

## 复杂网络零模型的量化评估

李欢, 卢昱\*, 郭俊霞

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

(\* 通信作者电子邮箱 sisheng@126.com)

**摘要:**针对随机置乱算法生成复杂网络的零模型时,因不同阶次零模型成功置乱概率的差异导致难以准确判断零模型何时能够趋于稳定的问题,定义了“成功置乱次数”的概念,并提出使用“成功置乱次数”替代传统的“尝试置乱次数”进行算法设定。提出的成功置乱次数指标仅在随机选择的边满足相应阶次零模型的置乱条件从而被成功置乱后进行累加。各阶次零模型生成实验表明,使用该算法设定方式后各网络拓扑指标均能在较小的成功置乱次数范围内趋于稳定。进一步的量化分析表明,按阶次分别设定成功置乱次数为网络边数的2倍、1倍、1倍即可得到质量较好的0阶、1阶、2阶零模型。

**关键词:**复杂网络;零模型;随机置乱算法;成功置乱次数;稳定性

**中图分类号:** TP393.01 **文献标志码:** A

## Quantitative evaluation for null models of complex networks

LI Huan, LU Gang\*, GUO Junxia

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The null models of complex networks generated by random scrambling algorithm often can't tell when null models can be stable because of the difference of successful scrambling probabilities of different order null models. Focusing on the issue, the concept of “successful scrambling times” was defined and used to replace the usual “try scrambling times” to set the algorithm. The index of the proposed successful scrambling times could be added only when the randomly selected edges could meet the scrambling conditions of corresponding null models, and thus be successfully scrambled. The generation experiments of null models of every order show that every index can be stable in a small scale of successful scrambling times. Further quantitative analyses show that, according to the corresponding orders, 0-order, 1-order and 2-order null models with good quality can be got by setting successfully scrambling-times to be 2 times, 1 times and 1 times of actual networks' edge number respectively.

**Key words:** complex network; null model; random scrambling algorithm; successful scrambling times; stability

## 0 引言

在复杂网络的研究中,仅仅依赖现有网络特性的统计量如度分布、平均路径长度、聚类系数等往往不能准确地刻画原网络的实际特性<sup>[1]</sup>,因此,通常需要将与原网络具有相同规模和某些相同性质的随机化零模型作为参照,来判别某性质是否的确为这类实际网络的非平凡特性。可见,构建良好的零模型对于复杂网络的研究具有非常重要的意义。零模型的构造分为两种方法:网络建模方法以及随机置乱方法。网络建模方法是从无到有地生成需要的零模型,主要包括 ER 随机图<sup>[2]</sup>、配置模型<sup>[3]</sup>等;而随机置乱方法是以原网络为基础,断开其中满足条件的边并生成新的边,最终得到需要的零模型。两种方法都遵守一定的生成过程,网络建模过程通常有明显的停止标志,如配置模型是将所有节点的线头均连接完毕则停止;而随机置乱的过程并没有这类明显标志,研究人员通常称随机置乱“足够多次”,却未明确提及“足够多”的量化标准,现有的生成过程大多只是进行大概次数的置乱<sup>[4-6]</sup>,并没有一个深入的针对能够使得零模型趋于稳定的置乱次数的研究。

在生成零模型的置乱过程中,置乱次数过少可能导致零模型随机化不充分,进而影响零模型质量,而对于规模较庞大的网络而言,置乱次数过多又会在零模型特征已稳定后消耗大量的时间进行无意义的置乱。究竟要进行多少次的随机置乱才“足够好”、随机置乱的次数对网络拓扑性质以及进一步对零模型的使用的影响等问题,尚未有人作过量化的研究。文献[7]指出对一个 $L$ 条边的实际网络,需要置乱 $4L$ 次则零模型基本保持稳定,但文中仅是针对1阶零模型而言,对于其他阶次零模型则不适用,且并未对该结论进行相应的评估与证明。本文将针对基于随机置乱方法生成零模型需要的执行次数进行研究,考察不同阶次的零模型生成过程中网络特性变化情况,最终将约定一个置乱次数范围,供研究者在生成零模型的过程中进行参考。

## 1 随机置乱的零模型构建方法

根据随机置乱时约束条件的不同,零模型通常可分为以下不同的阶次的随机化网络<sup>[8-10]</sup>:

