

## 一种有效提高无标度网络负载容量的管理策略\*

蔡君<sup>1)2)†</sup> 余顺争<sup>1)</sup>

1) (中山大学信息科学与技术学院, 广州 510006)

2) (广东技术师范学院电子与信息学院, 广州 510665)

(2012年8月20日收到; 2012年10月25日收到修改稿)

现有研究表明明显的社团结构会显著降低网络的传输性能. 本文基于网络邻接矩阵的特征谱定义了链路对网络社团特性的贡献度, 提出一种通过逻辑关闭或删除对网络社团特性贡献度大的链路以提高网络传输性能的拓扑管理策略, 即社团弱化控制策略 (CWCS 策略). 在具有社团结构的无标度网络上分别进行了基于全局最短路径路由和局部路由的仿真实验, 并与关闭连接度大的节点之间链路的 HDF 策略进行了比较. 仿真实验结果显示, 在全局最短路径路由策略下, CWCS 策略能更有效地提高网络负载容量, 并且网络的平均传输时间增加的幅度变小. 在局部路由策略下, 当调控参数  $0 < \alpha < 2$ , 对网络负载容量的提升优于 HDF 策略.

关键词: 复杂网络, 社团特性, 负载容量, 拓扑管理

PACS: 89.75.HC, 89.40.-a

DOI: 10.7498/aps.62.058901

## 1 引言

Barabási 和 Albert 的无标度网络模型和 Watts 和 Strogatz 的小世界网络模型揭示了网络结构的本质规律, 在过去的 10 多年中, 推动了复杂网络研究的迅速发展. 进一步的研究发现, 多数现实网络是不均匀的, 由许多子网络组成. 子网络内节点之间的连接比较紧密, 而子网之间节点的连接比较稀疏, 这一现象在人工网络和自然网络中都比较常见, 称之为网络中的社团结构 (Community Structure). 社团结构成为了继小世界和无标度特性之后复杂网络中最普遍和最重要的拓扑结构属性之一<sup>[1]</sup>. 随着复杂网络理论不断成熟, 研究者对很多复杂的互连系统, 包括航空、电力、Internet 和 World Wide Web (WWW) 等各种网络, 都从复杂网络的视角研究了其统计特征和实际应用<sup>[2,3]</sup>.

近年来, 伴随着因特网等诸多复杂网络中负载的快速增长, 如何快速有效地提高网络的传输性能已成为一个重要的研究领域, 受到了研究人员的普

遍关注. 人们提出了各种网络传输策略, 主要分为两类, 一类是“软”策略, 即在整个过程中无需网络拓扑结构的改变. 如针对网络的无标度特性, 陈华良等<sup>[4]</sup>对网络的每条边加权, 权值与该边两端节点的度相关, 然后数据包按照这个加权网络的最短路径路由, 提高网络的传输性能, 李涛等<sup>[5]</sup>提出了一种基于节点度的优化路由策略, Pu 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于与节点度相关的成本函数选择节点之间最优路径的路由策略. 针对网络的社团特性, Danon 等<sup>[7]</sup>基于社团结构降低最短路由策略的传输能力的性质, 提出了一种通过将社团结构信息提供给数据包来提高网络负载能力的路由策略. 邵斐等<sup>[8]</sup>提出了一种减少最短路由经过的社团数量的负载传输策略. 以上“软”策略在某一特定的拓扑结构中对网络性能的改善是有效的, 但许多实证研究结果显示, 网络的传输性能不仅受路由策略的影响, 而且在很大程度上依赖于网络拓扑的结构<sup>[9,10]</sup>, 例如, Zhao 等<sup>[11]</sup>发现对于两个不同结构的网络, 即使网络具有相同的节点和平均度以及每个节点具有相同的分发处理能力, 网络的负载能力也可能不同.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60970146, 61272381, 61202271), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA01Z449) 和自然科学基金-广东联合基金重点项目 (批准号: U0735002) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gzhcaijun@gmail.com

第二类是“硬”策略,即直接优化或改善网络拓扑结构,提高网络性能.如 Guimerà等<sup>[12]</sup>在节点和边的数量固定的情况下,提出了一种能兼顾网络拥塞和搜索的最优网络拓扑的策略,其研究表明,当网络处于非阻塞阶段,中心化的网络拓扑结构的搜索性能是最优的,而当网络处于阻塞阶段,全分布式非结构化的拓扑有利于负载在节点之间的均衡,为后续网络的设计、优化提供了参考.最近, Liu等<sup>[13]</sup>提出了一种高度优先策略(HDF策略),该策略通过关闭具有连接度大的节点之间的链路以提高网络负载容量.与此类似, Zhang等<sup>[14]</sup>提出通过关闭具有高介数的节点之间的链路来提高网络负载容量的高介数优先策略(HBF策略).

由于现实中的网络具有明显的社团结构特征,并且,最近有研究发现,模糊社团结构的网络拓扑更适合网络信息的传输<sup>[7,15]</sup>.因此,本文从复杂网络特性改善的视角出发,基于网络邻接矩阵的特征谱(邻接矩阵特征值的集合)反映网络中社团特性变化的特征,定义了链路对网络社团特性的贡献度,提出一种通过逻辑关闭或删除对网络社团特性贡献度大的链路以提高网络传输性能的策略,简称CWCS策略.在具有社团结构的无标度人工网络拓扑上基于全局最短路径路由和局部路由进行了仿真实验.实验结果表明,CWCS策略能有效地提高网络的负载容量,且对网络性能的改善优于HDF策略,尤其在全局路由策略的情况下.

