

# 基于引力约束的复杂网络拥塞问题研究\*

刘刚<sup>†</sup> 李永树

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 610031)

(2011年9月5日收到; 2011年9月27日收到修改稿)

如何在保证网络传输效率的同时提高网络的吞吐量是目前研究的主要问题. 通过研究节点对数据包传递过程的引力作用, 提出了一种具有引力约束的路由算法. 为检验算法的有效性, 通过引入一个状态参数  $H$ , 利用由稳态到拥塞状态的指标流量相变值来度量网络的吞吐量, 同时利用数据包的最大传输时间 ( $T_{\max}$ ) 与平均传输时间 ( $T_{\text{avg}}$ ) 来分析网络的传输效率. 针对算法在不同引力约束条件下的路由情况进行了仿真. 仿真结果表明, 若数据传递过程只考虑路径长度最短, 则会导致网络吞吐量较低且流量分布极不均匀; 若只顾及等待时间最短, 会导致传输路径过度迂回且大部分节点都会陷入拥塞状态; 同时考虑路径长度和等待时间的引力作用并选取适当引力的节点进行传递, 可以显著提高网络吞吐量并缓解网络的拥塞程度.

**关键词:** 复杂网络, 引力, 吞吐量, 拥塞

**PACS:** 89.75.Hc, 89.20.Hh

## 1 引言

近年来, 复杂网络的研究逐渐受到普遍关注, 已广泛应用于计算机、控制、物理、生物、交通等领域<sup>[1-6]</sup>, 研究热点主要集中在网络的拓扑结构与动力学过程, 其中动力学过程的研究主要涉及网络博弈<sup>[7-11]</sup>、相继故障<sup>[12-14]</sup>、病毒与灾害传播<sup>[15-17]</sup>、网络同步<sup>[18-20]</sup>等问题. 人们希望通过研究网络的拓扑结构及动力学过程为解决相关难题提供决策方案. 拥塞现象是许多真实网络如交通网络、通讯网络等常见的一种具有动态特性的复杂现象, 已经吸引了大量的学者对此进行深入研究. 随着网络上交通流量的日益增长, 如何在有限资源的条件下缓解网络拥塞, 提高网络吞吐量并保证信息的高效传输已成为越来越紧迫的问题.

拥塞表现为网络上的交通流的相变, 即由自由流状态变为拥塞状态<sup>[21]</sup>. 目前, 解决拥塞问题的主要方法是通过设计相应的路由算法降低数据包的传输延时并尽可能地提高网络的吞吐量, 从而提高网络整体的数据传输效率. 路由算法大致可分为全局型、局部型和混合型三类. 全局型路由算

法需要获取整个网络的拓扑信息, 以源节点到目标节点的传输代价最小进行路由选择<sup>[22]</sup>, 如传统的最短路由算法、有效路由算法<sup>[23]</sup>等. 局部路由算法则只需考虑局部信息(如局部流量大小、邻居节点的度), 可通过局部代价最小进行传输或以一定的概率将数据包发送给某个邻居节点, 如随机行走<sup>[24,25]</sup>、邻居负载路由算法<sup>[26]</sup>等. 混合路由算法则需同时考虑节点之间的最短路径长度、邻居节点的度或缓存队列等诸多因素<sup>[27]</sup>, 通常也是以代价最小或以一定的概率将数据包发送给某个邻居节点, 如随机路由算法<sup>[28]</sup>、感知流量路由算法<sup>[29]</sup>等.

从数据包的传递过程可以看出, 节点作为数据包的载体直接影响其传输的动态机制, 该机制可以表现为节点对数据包的引力作用, 且这种引力源于在确定路由算法下节点之间的相互作用强度. 在最短路由算法中, 度较大的节点对数据包的传递具有很强的吸引力, 导致大量的数据包停留在节点的缓存队列中, 从而引发交通拥塞. 如果能有效地控制节点对数据包的引力作用, 预测某些路径的拥塞程度而不只是考虑邻居节点的拥塞, 使数据包能及

\* 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20100184110019)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: liuganggis@sina.com

时、有效地避开拥塞程度相对较大的路径将会在一定程度上提高网络的传输效率. 出于这种考虑, 本文提出一种具有引力约束的复杂网络路由算法.

本文第 2 节给出网络流模型, 并提出引力约束路由算法; 第 3 节以 Barabási-Albert(BA) 网络模型为例分别探讨在不同的引力取值和不同的节点传输能力 (等于常数和等于度两种情况) 下网络流量的动态特性; 最后, 讨论节点的引力作用与网络的吞吐量及传输效率之间的关系以及进一步的研究工作.

## 2 网络流模型及其路由算法

### 2.1 网络流模型

对于给定的复杂网络, 假设网络上所有节点都具有路由、收包、发包的功能, 且初始状态网络负载为 0, 之后每一时间步产生  $R$  个数据包并随机地选择源节点和目标节点, 产生的数据包自动添加到源节点的队列尾部; 每个节点的传输能力为  $c_i$ , 即在单位时间步内每个节点最多只能发送  $c_i$  个数据包; 此外, 每个节点的缓存队列长度无限, 且采用先进先出方式. 在数据包的传输过程中, 每个节点总是将数据包发送给某个邻居节点, 若该节点为数据包的目标节点, 则删除该数据包; 否则, 按照给定的路由策略进入该节点的缓存队列.

### 2.2 引力约束路由算法

在最短路由策略下, 数据包总是沿着离目标节点最近的路径进行传递, 只要源节点与目标节点确定, 则传输路径已确定. 该路由策略不考虑网络的流量分布和拥塞状态, 且拥堵易从度较大的节点开始, 然后逐步蔓延至其他节点. 一旦某个节点发生拥堵就很难恢复自由流状态, 且该处的拥塞程度将随着时间不断恶化. 最短路由算法旨在实现路径的距离或权重最小, 而不顾及数据包在该路径上的传输时间, 导致网络的吞吐量很小. 由此, 我们可以得出一个高效的路由算法, 需主要考虑如下两个方面: 1) 数据包的传输时间尽量短; 2) 网络的吞吐量尽量大. 在最短路由算法中, 节点介数分布的极度不均匀是造成网络吞吐量较低的重要原因, 对于规模为 1000 的 BA 网络, 最大介数可能达到数万甚至数十万, 而最小介数可能小于 100. 其实, 我们可以将介数看成是节点对数据包的一种引力作用, 即介数

越大, 引力就越大. 一般情况下, 度较大的节点对数据包的传递具有更大的引力, 导致大量的数据包汇聚于此进而引发网络拥塞. 如果能有效地控制这类节点的引力作用, 或许会在一定程度上提高网络的吞吐量并改善拥塞情况.

