

文章编号: 1001- 2486(2010) 05- 0160- 06

# ITSON: 一种基于拓扑演化的 P2P 智能搜索机制\*

唐九阳, 葛斌, 张羽中, 汤大权

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** P2P 系统中节点的动态特性对搜索性能的稳定提出了很大挑战。借鉴社会学和组织学相应原理, 提出拓扑演化模型捕获节点的运动规律。节点模拟人类在社会网络中的行为, 根据自身和他人的兴趣变化, 随搜索过程的进行, 利用自身局部信息, 动态、自适应地调整网络拓扑, 及时反映资源分布以及搜索内容的动态变化, 维持资源合理组织。在此基础上提出的智能搜索机制 ITSON(Intelligent Search based on tOpology evolution), 利用消息转发的智能性进行路由方向决策, 从而迅速定位提供资源的节点。仿真结果说明, ITSON 能自动优化网络, 具有良好的搜索性能和自适应特性。

**关键词:** 对等网; 自组织; 拓扑演化; 社区; 自适应

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## ITSON: A Mechanism for Intelligent Search Based on Topology Evolution in Peer-to-Peer Network

TANG Jiu-yang, GE Bin, ZHANG Chong, TANG Da-quan

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Efficient search in decentralized peer-to-peer systems is a challenging problem. An intelligent search mechanism based on topology evolution, named ITSON, is proposed. Each peer clustered with peers in similar interests into a community and chose important communities as logical neighbors based on the past queries. For a new arriving query, the most possible communities that have the query answers were selected according to topology evolution to send the query. With queries done, overlay network topology can be adjusted automatically with little cost. Simulations reveal that ITSON greatly improves the search efficiency and guarantees the search effectiveness.

**Key words:** P2P(Peer to Peer); self-organization; topology evolution; community; adaptation

以广域分布、动态自治为特点的 P2P 环境下资源共享和协同工作效率的核心是如何快速准确地进行资源搜索<sup>[1-2]</sup>。为改善资源搜索效率和网络可扩展性, 学术界提出了社区的概念<sup>[3]</sup>, 其思想是以“小世界”现象为理论依据, 通过挖掘节点共享的内容或者根据用户的查询行为获得兴趣, 并按照节点的兴趣关系构建网络拓扑, 使得具有相似兴趣的节点聚集成虚拟社区, 增强消息传播的针对性<sup>[4]</sup>。但是这些方法大部分基于静态拓扑的假设, 很少考虑节点的动态性对网络拓扑以及搜索性能的影响。实际上, 由于节点的自治以及节点信息的动态变化, 决定了拓扑的不稳定性, 相应导致搜索性能的不稳定。因此, P2P 系统中一种能适应资源动态变化并且定位性能好的资源搜索机制成为研究的热点。

在社会网络中, 按照“人以群分, 物以类聚”的生物学原理, 有着共同兴趣爱好的人, 相互之间容易建立关系, 个人根据自身兴趣的变化自动调整聚群, 主动趋向稳定状态, 这种自发的调整具有自组织、自适应等系统特性。借鉴社会学和组织学原理, 本文提出拓扑演化模型捕获节点的运动规律, 节点根据搜索返回的结果和历史信息, 从服务他人和满足自身的双重视角动态调整网络拓扑, 及时反映资源分布以及关注信息(搜索内容)的动态变化。随后提出的智能搜索机制 ITSON, 通过消息转发的智能性, 能够迅速定位提供资源的节点, 通常情况下可以在近邻找到结果。仿真结果表明该方法在保证良好搜索性能的前提下具有很好的自适应性。

\* 收稿日期: 2010- 03- 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60903225); 国家自然科学基金资助项目(60903206)