## 2 相关模型和参数

### 2.1 网络负载传输能力

为了衡量网络的负载传输能力,假定:每个时刻 $t$ ,每个节点以概率 $\rho$ 产生一个数据包,每个新产生的数据包,以随机方式选择它的目的节点(与源节点不同).假定每个节点都兼有终端和路由功能,能产生、接收和转发数据包,并且处理能力相同,每个时刻能处理 $C_i$ 个数据包,每个节点的存储能力没有限制,可以容纳任意长的数据包等待队列,在同一节点等待传输的数据包的发送规则为先进先出,在接下来的 $t+1, t+2, \dots, t+T$ 时刻,数据包向目的节点传输,一旦到达目的节点,则从该网络中离开.

当网络处于无阻塞状态时,任意节点都没有数据包的聚集.随着网络中节点产生数据包的概率 $\rho$ 增大,网络将由无阻塞状态进入阻塞状态,其存在

一个临界值 $\rho_c$ ,当 $\rho < \rho_c$ 时,网络中产生的数据包和传输的数据包基本相同,网络处于无阻塞状态;当 $\rho > \rho_c$ ,网络中产生的数据包将大于其传输的数据包,网络将出现阻塞.为此,可使用有序参数 $\eta$ 与 $\rho$ 的关系来分析上述网络状态的变化<sup>[11]</sup>.

$$\eta(\rho) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle \Delta W \rangle}{\rho N \Delta t}, \quad (1)$$

其中 $N$ 为网络中的节点数, $\langle \Delta W \rangle = W(t + \Delta t) - W(t)$ , $W(t)$ 为 $t$ 时刻网络中数据包的总数, $\langle \dots \rangle$ 为基于时间窗口 $\Delta t$ 的平均.当 $\rho < \rho_c$ , $\Delta W = 0$ 和 $\eta = 0$ 时,网络处于无阻塞状态.由此可见,节点数据包的临界产生概率 $\rho_c$ 能够很好地反映网络负载的处理能力.

在网络无阻塞状态,任意节点 $j$ 接收到的数据包为<sup>[16]</sup>

$$R_j = \rho B_j / (N - 1), \quad (2)$$

其中 $B_j$ 为节点 $j$ 的有效介数,定义为

$$B_j = \sum_{m, k \in N, m \neq k} \frac{n_{mk}(j)}{n_{mk}}, \quad (3)$$

其中 $n_{mk}$ 为在特定传输策略下,节点 $m, k$ 之间的总路径数, $n_{mk}(j)$ 为节点 $m, k$ 之间的总路径数中经过节点 $j$ 路径的数目.令 $C_i = 1$ ,当 $R_j < 1$ 时,节点 $j$ 产生的数据包和传输的数据包基本相同,节点 $j$ 处于自由状态;当 $R_j > 1$ ,节点 $j$ 产生的数据包大于其传输的数据包,节点 $j$ 将出现阻塞.因此, $\rho_c$ 可以用以下公式进行估计:

$$\rho_c = (N - 1) / B_{\max}, \quad (4)$$

其中 $B_{\max}$ 为网络中介数的最大值,对应于网络中最中心的节点. $\rho_c$ 越大,网络的负载能力越强.

本文分析了CWCS策略在全局路由策略和局部路由策略两种情况下对网络性能的改善.全局路由策略指源节点和目标节点之间采用最短路径传送数据包.局部路由策略采用如下方式<sup>[17]</sup>:每个节点在它的邻近节点之间进行局部搜索,如果数据包的目的节点在其搜索的范围,则直接发给目的节点.否则,根据(5)式的概率发给邻居节点.

$$P_i = \frac{k_i^\alpha}{\sum_j k_j^\alpha}, \quad (5)$$

其中 $k_i$ 为节点 $i$ 的度, $\alpha$ 为可调节的控制参数.

### 2.2 社团定义与评价指标

社团定义为网络中的一种子结构.在社团内部,节点之间连接相对紧密,而在社团之间,节点之间

的连接则相对稀疏<sup>[18]</sup>. 为量化复杂网络的社团结构, 本文采用了目前应用最为广泛的由 Newman 等人提出的网络社团量化指标——模块度 (Modularity), 简称  $Q$  值, 其定义<sup>[18,19]</sup> 为

$$Q = \sum_{c=1}^{N_c} \left( \frac{m_c}{M} - \frac{d_c^2}{4M^2} \right), \quad (6)$$

其中  $N_c$  表示网络中社团的数目,  $M$  表示网络中连接的总数,  $m_c$  表示社团  $c$  内节点之间的连接数,  $d_c$  表示社团  $c$  内所有节点度数之和. 模块度  $Q$  值有两个作用: 一是在复杂网络社团划分过程中, 作为优化的目标函数. 二是用于评价网络社团特性的强弱,  $Q$  值的上限为 1,  $Q$  值越高, 表示复杂网络社团特性越明显, 现实社团结构较明显的网络的  $Q$  值介于 0.3—0.7 之间<sup>[18]</sup>.