为此, 本文提出一种引力约束路由算法, 通过约束节点对数据包传递的引力作用以达到分流的效果. 假设数据包传输的源节点  $s$ , 目标节点  $t$ , 待发送数据包所在节点  $v$  (初始时刻即为  $s$ ), 其邻居节点集为  $N_v$ , 邻居节点  $i(i \in N_v)$  到目标节点  $t$  的最短路径所经过的节点集为  $N_{it}$ , 则对于邻居节点  $i(i \in N_v)$  可以建立如下引力约束模型:

$$\Gamma_{iu} = \frac{1}{d_{it}^\gamma} \left( \frac{q_i}{c_i} \right)^\alpha \left( \frac{q_u}{c_u} \right)^\alpha, \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \frac{q_u}{c_u} = \max_{j \in N_{it}} \left\{ \frac{q_j}{c_j} \right\}, \quad (2)$$

(1) 式中,  $\Gamma_{iu}$  是邻居节点  $i$  到目标节点  $t$  的最短路径对数据包传递的引力;  $d_{it}$  是节点  $i$  到目标节点  $t$  的最短路径长度;  $q_i$  是节点  $i$  当前所存储的数据包的个数,  $c_i$  是节点  $i$  单位时间内所能处理的数据包的最大个数;  $q_i/c_i$  可以看作数据包将要在节点  $i$  的等待时间;  $u$  是节点  $i$  到目标节点  $t$  的最短路径所经过的节点之一, 并通过 (2) 式确定节点  $u$ ;  $q_u$  是节点  $u$  当前所存储的数据包的个数,  $c_u$  是节点  $u$  单位时间内所能处理的数据包的最大个数;  $q_u/c_u$  可以看作数据包将要在节点  $u$  的等待时间;  $\alpha$  和  $\gamma$  是两个可以调节的参数 ( $\alpha \geq 0, \gamma \geq 0$ ), 分别用于调节数据传输对等待时间和对路径长度的依赖程度. (2) 式中,  $q_j, c_j$  分别表示节点集  $N_{it}$  中任意节点  $j$  当前所存储的数据包的个数和单位时间内所能处理的数据包的最大个数. 由 (2) 式可知,  $u$  是节点  $i$  到目标节点  $t$  的最短路径上等待时间最长的节点, 故可认为  $u$  是该路径上最拥堵的节点. 若在该最短路径上存在多个等待时间最长且相等的节点, 则随机地选择其中一个节点.

在引力约束模型中, 邻居节点  $i$  是数据包传递的下一个路由节点, 直接影响之后的传输过程, 节点  $u$  是  $i$  到  $t$  的最短路径上最拥堵的节点, 很大程度上反映了路径的拥塞情况及选择该路径将要付出的代价. 所以, 这两个节点可以认为是节点  $i$  到目标节点  $t$  的最短路径上非常关键、代表性较强的两个节点, 可以用二者的拥塞程度刻画整个路径的交通流状况, 并以  $(q_i/c_i)^\alpha (q_u/c_u)^\alpha$  进行度量. 为便于阐述模型思想, 我们把数据传输对等待时间的依

赖称作时间引力, 而把对路径长度的依赖称作空间引力. 由此, 引力约束模型即表达了时间引力和空间引力对数据包传递的共同作用. 通过改变  $\alpha$  和  $\gamma$  值可以调节数据包的传输对时间引力和空间引力的依赖程度. 由该引力约束模型可知: 若取  $\alpha = 0$  且以引力  $\Gamma_{iu}$  最大的邻居节点为下一个路由节点, 算法即为最短路由算法, 这种模式下空间引力占绝对优势 (即以路径长度最短为路由选择标准); 若取  $\gamma = 0$  且以引力  $\Gamma_{iu}$  最小的邻居节点为下一个路由节点, 等价于选择等待时间最短的路径, 这种模型下时间引力占绝对优势; 当  $\alpha > 0, \gamma > 0$  时, 即同时考虑了空间引力和时间引力对数据包传递的影响, 并可以通过改变  $\alpha$  和  $\gamma$  的值调整空间引力和时间引力的影响大小.

针对空间引力绝对占优方式 ( $\alpha = 0$ ), 选择  $\Gamma_{iu}$  最大的节点作为下一个路由节点, 若存在多个该引力的节点, 则随机选择一个, 并重复该过程; 针对时间引力绝对占优方式 ( $\gamma = 0$ ), 选择  $\Gamma_{iu}$  最小的节点作为下一个路由节点, 若存在多个该引力的节点, 则随机选择一个, 并重复该过程; 针对空间引力与时间引力共同作用方式 ( $\alpha > 0, \gamma > 0$ ), 在得到节点  $v$  的所有邻居节点的  $\Gamma_{iu}$  之后, 选取适当引力的节点作为下一个路由节点, 如果具有该引力的节点有多个, 则随机选取其中一个节点. 之后每一步都需要动态计算  $\Gamma_{iu}$  的值, 并重复该过程. 我们预测: 1) 对于时间引力绝对占优方式, 会在一定程度上减轻度较大节点的拥塞程度但可能造成网络上大部分节点均陷入拥塞状态; 2) 对于空间引力和时间引力共同作用方式 ( $\alpha > 0, \gamma > 0$ ), 当选取  $\Gamma_{iu}$  最大的节点时, 路由效果将与最短路由算法相当; 当选取  $\Gamma_{iu}$  最小的节点时, 数据包传递过程会产生大量的迂回路径, 导致网络吞吐量比较低; 当选取中间某个适当引力的节点时, 将会较大地提高网络的传输能力并改善网络的拥塞情况.