作者简介: 唐九阳(1978-), 男, 副教授, 博士。

## 1 相关工作

由于历史信息对搜索具有一定的指导意义,目前利用反馈机制进行自适应搜索的研究获得了普遍关注。文献[5]提出了在P2P系统中使用基于节点兴趣的搜索机制,基于节点兴趣局部性原理,在具有相同或相似兴趣的节点间建立捷径(shortcut),搜索首先利用曾经提供过搜索结果的快捷节点,失败后采取广播搜索方式。这一方案通过把搜索中的第一跳指向拥有相同兴趣的节点来提高搜索效率。文献[6-7]选择以往表现好的节点作为直接邻居。所谓“表现好”指的是能以较短的路径长度,带来较多的返回结果。经过一段时期的调整后,兴趣相近的节点之间便会建立起直接连接。文献[8]从历史搜索结果中学习节点之间兴趣的相似度,将节点按兴趣分类,在具有相似兴趣的节点之间建立朋友关系,搜索请求首先转发给朋友。该方法存在的问题是倘若节点查询的不是自身的兴趣,那么建立的朋友关系作用不大,仍然类似原始的P2P网络。与上述方法相比,本文综合考虑了节点的资源 and 需求对搜索性能的影响,保证搜索大部分情况下可以在近邻内完成,搜索效率进一步提高。

## 2 拓扑演化模型

本文的P2P网络拓扑采用文献[9]提出的REC模型。REC中的节点根据能力异构分为服务节点和叶节点,叶节点和服务节点间的拓扑连接基于节点参与资源共享的不同动机,分为资源连接和需求连接。

假定系统中的叶节点集合为  $P = \{P_i | 1 \leq i \leq N\}$ , 服务节点集合  $SP = \{SP_j | 1 \leq j \leq M\} (M \ll N)$ 。下面给出相应定义。

定义1 (资源连接)。叶节点基于资源类型与服务节点的连接称为资源连接,记资源连接映射为  $L_R: P \rightarrow SP$ ,  $L_R$  为单射且可逆,那么服务节点  $SP_j$  的资源连接节点集合  $L_R^{-1}(SP_j) = \{P_i | L_R(P_i) = SP_j\}$ 。

定义2 (需求连接)。叶节点基于资源需求与服务节点的连接称为需求连接,记需求连接映射为  $L_D: P \rightarrow SP$ ,  $L_D$  同样为单射可逆,那么服务节点  $SP_j$  的需求连接节点集合  $L_D^{-1}(SP_j) = \{P_i | L_D(P_i) = SP_j\}$ 。

定义3 (社区)。服务节点的资源连接节点集合与服务节点组成的逻辑覆盖网称作社区。下文中将服务节点  $SP_j$  管理的社区称作社区  $SP_j$ , 记为  $C(SP_j)$ , 用图表示为  $C(SP_j) = (N, E)$ , 其中节点集合  $N = \{SP_j \cup L_R^{-1}(SP_j)\}$ , 边集  $E = \{e | \forall P_i \in L_R^{-1}(SP_j), \text{有 } e \text{ 连接 } P_i \text{ 和 } SP_j\}$ 。

定义4 (兴趣)。设在任意时刻  $t$ , 任意叶节点  $P_i$  的兴趣

$$R_i = \begin{bmatrix} R_{i1}^r, R_{i2}^r, \dots, R_{iM}^r \\ R_{i1}^d, R_{i2}^d, \dots, R_{iM}^d \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $R_{ij}^r, R_{ij}^d \in \{0, 1\}, j = 1, 2, \dots, M, M$  为服务节点的个数,  $R_{ij}^r = 1$  表示叶节点  $P_i$  有意与服务节点  $SP_j$  建立资源连接,  $R_{ij}^r = 0$  表示叶节点  $P_i$  无意与服务节点  $SP_j$  建立或保持资源连接; 类似地,  $R_{ij}^d = 1$  表示叶节点  $P_i$  有意与服务节点  $SP_j$  建立需求连接,  $R_{ij}^d = 0$  表示叶节点  $P_i$  无意与服务节点  $SP_j$  建立或保持需求连接。任意时刻  $t$  所有叶节点的兴趣组合  $R_t = (R_{t1}, R_{t2}, \dots, R_{tN})$ , 其中  $N$  为所有叶节点的个数。

