

无标度复杂网络负载传输优化策略^{*}

李 涛[†] 裴文江 王少平

(东南大学信息科学与工程学院, 南京 210096)

(2009 年 2 月 24 日收到 2009 年 4 月 8 日收到修改稿)

提出了一种能够显著提高无标度复杂网络负载传输性能的优化路由策略. 实现了负载在核心节点与边缘节点间的合理分配. 分析表明该策略使得网络的负载处理能力正比于网络规模的平方, 而与单个节点的度值无关. 实验结果显示优化路由策略在保持了最短路由策略小世界效应的同时, 成倍地提升了网络的负载传输能力, 且随着网络平均节点度的增加其优势越趋显著. 此外, 与有效路由策略的比较进一步验证了优化路由策略的优异性能.

关键词: 优化路由策略, 复杂网络, 负载传输, 网络阻塞

PACC: 0250, 0560, 0570J

1. 引 言

现实世界中复杂网络无处不在, 它们由各种实体以及实体间错综复杂的关系所构成^[1]. 其存在形式既可以是有限的, 也可以是无形的^[2-9]. 近年来, 伴随着因特网等诸多大规模复杂网络的相继出现, 现代社会对网络的依赖性不断增强. 因此, 如何提高复杂网络的传输能力和实现负载的高效传递已成为一个重要的研究领域. 过去, 对复杂网络负载传输特性的研究均建立在网络同构的假设之上^[10,11]. 然而, Barabási 与 Albert 的研究成果表明现实世界复杂网络通常都是异构的, 且其节点的度分布具有无标度的统计学特性^[12]. 此后, 该领域的研究工作则基本围绕着两个方面展开. 一是研究网络的异构特性对负载传输的影响. 如 Moreno 等人率先提出了基于 BA 无标度网络的相继故障模型, 分析了节点负荷与网络相继故障规模之间的关系以及由于边的拥塞所引发的相继故障问题^[13,14]. Holme 等人研究了网络增长过程中相继故障的产生条件^[15]. Crucitti 等人同时考虑了网络节点和边对负载传递的影响^[16]. Zhao 等人采用动态最短路由策略对异构网络的承载能力进行了理论分析^[17]. Kinney 等人对成指数规律分布的北美电力网络的传输性能进行了研究^[18]. Wang 等人利用具有感知流量的路由策略分析了拓扑结构

对网络传输流量的影响^[19]. 二是研究如何提高异构网络的负载传输性能. 如 Yin 等人提出了一种所谓的次邻近节点路径搜索策略^[20]. Macri 等人采用动态负载缓和机理减小了无标度网络的负载阻塞压力^[21]. Chen 等人应用加权路由的方法提升了网络的负载传输能力^[22]. Wang 等人提出了一种基于优先选择机理的动态路由策略^[23], 并指出在节点负载传输能力非均匀的条件下, 随机路由策略具有较大的优势. 此外, 基于路径节点度和最小化原则, Yan 等人采用有效路由策略减小了网络核心节点的负载量, 从而实现了网络负载由核心节点向边缘节点的转移^[24,25]. 但与上述其他启发式策略相同, 该策略的提出也缺少相应的理论依据.

对随机行走过程的研究表明, 单个粒子通过某条特定路径的时间正比于该路径上所有节点度的连乘积^[26]. 该结果揭示了网络传输路径与节点度之间的内在联系. 受此启发, 本文在上述研究的基础上, 针对复杂网络的本质特性提出了一种基于节点度连乘积最小化原则的优化路由策略. 较之于最短路由策略和有效路由策略, 该策略能够最大限度地提高网络的承载能力, 且其平均路径长度基本接近于最短路由策略. 这使得网络在具有较高传输容量的同时拥有较短的负载传递时间.

本文第二部分提出了基于优化路由策略的网络负载传输模型. 第三部分采用 ER 随机网络和 BA 无

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60672095), 国家高技术研究发展计划(863)(批准号: 2007AA11Z210)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: taoli@seu.edu.cn

标度网络对优化路由策略的性能进行了全面分析;第四部分给出了全文总结.