1) 0阶零模型:与原网络有相同节点数和边数,即相同的平均度 $\langle k \rangle$ 。

收稿日期:2015-01-06;修回日期:2015-03-20。 基金项目:北京高等学校青年英才计划项目(YETP0506)。

作者简介:李欢(1989-),女,河北张家口人,硕士研究生,主要研究方向:复杂网络、社会计算; 卢昱(1981-),男,吉林吉林人,讲师,博士,主要研究方向:复杂网络、社会计算; 郭俊霞(1980-),女,山西朔州人,讲师,博士,主要研究方向:网络信息定向抽取、网络用户行为分析。

2) 1阶零模型:与原网络有相同节点数和度分布  $\rho(k)$ 。

3) 2阶零模型:与原网络有相同节点数和联合度分布  $\rho(k, k')$ 。

此外,还可以根据实际需要定义更高阶的零模型<sup>[1]</sup>,随着阶次的增加,零模型将越来越接近于原网络。构造一个与原网络具有相同某些性质的随机网络模型,可以通过使连边的位置尽可能随机化的方式。记节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的连边为  $e_{i,j}$ , 则有以下随机置乱的 dK 算法<sup>[6,11-12]</sup>。图1展示了该算法的置乱过程:

1)  $d = 0$ , 即 0 阶零模型的随机置乱算法。每次随机选择原网络中的一条边  $e_{m,n}$ , 再随机选择两个节点  $p, q$ , 若这两个节点不相邻, 则删除  $e_{m,n}$ , 增加  $e_{p,q}$ 。

2)  $d = 1$ , 即 1 阶零模型随机置乱算法。每次随机选择原网络中的两条边, 记为  $e_{m,n}$  和  $e_{p,q}$ 。若  $v_m, v_n, v_p, v_q$  这4个节点之间仅存在这两条边, 则删除  $e_{m,n}$  和  $e_{p,q}$ , 并创建新边  $e_{m,q}$  和  $e_{p,n}$ 。

3)  $d = 2$ , 即 2 阶零模型的随机置乱算法。在 1 阶零模型的基础上要求节点  $v_n, v_q$  (或  $v_m, v_p$ ) 具有相同的度值。

上述算法也可以推广到有向网络, 如保持每个节点的入度和出度不变进行随机置乱而生成有向网络的 1 阶零模型。

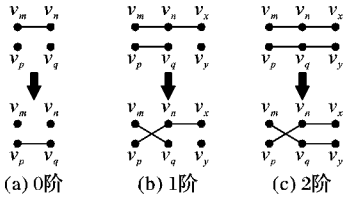


图1 0阶、1阶、2阶零模型的随机置乱算法

## 2 网络特性评估指标

在复杂网络的研究中,通常使用以下指标衡量某个网络的拓扑特性。

### 2.1 平均路径长度

一个网络中从节点  $i$  出发到节点  $j$  之间经过的最短距离  $d_{ij}$  定义为从  $i$  到  $j$  经过的所有可达路径中节点数和边数最少的路径中的边数。对于一个含  $N$  个节点的网络,每一对节点之间最短路径的平均值则称为该网络的平均路径长度 (Average path length)  $l$ , 计算方法为:

$$l = \frac{1}{N(N-1)/2} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (1)$$

其中  $N$  为网络节点个数。

### 2.2 同配系数

同配系数即 Pearson 相关系数: 衡量度值相近的节点之间互相连接的倾向性。度高的节点倾向于与度高的节点相互连接或度低的节点倾向于与度低的节点相互连接的现象称为同配, 度高的节点倾向于与度低的相互连接称为异配。同配系数定义为:

$$r = \frac{1}{\sigma_q^2} \sum_{j,k} jk(e_{jk} - q_j q_k) \quad (2)$$

其中:  $j$  和  $k$  分别表示随机选择的一条边对应的两个节点的度值,  $e_{jk} = P(j,k)$  表示  $j$  和  $k$  的联合概率,  $q_j = P_n(j)$  表示节点  $j$  的余度分布,  $\sigma_q^2$  表示余度分布  $q_k$  的方差。 $\sigma_q^2$  定义为:

$$\sigma_q^2 = \sum_k k^2 q_k^2 - \left[ \sum_k k q_k \right]^2 \quad (3)$$

若  $r > 0$  则为同配网络,  $r < 0$  为异配网络。对于有向网络

的同配性有如下4种度量  $r(\text{out}, \text{in})$ ,  $r(\text{in}, \text{out})$ ,  $r(\text{out}, \text{out})$ ,  $r(\text{in}, \text{in})$ 。

