与查询的查全率和准确率比较有限。

收稿日期: 2015-03-16; 修回日期: 2015-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61273210); 国防装备预研基金(51306010202)

作者简介: 牛小星(1985—), 男, 河南人, 博士生, 从事 C⁴ISR 理论、软件工程、形式化验证研究。

针对传统 Web 服务体系结构不能完全满足部队构建 C⁴ISR 系统要求的问题,笔者提出一种基于结构化层次覆盖网的语义 Web 服务体系结构。

1 面向服务的 C⁴ISR 系统核心元素及关系

笔者对 C⁴ISR 系统核心元素及关系进行了面向服务的扩展,增加了服务相关概念及关系。通过将 C⁴ISR 系统中各类指控系统、武器装备系统、情报侦察系统、后勤保障系统等各类资源进行服务化封装,以服务的形式分布于网络中,进而实现服务的可发现、可组合、可复用的特性,达到面向服务构建 C⁴ISR 系统体系结构的目的。

文中面向服务的 C⁴ISR 体系结构以 C⁴ISR2.0^[1]和 DoDAF2.0^[6]为一般体系结构的基本框架,以 DoDAF Meta-Model(DM2)为体系结构元概念模型,从中选取了描述目标、能力、活动以及服务等相关概念为主要元素,形成面向服务的 C⁴ISR 系统核心元素及关系,如图 1 所示。

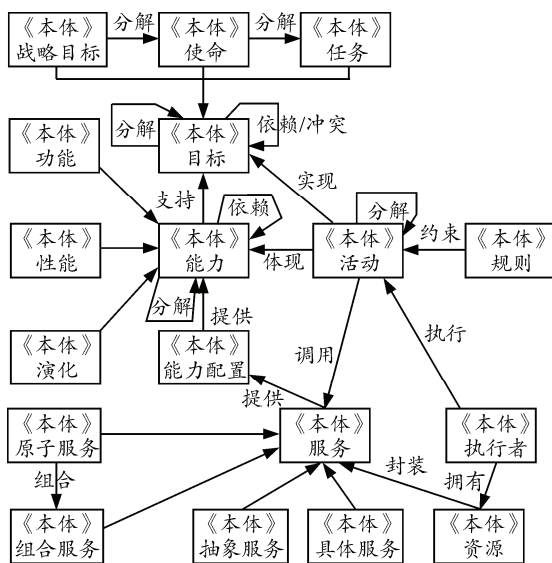


图 1 面向服务的 C⁴ISR 系统核心元素及关系

2 Web 服务体系结构设计

只有设计高效的 Web 服务体系结构,快速而准确地找到所需的 Web 服务,才能使 Web 服务得以更合理高效的应用,因此 Web 服务体系结构设计是 Web 服务关键技术之一。当前最主要的 2 种 Web 服务体系结构是注册中心结构和点对点结构。

注册中心结构的主要优点是服务发现仅依赖于单个服务注册中心,服务发现过程简单。但是存在单点失效、带宽瓶颈、容错性低、负载不均衡、可伸缩性差等问题。而且由于服务的查找算法是根据服务名进行关键字匹配的,使得由 UDDI 注册中心

查找出的服务,往往不能满足用户的需求。

点对点结构不依赖于集中的注册中心来管理 Web 服务。在这种结构下,Web 服务作为节点被置于一个对等网络中。在 Web 服务发现阶段,一个请求者向其相邻节点发送请求以寻找一个合适的 Web 服务。服务发现可以采用洪泛查询或者范围受限洪泛查询,但系统存在着可扩展性和搜索的完整性之间的矛盾。

国防科大刘志忠^[9]提出一种双层 P2P 结构的语义服务发现模型,但是该模型需要在服务查全率和发现响应时间之间折衷。

卢佳河等^[10]提出了一种应用于我国地理信息服务的多级树结构目录服务模型,但由于是树形结构,存在单点故障的不足。由于指挥信息系统在战争中经常会遭受到地方的攻击,一旦多级树结构的树根遭受到拒绝服务攻击,那么整个系统将处于瘫痪状态。因此该结构更适于民用而非军用。