2. 网络负载传输模型

针对任意结构网络,假设其所有节点同时具有转发和接收负载的能力.单位时间内系统生成 R 个负载,同时为每个负载随机指定源节点和目标节点.这里定义的负载既可以是数据也可以是能量等.负载依据特定的路由策略进行传输,并在到达目标节点后被从系统中自动删除.每个节点的负载处理能力与该节点的度成正比,即在单位时间内,度为 k 的节点最多可处理 $C(k) = \alpha k$ 个负载.不失一般性,为简化起见取 $\alpha = 1$.因此,度高的节点具有较大的负载处理能力.这与现实网络的特性相一致,例如对因特网而言,被访问量较大的路由器往往具有较强的数据处理能力^[27].

上述模型可采用多种路由策略,如随机路由策略^[28]、最短路由策略^[29]和有效路由策略^[24]等.文献[26]对粒子的随机行走过程进行了分析,并指出假设网络中某条特定路径为 $C(l) = c_0 \cdots c_l$,粒子在 t 时间内行走的轨迹为 $W(t) = v_0 \cdots v_t$,如果 $C(l) \subseteq W(t)$,则认为粒子在时间 t 内通过了路径 $C(l)$.以 $\theta(t)$ 表示该事件发生的概率,令 $v_0 = s, v_t = d, c_0 = u, c_l = v$,若 $d = u$,即粒子最终回到路径 $C(l)$ 的出发点,则

$$\theta(t) = \sum_{r=0}^{t-1} (P_{su}^{(r)} - \theta(r)) \cdot P_0 \cdot P_{uu}^{(t-1-r)}, \quad (1)$$

其中, $P_{ij}^{(m)}$ 为节点 v_i 到节点 v_j 的 m 步转移概率, $P_0 = P_{c_0 c_1} \cdots P_{c_{l-1} c_l}$ 为路径 $C(l)$ 转移概率的连乘积.进一步,可以得到粒子在 t 时刻 ($d = v$) 通过路径 $C(l)$ 的概率为

$$\xi(t) = [P_{su}^{(t-l)} - \theta(t-l)] \cdot P_0, \quad (2)$$

由(2)式的生成函数 $\mathcal{R}(x)$ 可得粒子通过路径 $C(l)$ 的平均时间为

$$\langle T \rangle = \mathcal{R}'(1) = 2m \prod_{i=1}^{l-1} k_i + \Phi, \quad (3)$$

其中, m 为网络的边数, Φ 与网络的拓扑结构相关.(3)式表明粒子通过某条特定路径所花费的平均时间正比于该路径上所有节点度的连乘积.该结果揭示了网络传输路径与节点度之间的内在联系.受此启发,本文提出了优化路由策略.即选取节点 v_i 到节点 v_j 之间所有路径中,途经节点度的连乘积 Θ 最

小者作为负载传输的最佳路径.设 $v_i \equiv v_0, v_1, \cdots, v_{n-2}, v_{n-1} \equiv v_j$ 为节点 v_i 到节点 v_j 的任意路径,则优化路径 P_{opt} 可通过下式求得:

$$\Theta(P_{\text{opt}}(v_i \rightarrow v_j)) = \min \prod_{m=0}^{n-1} k_m. \quad (4)$$

如果源节点和目标节点间存在多条优化路径,则从中随机选取一条作为最佳路径.