### 3 策略分析

受 (4) 式的启发, 如果降低网络中节点的有效介数的最大值, 就可以提高网络的负载容量, 有研究者提出了关闭具有高出入度节点之间的链路的 HDF 策略<sup>[13]</sup> 和关闭具有高介数的节点之间的链路的 HBF 策略<sup>[14]</sup>. 如果我们更深入地追溯导致网络中产生介数较大边的原因就会发现: 由于网络中社团结构的存在, 社团之间的边的介数较大, 连接这些边的两端的节点的有效介数也相对较大. 因而, 如果减弱网络的社团结构, 将直接导致网络负载容量的提升. 基于此, 本文通过关闭最能减弱网络社团特性的边来提高网络的负载容量. 下面基于网络邻接矩阵的特征谱定义链路对网络社团特性的贡献度, 关闭贡献度最大的链路, 网络的社团特性减弱最快.

用图  $G = (V, E, W)$  表示具有  $N$  个节点、 $M$  条边的有向加权网络, 其中,  $V$  表示网络中节点的集合,  $E$  表示网络中链路的集合,  $W$  表示链路上的权重. 用  $N \times N$  的  $A$  表示网络节点连接关系的邻接矩阵, 如果节点  $i$  和  $j$  有连接, 元素  $A_{ij}$  表示从节点  $i$  到节点  $j$  的边上的权重, 否则为 0. 用  $\lambda$  表示邻接矩阵  $A$  的特征值,  $u$  和  $v$  分别表示特征值  $\lambda$  对应的右和左特征向量, 有  $Au = \lambda u$  和  $v^T A = \lambda v^T$ . 假定网络中存在  $c$  个社团, 社团与社团之间没有连接, 则每个社团对应一个最大的特征值. 若对网络节点进行合理编号, 矩阵  $A$  将由  $c \times c$  个分块矩阵组成, 在矩阵的对角线上的分块矩阵对应于网络中社团内节点之间的连接, 非对角线上的分块矩阵对应不同社

团节点之间的连接. 若将社团之间的连接当成矩阵  $A$  的扰动, 则邻接矩阵  $A$  可以写成

$$A = A_0 + \delta A, \quad (7)$$

其中  $A_0$  为对角分块矩阵, 其对角元素为矩阵  $A$  的对角分块矩阵,  $\delta A$  的对角分块矩阵为 0, 其非对角分块矩阵的元素为矩阵  $A$  的非对角分块矩阵的元素. Chauhan 等<sup>[20]</sup> 已证明网络邻接矩阵的特征谱能清楚地反映网络中社团的数目, 例如由  $c$  个社团组成的网络, 则该网络的邻接矩阵将有  $c$  个特征值远大于其他特征值, 这些特征值可以作为量化网络社团结构的重要指标. 基于此, 我们把这些特征值的乘积作为量化复杂网络社团结构的一个指标. 显然, 当所有社团的特征值都比较接近时, 该乘积将达到最大值. 为此定义社团强度为  $P = \log \prod_{k=1}^c \lambda_k$ , 其中  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_c$  是邻接矩阵  $A$  特征值中按降序排列的前  $c$  个特征值. 根据该定义, 当链路  $e(i, j)$  被管理性关闭时, 将造成整个网络的社团结构的变化和  $A$  的特征值的变化, 即  $P' = \log \prod_{i=1}^c \lambda'_i$ . 所以, 链路  $e(i, j)$  对网络社团特性的贡献度为  $P_{e(i,j)} = P - P'$ . 当网络规模较大, 每个社团的规模也比较大时, 可以假定链路  $e(i, j)$  被管理性关闭之后, 只会造成  $A$  的特征值的微小变化, 而不会造成社团与特征值之间的对应关系的变化. 这时  $P_{e(i,j)}$  可以用下式来近似计算:

$$P_{e(i,j)} = - \sum_{k=1}^c \frac{\Delta \lambda_k}{\lambda_k}, \quad (8)$$

其中  $c$  为网络社团的数目,  $\Delta \lambda_k = \lambda'_k - \lambda_k$  是链路  $e(i, j)$  关闭后引起的特征值的变化. 为减少  $P_{e(i,j)}$  计算量, 从特征向量  $v$  和  $u$  出发, 利用摄动理论提供  $P_{e(i,j)}$  的近似解. 用  $A$  和  $A + \Delta A$  分别表示链路关闭前和后的网络的邻接矩阵.  $\lambda + \Delta \lambda$  和  $u + \Delta u$  分别表示链路关闭后网络邻接矩阵  $A + \Delta A$  的特征值以及特征值对应的右特征向量. 对于大的邻接矩阵, 一条链路的关闭对网络邻接矩阵的特征谱的影响比较小, 即  $\Delta u$  和  $\Delta \lambda$  比较小, 得

$$(A + \Delta A)(u + \Delta u) = (\lambda + \Delta \lambda)(u + \Delta u). \quad (9)$$

在 (9) 式两边左乘  $v^T$ , 并忽略  $v^T \Delta A \Delta u$  和  $\Delta \lambda v^T \Delta u$  两项, 得  $\Delta \lambda = \frac{v^T \Delta A u}{v^T u}$ . 在链路  $e(i, j)$  关闭后, 网络邻居矩阵变化量可表示为  $(\Delta A)_{ij} = -A_{ij}$ ,  $(\Delta A)_{lm} = 0$ ,  $l \neq i, m \neq j$ , 得

$$\frac{\Delta \lambda_k}{\lambda_k} = - \frac{A_{ij} v_{ik} u_{jk}}{\lambda_k v_k^T u_k}, \quad (10)$$

