

PeerIS: 基于 Peer-to-Peer 的信息检索系统*

凌波^{1,2+}, 陆志国¹, 黄维雄³, 钱卫宁¹, 周傲英¹

¹(复旦大学 计算机科学与工程系, 上海 200433)

²(中国浦东干部学院, 上海 200233)

³(新加坡国立大学 新加坡-麻省理工联盟, 新加坡)

PeerIS: A Peer-to-Peer Based Information Retrieval System

LING Bo^{1,2+}, LU Zhi-Guo¹, Ng Wee-Siong³, QIAN Wei-Ning¹, ZHOU Ao-Ying¹

¹(Department of Computer Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

²(China Executive Leadership Academy Pudong, Shanghai 200233, China)

³(Singapore-MIT Alliance, National University of Singapore, Singapore)

+ Corresponding author: Phn: +86-21-65643024, E-mail: lingbo@fudan.edu.cn, <http://www.cs.fudan.edu.cn/wpl>

Received 2003-11-29; Accepted 2004-02-03

Ling B, Lu ZG, Ng WS, Qian WN, Zhou AY. PeerIS: A peer-to-peer based information retrieval system. *Journal of Software*, 2004,15(9):1375~1384.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1375.htm>

Abstract: In this paper, the emerging P2P computing is first briefly introduced, including its distinct features, potential merits and applications, and the problems from which the existing P2P-based data sharing systems are suffering are further point out. To address these problems, the concept of P2P-based information retrieval is proposed, which can not only exploit the potential merits of P2P to overcome the problems of traditional information retrieval systems (e.g., lacking of scalability), but also achieve fully semantic retrieval and sharing in the context of P2P systems. Based on the ideology, PeerIS, a P2P-based information retrieval system is developed. Then, the architecture of PeerIS and its peers' components are presented. The key issues of implementation are described, including communication, semantics-based self-reconfiguration, query processing and self-adaptive routing mechanisms, are also described. Finally, an experimental study is used to verify the advantages of PeerIS.

Key words: peer-to-peer; information retrieval

摘要: 介绍了对等计算(peer-to-peer,简称 P2P)的特征、潜在优势和应用范围,指出了当前 P2P 数据共享系统

* Supported by the National Nature Science Foundation of China under Grant No.60373019 (国家自然科学基金); the High Education Doctorial Subject Research Program of MoE of China under Grant No.20030246023 (国家教育部博士点基金资助); the Science and Technology Commission of Shanghai Municipal Government of China under Grant No.03DZ15028 (上海市科委重大项目)

作者简介: 凌波(1974-),男,江西赣州人,博士,主要研究领域为 P2P 计算,分布式数据库,信息检索,信息经济;陆志国(1978-),男,硕士,主要研究领域为 P2P 计算,数据库系统实现技术;黄维雄(1973-),男,马来西亚人,博士,主要研究领域为数据库性能,P2P 计算,基于 Internet 的应用;钱卫宁(1976-),男,博士,主要研究领域为 P2P 计算,海量数据挖掘,流数据管理与分析;周傲英(1965-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为对等计算,Web 数据管理,数据挖掘,流数据管理与分析。

存在仅支持弱语义(甚至缺乏语义)和粗粒度(文件水平)共享等局限性.针对这种现状,提出了基于 P2P 的信息检索,既可充分发掘 P2P 技术的潜在优势,克服传统信息检索系统的可伸缩瓶颈等问题,又可实现 P2P 数据共享系统语义丰富和细粒度的信息检索与共享;并开发出 PeerIS:基于 P2P 的信息检索系统.描述了 PeerIS 的整体构架与节点的内部结构;重点阐述了 PeerIS 的通信机制、自配置机制、查询机制以及自适应路由机制等实现关键技术;并用实验证明了 PeerIS 的优异性.

关键词: peer-to-peer;信息检索

中图法分类号: TP311 文献标识码: A

对等计算(peer-to-peer,简称 P2P)已经成为计算技术研究热点.虽然 P2P 目前还没有被人们广泛接受的定义,但以下特征使其明显区别于传统的计算模式:

- (1) P2P 系统是自组织的、非集中式的,各节点(peer)是自治的、动态的;
- (2) 节点在 P2P 系统中同时承担客户机与服务器两位一体的角色;
- (3) 各个节点功能与职责相同,它们之间的交互直接而对等;
- (4) 纯粹的 P2P 系统不存在集中式机制.

这种新型的体系结构具备许多潜在的优势有待于发掘:首先,非集中式体系结构不但消除了系统的单点出错和可伸缩性瓶颈等局限性,而且使得系统的鲁棒性、可用性和性能可随节点数目的增加而提高;其次,系统的信息、带宽与计算资源随着节点的加入而不断丰富,因而系统的能力随之不断增强;并且,由于各节点之间的交互直接而对等,可以高效地利用系统的资源;另外,P2P 还能够很好地提供匿名等特殊服务.因此,P2P 被认为是未来重构分布式体系结构的关键技术^[1].已有的研究成果表明,P2P 可以应用于许多领域:如 CPU 周期共享^[2]、及时信息传输^[3]、协同工作组件^[4]和数据共享^[5-10]等.其中,数据共享已经成为当前 P2P 研究与开发的主流.