基于对迪杰斯特拉(Dijkstra)最短路径算法^[30]的改进,本文提出了优化路径的计算方法.设 V 为网络节点集,其大小为 N , deg 为网络邻接矩阵,若边 $\langle v_i, v_j \rangle$ 存在,则 $\text{deg}[i, j]$ 等于节点 v_j 的度 k_j ,反之无穷.令 D 表示已找到的以 v_n 为源点的优化路径的终点集, $\text{pdt}[i]$ 为节点 v_n 到节点 v_i ($n \neq i$) 优化路径上节点度的连乘积.优化路径算法具体步骤如下:

- 1) 设 D 初始值为空.令 $\text{pdt}[i] = k_n \cdot \text{deg}[n, i]$, 其中 $v_i \in V - \{v_n\}$.
- 2) 选择 v_j , 使得 $\text{pdt}[j] = \min \{\text{pdt}[i] \mid v_i \in V - D - \{v_n\}\}$, 令 $D = D \cup \{v_j\}$.
- 3) 对于 $V - D - \{v_n\}$ 中任意顶点 v_k , 如果 $\text{pdt}[j] \cdot \text{deg}[j, k] < \text{pdt}[k]$ 则修改 $\text{pdt}[k] = \text{pdt}[j] \cdot \text{deg}[j, k]$.
- 4) 重复步骤 2), 3) 共 $N - 1$ 次, 可得到从节点 v_n 到其余各顶点的优化路径.
- 5) 选取不同源点 v_n , 重复步骤 1) — 4) 共 N 次可得到网络中任意节点间的优化路径.

该算法 1) — 3) 步的时间复杂度为 $O(N)$, 反复执行 $N - 1$ 次后至第 4) 步所需时间为 $O(N^2)$, 结合第 5) 步可知优化路由算法的总体时间复杂度为 $O(N^3)$.以 $N = 1000$ 的 BA 网络为例,采用台式计算机(3.2 GHz Intel 处理器, 2G 内存)计算网络中所有节点间的优化路径共需时 32 s.该结果与计算网络最短路径所需时间基本相同.因此,如果网络的规模较小或适中,则生成固定路由表的时间复杂度是完全可以接受的.且固定路由方式相对于动态路由方式在经济和技术成本上具有明显的优势,因此在诸如 IP 网络等领域中得到了广泛应用^[31].固定路由表生成后,网络中所有节点将依据该表完成负载的转发和接收.

3. 优化路由策略性能分析

针对上述网络负载传输模型,随着单位时间内

新增负载量 R 的逐渐增大,网络将由无阻塞状态进入阻塞状态,其间存在一个临界负载量 R_c .当 $R < R_c$ 时,网络的新增负载量与可传输负载量基本相等,各节点所接收的平均负载量总体上小于或等于其最大负载处理能力.因此,网络处于畅通状态.当 $R > R_c$ 时,部分节点的负载处理能力将小于其所接收的负载量.此时,网络将出现阻塞,且随着运行时间的增加,阻塞规模不断增大.由此可见,临界负载量 R_c 能够很好地反映网络的最大负载处理能力.本文借助有序参数 η 与 R 的关系来分析上述网络状态的变化,设

$$\eta = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{R} \frac{\langle \Delta W \rangle}{\Delta t}, \tag{5}$$

其中, N 为网络节点数, $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t)$, $W(t)$ 为 t 时刻网络中的累积负载量, $\langle \cdots \rangle$ 表示基于时间窗 Δt 的平均^[32].

首先,基于 ER 随机网络^[33] 分析 η 与 R 的关系.设网络节点数 $N = 1500$,任意两节点的连接概率 $p = 0.02$.针对网络最大连通子图分别采用最短路由策略、有效路由策略和优化路由策略所得路由的平均路径长度分别为 $L_{\text{sh}} = 5.36$, $L_{\text{eff}} = 5.62$ 和 $L_{\text{opt}} = 5.46$.其中, L_{sh} 与 L_{opt} 的值较为接近且均小于 L_{eff} .如图 1 所示,对应于上述路由策略,网络的临界负载量分别为 $R_c^{\text{sh}} = 316$, $R_c^{\text{eff}} = 665$ 和 $R_c^{\text{opt}} = 718$.该结果表明,对于 ER 同构网络,有效路由策略和优化路由策略均能显著提高网络的承载能力.但相对而言,优化路由策略不论是在平均路径长度还是最大负载量方面较前者均具有明显优势.