其中  $v_{ik}$  和  $u_{jk}$  分别表示  $v_i$  和  $u_j$  的第  $k$  个元素. 对于无权无向网络  $A_{ij} = 1, u = v, v_k^T u_k = 1$ , 则由 (10) 式可得链路  $e(i, j)$  对网络社团特性的贡献度, 如下式:

$$P_{e(i,j)} = \sum_{k=1}^c \frac{2u_{ik}u_{jk}}{\lambda_k}. \quad (11)$$

$P_{e(i,j)}$  值越大, 链路  $e(i, j)$  对网络的社团结构越重要, 将该链路从网络中删除后, 网络社团特性强度减弱最快. 对于具有  $M$  条边,  $c$  个社团的网络, 由 (8) 和 (10) 式可知有  $\sum_{e=1}^M P_e = c$ . 为使测量参数的和为 1, 我们定义  $I_e = P_e/c$ , 满足  $\sum_{e=1}^M I_e = 1$ . 在应用  $I$  之前, 需预先知道网络中社团数目  $c$  的值. 而在复杂网络社团探测的过程中, 社团数目的确定仍然是一个难点. 一般每种社团探测算法都应有确定社团数目的策略. 目前, 已提出了很多不同的方法确定网络社团的数目 [21]. 本文利用网络的频谱特性直接确定网络社团数目 [20]. 如果  $c$  给定, 我们的方法无需对网络进行社团划分, 直接可以刻画链路对社

团的贡献度.

以著名的空手道 (Karate) 俱乐部网络进行链路对网络社团特性的贡献度参数  $I$  的测试. 该网络是 Zachary 通过对一个美国大学空手道俱乐部历时两年的观察而构建的社会网, 描述了空手道俱乐部成员之间的相互关系, 由 34 个成员和 78 条边组成. 其中节点 1 代表俱乐部教练, 节点 33 代表俱乐部的管理者. 通常划分为 2 个社团, 即  $c = 2$ . 计算每条链路的  $I$  值. 现以每个成员为节点, 节点之间的链路的  $I$  值为边构建加权网络, 如图 1 所示. 由 (6) 式易得, 若网络的社团结构不发生改变, 关闭社团内部的链路, 将减弱网络的社团特性; 关闭社团之间的链路, 将增强网络的社团结构. 在图 1 中, 社团内部的链路的  $I$  值远大于社团之间的链路的  $I$  值, 并且社团 1 内节点 33 与节点 34 之间的链路的  $I$  值最大. 社团之间的链路的  $I$  值普遍很小. 从中可以得出, 参数  $I$  能很好地定量描述网络中每条链路对网络社团特性的贡献度.

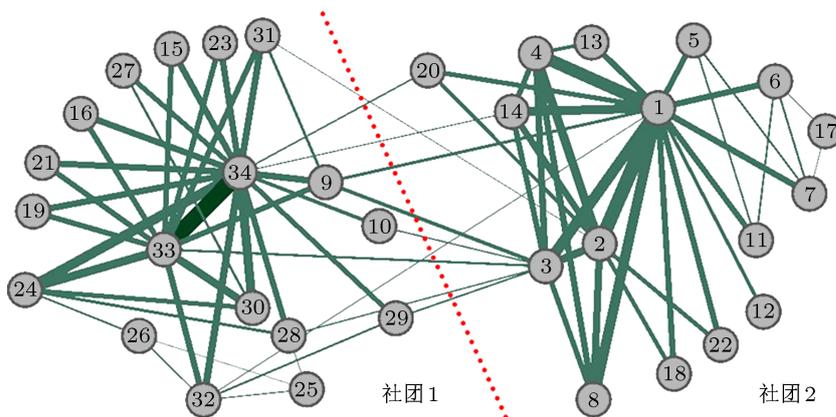


图 1 Karate 网络中的  $I$  值分布

## 4 仿真实验与分析

### 4.1 人工网络生成模型

由于现实中的网络不仅具有无标度特性, 并且社团结构明显, 因此本文引用由 Yan 等人提出的可调社团特性的无标度网络模型 [22] (记为 SFC 模型) 来生成无标度网络. 该模型采用了与 Barabasi-Albert (BA) 模型相似的增长特性和优先连接特性两种机理, 生成算法如下: 1) 增长: 初始于  $c$  个社团, 分别表示为  $U_1 \dots U_c$ , 每个社团内含有  $m_0$  个全

连接的节点, 并且社团之间相互连接, 每次引入一个新的节点, 新加入的节点与网络连接  $m$  ( $m < m_0$ ) 条边, 其中与节点所属社团  $U_l$  连接  $n$  条, 另外的  $m - n$  条边与其他  $c - 1$  个社团内的节点相连. 2) 优先连接: 新节点与一个已经存在的节点  $i$  相连接的概率  $\Pi_i$  的关系:  $\Pi_i = k_i / (\sum_{j \in U} k_j)$ , 其中  $k_i$  为节点  $i$  的度. 由该模型生成的网络不仅具有无标度特性, 而且反映网络社团特性模块度的强度可以根据  $Q = n/m - 1/c$  可调. 下面通过调整参数  $n, m$  和  $c$ , 生成不同规模的网络, 在全局最短路径路由策略和

局部路由策略两种情况下,分析本文的 CWCS 策略对网络性能的影响,其中包括链路关闭比例  $f_{ce}$  分别与网络节点数据包的临界产生概率 ( $\rho_c$ ), 平均最短路径长度 ( $L_{ave}$ ) 和平均传输时间  $\langle T \rangle$  的关系, 并且将它与 HDF 策略进行比较 (由于 HDF 策略与 HBF 策略具有很强的相似性, 因此本文选择计算量偏小的 HDF 策略). 本文中的仿真结果数值是进行 10 次仿真后的平均值.