### 3 仿真结果及分析

为检验本文方法的有效性, 我们选择 BA 网络模型 [30], 节点数  $N = 1000$ , 且  $m_0 = m = 5$ . 在仿真中, 每次实现都运行 11000 步, 此时可认为网络上的数据流量基本处于稳态, 并根据最后 1000 步的平均值确定网络吞吐量  $R_c$ , 并针对  $\Gamma_{iu}$  在不同取值策略下的网络吞吐量进行对比实验. 网络吞吐量为网络流状态发生突变时对应的负载量  $R$ , 本文引

入状态参数  $H$  来刻画这种状态 [31]:

$$H(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{R} \frac{Q(t)}{t}, \quad (3)$$

其中  $Q(t)$  是  $t$  时刻网络中总的数据包个数. 当  $R < R_c$  时,  $H(R) = 0$ , 网络处于自由流状态; 当  $R > R_c$  时,  $H(R) > 0$  且突然变大, 网络开始出现拥塞. 因此, 通常用  $R_c$  来衡量网络的吞吐量. 此外, 网络上数据包的最大传输时间  $\langle T_{\max} \rangle$  与平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  也是衡量网络传输效率的重要指标 [28,32], 本文将对这些指标进行统计分析. 为不失一般性, 我们主要针对节点传输能力相同 ( $c = 1$ ) 的情况分析不同引力取值对网络传输效率的影响; 然后, 再探讨节点传输能力等于度 ( $c = k$ ) 时网络流的动态特性.

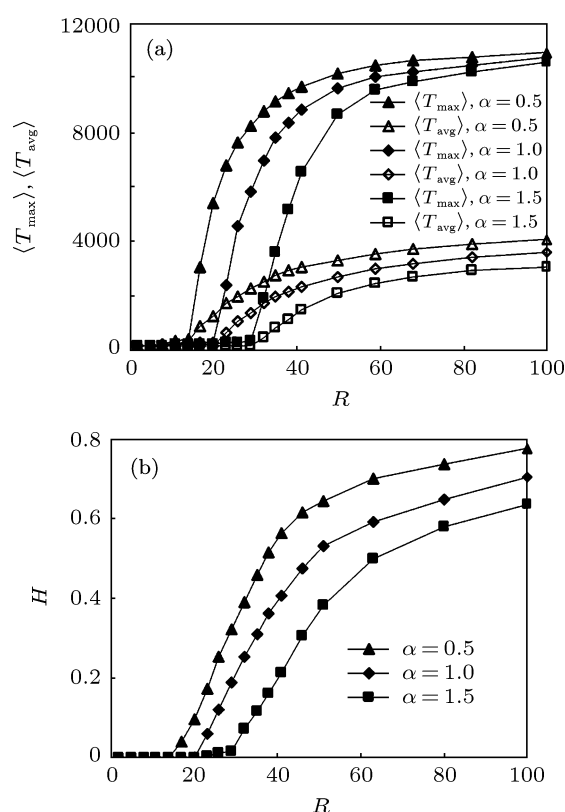


图 1 时间引力绝对占优方式下的仿真结果  $N = 1000$ ,  $m_0 = m = 5, c = 1$ ; (a) 数据包的最大传输时间  $\langle T_{\max} \rangle$ , 平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  与  $R$  的关系; (b) 状态参数  $H$  与  $R$  的关系

#### 3.1 时间引力或空间引力绝对占优方式

图 1 表示在时间引力绝对占优方式下的仿真结果, 其中给出了  $\alpha = 0.5, 1, 1.5$  时状态参数  $H$ , 数据包的最大传输时间  $\langle T_{\max} \rangle$  与平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  随负载量  $R$  的变化情况. 由仿真结果可以看出, 当  $R < R_c$  时,  $H$  值接近于 0, 最大传

输时间  $\langle T_{\max} \rangle$  与平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  也较稳定; 当  $R > R_c$  时,  $H$ ,  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  与  $\langle T_{\max} \rangle$  均迅速增大. 同时可以看出相变值  $R_c$  随  $\alpha$  的增大而增大. 图 2 为空间引力绝对占优方式下 (等价于最短路由算法) 得到的仿真结果. 结果显示,  $\langle T_{\max} \rangle$ ,  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  及  $H$  的值均在  $R = 10$  时发生相变, 由此可知网络的吞吐量  $R_c = 10$ . 从网络传输能力的角度可以看出, 时间引力绝对占优方式下网络吞吐量略大于空间引力绝对占优方式. 根据引力约束模型可知, 当时间引力绝对占优时, 数据包在传递过程中能及时地避开拥塞较严重的节点, 从而减轻了最短路由算法中程度较大、易拥塞节点的拥塞程度, 但同时由于每一步都会选择等待时间最短的路径, 缺乏用路径长度对数据包的传递方向进行控制和引导, 造成传输路径过度迂回而需花费较长时间才能到达目标节点; 在时间引力绝对占优策略下, 随着  $\alpha$  值的增大, 增强了节点  $i$  和  $u$  之间时间引力的相互作用强度, 尤其是使得节点  $u$  的时间引力得以放大, 从而增强对  $u$  的约束作用, 使得更多的数据包能及时地避开节点  $u$ , 在一定程度上进一步提高了网络的吞吐量.