由于 ER 随机网络不能反映现实世界复杂网络的异构特征,Barabási 与 Albert 提出了一种具有无标度特征的 BA 网络模型,其节点的度服从幂率分布^[12].图 2 为 BA 无标度网络的 η - R 曲线.与 ER 网络相同,取节点数 $N = 1500$.设 BA 网络参数 $m = 2$,则相应的平均节点度 $\langle k \rangle = 4$.采用最短路由策略、有效路由策略和优化路由策略所得路由的平均路径长度分别为 $L_{\text{sh}} = 4.21$, $L_{\text{eff}} = 6.60$ 和 $L_{\text{opt}} = 4.73$.显然, L_{opt} 接近于 L_{sh} ,且远小于 L_{eff} .对应于不同路由策略,网络的临界负载量分别为 $R_c^{\text{sh}} = 255$, $R_c^{\text{eff}} = 322$ 和 $R_c^{\text{opt}} = 958$.优化路由策略再次表现出了优异的性能.相比于最短路由策略,它将网络的承载能力提高了 2.8 倍,而平均路径长度只增加了约 12%.而有效路由策略虽然将网络承载能力提升了 26%,但平均负载传输路径长度却增加了约 57%.

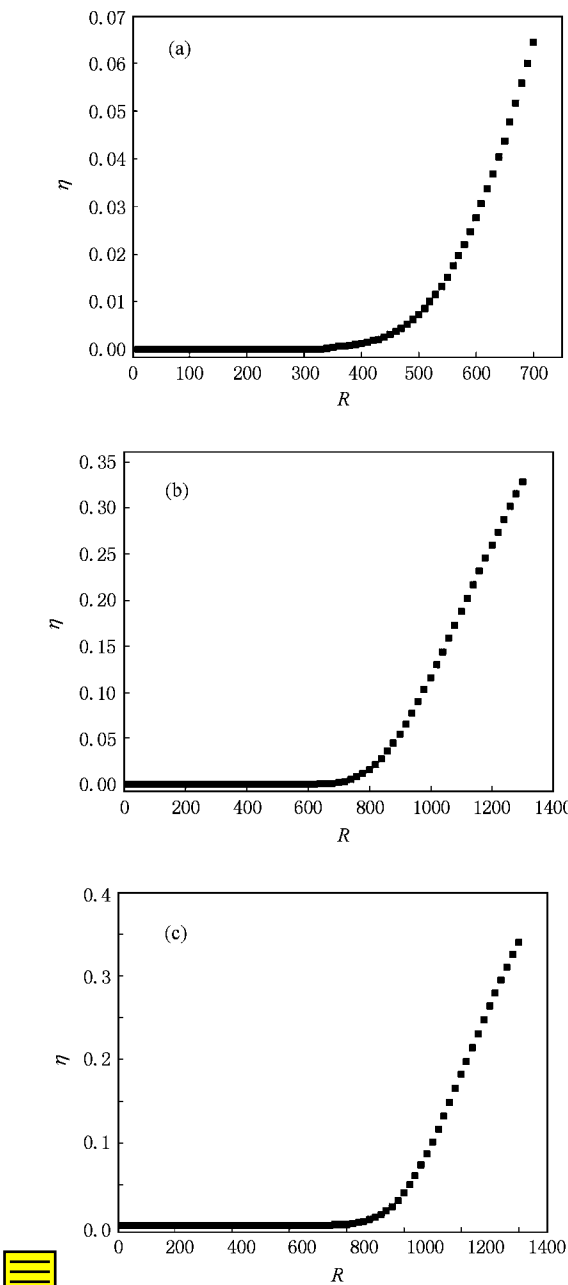


图 1 ER 随机网络中 η 与 R 的关系 (a)采用最短路由策略;(b)采用有效路由策略;(c)采用优化路由策略

此外,通过与 ER 随机网络实验结果比较,可以发现随着网络异构性的增强,优化路由策略对网络承载能力的提升作用也将增大.

