

基于 P2P 的 Web 搜索技术*

方启明⁺, 杨广文, 武永卫, 郑纬民

(清华大学 计算机科学与技术系 清华信息科学与技术国家实验室(筹),北京 100084)

P2P Web Search Technology

FANG Qi-Ming⁺, YANG Guang-Wen, WU Yong-Wei, ZHENG Wei-Min

(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

+ Corresponding author: E-mail: fangqiming@tsinghua.org.cn

Fang QM, Yang GW, Wu YW, Zheng WM. P2P Web search technology. *Journal of Software*, 2008, 19(10):2706–2719. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2706.htm>

Abstract: Web search engine has become a very important tool for finding information efficiently from the massive Web data. With the explosive growth of the Web data, traditional centralized search engines become harder to catch up with the growing step of people's information needs. With the rapid development of peer-to-peer (P2P) technology, the notion of P2P Web search has been proposed and quickly becomes a research focus. The goal of this paper is to give a brief summary of current P2P Web search technologies in order to facilitate future research. First, some main challenges for P2P Web search are presented. Then, key techniques for building a feasible and efficient P2P Web search engine are reviewed, including system topology, data placement, query routing, index partitioning, collection selection, relevance ranking and Web crawling. Finally, three recently proposed novel P2P Web search prototypes are introduced.

Key words: Web search; peer-to-peer; query routing; index partitioning; relevance ranking

摘要: Web 搜索引擎已经成为人们从海量 Web 信息中快速找到所需信息的重要工具,随着 Web 数据量的爆炸性增长,传统的集中式搜索引擎已经越来越不能满足人们不断增长的信息获取需求.随着对等网络(peer-to-peer,简称 P2P)技术的快速发展,人们提出了基于 P2P 的 Web 搜索技术并迅速成为研究热点.研究的目的是对现有的基于 P2P 的 Web 搜索技术进行总结,以期为进一步研究指明方向.首先分析了基于 P2P 的 Web 搜索面临的诸多挑战,然后重点总结分析了基于 P2P 的 Web 搜索的各项关键技术的研究现状,包括系统拓扑结构、数据存放策略、查询路由机制、索引切分策略、数据集选择、相关性排序、网页收集方法等;最后对已有的 3 个较有特色的基于 P2P 的 Web 搜索原型系统进行了介绍.

关键词: Web 搜索;对等网络;查询路由;索引切分;相关性排序

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60433040, 90412006, 90412011, 60573110, 60673152, 90612016 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant Nos.2003CB317007, 2004CB318000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant Nos.2006AA01A101, 2006AA01A108, 2006AA01A111 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2007-07-30; Accepted 2008-02-25

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

搜索引擎已经成为一种重要的网络信息导航工具,它帮助人们在海量 Web 数据中快速而方便地找到所需信息.随着 Web 数据量的持续快速增长,传统的集中式搜索引擎已经越来越不能满足人们不断增长的信息获取需求.一方面,集中式搜索引擎的服务器处理能力有限,目前最好的搜索引擎之一——Google 使用上万台 PC 组成的机群服务器,也只能索引到整个 Web 网页总数的大约 1/10,这还不包括数量为表层网页(surface Web)400~500 倍的深层网页(deep Web)^[1],而且,目前的集中式搜索引擎对数据的更新周期都比较长,很难满足人们对信息时效性的需求.另一方面,受网络爬虫(Web crawler)的信息采集能力所限,传统搜索引擎很难深度挖掘深层网页信息.再者,传统搜索引擎很难实现个性化搜索服务,它对不同需求的用户通常都返回相同的结果.

最近几年,P2P^[2]技术发展势头强劲.P2P 是区别于传统客户端/服务器(C/S)模式的一种新型计算模式,它将高度分布的大量普通结点资源组织在一起,每个结点都拥有对等的地位,在享受其他结点提供服务的同时也为其他结点提供服务.由于 P2P 网络具有集中式服务网络所缺乏的优势:可扩展性强、容错性好、成本低廉、充分利用分布资源等,它在文件共享、分布式计算、分布式存储、协同工作、应用层组播、流媒体服务等方面已有广泛应用.而针对传统集中式搜索引擎的不足,研究者提出了基于 P2P 的 Web 搜索技术,也就是在 P2P 网络中构建 Web 搜索引擎,提供 Web 搜索服务.

P2P 网络中的搜索问题一直是 P2P 研究领域中的热点问题,它是指如何在 P2P 网络中找到所需的资源,这里的资源包括各种类型的文件、结点提供的各种服务、各种数据库中的数据等,而具体的搜索机制也有多种,比如键值搜索、元数据搜索、全文搜索、数据库搜索等.目前基于 P2P 的 Web 搜索研究的搜索对象是各类 Web 文档,通常以关键词查询的方式提供服务,因此本质上属于基于关键词的全文搜索.在 P2P 全文搜索方面,已有很多研究成果^[3-13],它们为基于 P2P 的 Web 搜索提供了一定的技术基础.然而,Web 这一新的搜索对象为基于 P2P 的 Web 搜索带来了许多新问题:一方面,Web 的巨大规模对搜索系统的性能提出了更高的要求,已有的 P2P 全文搜索系统一般只能支持十万到百万量级的文档数^[3],这与 Web 搜索要求的十亿甚至更高量级的文档规模存在着巨大差距,因此在系统结构、搜索机制和优化技术等方面都需要进行更多的研究,大幅度地提高系统的可扩展性,才能满足 Web 搜索的要求;另一方面,针对 Web 文档的搜索需要在 P2P 全文搜索的基础上引入很多新的技术环节,比如 Web 文档的收集和更新、基于链接分析的结果排序、高效的 top-K 查询等,这些问题在传统的 Web 搜索引擎中都有较好的解决,但是将它们引入到 P2P 搜索这样的分布式系统中并不是一件容易的事,这也是基于 P2P 的 Web 搜索系统需要重点解决的问题.

与传统的集中式搜索引擎相比,基于 P2P 的 Web 搜索具有很多优势:

分布式:P2P 是典型的分布式系统,而 Web 数据的分布式特性使得 Web 搜索天生就适合利用 P2P 结构来处理.

可扩展性:Web 的巨大规模对 Web 搜索系统的可扩展性提出了严峻的挑战,而 P2P 系统可以将大量结点连接起来形成一个巨大的资源池来提供服务.P2P 系统强大的聚合处理能力为在 Web 搜索中引入更多的先进技术和方法提供了保证,例如统计学习、计算语言学、本体知识推理等方法.

低成本:P2P 系统通常由边缘网络中的大量普通结点组成,充分利用这些结点的闲置资源来提供服务可能会有效地降低成本.而且结点之间往往是自组织的,这也有望节省系统的管理和维护成本.

鲁棒性:传统的搜索引擎采用集中式结构,其中心服务器存在单点失效问题,往往成为性能瓶颈和安全隐患,而 P2P 系统则不存在这样的问题.

对深层网页的处理能力:深层网页主要是指那些存储在网站数据库中以动态网页的形式来提供服务的 Web 信息.深层网页数量巨大,但很难用传统搜索引擎所使用的网络爬虫来采集,而 P2P 搜索则为此提供了一条可行的方案:这些信息提供者可以作为结点加入 P2P 网络,主动将这些信息贡献出来提供搜索服务,这将使人们能够通过搜索引擎获取更加丰富的信息.

个性化搜索:利用 P2P 系统的特点,更容易利用用户协作、根据用户兴趣偏好以及地理位置等个性化特征

提供个性化搜索服务,以满足不同用户的不同需求.

打破信息垄断:传统的集中式搜索引擎令很多人担心会产生信息垄断现象,它们易受商业利益、内容审查和垃圾信息等因素的影响,而基于 P2P 的 Web 搜索则可以打破这种可能的垄断.

