

基于拥塞控制的非结构化 P2P 网络的路由负载均衡策略*

沈项军¹, 常青¹, 姚银¹, 查正军²

¹(江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013)

²(中国科学院 合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031)

通讯作者: 沈项军, E-mail: xjshen@ujs.edu.cn

摘要: 非结构化 P2P(unstructured peer-to-peer network)对等网络中的节点资源定位的路由查询是对等网络研究中的一个主要难题,特别是当网络中客户端节点由于其频繁加入、离开导致网络结构动态变化所带来的资源查询难题.提出了一种新的基于拥塞控制的路由查询方法来实现动态网络下的资源查询.该方法分两部分实现:首先是网络资源的分组与节点重连策略.该策略使得具有同等资源的节点相互连接,并周期性地调整节点上的节点连接数量以减少同组资源节点上的负载.通过以上策略,使得网络的拓扑结构自动地从随机网络结构进化到以资源组为单位的聚类网络,从而使得网络中形成网络资源组间的查询负载均衡.另一方面,组内的节点之间的路由负载均衡是通过节点间协同学习实现的.采用协同 Q-学习方法,所研究的方法不仅从节点上学习其处理能力、连接数和资源的个数等参数,还将节点的拥塞状态作为协同 Q-学习的重要参数,并建立模型.通过这种技术,同一组节点上的资源查询被有目的地引导,以避免那些组内拥塞的节点,从而最终实现资源组内节点之间的查询均衡.仿真实验结果表明,相比常用的 random walk 资源查找方法,该研究所实现的资源定位方法能够更迅速地实现网络的资源查询.仿真结果还表明,相比 random walk 方法,所提出的方法在网络高强度查询和网络节点动态加入和退出的情况下进行查询具有更高的鲁棒性和适应性.

关键词: 拥塞控制,负载均衡,查询路由,Q-学习,非结构化 P2P 网络

中文引用格式: 沈项军,常青,姚银,查正军.基于拥塞控制的非结构化 P2P 网络的路由负载均衡策略.软件学报,2015,26(Suppl. (2)):218-227. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15032.htm>

英文引用格式: Shen XJ, Chang Q, Yao Y, Zha ZJ. Congestion control based load balancing routing in unstructured P2P networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015,26(Suppl.(2)):218-227 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15032.htm>

Congestion Control Based Load Balancing Routing in Unstructured P2P Networks

SHEN Xiang-Jun¹, CHANG Qing¹, YAO Yin¹, ZHA Zheng-Jun²

¹(School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

²(Institute of Intelligent Machines (Hefei), The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Query routing among peers to locate resources is a main issue discussed in Peer-to-Peer (P2P) networks, especially in unstructured P2P networks. This issue becomes even worse when frequent join and departure or failure of client peers happen in the networks. This paper proposes a new churn-resilient protocol to assure alternating routing path to balance query among peers under network churn. The proposed protocol uses two strategies to make queries balancing among inter- and intra-group peers. First a resource grouping and rewiring strategy is provided to periodically cluster peers having same set of resources. This grouping strategy makes locating resources more efficient in the inter-group peers, for it makes the network overlay topology evolve from a random network to a clustered network. The rewiring strategy also alleviates loads among over-loaded peers. Meanwhile, load balancing routing among the intragroup peers is achieved by collaborative Q-learning among peers. The collaborative Q-learning method not only learns from such

* 基金项目: 国家自然科学基金(61005017, 61572240)

收稿时间: 2015-05-15; 定稿时间: 2015-10-12

parameters as processing capacity, number of connections and number of resources in peers, but also learns their state of congestion. Using this technique, queries are guided to avoid forwarding to those congested peers. Thus, query routing forwarding is balanced among intra-group peers. Simulation results show that the desired resources are located more quickly and queries in the whole network are balanced. The results also show that queries by the proposed method exhibit more robustness and adaptability under network attacking, high query workloads, and high network churns than queries by random walk method.

Key words: congestion control, load balancing, query routing, Q-learning, unstructured P2P network

目前 P2P(peer-to-peer)网络已经成为互联网的主流应用,出现了诸如文件共享、海量存储、视频流媒体播放等热门应用^[1].当前 P2P 网络主要分为结构化 P2P 网络和非结构化 P2P 网络两大类,在两种不同类型的网络上其资源查找的方法也有所不同.在基于 DHT 的结构化 P2P 网络,如 Chord^[2],CAN^[3]和 Pastry^[4]等,采用分布式哈希表算法对资源进行存储和定位.然而,由于 DHT 网络是对节点和资源的 ID 空间划分,并进而进行资源的查找.因此在网络节点动态加入和退出的情况下,DHT 网络会产生巨大的空间调整问题.为了维持 DHT 网络节点间 ID 空间的划分,结构化 P2P 网络适用于小型网络且不够灵活.同时,很多研究,例如文献[5]展开了 DHT 环境下 Churn 问题的研究.

而非结构化 P2P 网络具有网络节点扩展性强、资源负载能力大等特点,出现了诸如 BitTorrent 和 CoolStreaming^[6]等诸多网络协议及对等计算、文件共享等应用.然而,由于非结构化 P2P 网络的分布式特性,网络中的节点只知道其邻居节点的资源分布情况,因此消息只能转发给邻居节点.而这种消息转发机制会导致网络中节点负载不均衡.因此资源发现与搜索以及如何平衡网络的负载成为非结构化 P2P 网络的核心问题^[7],引起学术界对网络负载均衡的广泛和深入的研究.例如朱桂明等人^[8]对如何优化资源定位过程的查询延迟和准确率进行了研究.