本节针对当前的 Web 服务体系结构存在的单点故障和扩展性不足,提出一种基于结构化层次覆盖网的语义 Web 服务体系结构并定义相关的本体。

2.1 语义 Web 服务体系结构设计

层次覆盖网^[11]由 FastTrack 首创,结合了上述 2 种方法的优点,多年来许多客户机实现了这种文件共享协议,最典型的案例就是 KaZaA^[12](kazaa media desktop, KMD)。与点对点结构类似,层次覆盖网不使用专用的服务器来跟踪和索引文件。然而不同的是,在层次覆盖网中并非所有的对等方都是平等的。特别是与网络高速连接、具有高可用性、高存储能力和高计算速度的对等方被指派为超级对等方,普通对等方被指派为一个超级对等方的子对等方,一个超级对等方可能有几百个普通对等方作为其子对等方。

通常层次覆盖网的各个超级对等方功能上完全类似,超级对等方组成的网络是一个无结构的完全随机网络,结点之间的链路没有遵循任何预先定义的拓扑来构建。这种网络不提供性能保证,查询的结果可能不完全,查询速度较慢。而且采用广播查询的系统对网络带宽的消耗非常大,并由此带来可扩展性差等问题。发现的准确性和可扩展性就成为了非结构化层次覆盖网面临的 2 个重要问题。因此非结构化层次覆盖网不适合应用于大规模的分布式 Web 服务体系结构中。

笔者提出结构化层次覆盖网,根据功能或服务提供者的不同,将超级对等方进行分类,超级对等

方构成一个结构化的 P2P 网络。利用功能匹配算法将普通对等方指派为特定超级对等方的子对等方。结构化的层次覆盖网具有很强的伸缩性和很高的查询效率。

根据该思想，笔者将结构化层次覆盖网应用于 Web 服务体系结构设计，提出一种基于结构化层次覆盖网的 Web 服务体系结构，如未特殊说明，文中后面提到的层次覆盖网均是结构化的。如图 2 所示，在该结构中，超级对等方是服务簇，如图中 A、B 所示；普通对等方是发布的服务，如图中 a1、b2 所示。服务簇负责管理和发现本簇中的服务，每个服务簇维护着两张表：服务列表和服务簇列表。服务列表保存着该服务簇中管理的服务名称、服务 ID、服务功能属性和非功能属性等信息；服务簇列表保存着该结构中与本服务簇有语义路由连接服务簇的服务簇名称、服务簇 ID、服务簇功能等信息。

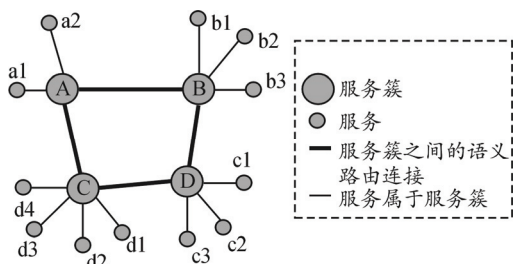


图 2 基于结构化层次覆盖网的语义 Web 服务体系结构

2.2 定义服务本体和服务簇本体

传统的 Web 服务由于缺乏必要的语义信息，使其无法准确地描述 Web 服务的功能与非功能属性。为了对该体系结构进行语义标注，以及描述该体系结构的工作原理，结合 OWL-S^[13]，笔者定义了服务本体和服务簇本体。

定义 1 Web 服务本体由二元组定义。

$$Service = \langle Serv_Concept, Serv_Relation \rangle$$

Serv_Concept 是服务本体概念集：

Serv_Concept = {ServName, ServID, ServDescription, ServiceCluster, Resource, CompositeServ, ServProvider, ServRequestor, ServFun, ServNonFun}。这些概念都是自解释的。ServiceCluster 表示服务所属的服务簇，将在定义 2 中定义；CompositeServ 表示组成该服务的原子服务；ServFun 表示服务的功能属性集；ServNonFun 表示服务的非功能属性集。

Serv_Relation 是服务本体关系集：

$$Serv_Relation = \{hasServNameOf, hasServIDOf, hasServDescriptionOf, belongToServClu, useResource, composedBy, hasProviderOf,$$

hasRequestorOf, hasServFunOf, hasServNonFunOf}。服务本体关系也是自解释的。belongToServClu 表示服务与其所属的服务簇 ServiceCluster 之间的属于关系；compose 表示服务与组合服务 CompositeServ 的被组合关系。

定义 2 Web 服务簇本体由二元组定义。

$$ServiceCluster = \langle ServClu_Concept, ServClu_Relation \rangle$$

ServClu_Concept 是服务簇本体概念集：

ServClu_Concept = {ServCluName, ServCluID, ServCluDescription, ServCluOrganizer, ServList, ServCluList, ServCluFun}。ServCluOrganizer 表示服务簇的管理者，根据一定的规则和算法创建、分解、合并和删除服务簇；ServList 表示本服务簇的服务列表；ServCluList 表示体系结构中所有的服务簇构成的列表；ServCluFun 是服务簇的功能属性集。