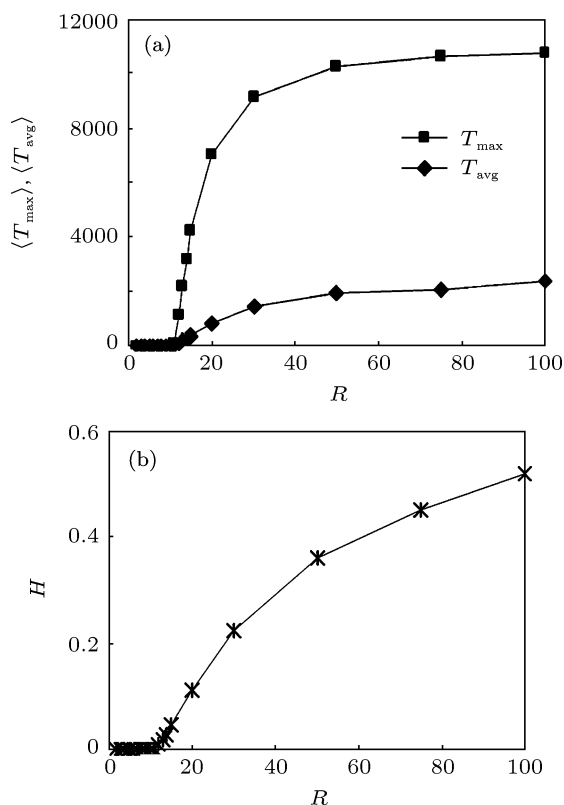


图 2 空间引力绝对占优方式下 (等价于最短路由算法) 的仿真结果  $N = 1000$ ,  $m_0 = m = 5$ ,  $c = 1$ ; (a) 数据包的最大传输时间  $\langle T_{\max} \rangle$ , 平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  与  $R$  的关系; (b) 状态参数  $H$  与  $R$  的关系

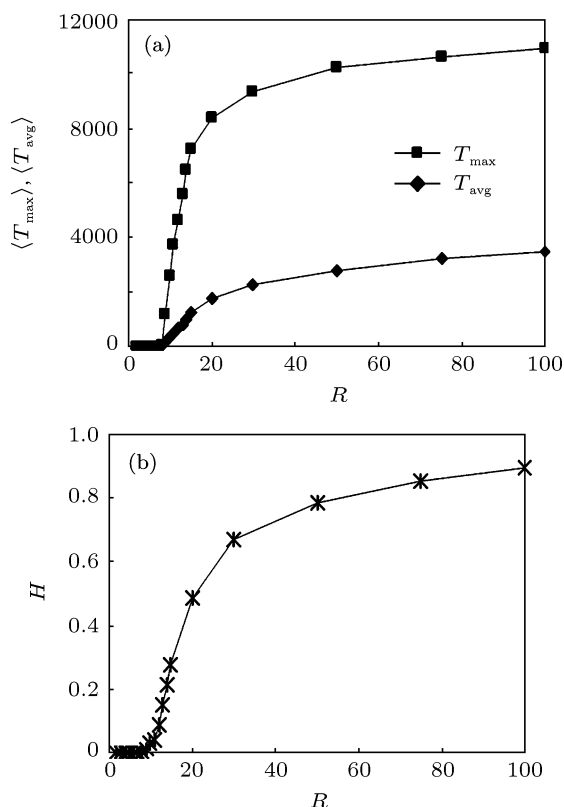


图 3 在选取具有  $\Gamma_{iu}$  最大的节点时仿真结果  $N = 1000$ ,  $m_0 = m = 5$ ,  $c = 1$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\gamma = 1$ ; (a) 数据包的最大传输时间  $\langle T_{\max} \rangle$ , 平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  与  $R$  的关系; (b) 状态参数  $H$  与  $R$  的关系

## 3.2 时间引力与空间引力共同作用方式

### 3.2.1 选取 $\Gamma_{iu}$ 最大的节点

在共同作用模型下, 我们以  $\alpha = 1$ ,  $\gamma = 1$  为例进行仿真实验. 图 3 为选取具有  $\Gamma_{iu}$  最大值的节点作为下一个路由节点所得到的仿真结果. 由仿真结果可以看出, 当  $R < R_c$  时,  $H$  值接近于 0,  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  近似等于恒定值 3,  $\langle T_{\max} \rangle$  也只是在极小范围内波动; 当  $R > R_c$  时,  $H$ ,  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  与  $\langle T_{\max} \rangle$  均迅速增大, 且相变值  $R_c = 8$ . 该引力策略下数据包的最大传输时间  $\langle T_{\max} \rangle$  和平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  随负载量  $R$  的变化情况与最短路由算法 (即空间引力绝对占优策略) 很相近. 根据引力约束模型可知, 数据包的传输路径越短 ( $d_{it}$  越小), 则  $\Gamma_{iu}$  越大; 节点  $i$  和  $u$  的拥塞程度越大, 则  $\Gamma_{iu}$  越大. 所以, 在该引力策略下, 数据包会沿着路径长度短、拥塞情况严重的节点进行传递, 从而导致大量的数据包仍旧要经过那些度较大、易拥塞的节点, 且随着节点拥塞情况的不断恶化, 该类节点将会吸引更多的数据包进入缓存队列, 从而进一步加重网络拥塞. 所以可以得出以下

结论: 当时间引力与空间引力共同作用下选择  $\Gamma_{iu}$  最大的节点作为下一个路由节点时, 网络的传输能力与最短路由算法相当, 且网络拥塞情况更为严重.

### 3.2.2 选取 $\Gamma_{iu}$ 最小的节点

图 4 表示在选取具有  $\Gamma_{iu}$  最小的节点作为下一个路由节点时, 数据包最大传输时间  $\langle T_{\max} \rangle$ , 平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  以及状态参数  $H$  随负载量  $R$  的变化情况. 仿真结果显示, 与最短路由算法相比, 选择  $\Gamma_{iu}$  最小的节点在一定程度上提高了网络的传输能力, 相变值  $R_c \approx 24$ . 当  $R < R_c$  时,  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  近似等于 37, 明显大于选取  $\Gamma_{iu}$  最大时的平均传输时间; 当  $R > R_c$  时, 网络迅速陷入拥塞状态且几乎所有节点均表现出拥塞现象, 网络中停留的数据包个数急剧增长. 由引力约束模型可知, 选择  $\Gamma_{iu}$  最小的节点需满足邻居节点  $i$  到目标节点  $t$  的最短路径  $d_{it}$  尽量大, 且节点  $i$  和该路径上节点  $u$  的相互作用 (即  $(q_i/c_i)^\alpha (q_u/c_u)^\alpha$  的值) 尽量小, 从而导致数据包会沿着路径较长或拥塞度较小的节点进行传递. 这种引力策略明显改善了度较大的节点的拥塞情况, 但由于传输路径过度迂回, 造成平均距离

