

## P2P 网络中一种基于进化博弈的资源配置模型\*

周经亚, 宋爱波, 罗军舟

(东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

通讯作者: 周经亚, E-mail: jyz@seu.edu.cn

**摘要:** 合理的资源配置能够有效地改进非结构化 P2P 网络的查询性能, 提高资源副本的可获得性。当前, 资源配置研究多集中在各种类型资源副本的定量分析和分布式配置策略上, 节点独立地选择资源副本进行配置, 并未考虑节点间配置行为的交互作用。P2P 网络中节点只维护若干与邻居节点的连接, 掌握局部信息, 因而在交互过程中可将节点视为有限理性节点。在分析查询性能与节点资源配置行为之间关系的基础上, 构造查询性能相关的节点收益函数, 将资源配置问题模型化为一种进化博弈, 通过对进化过程的描述能够有效分析节点在资源配置过程中的交互关系以及可获得的查询性能。仿真实验结果表明, 资源配置进化模型可获得更高的查询成功率和近似最优的平均查询跳数, 且保持相对较低的冗余度。

**关键词:** 对等网络; 广义随机图; 进化博弈; 资源配置; 泛洪

**中图法分类号:** TP393      **文献标识码:** A

中文引用格式: 周经亚, 宋爱波, 罗军舟. P2P 网络中一种基于进化博弈的资源配置模型. 软件学报, 2013, 24(3): 526-539. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4229.htm>

英文引用格式: Zhou JY, Song AB, Luo JZ. Evolutionary game theoretical resource deployment model for P2P networks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013, 24(3): 526-539 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4229.htm>

### Evolutionary Game Theoretical Resource Deployment Model for P2P Networks

ZHOU Jing-Ya, SONG Ai-Bo, LUO Jun-Zhou

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Corresponding author: ZHOU Jing-Ya, E-mail: jyz@seu.edu.cn

**Abstract:** Resource deployment is an effective means to improve search performance and can also be used to enhance the availability of resource replicas in unstructured P2P networks. Most of the current studies focus on the quantitative analysis of various types of resource replicas and distributed deployment strategies. During the resource deployment process each node selects resource replica exclusively for deployment; however, the process lacks a consideration for deployment behavior interactions among participating nodes. In a P2P network, each node keeps in touch with several other neighbors and are aware of local information, so each node can be assumed to be bounded rational. This paper designs the performance-related payoff function through analyzing the relation between search performance and resource deployment behaviors of nodes, and then models the resource deployment as an evolutionary game. In terms of the description of game evolution, the study can effectively analyze the interactions among nodes and the expected search performance. The simulation results indicate that the proposed resource deployment evolutionary model achieves higher success rate and approximate optimal average hop counts while maintaining a relatively low redundancy.

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2010CB328104); 国家自然科学基金(61070161, 61202449, 61272054, 61003257); 国家科技支撑计划(2010BAI88B03, 2011BAK21B02); 高等学校博士点学科专项科研基金(20110092130002); 国家科技重大专项科研基金(2010ZX01044-001-001); 江苏省自然科学基金(BK2008030); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2012202); 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2012036); 江苏省网络与信息安全重点实验室资助项目(BM2003201); 教育部计算机网络与信息集成重点实验室(东南大学)资助项目(93K-9); 上海市可扩展计算与系统重点实验室(上海交通大学)资助项目(2010DS680095); 浙江师范大学计算机软件与理论省级重中之重学科开放基金(ZSDZZZXK34); 中国教育科研网格 ChinaGrid 资助项目

收稿时间: 2011-07-07; 定稿时间: 2012-03-23

**Key words:** P2P network; generalized random graph; evolutionary game; resource deployment; flooding

大规模分布式对等网络(peer-to-peer,简称 P2P)中的节点既是资源使用者又是资源提供者,为以资源共享为基础的应用提供了一种很好的示范.在如此大规模的网络中,没有集中式的资源目录服务器,尤其在按照全分布式构造的非结构化 P2P 网络(fully decentralized unstructured P2P network)中,节点只维护与少量邻居节点的连接,资源查询主要通过节点间转发匹配查询消息实现.

本文把节点可以获取并创建的资源实体称为资源副本(resource replica),例如数据、文件等.获取资源相关信息并在节点上创建资源副本的过程被称为资源配置,资源配置对于 P2P 网络中资源副本的可获得性是至关重要的,合理地配置各种类型资源能够极大提升查询性能.P2P 网络中没有集中服务器,不适合采用集中方式配置资源.分布式资源配置方式一般采用资源复制策略实现,实现过程中,每个节点需要与其他节点进行交互,并按照统一规则选择其上的资源进行复制.节点交互时,关于创建对象的选择会相互影响,节点总是倾向于选择带来更高收益的资源创建副本.从查询的角度研究,这里的收益主要与查询性能有关.节点的交互会进一步影响查询性能,例如,节点 A 发现节点 B 上的  $i$  类型资源收益更高,为了提高查询性能,节点 A 会创建  $i$  类型资源副本,因而系统中资源副本的分布发生改变,导致整体查询性能也随之改变.博弈论作为一种理论分析工具,为多参与者交互的策略选择问题提供新的研究思路.本文提出了一种资源配置进化博弈模型,建立节点资源配置策略与查询性能之间的联系,以此分析资源配置的进化过程以及可获得的查询性能.

本文第 1 节介绍目前 P2P 网络中与资源配置和查询相关的研究工作.第 2 节介绍 P2P 网络随机图模型并对资源查询性能进行分析.第 3 节分析节点资源选择行为与查询性能的关系,建立资源配置进化博弈模型.第 4 节结合实际 P2P 网络特点对模型进行扩展.第 5 节通过仿真实验对该模型进行性能分析验证.第 6 节总结全文.

## 1 相关工作

目前,从查询角度研究 P2P 网络中资源配置问题主要集中在资源副本定量分析和分布式配置方式:前者研究各类型资源副本分布状况及对查询性能的影响;后者关注资源副本分布的实施策略,通常基于副本复制技术.

### 1.1 资源副本定量分析

均匀分布是一种简单的资源副本分布形式,每种类型的资源拥有近似相同数量的副本,由于未考虑资源查询(访问)频度即流行度(popularity)的差异,故只适用于流行度均匀的情况.而正比例分布让资源副本数正比于资源类型的流行度,使得流行度高的资源类型拥有更多的副本.文献[1]指出,采用泛洪(flooding)方法查询时,正比例分布可以获得最短的查询时间(用平均查询跳数表示).但是,正比例分布会使得经常被查询的热点资源类型拥有更多的资源副本,而对于那些不经常被查询的资源类型,由于副本太少,查询性能得不到保证.为了避免这种现象,文献[2]提出平方根分布(square-root distribution),让资源副本数正比于资源类型流行度的平方根,并证明平方根分布可获得最优的查询规模(expected search size),即一次查询访问的节点数.

文献[3]将资源复制问题描述为一种带约束的单目标优化问题,提出一种在资源类型流行度和存储空间确定情况下的资源副本优化分布,其分析是基于节点掌握全局信息的假设,配置主要依靠集中式方法实现,未给出有效的分布式配置策略.