由定义4,  $R_t$  以及服务节点间的连接实际上表示了  $t$  时刻的P2P网络, 本文假设服务节点运行稳定, 在拓扑演化过程中, 服务节点间的连接不发生变化, 因此, 可以采用  $R_t$  代表  $t$  时刻的网络。可以看出,  $R_t$  由叶节点的资源连接和需求连接共同决定, 它们的改变都将导致相应拓扑连接的变化。

定义5 (活动)。一段时间间隔内, 由节点的查询动作触发的网络行为称为活动。

定义6 (演化点)。称引起拓扑改变的节点间的活动为演化点。为简化问题的描述, 也将演化点对应的拓扑称为演化点。

定义7 (调整周期)。设网络中活动的时刻按升序排列, 即  $t_0 < t_1 < \dots < t_i < \dots < t_m$ , 那么  $t_i - t_{i-1}$  为一个调整周期  $T_i$ 。

定义8 (资源重要度)。调整周期  $T_i$  内, 叶节点  $P_i$  在社区  $C(SP_j)$  内得到的资源请求应答数量占

全部社区应答数量的百分比称为资源重要度,记做  $perQueryHit(P_i, SP_j, T_l)$ , 有

$$perQueryHit(P_i, SP_j, T_l) = \frac{QueryHit(P_i, SP_j, T_l)}{\sum_{n: n \in QueryHitSet(P_i, T_l)} QueryHit(P_i, SP_n, T_l)} \quad (2)$$

其中  $QueryHit(P_i, SP_j, T_l)$  代表社区  $C(SP_j)$  为叶节点  $P_i$  提供的查询应答数量,  $QueryHitSet(P_i, T_l)$  为调整周期  $T_l$  内节点  $P_i$  的查询应答社区集合。

定义 9 (查询跳数)。查询跳数为叶节点到查询应答节点的资源连接的服务节点的跳数,记做  $QueryHops(P_i, SP_j)$ 。

定义 10 (距离重要度)。调整周期  $T_l$  内,叶节点  $P_i$  与社区  $C(SP_j)$  内查询应答节点的查询跳数之和占全部查询应答节点查询跳数之和的百分比称为距离重要度,记为  $perQueryHops(P_i, SP_j, T_l)$ , 有

$$perQueryHops(P_i, SP_j, t) = \frac{QueryHit(P_i, SP_j, t) \times QueryHops(P_i, SP_j)}{\sum_{n: n \in QueryHitSet(P_i, t)} QueryHit(P_i, SP_n, t) \times QueryHops(P_i, SP_n)} \quad (3)$$

定义 11 (效用函数)。在调整周期  $T_l$  内,社区  $C(SP_j)$  对叶节点  $P_i$  的效用记做  $Utility(P_i, SP_j, T_l)$ , 有

$$Utility_{T_l}(P_i, SP_j) = a \times \beta \times perQueryHit(P_i, SP_j, T_l) + a \times (1 - \beta) \times perQueryHops(P_i, SP_j, T_l) + (1 - a) \times Utility_{T_{l-1}}(P_i, SP_j) \quad (4)$$

式(4)综合了查询结果和历史信息对叶节点调整的影响。其中  $Utility(P_i, SP_j, T_{l-1})$  为上一次调整周期  $T_{l-1}$  内社区  $C(SP_j)$  对  $P_i$  的效用值,  $a, \beta$  为相互独立的系数 ( $0 < a < 1, 0 < \beta < 1$ )。若用户对查询结果数目的偏好越大,则  $\beta$  越大;用户的查询行为越不稳定,则  $a$  越大。资源连接和需求连接可以采用不同的效用函数,也可以采用不同的参数,即改变  $a, \beta$  的取值。文中假设采用相同的效用函数。即

$$Utility_{T_l}^{R_j^r}(P_i, SP_j) = Utility_{T_l}^{R_j^d}(P_i, SP_j) = Utility_{T_l}(P_i, SP_j) \quad (5)$$