ServClu_Relation 是服务簇本体关系集。

在该体系结构中，服务簇主要有以下几个方面的作用：1) 服务发布。指定服务所归类的服务簇 ServiceCluster，与服务提供者一起为服务命名 ServName。归类的服务簇为服务分配 ServID，并增加到 SerList 中。2) 服务发现。接收、查询并回复服务请求者和邻居服务簇的基于功能和非功能匹配的服务发现请求。3) 服务删除。当服务不可用或没用时删除该服务并收回 ServName 和 ServID，从 SerList 中删除。

3 Web 服务体系结构工作原理

3.1 服务发现工作原理

服务发现^[14-15]流程如图 3 所示。服务请求者向服务簇提出服务调用请求，当服务簇收到服务调用请求时，首先判别需求服务功能 ReqServFun 是否与本服务簇的功能 ServCluFun 匹配，如果不匹配，则查询服务簇列表 ServCluList 是否有功能匹配的服务簇。如果服务簇列表中没有匹配的服务簇，则返回“没有匹配的服务簇”，如果服务簇列表中有匹配的服务簇，则查询该服务簇的 ServList，判断需求服务功能 ReqServFun 与服务簇中的提供服务功能 ProServFun 是否匹配。如果 ReqServFun 和所有 Service 的 ProServFun 都不匹配，则返回“功能不匹配”，如果有多个服务满足功能匹配，则判断需求服务与满足功能匹配条件的提供服务是否效能匹配，即 ServNonFun 是否匹配。如果多个服务满足效能匹配，则返回效能最优的服务，如果没有一个服务满足 ServNonFun 匹配，则根据策略返回效能

最大程度满足条件的服务或返回“效能不匹配”。

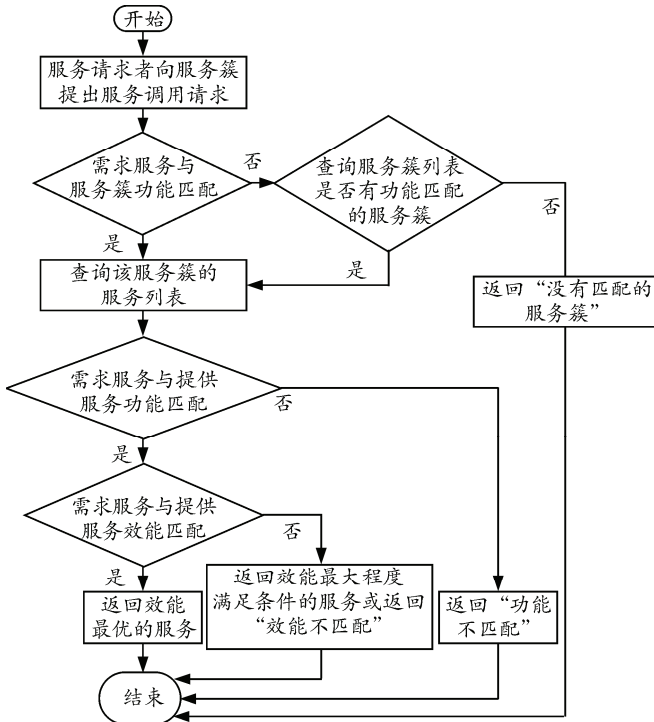


图 3 服务发现流程

3.2 基于 OWL-S 的 Web 服务功能匹配算法研究

Web 服务发现旨在从网络上数量庞大的服务中发现满足用户需求的服务，服务匹配算法则是实现快速高效的服务的核心技术。

在图 3 中需要 3 种匹配算法：1) 需求服务与服务簇的功能匹配；2) 需求服务与提供的服务的功能匹配；3) 需求服务与提供的服务的效能匹配。

Web 服务功能匹配就是判断服务提供的功能是否符合请求者的功能要求。通过这一步，才可能找到与功能要求一致的服务，从而才可能最终找到满足需求的最佳服务。因此，Web 服务功能匹配是解决 Web 服务自动化的重要一环，也是基于非功能性条件约束的服务选择的基础。因此，本节重点研究算法 2，提出一种基于 OWL-S 描述的服务功能匹配算法，算法 1 和算法 3 是文中后续研究重点。