基于 P2P 的 Web 搜索可以弥补传统集中式搜索引擎的很多不足,正吸引着越来越多研究者的关注.不过,该领域研究尚处于起步阶段,很多问题都还未得到解决.本文试图对目前基于 P2P 的 Web 搜索技术的研究现状作一个较为全面的总结,从而为进一步研究提供参考.本文第 1 节分析基于 P2P 的 Web 搜索面临的挑战.第 2 节重点总结各项关键技术的研究现状.第 3 节对已有的 3 个原型系统进行介绍.最后总结全文并分析可能的发展方向.

1 基于 P2P 的 Web 搜索面临的挑战

Li 等人从 Web 搜索的负载和 P2P 搜索系统的资源限制的角度对基于 P2P 的 Web 搜索的可行性进行了分析^[14],得出的结论是:简单实现的基于 P2P 的 Web 搜索是不可行的,因为 P2P 搜索系统能够提供的资源不足以满足 Web 搜索的巨大负载要求,尤其是在系统通信开销方面;基于 P2P 的 Web 搜索系统必须要在系统设计和实现方面做很多优化工作才可能保证系统的可行性,比如缓存、压缩等;另外,在搜索性能方面作一些折衷将有助于提高系统的可行性,比如在搜索结果的质量和搜索延迟等方面作一些折衷可以降低系统的实现难度.可见,要实现一个真正实用的基于 P2P 的 Web 搜索系统面临着巨大的挑战,这主要是由 Web 搜索的复杂性和 P2P 环境的分布、动态、异构、自治等特性所决定的.

基于 P2P 的 Web 搜索面临的主要问题有:

搜索效率:由于 P2P 系统通常都是由处于边缘网络中的结点组成,这些结点的计算能力、存储资源和网络带宽往往比较有限,因此如何设计高效的搜索算法是一个很大的难题.

自治性:P2P 中各结点都有很强的自治性,但自治与效率往往是矛盾的^[15],如何权衡两者之间的关系是研究者需要考虑的问题.

性能保证:主要是指查询响应时间、查询结果质量(比如查全率、查准率)等搜索性能.在 P2P 的动态分布环境中,如何保证搜索性能是必须解决的问题,而且在搜索效率与查询结果质量两方面也存在着权衡关系.

可用性:在 P2P 这样高度动态的环境中,要保证系统可用性,必须有相应的容错机制和优化方法,例如副本、压缩、缓存技术等.

可扩展性:虽然 P2P 系统被普遍认为具有较强的可扩展性,但在面对 Web 搜索时,由于 Web 的巨大规模和海量数据,系统的可扩展性仍然是需要重点考虑的问题.

负载均衡:Web 搜索中固有的“热点(hotspots)”问题在 P2P 环境中同样存在,而且相比于传统集中式搜索引擎,P2P 中的负载均衡显得更为重要,同时难度也更大.

复杂查询:所谓复杂查询,是相对于键值查询这样的简单查询来说的,人们希望 Web 搜索能够支持关键词查询、聚合查询,甚至 SQL(structured query language)查询、语义查询这样的复杂查询,从而满足人们更高的查询需求.目前,无论是集中式搜索引擎还是 P2P 搜索引擎,主要的研究都还是针对关键词查询.在 P2P 中如何支持高效的复杂查询也是一个难点.例如,PIER^[16]能够支持 SQL 查询,不过实验结果显示存在严重的“热点”问题.

安全性:P2P 系统中虽然没有易受攻击的中心服务器,但也存在其他的安全问题,比如其结点容易遭受 DoS 攻击、如何对文件进行认证以保证数据的真实性、如何保证匿名性、如何进行访问控制以保护某些内容的版权等.

2 基于 P2P 的 Web 搜索关键技术

要构建一个高效实用的基于 P2P 的 Web 搜索系统,需要解决很多基础性的问题,包括 P2P 基础设施、搜索机制、优化技术等多个方面,本节将对其中的一些关键技术的研究现状作一个较为全面的总结,包括系统的拓扑结构、数据存放策略、查询路由机制、索引切分策略、数据集选择、相关性排序、网页收集等.

2.1 拓扑结构

拓扑结构是指 P2P 中的各结点在逻辑上的连接关系,P2P 基础设施采用什么样的拓扑结构对搜索系统的性能有着关键性的影响.目前,P2P 网络的拓扑结构主要分为 4 类:中心化拓扑、非结构化拓扑、结构化拓扑和混合式拓扑.

2.1.1 中心化拓扑

中心化拓扑有一个中心结点维护一个全局目录系统,各结点把本地资源信息发布到全局目录中,资源查找也通过全局目录来实现.中心化拓扑的典型案例是 Napster,这是一个著名的 MP3 共享软件,它通过一个中央服务器保存所有用户上传的音乐文件索引和存放位置的信息.当某个用户需要某个音乐文件时,首先连接到中心服务器进行检索,服务器返回保存有该文件的用户信息,再由请求者直接连接到文件所有者下载文件.中心服务器的存在使得 Napster 很像传统的 C/S 模式,因此它并不是纯粹的 P2P 系统.

中心化拓扑中的搜索算法灵活、高效,并且能够实现复杂查询.但中心化拓扑也存在很多问题:中央服务器的存在容易造成单点故障,可靠性和安全性较低;随着网络规模的扩大,对中央索引服务器进行维护和更新的成本将急剧增加;中央服务器的存在容易引起共享资源在版权问题上的纠纷.对小型网络而言,中心化拓扑在管理和控制方面占据一定优势.但鉴于其存在的种种缺陷,该模型并不适合大型网络应用.

鉴于中心化拓扑存在的问题,研究者提出了完全分布式的 P2P 结构,包括非结构化拓扑和结构化拓扑.

2.1.2 非结构化拓扑

在非结构化拓扑中,每个结点可以任意选择其他一些结点作为邻居建立连接关系,这样形成的拓扑结构比较松散,结点连接关系具有很大的随意性,整个网络接近无规则的随机图,例如 Gnutella 就是一个典型的非结构化 P2P 网络.这种拓扑随意性使非结构化 P2P 系统具有较低的拓扑维护开销,适用于高度动态的环境,其缺点是路由效率较低,且具有路由不收敛性,即从一个结点出发的路由消息不一定能够成功抵达目的地.

2.1.3 结构化拓扑

相对于非结构化拓扑中结点连接的随意性,结构化拓扑为了实现有效的资源查找,对结点连接关系作了严格的限制,比如网状、环状、圆环面、蝶形等结构.这些拓扑结构一般都通过分布式哈希表(distributed hash table,简称 DHT)来构建,利用 DHT 将结点映射到一个结点标识空间,从而形成特定的拓扑结构.CAN^[17],Chord^[18],Pastry^[19],Tapestry^[20],SkipNet^[21],Butterfly^[22]等都采用结构化拓扑,其中 Pastry,Tapestry 采用网状结构,Chord 采用环状结构,CAN 采用 d 维圆环面结构,SkipNet 则采用一种 SkipList 结构.结构化拓扑的可扩展性好,可以实现高效路由.不过,在高度动态的网络中,拓扑维护开销较大,而且基于 DHT 的查询机制很难支持复杂查询.

2.1.4 混合式拓扑

混合式拓扑由中心化拓扑和非结构化拓扑结合而成,它选择性能较高(处理能力、存储资源、网络带宽等)的结点作为超级结点(SuperNodes,Hubs),各个超级结点之间形成非结构化拓扑,而每个超级结点与一部分普通结点(也称为叶子结点)形成中心化拓扑,超级结点作为它所连接的那些叶子结点的查询代理.混合式拓扑的优点是搜索性能、可扩展性较好,较易管理,但对超级结点依赖性较大,易受到攻击,容错性也受到影响.KaZaA 就是一个典型的混合式拓扑结构.

2.1.5 4 种拓扑结构的性能比较

上述 4 种拓扑结构的性能比较见表 1.可见这 4 种拓扑结构都各有优缺点,目前基于 P2P 的 Web 搜索方面的研究主要采用非结构化和结构化的拓扑结构^[23-29].结构化拓扑搜索效率高、可扩展性好,因此比较适合 Web 搜索的要求,但其拓扑维护开销很大,这是需要考虑解决的问题.非结构化拓扑可维护性好,且能支持复杂查询,但其搜索效率低下并导致系统可扩展性差,这是需要重点解决的问题.