### 2.3 社团 $Q$ 值

社团  $Q$  特征值用于刻画网络中社团现象的明显程度, 计算公式如下:

$$Q = \sum_v (e_{vv} - a_v^2) \quad (4)$$

其中,  $e_{vv}$  表示在网络所有节点的连边中, 包含在社团  $v$  内各节点的连边占的比例;  $a_v$  表示一端与社团  $v$  内节点相连的边占的比例。通常, 在一定的社团划分算法的前提下,  $Q$  值的大小和网络中社团结构的明显程度成正比, 通常,  $Q \geq 0.3$  则表示网络具有明显的社团结构。

### 2.4 聚类系数

聚集系数是衡量一个网络中节点聚集程度的系数, 也即衡量一个节点的两个邻居节点相连的概率。网络中一个度值为  $k_i$  的节点  $i$  的聚集系数  $C_i$  定义为:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (5)$$

一个网络的聚类系数  $C$  则定义为网络中所有节点的聚类系数的平均值:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (6)$$

它的社会学定义为:

$$C = \frac{\text{网络中三角形的数目}}{\text{网络中连通三元组的数目} / 3} \quad (7)$$

## 3 成功置乱次数

在对零模型的研究中, 研究者们通常设定一个置乱次数, 对原网络进行该次数的置乱后生成相应阶次的零模型, 一个质量较好的零模型应当是随机化程度较高的, 因此, 应当保证进行足够多次的置乱, 使得零模型的各项网络指标不再随更多次的置乱而变化, 则此零模型是稳定的。通过对前人提供的置乱程序分析发现, 通常所谓的“置乱次数”只是“尝试置乱次数”, 即假如某一次置乱过程中并没有找到满足置乱条件的边而没有进行置乱, “置乱次数”仍然会累加1次。这样一来, 在 1 阶零模型生成过程中如果设定这样的置乱次数为  $4L$ , 可能能够保证零模型最后趋于稳定, 但是本文在 2 阶零模型生成过程中, 发现  $4L$  次远远不能使零模型趋于稳定, 也就是说这样的置乱次数远远不足以使零模型的质量满足需要。

基于传统的置乱次数设定方式的这一不足, 本文提出了“成功置乱次数”的概念。在第1章介绍的随机置乱的 dK 算法中, 每一阶的算法都有一定的置乱限制条件, 因此每一次尝试置乱都会进行相应的判断, 在满足特定阶次的置乱条件时, 才执行图1中所示的置乱过程, 只有当该过程执行完毕时, 才是真正意义上的成功置乱。而如果某次尝试由于条件不满足而结束这次尝试并更换节点进行下一次尝试时, 仅仅应当是前述的“尝试置乱次数”累加1。基于此, 本文将“成功置乱次数”定义为: 在置乱过程中, 只有找到满足置乱条件的边并进行了置乱操作后, 才表示“成功置乱”了一次, 并将成功置乱次数累加1。此外, 本文将成功置乱次数和尝试置乱次数的比值定义为“成功置乱概率”。

将本文提出的成功置乱次数应用至算法中, 以 1 阶随机置乱算法为例, 设计如下的伪代码。其中: 布尔型变量 `succ` 为成功置乱标记符号; `attempt_times` 为尝试置乱次数; `succ_times`

为成功置乱次数;  $\text{succ\_prob}$  为成功置乱概率。为节省时间, 对所有数据集仅计算 100 个成功概率值。

#### 1 阶随机置乱算法

输入 原始图  $G$ , 置乱次数  $N$ ;

输出 1 阶随机置乱后的随机图。

方法:

$\text{succ} = \text{false};$

for ( $\text{succ\_times} = 0, \text{attempt\_times} = 0; \text{succ\_times} < N;$ )

{

从  $G$  中随机选择两条边  $e_{m,n}, e_{p,q}$ ;

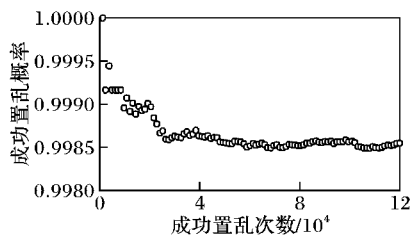
if ( $v_m \neq v_n \neq v_p \neq v_q$  && ( $e_{m,q}, e_{p,n}$  不存在)) then