简而言之,基于 P2P 的数据共享系统大致可分为 3 类:混合型、结构化和非结构化 P2P 系统,如图 1 所示.混合型 P2P 数据共享系统用一个或数个服务器维护所有在线节点的共享数据索引.对等节点(peer)提交的查询首先被发送到服务器,服务器处理后把要查找文件的维护节点的 IP 地址返回给查询节点,最后,查询节点与维护节点建立直接连接并下载查找到的文件,如图 1(a)所示.然而,由于这类系统存在集中式机制(如 Napster 的中心索引服务器),系统存在可伸缩性瓶颈和单点出错等局限性.近期开发出的结构化 P2P 数据共享系统,如 PAST^[7,8],数据在系统的放置是严格控制的.基于分布式哈希函数,数据严格地映射到节点,即如果一个文件 f 的标识符的哈希值与某个节点 P 的标识符的哈希值最相近,则由节点 P 维护文件 f ,如图 1(b)所示.这类系统的查询消息能在具有上限的跳数(hops)内到达答案所在节点,因而这类系统的查询路由比较高效.但是这类系统存在以下局限性:(1) 不支持非精确匹配的查询;(2) 系统中数据的放置严格控制,这就意味着在动态的 P2P 环境中维护系统拓扑结构的代价极其昂贵.非结构化 P2P 系统既不存在任何集中式机制,也不存在数据放置控制机制;节点独立自治,虽然一个节点不但可以为其他节点提供信息与服务,而且可以享用其他节点提供的信息与服务,但每个节点只需维护自己关注的文件;查询一旦提交,提交节点立即搜索本地文件库,并把查询转发给其所有邻居,这些邻居也依次进行类似的操作,直到查询消息的存活期(time-to-live,简称 TTL)减少到 0 为止,所有查询结果(包括击中与失败)沿途返回给提交节点,如图 1(c)所示.显然,相对于其他两类数据共享系统,非结构化系统更具有可伸缩性、灵活性和自治性等优良特性.因此,我们不把混合型和结构化系统列入研究范畴,而着重研究非结构化系统.

然而,当前数据共享系统存在仅支持弱语义(甚至缺乏语义)和粗粒度(文件水平)共享等局限性,用户通过文件的标识符进行查找(如 Past 用文件名的哈希值查找).在这种模式下,一方面,用户很难设想出一个文件标识符来表达信息需求,因而很难找到自己真正需要的文件;另一方面,许多标识符相近、但语义不相干的答案却被返回给用户,造成了大量的带宽与计算资源的浪费,极大地限制了 P2P 潜能的发挥.显然,这种缺乏语义的共享既不能很好地满足用户的需求,也不能有效地利用系统的资源.

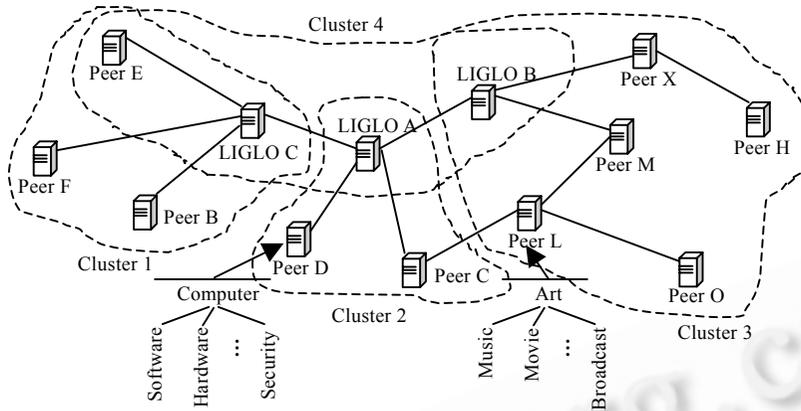


Fig.1 Architecture of PeerIS
图1 PeerIS 体系结构示意图

针对这种现状,我们提出基于 P2P 的信息检索,把语义丰富的信息检索技术与 P2P 系统相集成,既可充分发掘 P2P 技术的潜在优势,克服传统信息检索系统存在的可伸缩瓶颈等局限性;又可克服现有 P2P 数据共享系统仅支持弱语义(甚至缺乏语义)和粗粒度(文件水平)的共享等问题,实现 P2P 系统语义丰富的信息检索与共享。基于此理念,我们在 BestPeer^[1]平台上开发出 PeerIS:基于 P2P 的信息检索系统。相对于现有的类似系统,PeerIS 有以下优点:

- 保持节点(peer)的自治性,系统中的各个节点只需维护和查找自己关注的文件,独立自主地设定共享文件范围以及共享权限,完全消除了结构化 P2P 系统忽略节点自治性和数据严格放置的局限性;
- 节点在不同的环境中可以承担不同的角色工作,既可作为 P2P 系统的 peer(数据服务器与客户机两位一体),又可用作独立自治的信息检索系统,还可作为其他网络(如 Internet)的节点,这与现有的结构化与非结构化文件共享系统节点功能单一有明显的区别;
- 支持不同粒度、语义丰富的信息检索与共享,节点不仅可以处理本地提交的查询,还可以完成远程查询,而与现有的 P2P 文件共享系统(包括非结构化系统)仅支持文件水平和缺乏语义的共享有明显的区别;
- 支持基于语义的动态自配置策略,节点可以根据查询历史、相互间的兴趣偏好与行为相似度动态地调整邻居关系,这明显有别于典型的非结构化 P2P 系统(如 Gnutella)的节点随机和静态地选择邻居节点的机制,自配置机制的优异性已在文献[1]中得以证明。