2.2 数据存放策略

所谓数据存放策略,是指采用什么样的策略将系统中所有的数据分布到各个结点上存放.不同拓扑结构的 P2P 系统其数据存放策略很不相同,数据存放策略需要与拓扑结构协调一致.

Table 1 Comparison of the four topologies**表 1** 4种拓扑结构的性能比较

Topologies	Centralized	Unstructured	Structured	Hybrid
Scalability	Poor	Poor	Good	Medium
Reliability	Poor	Good	Good	Medium
Maintainability	Excellent	Good	Poor	Medium
Search efficiency	Excellent	Poor	Good	Medium
Support to complex query	Yes	Yes	No	Yes

非结构化拓扑对数据存放位置不作限定,完全由结点按照各自意愿存储.这种策略比较适合文件共享应用,结点按照各自使用者的喜好存储并共享文件.由此,非结构化 P2P 中数据具有和语义密切相关的分布特性.一些非常流行和访问频度高的文件和信息在非结构化 P2P 中大量存在,而另外相对冷门的文件和信息则分布非常少.这种数据分布特性以及路由的不收敛性造成非结构化 P2P 中寻找访问频度低的数据非常困难.除了数量上的分布以外,数据存放的语义相关性还表现在结点表现出对数据很强的偏好性,不同结点的兴趣偏好可能很类似也可能很不同,而偏好接近的结点在搜索的内容和共享的数据方面具有明显的共同特征.这种因人们的使用而产生的数据分布特性是非结构化 P2P 的重要特征,很多研究工作利用数据分布特性及语义相关性来优化搜索性能^[30,31].

结构化 P2P 为了发挥其收敛性路由的优势,一般都使用了严格限定数据存放位置的做法,以便能够使用路由实现高效率、有保障的数据查找.在结构化 P2P 中,数据和结点一样被赋予标识(可以由散列函数产生或使用数据属性值),并将数据标识映射到结点标识空间中.存放数据时采用严格匹配的办法,由数据标识在标识空间中的映射决定数据存储的确切位置,一般是存放到标识距离映射位置最接近(根据逻辑距离的定义)的结点上.不同的结构化 P2P 可能使用不同的匹配方法和距离定义,除通常的线性距离外,还有使用异或运算来定义距离的做法.由于这种严格匹配关系,根据数据标识即可知道数据存放的位置,从而为数据的高效查找奠定了基础.

结构化 P2P 中结点无法决定存储或不存储哪些数据,一切都是系统决定的,这就带来了负载均衡的问题.存放策略设计得不好就可能造成负载失衡和结点过载.通常保证负载均衡的做法是使用散列函数生成均匀分布的数据标识,再将其匹配到均匀分布的结点标识上,从而使各结点负载大体一致.此外,研究者还提出了很多用于结构化 P2P 系统的负载均衡措施^[32-35].

目前,基于 P2P 的 Web 搜索系统在数据存放策略上通常采用任意存放的方式,即 Web 文档在各结点上可以任意存放,即使是采用结构化拓扑,各结点存放的 Web 文档也是自主选择的,其 DHT(distributed hash table)结构主要用来划分索引.之所以采用这样的数据存放策略,主要是为了简单、方便,易于实现,因为要把规模巨大的 Web 文档按照 DHT 方式进行存放将是十分困难和复杂的.

2.3 查询路由机制

查询路由是 P2P 搜索技术中的一个核心问题,路由算法的效率和开销直接决定搜索系统的性能.P2P 搜索系统中的路由是指当一个用户提交一个查询请求以后,如何在系统中沿着结点之间的连接转发请求,最终到达目标结点(能够响应该查询请求的结点)的过程.路由算法与 P2P 拓扑结构有着密切的关系,一个 P2P 系统的拓扑结构大致决定了它的路由算法.目前的路由机制主要包括以下 3 类.

2.3.1 中心目录服务

这是中心化拓扑结构所采用的路由算法.系统中设置一个中心目录,所有共享数据的位置信息都保存在这个中心目录中.当一个结点发起一个查询请求时,它首先连接到中心目录服务器,在中心目录中查找到能够满足查询要求的目标结点,在获取到目标结点的地址之后,查询请求结点直接与目标结点联系,获取查询结果.这种路由机制简单、高效,且能支持复杂查询.但是中心目录服务使系统存在单点失效以及可扩展性等方面的问题.

2.3.2 洪泛

这种路由机制没有中心服务器和中心目录,用户的查询请求以不加选择的方式转发给一个结点的邻居结点,例如广度优先和深度优先算法.这种路由算法不需要大量系统状态信息的支持,实现简单,但是整个路由过

程需要消耗大量网络带宽和 CPU 资源,因此存在搜索效率低下和不可扩展等问题.当网络规模较大时,为了减小搜索开销,通常会为查询请求赋予一个 TTL 值,它随着查询转发的进行而递减,当 $TTL=0$ 时,路由过程即终止执行,这样就将路由跳数限制在一定范围内,从而减小路由开销.但是,TTL 的设置会带来新的问题,即不能保证路由的收敛性,即使搜索目标存在于系统中,也不能保证能够搜索到.

Gnutella 就是采用洪泛方式来实现查询路由的.这类路由机制又被称作盲目搜索(blind search)或随机搜索(random search).如何解决这类搜索方法的低效率和高带宽开销一直是 P2P 搜索研究的一个热点问题,而基于 P2P 的 Web 搜索对此提出了更高的要求.目前的努力主要集中在如何利用系统中的一些信息来引导查询转发过程尽快到达目标结点^[36],尽可能地避免将查询请求转发给过多的无关结点,比如改进的宽度优先搜索^[37]、随机走步^[38]、路由索引^[39]、语义覆盖网^[40]等.

2.3.3 分布式哈希表

目前的结构化 P2P 系统通常都基于分布式哈希表(DHT)来实现,在这些系统中,每个共享文档都有一个 key,可能是文档名或者文档的系统标识号,所有的 key 被一个哈希函数映射到一个公共的 key-space,这个 key-space 被划分到各个结点上,每个结点负责 key-space 的一个区间,文档则按照它的 key 所在的区间被保存到对应的结点上.当要查询一个文档时,必须知道该文档的 key.搜索过程则相对比较简单:查询请求结点用系统哈希函数对 key 作哈希,找出负责保存该 key 对应数据的结点,然后将查询请求通过 DHT 结构路由到目标结点上执行查询.

DHT 中的路由过程与各系统的 DHT 拓扑结构及路由协议紧密相关,比如 CAN^[17],Chord^[18],Pastry^[19],Tapestry^[20],这些系统中的路由算法都各不相同.在基于 DHT 的系统中,每个结点都维护一张路由表,记录其他一些结点的信息.当一个结点收到一个查询操作时,如果它发现所查询的标识不在自己关联的区间内,那么该结点将会把该查询发送给其路由表中它认为最靠近目标的邻居.各种算法中,对“最靠近目标”的定义不尽相同,但是通常都是根据结点标识和目标标识的逻辑距离加以定义.

Ratnasamy 等人总结了基于 DHT 的路由算法研究中的一些开放性问题^[41].基于 DHT 的路由机制效率较高,不过路由表的维护开销较大,而且很难支持复杂查询.但是,也有研究者提出了在 DHT 结构中实现复杂查询的方法^[42],但还不够完善.

2.4 索引切分策略

为了实现对资源的快速定位,大规模信息检索系统通常都需要采用索引技术,其中使用最广泛的是倒排列表,其基本形式是根据关键词列出一个数据集中所有包含该关键词的文档,即(keyword,doc1,doc2,doc3...),这样,给定一个关键词,根据其倒排列表即可快速查找出对应的文档.另外,也有采用其他索引技术的,比如后缀数组^[43].

在小规模搜索系统中,索引通常采用集中式结构,而对于大规模搜索系统,通常需要采用分布式索引.在基于 P2P 的 Web 搜索系统中如何对索引进行切分是一个必须解决的重要问题.以倒排列表为例,目前主要存在两类切分方法:基于文档的切分和基于关键词的切分^[14].