### 1.2 分布式配置策略

分布式宿主复制策略(owner replication)要求在查询成功节点时配置所查询的资源副本.文献[1]提出,当节点存放资源能力有限时,经过改进的最近最少用算法可获得近似正比例副本分布.文献[2]提出 3 种平方根分布的实现策略:路径复制(path replication),查询成功时在所有查询经过的节点配置所查资源副本,使得该类型资源副本数等于对应资源类型的查询规模,路径复制需要花费大量资源副本创建开销,并且当资源类型流行度变化过于频繁时会使得创建的资源副本数偏离期望值不停抖动;记录兄弟副本数的复制(replication with sibling-number memory,简称 SNM)和记录探测值的复制(replication with probe memory,简称 PM),分别通过记录创建新

副本时兄弟副本数(sibling copies)和近期收到的查询请求,估计和调整资源副本数,从而以较高的置信水平实现平方根分布.但是,后两种策略需要额外的存储开销,限制了其在实际网络中的应用.

随机复制策略(random replication)要求以随机方式选择节点配置资源副本,文献[4]用实验验证路径复制和随机复制较宿主复制需要更小的查询消息开销.但随机复制要求每个节点均掌握整个网络的节点信息,而在实际 P2P 网络中,节点通常只了解其邻居节点信息.文献[5]提出一跳索引复制策略(one-hop index replication),每个节点将其资源索引信息转发给邻居节点.文献[6]提出一种移动自组网(mobile ad hoc network,简称 MANET)环境下分布式动态自适应副本放置算法,节点从其邻居节点收集查询请求信息,并动态调整副本放置方案以适应访问请求并减少查询跳数.但与 SNM 及 PM 策略一样,索引复制和信息收集均需要额外开销.文献[7]深入研究两跳复制策略,并证明可以提高对稀有资源的查询效率.但这主要针对存在超级节点的网络,资源索引在超级节点间两跳传播.另外,需要对索引进行更新和一致性维护.

分布式资源配置表现为节点选择创建资源副本的过程,在这个过程中,上述工作普遍缺乏对节点交互行为的理论分析.进化博弈<sup>[8]</sup>适用于描述参与者动态交互过程.本文将资源配置视为网络节点间进化博弈过程,设计与查询性能相关的收益函数,用以指导节点对创建资源副本的选择,进而研究资源配置对查询性能的影响.

## 2 P2P 网络模型

广义随机图理论<sup>[9]</sup>被广泛地用于对网络拓扑进行建模,本文同样采用广义随机图对 P2P 网络拓扑结构建模,将网络描述为  $n$  个节点的无向图,其中,每个节点的节点度服从一定的概率分布,用度概率分布生成函数  $G_0(x) = \sum_{k=0}^{n-1} p_k x^k$  表示,  $p_k$  表示图中任意节点的节点度为  $k$  的概率(节点不存在自回路,任意两节点间不多于一条连接).根据随机图性质,当从任意节点发出查询请求时,查询消息在第  $h(h>1)$  跳到达节点数的期望为

$$d(h) = d(h-1) \sum_{k=1}^{n-1} (k-1) \frac{kp_k}{d} = \bar{d} \left( \sum_{k=1}^{n-1} (k-1) \frac{kp_k}{d} \right)^{h-1} \quad (1)$$

其中,  $\bar{d}$  为网络中节点的平均度.因此,从任意节点发出查询请求,  $h$  跳内到达的总节点数为  $D(h) = \sum_{i=1}^h d(i)$ .

在上述 P2P 网络中,每个节点存放一种类型资源,网络中共有  $R(R \leq n)$  种类型资源.  $i(i=1, \dots, R)$  类型资源的流行度  $q_i$  表示该类资源被查询的频率,所有类型资源总流行度为 1.网络中,时间被划分为若干时隙,在每个时隙开始时,每个节点均发起一次资源查询.一次查询过程中,任意节点收到查询消息的概率为  $\frac{D(h)}{n-1}$  (去除查询发起节点),则一个时隙内节点收到的有效查询消息数期望为  $D(h)$ .对于任意  $i$  类型资源,一次查询是针对  $i$  类型资源发起的概率即为其流行度  $q_i$ .所以,当该类资源有一个资源副本时,该副本在一个时隙内能够满足  $D(h)q_i$  次查询.当给该类资源再配置一个资源副本时,第 2 个资源副本能够满足的查询与第 1 个副本满足的查询会存在重叠,所以,第 2 个资源副本满足的有效查询次数为  $S_h^i(2) = D(h)q_i - D(h)q_i \frac{D(h)q_i}{n-1}$ .随着添加副本数的增加,添加副本所满足的有效查询次数逐渐减小.当为  $i$  类型资源配置  $n_i$  个副本时,第  $n_i$  个副本能够满足的有效查询次数为

$$S_h^i(n_i) = D(h)q_i - D(h)q_i \frac{\sum_{j=1}^{n_i-1} S_h^i(j)}{n-1} = D(h)q_i \left( 1 - \frac{D(h)q_i}{n-1} \right)^{n_i-1} \quad (2)$$

其中,  $S_h^i(n_i)$  也可理解为每增加一个资源副本所带来的有效查询命中次数的增量.由公式(2)可知,随着  $n_i$  的增大,该增量逐渐减小.此时,  $n_i$  个副本在该时隙内共能满足查询次数可表示为

$$S_h^{n_i} = \sum_{j=1}^{n_i} S_h^i(j) = (n-1) \left( 1 - \left( 1 - \frac{D(h)q_i}{n-1} \right)^{n_i} \right) \quad (3)$$

所以,在一个时隙内,为  $i$  类型资源配置  $n_i$  个副本时可获得的查询成功率为  $S_h^{n_i} / n$ .那么,当网络中总资源副

本数为  $\sum_{i=1}^R n_i$  时,查询成功率为

$$Suc_h = \sum_{i=1}^R \frac{S_h^{n_i}}{n} = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^R \left( 1 - \left( 1 - \frac{D(h)q_i}{n-1} \right)^{n_i} \right) \quad (4)$$

通过计算公式(4)可以得出,当最大查询跳数限制为  $h$  时,该网络可获得的资源查询成功率.假设在第  $m$  跳第 1 次找到目标资源副本的概率(first hit rate)为  $Suc(m)$ ,则  $Suc_h = \sum_{m=1}^h Suc(m)$ .如果查询成功即在  $h$  跳内能够找到目标资源副本,那么该副本在第  $m$  跳第 1 次被发现的概率应为  $Suc(m)/Suc_h$ .于是,查询成功时的平均查询跳数为

$$T_h = \sum_{m=1}^h m \frac{Suc(m)}{Suc_h} = \frac{1}{Suc_h} \left( \sum_{m=1}^{h-1} m Suc(m) + h Suc(h) \right) = h - \frac{1}{Suc_h} \sum_{m=1}^{h-1} Suc_m \quad (5)$$

### 3 资源配置模型

#### 3.1 模型描述

通过上一节对 P2P 网络模型和查询性能的分析可知,查询性能主要与查询最大跳数  $h$ 、资源流行度  $q_i$  以及资源副本数  $n_i$  有关.在前两者都给定的情况下,如何配置各类型资源副本以及资源配置方式对查询性能的影响,是本文的研究所在.P2P 网络是一种大规模的分布式系统,节点按照自组织方式构建网络,具有自治性,所以很难通过集中管理方式进行统一的资源配置,只能通过单个节点根据一定规则自主选择创建资源副本来实现.理性节点要求所做出的选择能够最大化自身收益,节点在交互过程中,任意节点的选择都可能影响到其他节点的收益.从进化博弈论角度理解,节点拥有局部信息这种情况可以被看作为节点具备有限理性,也就是说,节点只能根据当前自身掌握的局部节点收益状况做出决策,并通过不断的学习做出调整,最终达到一种均衡状态.本文把资源配置问题模型化为一种进化博弈.