在式(5)的基础上给出拓扑演化模型,拓扑的演化由节点间的活动触发,依据叶节点  $t_k$  时刻自身的效用,即  $Utility_{T_k}(P_i, SP_j)$ , 由于叶节点的理性,经过  $t_{k+1}$  时刻与任意其他服务节点交互后,根据活动所了解的有关服务节点的信息重新调整自身的兴趣,以使得自身效用最大化,即

$$R_{i(k+1)} = \left[ \begin{array}{c} \arg \max \left( Utility_{T_{k+1}}^{R_j^r} (P_i, SP_j) \right) \\ \arg \max \left( Utility_{T_{k+1}}^{R_j^d} (P_i, SP_j) \right) \end{array} \right] \quad (6)$$

其中  $\arg \max$  表示取到函数最大值的节点取值。对于多个服务节点同时取到最大值的情况,约定总是取下标最小的服务节点。

定义 12 (基于效用的拓扑演化)。称拓扑中节点根据式(6)选择兴趣的拓扑演化为基于效用的拓扑演化(Utility-based Topology Evolution),简称 UTE。

### 3 智能搜索机制

基于拓扑演化的智能搜索机制的一个基本假设是所有节点在搜索过程中都处在合适的位置上(即隶属于合适的社区),那么搜索请求可以以较高的概率被拥有相同兴趣的节点满足。实际上根据节点周期性地运行拓扑自组织构造算法 SOMA<sup>[9]</sup>,该假设是成立的。于是,对于一个给定的查询,它的答案集很大程度上就在对应的社区(目标资源的聚集),这样,资源搜索问题就转化成如何快速定位对应社区的问题。

给出搜索的基本过程如下:

(1) 确定查询内容所在的社区。当一个节点发起查询时,如果该节点是服务节点,跳(2);否则,首先计算查询项  $q$  与该节点维护的文档  $d_i$  的相似度  $Sim(d_i, q)$ <sup>[10]</sup>, 计算结果和预先设定的阈值(Threshold)进行比较,这里分两种情况:如果计算结果大于或等于设定的阈值,则认为成功找到了匹配的资源,将与查询相似度大于等于阈值的文档作为查询结果返回,同时该节点将查询消息发送给资源连

接的服务节点; 如果  $Sim(d_i, q)$  小于设定的阈值, 查询消息则传递给需求连接对应的服务节点;

(2) 确定查询内容所在的具体位置。当查询消息到达后, 接收到查询消息的服务节点先查看查询内容是否在本机上, 然后根据它维护的资源索引信息确定内容是否在社区内的叶节点上, 同时将查询按照一定策略发送给它的邻居服务节点, 为简化问题的讨论, 本文采用服务节点间的广播机制, 其中资源的搜索范围由 TTL 给出。

从直观上看, 智能搜索利用判断查询和当前节点所含资源的相似度, 决定查询的转发路径: 如果当前节点所含的资源与查询的相似度小于阈值, 那么该节点所属社区内的节点拥有和查询相关资源的可能性也较小, 因为根据节点的拓扑演化, 同一社区内维护相似资源的节点, 因此借助历史反馈信息, 将查询路由给需求连接的服务节点; 反之, 查询可能已经被发送到一个由一组查询主题相关的资源所在节点构成的社区中, 当前社区内包含与查询相关的大部分资源对象。

## 4 实验及分析

本节对基于拓扑演化的智能搜索机制 ITSON 进行实验性能分析。实验的软硬件环境为 Intel Pentium (R) 4 CPU 2.0GHz, 内存 1GB, Windows XP sp2 操作系统。在仿真网络拓扑中, 服务节点的连接按照幂次法则进行组织, 初始情况下默认叶节点的资源连接和需求连接为同一服务节点。节点共享文件的数量及分布采用了文献[9]中的设置方法。在该方法中, 节点拥有文件的概率和被查询的概率遵循 Zipf 定律。