基于文档的索引切分策略将系统的整个数据集按照文档切分成多个子集,每个结点负责存储和维护一个文档子集的索引,如图 1 所示.在查询时,查询请求结点通过洪泛或随机走步等方式把查询请求转发到各个结点上,由各个结点在本地索引中进行查询.

基于文档的索引切分策略实现起来比较简单,而且很容易做到各个索引结点的负载均衡,它在紧耦合系统中(结点数目一般比较少)得到了很好的应用.但由于它在查询处理时必须将查询分发到每一个结点上以得到精确的搜索结果,这样无疑增加了系统查询开销,从而也带来了系统的可扩展性问题.

基于关键词的索引切分策略将系统的整个数据集的索引按照关键词切分成多个部分,每个结点存储一部分索引,也就是说,每个结点负责存储和维护一部分关键词的索引,一个结点上拥有多个关键词的索引,而不同结点上的索引是正交的(在实际系统中,为了提高系统可用性,通常都有索引备份策略),如图 2 所示.在查询时,由查询请求结点根据查询词将查询请求发送到存储这些关键词索引的结点上.

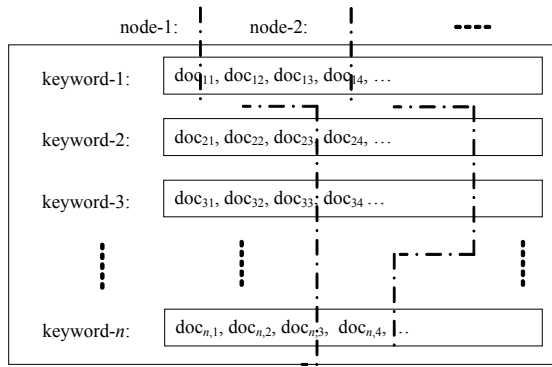


Fig.1 Document-Based partitioning
图 1 基于文档的索引切分

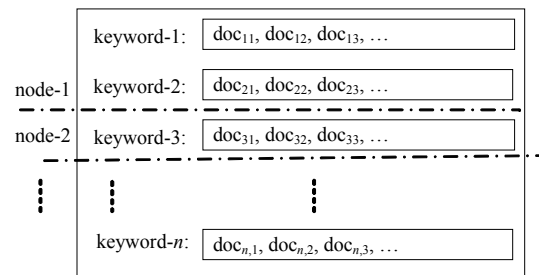


Fig.2 Keyword-Based partitioning
图 2 基于关键词的索引切分

基于关键词的索引切分由于处理一个查询请求只需要少数几个结点的参与,因此可以同时支持较多的查询,提高了系统吞吐率.但是,由于它在处理多关键词查询时需要在结点之间传递索引用于倒列表求交运算,因此,当系统中索引的数据量很大时,查询处理需要占用大量的网络带宽,通信延迟也会急剧增长.在这方面有一些方法可以用来减小索引传输的通信量,比如索引压缩技术、Bloom Filter 技术等.此外,基于关键词的切分方式还面临着负载不均衡问题,一方面,关键词在文档中的分布是不均衡的,有的关键词索引会很大,而有的关键词索引则很小,这就造成各结点存储的索引量很难达到均衡;另一方面,各结点的查询负载也是不均衡的,容易形成查询热点问题.

有的文献将基于文档的索引切分和基于关键词的索引切分分别称作水平切分和垂直切分^[3]或本地索引和全局索引^[44].Zhong 等人对这两类切分方式进行了评价和对比^[4].另外,还有一类混合索引切分策略,其本质是将上述两种切分方式结合起来,多层次索引切分^[45]就是这样一种切分方式.

2.5 数据集选择

在分布式信息检索领域,一个重要问题是如何选择最优的数据子集来执行查询.比如,在基于文档的索引切分策略中,整个数据集被切分成多个子集分别存储在各个结点上,而系统中又没有全局索引来实现资源定位,这时,有效的数据集选择方法就显得尤为重要,否则就只能采用洪泛式查询.

数据集选择的基本思路是通过综合考虑各数据集的信息以及数据集之间的相互关系,预先评估每个数据集对一个查询的潜在贡献,根据每个数据集潜在贡献的大小、系统的负载情况、用户对查询质量的要求等方面的限制,选取若干最优的数据集来执行查询,从而以尽可能小的查询开销达到尽可能好的查询质量.

在已有的数据集选择方法中,比较有影响的主要有:Callan 等人提出的数据集排序方法 CORI^[46],Fuhr 提出的基于决策论的数据集选择框架^[47],Gravano 等人提出的 Gloss 方法^[48],Si 等人提出的基于统计语言模型的方法^[49].这些方法都没有考虑数据集之间的重叠关系,而只是独立地考虑每个数据集对查询结果的贡献,而考虑数据集之间的重叠关系可以进一步提高数据集选择方法的有效性.Byers 等人提出了一种基于置换的技术,可以有效地评估数据集之间的相似性^[50];Florescu 等人则使用概率测度对数据集之间的重叠和覆盖关系进行建模^[51];Zhang 等人则提出一种在集中式信息过滤系统中数据集的新颖性(novelty)和冗余性(redundancy)检测方法^[52];Nie 和 Hernandez 等人提出利用查询分类和数据挖掘的方法来评估数据集之间的覆盖和重叠,他们还采用探针技术来提取数据集的特征^[53,54];Bender 等人则提出采用统计方法来评估数据集的重叠关系^[55].

以上各种数据集选择方法的都是为了减小查询的转发范围,从而减小查询开销.不过,在系统中引入数据集选择算法,本身也会给系统带来一定的开销,而且目前的数据集选择算法通常都要针对每个查询进行处理,因此,对算法额外开销的评估就显得尤为重要.目前尚未见到对各种数据集选择方法所引入的额外开销进行的综合分析.

2.6 相关性排序

相关性排序是指根据文档与查询之间的相关度对查询结果进行排序。在传统信息检索领域,相关度评价模型主要包括布尔模型、向量空间模型、概率模型以及在此基础上发展出来的一系列扩展模型。这些相关度评价模型在传统集中式检索系统中已经得到很好的应用,但是要将它们应用到基于 P2P 的 Web 搜索系统中则存在很多问题:一方面,这些模型的计算往往需要一些全局信息的支持,比如著名的 TF-IDF 公式中就需要文档频度信息,而在 P2P 这样的分布式系统中要获取这些全局信息是不容易的;另一方面,这些相关度计算方法在以往都是集中式的算法,而要在 P2P 的分布式环境中实现也存在一定的困难。

在 P2P 搜索的相关性排序方面,研究者做了很多努力,取得了很多重要成果。Bender 等人提出一种在各结点数据集之间存在重叠的情况下进行全局文档频度估计的方法^[56]。pSearch^[57]系统中使用向量空间模型和潜在语义索引来生成文档向量和查询向量,并将它们映射到一个高维的 P2P 系统中。Bhattacharya 等人使用一种相似性保留哈希和余弦相似度来计算文档相似度^[58],他们认为这种方法可以适用于任何 DHT 结构。PlanetP^[59]也使用向量空间模型,它的每个结点保存本地文档的向量,同时还保存其他结点上文档内容的摘要信息,它采用 gossip 方法来散播这些信息,利用这些信息,各个结点就可以在本地计算文档和查询的相似度。Bawa 等人也提出使用 gossip 技术来获取非结构化 P2P 系统中的一些全局信息,比如系统中的结点总数、文档总数等^[60]。Gopalakrishnan 等人则采用随机取样法将向量空间模型扩展到 P2P 系统中^[61]。还有一类方法是各结点根据自己的本地数据集计算文档与查询之间的相关度,然后在合并查询结果时对相关度分值进行归一化,Callan 对这类方法进行了较为详细的总结和分析^[46]。