在  $n$  个节点的 P2P 网络中,每个节点都被看作为一个参与者(player),每个参与者存放一个属于某种类型的资源副本,把选择存放何种类型的资源副本作为参与者的策略(strategy),参与者按照不同策略进行分类,即存放  $i$  类型资源副本的节点作为  $i$  类型节点.为了分析节点所选策略对查询性能的影响,节点的收益必须与查询性能相关,在每个时隙开始时,每个节点均发起一次查询,若查询成功则节点付出  $\beta$  单位代价;与此同时,节点获得的收益与满足查询的增量成正比,比例系数为  $\alpha$ ,分别描述如下:

$$u_i^-(t) = \beta Suc_h, u_i^+(t) = \alpha \frac{S_h^i(x_i(t)n)}{n} \quad (6)$$

其中,  $u_i^-(t), u_i^+(t)$  分别表示  $t$  时刻  $i$  类型节点的负收益和正收益,  $x_i(t)$  表示  $t$  时刻  $i$  类节点在总节点中所占比例.根据公式(2)得知,  $\frac{S_h^i(x_i(t)n)}{n}$  表示  $i$  类型节点提供的查询成功率增量.相比于查询成功率,成功率增量能够更准确地反映资源副本数量变化对查询性能的影响.这里,设  $\beta=1$ ,  $t$  时刻选择存放  $i$  类型资源的节点的收益函数(payoff function)可表示为

$$u_i(t) = u_i^+(t) - u_i^-(t) = \alpha \frac{D(h)q_i}{n} \left( 1 - \frac{D(h)q_i}{n-1} \right)^{x_i(t)n-1} - Suc_h \quad (7)$$

公式(7)表示了节点收益与所选策略以及节点类型比例的关系.节点交互时,通过对比收益函数不断调整策略.在这个动态演化过程中,可以把节点这种行为看成是一种学习,称为复制者动态(replicator dynamics).下面给出资源配置进化博弈模型的形式化定义.

**定义 1(资源配置进化博弈模型).**  $n$  个节点的 P2P 网络,每个节点选择一种类型资源副本存放,参与者集合为网络节点集  $\{1, \dots, n\}$ ,策略集为资源类型集合  $\{1, \dots, R\}$ .根据节点所选策略划分节点类型,  $t$  时刻节点类型分布为  $X(t)=(x_1(t), \dots, x_R(t))$ ,对应节点收益函数分别为  $(u_1(t), \dots, u_R(t))$ .节点采用复制者动态进化方式,在每个时隙结束时调整策略,资源配置进化博弈用  $G=\{1, \dots, n, X(t), (u_1(t), \dots, u_R(t)), rd\}$  表示,其中,  $rd$  表示复制者动态进化方式.

### 3.2 进化过程

在资源配置进化博弈模型中,复制者动态进化方式要求节点作为有限理性参与者通过不断获得其他节点信息来调整自身的策略,以逐步提高收益.在每个时隙开始时,所有节点均发起一次查询,节点随机选择所要查询的资源类型,总体上资源被查询频率(流行度)符合齐普夫(Zipf's law)分布<sup>[10]</sup>,查询结束,各自获得相应收益.如图 1 所示,在时隙结束时, $i$  类型节点从查询访问过的节点中随机选择一个  $j(j \neq i)$  类型节点作为学习对象,如果学习对象的收益低于该节点收益,则节点不需要调整当前策略;否则,节点以概率  $\lambda(u_j(t)-u_i(t))$  改变当前策略为产生更高收益的策略,即学习对象的策略.其中,用  $\lambda$  表达节点对性能差异的敏感度,通过调节  $\lambda$  可以控制调整频度,避免过度复制.

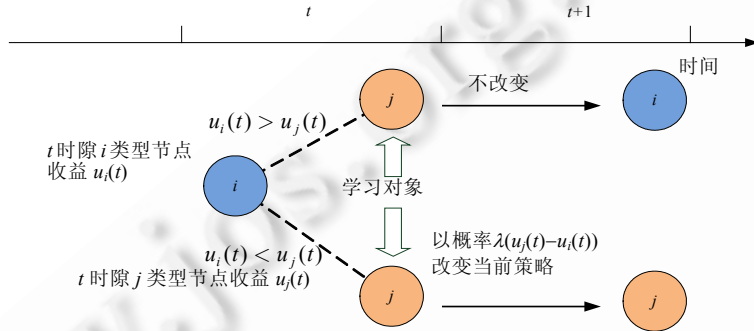


Fig.1 Interaction between two nodes in the evolutionary process

图 1 进化过程中节点的交互

进化过程中,每个节点仅根据局部信息即自身收益和学习对象收益进行策略选择,节点收益理论值根据公式(7)计算,其中包含全局变量如  $n, q_i$ , 用于进化过程的理论分析.实际收益用下述方法近似获得:在每个时隙内,节点用满足的有效查询消息数除以收到的有效查询消息数,计算节点在该时隙对查询成功率的贡献,取连续两个时隙贡献的差值作为增量.如果图 1 中节点在连续的两个时隙内没有改变类型,则直接减去前一时隙贡献值即可获得增量;否则,需要从学习对象获得前一时隙贡献值来计算增量.用增量乘以预先设定的比例系数  $\alpha$  得到节点收益,如果本时隙内节点发起的查询成功完成,则需要扣除相应的查询代价.

### 3.3 性能分析

进化过程中,节点不断调整自身策略,节点类型分布  $X(t)$  也随之变化, $X(t)$  的变化状况从整体上反映了博弈的进化过程,也就是资源配置过程.根据进化博弈中复制者动态分析方法<sup>[8]</sup>对上述过程进行分析,假设  $t$  时刻任意两种类型节点收益  $u_i(t)$  和  $u_j(t)$  的概率密度函数分别为  $f_i(u_i(t))$  和  $f_j(u_j(t))$ ,若此时  $j$  类型节点收益高于  $i$  类型节点,则在该时隙结束时, $i$  类型节点调整为  $j$  类型节点的概率为  $p_{ij}(t) = \int \lambda(u_j(t) - u_i(t)) f_j(u_j(t)) f_i(u_i(t)) du_j(t) du_i(t)$ . 由于  $t$  时刻两种类型节点占总节点数的比例分别为  $x_i(t)$  和  $x_j(t)$ ,所以可得出  $i$  类型节点向  $j$  类型节点转变的速率为  $r_{ij}(t) = \lambda x_j(t) x_i(t) \int (u_j(t) - u_i(t)) f_j(u_j(t)) f_i(u_i(t)) du_j(t) du_i(t)$ , if  $u_i(t) < u_j(t)$ . 与此同时,如果  $j$  类型节点收益低于  $i$  类型节点,同样地,可得出  $j$  类型节点向  $i$  类型节点转变的速率  $r_{ji}(t)$ ,因此, $t$  时隙结束时, $j$  类型节点向  $i$  类型节点转变的聚合速率为  $r_{ji}(t) - r_{ij}(t) = \lambda x_i(t) x_j(t) E(u_i(t) - u_j(t))$ . 其中,  $E(u_i(t) - u_j(t))$  为收益差值的期望值,将其推广到所有类型节点,可计算出  $t$  时刻  $i$  类型节点变化率为

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^R (r_{ji}(t) - r_{ij}(t)) = \lambda x_i(t) (E(u_i(t)) - E(u(t))) \tag{8}$$

其中,  $E(u(t)) = \sum_{j=1}^R x_j(t) u_j(t)$  为  $t$  时刻节点平均收益的期望.由公式(8)不难看出,在进化过程中,当  $i$  类型节点的收益高于平均收益时,一部分低于平均收益的其他类型节点会逐渐转变为  $i$  类型节点,从而使得  $x_i(t)$  随着时间  $t$  逐

渐增加.但根据公式(7)收益函数的定义,在  $x_i(t)$  增加的同时,  $u_i(t)$  在减小,所以不会导致  $x_i(t)$  持续增加.同样,对于那些低于平均收益的其他类型节点,随着它们群体比例的变化,其收益也变化,所以未必会导致群体比例的持续减少.这样的进化过程会到达一个最终状态,此时,节点不再改变类型或者改变幅度相同而抵消,从每种类型节点的  $x_i(t)$  值判断不再变化,从而达到动态均衡.在这种情况下,认为进化停止,即  $\frac{dx_i(t)}{dt} = 0, \forall i \in [1, R]$ , 所有节点的收益均相同.此时,节点不再具备改变当前策略的动机.