从  $G$  中删除  $e_{m,n}, e_{p,q}$ ;

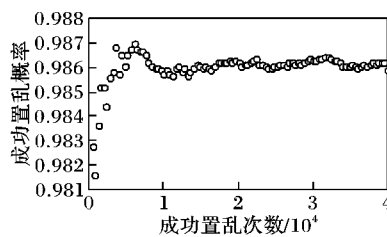
创建  $e_{m,q}, e_{p,n}$ ;

$\text{succ} = \text{true};$

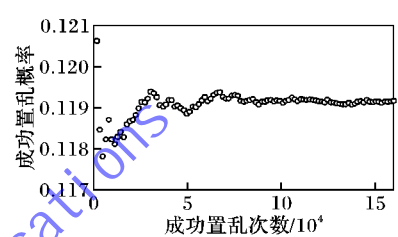
}



(a) 0阶



(b) 1阶



(c) 2阶

图2 p2p-Gnutella08 网络各阶成功置乱概率变化情况

从图2中可以看出,当成功置乱概率最终趋于稳定后,阶次的不同将带来成功置乱概率非常大的差异,0阶成功置乱概率接近1,而1阶情况下成功置乱概率略低于0阶,到2阶时成功置乱概率降到非常低的水平。对于 p2p-Gnutella08 这个数据集,要进行大约 8 次尝试才能成功置乱一次,可见,成功置乱概率是随着零模型阶次的升高而下降的。根据零模型的定义及其生成算法,这种现象可以解释为:随着阶次的增长,其生成过程对于选边的约束条件越来越强,意味着阶次越高,满足置乱条件的边将越来越少,这必然导致在2阶的置乱过程中,需要进行更多次的尝试才能成功找到一对满足条件的边,这同样也是随着阶次的升高,置乱产生的零模型最终将收敛于原网络的原因。因此,设置置乱次数为尝试置乱次数会因为阶次的变化而变得非常难以确定,其值从  $4L$  到上百倍  $L$  次都有可能,若照搬前人,设定对原网络也置乱  $4L$  次生成2阶零模型必然无法使其达到稳定。

## 4 稳定次数的确定

从第3章中可以看到在应用零模型时应采用成功置乱次数。为了进一步验证设定其作为置乱次数能够在不同阶次、数据集的情况下仍旧保证在一定的次数内使零模型趋于稳定,并最终得出不同阶次稳定次数的可设定范围,本文针对不同规模数据集做了如下的实验。

选用4个不同规模的公共数据集 football、petster-familylinks-hamster、p2p-Gnutella08、Wikipedia vote network 进行零模型质量的研究,其中 football 为无向网络,其余数据集为有向网络,数据规模见表1。本文选用第2章中各网络拓扑指标对以上各网络的0阶到2阶零模型质量进行评估,因篇幅限制,此处仅给出 petster-familylinks-hamster 网络2阶随机置乱各网络拓扑指标的变化图,其中计算  $Q$  值时采用经典的基于贪婪算法思想的社团结构检测算法——CNM (Clauset, Newman, Moore) 算法,算法采用堆数据结构计算和更新模块度。实验结

```

succ_times ++;
end if
attempt_times ++;
if (succ_times % (N/100) == 0 && succ)
    succ_prob = succ_times / (attempt_times * 1.0);
    succ = false;
end if
}
return G;

```

为了验证使用成功置乱次数的必要性,本文针对规模适中的网络数据集 p2p-Gnutella08 (6301 个节点,20777 条边) 进行了包括0阶、1阶、2阶的置乱实验,记录了不同阶次零模型成功置乱概率的变化情况,如图2(本文所有实验均是进行10次求平均值)。

果如图3所示。

从图3中可以看到,在经过若干次的成功置乱后,零模型的各项指标均能维持在一个稳定的数值。其中,因2阶零模型本身置乱条件的限制,4种同配系数均维持恒定值不变。由于前文已经提到,生成零模型的质量取决于此零模型的随机化程度,随机化程度越高,零模型的质量越好。而充分随机化的直接体现就是零模型各项指标趋于稳定。因此,该结果表明,对于不同规模的数据集、不同阶次的置乱,设定成功置乱次数作为置乱次数上限,均能在较小的、可预测的范围内使得零模型趋于稳定。为了得到各指标的量化结果,本文将成功随机置乱次数均分为10个区间,求取每个区间内指标的标准差,判断各区间的波动情况。当指标不再波动时可判定零模型质量达到稳定。图4显示了对于 petster-familylinks-hamster 数据集进行不同阶次置乱其中2阶聚类系数稳定性变化的实验,图4(a)为聚类系数变化曲线,图4(b)为各区间标准差。