总之,本文的主要贡献如下:

- (1) 提出了基于 P2P 的信息检索,并开发出 PeerIS:基于 P2P 的信息检索系统;
- (2) 介绍了系统的整体构架,系统中节点的相互关系以及节点的内部构成;
- (3) 论述了系统实现的关键技术;
- (4) 用实验证明了 PeerIS 的优良特性。

本文第 1 节介绍 PeerIS 的体系结构,第 2 节论述 PeerIS 实现的关键技术,第 3 节进行系统测试与性能分析,第 4 节总结全文并指出今后的工作方向。

1 PeerIS 体系结构

本节首先介绍 PeerIS 系统的整体构架和 peer 之间的相互关系,然后描述 peer 的内部结构。

1.1 PeerIS 系统体系结构

PeerIS 是建立在 BestPeer 平台上的一种新型的基于 P2P 的信息检索系统,系统由两类节点构成:数目甚少的位置独立全局名称服务器 LIGLO(location independent global names lookup server)和为数众多的对等节点(peer,用 BPID 标识)^[1]。LIGLO 之间都相互联系并以 P2P 方式交互,并且每个 LIGLO 都与其所管辖的 peer 相联;

每个 peer 都是一个自治的信息检索系统,并一起构成 P2P 系统,由于受到自身的带宽与计算资源等条件的限制,每个 peer 在某时刻只能与有限的 peer 相互联系和交互.PeerIS 中 peer 之间的两类重要关系定义如下:

邻居节点.如果两个 peer 直接相联,那么它们互为邻居.

相关节点.如果一个 peer P_i 通过其他 peer 与另一个 peer P_j 相联并交互,那么 P_j 被定义为 P_i 的一个相关节点.

显然,邻居节点是相关节点的一种特例,可以把这两类节点统称为重要节点.在 PeerIS 中,每个 peer 用一个重要节点管理器(important peer manager,简称 IPM)来管理邻居节点和相关节点.

通过系统的基于语义的自配置机制(见第 2.2 节),每个 peer 根据其自身资源条件,尽可能地把与自己具有最相似偏好(用本地文件的语义类别分布定义)和行为的 peer 保持为邻居节点和相关节点.这样,在 PeerIS 中,peer 将基于不同的偏好和行为形成不同的簇,如图 1 中虚线所示;并且在同一簇内,两个 peer 的偏好和行为越相似,则逻辑距离越近,反之亦然.这样,对于某个给定的查询,它的答案只在特定的节点簇(称为该查询的目标簇),只需在该节点簇处理.

1.2 Peer结构及工作流程

PeerIS 系统的每个 peer 均由 6 个组件耦合而成,如图 2 所示.

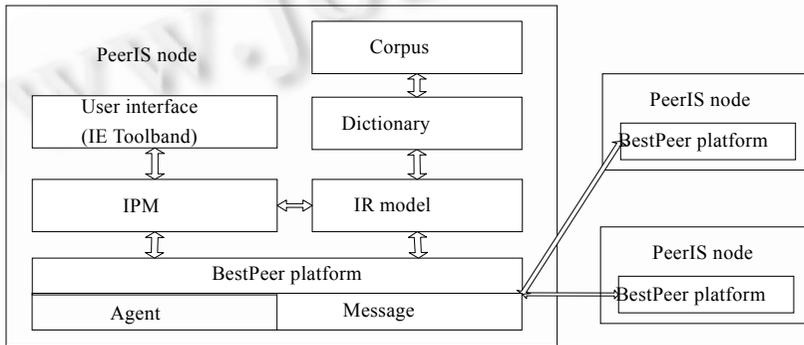


Fig.2 Architecture of PeerIS node

图 2 PeerIS 节点结构示意图

(1) 用户界面(user interface).友好的用户界面便于用户管理和维护本地文件,设置文件共享范围及其共享权限,产生和提交查询.如图 3 所示.

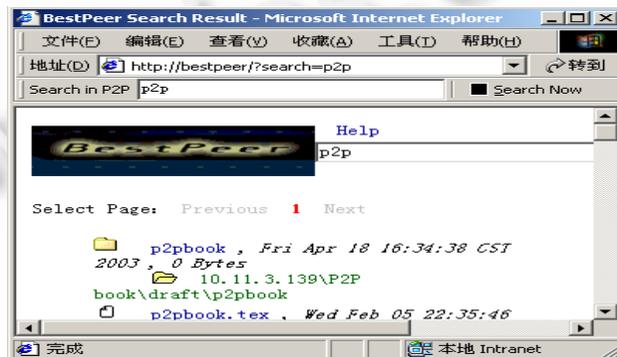


Fig.3 User interface of PeerIS

图 3 PeerIS 用户界面

PeerIS 节点的用户界面是在 IE 的基础上加 ToolBand 插件开发而成的.用户的查询(关键词)直接输入插件中,查询结果则以 Html 的形式返回给 IE 显示.显然,peer 的用户界面也可以用作普通浏览器,这种实现体现了

peer 在不同的环境下可以充当不同角色的设计理念.