进一步,为从微观角度揭示优化路由策略提升网络负载传输能力的内在机理,如图 3 所示,采用小规模 BA 网络对不同策略所生成的具体路由进行分析.对于该网络,各策略所得路由的平均路径长度分别为 $L_{\text{sh}} = 2.68$, $L_{\text{eff}} = 3.05$ 和 $L_{\text{opt}} = 2.76$.首先,考虑节点 v_8 到 v_{25} 之间的路由.不难发现,其间存在多条

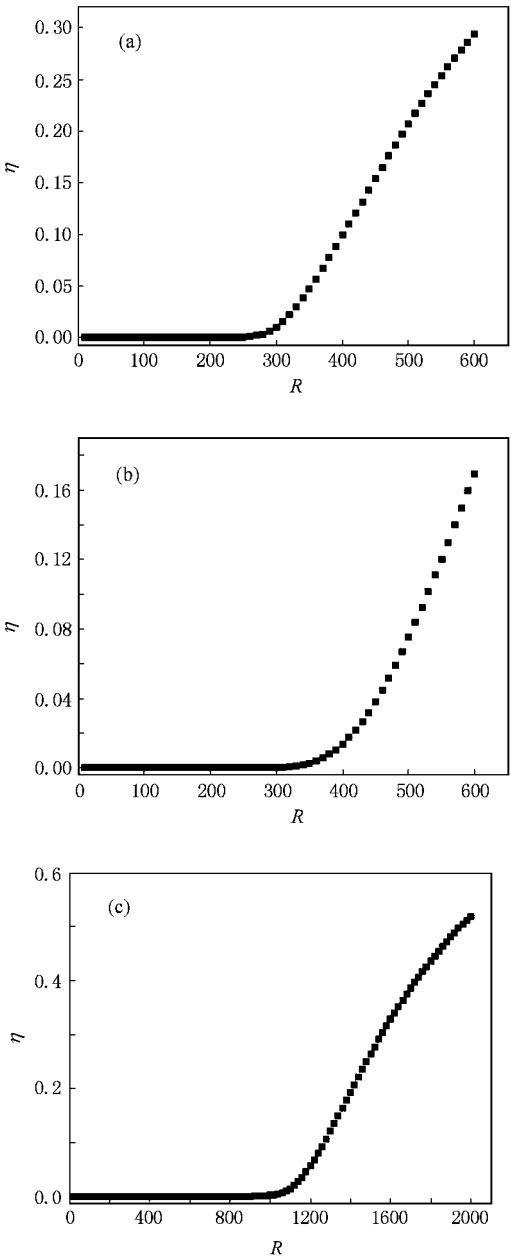


图 2 BA 无标度网络中 η 与 R 的关系 (a)采用最短路由策略; (b)采用有效路由策略;(c)采用优化路由策略

长度为 3 的最短路径. 最短路由策略以随机方式选得路径 $P_{\text{sh}} = \{v_8, v_2^9, v_5^{15}, v_{25}\}$ (上标为节点度值). 该路径经过了 v_2^9 和 v_5^{15} 两个高度值节点. 而优化路径 $P_{\text{opt}} = \{v_8, v_{13}^{16}, v_{42}^2, v_{25}\}$ 只经过了 v_{13}^{16} 一个高度值节点. 可见, 在未增加路径长度的前提下, 优化路由策略主动避免了对高度值节点的过度依赖. 对于有效路由策略, 其路径 $P_{\text{eff}} = \{v_8, v_2^9, v_6^6, v_{30}^2, v_{25}\}$ 虽然也减小了对高度值节点的依赖, 但却增加了负载的传输路径长度. 其次, 考虑节点 v_{22} 到 v_{32} 之间的路由

$P_{\text{sh}} = \{v_{22}, v_5^{15}, v_4^{10}, v_{32}\}$, $P_{\text{opt}} = \{v_{22}, v_{13}^{16}, v_{41}^2, v_{38}^3, v_{32}\}$ 和 $P_{\text{eff}} = \{v_{22}, v_{31}^3, v_6^6, v_{29}^3, v_{12}^6, v_{32}\}$. 最短路由策略利用了两个度高节点. 优化路由策略以路径长度增 1 为代价只利用了一个度高节点. 而有效路由策略以路径长度增 2 为代价完全避免了对度高节点的利用, 但未能发挥核心节点的传输能力.