除了计算文档与查询之间的相关度,Web 搜索中对搜索结果的排序还有一个重要的方面是基于链接关系的网页重要性排序。PageRank^[62]和 HITS^[63]是传统集中式搜索引擎中最为重要的两种链接关系评价算法,它们对搜索结果的排序起着相当重要的作用,人们自然会考虑将其引入到基于 P2P 的 Web 搜索引擎中,然而,这一扩展同样会遇到之前提到的两方面问题。目前,在 P2P 结构中实现 PageRank 算法一般都采用近似计算,以降低计算复杂度和算法设计难度。Sankaralingam 等人在 P2P 环境中实现了 PageRank 算法^[64],他们采用异步迭代和增量式的计算方法。Shi 等人研究并给出了基于结构化 P2P 网络的异步 PageRank 计算方法并给出了收敛性的理论证明^[65]。Parreira 等人最近提出了 JXP 算法^[66],该算法能够动态地、协作式地计算任意分布在 P2P 网络中的网页 PageRank 值。

目前,基于 P2P 的 Web 搜索中的相关性排序主要还是将传统集中式的相关性排序算法引入到 P2P 环境中,有时甚至要作一些简化或者采用一些近似算法,但是传统搜索引擎中的相关性排序算法仍然存在很多缺陷,其相关性计算和排序结果还不能令用户完全满意,因此,基于 P2P 的 Web 搜索中的相关性排序必然面临更大的难度,在借鉴传统方法的同时,如何充分利用其自身的特点,提出更有效的相关性排序算法是一个很大的难题。

2.7 网页收集

基于 P2P 的 Web 搜索系统的数据来源可以是 P2P 系统内部,也可以是系统外部。系统内部的数据可以通过主动推送等方式发布到搜索系统中,而系统外部的数据则必须通过某种被动方式获取。就目前来说,要想构建大规模的 P2P 搜索引擎,必须借助网络爬虫来抓取系统外部的大量 Web 文档,这就需要将传统集中式搜索引擎中的网络爬虫扩展到 P2P 的分布式环境中。

传统的网络爬虫通常是集中式的或者是在一个紧耦合机群环境中并行实现的,这类网络爬虫都有一个中心化的调度器负责各结点的任务分配、调度和结果收集工作,这样的结构并不适合 P2P 环境。目前,在 P2P 环境中的分布式网络爬虫研究工作主要包括:Takahashi 等人提出了松耦合 P2P 系统中的网络爬虫技术^[67],不过并没有提供结点间任务分配和负载均衡的具体机制;Grub 是目前可用的一个 P2P 网络爬虫,它采用类似 SETI@home 的结构,拥有一个中心化的 URL 分配器,因此也被认为并不是纯 P2P 的;Loo 等人提出基于 DHT 的分布式网络爬虫技术^[68],参与网页抓取的各个结点利用 DHT 来协调和分配任务;Apoidea^[69]是 Singh 等人提出来的一个完全分布式和无中心化的 P2P 网络爬虫体系结构,它可以实现自主管理,并且可以利用结点与 Web 资源的地理邻

近信息来优化网页抓取过程,Apoidea 还利用 DHT 来实现 URL 重复性和网页内容重复性检测。

目前针对 P2P 环境中的网络爬虫研究主要还集中在如何利用 P2P 系统提供的资源和特性来优化网络爬虫的设计上,而对如何将网络爬虫与基于 P2P 的 Web 搜索引擎加以结合的问题还研究得很少。

3 基于 P2P 的 Web 搜索原型系统

在对各项关键技术进行研究的基础上,一些研究者设计了基于 P2P 的 Web 搜索原型系统,比如 Coopcer^[24,25],ODISSEA^[26],GALANX^[27],MINERVA^[28,29],PlanetP^[59]等.本节将对其中 3 个较有特色的系统进行介绍。

3.1 MINERVA

MINERVA 是德国马克斯-普朗克信息研究所的 Bender 等人提出的一个基于 P2P 的 Web 搜索原型系统。MINERVA 假设每个结点都是自治的,并且拥有符合本地用户兴趣的本地索引(可以通过本地爬虫来构建,也可以从外部导入)。系统中设置一个全局的分布式目录,构建在类似于 Chord 的 DHT 上,用来保存经聚合、压缩的结点本地索引的元信息。每个结点将本地索引的元信息发布到全局目录中,其中包括结点的标识信息以及针对每个关键词的一系列统计信息。对于一个多关键词查询来说,其处理过程为:首先,在本地结点执行查询,如果不能得到满意的结果,则需要进一步转发查询。其次,由查询结点在 DHT 中执行 lookup 查找,获取每个查询词对应的结点列表,这些结点列表通过求交运算得到整个查询对应的结点列表。然后,查询被转发到这些结点,这些结点执行本地查询之后将结果返回请求结点。最后,查询请求结点将这些返回的查询结果进行合并得到最终的查询结果。MINERVA 的系统结构和 workflow 如图 3 所示^[70]。

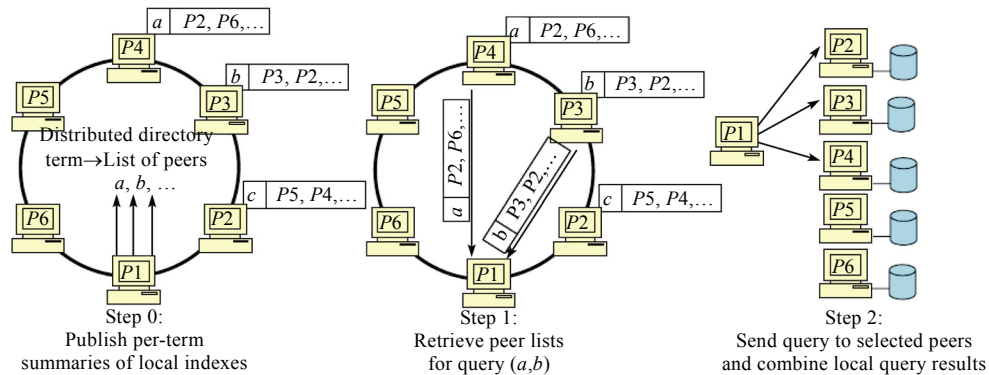


Fig.3 MINERVA system architecture and workflow^[70]

图 3 MINERVA 的系统结构和 workflow^[70]

MINERVA 系统提出了一种重叠感知(overlap awareness)的数据集选择算法^[55],即考虑各数据集之间的重叠关系来进行数据集选择。由于 P2P 系统中各结点的自治性,结点数据集之间通常会存在重叠现象。以往的一些数据集选择方法只考虑各个数据集本身对查询结果的贡献,而没有考虑数据集之间的重叠。MINERVA 把数据集本身的质量和数据集之间的重叠结合起来考虑,提出了新的数据集选择算法。通过与 CORI 算法的实验对比,这种算法在达到相同查全率的前提下可以有效地减少查询结点数量。

3.2 GALANX

GALANX 是美国威斯康辛大学开发的一个 P2P 搜索引擎,它是基于 Apache HTTP Server 和 BerkeleyDB 实现的,其特点在于利用本地结点索引来引导用户查询转发到相关结点上,从而达到较高的查询效率。

GALANX 采用的索引结构包括两部分:数据索引和结点索引。数据索引就是传统信息检索技术中的倒列表,它反映了关键词和文档之间的关系,如图 4 所示,GALANX 的每个结点建立本地文档的数据索引。结点索引

则反映关键词和结点之间的关系,如图 5 所示.在处理查询请求时,先从结点索引中找出那些可能相关的结点,然后根据这些结点的数据索引进行检索.