表1 数据集及规模

数据集	节点数	边数
football	115	613
petster-familylinks-hamster	1944	4095
p2p-Gnutella08	6301	20777
Wikipedia vote network	8298	103689

使用该方法,本文将得到的各个数据集不同阶次置乱过程的稳定次数的量化结果汇集到表2。

表2 各数据集达到稳定的成功置乱次数

数据集	0阶	1阶	2阶
football	1.6L/4L	0.67L/2L	0.67L/2L
petster-familylinks-hamster	1.8L/4L	1L/2L	1L/2L
p2p-Gnutella08	2L/4L	1L/2L	1L/2L
Wikipedia vote network	1L/4L	0.5L/2L	0.5L/2L

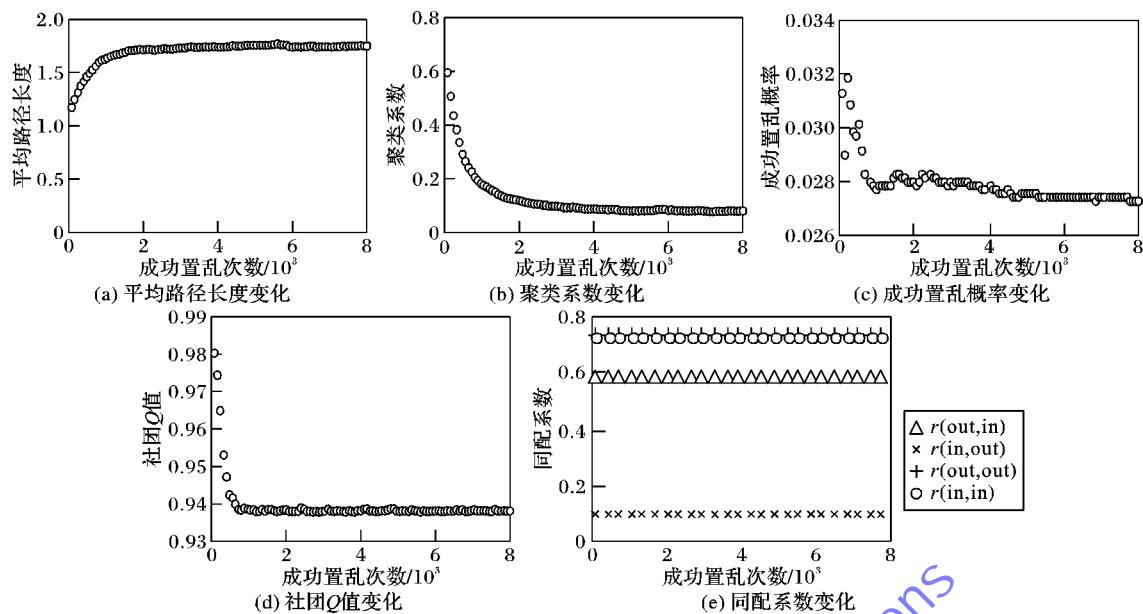


图3 petster-familylinks-hamster 网络2阶置乱过程各项指标变化情况

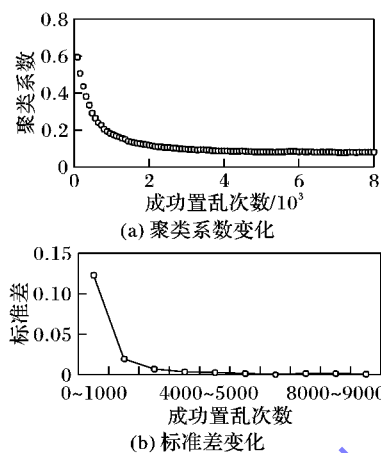


图4 petster-familylinks-hamster 网络聚类系数及标准差变化情况

表2中数据分为前后两项:前一项表示各拓扑指标开始稳定的成功置乱次数;后一项表示实验中设定的总共的成功置乱次数。因此后一项对于不同阶次、数据集的差异对本文所要研究的结论并无影响。表2中生成1阶、2阶零模型时达到稳定的次数反而比0阶少,这是因为随着阶次的增加,满足置乱条件的边将越来越少,对更少的边进行反复的置乱操作,必将导致零模型更快地趋于稳定。