最近一些研究^[9]发现,非结构化 P2P 网络中有 3 种网络拓扑结构可以应用在不同程度的查询负载下.第 1 种是属于 client-server(C/S)结构的星状拓扑.这种结构适合应用在轻量级的查询负载下,但缺点在于,当网络中查询变得频繁时中心节点容易发生过载,因此在网络负载较重的情况下,网络的搜索效率很低.第 2 种是最适合高强度查询负载的随机网络拓扑结构.这种结构可以将查询负载分担给网络中的所有节点.但是由于非结构化 P2P 网络中存在资源定位的难题,因此随机网络拓扑结构不可避免地存在资源搜索效率低下的缺陷.第 3 种是最适用于中等强度查询负载的一种聚类拓扑结构,这是搜索效率和节点负载均衡之间的一种折中.因此,许多研究^[8-12]提出了负载均衡算法,帮助网络从随机网络结构进化到聚类网络结构,以此实现搜索效率和网络负载均衡之间的平衡.

本文提出了一种新的基于拥塞控制的路由查询方法来解决节点的过载和拥塞问题.该方法分两部分实现:一是网络进化,即将拥有相同资源的节点分到同一资源组内.这种机制使得网络中资源定位更迅速且不同资源组间的查询得到了均衡.二是资源组内的查询路由控制,实现了资源组内节点的查询均衡.这两个机制使得资源组间和组内的查询得到了均衡.本文提出的策略有如下创新性.

(1) 网络进化.通过资源分组和节点重连策略使网络中的节点向资源组间节点演化.资源分组使得拥有相同资源的节点能够聚集在一起,引导节点连接到高处理能力节点上,使得网络形成聚类拓扑结构.与此同时,节点重连策略定期断开过载节点上的部分连接,防止因局部节点连接数量过多导致过载.资源分组和节点重连策略使得资源组间节点之间的查询得到均衡且资源定位更有效.

(2) 资源组内节点之间的负载均衡路由控制是由节点间的协同 Q-学习^[13]来实现的.本文首次在路由拥塞控制中采用一般运用于状态学习的协同 Q-学习方法,所研究的方法不仅从节点上学习其处理能力、连接数和资源的个数等参数,还将节点的拥塞状态作为协同 Q-学习的重要参数,并建立模型.通过这种技术,同一组节点上的资源查询被有目的地引导以避开那些组内拥塞的节点,从而最终实现资源组内节点之间的查询均衡.

仿真实验结果表明,相比常用的 random walk 资源查找方法,本研究所实现的资源定位方法能更迅速地实现网络的资源查询.仿真结果还表明,与 random walk 方法相比,本文提出的方法在网络高强度查询和网络节点动态加入和退出的情况下进行查询具有更高的鲁棒性和适应性.

本文第 1 节介绍 P2P 网络中负载均衡算法的相关研究背景.第 2 节阐述基于拥塞控制的路由查询方法:基于拥塞控制的非结构化 P2P 网络的路由负载均衡策略.第 3 节是对仿真结果的评估,证明动态拓扑方法具有显著成效:可扩展性、鲁棒性方面以及网络波动的回复.最后,第 4 节进行总结.

1 相关研究

结构化 P2P 网络采用 DHT 搜索算法在结构化网络,如 Chord^[2]、CAN^[3]和 Pastry^[4]中高效地搜索资源.但是结构化 P2P 网络也有其不足之处.由于其采用基于节点和资源的空间划分方法,因此基于 DHT 设计的算法都是为了实现节点之间哈希函数空间划分的平衡.因此,在网络节点动态加入和退出的情况下,DHT 网络会产生严重的空间调整问题.为了维持 DHT 网络节点中 ID 空间划分上的平衡,结构化 P2P 网络不能大规模部署且实现不灵活.但仍有一些研究提出了克服这些难题的方法.例如,文献[14,15]提出了波动的回复方法来实现 P2P 网络动态负载环境下的消息转发.其他一些研究^[16,17]提出了节点重连策略以克服网络延迟和大型结构化网络负载均衡问题.另外,结构化 P2P 网络还存在不支持如关键字的语义搜索等缺点.因此有研究^[18,19]提出对资源的范围查询以及不均衡键 ID 空间分区方法^[20,21].

非结构化 P2P 网络具有结构单一的特点,这使得非结构化 P2P 网络具有良好的灵活性和可扩展性.但是,非结构化网络存在资源定位困难的问题,因为查询只能被转发给邻居节点.为了解决 P2P 网络中的资源定位问题,出现了诸如洪泛法搜索^[22],random walk 搜索算法^[23].然而由于 P2P 网络节点的异构性,在网络负载较重时,一些处理能力比较弱的节点会发生拥塞,处理能力强的节点却会有很多时间都是空闲的,节点的拥塞现象会严重影响到搜索算法的性能.出现如随机游走抽样和基于信息收集的引导搜索^[24]等搜索算法.另一种方法是用负载均衡方法解决非结构化 P2P 网络中的负载不均衡问题.文献[25,26]利用高处理能力节点来控制网络中查询的转发.但这种网络可能会遇到单点失效问题.当高处理能力节点离开时,网络的可扩展性仍然受到限制.一些研究工作^[27]表明,网络从随机网络结构进化到聚类网络结构,可以实现搜索效率和网络负载均衡之间的平衡.因此很多研究采用了网络拓扑的动态调整方法.

这些网络拓扑动态调整方法包括:Merino 等人^[9]介绍的 DANTE 网络,它采用重连机制来形成一个平衡的集群拓扑.同时,Pournaras 等人^[28]提出了基于重连策略的 ERGO 网络.它使用虚拟服务器来管理节点的运作.当过载节点被发现时,它将一些请求连接重连到其他轻载节点上.AVMON^[29]是另一种能够管理内容的发现与共享的网络.还有一些研究^[11,12]采用了小世界拓扑结构.