为了描述方便, 将连续仿真时间中从初始观测点开始的每一段固定时间间隔称为轮次 (round), 每个轮次中各节点只给定一个查询动作。在仿真中, 我们将轮次设为 1s。

### 4.1 实验 1

图 1 显示了  $\alpha$ 、 $\beta$  两个参数对拓扑演化的影响。实验中, 我们从 150~150000 变换网络节点的数目。对于每一固定的网络规模, 分别使用 6 种不同的网络拓扑和 6 组各异的数据查询分布, 并针对上述 36 种组合考察不同  $\alpha$ 、 $\beta$  下算法的表现。图 1(a) 是拓扑演化达到收敛状态所需轮次随  $\alpha$  的变化趋势 (其中,  $TTL=5$ ,  $\beta=0.5$ )。我们观察到, 在不同网络规模下,  $\alpha$  取值为 0.1 时, 拓扑收敛的轮次最高。这是因为过分强调了历史信息在效用中的比重, 没能迅速体现最新搜索结果的作用。随着  $\alpha$  的逐渐增大, 拓扑收敛的轮次降低, 并在  $\alpha$  取值为 0.6 时达到最小。此后, 随着  $\alpha$  的增大, 由于  $\alpha$  的取值体现为注重最新搜索结果的作用, 导致拓扑调整过多, 拓扑收敛的轮次呈上升趋势。图中还可以发现, 随着网络规模以指数形式增长, 拓扑演化达到收敛的轮次大致呈线性增长, 在 150000 个节点的网络中, 达到稳定社区拓扑的轮次最大, 但平均也只需 12 个轮次即可完成。实验说明拓扑演化机制在不同网络规模和不同数据查询分布下性能稳定, 可扩展性好。图 1(b) 表明  $\beta$  的取值变化对拓扑收敛的轮次影响不大 (其中,  $TTL=5$ ,  $\alpha=0.6$ )。下面的实验中, 除非特别说明, 网络规模选取 1500 个节点 (其中 15 个服务节点),  $TTL$  取值为 5,  $\alpha$  取值为 0.6,  $\beta$  取值为 0.8。

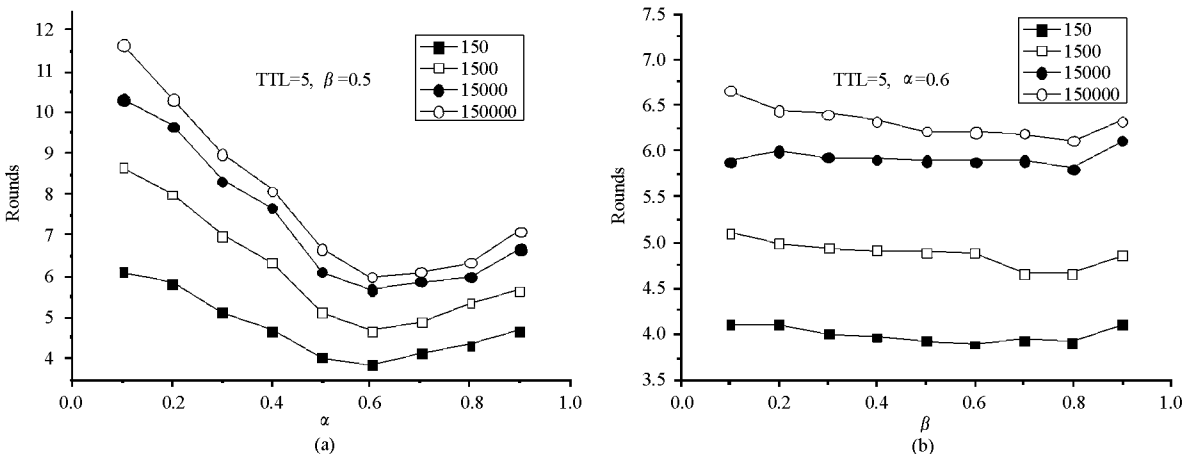


图 1 拓扑收敛轮次随参数的变化情况  
Fig. 1 Topology evolution rounds versus parameter

### 4.2 实验 2

实验 2 展示 ITSON 性能随拓扑演化的变化曲线。实验中,初始随机生成网络拓扑。每经历一个查询轮次,各叶节点进行拓扑连接调整,并将上一轮次调整后的拓扑作为下一轮次查询的拓扑。实验中每个叶节点重复单一的查询 12 次,系统拓扑也经历 12 轮次的调整。实验结果如图 2 所示。