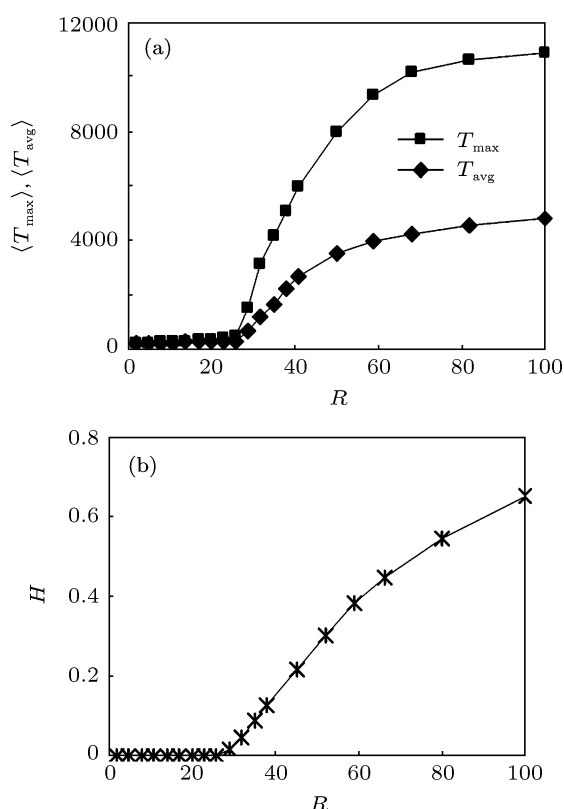


图 4 在选取具有  $\Gamma_{iu}$  最小的节点时的仿真结果  $N = 1000, m_0 = m = 5, c = 1, \alpha = 1, \gamma = 1$ ; (a) 数据包的最大传输时间  $\langle T_{\max} \rangle$ , 平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  与  $R$  的关系; (b) 状态参数  $H$  与  $R$  的关系

长度较大, 且在单位时间步内只有少量的数据包能到达目标节点, 最终导致网络上大部分节点的缓存中都存储了大量的数据包.

### 3.2.3 选取引力在 $(\min \{\Gamma_{iu}\}, \max \{\Gamma_{iu}\})$ 范围内的节点

前面我们讨论了时间引力绝对占优、空间引力绝对占优、时间引力与空间引力共同作用下  $\Gamma_{iu}$  最大和  $\Gamma_{iu}$  最小四种引力策略下网络吞吐量及传输效率的动态特性, 仿真结果显示这四种策略下路由效果均不理想, 那么当引力取值在  $(\min \{\Gamma_{iu}\}, \max \{\Gamma_{iu}\})$  范围内时路由效果会怎么样呢? 理论上, 可以选择任意引力大小的节点传递数据包, 度越大, 可供选择的引力情况也就越多, 但这样难以说明不同引力策略对网络传输的影响. 为此, 规定所有节点的引力取值遵循统一的标准: 假设将引力取值划分为 10 级  $\frac{(\min \{\Gamma_{iu}\} + \max \{\Gamma_{iu}\}) \cdot h}{10}$ ,  $h = 1, 2, 3, \dots, 10$ , 则针对所有节点每次均选择引力距离  $\frac{(\min \{\Gamma_{iu}\} + \max \{\Gamma_{iu}\}) \cdot h}{10}$  最近的节点作为下一个路由节点. 仿真结果如图 5 所示, 由该仿真结果可以得出, 随着引力取值的增大, 网络吞吐量先增加后减小, 且在  $(\min \{\Gamma_{iu}\} + \max \{\Gamma_{iu}\})/2$  (即  $h = 5$ ) 处取得最大值; 当引力取值大于  $(\min \{\Gamma_{iu}\} + \max \{\Gamma_{iu}\})/2$  时, 网络吞吐量随引力急剧减小.

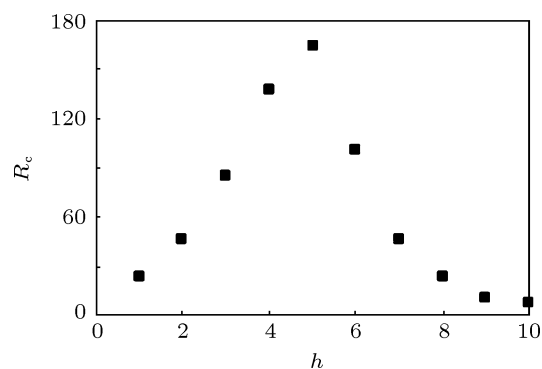


图 5 网络的吞吐量随  $h$  的变化情况  $N = 1000, m_0 = m = 5, c = 1, \alpha = 1, \gamma = 1$

图 6 给出了  $h = 3, 5, 7$  时  $\langle T_{\max} \rangle, \langle T_{\text{avg}} \rangle$  及  $H$  随  $R$  的变化情况. 仿真结果显示, 当  $h = 5$  时, 网络的吞吐量达到最大  $R_c \approx 164$ , 且从状态参数  $H$  随  $R$  的变化情况可以看出, 该引力策略下随  $R$  的增长网络中出现拥塞的过程比较缓慢, 拥塞程度也明显降低; 在自由流状态下,  $\langle T_{\max} \rangle$  随负载量  $R$  缓

慢增长,  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  变化很小且近似等于 9. 仿真结果说明, 选择引力距离  $(\min \{ \Gamma_{iu} \} + \max \{ \Gamma_{iu} \}) / 2$  最近的节点作为下一个路由节点是最优的引力策略. 该策略下路由过程同时地顾及了等待时间 (即时间引力) 和路径长度 (即空间引力) 对数据包传递的影响, 没有追求等待时间最短或传输距离最短. 因为整个路由过程是动态的, 如果要求路径长度最短, 则容易造成网络吞吐量低、拥塞严重; 如果追求等待时间最短, 则可能导致数据包的传递总是在寻找网络中处于空闲状态或拥塞程度小的节点, 造成传输路径过度迂回, 反而增大了数据包的传输时间. 所以, 同时考虑时间引力和空间引力对路由过程的影响对提高网络传输能力具有重要意义.