**定义 2(不动点).** 在采用复制者动态的进化博弈中,当节点类型分布  $X(t)=(x_1(t), \dots, x_R(t))$  满足  $\frac{dx_i(t)}{dt} = 0, \forall i \in [1, R]$  时,进化过程终止,节点类型分布不再改变,称为不动点(fixed point).

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \lambda x_i(t)(E(u_i(t)) - E(u(t))) = 0, \forall i \in [1, R].$$

设  $\Psi_i = 1 - \frac{D(h)q_i}{n-1}$ , 求解得:

$$x_R^*(t) = \frac{1 - \sum_{i=1}^R \frac{\ln q_R - \ln q_i - \ln \Psi_R}{n \ln \Psi_i} - \frac{R}{n}}{\sum_{i=1}^R \frac{\ln \Psi_R}{\ln \Psi_i}}, x_i^*(t) = \frac{(x_R^*(t)n-1) \ln \Psi_R + \ln q_R - \ln q_i}{n \ln \Psi_i} + \frac{1}{n}, \forall i \in [1, R].$$

所以,上式给出了资源配置进化博弈的唯一不动点  $X^*(t)$ ,各类型节点的数量在此处均不再改变.根据第 2 节公式(4)、公式(5)的结论可以得出,不动点处的查询成功率和平均查询跳数分别为

$$Suc_h^* = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^R \left( 1 - \left( 1 - \frac{D(h)q_i}{n-1} \right)^{x_i^*(t)n} \right), T_h^* = h - \frac{1}{Suc_h^*} \sum_{m=1}^{h-1} Suc_m^* \quad (9)$$

#### 4 模型扩展

为了简化讨论,我们对网络模型做了假设:首先,认为网络节点规模一直保持不变;其次,每个时隙节点均同时发起一次查询;再次,网络中的任意节点只存放一个资源副本.实际的 P2P 网络通常是一个动态异构网络,网络动态性表现在节点频繁地加入和退出,节点发起查询的时机并不一定同步,而单个节点能力也存在差异,在本文中,把这种差异理解为节点在存放和维护资源副本数量上的区别.因此,需要从 3 个方面对模型进行扩展.

P2P 网络中,节点动态性可以用节点加入率和生存周期构成的排队系统来描述.节点加入网络是一种随机行为,用泊松分布  $Po(\theta)$  描述节点加入过程.文献[11]研究发现,P2P 网络中,节点的生存周期近似服从重尾分布(heavy-tailed distribution),我们采用一种简单的重尾分布——帕累托分布(Pareto distribution)来描述节点生存

周期,考虑允许存在任意短的生命周期,参照文献[12]对帕累托分布做如下修改  $F(x) = 1 - \left( \frac{\phi}{\phi+x} \right)^\varphi$ ,  $\varphi > 1, \phi > 0$ . 假设节点加入网络的时间为  $\pi(0 < \pi < t)$ ,根据帕累托分布的性质,在  $[0, t]$  时段内到达的节点,在  $t$  时刻依然在线的概率可表示为

$$P_{alive}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \left( \frac{\phi}{\phi+t-\pi} \right)^\varphi d\pi = \frac{\phi \left( 1 - \left( 1 + \frac{t}{\phi} \right)^{1-\varphi} \right)}{t(\varphi-1)} \quad (10)$$

节点加入率用期望为  $\theta$  的泊松分布  $Po(\theta)$  描述,结合公式(10)可得,  $t$  时刻网络节点规模为

$$N(t) = \theta t P_{alive}(t) = \frac{\theta \phi - \theta \phi \left( 1 + \frac{t}{\phi} \right)^{1-\varphi}}{\varphi - 1} \quad (11)$$

公式(11)表明,网络节点规模的增幅会随着时间增加而逐渐减少,最终,节点规模稳定于  $\frac{\theta\phi}{\phi-1}$ . 将这一结论带入资源配置进化博弈模型,博弈参与者集合即节点集将随时间而变化,在任意时刻  $t$ ,有  $N(t)$ 个节点参与博弈.

资源配置过程是节点选择创建资源副本的进化过程,伴随查询过程同步进行,但这要求查询过程中节点在每个时隙同步发起查询请求,但在实际网络中很难实现.因此我们认为,节点不断发起查询,但发起查询的时机随机.通过对时隙长度的设置,保证每个时隙内每个节点至少发起一次查询.对于一个时隙内节点发起多次查询的情况,时隙结束时选取其中一次查询计算相应收益并参与博弈.为了避免记录多次查询带来的额外存储开销,我们选择该时隙内最后一次查询.从进化过程看,仍然可以保证进化同步进行,同时对查询过程没有特殊要求.

在异构性方面,用存放和维护资源副本的数量来表示节点能力,节点  $a$  的能力为  $r_a$ .节点存放同一类型资源不超过 1 个副本,因为从查询角度看,一个节点上相同类型资源的多个副本不会带来任何性能的提升;从节点收益角度看,多个副本的收益重叠,不会增加总收益.对节点按照能力进行拆分,例如,节点  $a$  被拆分成  $r_a$  个子节点,每个子节点存放一个资源副本,对应于第 3 节中的一个节点,节点  $a$  的子节点集合记为  $s_a$ .结合以上描述,对资源配置模型定义做如下扩展:

**定义 3(扩展的资源配置进化博弈).** 在动态异构 P2P 网络中,每个节点按照能力划分成若干个子节点,每个子节点选择一种类型资源副本存放,任意  $t$  时刻参与者集合为网络子节点集  $\bigcup_{a \in [1, N(t)]} s_a$ ,策略集为资源类型集合  $\{1, \dots, R\}$ .根据子节点所选策略划分子节点类型, $t$  时刻子节点类型分布为  $X(t) = (x_1(t), \dots, x_R(t))$ ,对应子节点收益函数分别为  $(u_1(t), \dots, u_R(t))$ .子节点采用复制者动态进化方式,在每个时隙结束时调整策略,扩展的资源配置进化博弈用  $EG = \left\{ \bigcup_{a \in [1, N(t)]} s_a, X(t), (u_1(t), \dots, u_R(t)), rd \right\}$  表示,其中,  $rd$  表示复制者动态进化方式.

模型扩展后的进化过程用算法 1 描述,在进化过程中,每个时隙内所有在线节点等待随机一段时间后(等待时间不超过 1 个时隙),从各自的子节点集中随机选择一个子节点代表该节点发起查询.查询请求到达一个节点,会对该节点上存放的所有资源副本进行匹配,匹配不成功则转发给邻居节点直到到达最大跳数,完成该次查询.若时隙未结束,则继续上述过程.时隙结束时,选取最后一次查询计算相应子节点收益;同时,从该查询访问过的节点的子节点中挑选学习对象,挑选过程中必须保证所选对象存放的资源类型不在查询节点存放的资源类型集合中;否则,可能会出现一个节点上存放相同类型资源的多个副本,节点根据收益比较结果决定是否改变当前策略.整个过程的操作粒度是以子节点为单位.