### 4.2 最短路径路由策略下的分析

调整 SFC 模型的  $n, m$  和  $c$  参数, 生成  $Q$  值分别为 0.6 和 0.7 的  $N = 1000$  的网络. 在最短路径路由策略下,  $\rho_c$  和  $L_{ave}$  与  $f_{ce}$  的关系如图 2 所示. 从图 2(a) 和 (c) 可得, 当关闭链路的比例小于 0.2 时, 数据包的传送从中心节点转向非中心节点, 因此负载在网络中节点的分布达到了均衡, CWCS 策略和 HDF 策略都能快速地提升网络的负载容量  $\rho_c$  的值. 但随着链路关闭比例的增加, 负载容量提升的速度减慢, 并且当  $f_{ce}$  超过 0.2 后, 由于网络中路由线路的数目快速减少, 数据包将经过更多的中间节点才能到达它的目的地, 数据包很可能在网络的传输过程中出现堵塞, 导致了网络负载容量下降, 所以随着  $f_{ce}$  的增加, 网络的负载容量出现下降. 若从社团改善的视角理解, 随着链路关闭比例的不断增

加, 网络的社团特性不断减弱, 当  $f_{ce}$  大约为 0.2 时, 此时网络的  $Q$  值接近 0.3, 网络已不具有明显的社团结构. 若继续在网络中关闭链路, 网络的社团特性将再次增强. 将 CWCS 策略与 HDF 策略比较发现, 在链路关闭的初始阶段, HDF 策略与 CWCS 策略非常接近, 但是随着链路关闭比例的增加, CWCS 策略的优势变得明显. 产生这一现象的主要原因是: 在 HDF 策略中, 连接度大的节点之间的链路首先被关闭, 能直接快速提高网络的负载容量. 但是在无标度网络中, 度相对很高的节点不多, 绝大部分的节点的度相对较低. 因此, 在开始几次链路关闭过程中, HDF 策略具有很好的效果. 当度高节点之间的链路关闭后, 关闭非中心节点之间的链路对网络的负载容量的提升的效果大大减弱. 而 CWCS 策略每次关闭最能减弱网络社团特性的链路, 降低网络中节点的最大有效介数, 与 HDF 策略相比, 对网络负载容量的改善具有可持续性.

图 2(b) 和 (d) 为在最短路径路由策略下,  $L_{ave}$  与  $f_{ce}$  的关系. 从图可知,  $L_{ave}$  随  $f_{ce}$  的增加而单调增长, 这是由于链路的关闭, 导致原本距离很短的节点之间的距离变长. 结果显示, 相对 HDF 策略, CWCS 策略在提高网络负载的同时, 并没有大幅延长网络的平均最短距离.

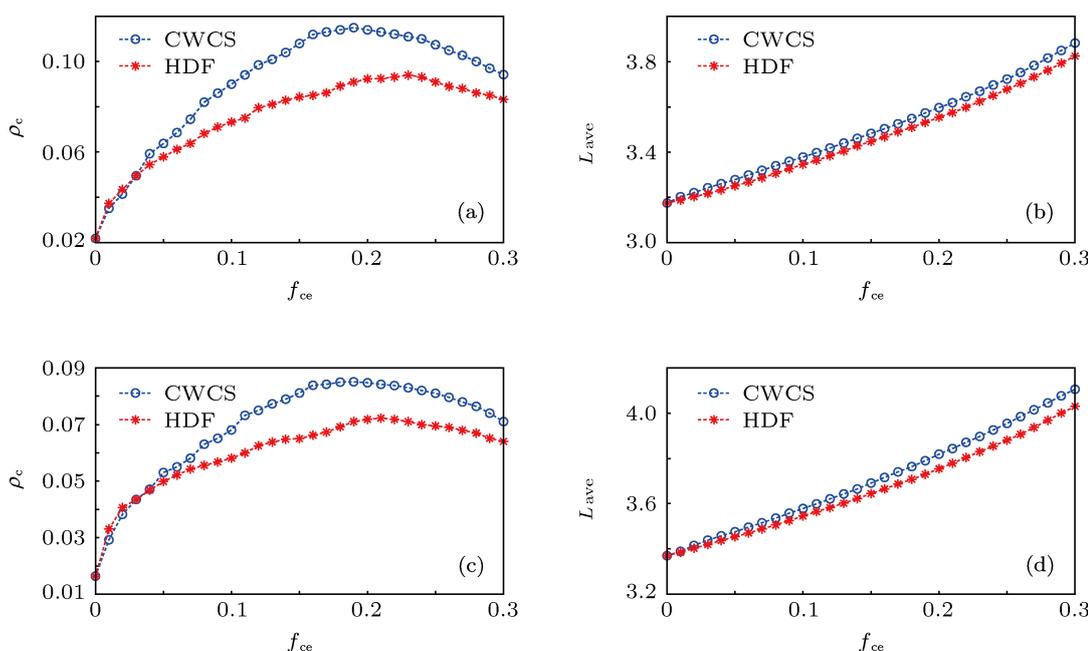


图 2 最短路径路由策略下  $\rho_c$  和  $L_{ave}$  与  $f_{ce}$  的关系 (a) 和 (b) 网络的  $Q$  值为 0.6; (c) 和 (d) 网络的  $Q$  值为 0.7

在最短路径路由策略下, 分别通过 CWCS 策略和 HDF 策略关闭链路, 网络的平均传输时间  $\langle T \rangle$  如图 3 所示. 在数据包生成概率  $\rho$  值较小的情况下, CWCS 策略和 HDF 策略所引起的  $\langle T \rangle$  的变化接近. 但是, 随着  $\rho$  值的增大, CWCS 策略作用下的  $\langle T \rangle$  小于 HDF 策略. 综上所述, 在最短路径路由策略下, CWCS 策略与 HDF 策略相比不仅可以提高网络的负载容量, 而且能减少网络的平均传输时间.