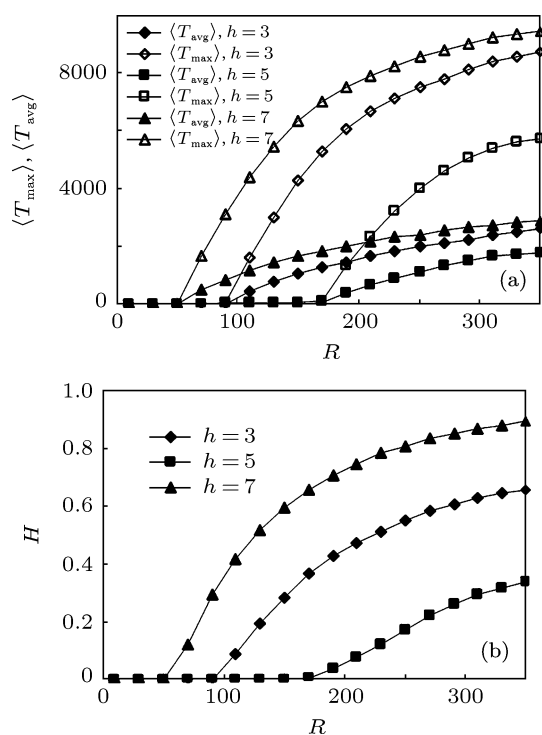


图6 引力取值在  $(\min \{ \Gamma_{iu} \}, \max \{ \Gamma_{iu} \})$  范围内的仿真结果  $N = 1000, m_0 = m = 5, c = 1, \alpha = 1, \gamma = 1$ ; (a) 数据包的最大传输时间  $\langle T_{\text{max}} \rangle$ , 平均传输时间  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  与  $R$  的关系; (b) 状态参数  $H$  与  $R$  的关系

此外, 我们还针对该类节点选择机制在节点传输能力等于度 ( $c = k$ ) 的情况下网络吞吐量的变化情况进行了实验, 如图 7 所示为  $h = 5$  时得到的仿真结果. 仿真结果显示, 当  $c = k$  时, 网络吞吐量  $R_c \approx 560$ , 说明增大节点的数据处理能力可以有效地提高网络的吞吐量; 与  $c = 1$  相比, 当网络处于自由流时, 数据包的平均传输时间有所降低  $\langle T_{\text{avg}} \rangle \approx 7$ , 且网络中出现拥塞的过程更加缓慢. 由引力约束模型不难看出, 在  $c = k$  条件下度较大

的节点在单位时间步内的数据包处理能力较大, 从而可以吸引更多的数据包经过该节点, 同时, 由于很多起讫节点间的最短路径都要经过此类节点, 这样就减少了大量数据包的传输时间. 所以, 提高网络中度较大的节点的传输能力有利于改善网络拥塞情况并提高网络的吞吐量.

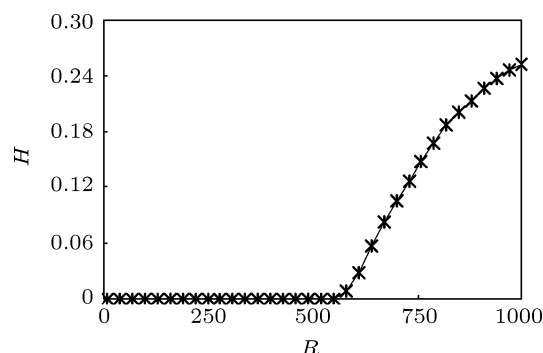


图7 选取  $\Gamma_{iu}$  值距离  $(\min \{ \Gamma_{iu} \} + \max \{ \Gamma_{iu} \}) / 2$  最近的节点的仿真结果  $N = 1000, m_0 = m = 5, c = k, \alpha = 1, \gamma = 1$

### 3.3 不同策略下的网络拥塞情况

我们对上述不同策略下网络节点的拥塞情况进行了统计分析, 如图 8 所示. 其中图 8(a)—(e) 分别为空间引力绝对占优、时间引力绝对占优以及共同作用下选取  $\Gamma_{iu}$  最大、最小与距离  $(\min \{ \Gamma_{iu} \} + \max \{ \Gamma_{iu} \}) / 2$  最近的节点 5 种策略在节点传输能力  $c = 1$  时网络上所有节点的拥塞情况, 即缓存中的数据包个数  $N(P)$ ; 图 8(f) 为选取距离  $(\min \{ \Gamma_{iu} \} + \max \{ \Gamma_{iu} \}) / 2$  最近的节点且  $c = k$  条件下的网络拥塞情况. 由于图 8(a)—(f) 都是在负载量  $R > R_c$  条件下得到的结果, 所以网络处于拥塞状态. 由仿真结果可以看出, 空间引力绝对占优策略与共同作用模式下  $\Gamma_{iu}$  最大策略的流量分布都极不均匀, 其中 80% 的节点拥塞程度为 0, 95% 的节点拥塞程度小于 3, 前者最大拥塞为 66347, 后者最大拥塞为 98375; 时间引力绝对占优策略下大部分节点的拥塞均比较大, 26% 的节点拥塞度大于 1000, 95% 的节点拥塞度大于 100, 度较大节点的拥塞程度有所缓解但仍较大; 与其他策略相比, 共同作用模式下选择  $\Gamma_{iu}$  最小的节点时的网络拥塞发生了转移, 度较大节点的拥塞程度变得很小, 而一些度较小的节点的拥塞情况较为严重, 同时网络流量也均匀了很多但普遍较为拥堵, 84% 的节点拥塞度在 100 以上; 选择距离  $(\min \{ \Gamma_{iu} \} + \max \{ \Gamma_{iu} \}) / 2$  最近的节点且  $c = 1$  时的流量分布较均匀, 度较大