为方便以后学者们对于零模型的应用,避免无规则地人为设定置乱次数,有必要确定一个明确的置乱次数。通过对表2的总结,将不同阶次置乱次数规定如表3,当对实际网络成功置乱表中相应次数时(可在第3章的伪代码中将 $N$ 设为表中的值),得到的零模型便是稳定的。

表3 规定成功置乱次数

阶次	置乱次数
0	$\geq 2L$
1	$\geq 1L$
2	$\geq 1L$

## 5 结语

本文通过对不同阶次零模型生成过程中尝试置乱次数和

成功置乱次数进行研究比较,提出了成功置乱次数及成功置乱概率的概念,实验发现,不同阶次零模型的成功置乱概率有着非常大的差异。基于这一事实,本文将通常零模型生成过程中的尝试置乱次数改为成功置乱次数并应用到0阶、1阶、2阶零模型生成过程,实验表明,这一改变明确了使零模型趋于稳定的置乱次数。不仅便于研究者在生成零模型的过程中设定置乱次数,并且在应用零模型来判断网络拓扑特征时能够得到更准确的结论。

本文仅针对0到2阶零模型置乱次数作了研究,对于更高阶次零模型的特征分析与质量评估以及网络内部结构和置乱次数之间的关系是下一步研究的方向。

### 参考文献:

- [1] SHANG K, XU X. Construction and application for null models of complex networks based on randomized algorithms [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(1): 7-20. (尚可, 许可. 基于置乱算法的复杂网络零模型构造及其应用[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(1): 7-20.)
- [2] FANG J. Some progress in theory model and its application research of network science [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2009, 5(1): 1-20. (方锦清. 网络科学的理论模型及其应用课题研究的若干进展[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 5(1): 1-20.)
- [3] MEI S. Modeling and simulation of virus propagation based on complex Agent network [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (梅珊. 基于复杂Agent网络的病毒传播建模和仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.)
- [4] WANG X, HOU Y, LIANG C, et al. Analysis of point pattern based on different null models [J]. Biodiversity Science, 2012, 20(2): 151-158. (王鑫, 侯亚丽, 梁存柱, 等. 基于不同零模型的点格局分析[J]. 生物多样性, 2012, 20(2): 151-158.)
- [5] ZENG J, YANG J, CHEN Q, et al. Research on the open source community mass production cooperation network structure based on null model [J]. Journal of South China University of Technology: Social Science, 2013, 15(2): 29-34. (曾进群, 杨建梅, 陈泉, 等. 基于零模型的开源社区大众生产合作网络结构研究[J]. 华南理工大学学报: 社会科学版, 2013, 15(2): 29-34.)

(下转第1572页)

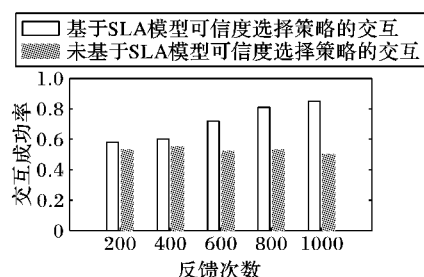


图5 服务主体交互成功率比较

#### 4 结语

本文针对用户对云服务提供商缺乏信任的问题,提出了一种基于SLA的信任模型,引入了系统信任的概念,只有系统信任值大于一定的阈值的云服务提供商才能进入信任实体集合,在云目录上发布服务,和用户进行交互。通过该模型,把实力较差或是信誉值较低的云服务提供商排除在可信实体集合之外,用户能选择较为可信的云服务提供商进行交互,有效地防止了云服务提供商的不诚信行为,提高了交互的成功率。实验结果表明,该模型具有更好的客观性、准确性和可信性。但本文的重点是为了防止云服务提供商提供不可信服务,并没有考虑到用户的欺骗行为,如何完善该模型,保证用户和服务提供商双方均作出诚实交互,将是以后的工作。