其他一些研究则使用 Agent 技术来解决非结构化 P2P 网络中的负载均衡问题.例如,Dasgupta^[30]提出了一种能够保持非结构化 P2P 网络中的小世界网络结构的多代理方法.文献[31]提出了基于网络迁移的移动 Agent 的协同负载均衡的方法.

2 基于拥塞控制的负载均衡路由

本节详细地介绍我们提出的基于拥塞控制的负载均衡路由查询方法.第 2.1 节介绍定期发起的资源分组和节点重连策略.通过以上策略,使得网络的拓扑结构自动地从随机网络结构进化到以资源组为单位的聚类网络,从而形成网络资源组间的查询负载均衡.第 2.2 节介绍基于节点协同 Q-学习方法的查询路由控制.在这一机制中,每个节点均能自主计算节点自身的 Q 值,并在邻居节点上定期交换 Q 值信息,引导查询消息避开组内拥塞的节点,从而达到资源组内节点之间的查询路由优化的目的.

2.1 资源分组和节点重连

为了使非结构化 P2P 网络中资源定位更加迅速,采用了资源分组和节点重连策略.资源分组的假设是:有相同资源的节点可能有相似的兴趣.在像文件共享、视频点播等 P2P 应用中,下载同一文件或观看同一视频的节点之间可能对其他资源有相同的兴趣.因此保持相同兴趣节点之间的连通可使资源搜索更迅速.在 BitTorrent 方法^[32]中提出了采用群技术的资源分组和节点重连策略.本研究提出的网络没有服务器且定期地发起资源分组

以此自动地进化成聚类拓扑结构。

一个典型的节点资源分组过程如下:假设发起节点为 P_i ,它开始了对资源 j 的一个新的资源分组过程.假设 P_i 有 N 个不同的资源,那么它可能属于不同的资源组.新的分组过程中,首先 P_i 发起搜索相同资源节点的节点搜索消息. P_i 的搜索节点消息包含例如 $\{P_i, CP_{i,j}, TTL\}$ 这样的信息,其中, P_i 是发起查询的节点, $CP_{i,j}$ 是拥有资源 j 而与节点 P_i 待相连的候选节点集. TTL 是消息存活时间,即节点遍历非结构化 P2P 网络的跳数.最初的候选节点集 $CP_{i,j}$ 为空集,为了搜集候选节点,搜索节点消息以 random walk 的方式在网络中传播.当节点 P_k 接收到搜索节点消息时,首先这个节点将消息中 TTL 值减 1;然后节点 P_k 检查其资源.如果 P_k 具有所需的资源,那么将节点 P_k 加入候选节点集 $CP_{i,j}$ 中.如果 P_k 不具有资源 j ,则 P_k 不加入候选节点集;最后, P_k 使用 random walk 的方法来选择它的一个邻居来接收此搜索节点消息.这个邻居重复这一过程,让消息在网络中传播,直到 TTL 值减少到 0.该消息被发送回发起节点 P_i .

当 P_i 收到资源 j 的候选节点集 $CP_{i,j}$ 后,选择一些 $CP_{i,j}$ 中的节点与 P_i 重新相连.为了选择合适的节点,本文定义了一个名为节点资源吸引力(PRA)的参数.PRA 由 3 部分组成:节点度、节点的处理能力和节点中包含的资源数量.PRA 的定义如下:

$$A_i = \chi(i, k_c) \times C_i \times n_i, \quad \chi(i, k_c) = \sum_{h=1}^{k_c} \frac{N(i, h)}{h^\delta} \quad (1)$$

其中, $\chi(i, k_c)$ 表示节点 P_i 与 k_c 半径内的所有节点的连通程度. $N(i, h)$ 是与节点 P_i 相距 h 跳的节点个数, δ 是控制因数, h^δ 用来控制不同距离节点对节点连通度影响的比权重. $\chi(i, k_c)$ 越大,节点 P_i 可能接收到的查询消息越多.

C_i 为节点 P_i 每微秒所能处理的最大查询数量. n_i 是 P_i 包含的资源数. A_i 定义了节点连通度、处理能力和资源数量三者的总体效果. A_i 值越高,反映了节点越高的处理能力、更高的连通度以及更多的资源.很明显, A_i 越大,节点 P_i 就越具有吸引力,越可能成为当前节点的邻居节点.

根据 PRA 值的引导,节点 P_i 与其候选集 $CP_{i,j}$ 中节点重连过程如下所示.

(a) P_i 选择 $CP_{i,j}$ 中 PRA 最大值的节点作为重连节点,假设此节点为 P_a ,且它在点集 $CP_{i,j}$ 中,并且将 P_a 从候选集 $CP_{i,j}$ 中移除;

(b) P_i 选择一个邻居节点断开连接.这个选中的邻居节点的连接数必须大于 2 以防止节点被完全隔离,并且被选中节点是不含资源 j 的.如果这样的节点不存在,那么节点 P_i 就会选择邻居节点中能力最弱的点断开连接.现在,假设选中的节点是 P_d ;

(c) 节点 P_i 发送一个连接请求给 P_a , P_a 如果接受了请求,那么 P_i 断开与 P_d 的连接并且和 P_a 连接在一起.

重复上述过程,直到候选集为空或 $CP_{i,j}$ 中所有节点的 PRA 值都小于 P_i 的邻居节点的最小 PRA 值.