的节点的拥塞情况得到了明显改善, 其  $N(P)$  值略大于其他节点, 当  $c = k$  时流量分布表现出一定的非均匀性, 其原因是度较大节点的传输能力增大, 可以吸引更多的数据包, 所以其缓存数据包数增大, 但就其与度较小节点的相对拥塞情况而言(即  $q/c$ ), 又远小于最短路由策略和选取  $\Gamma_{iu}$  最大时的路由策略. 时间引力和空间引力共同作用下选取  $\Gamma_{iu}$  最

大的节点加重了度较大节点的负载, 节点越拥塞, 就会吸引更多的数据包, 而不仅仅是经过该节点的最短路径上的那些节点存储的数据包; 而选择  $\Gamma_{iu}$  最小的节点会导致传递过程过度迂回, 造成传输时间较大, 且网络拥塞也较为严重. 仿真结果说明, 提高网络传输能力需要同时考虑路径长度和等待时间的影响, 从空间引力和时间引力上共同进行约束.

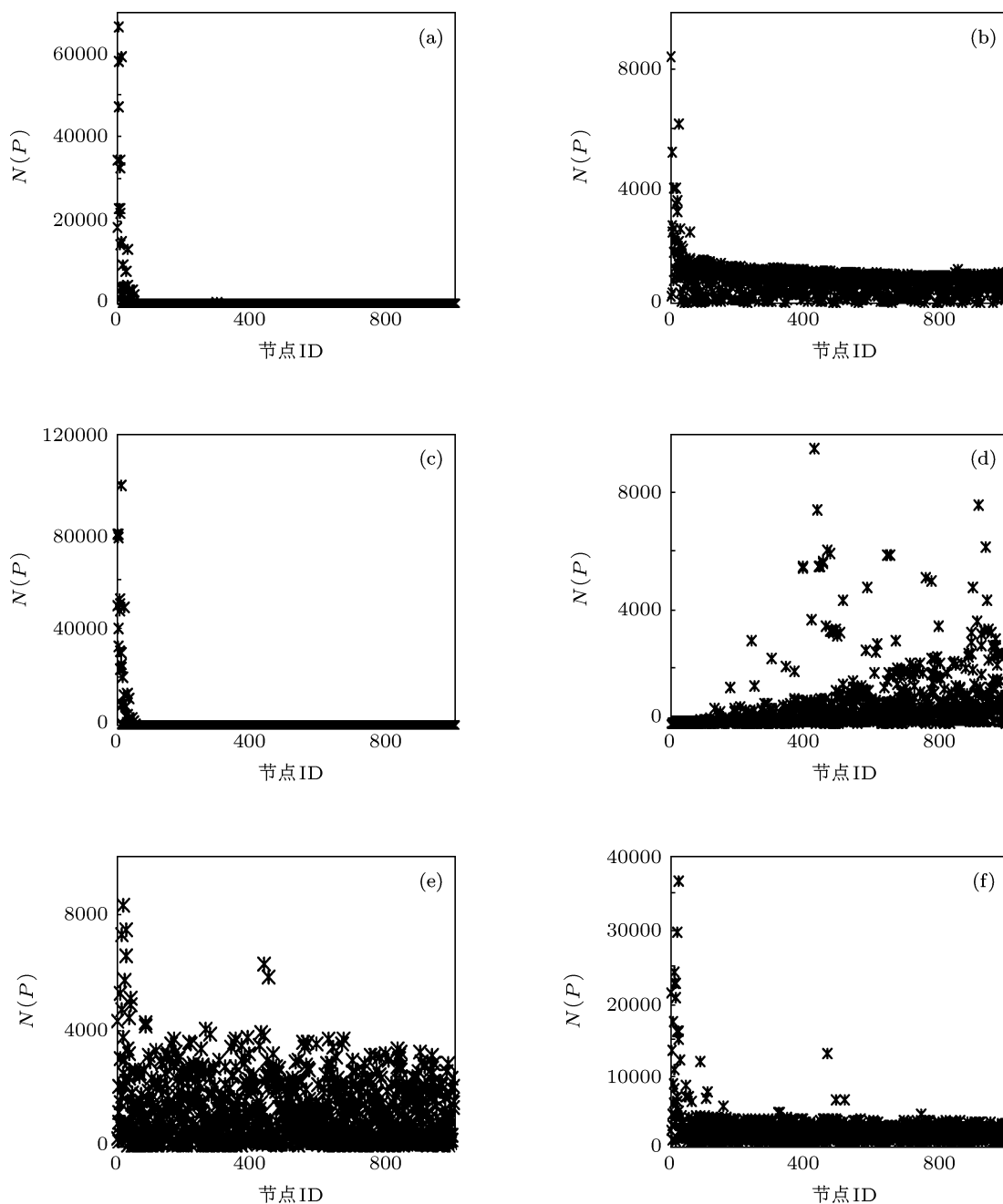


图 8 网络拥塞情况仿真结果  $N = 1000, m_0 = m = 5, \alpha = 1, \gamma = 1$ ; (a) 空间引力绝对占优方式  $c = 1, R = 100, N(P)$  总量为 520181; (b) 时间引力绝对占优方式  $c = 1, R = 100, N(P)$  总量为 808931; (c) 选取  $\Gamma_{iu}$  最大的节点  $c = 1, R = 100, N(P)$  总量为 893719; (d) 选取  $\Gamma_{iu}$  最小的节点  $c = 1, R = 100, N(P)$  总量为 653065; (e) 选取距离  $(\min \{ \Gamma_{iu} \} + \max \{ \Gamma_{iu} \}) / 2$  最近的节点  $c = 1, R = 350, N(P)$  总量为 1200188; (f) 选取距离  $(\min \{ \Gamma_{iu} \} + \max \{ \Gamma_{iu} \}) / 2$  最近的节点  $c = k, R = 1000, N(P)$  总量为 2497991