为了研究 Web 服务功能匹配算法，这里首先结合 OWL-S 定义 Web 服务功能本体。

定义 3 Web 服务功能本体由二元组定义。

$ServFun = \langle ServFun_Concept, ServFun_Relation \rangle$

$ServFun_Concept$ 是服务功能本体概念集：

$ServFun_Concept = \{Input, Output, Precondition, Effect\}$ 。Input 和 Output 分别表示服务的输入输出参数集；Precondition 表示服务执行的前提条件集；Effect 表示服务执行所产生的效果集

$ServFun_Relation$ 是服务功能本体关系集：

$ServFun_Relation = \{hasInput, hasOutput, hasPrecondition, hasEffect\}$ 。

要匹配需求服务与提供的服务的功能，就要定义需求服务和提供的服务的功能本体，需求服务和提供的服务的功能本体都继承了 Web 服务功能本体。为简化，这里只给出它们的本体概念集。

定义 4 提供服务功能本体概念集可表示为：

$ProServFun_Concept = SF^P = \{I^P, O^P, P^P, E^P\} = \{(I^P_1, I^P_2, \dots, I^P_i), (O^P_1, O^P_2, \dots, O^P_j), (P^P_1, P^P_2, \dots, P^P_m), (E^P_1, E^P_2, \dots, E^P_n)\}$

其中， i, j, m 和 n 分别表示提供服务功能 SF^P 的输入、输出、前提条件和效果的个数。

定义 5 需求服务功能本体概念集可表示为：

$ReqServFun_Concept = SF^R = \{I^R, O^R, P^R, E^R\} = \{(I^R_1, I^R_2, \dots, I^R_{i'}), (O^R_1, O^R_2, \dots, O^R_{j'}), (P^R_1, P^R_2, \dots, P^R_{m'}), (E^R_1, E^R_2, \dots, E^R_{n'})\}$

其中， i', j', m' 和 n' 分别表示需求服务功能 SF^R 的输入、输出、前提条件和效果的个数。

这样，需求服务与提供的服务的功能匹配函数 $MatchSF(SF^P, SF^R)$ 可表示为：

$MatchSF(SF^P, SF^R) = CompareI(I^P, I^R) \cap CompareO(O^P, O^R) \cap CompareP(P^P, P^R) \cap CompareE(E^P, E^R)$

当 SF^P 和 SF^R 功能匹配时， $MatchSF(SF^P, SF^R)$ 为真，否则为假。其中函数 $CompareI(I^P, I^R)$ 为真的条件是 $I^P \subseteq I^R$ ； $CompareO(O^P, O^R)$ 为真的条件是 $O^P \supseteq O^R$ ； $CompareP(P^P, P^R)$ 为真的条件是 $P^P \subseteq P^R$ ； $CompareE(E^P, E^R)$ 为真的条件是 $E^P \supseteq E^R$ 。

需求服务与提供服务匹配流程如图 4 所示，首先初始化匹配结果记录集 $Matchrecord$ 和匹配个数 h ，然后查询服务簇中是否有尚未匹配的提供服务，如果没有则返回 $Matchrecord$ 和 h 并结束，如果有则取第一个尚未匹配的提供服务，之后按照 Output, Effect, Input, Precondition 的顺序依次匹配提供服务和需求服务的功能，如果匹配成功，则将该提供服务加入 $Matchrecord$ 并且 $h++$ ，不论匹配成功与否都继续查询服务簇中是否有尚未匹配的提供服务。

4 效率分析

假设该体系结构中一共有 N 个服务簇，平均每个簇中有 M 个服务，总计有 $N \times M$ 个服务。在服务发布阶段，提供服务找到匹配的服务簇就停止匹配，那么提供服务与服务簇之间的功能匹配次数期望值为 $(N+1)/2$ ，发布 $N \times M$ 个提供的服务的功能匹配次数期望值为 $(N+1) \times N \times M / 2$ 。在服务发现阶段，需求服

务与服务簇之间的功能匹配次数期望值也是 $(N+1)/2$ ，遍历匹配该服务簇中的提供服务期望值为 M ，那么总计匹配 $(N+1)/2+M$ 次就可以找到所有功能匹配的服务。