可以看出,随着搜索的进行,节点自主调整拓扑连接(拓扑演化的过程),逐渐加入所属的社区,资源搜索越来越准确,查询效果越来越好,系统性能显著提高。图 2(a) 中系统的搜索成功率上升,由初始状态下的 79.3% 增长到 94.5%,图 2(b) 中系统稳定后的搜索路径长度仅为 1.33。平均搜索路径不超过 2 的实验结果说明经过拓扑演化,ITSON 下的查询请求大部分在同一社区或邻接社区内得到满足,这不但反映了相似资源节点能聚集在同一社区内,聚类效果好,而且反映了通过资源连接,资源提供节点也能保持在相邻节点位置,实现了网络拓扑结构的优化。

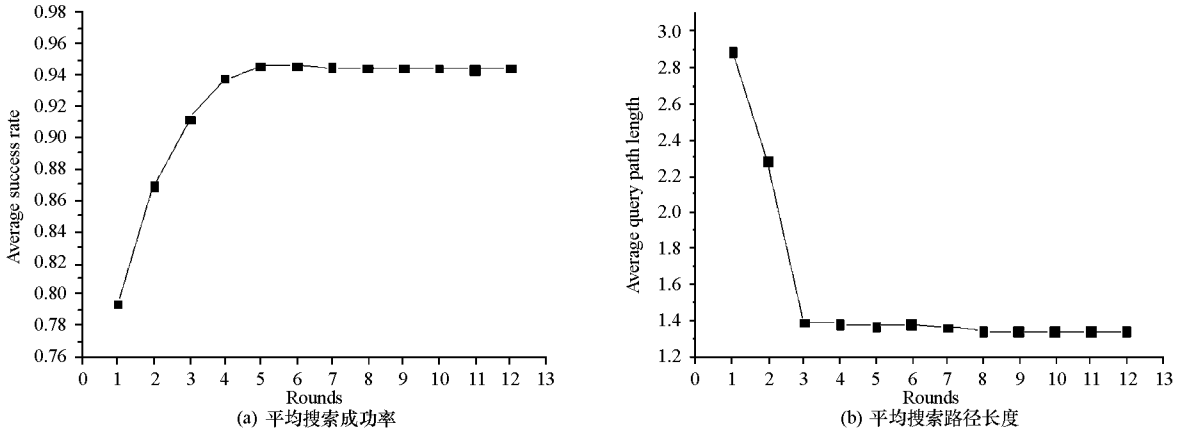


图 2 基于拓扑演化的搜索性能变化情况  
Fig. 2 Search performance variety based on topology evolution versus rounds

