

无结构化 P2P 网络资源搜索机制研究综述

钱 宁 吴国新

(东南大学计算机网络和信息集成教育部重点实验室 南京 210096)

(东南大学计算机科学与工程学院 南京 210096)

摘 要 随着 Napster, Gnutella 等文件共享应用的成功, 对等网络(P2P)得到了快速发展, 高效的资源搜索成为 P2P 应用中的首要问题, 现已提出了许多搜索方法。主要研究无结构化 P2P 网络中的资源搜索机制。在分析现有搜索方法特点的基础上, 对它们进行分类, 然后深入分析各类搜索方法中的关键技术, 并从搜索成功率、产生消息量、对网络动态变化的适应性和网络维护的复杂程度等方面进行比较, 最后进行总结。

关键词 无结构化 P2P, 搜索方法, 本地索引, 层次, 聚集

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Survey on Search Mechanisms for Unstructured Peer-to-Peer Networks

QIAN Ning WU Guo-xin

(Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract The success of file-sharing applications such as Napster and Gnutella makes Peer-to-Peer networks developing rapidly. Efficient resource discovery is the first step towards distributed resource sharing. Recently many search methods have been proposed. We gave an overview of search mechanisms for unstructured Peer-to-Peer networks in this paper. Firstly we approximately classified existing search methods based on the features of them. Then we discussed critical techniques used in these approaches in detail and compared the performance of them on various metrics, giving emphasis on the success rate, message production, adaptation to dynamic network conditions and maintenance overhead. Finally recommendations were given for future work.

Keywords Unstructured P2P, Search method, Local index, Hierarchy, Clustering

1 引言

近年来,随着 Napster, Gnutella 等文件共享应用的成功,对等网络(P2P)得到了快速发展。对等网络充分利用网络中各个节点的信息资源、存贮资源和计算资源,具有分布、自组织、容错和负载均衡等特点。但是,它也带来许多新的问题,如在全分布、自组织的条件下如何有效地发现资源,匿名性导致的安全问题,其中高效的资源搜索是 P2P 应用中的首要问题。资源搜索方法与 P2P 网络中节点的组织方式紧密相关,关系到对等网络的可扩展能力、容错能力及可用性。P2P 网络中节点的组织方式,大致可以分为两类:结构化 P2P 网络和无结构化 P2P 网络。结构化 P2P 网络采用分布式 hash 表(DHT),通过分布式 hash 函数将资源与节点联系起来,资源存贮遵循一定的规则,节点也按照一定的拓扑结构进行组织,可以在确定的时间(跳数)内实现资源的搜索;但是 P2P 网络高度动态变化的特性,使得网络拓扑及资源存贮规则的维护非常复杂。在无结构化 P2P 网络中,节点之间的关系是松散的,不存在相互的约束关系,资源在网络中随机存贮,结构简

单是其最显著的优点,它具有较强的容错能力,能够适应 P2P 网络高度动态变化的特性,但搜索具有较大的不确定性,如何提高搜索性能是难点。

目前,无结构化 P2P 网络获得了更为广泛的应用,研究人员提出许多搜索方法^[1,2],如何以较低的代价获得较高的搜索性能和可扩展能力,对于无结构化 P2P 网络具有重要意义。

本文主要研究无结构化 P2P 网络中的资源搜索机制。首先根据现有各种搜索方法的特点进行大致的分类,然后从不同方面分析各类方法中的关键问题,讨论现有的解决方法,从搜索成功率、产生的消息量、对网络动态变化的适应性和网络维护等方面对各类方法进行比较,最后进行总结和展望。

2 无结构化 P2P 网络资源搜索机制

2.1 搜索方法分类

P2P 网络通常被模型化为图 $G = \langle V, E \rangle$, 其中 V 是图 G 中所有顶点的集合, E 是图 G 中所有边的集合。P2P 网络中的节点对应于 V 中的顶点, 节点之间的连接对应于 E 中的

到稿日期:2009-05-14 返修日期:2009-08-04 本文受国家“863”高技术研究发展计划基金项目(2007AA01Z422)资助。

钱 宁(1969—),男,博士生,主要研究方向为 P2P 网络、信任管理等, E-mail: nqian1022@hotmail.com; 吴国新(1956—),教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络、P2P 网络、网络制造等。