**算法 1.** *Evolve\_process()*.

1. **For** each time slot  $t$
2.     **For** each node  $a$  ( $\forall a \in [1, N(t)]$ )
3.         **While** not reach the end of time slot
4.             wait a random period of time;
5.             select a sub-node  $a_i$  ( $a_i \in s_a$ ) randomly to represent node  $a$  to issue a query;
6.             search process;
7.         **End While**
8.         select the last search and compute node  $a_i$ 's payoff;
9.         select learning object  $l$  from the sub-nodes of visited nodes;
10.        **While**  $l \in s_a$
11.            select another learning object  $l$ ;
12.        **End While**
13.        **If**  $l$  is found and  $l$ 's payoff is higher than  $a_i$ 's **then**
14.            sub-node  $a_i$  switches to  $l$ 's strategy with probability proportional to the payoff gap;
15.        **End If**

16. End For

17. End For

## 5 仿真实验与分析

### 5.1 实验环境

为了进一步验证资源配置模型的性能,对该模型进行了 4 组仿真实验.前 3 组实验分别对基本模型、异构性扩展模型和动态性扩展模型进行验证分析,最后一组实验讨论资源配置中的副本冗余问题.仿真程序采用 C++ 语言开发,主要由 4 个部分组成:拓扑生成模块负责产生网络拓扑;资源配置模块负责资源副本的分布式放置;查询模块负责生成符合特定流行度分布的资源查询请求并执行;性能分析模块用于收集和分析程序运行过程中的性能参数,程序运行在配置为 Intel Core 2 Quad CPU Q8200 @2.33GHz 4GB 机器上.我们用 BRITE<sup>[13]</sup>生成同等规模的两种类型网络拓扑结构:幂律(power-law)结构,万维网和 Gnutella 网络均表现为这种自演化的拓扑结构;泊松(Poisson)结构,一种典型的随机图模型,又称为 E-R 图(Erdős-Rényi graph)<sup>[14]</sup>.网络中可配置的资源类型总数设置为 2 000,资源类型流行度服从齐普夫分布.查询消息采用 flooding 路由方式进行资源查找,实验基于离散时间执行.表 1 列出实验基本参数设置.

**Table 1** Parameters setting  
**表 1** 参数设置

| Parameter                | Value or type  |
|--------------------------|--|
| Topology                 | Power-Law random graph ( $G_0(x) = \text{Li}_\tau(xe^{-1/\kappa}) / \text{Li}_\tau(e^{-1/\kappa})$ ) **<br>E-R graph ( $G_0(x) = e^{\bar{d}(x-1)}$ ) |
| Network size             | $n=20\ 000$  |
| Average node degree      | $\bar{d}=6$  |
| Coefficient              | $\alpha=18\ 000$   |
| Total resource types     | $R=2\ 000$   |
| Resource type popularity | Zipf's law distribution  |
| Searching algorithm      | Flooding   |

### 5.2 基本模型

首先,验证资源配置基本模型的正确性和有效性.每个时刻所有节点均发起一次查询,查询最大跳数限制  $h$  设置为 4,每个节点只存放一个资源副本.初始时,资源副本随机存放于各节点;每完成一次查询,节点根据收益调整存放的资源副本,直到稳定于不动点. $\lambda$ 是进化过程中一个重要参数,表示节点在交互时对收益差异的敏感度,其取值对进化速度和复制开销有重要影响.进化速度用进化到达不动点所需的时隙数表示,复制开销为到达不动点所需总复制次数.我们对一组  $\lambda$ 取值进行多次实验比较,如图 2 所示, $\lambda$ 取值越大,进化速度越快,复制开销也随之变大;但当  $\lambda \geq 2.3$  时,进化速度不再有较大变化,而复制开销则持续增加.这是因为  $\lambda$ 取值越大,意味着节点对收益差异越敏感,从而加快了进化过程中资源调整的节奏,有利于更快到达不动点;但进化速度与调整节奏并非始终正相关,较大的  $\lambda$ 值会放大细微的收益差异,造成一定的抖动,频繁的调整则导致过度的复制开销.实验结果表明,当  $\lambda=2.3$  时可以取得较快的进化速度,同时不会带来太大的复制开销.

本文考虑两种查询性能指标:成功率和平均跳数.如图 3 所示,随着进化过程的进行,成功率得到不断增加,平均跳数呈现降低趋势,在前 500 时隙内基本达到稳定.两种拓扑结构下的实验值与不动点处的理论计算值基本吻合,幂律拓扑结构下的查询性能优于 E-R 图,因为幂律拓扑中大度节点(high degree node)的存在,使得  $h$  跳内可以到达更多的节点,即获得更大  $D(h)$ .同时,大度节点能够收到更多节点发出的查询请求,有更多的可能被选

\*\* 其中,  $\text{Li}_\tau(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x^k}{k^\tau}$  为  $\tau$ 重对数函数.



为学习对象;当大度节点存放热点资源副本时,那么热点资源能够得到更快的复制,而查询性能主要取决于热点资源,热点资源的快速配置保证了查询性能的快速稳定,所以幂律拓扑下的查询性能能够更快地趋于稳定.

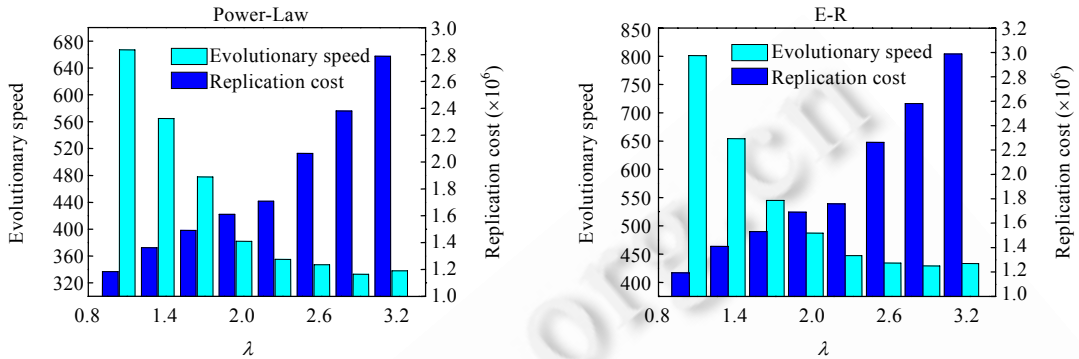


Fig.2 Evolutionary speed vs. replication cost for each lambda

图 2 不同lambda值下,进化速度和复制开销比较

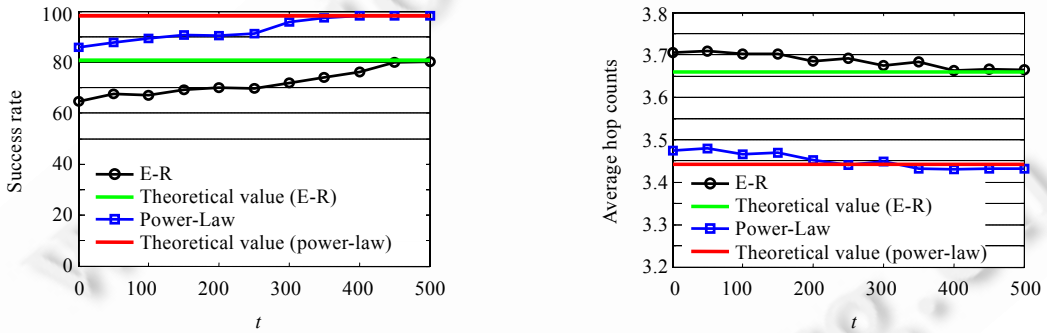


Fig.3 Performance changes accompanied by evolution

图 3 进化过程中查询性能的变化

为了验证模型有效性,将本文模型与 3 种配置策略进行比较:均匀分布、正比例分布和平方根分布.其中,正比例分布采用宿主复制策略实现,平方根分布采用路径复制策略实现.