Keyword ₁	Doc _{1,1} , Doc _{1,2} , ..., Doc _{1,k1}
Keyword ₂	Doc _{2,1} , Doc _{2,2} , ..., Doc _{2,k2}
...	...
Keyword _n	Doc _{n,1} , Doc _{n,2} , ..., Doc _{n,kn}

Fig.4 Data index^[27]
图 4 数据索引^[27]

Keyword ₁	Peer _{1,1} , Peer _{1,2} , ..., Peer _{1,k1}
Keyword ₂	Peer _{2,1} , Peer _{2,2} , ..., Peer _{2,k2}
...	...
Keyword _n	Peer _{n,1} , Peer _{n,2} , ..., Peer _{n,kn}

Fig.5 Peer index^[27]
图 5 结点索引^[27]

结点索引的分布通常可以采用两种方法:一种是每个结点保存一份全局结点索引,另一种则是通过 DHT 将结点索引根据关键词散列在各结点上.GALANX 则提出了一种折衷的方法,如图 6 所示.每个结点上保存的结点索引包含两部分:直接结点索引(direct peer index)和间接结点索引(indirect peer index).直接结点索引中的每个关键词都拥有其完整的结点列表;而间接结点索引中的关键词则只对应少量结点,而且这些结点不一定具有该关键词的数据索引,而是具有该关键词的直接结点索引.对每个结点来说,它的直接结点索引和间接结点索引中的关键词是互不重叠的,并且包含网络中所有的关键词.对不同的结点来说,它们的结点索引是不同的.采用这样的结点索引,在处理查询请求时,如果查询词在直接结点索引中,则可以直接定位到这些结点上进行搜索;如果查询词在间接结点索引中,则需要进一步查询间接结点索引中该查询词所对应的结点,然后才能最终定位到数据结点上进行搜索.采用这样的索引结构,既能保证较高的查询效率,又能达到较小的索引维护开销,因此是一种较好的解决办法.

Keyword ₁	Peer _{1,1} , Peer _{1,2} , ..., Peer _{1,k1}	Direct peer index
Keyword ₂	Peer _{2,1} , Peer _{2,2} , ..., Peer _{2,k2}	
...	...	
Keyword _j	Peer _{j,1} , Peer _{j,2} , ..., Peer _{j,kj}	
Keyword _{j+1}	Peer _{j+1,1} , Peer _{j+1,2}	Indirect peer index
Keyword _{j+2}	Peer _{j+2,1} , Peer _{j+2,2} , Peer _{j+2,3}	
...	...	
Keyword _n	Peer _{n,1} , Peer _{n,2}	

Fig.6 Local peer index in GALANX^[27]
图 6 GALANX 的本地结点索引^[27]

3.3 Coopeer

Coopeer 是清华大学 Zhou 等人提出的一个基于 P2P 的 Web 搜索系统,它的主要特点是充分利用 P2P 系统中人的因素,在搜索过程中引入用户协作,使得搜索结果更具人性化(humanization)和个性化(personalization).

Zhou 等人指出,传统集中式搜索引擎有着难以克服的缺陷:首先,它们无法利用用户协作来提高搜索质量和搜索效率;另外,它们完全忽略了用户的兴趣和偏好,对所有用户请求都返回完全一样的搜索结果.而基于 P2P 的 Web 搜索可以弥补这些缺陷,用户兴趣通常可由 user profile 反映出来,根据用户兴趣可以对搜索结果进行过滤,从而使搜索结果个性化;根据用户兴趣形成的兴趣团体则可以将查询路由限制在一小部分结点中,从而极大地减少了搜索开销,提高了搜索效率.

在 Coopeer 中,不仅网页信息可以共享,用户的搜索经验也可以被共享,包括查询词的选择以及对搜索结果的评价等,这就为用户协作提供了途径.Coopeer 充分利用了用户的搜索经验,提出了 3 项有特色的技术:

(1) PeerRank.这是 Coopeer 提出的结果排序技术,它的思想类似于社会选举.Coopeer 将所有用户看作一个推荐网络,用户需要对搜索结果中的每个网页做出评价,用户对一个网页做出好评,则该用户就是这个网页的推

荐者,PeerRank 根据推荐网络确定每个网页的相关度,拥有更多推荐者的网页具有更高的相关性分值.Zhou 等人指出,PeerRank 可以获得更好的排序结果,因为真实用户的评价通常比基于词频和基于链接关系的描述更准确.此外,PeerRank 还能更好地阻止 spam,因为要模仿真实用户的评价是相当困难的.

(2) 基于查询的文档表示方法.传统的搜索引擎通常使用从文档中提取的关键词来描述文档内容,而 Coopeer 则使用从用户查询中提取的查询词来描述文档.这种方法很有新意,它能够更好地描述文档的语义内容,也使搜索更人性化.

(3) 语义路由算法.Coopeer 的查询路由采用基于语义的定向广度优先算法.每个结点维护一个主题邻居索引(topic neighbor index)来描述其他结点的内容,该索引只保存那些本地用户感兴趣的主体,这就形成了一个实际的兴趣团体,根据这个索引表进行路由就可以保证用户能够快速找到感兴趣的内容,形成个性化搜索结果.

4 总 结

本文对目前基于 P2P 的 Web 搜索技术的研究现状进行了较为全面的总结,包括该领域面临的挑战和关键技术,并对已有的 3 个较有影响且富有特色的基于 P2P 的 Web 搜索原型系统做了介绍.通过总结可以看出,基于 P2P 的 Web 搜索引擎相比于传统集中式搜索引擎具有很多优势,可以很好地弥补传统搜索引擎的一些缺陷,但同时也面临着很多严峻的挑战.总体来看,该领域的研究还处在起步阶段,对各项关键技术的研究还不够完善,已提出的一些原型系统与实用还有很大差距,还需要研究者继续不断地努力.我们认为下一步的研究仍将重点围绕两个关键性问题:一是如何提高系统的可扩展性以满足 Web 搜索的巨大规模,二是如何提高系统的搜索效率以满足用户的搜索需求.这两个问题都是综合性的问题,需要在 P2P 基础设施、搜索机制、优化技术等多方面共同努力才有可能得到解决.从短期来看,基于 P2P 的 Web 搜索引擎与传统集中式搜索引擎相比仍将处于弱势地位,但我们相信随着研究的不断深入,基于 P2P 的 Web 搜索技术将逐步发展成为传统搜索引擎的有益补充,共同帮助人们更好地利用 Web 这个百科全书式的巨大知识库.

需要指出的是,本文对基于 P2P 的 Web 搜索关键技术的总结并不十分全面,比如 P2P 搜索中的安全问题是—个很重要的基本问题,本文中并未对其进行详细分析,另外,P2P 搜索中的一些优化问题也是值得关注的,比如副本技术、缓存技术等,这对构建一个高效、实用的 P2P 搜索系统是很重要的.

References:

- [1] Bergman MK. The deep Web: Surfacing hidden value. White paper. The Journal of Electronic Publishing. 2001. <http://www.press.umich.edu/jep/07-01/bergman.html>
- [2] Wang CG, Li B. Peer-to-Peer overlay networks: A survey. Technical Report, Department of Computer Science, Hong Kong University of Science and Technology, 2003.
- [3] Reynolds P, Vahdat A. Efficient peer-to-peer keyword searching. In: Endler M, Schmidt D, eds. Middleware 2003. LNCS 2672, Berlin: Springer-Verlag, 2003. 21–40.
- [4] Zhong M, Moore J, Shen K, Murphy AL. An evaluation and comparison of current peer-to-peer full-text keyword search techniques. In: Doan A, Neven F, McCann R, Bex GJ, eds. Proc. of the 8th Int'l Workshop on the Web and Databases (WebDB 2005). New York: ACM Press, 2005. 61–66.
- [5] Yang Y, Dunlap R, Rexroad M, Cooper BF. Performance of full text search in structured and unstructured peer-to-peer systems. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM 2006). IEEE Computer Society, 2006. 1–12.
- [6] Yang B, Garcia-Molina H. Improving search in peer-to-peer networks. In: Rodrigues L, Raynal M, Chen W, eds. Proc. of the 22nd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2002). Washington: IEEE Computer Society, 2002. 5–14.
- [7] Risson J, Moors T. Survey of research towards robust peer-to-peer networks: Search methods. Computer Networks, 2006, 50(17):3485–3521.
- [8] Cholvi V, Felber P, Biersack E. Efficient search in unstructured peer-to-peer networks. In: Gibbons PB, Adler M, eds. Proc. of the 16th Annual ACM Symp. on Parallelism in Algorithms and Architectures (SPAA 2004). New York: ACM Press, 2004. 271–272.
- [9] Joung YJ, Fang CT, Yang LW. Keyword search in DHT-based peer-to-peer networks. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2005). IEEE Computer Society, 2005. 339–348.