公式(1)表明,节点的 PRA 值越大,它所能处理的转发查询越多,且节点越可能是拥有更高节点连通度和更多资源的中心节点.这使得资源组间节点之间的资源搜索更有效.然而,此时这些节点很容易因为更多的连接和转发查询而变得拥塞.因此本文使用重连策略来断开拥塞节点的一些邻居节点.这样操作降低了拥塞节点的查询路由并且使得拥塞节点重新恢复正常.首先,本文引入一个名为拥塞水平(CL)的参数来评价节点的拥塞状态.节点 P_i 在 t 时刻的 CL 值计算如下:

$$CL_i(t) = \frac{1 + Q_i(t)}{C_i} \quad (2)$$

$Q_i(t)$ 表示在时刻 t 节点 P_i 的输入缓存队列中的消息数,公式(2)计算的是一个消息转发到节点 i 到处理完毕需要的等待时间. $Q_i(t)$ 值越大说明节点越拥塞.因此本文设置了一个阈值 U 去判断一个节点是否拥塞.

当 $CL_i(t)$ 大于 U 时,说明当前节点是拥塞的且处于过载状态.本文设定一个时间周期来触发节点重连策略.当节点处于过载状态触发节点重连时,此节点就会随机地断开一些邻居节点并将这些节点连接到其他拥有相同资源的节点上.断开的邻居节点数遵循以下规则:

当 P_i 节点过载时,它将会断开一些邻居节点以此减少 P_i 的转发查询数.假设一个节点的转发查询数与其邻居节点数量成正比.由于 U 是判断是否拥塞的阈值且 C_i 是 P_i 每微秒能处理的最大查询数,那么查询过程中在等

待队列中可以处理而不被视为过载的最大查询数量是 $U_i \times C_i - 1$. 所以, 断开邻居节点后, 应保留有 $m_i \times U_i \times C_i - 1$ 个查询消息. 下列方程推导出了断开连接的数目.

$$\frac{Q_i(t)}{m_i \times U_i \times C_i - 1} = \frac{N_i}{N_i - D_i}, D_i = \left\lceil \frac{N_i \times (Q_i(t) - (m_i \times U_i \times C_i - 1))}{Q_i(t)} \right\rceil \quad (3)$$

其中, N_i 是当前 P_i 的邻居数. $\lceil \cdot \rceil$ 是向上取项功能.

拓扑网络通过这种方式更新, 使具有相同资源的节点之间建立连接. 资源分组和节点重连策略使得网络的拓扑结构自动地从随机网络结构进化到以资源组为单位的聚类网络, 网络中形成的网络资源组间的查询负载得到均衡. 同时, 该方法使得相同资源组里的高处理能力节点拥有比低处理能力节点更多的连接. 而高连通度的节点更可能出现拥塞. 因此, 控制每个节点的转发查询负载很重要. 下一节本文将介绍协同 Q -学习方法, 用以实现资源组内节点的负载均衡.

2.2 基于协同 Q -学习的路由拥塞控制

为了识别拥塞节点并且避免查询消息转发给拥塞节点, 本文中运用属于强化学习的 Q -学习方法来监测网络中节点的状态. 强化学习 (RL)^[33] 中智能体与环境达成交互并且通过观察交互结果来达到学习的目的. Q -学习方法用迭代函数 Q 以逼近最优动作值. Q -学习模型的定义如下:

$$Q_{local}(s, a) = R(s) + \gamma \max_{a'} Q(s', a'), Q_{new}(s, a) = Q(s, a) + \alpha Q_{local}(s, a) \quad (4)$$

其中, $Q(s, a)$ 是一个迭代函数. $R(s)$ 是奖赏值. a 是学习率, 介于 0 和 1 之间. γ 是折扣因子, 其值在 0 和 1 之间. $\max_{a'}$ 是当前状态的下一状态的最优值.

为了监测网络中节点的状态, 本文监测了节点的处理能力、连接数和所拥有的资源数. $R(s)$ 函数中罗列了这些参数, 因此 $R(s)$ 函数体现了网络中节点的基本状态. 同时, $R(s)$ 函数定义如下:

$$R(s) = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i \frac{AP_s}{N_s}, AP_s = C_s \times \chi(s, k_c) \quad (5)$$

C_s 和 $\chi(s, k_c)$ 在公式(1)中已有定义, 其中, $\chi(s, k_c)$ 是节点 P_s 的连通度, 同时 C_s 是节点 P_s 每微秒能处理的最大查询数. 因此, AP_s 是 P_s 的正吸引力, 它的值越大, 则节点的处理能力越强, 连通度越高. 最后, N_s 是包含在节点 P_s 中的资源数量, 它是公式中的消极因子, 因为 P_s 的资源越多, 则将会接收更多的查询消息. 这意味着, 每个单一的资源只能分配到更少的带宽. 因此, N_s 是公式中的消极因子.

上述公式表明, AP_s 值越大, 节点的奖赏值就越大. 由于它们有更多的邻居和连接, 那么这些节点将会处理比其他节点更多的转发查询. 同时, 这也使得节点更容易发生拥塞. 为了均衡这种效果, 本文在基本 Q -学习模型的基础上增加了公式(2)中定义的拥塞因子 (CL). 改进的 Q -学习模型如下:

$$Q_{new}(s, a) = Q(s, a) + \alpha Q_{local}(s, a) + \beta \times I(U - CL_i(t)) \times CL_i(t) \quad (6)$$

$I(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ -1, & x \leq 0 \end{cases}$ 是一个指标函数. 当一个节点处于正常状态或者超载状态时, 该函数会相应地给出正或负的符号.