为了避免路径复制中 flooding 算法产生大量复制开销,采用 random walks 消息转发方式,并通过调整 walkers 数目和最大跳数限制以保持与 flooding 算法到达节点数 D(h)基本一致.宿主复制和路径复制均在查询成功后进行副本创建,配置过程中,查询性能不断提高.随着成功率增加,宿主复制和路径复制的副本创建会越来越频繁,即性能的提升是以增加创建开销为代价的.而对于基本模型 G,进化过程中,节点间收益差距会趋于减小,从而副本创建开销也随之降低.

图 4 显示两种拓扑结构下资源配置基本模型 G 与 3 种策略的比较结果,面向不同拓扑结构,不同最大跳数限制 h,即不同 D(h),G 始终获得最大查询成功率,并且幂律拓扑优于 E-R 图;但当 h 较大时,E-R 图中 G 在成功率方面比其他策略优势更为明显.这是因为当 h 较大时,E-R 图较幂律拓扑查询到达节点数 D(h)要小得多,此时,幂律拓扑下的正比例分布和平方根分布通过更加频繁的复制可以获得较 G 略低的查询成功率;相比之下,E-R 图下的这两种策略复制频度较小,对查询成功率优化效果有限;而基本模型 G 利用查询性能相关的收益函数指导节点合理创建副本,无需过多的复制操作即可获得较好的查询成功率.对于平均跳数指标,文献[1]已证明正比例分布策略可以获得最优值,本文实验结果与文献[1]的结论一致.从图 4 还可以看出,基本模型 G 较均匀分布策略更接近最优值.

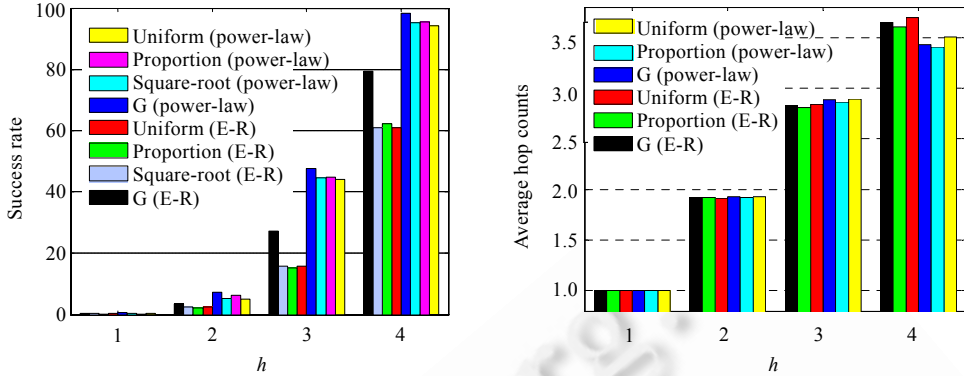


Fig.4 Performance comparison with other strategies

图 4 查询性能比较

5.3 异构性扩展模型

考虑节点在能力即存放资源副本数量方面的差异,对配置模型进行异构性扩展并验证.在总资源副本数相同的情况下,我们对比了 3 种类型的节点能力分布:正态分布(normal distribution) $N(\mu, \sigma^2)$ ,其中, $\mu=15, \sigma^2=0.5$ ,区间为 $[10,20]$ 的均匀分布和幂律分布  $p(r) = \frac{r^{-\omega} e^{-r/\eta}}{Li_r(e^{-1/\eta})}, r \geq 1, p(r)$ 表示节点存放  $r$  个资源副本的概率,其中, $\omega=2, \eta=0.8$ ,其他设置同表 1.资源配置进化过程以子节点为粒度,每个时隙内节点随机发起 1 次~10 次查询,每次选择一个子节点代表自己发起查询,并在时隙结束时参与资源选择,查询最大跳数限制设为 3.图 5 描述了在不同节点能力分布状况下,查询性能伴随进化过程的变化情况.总体趋势和基本模型相似,使得查询性能得到提高.从图 5 可以看出:幂律拓扑较 E-R 图可获得更快的收敛速度和更好的性能;在节点能力分布方面,节点能力符合幂律分布的网络可达到更好的查询效果.因为幂律拓扑网络中存在少量节点,它们即具有高节点度又存放较多的资源副本,高节点度意味着收到更多的查询请求,较多的资源副本则可带来更高的匹配率.

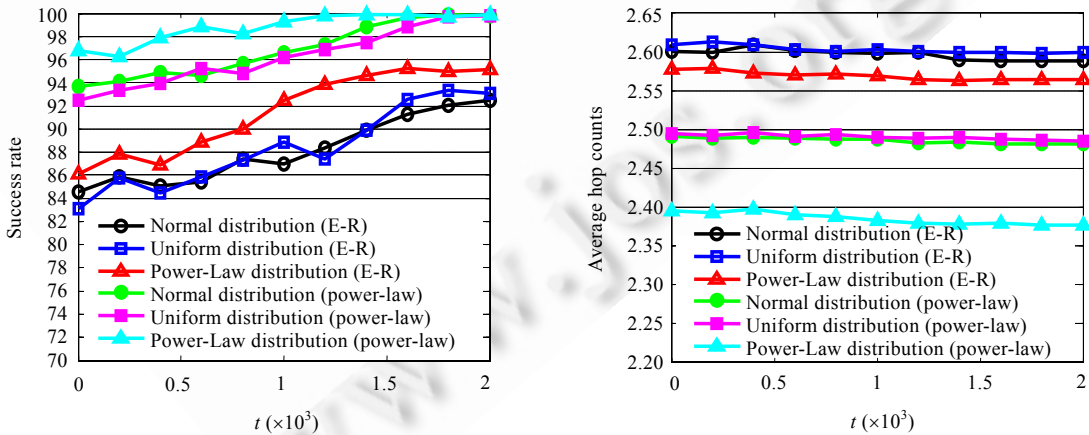


Fig.5 Performance changes accompanied by evolution under different node capacity distributions

图 5 不同节点能力分布下,进化过程中查询性能的变化

如果把节点度视为节点能力的另一方面,为了进一步分析节点能力的这两方面之间的关系对进化过程和查询性能的影响,我们将节点存放资源能力与节点度之间的关系分为正比例和反比例分别进行实验.正比例关系表示高能力节点与大度节点重合,这样的节点相当于网络中的超级节点在进化过程中会更多地被用作学习

对象,从而将资源副本特别是热点资源副本复制到其他节点;而反比例关系中不存在这样的节点,大度节点只存放少量资源副本,高节点度在进化过程中无法充分发挥作用,同样地,高能力节点由于节点度低也无法发挥重要作用.因此如图 6 所示,正比例关系可以使得进化过程更快稳定,查询跳数更小,证明超级节点的存在能够提高网络查询性能,两种比例关系最终可获得的查询成功率均接近 1.