边。P2P 网络中的资源搜索可以看作在图中寻找从起始顶点 v_0 到目标顶点 v_n 的路径 $\langle v_0, v_1, \dots, v_{n-1}, v_n \rangle$ 。在图上,搜索方法通常分为两类^[1]:盲目搜索(uninformed search)和信息搜索(informed search)。盲目搜索是在完全没有任何相关信息的前提下,试图通过访问足够数量的节点来满足搜索请求;信息搜索则是利用所获得的各种有关信息,采用启发式方法指导当前的搜索,提高搜索的针对性,克服盲目搜索的不足。这些信息可以是确定的,也可能是提示性的。

P2P 网络作为应用层上的自组织网络,有许多特点可以在搜索过程中利用,如网络中节点的异构性、节点具有的兴趣特征等。为了充分体现各种搜索方法的特点,进行更细致的划分,将搜索方法大致分为盲目搜索、基于本地索引的方法、基于层次的方法和基于聚集的方法。

2.2 盲目搜索

在盲目搜索方法中,由于没有关于资源及节点的任何信息,搜索只能依赖访问尽可能多的节点来发现目标。泛洪(flooding)、随机游走(Random walks)是两种最基本的方法。

Gnutella 网络是最早的全分布无结构化 P2P 网络,它采用泛洪方法(flooding)进行搜索,节点向它所有邻居节点转发搜索请求,直至达到 TTL(Time-To-Live)限制。这种方法最大的优点是简单健壮,适应能力强,并且搜索成功率高,但所产生的巨大流量严重影响了它的可用性 & 扩展能力。

为减少产生的消息量,研究者对泛洪方法进行了改进。主要方法有两种:一种是通过减小 TTL 值或渐进地确定 TTL 值,来减小消息转发的深度;另一种是通过选择向部分邻居节点转发搜索请求,减小消息转发的广度,从而达到减少产生消息量的目的。

Modified-BFS^[3]方法不再向所有邻居节点转发查询请求,而是随机选择部分邻居节点,这样虽然减少了产生的平均消息量,但也降低了搜索成功率。iterative deepening^[4]借鉴了人工智能技术,亦称为 expand ring。查询节点周期性以 BFS 方式发出一系列的查询请求,每次的查询深度 D_i 不断增加,即 $D_1 < D_2 < \dots < D_i < D_{i+1} < \dots$ 。在两次连续 BFS 搜索之间的时间间隔 W 内,如果返回的结果满足要求或达到了最大的深度,则本次 BFS 搜索终止。与泛洪相比较,这种方法并未有效地减少重复的消息,并且使得查询响应缓慢。

文献[5]对泛洪方法中所产生冗余消息的分布进行了研究,认为冗余消息主要产生在搜索过程的后面阶段,如设置 $TTL=7$ 时,冗余消息主要产生在跳数大于 4 之后的阶段,由此提出 LightFlood 方法。它的目标是尽可能减少冗余消息,同时保持与标准泛洪方法同样的节点覆盖范围。它采用的方法是在已有 P2P 网络中构建树状的子 overlay 层,将搜索过程分为两个阶段:首先采用标准的泛洪方法,但是设置较小的 TTL 值,这样可以在产生较少冗余消息的情况下覆盖足够多的节点;然后仅在子 overlay 层继续搜索。

随机游走是另一种盲目搜索方法。在随机游走方法中,查询节点随机选择 k 个邻居节点,将查询请求转发给它们;收到查询请求的邻居节点也从它自己的邻居节点中随机选择一个,再次转发查询请求,直至发现目标或达到 TTL 结束。这种方法极大地减少了查询产生的消息量,但是严重增加了搜索的延迟,搜索成功率受网络拓扑的影响较大。在可以对网络拓扑进行某些修改的情况下^[22],随机游走的性能甚至可能

超过泛洪方法。

将泛洪和随机游走相结合,吸取各自的优点,也是一种研究思路^[6,7]。文献[6]提出一种混合算法,即首先采用泛洪方法发现足够多的节点,然后从这些节点开始,应用随机游走的方法继续搜索。文献[7]研究认为,在可以获得图中的关键边的情况下,首先进行随机游走,然后采用泛洪,是十分有效的方法。