### 4.3 局部路由策略下的分析

下面分析在局部路由方式下, CWCS 策略对网络性能的改善, 主要观察在应用 CWCS 策略过程中  $f_{ce}$ ,  $\rho_c$  和  $\alpha$  三参数之间的变化关系. 如图 4(a)—(c) 所示, 可控参数  $\alpha$  分别设置为  $-3$ ,  $-1$  和  $2$ . 从图 4(b) 可知, 当  $\alpha = -1$  时, 随着网络中链路的关闭, CWCS 策略和 HDF 策略作用下的网络负载容量都下降, 这是由于当  $\alpha = -1$  时, 负载在网络节点中的分布是均匀的. 因此, 网络中任何链路的关闭都不会提高网络的负载容量 [23]. 当  $\alpha = -3$  和  $\alpha = 2$  时, 负载在网络中的节点的分布不像  $\alpha = -1$  时均匀, 在 CWCS 策略和 HDF 策略作用下, 随着网络中链路的关闭, 网络的负载容量都是先提高, 然后降低. 从图 4(c) 中可得, 当  $\alpha = 2$  时, 与 HDF 策略比较,

CWCS 策略更能快速提升网络的负载容量  $\rho_c$  的值. 当  $\alpha = -3$  时, HDF 策略提高网络负载容量的性能优于 CWCS 策略. 这一现象是由数据包的路由机理造成的. 当  $\alpha = 2$  时, 数据包更易选择连接度大的节点进行路由. 而对社团贡献度大的链路一般是社团内部与中心节点相连的连接度大的链路, 关闭这些链路有利于网络负载的提升. 当  $\alpha = -3$  时, 数据包更易于分发给连接度小的节点, 此时, 关闭对社团贡献度大的链路对网络负载的进一步的提升有限. 为详细评估控制参数  $\alpha$  对 CWCS 策略的影响,  $\rho_c$  在不同  $\alpha$  条件下的变化情况如图 5 所示, 设置  $f_{ce}$  分别为  $0.1$ ,  $0.2$  和  $0.3$ , 从中也可以得到当  $\alpha$  在  $0-2$  的变化范围内, CWCS 策略更能提高网络的负载容量.

在局部路由策略下, 相对 HDF 策略, 通过 CWCS 策略关闭链路后的网络平均传输时间  $\langle T \rangle$  略长. 设置可提高网络负载容量的局部路由控制参数  $\alpha = 2$ , 在关闭不同比例链路的情况下, 网络的平均传输时间如图 6 所示. 结果显示, 与 HDF 策略相比, CWCS 策略不能在局部路由情况下提高网络负载容量的同时再提高网络的平均传输时间.

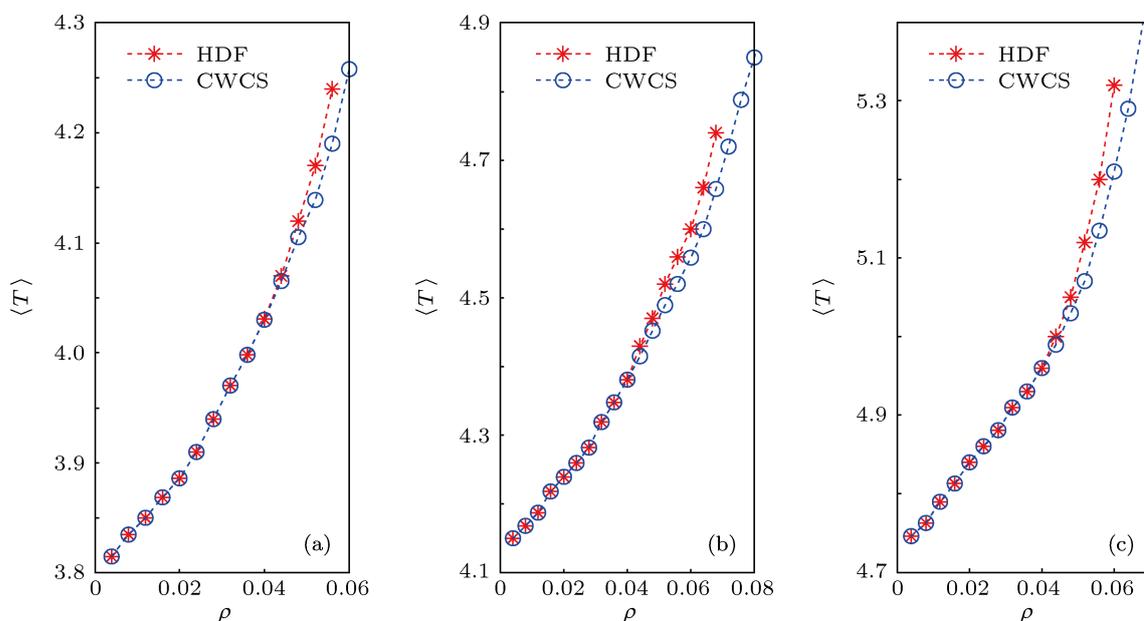


图 3 全局路由策略下, 在不同  $f_{ce}$  条件下, 网络平均传输时间  $\langle T \rangle$  与  $\rho$  的关系 (网络规模  $N = 1000$ , 网络模块度  $Q = 0.7$ )