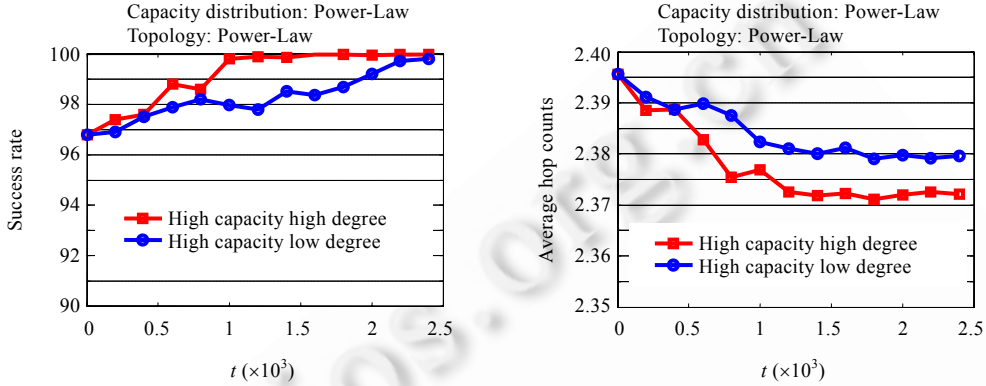


Fig.6 Impact of node capacity and node degree to search performance

图 6 节点能力与节点度对查询性能的影响

为验证模型在异构性扩展后的有效性,将扩展模型 EG 与其他 3 种配置策略(uniform, proportion and square-root)进行比较,节点能力服从幂律分布,结果如图 7 所示.当  $h$  较小时,EG 下的查询成功率优势更明显; $h=3$  时,幂律拓扑下所有配置策略的成功率都接近 1.因为随着  $h$  的增加,查询消息到达节点数  $D(h)$ 呈指数级增加,成功率也随之增大;当  $D(h)$ 足够大时,根据公式(4)资源配置策略差异对查询成功率的影响会被抵消.图中可见,扩展模型 EG 下的平均查询跳数仍然更接近 proportion 策略的最优值.

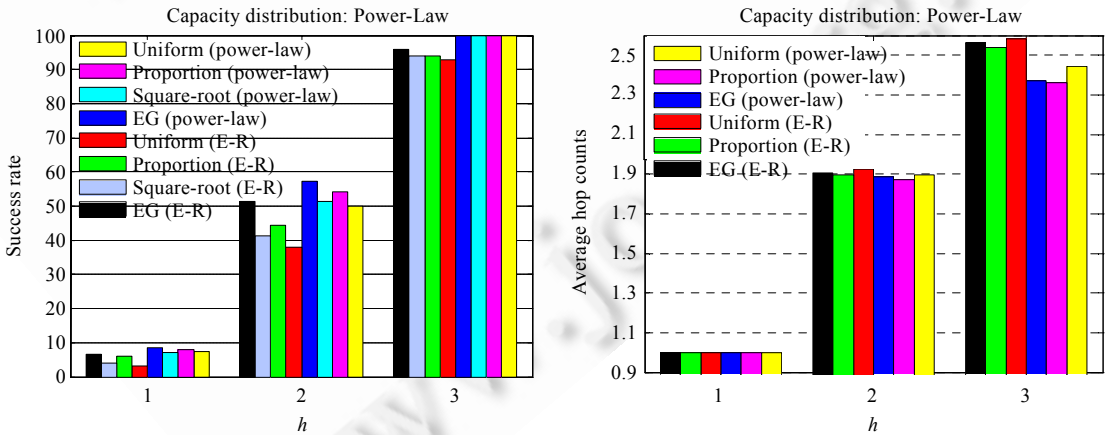


Fig.7 Performance comparison with other strategies under power-law node capacity distribution

图 7 幂律节点能力分布下,查询性能比较

### 5.4 动态性扩展模型

考虑 P2P 网络中节点的动态性,对配置模型进行动态性扩展并验证.网络拓扑生成为渐增方式,节点加入网络的过程用泊松过程  $Po(\theta)$ 描述,平均每个时刻有  $\theta=400$  个节点加入,每个加入网络的节点都被赋予一个生存周期和存放资源能力.生存周期服从帕累托分布  $Pa(\varphi, \phi)$ ,其中,  $\varphi=3, \phi=200$ .节点能力分布服从幂律分布,初始时,节点根据自身能力随机选择资源副本存放,资源类型总数为 5 000.初始阶段,网络节点规模迅速扩大,直到第 500

时隙开始减缓并逐渐趋向稳定;从该时隙起,执行资源配置过程.本文模型和采用宿主复制策略的正比例配置策略均按照 flooding 算法转发查询消息, $h=3$ .采用路径复制策略的平方根配置策略,按照 random walks 方式转发查询消息,查询到达节点数和 flooding 相同.与静态网络相比,在动态网络环境中,资源配置要达到稳定状态需要更长的时间.图 8 和图 9 表明,本文模型 EG 在配置过程中查询性能抖动更小,能够更快趋于稳定.这是因为节点在配置过程中不断收集更新局部信息,并且根据与查询性能相关的收益来选择资源副本存放,节点的收益与资源满足查询的增量成正比,对查询性能更加敏感;而宿主复制和路径复制策略在选择资源时带有一定的盲目性,容易因过度复制导致性能波动.

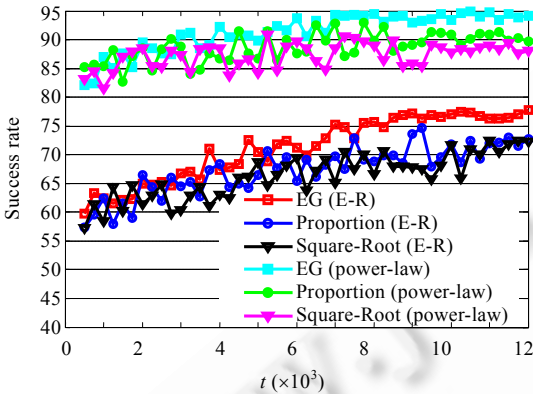


Fig.8 Success rate comparison with other strategies under node churn

图 8 节点动态变化下,成功率比较

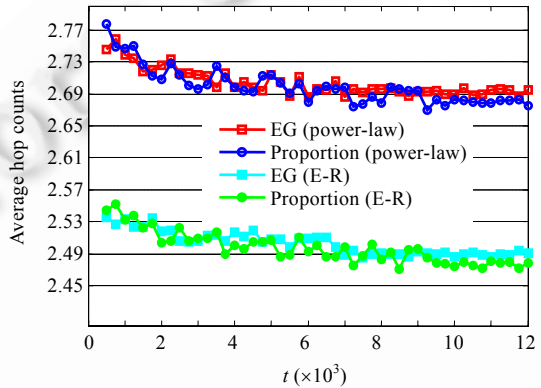


Fig.9 Average hop counts comparison with other strategies under node churn

图 9 节点动态变化下,平均跳数比较

### 5.5 副本冗余讨论

P2P 网络节点动态性会降低资源的可获得性,通常以资源副本的方式进行资源配置,提高数据可获得性和查询效率.资源配置会造成副本冗余,用冗余度表示,这里定义为资源副本的个数.本组实验考察在给定可获得性前提下,各配置策略的冗余度.文献[15]提出一种配置策略 Carbonite,通过目标可获得性计算冗余度,并根据节点动态性调整.本文从查询的角度用查询成功率重新度量资源可获得性  $Suc = 1 - \left(1 - \frac{D(h)}{n-1} p\right)^c$ ,其中  $p$  为节点在线概率  $P_{alive}$  的均值,得出相应冗余度  $c = \log(1 - Suc) / \log\left(1 - \frac{D(h)}{n-1} p\right)$ .