(2) 重要节点管理器(important peer manager,简称 IPM)有 3 种功能:(a) 管理重要节点(邻居节点和相关节点)的标识符、当前 IP 地址以及兴趣偏好以及查询历史统计信息等;另外,反映本地节点的兴趣的统计信息也由 IPM 管理,该设计技巧的优点是可以迅速判断本地是否可能有查询答案、查询是否落到其目标节点簇;(b) 基于重要节点的查询统计信息,应用基于语义的自配置机制(见第 2.2 节),动态地调整重要节点;(c) 截取 IE 插件的输入,生成相应的查询,基于本地节点和重要节点的兴趣偏好信息,判断本地是否可能有答案、查询是否落到了目标节点簇,并决定把查询转发给哪些重要节点.

(3) BestPeer 平台.提供最基本的 P2P 系统功能,包括消息传递、移动 Agent 克隆与转发以及数据传输等底层功能^[1].Peer 在线时,BestPeer 周期性地发出(Active)消息探测邻居节点在线与否或应答这类探测(Active_Ok);查询时,把查询嵌在 Agent 中,并根据 IPM 的处理结果转发给相应的重要节点.

(4) 信息检索模块(IR module)有 3 大功能:(a) 预处理本地文件(如去虚词、提取词根)以获取文件的索引项及其词频和初始反比文档频数等统计信息,并为本地文件建立索引^[11];(b) 确定文件的语义类别;(a)与(b)的处理结果将存储于字典(dictionary)中;(c) 检索信息,一旦接收到由本地 IPM(或远程转发)而来的查询,信息检索模块从字典中提取相关文件的统计信息并计算查询与文件的语义相关程度(见第 2.3 节),排序后把合格结果返回给 IPM(转发查询的邻居节点),通过界面展现给用户.

(5) 字典(dictionary)管理本地文件的索引(倒排文件)、索引项的词频和反比文档频数、文件的语义类别以及文件的共享权限等信息.

(6) 文件库(corpus)存储本地所有的文本文件.

2 实现技术

本节论述系统的通信机制、自配置机制、查询机制以及自适应路由机制.

2.1 通信机制

PeerIS 系统采用两种通信机制:消息传递和移动 Agent 机制,以更好地满足不同的处理需求.移动 Agent 机制与消息机制有许多共同点,可以把移动 Agent 机制看做是消息机制的智能化高级形式.因此,我们在论述消息机制时也论述移动 Agent 的相关之处.

2.1.1 消息机制

PeerIS 的 peer 周期性地产生消息,探测其邻居节点在线与否.消息头如图 4 所示.

UUID	Descriptor-ID	Payload-Descriptor	Group-ID	TTL	Hops	Payload-Length
------	---------------	--------------------	----------	-----	------	----------------

Fig.4 Message header of PeerIS

图 4 PeerIS 消息头示意图

- UUID.消息标识符,用于唯一地标识任意一个消息;在移动 Agent 机制中,唯一地标识 Agent.
- Descriptor-ID.一个 16 位的字符串,用于标识消息的发送者.在移动 Agent 机制中,它是指最后一个转发 Agent 的节点.
- Payload-Descriptor.用于标识消息的种类.纯消息机制中,消息有两类:Active 和 Active_Ok,前者用于节点探测其邻居节点在线与否,后者是前者的应答.PeerIS 采用区别于其他 P2P 系统单向消息策略,即消息接受者并不向对应消息的发送者发送消息;如果一个节点向其一个邻居节点发出一条 Active 消息后,在预定的时间间隔内收到 Active_Ok 应答,则认为该邻居节点在线,否则,认为该邻居节点离线.这种策略有助于减少带宽消耗,提高系统的可扩展性和性能.在移动 Agent 机制中,Payload-Descriptor 有两对:Connection 与 Connection_Proved 以及 Query 与 QueryHits,分别表示连接请求和连接确认、查询与查询击中.
- Group_ID.用于确定消息或移动 Agent 发往何处,该机制支持自适应路由机制.
- TTL(time-to-live).生命周期,即消息能够转发的次数.在移动 Agent 机制中,TTL 用于确定 Agent 能够克隆的次数.

- Hops.消息(Agent)已经转发(克隆)的次数.
- Payload_length:消息头中内容的大小.

2.1.2 移动 Agent 机制

移动 Agent 机制用于 peer 初始化、调整邻居节点和查询处理.任何一个 Agent 都有一个类似于消息机制“消息头”,各条目的作用已提前在消息机制中加以论述,以下仅阐述不同于消息机制的工作内容:

- Connection.当一个节点向其他节点请求建立新连接时就向其发出 Connection.该机制主要用于新节点的初始化和一个节点调整和优化其邻居节点过程.

- Connection_Proved 是 Connection 的应答.当一个节点(如 P_i)收到另一个节点(如 P_j)的 Agent 带来的 Connection 请求时,它首先从该移动 Agent 中提取相关数据,用以计算请求节点 P_j 与自己的偏好和行为相似度.根据计算结果, P_i 做出相应的决策:接受请求和回复 Connection_Proved 并推荐给自己相关的邻居节点或根本不作应答.如果 P_j 在预定时间内没收到 P_i 的应答,则认为请求失败.