- [10] Joung YJ, Yang LW. Wildcard search in structured peer-to-peer networks. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2007,19(11):1524–1540.
- [11] Skobeltsyn G, Luu T, Zarko IP, Rajman M, Aberer K. Query-Driven indexing for peer-to-peer text retrieval. In: Williamson CL, Zurko ME, Patel-Schneider PF, Shenoy PJ, eds. *Proc. of the 16th Int'l World Wide Web Conf. (WWW'75)*. New York: ACM Press, 2007. 1185–1186.
- [12] Zeinalipour-Yazti D, Kalogeraki V, Gunopulos D. pFusion: A P2P architecture for Internet-scale content-based search and retrieval. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2007,18(6):804–817.
- [13] Zhang RM, Hu YC. Assisted peer-to-peer search with partial indexing. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2007,18(8):1146–1158.
- [14] Li JY, Loo BT, Hellerstein JM, Kaashoek MF, Karger DR, Morris R. On the feasibility of peer-to-peer web indexing and search. In: Kaashoek F, Stoica I, eds. *Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2003)*. London: Springer-Verlag, 2003. 207–215.
- [15] Daswani N, Garcia-Molina H, Yang B. Open problems in data-sharing peer-to-peer systems. In: Calvanese D, Lenzerini M, Motwani R, eds. *Proc. of the 9th Int'l Conf. on Database Theory (ICDT 2003)*. Siena: Springer-Verlag, 2003. 1–15.
- [16] Huebsch R, Hellerstein JM, Lanham N, Loo BT, Shenker S. Querying the Internet with PIER. In: Freytag JC, Lockemann PC, Abiteboul S, Carey MJ, Selinger PG, Heuer A, eds. *Proc. of the 29th Int'l Conf. on Very Large Databases (VLDB 2003)*. Berlin: Morgan Kaufmann Publishers, 2003. 321–332.
- [17] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, Karp R, Shenker S. A scalable content-addressable network. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2001,31(4):161–172.
- [18] Stoica I, Morris R, Karger D, Kaashoek MF, Balakrishnan H. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2001,31(4):149–160.
- [19] Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, decentralized object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. In: Guerraoui R, ed. *Proc. of the 18th IFIP/ACM Int'l Conf. on Distributed Systems Platforms (Middleware 2001)*. London: Springer-Verlag, 2001. 329–350.
- [20] Zhao BY, Kubiatowicz J, Joseph AD. Tapestry: An infrastructure for fault-tolerant wide-area location and routing. *Technical Report, UCB/CSD-01-1141*, Berkeley: UC Berkeley, 2001.
- [21] Harvey NJA, Jones MB, Saroiu S, Theimer M, Wolman A. SkipNet: A scalable overlay network with practical locality properties. In: *Proc. of the 4th USENIX Symp. on Internet Technologies and Systems (USITS 2003)*. Berkeley: USENIX Association, 2003. 113–126. <http://research.microsoft.com/users/alecw/usits-2003.pdf>
- [22] Saia J, Fiat A, Gribble S, Karlin AR, Saroiu S. Dynamically fault-tolerant content addressable networks. In: Druschel P, Kaashoek F, Rowstron A, eds. *Proc. of the 1st Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2002)*. London: Springer-Verlag, 2002. 270–279.
- [23] Doukeridis C, Norvag K, Vazirgiannis M. The SOWES approach to P2P Web search using semantic overlays. In: Carr L, Roure D, Iyengar A, Goble CA, Dahlin M, eds. *Proc. of the 15th Int'l World Wide Web Conf. (WWW 2006)*. New York: ACM Press, 2006. 1027–1028.
- [24] Zhou J, Li K, Tang L. Towards a fully distributed P2P Web search engine. In: *Proc. of the 10th IEEE Int'l Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems (FTDCS 2004)*. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 332–338.
- [25] Zhou J, Li K, Tang L. Coopeer: A peer-to-peer Web search engine towards collaboration, humanization and personalization. In: Hassanein H, Oliver RL, Richard III GG, Wilson LF, eds. *Proc. of the 23rd IEEE Int'l Performance, Computing and Communications Conf. (IPCCC 2004)*. Phoenix: IEEE Computer Society, 2004. 313–314.
- [26] Suel T, Mathur C, Wu JW, Zhang JG, Delis A, Kharrazi M, Long XH, Shanmugasundaram K. ODISSEA: A peer-to-peer architecture for scalable Web search and information retrieval. In: Christophides V, Freire J, eds. *Proc. of the 6th Int'l Workshop on the Web and Databases (WebDB 2003)*. New York: ACM Press, 2003. 67–72.
- [27] Wang Y, Galanis L, Dewitt DJ. GALANX: An efficient peer-to-peer search engine system. <http://www.cs.wisc.edu/~yuanwang/papers>
- [28] Bender M, Michel S, Triantafillou P, Weikum G, Zimmer C. MINERVA: Collaborative P2P search. In: Böhm K, Jensen CS, Haas LM, Kersten ML, Larson PA, Ooi BC, eds. *Proc. of the 31st Int'l Conf. on Very Large Data Bases (VLDB 2005)*. Trondheim: VLDB Endowment, 2005. 1263–1266.
- [29] Michel S, Triantafillou P, Weikum G. MINERVA: A scalable efficient peer-to-peer search engine. In: Alonso G, ed. *Proc. of the Middleware 2005*. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 60–81.