实验设置与上一组动态性扩展模型相同,两种拓扑结构下目标可获得性分别取 90%(power-law)和 70% (E-R).根据上式计算得冗余度为  $c=45$ ,节点加入网络时按照该冗余度为其随机分配资源副本.从 500 时隙开始执行资源配置,我们对本文进化策略 EG、Carbonite、正比例和平方根策略,图 10 给出了几种策略的冗余度随时间的变化情况.从图中可以看出,Carbonite 策略下平均每种类型资源拥有 125 个副本,极大地超过初始冗余度.这是因为 Carbonite 一旦探测到节点失效,就会通过动态增加额外资源副本方式来屏蔽失效,冗余度随着节点规模的扩大不断增长.另外,Carbonite 不区分资源访问流行度特征,所有类型资源副本均匀分布,对于低流行度资源存在大量冗余副本. EG、正比例和平方根策略在配置过程中主要调节副本在不同类型资源之间的分配,在动态网络环境中只会引入少量额外副本,稳定后的冗余度均不超过 60.图 10 表明,EG 能够以较低的冗余度达到目标可获得性.图 11 给出了平均查询跳数随时间变化的比较,相对图 9 中 EG 策略的查询跳数略有增加,但依然能以较低的冗余度接近正比例策略的最优值;而在 Carbonite 策略下热点资源的副本数不足,导致查询跳数偏高.因而,冗余度的增加并未带来查询性能的显著提升.

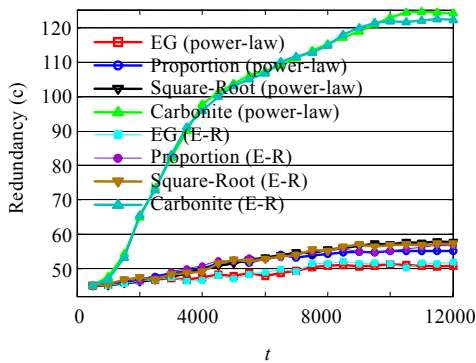


Fig.10 Redundancy trends comparison with other strategies over time

图 10 冗余度随时间变化趋势比较

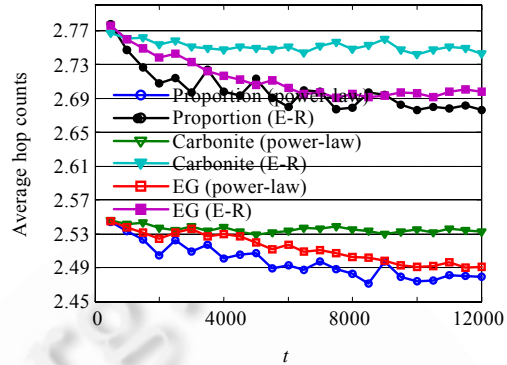


Fig.11 Average hop counts trends comparison with other strategies over time

图 11 平均查询跳数随时间变化趋势比较

## 6 结束语

本文研究 P2P 网络中资源配置对查询性能的影响,提出一种基于进化博弈的资源配置模型,将资源配置过程中节点对资源副本的选择行为以及对查询性能所产生的影响分别用节点策略和收益函数反映,从而把资源配置问题转化为一种进化博弈,能够更好地描述只掌握局部信息的有限理性节点在配置过程中的行为,分析系统可获得的查询性能,为资源配置提供更有效的方法.考虑 P2P 网络的特点,对模型进行异构性和动态性等方面扩展.仿真实验和分析进一步验证了模型的正确性和有效性.

## References:

- [1] Tewari S, Kleinrock L. Proportional replication in peer-to-peer networks. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. Barcelona: IEEE Press, 2006. 1-12. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.132]
- [2] Cohen E, Shenker S. Replication strategies in unstructured peer-to-peer networks. In: Proc. of the ACM SIGCOMM. Pittsburgh: AMC Press, 2002. 177-190. [doi: 10.1145/633025.633043]
- [3] Feng GF, Jiang YQ, Chen GH, Gu Q, Lu SL, Chen DX. Replication strategy in unstructured peer-to-peer systems. In: Proc. of the IEEE IPDPS. Long Beach: IEEE Press, 2007. 1-8. [doi: 10.1109/IPDPS.2007.370286]
- [4] Lü Q, Cao P, Cohen E, Li K, Shenker S. Search and replication in unstructured peer-to-peer networks. In: Proc. of the ACM ICS. New York: ACM Press, 2002. 84-95. [doi: 10.1145/514191.514206]
- [5] Chawathe Y, Ratnasamy S, Breslau L. Making gnutella-like P2P systems scalable. In: Proc. of the ACM SIGCOMM. Karlsruhe: ACM Press, 2003. 407-418. [doi: 10.1145/863955.864000]
- [6] Zheng J, Lu XC, Wang YJ, Yang K. Dynamic adaptive replica allocation in mobile ad hoc networks. Journal of China Institute of Communications, 2004,25(8):1-8 (in Chinese with English abstract).
- [7] Krishna PNP, Alessandra S, Zhao BY. Searching for rare objects using index replication. In: Proc. of the IEEE INFOCOM. Phoenix: IEEE Press, 2008. 1723-1731. [doi: 10.1109/INFOCOM.2008.234]
- [8] Thomas LV, Joel SB. Evolutionary Game Theory, Natural Selection, and Darwinian Dynamics. New York: Cambridge University Press, 2005. [doi: 10.1017/CBO9780511542633]
- [9] Newman MEJ, Strogatz SH, Watts DJ. Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications. Physical Review E, 2001,64(2):1-13. [doi: 10.1103/PhysRevE.64.026118]
- [10] Adamic LA, Huberman BA. Zipf's law and the Internet. Glottometrics, 2002,3:143-150.
- [11] Yao Z, Leonard D, Wang X, Loguinov D. Modeling heterogeneous user churn and local resilience of unstructured P2P networks. In: Proc. of the IEEE ICNP. Washington: IEEE Press, 2006. 32-41. [doi: 10.1109/ICNP.2006.320196]
- [12] Rytgaard M. Estimation in the Pareto distribution. ASTIN Bulletin, 1990,20(2):201-216. [doi: 10.2143/AST.20.2.2005443]



- [13] Alberto M, Anukool L, Ibrahim M, John B. BRITE: Universal topology generation from a user's perspective. Technical Report, BUCS-TR-2001-003, Boston University, 2001.
- [14] Newman MEJ. The structure and function of complex networks. SIAM Review, 2003,45(2):167-256. [doi: 10.1137/S003614450342480]
- [15] Chun BG, Dabek F, Haeberlen A, Sit E, Weatherspoon H, Kaashoek MF, Kubiawicz J, Morris R. Efficient replica maintenance for distributed storage systems. In: Proc. of the USENIX NSDI. San Jose: USENIX Association, 2006. 45-58.

#### 附中文参考文献:

- [6] 郑静,卢锡城,王意洁,杨侃.面向 MANET 环境的动态自适应副本放置算法研究.通信学报,2004,25(8):1-8.



周经亚(1983-),男,安徽合肥人,博士生,主要研究领域为 P2P 网络,网格与云计算.  
E-mail: jyz@seu.edu.cn



罗军舟(1960-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为下一代网络体系结构,协议工程,网络安全和管理,网格与云计算,无线局域网.  
E-mail: jl原因@seu.edu.cn



宋爱波(1970-),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为网格与云计算,海量数据处理, Petri 网理论与应用.  
E-mail: absong@seu.edu.cn