## 4 结论

本文重点研究了节点在数据包传递过程中的引力作用对网络吞吐量与传输效率的影响. 考虑路由过程对等待时间和路径长度的依赖, 引入了时间引力和空间引力的概念, 并构建了一种引力约束路由算法, 分别针对算法在五种不同引力策略下的路由情况进行了仿真. 仿真结果表明, 当空间引力绝对占优时, 网络的传输效率等于最短路由算法; 当时间引力绝对占优时, 网络吞吐量有一定提高但易导致大部分节点都陷入拥塞状态, 网络拥塞较严重; 当在时间引力和空间引力共同作用方式下选择  $\Gamma_{iu}$  最大的节点作为下一个路由节点时, 网络吞吐量与最短路由算法相当, 且网络拥塞程度与最短路由

算法相比更加严重; 当选择  $\Gamma_{iu}$  最小的节点时, 网络吞吐量有一定提高但数据包的平均传输时间较大, 网络传输效率较低; 当引力取值在  $(\min\{\Gamma_{iu}\}, \max\{\Gamma_{iu}\})$  范围内时, 网络吞吐量会有较大提高, 且在选择距离  $(\min\{\Gamma_{iu}\} + \max\{\Gamma_{iu}\})/2$  最近的节点时, 网络吞吐量达到最大且拥塞程度明显降低.

本文研究揭示了网络数据传输过程的引力机制, 指出这种引力机制表现为时间引力与空间引力的相互作用. 我们的模型能帮助人们理解网络路由的引力作用机理, 为路由策略优化提供了一种新的研究思路. 在整个网络的流量传输中是否可以针对不同的节点或流量分布等情况实施不同的引力约束策略, 采用这种动态引力约束策略的路由效果会怎样, 这些将在接下来的工作中继续深入研究.

- [1] Newman M E J 2003 *SIAM Rev.* **45** 167
- [2] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chavez M, Hwang D U 2006 *Phys. Rep.* **424** 175
- [3] Melanie M 2006 *Artificial Intelligence* **170** 1194
- [4] Albert R, Barabási A L 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 47
- [5] Strogatz S H 2001 *Nature* **410** 268
- [6] Li S B, Wu J J, Gao Z Y, Lin Y, Fu B B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050701 (in Chinese) [李树彬, 吴建军, 高自友, 林勇, 傅白白 2011 物理学报 **60** 050701]
- [7] Lin H, Wu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4313 (in Chinese) [林海, 吴晨旭 2007 物理学报 **56** 4313]
- [8] Szabo G, Szolnoki A, Vukov J 2009 *Eur. Phys. Lett.* **87** 18007
- [9] Gómez J G, Campillo M, Floriél L M, Moreno Y 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 1081
- [10] Chowdhury D 2006 *Physica A* **372** 84
- [11] Koo J H, Ji D H, Won S C 2010 *Appl. Math. Comput.* **217** 3916
- [12] Dobson I, Carreras B A, Newman D E 2005 *Prob. Eng. Inform. Sci.* **19** 15
- [13] Hu K, Hu T, Tang Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 080206
- [14] Simonsen I, Buzna L, Peters K 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 2187
- [15] Paster S R, Vespignani A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3200
- [16] Zager L, Vergheze G 2009 *Complexity* **14** 12
- [17] Lancic A, Antulov F N, Sikic M 2011 *Physica A* **390** 65
- [18] Toenjes R, Masuda N, Kori H 2010 *Chaos* **20** 033108
- [19] Tu L L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 030504
- [20] Yang J Z, Zhang M 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2183
- [21] Daniele D M, Luca D A, Ginestra B, Matteo M 2009 *Phys. Rev. E* **79** 015101
- [22] Pu C L, Pei W J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3841 (in Chinese) [濮存来, 裴文江 2010 物理学报 **59** 3841]
- [23] Yan G, Zhou T, Hu B, Fu Z Q 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046108
- [24] Noh J D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 11
- [25] Yang S J 2005 *Phys. Rev. E* **71** 016107
- [26] Zhao L, Al-Dubai A Y, Min G Y 2011 *Simul. Model. Prac. Theory* **19** 1415
- [27] Chen H L, Liu Z X, Chen Z Q, Yuan Z Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6068 (in Chinese) [陈华良, 刘忠信, 陈增强, 袁著祉 2009 物理学报 **58** 6068]
- [28] Echenique P, Gomez-Gardenes J, Moreno Y 2004 *Phys. Rev. E* **70** 056105
- [29] Wang D, Yu H, Jing Y W, Jiang N, Zhang S Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6802 (in Chinese) [王丹, 于灏, 井元伟, 姜囡, 张嗣瀛 2009 物理学报 **58** 6802]
- [30] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [31] Arenas A, Díaz-Guilera A, Guimerá R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3196
- [32] Danila B, Sun Y D, Bassler K E 2009 *Phys. Rev. E* **80** 066116



# Study on the congestion phenomena in complex network based on gravity constraint\*

Liu Gang<sup>†</sup> Li Yong-Shu

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 5 September 2011; revised manuscript received 27 September 2011)

## Abstract

How to guarantee the transport efficiency of the network and how to improve the network capacity are the main subject of the study presently. We investigate the gravity of the nodes to the transfer of data packets, and propose a routing method based on gravity constraint. In order to characterize the efficiency of the method, we introduce an order parameter  $H$  to measure the throughput of the network by a critical value of phase transition from free state to jammed state, and use the maximum travel time  $\langle T_{\max} \rangle$  and the average travel time  $\langle T_{\text{avg}} \rangle$  to test the transmission efficiency of the network. We simulate the network capacity under three different gravity constraints. Simulation results show that when only considering the path with shortest length, the network capacity is very small and the distribution of flow is extremely uneven; when only considering minimum waiting time, the excessive circuitous transfer of data packets occurs and most of the nodes will be in congestion state; when considering the gravity of path length and waiting time simultaneously and choosing a node with reasonable gravity, the network capacity will be improved greatly and the congestion level will be relieved to some extent.

**Keywords:** complex network, gravity, throughput, congestion

**PACS:** 89.75.Hc, 89.20.Hh

---

\* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100184110019).

<sup>†</sup> E-mail: liuganggis@sina.com