泛洪方法具有非常高的搜索成功率,随机游走的搜索成功率具有不确定性。研究表明^[6],在不同的网络拓扑模型和设置条件下,它们的性能会发生变化。对于 binomial 随机图和 regular 随机图,各种方法性能相似;对于 power-law 图,在限定较小消息总量的情况下,泛洪较优,而对较大消息总量,混合算法更好;对于 cluster 类型拓扑,泛洪方法较差,而随机游走最好。它们对网络动态变化的适应能力非常强,基本不受节点动态加入和退出的影响,也不需要复杂的维护。

2.3 基于本地索引的方法

这种方法主要通过各种方式收集网络中的相关信息,在每个节点建立本地索引表。利用这些信息,采用排序或概率的方法,选择合适的邻居转发搜索请求,其目的在于减少搜索的盲目性。尽管不能保证一定成功,但通常可以获得较好的结果。这种方法最大的特点是不改变 P2P 网络的拓扑结构,保持了全分布无结构化 P2P 网络结构简单健壮的优点。

获取信息的方法有两种:主动学习和被动学习。主动方式由节点主动发出请求,在网络中查找所需要的各种信息;在被动方式下,节点主要从历史搜索反馈中收集各种信息,无需进行额外的信息交换。收集的信息主要有:有关邻居节点的信息、资源的索引、搜索目标位置,到搜索目标的路径等。信息可以是确定的,如资源的位置、访问资源的路径;也可以是可能性的,如从某个邻居节点搜索成功的概率。

intelligent search^[3]对它的邻居进行简单的跟踪统计,获取返回查询结果数量、网络延迟等信息,根据一定的标准选择最好的邻居转发查询。与 intelligent search 仅利用历史查询的成功信息不同,APS^[8]方法同时考虑了历史查询的成功与失败,并以此进行概率选择、转发查询,这样增强了对网络动态变化的适应能力。BNS^[9]方法则从资源之间的语义关系出发,深入挖掘已有的历史反馈信息,应用贝叶斯网络进行推理,选择与搜索目标语义相关的邻居节点,进一步提高搜索的成功率。

在 local indices^[4]中,每个节点保存与它距离为 k 跳的所有节点上数据的索引。根据预先定义的策略 P ,将查询请求转发到特定的节点。这种方法的目标是:在获得相同数目的查询结果的情况下,使尽可能少的节点处理这个查询请求。

文献[10]采用强制学习的方法,确定到指定文件的最佳路径。它采用主动方式,以概率 p 随机选择邻居转发查询来发现新的路径,以 $1-p$ 利用现有的最好路径;节点上保存得到的关于查询 q 的最佳路径(邻居节点),在一次搜索完成后通过比较进行更新。

现有的方法可以有效地指导未来与历史搜索相同的搜索请求,但是对与历史搜索不同的搜索请求则无法提供帮助。文献[9]对这个问题进行了探索,它利用资源之间的语义相关性进行推理,扩大索引信息的应用范围,为相关的搜索提供指导。

这些方法都是以本地索引为基础,平均搜索成功率与 Random walks 相比获得了较大的提高。节点需要对本地索引表进行维护。在被动方式中,索引信息从历史反馈中获取,无需进行额外的信息交互,不会增加网络流量,维护比较简单;在 APS 和 BNS 方法中,一次查询所产生的最大消息数为 $2 \times k \times \text{TTL}$,与 Random Walks 算法所产生的消息量相当,有效地减少了搜索产生的消息量。在主动方式中,节点需要周期性地与其它节点交互,更新索引信息,进行额外的消息通信。由于搜索依赖于这些节点、资源等索引信息,网络的动态变化会使得部分信息失效,从而降低搜索的成功率。如何有效地利用索引信息并且增强对网络动态变化的适应能力是这种方法需要进一步研究的问题。

2.4 基于层次的方法

这种方法主要利用网络自身特点及节点之间的异构性,将网络中的节点分为超级节点和叶节点。每个叶节点与一个超级节点连接,形成多个节点组。超级节点之间相互建立连接,形成覆盖层。可以继续在超级节点之上再次建立覆盖层,从而形成多层结构。这种方法增强了网络的扩展能力,获得了广泛应用,如 FastTrack, Gnutella2 等。