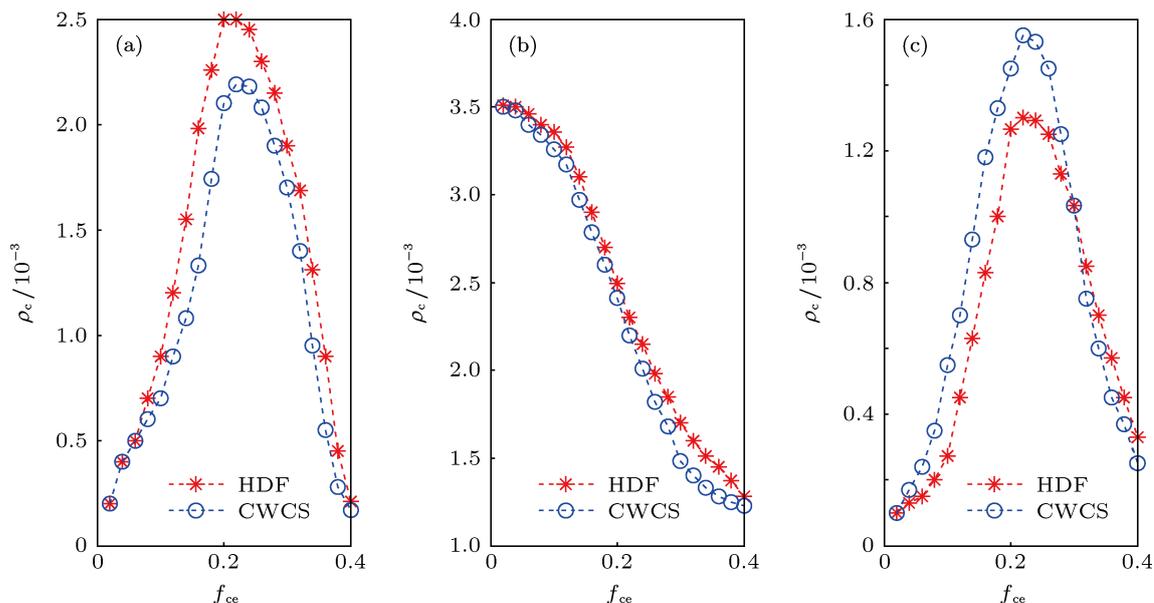


图4 局部路由策略下,  $\rho_c$  与  $f_{ce}$  的关系. 网络规模为  $N = 1000$ . 网络模块度  $Q = 0.7$  (a), (b) 和 (c) 的控制参数  $\alpha$  分别设置为  $-3$ ,  $-1$  和  $2$

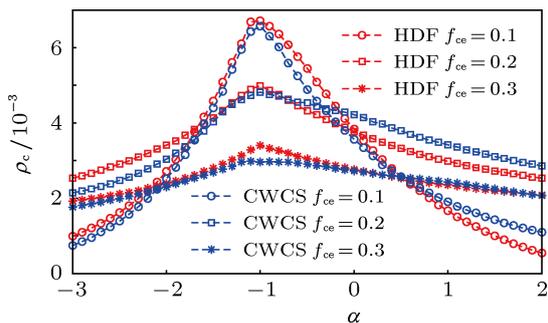


图5 局部路由策略下, 不同  $f_{ce}$  条件下,  $\rho_c$  与  $\alpha$  的关系. 网络规模  $N = 1000$ , 网络模块度  $Q = 0.7$

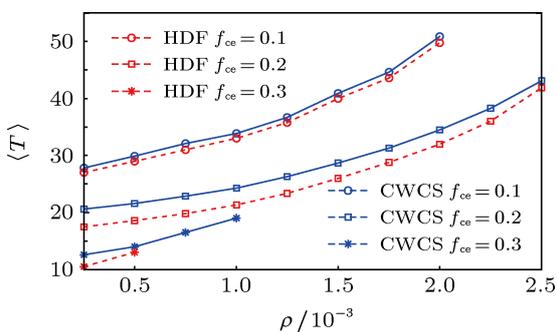


图6 局部路由策略下, 在不同  $f_{ce}$  条件下, 网络平均传输时间  $\langle T \rangle$  与  $\rho$  的关系 (网络规模  $N = 1000$ , 网络模块度  $Q = 0.7$ )

### 5 策略的时间复杂度分析

在 CWCS 策略中, 如 (11) 式所示, 计算每条链

路对网络社团特性的贡献度, 只需求出表示网络节点连接关系的邻接矩阵的所有特征值和特征向量. 而现实中的大部分网络为稀疏网络, 利用 Lanczos 算法和 QL 算法, 求稀疏对称矩阵的所有特征值和特征向量的时间复杂度为  $O(nm)$ <sup>[24]</sup>, 其中  $n$  和  $m$  分别表示网络的节点数和边数. 在 HDF 策略中, 需计算每条链路的  $k_i \times k_j$  的大小, 其中  $k_i$  为节点  $i$  的度, 其时间复杂度也为  $O(nm)$ . 所以, CWCS 策略的时间复杂度与 HDF 策略相同, 都比较低, 适合于实际应用.