通过这种方式, 本文提出的模型能够考虑到节点拥塞状态的影响.

公式(6)不仅从节点上学习节点的处理能力、连接数和资源的个数等参数, 而且还将节点的拥塞状态作为协同 Q -学习的重要参数. 因此, 协同 Q -学习方法使得资源组内节点之间的查询路由得到了控制. 本文提出的 Q -学习方法迭代过程如算法 1 所示.

算法 1. 协同 Q -学习算法.

- 1: 初始化 $Q(s, a)$
- 2: repeat
- 3: 初始化 s
- 4: repeat
- 5: 根据从 Q 中获得的策略, 由状态 s 选择动作 a

- 6: 执行动作 a , 观察状态 r , 新的状态 s' , 拥塞程度 $CL_i(t)$
- 7: $Q_{new}(s,a)=Q(s,a)+\alpha Q_{local}(s,a)+\beta \times I(U-CL_i(t)) \times CL_i(t)$
- 8: $s \leftarrow s', a \leftarrow a'$
- 9: 直到达到目标状态 s
- 10: until

网络中的转发查询经过协同 Q -学习方法的引导, 在节点间转发. 本文用表 1 和图 2 来举例说明下一个转发节点的选择过程. 例如, 拥有资源 a 的节点 P_0 转发出一个对资源 c 的查询, 并且节点 P_0 有 5 个邻居节点, 分别是 P_1, P_2, P_3, P_4 和 P_5 . 这些邻居节点分别有以下资源 [' a ', ' d '], [' b '], [' a '], [' b ', ' c ', ' f '] 和 [' a ', ' c ', ' f ', ' g ']. 然后, 节点 P_0 决定一个节点接收这个查询消息. 首先检查它的邻居表, 见表 1. 根据表 1, 节点 P_4 和 P_5 有资源 c . 然后, P_0 根据邻居表中的 Q 值选择了 P_2 作为下一转发查询节点. 而如果节点查询的资源为 e , 根据表 1, 由于所有邻居都不包含资源 e , 因此根据 Q 值选择 P_2 作为下一个转发节点.

表 1 P_0 的邻居表

Neighbors	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Resources	[' a ', ' d ']	[' b ']	[' a ']	[' b ', ' c ', ' f ']	[' a ', ' c ', ' f ', ' g ']
Q -Values	2	10	1	5	6

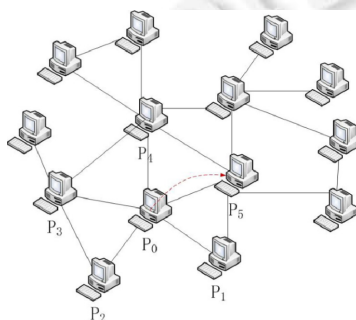


图 2 网络节点模拟图

3 性能评估

3.1 仿真实验

本实验在 Windows 平台下利用 Python 2.6 进行程序的编写及运行, 根据 Gnutella 协议设计网络, 该网络包含 10 000 个节点. 网络中每个节点的初始邻居数都大致相同, 约为 10 个, 节点的处理能力用 C_i 表示, 假设节点 P_i 中有 n 个数据, 节点 P_i 处理一个查询信息需要的时间为 $\frac{n}{C_i}$, 采用从 Gnutella 网络测量^[34]中获得的节点能力分布情况(见表 2), 来模拟节点能力的异构性. 系统的负载主要是由节点对网络资源的查询而引起的, 假设所有节点中查询时间间隔相同, 这个时间被称为搜索时间间隔(tbs). 如果 $tbs=5$, 则在本系统中每秒会发起 2 000 个查询消息.

表 2 网络模拟中不同处理能力节点的比例

节点比例(%)	节点能力 C_i
20	0.1
45	1
30	10
4.9	100
0.1	1 000

实验中有 1 000 个不同的资源数据, 根据资源热度的不同来确定资源的复制率, 资源的热度服从 Zipf 分布. 所有资源随机地分布在网络节点上. 我们用复制率来表示一个资源在网络中的副本数, 假设复制率为 0.01, 那么

在 10 000 个节点的系统中,就有 100 个相同的资源存在.同时,热度最高的资源的复制率为 0.5,热度最低的资源只有 0.5%的复制率.查询的 TTL 设置为 8,同时搜索节点消息的 TTL 设置为 30.这个值必须足够大才能够获得良好的网络样本.

本文所给公式中涉及到的参数是:首先,公式(1)中的这两个参数 k_c 和 σ 分别设置为 2 和 1.显而易见,网络带宽消耗是随 k_c 的增长而增长的.公式(3)中的参数 m 设置为 0.8,这意味着,在过载节点需要断开连接的 20%.参数 U 设置为 1.1,则公式(2)中的拥挤水平(CL)是 1.1,这意味着,节点被允许拥有比其每微秒能处理最大查询数量大 10%的查询.如公式(4)~公式(6)中的参数, γ 设置为 0.3, σ 设置为 0.3, β 设置为 0.5.

为了评估本文所提出方法的性能,我们模拟了几种不同网络设置下的网络.仿真实验将 random walk 方法与本文提出的方法进行比较.在第 3.2 节中对基本网络情况下的特点进行评估.在第 3.3 节和第 4.4 节中,实验模拟网络高强度查询、网络节点动态加入和退出的情况来测试本文提出方法在更逼近真实网络情况下的性能.

3.2 基础网络下的性能评估

图 3(a)~图 3(d)给出了基础网络中强化学习方法与 random walk 的对比.实验中以 10 分钟为一个时间段来观察节点度的变化,可以看出,随着时间的推移,本文提出的强化学习方法比 random walk 方法有更高的命中率 and 更低的拥塞比率、平均跳数以及平均搜索时间,这意味着,在基础网络中,强化学习方法比 random walk 方法更适用.仿真实验结果表明,相比常用的 random walk 资源查找方法,本研究所实现的资源定位方法能够更迅速地实现网络的资源查询.