在这种方法中,资源搜索过程通常分为两步:叶节点发出查询请求,首先在自己组内搜索,如成功则结束,否则将查询请求转发给自己的超级节点;该超级节点在超级节点之间继续进行搜索,如找到满足搜索要求的超级节点,则可以定位提供资源的叶节点,完成搜索任务。

其主要的研究问题包括超级节点的选择以及各个层次资源的描述方法。

超级节点具有重要作用。通常根据节点的处理能力、连接带宽以及邻居数等用户自定义的指标选择超级节点。如何选择超级节点与叶节点的比例关系,也是一个非常重要的问题。为了减少搜索产生的消息量,提高搜索成功率,每个超级节点需要连接较多的叶节点;但是从系统维护及系统可靠性出发,则需要控制叶节点的数量。文献[20]针对超级节点与叶节点最优比例关系问题给出了解决方法,即不需要产生大量额外的消息,但是要求超级节点拥有它的所有叶节点信息,并且叶节点知道它近期的超级节点。

与这种结构相对应,准确地描述各个层次的信息,对于高效搜索至关重要。文献[11]提出了称为 Hierarchical Summary Structure 的索引结构。首先对网络中的信息按照不同的粒度进行归纳,分为 3 个层次:unit level,对单个文档进行归纳;peer level,对一个节点上的所有信息进行归纳;super level,对一个节点组所包含的所有信息进行归纳。然后在每个归纳层次分别建立索引:a local index, a group index, a global index。

这种方法具有较高的搜索成功率,更重要的是极大地提高了 P2P 网络的可扩展能力。但是为了维护层次结构,需要复杂的维护工作;为了保持超级节点与叶节点信息的一致,需要不断地更新超级节点上的信息;叶节点的动态变化对其它节点没有影响,但超级节点的失效将影响许多节点,导致系统具有脆弱性。

2.5 基于聚集(Clustering)的方法

研究表明^[12,13],在 P2P 网络中,节点通常对网络中的部分资源以及部分资源类别感兴趣,呈现一定的兴趣特征。根据这个特点,可以应用聚集方法,将具有相似兴趣的节点联系在一起,重构 P2P 网络拓扑,为相关内容的搜索提供捷径,由

此来提高搜索性能。这个方法的核心在于如何准确反映节点的兴趣特征。

可以用节点上的内容表示节点的兴趣,它是基于这样的假设:节点如果拥有相似的内容,则很可能发出相似的搜索请求。但是,这种方法不易反映节点兴趣的变化。为了及时反映节点兴趣的变化,GES^[14]周期性跟踪现有的邻居,监视邻居节点的节点向量的变化。文献[19]采用节点下载内容来表示节点的兴趣。文献[16]则记录用户的查询请求,对其进行聚类,以此获得用户不同的兴趣特征。

节点兴趣的描述方法主要有主题分类、向量空间模型(VSM)和 RDF。在语义覆盖网 SON^[12]中,选定某种语义分类体系,根据节点内容,用不同的主题对节点进行分类,将主题相似的节点聚集在一起,在 P2P 网络中形成多个代表不同主题的 SON,再依据这一语义分类体系的层次关系对 SONs 进行组织。语义定义及语义分类体系的确定是其中一个关键问题。这种方法缺乏灵活性,不易反映节点兴趣的变化。在 GES^[14]中,采用 VSM 生成节点向量(Node Vector)来描述节点的兴趣。根据节点向量在语义上的相关程度,重构覆盖层的拓扑,将语义相关的节点组织在一起成为语义组。当节点上文档分布多样时,节点向量不能准确地描述节点内容。CSS 方法^[17]针对这一不足进行了改进。CSS^[17]采用数据聚集方法,将节点上文档分成多个类,用类向量(Class Vector)代替节点向量,这样能够更准确地描述节点的兴趣;根据类向量的相似程度,建立虚拟连接。文献[15]采用元数据描述文档属性,利用 RDF 作为元数据的基本框架,拥有相同元数据的节点同属一个兴趣域。