### 6 结论

本文提出了一种通过关闭对网络社团特性贡献度大的链路有效减弱网络社团特性以提高网络传输性能的 CWCS 策略. 在具有社团结构的无标度网络中进行了实验仿真, 与现有的 HDF 策略进行比较, 在最短路径路由方式下, 无需大幅提高网络的平均距离, CWCS 策略能更进一步提高网络负载容量和降低网络的平均传输时间延长的幅度. 在局部路由方式下, 当调控参数  $0 < \alpha < 2$  时, CWCS 策略可获得更大的网络负载能力.

在实际网络中, 链路关闭成本低, 易实现, 如 Internet 网络通过软件设置即可完成网络链路的关闭. 但随着网络规模的增大, 对于一些特殊的网络, 如 Internet 网, 基于光逻辑链路可以提供与实际物

理链路相当的高性能, 在网络中添加链路将变得易于实现. 怎样在网络中通过增添链路实现网络性能

最大改善, 将成为我们下一步的研究工作.

- 
- [1] Newman M E J 2004 *Eur. Phys. J. B* **38** 321
- [2] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, Chavez M, Hwang D 2006 *Phys. Rep.* **424** 175
- [3] Zhou T, Bai W J, Wang B H, Liu Z J, Yan G 2005 *Physics* **34** 31 (in Chinese) [周涛, 柏文洁, 汪秉宏, 刘之景, 严钢 2005 物理 **34** 31]
- [4] 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]
- [5] Li T, Pei W J, Wang S P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5903 (in Chinese) [李涛, 裴文江, 王少平 2009 物理学报 **58** 5903]
- [6] Pu C L, Zhou S Y, Wang K 2012 *Physical A* **391** 866
- [7] Leon D, Alex A, Guilera A 2008 *Phys. Rev. E* **77** 036103
- [8] Shao F, Jiang G P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078902 (in Chinese) [邵斐, 蒋国平 2009 物理学报 **60** 078902]
- [9] Zoltán T, Kevin E 2004 *Nature* **428** 716
- [10] Arenas A, Díaz-Guilera A, Guimerà R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3196
- [11] Zhao L, Lai Y C, Park K, Ye N 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026125
- [12] Guimerà R, Díaz-Guilera A, Vega-Redondo A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 248701
- [13] Liu Z, Hu M B, Wang W X, Wu Q S 2007 *Phys. Rev. E* **76** 037101
- [14] Zhang G Q, Wang D, Li G J 2007 *Phys. Rev. E* **76** 017101
- [15] Zhou M Y, Cai S M, Fu Z Q 2012 *Physica A* **391** 1887
- [16] Guimerà R, Arenasb A, Díaz-Guilera A 2001 *Physica A* **299** 247
- [17] Yin C Y, Wang B H, Wang W X 2006 *Phys. Lett. A* **351** 220
- [18] Newman M E J 2004 *Phys. Rev. E* **69** 026113
- [19] Guimerà R, Amaral L 2005 *Nature* **433** 895
- [20] Chanuhan S, Girvan M, Ott E 2009 *Phys. Rev. E* **80** 056114
- [21] Fortunato S 2010 *Phys. Rep.* **486** 75
- [22] Yan G, Fu Z Q, Ren J 2007 *Phys. Rev. E* **75** 016108
- [23] Wang W X, Wang B H, Yin C Y 2007 *Phys. Rev. E* **73** 026111
- [24] Newman M E J 2010 *Networks: An Introduction* (Oxford UK: Oxford University Press) p346

# An efficient management strategy for enhancing traffic capacity in scale-free networks\*

Cai Jun<sup>1)2)†</sup> Yu Shun-Zheng<sup>1)</sup>

1) (*Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China*)

2) (*School of Electronic and Information, Guang Dong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China*)

(Received 20 August 2012; revised manuscript received 25 October 2012)

## Abstract

Previous research has shown that the community structure of the network well significantly affect information transmission, and the obvious community structure will significantly reduce the network transmission performance. To address the problem, first we define the link importance to communities, which is based on the spectrum of network adjacency matrix. Then we propose a topological management strategy called community weaken control strategy (CWCS) to enhance traffic capacity, which weakens the community structures by logically closing or cutting some links with great link importance. We implement the scheme in both a global shortest-path routing strategy and local routing strategy, and compare it with the previous scheme HDF that removes the links among hub nodes. The simulation results show that the traffic capacity can be greatly enhanced and the average transport time is effectively reduced under the shortest path routing strategy. Under the local routing strategy, the traffic capacity can also be greatly enhanced when the tunable parameter  $\alpha$  lies in a range from 0 and 2.

**Keywords:** complex network, community structure, traffic capacity, topological management

**PACS:** 89.75.HC, 89.40.-a

**DOI:** 10.7498/aps.62.058901

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60970146, 61272381, 61202271), the National High Technology Research and from Development Program of China (Grant No. 2007AA01Z449), and the Key Program of NSFC-Guangdong Joint Funds(Grant No. U0735002).

† Corresponding author. E-mail: gzhcaijun@gmail.com