- Query.移动 Agent 把查询约束条件(如关键词和语义类别等)运送到相关节点.如果节点拥有结果,就以 QueryHits 应答.

- QueryHits 是相应 Query 的应答,与 QueryHits 一道,移动 Agent 把该应答 peer 的相关信息返回给查询者,满足当前查询以及优化节点的邻居节点和查询.

2.2 基于语义的自配置机制

基于语义的自配置机制是 PeerIS 的 peer 能够根据信息偏好、行为和查询统计数据综合地确定和调整自己的重要节点的机制,使自己能以较小的代价检索到所需的数据.

2.2.1 自配置基础

对于每个 peer 而言,重要节点的选择至关重要.由于理性用户的兴趣总有一定的偏好.比如,对于计算技术研究人员而言,有的更关注对等计算,有的则专注于索引研究;而对于医学专家而言,有的专心攻克肝类病,有的则潜心发现提高免疫能力的机理等.显然,由于他们的兴趣各异,维护的信息也不同.peer 的兴趣偏好可以用本地文件的语义类别分布来定义,语义类别由类似于文本分类法^[12]来确定,并用向量模型表达.这样,每个 peer 为每类兴趣维护数个具有高度相似的 peer 为重要节点,并且,兴趣相似度越高,成为重要节点的优先权也越高.确定优先权的公式为

$$SimIn(P_i, P_j) = \frac{\bar{C}(P_i) \cdot \bar{C}(P_j)}{|\bar{C}(P_i)| \times |\bar{C}(P_j)|} = \frac{\sum_{s=1}^t w_{s,i} \times w_{s,j}}{\sqrt{\sum_{s=1}^t w_{s,i}^2} \times \sqrt{\sum_{s=1}^t w_{s,j}^2}} \quad (1)$$

其中 $SimIn(P_i, P_j)$ 为 peer P_i 与 P_j 的兴趣相似度, $\bar{C}(P_i)$ 与 $\bar{C}(P_j)$ 分别为两个 peer 的兴趣特征向量,而 $|\bar{C}(P_i)|$ 与 $|\bar{C}(P_j)|$ 则分别为两个向量的模,若是分子与分母同时为 0,则 $SimIn(P_i, P_j)$ 取零值. $w_{s,i}$ 和 $w_{s,j}$ 非负,表示 P_i 与 P_j 节点中对应于第 s 个特征词的权值.

另外,行为相似性也是决定重要节点优先权的关键因素之一.即使两个节点的兴趣偏好非常类似,但它们如果不能同时在线,它们成为邻居则没有任何意义.行为相似性的计算公式为

$$SimBe(P_i, P_j) = \frac{Con(P_i) \cap Con(P_j)}{N \times 24 \times 3600} \quad (2)$$

其中 $SimBe(P_i, P_j)$ 为两个 peer 的行为相似度, $Con(P_i) \cap Con(P_j)$ 为 N 天中两 peer 同时在线的时间. $N \times 24 \times 3600$ 是以秒为单位计量的 N 天的时间.

在 PeerIS 中,peer 在初次加入网络或系统崩溃而再次加入网络时,就是基于兴趣和行为相似度来决定其重要节点的.

2.2.2 动态自配置策略

相对于其他 P2P 系统,PeerIS 的一大特征和优点是每个 peer 能够动态地配置自己的重要节点.PeerIS 的动态自配置机制以兴趣与行为相似性为基础,并综合了 peer 间交互的历史统计数据、时间因素以及网络因子.其公式如下:

$$AP(P_i, P_j) = \omega * \left(\alpha * \sum_t \frac{Hit(P_j)}{Hop(P_j)} + \beta * \sum_{t-1} \frac{Hit(P_j)}{Hop(P_j)} \right) \quad (3)$$

其中 $AP(P_i, P_j)$ 为 peer P_i 在动态自配置过程中, P_j 成为 P_i 的重要节点的优先权; $\sum_t \frac{Hit(P_j)}{Hop(P_j)}$ 为当前配置周期内 P_j 所提供合格答案与逻辑距离之商的总和, 而 $\sum_{t-1} \frac{Hit(P_j)}{Hop(P_j)}$ 则为上一次自配置周期所得的该值; α, β 为递进系数, 且 $\alpha + \beta = 1, \alpha > \beta$, 用户的兴趣偏好越不稳定, 则 α 越大, 这两个系数可以根据 peer 的统计数据来确定; ω 是取值范围为 $[0, 1]$ 的网络因子, 它考虑了 WAN 与 LAN 之分、peer 的带宽与计算资源利用状况. 在 PeerIS 中, 如果 peer 在同一 Intranet 且带宽与计算资源负荷小于阈值的 80%, 则 ω 取值为 1. 其他情况可以通过配置系统的移动 Agent 来确定.

基于该自配置机制, PeerIS 中的节点周期性地利用空闲时间动态地调整自己的邻居节点和重要节点, 这样, 系统中的节点基于兴趣与行为相似性形成不同的簇, 并且在同一簇内, 两个 peer 的偏好和行为越相似, 两者的逻辑距离越近, 反之亦然. 用户提交的查询往往在重要节点获得答案, 因而系统的性能很好.