如何确定节点兴趣描述的粒度是一个难题。粒度过大,兴趣描述不够准确,兴趣组过大,影响搜索性能;粒度过小,造成兴趣类别过多,使得兴趣组的组织和维护十分复杂。

为了发现兴趣相似的节点,可以采用主动学习和被动获取两种方法。在 GES^[14]中,每个节点需要完成邻居发现和邻居维护任务:每个节点周期性地随机游走,发现新的邻居候选者,从邻居候选者中选择新的邻居,周期性地更新语义邻居和随机邻居。文献[18]则采用被动方式获取相似节点。其策略是:首先根据搜索请求与邻居节点的语义相似程度,选择邻居节点转发搜索请求;节点不断地从历史搜索反馈中提取信息,当积累了足够多信息时,节点不再使用邻居节点的信息,而是在语义相关的节点之间建立捷径,形成语义覆盖网。文献[21]也同样采用过滤历史搜索信息的方法,积累搜索经验,发现与搜索内容相关的节点。

将兴趣相似节点聚集,在节点兴趣稳定的情况下非常有效,可以提高平均搜索成功率,获得较高的查全率和查准率,但是对不在节点兴趣范围内的搜索请求则没有帮助。搜索过程中只需要访问网络中少部分节点,产生的消息量减少了,但聚集过程以及维护系统需要产生额外的消息;系统复杂程度的提高需要大量的维护工作;在对兴趣组周期性地维护更新的情况下,节点的动态加入和退出、节点兴趣的变化对其性能的影响并不明显。

结束语 本文主要研究无结构化 P2P 网络中的资源搜索机制,深入分析了各类搜索方法中的关键技术,从搜索成功率、产生消息量、对网络动态变化的适应能力及维护复杂程度等方面对各类方法进行了比较。各种方法各有其优缺点,如何在应用中充分发挥各自的优点更为重要。选择何种方法,应该从应用自身出发,考虑应用的目标以及应用的环境,由此