#### 参考文献:

- [1] MA J. Research on network security threat situation assessment and analysis [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (马杰. 网络安全威胁态势评估与分析方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.)
- [2] WANG Y, VASSILEVA J. Trust and reputation model in peer-to-peer networks [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Peer-to-Peer Computing. Piscataway: IEEE, 2003: 150-157.
- [3] TANG W, HU J, CHEN Z. Research on a fuzzy logic-based subjective trust management model [J]. Journal of Computer Research and Development, 2005, 42(10): 1654-1659. (唐文, 胡建斌, 陈钟. 基于模糊逻辑的主观信任管理模型研究[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(10): 1654-1659.)
- [4] LIU Y. The research of dynamic trust evaluation in mobile Ad Hoc networks [D]. Hefei: Anhui University, 2012. (刘亚峰. 移动 Ad Hoc 网下的动态信任评估研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2012.)
- [5] ZHANG Y. Research of trust relationship in multi-domain access control [D]. Wuhan: South-Central University for Nationalities, 2010. (张昀. 多域访问控制中的信任关系研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2010.)
- [6] DELLAROCAS C. Immunizing online reputation reporting systems against unfair ratings and discriminatory behavior [C]// Proceedings of the 2nd ACM Conference on Electronic Commerce. New York: ACM, 2000: 150-157.
- [7] ZHOU Q, YU J. Defense system model based on trust for cloud computing [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(6): 1531-1535. (周茜, 于炯. 云计算下基于信任的防御系统模型[J]. 计算机应用, 2011, 31(6): 1531-1535.)
- [8] HWANG K, KULKARENI S, HU Y. Cloud security with virtualized defense and reputation-based trust management [C]// DASC09: Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing. Piscataway: IEEE, 2009: 717-722.
- [9] ALHAMAD M, DILLON T, CHANG E. Conceptual SLA framework for cloud computing [C]// Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies. Piscataway: IEEE, 2010: 606-610.
- [10] ALHAMAD M, DILLON T, CHANG E. SLA-based trust model for cloud computing [C]// Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Network-Based Information Systems. Piscataway: IEEE, 2010: 321-324.
- [11] GAO Y, SHEN B, KONG H. Trust model for cloud computing based on SLA and user ratings [J]. Computer Engineering, 2012, 38(7): 28-30. (高云璐, 沈备军, 孔华峰. 基于SLA与用户评估的云计算信任模型[J]. 计算机工程, 2012, 38(7): 28-30.)
- [12] ZHAO P. Research on trust evaluation for service in cloud computing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (赵娉婷. 云计算环境下服务信任度评估技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.)
- [13] WANG M C, WU X, ZHANG W, et al. A conceptual platform of SLA in cloud computing [C]// Proceedings of the 2011 9th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing. Piscataway: IEEE, 2011: 1131-1135.
- [14] HUBERMAN B A, WU F. The dynamics of reputations [J/OL]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2004 (4). [2014-12-02]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.20.3728&rep=rep1&type=pdf>.
- [15] LIANG C, JIANG G, LU W. Research on evaluation of SaaS service quality based on SLA [J]. Computer Engineering, 2013, 39(10): 31-36. (梁昌勇, 江贵红, 陆文星. 基于SLA的SaaS服务质量评价研究[J]. 计算机工程, 2013, 39(10): 31-36.)
- [6] LIU Y, WANG X. Analysis of community structure in complex networks based on random rewiring [J]. Microcomputer Applications, 2010, 26(11): 29-32. (刘亚冰, 汪小帆. 基于随机重连的复杂网络社团结构特性分析[J]. 微型电脑应用, 2010, 26(11): 29-32.)
- [7] CHEN Q, YANG J, ZENG J. Null model and its application in the research of complex networks [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2013, 10(1): 8-17. (陈泉, 杨建梅, 曾进群. 零模型及其在复杂网络研究中的应用[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2013, 10(1): 8-17.)
- [8] GOTELLI N J, WERNER U. Statistical challenges in null model analysis [J]. Oikos, 2012, 121(2): 171-180.
- [9] MAHADEVAN P, HUBBLE C, KRIOUKOV D, et al. Orbis: rescaling degree correlations to generate annotated Internet topologies [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(4): 325-336.
- [10] WANG X, LI X, CHEN G. Introduction to complex networks models, structures and dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 217-218. (汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络引论——模型、结构与动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 217-218.)
- [11] MAHADEVAN P, KRIOUKOV D, FALL K, et al. Systematic topology analysis and generation using degree correlations [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(4): 135-146.
- [12] YANG G, DOU Q, DOU W. dK series analysis on annotated AS topology graph [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(9): 1633-1642. (杨国强, 窦强, 窦文华. AS关系标注的因特网拓扑图的dK序列分析技术[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(9): 1633-1642.)

(上接第1563页)