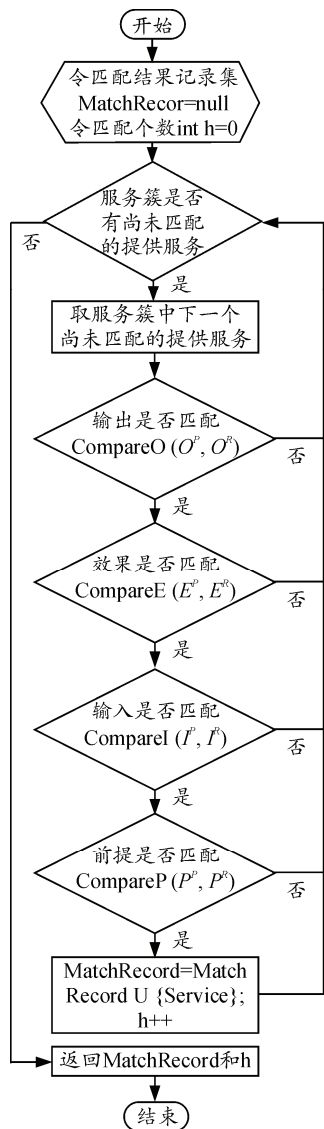


图 4 需求服务与提供的功能匹配

而如果采用注册中心结构，假设同样有 $N \times M$ 个服务。在服务发布阶段，提供服务只要直接加入服务列表中即可，不需要匹配。在服务发现阶段，需求服务需要遍历匹配所有 $N \times M$ 个服务才能找到所有功能匹配的服务。

由此可以看出，基于结构化层次覆盖网的 Web 服务体系结构牺牲了服务发布效率，从而提高了服务发现效率。当 N 和 M 值不同时大时，匹配次数 $(N+1)/2+M$ 和 $N \times M$ 没有本质区别，而当 N 和 M 值都很大时， $(N+1)/2+M$ 将会远小于 $N \times M$ ，查询效率也就明显提高。

5 结束语

Web 服务的不断成熟和发展为 C^4ISR 系统的体系结构设计和集成开发提供了新的方法和途径。笔者结合层次覆盖网的优点，提出基于结构化层次覆盖网的语义 Web 服务体系结构，详细描述了基于层次覆盖网的 Web 服务体系结构的服务发现工作原理，并研究了基于 OWL-S 描述的 Web 服务功能匹配算法。笔者对比了本体所提的 Web 服务体系结构和注册中心结构的服务查询算法的效率，分析可知，该方法可以明显提高服务查询效率。

今后，将对图 4 中的效能匹配算法进行重点研究，提高服务的查全率和准确率，减少服务发现响应时间，提高服务调用效率，并研究 C^4ISR 系统的安全性以及服务组合等一系列问题。

参考文献:

- [1] Group C^4ISR Architecture Working. C^4ISR architecture framework version 2.0[R]. The United States: Department of Defense, 1997.
- [2] 陈彬. 军事电子信息系统能力需求的建模和形式化方法研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2008: 12.
- [3] CapDEM CEP Team. Capability Engineering Process Version 1[R]. Defence Research and Development Canada, Valcartier, Dec. 2004.
- [4] The MODAF Development Team. The MOD Architecture Framework v1.2 [S/OL] <http://www.modaf.org.uk/>, 2008.
- [5] DoD Architecture Framework Working Group[EB/OL]. DoD Architecture Framework Version 1.5, 2007.
- [6] DoD Architecture Framework Working Group. DoD Architecture Framework Version 2.0[R]. Department of Defense, 2009.
- [7] 谢雨. Web 服务合作关系模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [8] 吴朝辉, 邓水光, 吴健. 服务计算与技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009: 12-20.
- [9] 刘志忠, 王怀民, 周斌. 一种双层 P2P 结构的语义服务发现模型 [J]. Journal of Software, 2007, 18(8): 1922-1932.
- [10] 卢佳河, 姜芸, 王军. 基于 SOA 的多级树结构目录服务模型研究[J]. 测绘空间地理信息, 2012, 35(8): 40-42.
- [11] Castro M, Druschel P, Hu Y. C. Topology-aware routing in structured peer-to-peer overlay networks[R]. Microsoft research technical report msr-tr-2002-82, 2002.
- [12] KaZaA[EB/OL]. <http://www.kazaa.com>.
- [13] World Wide Web Consortium. OWL-S: semantic markup for web services[C/OL]. <http://www.w3.org/Submission/OWL-S>, accessed Nov. 22 2004.
- [14] Khezrian M, Jahan A. An approach for web service selection based on confidence level of decision maker[J]. PLOS ONE, 2014, 9(6): 1-14.
- [15] Pirro G, Talia D, Trunfio P. A DHT-based semantic overlay network for service discovery[J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(4): 707.