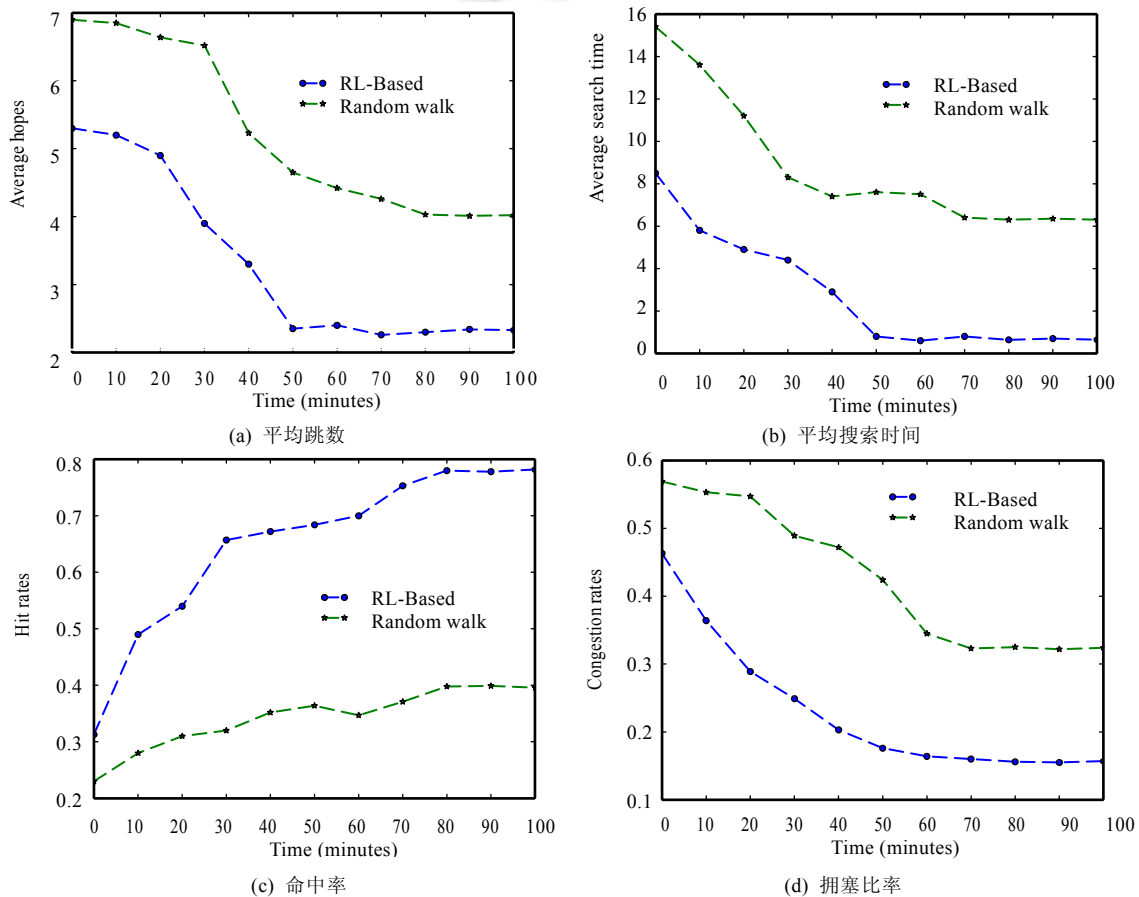


Fig.3 Timely behavior of the network search performances in our proposed protocol and random walk method

图 3 随着时间的变化,本文提出方法与 random walk 方法的比较

3.3 高负载下的网络性能评估

图 4(a)、图 4(b)所示为高负载下强化学习方法与 random walk 方法的拥塞比率和命中率的对比情况.实验中以 10 分钟为一个时间段来观察节点的变化,可以看出,本文提出的强化学习方法比 random walk 方法有更高的命中率和更低的拥塞比率.而在 80 分钟时负载突然加重,强化学习方法受负载变化影响相对较小.仿真实验结果表明,相比 random walk 方法,我们所提出的方法在网络高强度查询的情况下进行查询,具有更高的鲁棒性和适应性.