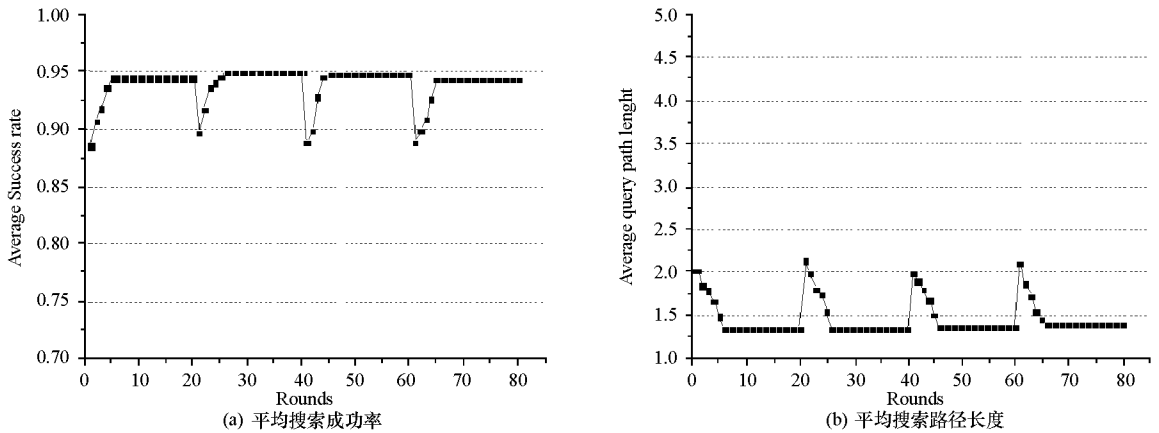


图 3 兴趣变化情况下的搜索性能变化情况  
Fig. 3 Search performance variety with the fluctuating interests

### 4.3 实验 3

该实验的目的是展示 ITSON 对兴趣变化的自适应性。在网络拓扑稳定后,每隔 3 万次查询随机选取 40% 的节点,对它们的兴趣,即共享文件和搜索请求进行随机互换。可以看出,ITSON 在兴趣发生变化后,搜索成功率略有降低,搜索路径长度略有增长,但随着搜索的进行,ITSON 的查询效果越来越好,并且能够很快恢复到收敛状态(基本上在 5 个轮次内完成)。这是因为 ITSON 可以通过选择路由方向决定搜索的路径,基于资源连接和需求连接的路由机制随着资源分布以及搜索内容的变化做动态自适应的调整,所以能快速自动优化搜索性能,相对减轻了兴趣变化带来的搜索性能恶化的程度。

### 4.4 实验 4

BestPeer<sup>[11]</sup> 是新加坡国立大学和复旦大学联合开发的 P2P 平台系统,与本文的工作类似, BestPeer 网

络中的节点可以动态自配置。由于静态 BestPeer 与 Gnutella 系统类似,我们在 Gnutella 系统的基础上应用 BestPeer 的动态配置策略模拟动态 BestPeer(简记为 DBP),并设置每个节点的直接邻居数目为 4。图 4 比较了 ITSON 与 DBP 在不同 TTL 下的搜索性能。实验中,网络规模设置 1500 个节点,数据为 10 次仿真实验的平均值,每次实验搜索次数为 15000 次。

搜索成功率如图 4(a) 所示,ITSON 优于 DBP。虽然 ITSON 和 DBP 都是通过动态配置调整节点拓扑,但 ITSON 中的配置对象是服务节点。而服务节点起到了局部索引服务器的作用,因此可以将搜索焦点集中在更多的成功可能性大的节点上。在 TTL 为 7 的情况下,ITSON 的平均搜索成功率为 1。由于实验中生成拓扑的网络直径为 7,当 TTL 取 7 时,查询覆盖整个网络。相比而言,DBP 的查询只是搜索一个局部范围,而答案散布在整个网络,平均搜索成功率为 92.2%。

ITSON 对搜索路径长度的节省可以从图 4(b) 直观地看出,当 TTL 从 3 增长到 7,ITSON 的平均搜索路径长度从 1.1 变化到 1.8,仅增长 0.7,增幅缓慢;相比而言,DBP 增幅明显,从 1.9 变化到 3.7。可见,ITSON 在保证高搜索成功率的基础上,可以有效控制搜索跳数。