- [30] Sripanidkulchai K, Maggs B, Zhang H. Efficient content location using interest-based locality in peer-to-peer systems. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2003 Conf. San Francisco: IEEE Computer Society, 2003. 2166–2176.
- [31] Cohen E, Fiat A, Kaplan H. Associative search in peer-to-peer networks: harnessing latent semantics. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2003 Conf. San Francisco: IEEE Computer Society, 2003. 1261–1271. http://www.ieee-infocom.org/2003/papers/31_02.PDF
- [32] Rao A, Lakshminarayanan K, Surana S, Karp R, Stoica I. Load balancing in structured P2P systems. In: Kaashoek F, Stoica I, eds. Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2003). London: Springer-Verlag, 2003. 68–79.
- [33] Byers J, Considine J, Mitzenmacher M. Simple load balancing for distributed hash tables. In: Kaashoek F, Stoica I, eds. Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2003). London: Springer-Verlag, 2003. 80–88.
- [34] Karger DR, Ruhl M. Simple efficient load balancing algorithms for peer-to-peer systems. *Theory of Computing Systems*, 2006,39(6):787–804.
- [35] Godfrey B, Lakshminarayanan K, Surana S, Karp R, Stoica I. Load balancing in dynamic structured P2P systems. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2004 Conf. Hong Kong: IEEE Computer Society, 2004. 2253–2262.
- [36] Tsoumakos D, Roussopoulos N. A comparison of peer-to-peer search methods. In: Christophides V, Freire J, eds. Proc. of the 6th Int'l Workshop on the Web and Databases (WebDB 2003). New York: ACM Press, 2003. 61–66.
- [37] Kalogeraki V, Gunopulos D, Zeinalipour-Yazti D. A local search mechanism for peer-to-peer networks. In: Proc. of the 11th Int'l Conf. on Information and Knowledge Management (CIKM 2002). New York: ACM Press, 2002. 300–307.
- [38] Lv Q, Cao P, Cohen E, Li K, Shenker S. Search and replication in unstructured peer-to-peer networks. In: Proc. of the 16th Int'l Conf. on Supercomputing (ICS 2002). New York: ACM Press, 2002. 84–95.
- [39] Crespo A, Garcia-Molina H. Routing indices for peer-to-peer systems. In: Rodrigues L, Raynal M, Chen W, eds. Proc. of the 22nd Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2002). Vienna: IEEE Computer Society, 2002. 23–32.
- [40] Crespo A, Garcia-Molina H. Semantic overlay networks for P2P systems. In: Moro G, Bergamaschi S, Aberer K, eds. Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Agents and Peer-to-Peer Computing (AP2PC 2004). Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 1–13.
- [41] Ratnasamy S, Stoica I, Shenker S. Routing algorithms for DHTs: Some open questions. In: Druschel P, Kaashoek F, Rowstron A, eds. Proc. of the 1st Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2002). London: Springer-Verlag, 2002. 45–52.
- [42] Harren M, Hellerstein JM, Huebsch R, Loo BT, Shenker S, Stoica I. Complex queries in DHT-based peer-to-peer networks. In: Druschel P, Kaashoek F, Rowstron A, eds. Proc. of the 1st Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2002). London: Springer-Verlag, 2002. 242–250.
- [43] Manber U, Myers G. Suffix arrays: A new method for on-line string searches. *SIAM Journal on Computing*, 1993,22(5):935–948.
- [44] Badue C, Ribeiro-Neto B, Baeza-Yates R, Ziviani N. Distributed query processing using partitioned inverted files. In: Proc. of the 8th Int'l Symp. on String Processing and Information Retrieval (SPIRE). Laguna de San Rafael: IEEE Computer Society, 2001. 10–20. http://homepages.dcc.ufmg.br/~berthier/conference_papers/spire_2001.pdf
- [45] Shi SM, Yang GW, Wang DX, Yu J, Qu SG, Chen M. Making peer-to-peer keyword searching feasible using multi-level partitioning. In: Voelker GM, Shenker S, eds. Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2004). Berlin: Springer-Verlag, 2004. 151–161.
- [46] Callan J. Distributed information retrieval. In: Croft WB, ed. *Advances in information retrieval*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. 127–150.
- [47] Fuhr N. A decision-theoretic approach to database selection in networked IR. *ACM Trans. on Information Systems*, 1999,17(3): 229–249.
- [48] Gravano L, Garcia-Molina H, Tomasic A. Gloss: Text-Source discovery over the Internet. *ACM Trans. on Database Systems*, 1999,24(2):229–264.
- [49] Si L, Jin R, Callan J, Ogilvie P. A language modeling framework for resource selection and results merging. In: Proc. of the 11th Int'l Conf. on Information and Knowledge Management (CIKM 2002). New York: ACM Press, 2002. 391–397.
- [50] Byers J, Considine J, Mitzenmacher M, Rost S. Informed content delivery across adaptive overlay networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2002,32(4):47–60.
- [51] Florescu D, Koller D, Levy A. Using probabilistic information in data integration. In: Jarke M, Carey MJ, Dittrich KR, Lochovsky FH, Loucopoulos P, Jeusfeld MA, eds. Proc. of the 23rd Int'l Conf. on Very Large Data Bases (VLDB'97). San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1997. 216–225.
- [52] Zhang Y, Callan J, Minka T. Novelty and redundancy detection in adaptive filtering. In: Proc. of the 25th annual Int'l ACM SIGIR Conf. (SIGIR 2002). New York: ACM Press, 2002. 81–88. <http://www.cs.cmu.edu/~callan/Papers/sigir02-yiz.pdf>

- [53] Nie ZQ, Kambhampati S, Nambiar U. Effectively mining and using coverage and overlap statistics in data integration. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2005,17(5):638–651.
- [54] Hernandez T, Kambhampati S. Improving text collection selection with coverage and overlap statistics. In: Ellis A, Hagino T, eds. *Proc. of the 14th Int'l World Wide Web Conference (WWW 2005)*. New York: ACM Press, 2005. 1128–1129.
- [55] Bender M, Michel S, Triantafillou P, Weikum G, Zimmer C. Improving collection selection with overlap awareness in P2P search engines. In: Baeza-Yates RA, Ziviani N, Marchionini G, Moffat A, Tait J, eds. *Proc. of the 28th Annual Int'l ACM SIGIR Conf. (SIGIR 2005)*. New York: ACM Press, 2005. 67–74.
- [56] Bender M, Michel S, Triantafillou P, Weikum G. Global document frequency estimation in peer-to-peer web search. In: *Proc. of the 9th Int'l Workshop on the Web and Database (WebDB 2006)*. New York: ACM Press, 2006. 69–74.
- [57] Tang CQ, Xu ZC, Dwarkadas S. Peer-to-Peer information retrieval using self-organizing semantic overlay networks. In: *Proc. of ACM SIGCOMM 2003 Conf.* New York: ACM Press, 2003. 175–186.
- [58] Bhattacharya I, Kashyap SR, Parthasarathy S. Similarity searching in peer-to-peer databases. In: *Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2005)*. Washington: IEEE Computer Society, 2005. 329–338.
- [59] Cuenca-Acuna FM, Peery C, Martin RP, Nguyen TD. PlanetP: Using gossiping to build content addressable peer-to-peer information sharing communities. In: *Proc. of the 12th IEEE Int'l Symp. on High Performance Distributed Computing (HPDC 2003)*. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 236–246.
- [60] Bawa M, Gionis A, Garcia-Molina H, Gionis A, Motwani R. Estimating aggregates on a peer-to-peer network. Technical Report, 2003-24, Department of Computer Science, Stanford University, 2003.
- [61] Gopalakrishnan V, Morselli R, Bhattacharjee B, Keleher P, Srinivasan A. Ranking search results in P2P systems. Technical Report, CR-TR-4779, Department of Computer Science, University of Maryland, 2006.
- [62] Page L, Brin S, Motwani R, Winograd T. The pagerank citation ranking: Bringing order to the Web. Technical Report, Stanford University, 1998. <http://dbpubs.stanford.edu/pub/1999-66>
- [63] Kleinberg JM. Authoritative sources in a hyperlinked environment. *Journal of the ACM*, 1999,46(5):604–632.
- [64] Sankaralingam K, Sethumadhavan S, Browne JC. Distributed pagerank for P2P systems. In: *Proc. of the 12th IEEE Int'l Symp. on High Performance Distributed Computing (HPDC 2003)*. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 58–68.
- [65] Shi SM, Yu J, Yang GW, Wang DX. Distributed page ranking in structured P2P networks. In: *Proc. of the 32nd Int'l Conf. on Parallel Processing (ICPP 2003)*. 2003. Kaohsiung: IEEE Computer Society, 2003. 179–186.
- [66] Parreira JX, Donato D, Michel S, Weikum G. Efficient and decentralized pagerank approximation in a peer-to-peer Web search network. In: *Proc. of the 32nd Int'l Conf. on Very Large Data Bases (VLDB 2006)*. Seoul: VLDB Endowment, 2006. 415–426.
- [67] Takahashi T, Soonsang H, Taura K, Yonezawa A. World Wide Web crawler. In: *Poster Proc. of the 11th Int'l World Wide Web Conf. (WWW 2002)*. 2002. <http://www2002.org/CDROM/poster/182/index.html>
- [68] Loo BT, Cooper O, Krishnamurthy S. Distributed web crawling over DHTs. Technical Report, UCB/CSD-04-1305, Berkeley: UC Berkeley, 2004.
- [69] Singh A, Srivatsa M, Liu L, Miller T. Apoidea: A decentralized peer-to-peer architecture for crawling the World Wide Web. In: *Proc. of the 26th Annual Int'l ACM SIGIR Conf. (SIGIR 2003)*. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 126–142.
- [70] Bender M, Michel S, Weikum G. P2P directories for distributed Web search: From each according to his ability, to each according to his needs. In: *Proc. of the 22nd Int'l Conf. on Data Engineering Workshops (ICDEW 2006)*. 2006. 51–60.



方启明(1982—),男,浙江淳安人,博士生,主要研究领域为对等网络,信息检索,网格计算.



武永卫(1974—),男,博士,副研究员,CCF会员,主要研究领域为并行与分布处理,网格计算,符号计算.



杨广文(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为网格计算,并行与分布处理,算法设计与分析.



郑纬民(1946—),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为并行与分布处理,集群计算,网格计算,高性能存储,生物信息学.