2.3 查询机制

为了支持语义丰富的信息检索与共享, PeerIS 中的每个 peer 维护的文件和用户提交的查询均用向量空间模型^[12]来表达. 在向量空间模型中, peer 维护的文件和用户提交的查询的索引项都用权重来表达, 这些权重不仅用于确定文件和查询之间的相似程度, 而且用于计算被检索出的文件排序. 在向量空间模型中, 索引项 k_i 在文件 d_j 的重要程度 (k_i, d_j) 用一权重 $w_{i,j}$ 来表达. 类似地, 索引项 k_i 在用户提交的查询中, q 的重要程度 (k_i, q) 也用一权重 $w_{i,q}$ 来表达. 这样, 文件 d_j 的向量定义为

$$\vec{d}_j = (w_{1,j}, w_{2,j}, \dots, w_{t,j}),$$

其中, t 为该文件的索引项的数目. 类似地, 用户提交的查询的向量定义为

$$\vec{q} = (w_{1,q}, w_{2,q}, \dots, w_{t,q}).$$

因此, 查询 q 和 peer 维护的文件 d_j 的相似度 $sim(d_j, q)$ 可由以下公式计算:

$$Sim(d_j, q) = \frac{\vec{d}_j \cdot \vec{q}}{|\vec{d}_j| \times |\vec{q}|} = \frac{\sum_{i=1}^t w_{i,j} \times w_{i,q}}{\sqrt{\sum_{i=1}^t w_{i,j}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^t w_{i,q}^2}} \quad (4)$$

上式中, $|\vec{d}_j|$ 和 $|\vec{q}|$ 分别表示查询与文件的各向量的模.

用户提交的查询首先由本地 peer P_i 解析后以并行的方式进行处理: 如果本地可能有答案, 则搜索本地文件库 (否则不查本地文件库), 同时将该查询发送到相关重要节点, 并在这些节点进行类似的处理. 对于远程查询, PeerIS 采用两步处理策略. 第 1 步, 远程 peer 的 QueryHits 先返回给查询 peer, 并由 Master Agent 根据 $sim(d_j, q)$ 进行排序后展现给用户选择; 第 2 步, 被选中的 QueryHits 被送回到相关 peer, 并把最终结果从这些 peer 返回给查询 peer. 这种处理策略有两个优点: (1) 最终查询结果经过用户的语义过滤, 可以减少信息处理和传输负荷, 更高效地利用带宽; (2) 关于相关远程 peer 的元数据 (如文件类别分布和 QueryHits 数目等) 也返回给查询 peer, 这些信息由 peer 优化其重要节点组成和优化查询处理的基础.

2.4 自适应路由机制

大多数非结构化 P2P 系统 (如 Gnutella) 采用广播路由策略. 为防止以指数增长的查询消息在 P2P 网络中泛滥, 每个查询都预先设定了一个存活周期 (time-to-live, 简称 TTL), 当消息转发的累计跳数达到 TTL 时被注销. 这种过于简单的策略面临两难抉择: 如果 TTL 设得太小, 则查询只能在网络的小范围内处理, 导致系统的查全率低下 (如 Gnutella, 见实验); 如果 TTL 设得过大, 查询消息洪泛系统. 为了克服上述挑战, 我们以 PeerIS 的拓扑特征 (节点簇) 为基础, 提出了自适应的查询路由策略. 这种策略首先根据节点的兴趣偏好把查询转发到目标节点簇; 在目标簇, 查询尽量只访问能够提供语义相似度大于阈值答案的节点. 大致过程如下:

- 查询-提交, 就在本地节点解析, 并根据 IMP 中本地节点与重要节点的兴趣统计信息来判定该查询是否已

经落在了目标节点簇,并根据判断结果分别进行以下两种处理;

- 如果该查询没有落在目标节点簇,则节点根据邻居节点的兴趣偏好统计信息,把查询向最可能导向目标节点簇的路径转发,所有接收到该查询的节点都进行同样的决策,直到查询落到目标簇节点或 TTL 为 0 为止;
- 查询一旦落在目标点簇,如果不能立即获得合格答案,当前节点可以根据本次路由的历史记录,把查询向可能提供最相关语义答案的节点转发;当查询经过那个节点后,如果处理节点不能提供满足语义要求($SR(d_i, q) \leq threshold$),查询终止.

3 系统性能实验分析

本节对 PeerIS 进行实验性能分析.首先,我们简要说明实验设置,然后从网络传输时间、查全率和带宽利用效率 3 个方面对比 PeerIS 与 Gnutella(经典非结构化 P2P 系统).我们将看到,实验结果证明了 PeerIS 的优良特性.

3.1 实验设置

实验环境由在同一 LAN 的 66 台 PC 构成,每台 PC 配置为 Intel Pentium 1.7(或 1.8)G 处理器、128RAM 和 Windows 2000 Professional 操作系统,并安装 PeerIS 系统.我们产生一批每个大约 10KB 的文件,这些文件分属于 4 个语义类别.每个节点管理 1 000 个文件,分别属于两个语义类别,比例为 80%:20%.这样,整个 P2P 信息检索系统有 4 个语义簇,每个节点同时属于两个簇.另外,我们也用这些节点随机分布成一个 Gnutella 系统.Gnutella 实际上是一个典型的非结构化 P2P 的文件共享的协议,代表了现有非结构化 P2P 文件共享系统的特征:(1) Gnutella 随机且静态地选择邻居节点;(2) 采用非选择性的广播式的搜索策略,即查询发起节点把查询消息广播给它的所有邻居节点,并把查询消息的 TTL 值减 1,而这些邻居节点也把查询消息广播给它们的所有邻居节点和减少 TTL 的值,查询广播直到 TTL 等于 0 为止;(3) 另外,Gnutella 仅支持基于文件名的粗粒度的搜索.但是在本实验中,我们也把 IR 技术在 Gnutella 的节点中实现,但考虑到现实中的 Gnutella 和其他非结构化 P2P 文件共享系统没有基于语义和不同粒度的检索与共享功能,因而它们的节点在处理查询机制与 PeerIS 时有所不同,查询时间也不具有可比性.所以我们仅比较了网络传输时间.