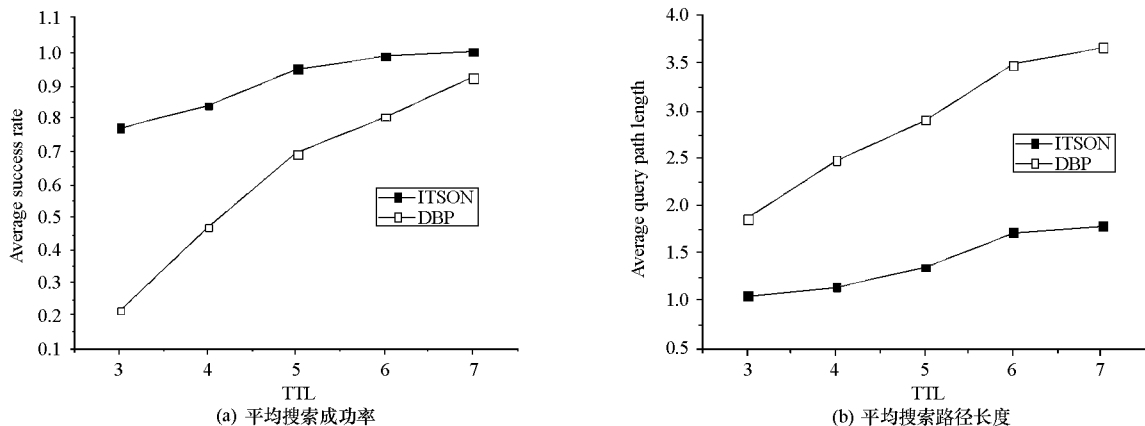


图 4 ITSON 和 DBP 在不同 TTL 下的实验结果

Fig. 4 Experimental results against different TTL of ITSON and DBP

## 5 结束语

本文提出一种基于拓扑演化的智能搜索机制 ITSON。随搜索过程的进行,节点根据兴趣的变化调整网络拓扑,实现资源的合理组织。在此基础上,通过选择最有可能包含查询结果的节点发送查询,有效提高了搜索的效率。仿真结果表明 ITSON 能自动优化网络,具有良好的自适应特性和搜索性能。

文中的资源搜索集中在服务节点上进行,由于资源搜索的不均匀,可能导致某些服务节点的负载过大,成为“热点”(hotspot),直接影响到系统的可伸缩性与整体性能。因此负载均衡机制以及故障容错是下一步研究的工作。

## 参考文献:

- [1] Risson J, Moors T. Survey of Research towards Robust Peer-to-Peer Networks: Search Methods[J]. *Computer Networks*, 2006, 50(17): 3485-3521.
- [2] 张小明, 王意洁. 位置感知的覆盖网构建算法[J]. 2006, 28(6): 124-126.
- [3] Vassileva J. Motivating Participation in Peer to Peer Communities[C]//ESAW 2002, Madrid, Spain, 2002.
- [4] Bisnik N, Abouzeid A A. Optimizing Random Walk Search Algorithms in P2P Networks[J]. *Computer Networks*, 2007, 51(6): 1499-1514.
- [5] Sripanikulchai K, Maggs B, Zhang H. Efficient Content Location Using Interest-based Locality in Peer-to-Peer Systems[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2003, San Francisco, USA, 2003.
- [6] Ramanathan M K, Kalogeraki V, Prujne J. Finding Good Peers in Peer-to-Peer Networks[C]//Proceedings of International Parallel and Distributed and Computing Symposium (IPDPS'02). Fort Lauderdale, FL, 2002.
- [7] Zhu Y W, Hu Y M. Enhancing Search Performance on Gnutella-Like P2P Systems[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(12): 1482-1495.
- [8] 陈海涛, 龚正虎, 黄遵国. 一种基于学习的 P2P 搜索算法[J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(9): 1600-1604.
- [9] 肖卫东, 唐九阳, 汤大权, 等. 基于社会学原理的 P2P 网络模型 REC[J]. *计算机科学*, 2007, 34(6): 38-40.
- [10] 唐九阳, 张维明, 肖卫东, 等. 类人类社会基于社区的对等网自组织构造[J]. *计算机研究与发展*, 2006, 43(8): 1383-1390.
- [11] 何盈捷, 冯月利, 王珊. Peer-to-Peer 环境下基于内容的智能搜索[J]. *计算机研究与发展*, 2004, 41(10): 112-118.
- [12] 黄维雄, 黄铭钧, 陈建利, 等. 一种基于自配置策略的新型 peer-to-peer 平台系统[J]. *软件学报*, 2003, 14(2): 237-246.