确定适合的搜索方法。许多情况下,简单、易于实现的方法对于应用非常重要。如何吸取各种方法的优点,在提高搜索性能的同时保持搜索方法的简单健壮,是以后需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] Meshkova E, Riihijärvi J, Petrova M, et al. A survey on resource discovery mechanisms, peer-to-peer and service discovery frameworks [J]. *Computer Networks*, 2008, 52: 2097-2128
- [2] Tsoumakos D, Roussopoulos N. Analysis and comparison of P2P search methods [C] // *Proc. of INFOSCALE'06*. New York: ACM, 2006
- [3] Kalogeraki V, Gunopulos D, Zeinalipour-yazdi D. A local search mechanism for peer-to-peer networks [C] // *Proc. of the 11th ACM Conference on Information and Knowledge Management*. New York: ACM, 2002
- [4] Yang B, Garcia-Molina H. Improving search in peer-to-peer networks [C] // *Proc. of the 22nd IEEE International Conference on Distributed Computing*. Picataway, NJ: IEEE, 2002
- [5] Jiang Song, Guo Lei, Zhang Xiaodong, et al. LightFlood: Minimizing redundant messages and maximizing scope of Peer-to-Peer search [J]. *IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(5): 601-614
- [6] Dorrigiv R, Lopez-Ortiz A, Pralat P. Search Algorithms for unstructured peer-to-peer networks [C] // *Proc. of 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks*. Picataway, NJ: IEEE, 2007
- [7] Gkantsidis C, Mihail M, Saberi A. Hybrid search schemes for unstructured peer-to-peer networks [C] // *Proc. of IEEE INFOCOMM05*. Picataway, NJ: IEEE, 2005
- [8] Tsoumakos D, Roussopoulos N. Adaptive Probabilistic Search for Peer-to-Peer Networks [C] // *Proc. of the Third International Conference on Peer-to-Peer Computing*. Picataway, NJ: IEEE, 2003
- [9] 钱宁, 吴国新, 赵生慧. 基于贝叶斯网络的无结构化 P2P 资源搜索方法 [J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(6): 889-897
- [10] Li Xiuqi, Wu Jie. Improve Searching by Reinforcement Learning in Unstructured P2Ps [C] // *Proc. of 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*. Picataway, NJ: IEEE, 2006
- [11] Shen Heng tao, Shu Yanfeng, Yu Bei. Efficient Semantic-based Content Search in P2P Network [J]. *IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering*, 2004, 16(7): 813-826
- [12] Crespo A, Garcia-Molina H. Semantic Overlay Networks for P2P Systems [R]. Stanford, CA: Stanford University, 2004
- [13] Schlosser M T, Condie T E, Kamvar S D. Simulating a File-Sharing P2P Network [C] // *Proc. of First Workshop on Semantics in P2P and Grid Computing*. New York: ACM, 2003
- [14] Zhu Yingwu, Hu Yiming. Enhancing Search Performance on Gnutella-like P2P Systems [J]. *IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(12): 1482-1495
- [15] 杨舰, 吕智慧, 钟亦平, 等. 一种基于兴趣域的高效对等网络搜索方案 [J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(5): 804-809
- [16] Lu Jie, Jamie C. User Modeling for Full-text Federated Search in Peer-to-Peer Networks [C] // *Proc. of SIGIR'06*. New York: ACM, 2006
- [17] Huang Juncheng, Li Xiuqi, Wu Jie. A Class-based Search System in Unstructured P2P Networks [C] // *Proc. of 21st International Conference on Advanced Networking and Applications*. Picataway, NJ: IEEE, 2007
- [18] Löser A, Staab S, Tempich C. Semantic Social Overlay Networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(1): 5-14
- [19] Sripanidkulchai K, Maggs B, Zhang Hui. Efficient Content Location Using Interest-based Locality in Peer-to-Peer Systems [C] // *Proc. of IEEE INFOCOM'03*. Picataway, NJ: IEEE, 2003
- [20] Zhuang Zhenyun, Liu Yunhao, Xiao Li. Dynamic layer management in super-peer architectures [C] // *Proc. of the 2004 International Conference on Parallel Processing*. Picataway, NJ: IEEE, 2004
- [21] 曹迎春, 王义麟, 陈建忠, 等. 一种基于语义相似的 P2P 搜索机制 [J]. *计算机科学*, 2007, 34(5): 52-56
- [22] Gkantsidis C, Mihail M, Saberi A. Random walks in peer-to-peer networks [C] // *Proc. of IEEE INFOCOM'04*. Picataway, NJ: IEEE, 2004
- [35] Thomas K, Andre B, Michalis F. Transport layer identification of p2p traffic [A] // *IMC'04: Proceedings of the 4th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement* [C]. ACM Press, 2004
- [36] Crotti M, Dusi M, Gringoli F, et al. Traffic Classification through Simple Statistical Fingerprinting [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2007, 37(1): 7-16
- [37] Suh K, Figueiredo D R, Kurose J, et al. Characterizing and Detecting Skype-Relayed Traffic [A] // *25th IEEE International Conference on Computer Communications* [C]. Barcelona, Spain, Apr. 2006: 1-12
- [38] Moore A W, Zuev D. Internet Traffic Classification Using Bayesian Analysis Techniques [A] // *ACM SIGMETRICS 2005* [C]. Banff, Alberta, Canada, 2005
- [39] Auld T, Moore A W, Gull S F. Bayesian neural networks for internet traffic classification [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2007, 18(1): 223-239
- [40] Marcel D, Alan M, Andreas H, et al. Detecting bittorrent blocking [A] // *Internet Measurement Conference 2008* [C]. 2008: 3-8
- [41] Karagiannis T, Rodriguez P, Papagiannaki K. Should internet service providers fear peer-assisted content distribution? [A] // *Proc. of IMC'05* [C]. Berkeley, CA, USA, October 2005
- [42] Aggarwal V, Feldmann A. Locality-Aware P2P Query Search with ISP Collaboration [J]. *Networks and Heterogeneous Media*, 2008, 3(2)
- [43] Vinay A, Obi A, Anja F. Improving User and ISP Experience through ISP-aided P2P Locality [A] // *Proceedings of 11th IEEE Global Internet Symposium 2008 (GI'08)* [C]. (Location: Phoenix, AZ, USA), IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2008
- [44] Choffnes D, Bustamante F. Taming the Torrent: A practical approach to reducing cross-ISP traffic in P2P systems [A] // *Proceedings of ACM SIGCOMM* [C]. 2008
- [45] Li W, Chen S, Yu T. Utaps: An underlying topology-aware peer selection algorithm in bittorrent [A] // *Advanced Information Networking and Applications*, 2008 [C]. AINA 2008. 22nd International Conference. March 2008: 539-545
- [46] Stevens L-B, Arnaud L, Walid D. Pushing BitTorrent Locality to the Limit [A] // *CoRR abs/0812.0581* [C]. 2008
- [47] Grid'5000. <https://www.grid5000.fr>. [Z]

(上接第 6 页)