为了使实验结果具有可比性,实验在可控的环境内进行,并以同一个节点集为评价基准.我们设计了 3 种评价方案:(1) 查找用户偏好的文件,即查找占提交节点 80%的那个语义类的文件,用 Favorite 表示;(2) 查找非偏好文件,即查找不属于本地节点那两类的文件,用 Non-Favorite 表示;(3) 在 Gnutella 上查找文件,用 Gnutella 表示.方案(1)与方案(2)全面地刻画了 PeerIS 检索面临的情形.3 种方案中执行相同的查询,方案(2)的查询提交节点与方案(1)的提交节点分别属于不同的节点簇,而方案(3)的提交节点与方案(1)相同.

3.2 网络传输时间

由于 PeerIS 与 Gnutella 节点处理查询的机制不同,两者的处理速度不具有可比性,因而我们用网络传输时间来比较两种 P2P 协议的效率.网络传输时间是查询从提交节点路由到答案维护节点所耗费的时间与答案从维护节点返回到提交节点的所耗费的时间之和.图 5 展示了查询执行 10 次各个答案传输时间的平均值.

从下面图 5 可知,Favorite 的网络传输时间最短;对于前 6 个答案,Gnutella 的传输时间比查找 Non-Favorite 所消耗的时间要短,而此后,两者相近甚至 Non-Favorite 的传输时间比 Gnutella 要短.导致这种结果的原因是网络拓扑结构以及数据的分布.在检索 Favorite 文件时,答案集中在查询提交节点所在的簇,距离提交节点很近,因而网络传输时间短.Gnutella 的答案散布在整个网络,所以传输时间呈线性增长;Non-Favorite 的答案集中在远离查询提交节点的节点簇,它们距提交节点的距离相近,并且比 Gnutella 的有些答案更近,因而所有答案的传输时间很相近,并且,从第 7 个答案开始就优于 Gnutella.因为用户在一般情况下是查找 Favorite 文件的,并且即使用户的兴趣发生改变,随着节点本地新数据的积累和查询统计数据的更新,系统的自配置机制也会使节点加入到响应的节点簇,即后续查询就在本节点簇完成.因而,PeerIS 整体上优于 Gnutella.

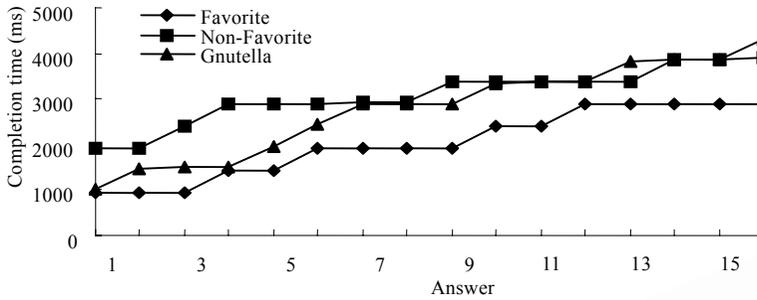


Fig.5 Network transmitting time
图 5 网络传输时间

3.3 查全率

查全率是评价系统能否检索到应该检索到的答案的指标.在 P2P 环境下,查全率可以定义为系统在一个预定的时间内(时间约束,因为用户等待的耐心有限),检索到合格答案的数量占系统当时所有在线节点维护合格答案总数的比率,用式(5)计算:

$$Recall = \frac{\sum_{Retrieved} Answer}{\sum_{CurrentAvailable} Answer} \tag{5}$$

在上式中,Recall 是查全率; $\sum_{Retrieved} Answer$ 是用户在规定时间内获得的合格答案的总数,而 $\sum_{CurrentAvailable} Answer$ 则为整个系统当时所有在线节点维护的合格答案的总数.图 6 展示了相对于不同的 TTL 各种方案的查全率.