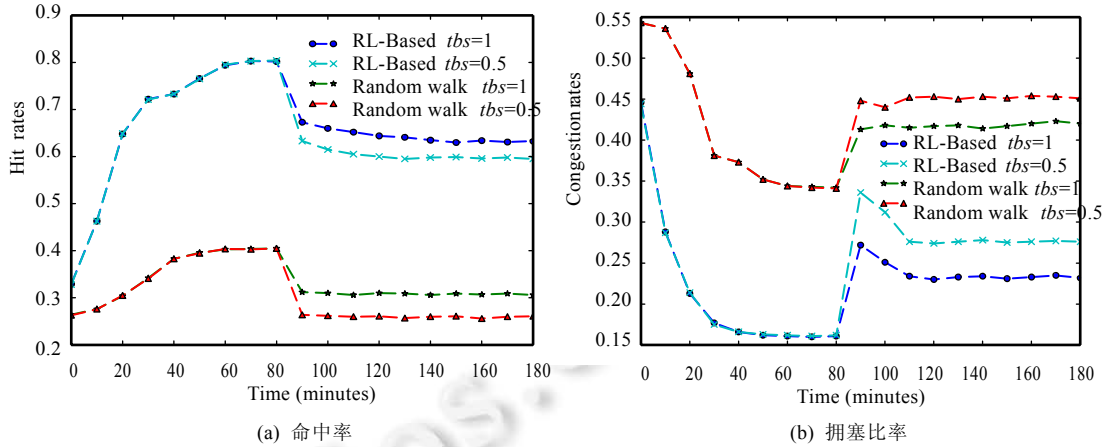


Fig.4. Network performance evaluation with high workloads

图 4 网络查询负载突然加重情况下的网络性能表现

3.4 高波动下网络性能评估

图 5(a)、图 5(b)所示为高波动网络下强化学习方法与 random walk 方法的拥塞比率和命中率的对比情况.实验中 60 分钟时部分中心节点突然退出,120 分钟时中心节点重新加入.从图中可以看出,强化学习方法虽然受中心节点影响相对较大,但当节点重新加入时,强化学习网络的回复更快,相比 random walk 方法,我们所提出的方法在网络节点动态加入和退出的情况下进行查询,具有更高的鲁棒性和适应性.

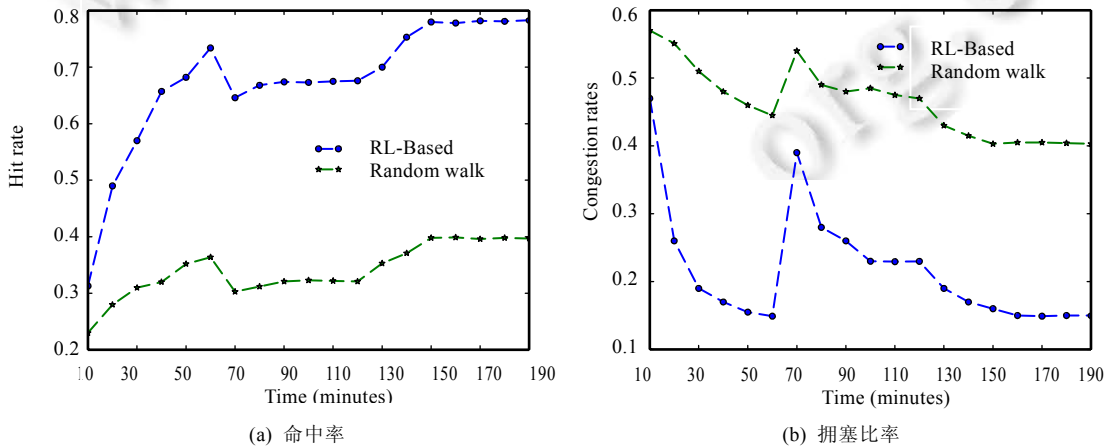


Fig.5 Our proposed method compared with random walk under the condition of high churns

图 5 重要节点受攻击的情况下本文提出的方法和 random walk 方法随时间变化的比较

4 总 结

在过去的几十年中,P2P 网络出现了很多应用.然而非结构化 P2P 网络中资源定位和负载均衡仍然是对等

网络研究中的两个主要难题.本文提出了一种新的基于拥塞控制的路由查询方法来实现动态网络下的资源查询.该方法分两部分实现:首先是网络资源的分组与节点重连策略.该策略使得具有同等资源的节点相互连接,并周期性地调整节点上的节点连接数量,以减少同组资源节点上的负载.通过以上策略,使得网络的拓扑结构自动地从随机网络结构进化到以资源组为单位的聚类网络,从而使得网络中形成网络资源组间的查询负载均衡.另一方面,组内节点之间的路由负载均衡是通过节点间协同学习实现的.本研究首次在路由拥塞控制中采用一般运用于状态学习的协同 Q -学习方法,所研究的方法不仅从节点上学习其处理能力、连接数和资源的个数等参数,还将节点的拥塞状态作为协同 Q -学习的重要参数,并建立模型.通过这种技术的使用,同一组节点上的资源查询被有目的地引导,以避免那些组内拥塞的节点,从而最终实现资源组内节点之间的查询均衡.仿真实验结果表明,相比常用的 random walk 资源查找方法,本研究所实现的资源定位方法能更迅速地实现网络的资源查询.仿真结果还表明,相比 random walk 方法,本文所提出的方法在网络高强度查询和网络节点动态加入和退出的情况下进行查询,具有更高的鲁棒性和适应性.

References:

- [1] Risson J, Moors T. Survey of research towards robust peer-to-peer networks: Search methods. *Computer Networks*, 2006, 50(17):3485–3521.
- [2] Stoica I, Morris R, Karger D. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM*. 2001. 149–160.
- [3] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, Karp R, Shenker S. A scalable content-addressable network. In: *Proc. of the ACM SIGCOMM*. 2001. 161–172.
- [4] Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, decentralized object location, and routing for large-scale peer-to-peer systems. In: *Proc. of the 18th IFIP/ACM Int'l Conf. on Distributed Systems Platforms*. 2001. 329–350.
- [5] Zhang YX, Yang D, Zhang HK. Research on churn problem in P2P networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2009, 20(5):1362–1376 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3485.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03485]
- [6] Li B, Qu Y, Keung Y, Xie S, Lin C, Liu J, Zhang X. Inside the new coolstreaming: Principles, measurements and performance implications. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. 2008. 814–825.
- [7] Lua EK, Crowcroft J, Pias M, Sharma R, Lim S. Survey of research towards robust peer-to-peer networks: Search methods. *Communications Surveys & Tutorials*, 2005,7(2):72–93.
- [8] Zhu GM, Guo DK, Jin SY. P2P probabilistic routing algorithm based on data copying and Bloom filter. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2011,22(4):773–781 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3757.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03757]
- [9] Merino LR, Anta AF, Lopze L, Cholvi V. Self-Managed topologies in P2P networks. *Computer Networks*, 2009,53(10): 1722–1736.
- [10] Guimera R, Diaz-Guilera A, Vega-Redondo F, Cabrales A, Arenas A. Optimal network topologies for local search with congestions. *Phys. Rev. Lett.*, 2002,89(24):248071.1–248701.4.
- [11] Merugu S, Srinivasan S, Zegura E. Adding structure to unstructured peer-to-peer networks: The use of small-world graphs. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2005,65(2):142–153.
- [12] Liu L, Antonopoulos N, Mackin S, Xu J, Russell D. Efficient resource discovery in self-organized unstructured peer-to-peer networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2009,23(2):159–183.
- [13] Azar MG, Munos R, Ghavamzadeh M, Kappen H. Speedy Q -learning. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 24)*. 2011. 2411–2419.
- [14] Li Z, Xie G, Hwang K. Churn-Resilient protocol for massive data dissemination in P2P networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2011,22(6):1342–1349.
- [15] Fu S, Xu C, Shen H. Randomized load balancing strategies with churn resilience in peer-to-peer networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2011,34(1):252–261.
- [16] Ganesan P, Bawa M, Garcia-Molina H. Online balancing of range-partitioned data with applications to peer-to-peer systems. In: *Proc. of the VLDB*. 2004. 444–455.
- [17] Karger DR, Ruhl M. Simple efficient load balancing algorithms for peer-to-peer systems. In: *Proc. of the 16th Annual ACM Symp. on Parallel Algorithms and Architectures*. 2004. 36–43.
- [18] Schutt T, Schintke F, Reinfeld A. Range queries on structured overlay networks. *Computer Communications*, 2008,31(2):

- 280–291.
- [19] Joung YJ, Wong WT, Huang HM, Chou YF. Building a network-aware and load-balanced peer-to-peer system for range queries. *Computer Networks*, 2012,56(8):2148–2167.
- [20] Karger DR, Ruhl M. Simple efficient load balancing algorithms for peer-to-peer systems. *Theory of Computing Systems*, 2006, 39(6):787–804.
- [21] Glendenning L, Beschastnikh I, Krishnamurthy A, Anderson T. Scalable consistency in scatter. In: *Proc. of the 23rd ACM Symp. on Operating Systems Principles*. 2011. 15–28.
- [22] Lv Q, Cao P, Cohen E, Li K, Shenker S. Search and replication in unstructured peer-to-peer networks. In: *Proc. of the 16th ACM Conf. on Supercomputing*. 2002. 84–95.
- [23] Gkantsidis C, Milena M, Saberi A. Random walks in peer-to-peer networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. 2004. 120–130.
- [24] Tsoumakos D, Roussopoulos N. Adaptive probabilistic search for peer-to-peer networks. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Peer-to-Peer Computing*. 2003. 102–109.
- [25] Khataniar G, Goswami D. Hup: An unstructured hierarchical peer-to-peer protocol. In: *Proc. of the Int'l Multi Conf. of Engineers and Computer Scientists*. 2010. 671–676.
- [26] Fakasa GJ, Karakostas B. An efficient super-peer overlay construction and broadcasting scheme based on perfect difference graph. *Information and Software Technology*, 2004,46(6):423–431.
- [27] Xu Z, Bhuyan LN. Effective load balancing in P2P systems. In: *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Cluster Computing and the Grid*. 2006. 81–88.
- [28] Pournaras E, Exarchakos G, Antonopoulos N. Load-Driven neighbourhood reconfiguration of gnutella overlay. *Computer Communications*, 2008,31(13):3030–3039.
- [29] Morales RV, Gupta I. Avmon: Optimal and scalable discovery of consistent availability monitoring overlays for distributed systems. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2009,20(4):446–459.
- [30] Bhardwaj R, Dixit VS, Upadhyay AK. A propound method for agent based dynamic load balancing algorithm for heterogeneous P2P systems. In: *Proc. of the IEEE/WIC/ACM Int'l Conf. on Intelligent Agent Technology*. 2009. 1–4.
- [31] Thampi SM, Sekaran KC. Q-Learning based collaborative load balancing using distributed search for unstructured P2P networks. In: *Proc. of the IEEE/WIC/ACM Int'l Conf. on Intelligent Agent Technology*. 2008. 797–802.
- [32] Luo J, Xiao B, Bu K, Zhou S. Understanding and improving piece-related algorithms in the bittorrent protocol. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2013,24(12):2526–2537.
- [33] Hasselt HV. Reinforcement learning in continuous state and action spaces. In: *Reinforcement Learning*. Springer-Verlag, 2012,12. 207–251.
- [34] Sarolu S, Gummadi PK, Gribble SD. A measurement study of peer-to-peer file sharing systems. In: *Proc. of the Multimedia Computing and Networking*. 2002.

附中文参考文献:

- [5] 张宇翔,杨冬,张宏科.P2P 网络中 Churn 问题研究.软件学报,2009,20(5):1362–1376. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3485.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03485]
- [8] 朱桂明,郭得科,金士尧.基于副本复制和 Bloom Filter 的 P2P 概率路由算法.软件学报,2011,22(4):773–781. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3757.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03757]



沈项军(1977—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为模式识别,分布式多媒体计算.



姚银(1991—),女,硕士生,主要研究领域为 P2P 流媒体.



常青(1991—),男,硕士生,主要研究领域为 P2P 流媒体.



查正军(1984—),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为多媒体计算,计算机视觉.