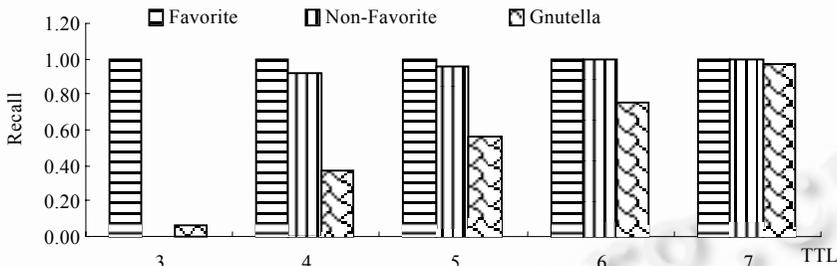


Fig.6 Recall
图 6 查全率

由图 6 可知,无论 TTL 设为何值,Favorite 都能找回所有合格答案;Non-Favorite 在 TTL 设得很小时(如 $TTL \leq 3$),检索不到任何答案,但一旦开始检索到答案,查全率几乎达到 100%;Gnutella 的查全率随 TTL 的增大而提高,但从 $TTL \geq 4$ 开始,它的查全率都低于 PeerIS(包括 Favorite 与 Non-Favorite).这是由答案分布与查询路由策略决定的.PeerIS 中,查询一旦落在目标节点簇,查询不由 TTL 终止而是当处理节点不能提供合格答案时终止.所以,即使在查找 Non-Favorite 时,当 TTL 大得($TTL \geq 4$)足以使查询落在目标节点簇时,查全率就会很高.Gnutella 的查询由 TTL 终止,而它的答案散布在整个网络,所以表现出查全率随 TTL 的增大而提高,但查询不可能散布到整个网络,因而它找不全在线答案.

3.4 带宽利用效率

我们用找到相同的答案所产生的消息量来衡量系统带宽的利用效率,结果如图 7 所示.

图 7 中的 Avg.属性表示得到每个合格答案所引发的消息量.由图可 7 知,检索 Favorite 文件所产生的消息量不足 Gnutella 的一半;就是检索 Non-Favorite 文件,所产生的消息量也不足 Gnutella 的 70%.因此,PeerIS 比 Gnutella 能够更高效地利用带宽,系统的可伸缩性也更好.Max.表示查找单个答案引发的最大消息量,根据这个属性,我们可以断定 PeerIS 在负载均衡方面也优于 Gnutella.

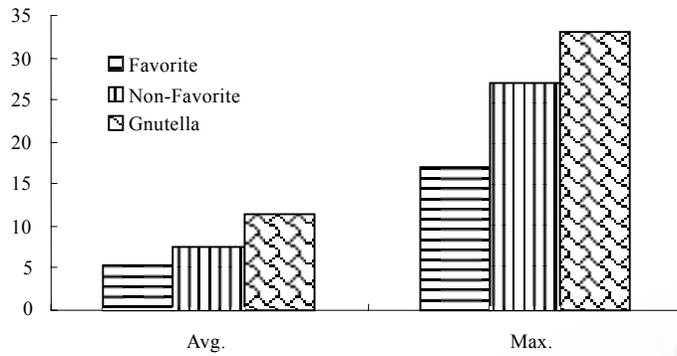


Fig.7 The efficiency of bandwidth

图 7 带宽利用效率

4 结 论

本文简要地介绍了 Peer-to-Peer 的特征和潜在的优良特性,指出了当前 P2P 数据共享系统存在的局限性.针对这种现状,我们提出了基于 P2P 的信息检索,既可充分发掘 P2P 技术的潜在优势,克服传统信息检索系统的可伸缩瓶颈等问题;又可实现 P2P 系统语义丰富的信息检索与共享;并且开发出 PeerIS:基于 P2P 的信息检索系统.我们还介绍了 PeerIS 的整体构架与节点的体系结构;阐述了 PeerIS 的实现关键技术;并用实验证明了 PeerIS 的优良特性.基于 P2P 的信息检索是一个新的研究课题,我们将在今后深入研究节点的数据表达、语义映射以及安全等问题.

References:

- [1] Ng WS, Ooi BC, Tan KL. BestPeer: A self-configurable peer-to-peer system. In: Chrysanthis PK, ed. Proc. of the 18th ICDE. San Jose: IEEE Computer Society Press, 2002. 272.
- [2] Anderson d. Peer-to-Peer: Harnessing the Benefits of a Disruptive Technology. O'Reilly & Associates, Inc., 2001. 67~76.
- [3] ICQ Home Page. <http://www.icq.com/>
- [4] Groove Home Page. <http://www.groove.net>
- [5] Napster Home Page. <http://www.napster.com/>
- [6] Gnutella Development Home Page. <http://gnutella.wego.com/>
- [7] Druschel P, Rowstron A. PAST: A large-scale persistent peer-to-peer storage utility. In: Elphinstone K, ed. Proc. of the HotOS VIII. Schloss Elmau: IEEE Press, 2001. 65~70.
- [8] Rowstron A, Druschel P. Storage management and caching in PAST: A large-scale persistent peer-to-peer storage utility. In: Chateau Lake Louise, ed. ACM SOSP 2001. Banff: ACM Press, 2001. 188~201.
- [9] Kalnis P, Ooi B, Papadias D, Tan K. An adaptive peer-to-peer network for distributed caching of olap results. In: Ramakrishnan R, ed. ACM SIGMOD. Madison: ACM Press, 2002. 25~36.
- [10] Ng WS, Ooi BC, Tan KL, Zhou A. Peerdb: A p2p-based system for distributed data sharing. In: Dayal U, ed. Proc. of the 19th ICDE. Bangalore: IEEE Computer Society Press, 2003. 633~644.
- [11] Salton G, Lesk ME. Computer evaluation of indexing and text processing. Journal of the ACM, 1968,15(1):8~36.
- [12] Yang Y, Liu X. A re-examination of text categorization methods. In: Callan J, ed. Proc. of the ACM SIGIR. Berkeley: ACM Press, 1999. 42~49.