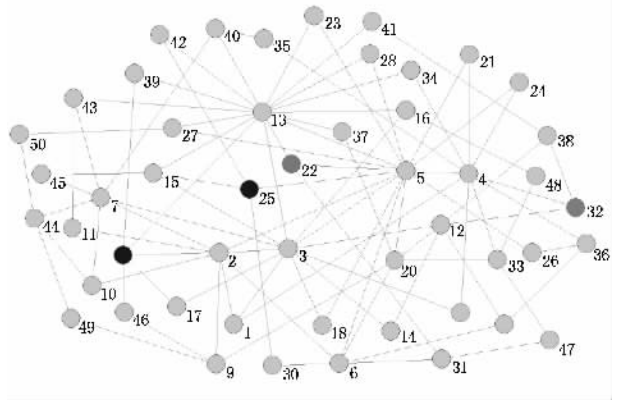


图 3 小规模 BA 无标度网络(其网络节点数 $N=50$, $\langle k \rangle=4$)

由此可见, 相比于最短路由策略, 优化路由策略不会盲目地选择最短路径. 因为在无标度网络中最短路径通常会经过节点度较高的核心节点, 甚至可能在一条最短路径上含有多个核心节点, 这样势必造成核心节点的拥塞, 进而降低网络的承载能力. 相比于有效路由策略, 优化路由策略也不会一味地选择节点度较低的边缘节点, 这样势必强制避开核心节点, 进而增加路径长度, 同时使得核心节点的负载处理能力无法得到充分发挥. 因此, 优化路由策略在路径长度和路径节点度值之间进行了折中, 既避免了路径长度的不合理增加, 又避免了对高度值核心节点的过分依赖, 从而在不增加或略增加路径长度的前提下实现了负载在不同度值节点间的合理分配, 克服了最短路由策略以及有效路由策略两者的缺陷, 获得了优化网络负载传输性能的满意效果. 对于 ER 随机网络, 虽然就整体而言其结构是同构的, 但网络节点的度值仍然存在较小的局部差异. 因此, 优化路由策略仍然能够起到提升网络承载能力的作用. 只是较异构性显著的 BA 网络而言, 其作用的效果较小而已. 因此, 网络的异构化程度越高, 优化路由策略的优势越明显.

为从宏观角度对优化路由策略的机理和性能进行分析, 类似于网络节点介数的概念^[34,35], 定义网络节点的平均路由中心度为

$$B(k) = \frac{1}{N(k)} \sum_{k_i=k} \sum_{s \neq t} \delta_{st}(i), \quad (6)$$

其中

$$\delta_{st}(i) = \begin{cases} 1, & \text{if } v_s \rightarrow v_t \text{ 经过 } v_i, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (7)$$

$N(k)$ 为度值等于 k 的节点的数量. 平均路由中心度 $B(k)$ 反映了不同度值节点在网络整体路由中所发挥作用的大小,同时也从另一个角度反映了不同度值节点所承载的负载量. $B(k)$ 与 k 之间存在很强的相关性,通常节点的度越大,其平均路由中心度也越大. 当网络处于非阻塞状态时,单位时间内网络的新增负载量 R 与传输负载量基本一致. 此时,通过度值为 k 的节点的平均负载量为 $RB(k)/N(N-1)$. 当网络发生阻塞时,部分节点的平均负载量大于其负载处理能力,即 $RB(k)/N(N-1) > C(k)$. 对于本文提出的负载传输模型, $C(k) = k$. 因此,负载阻塞将首先发生在 $B(k)/k$ 最大的节点上. 图 4 为 BA 网络中各路由策略的 $B(k)$ 分布. 对于最短路由策略 $B(k) \propto k^{1.7}$. 因此,相对于度值较低的节点,高度值节点承担了极大的负载量. 虽然节点的负载处理能力与节点的度成正比,但 $B(k)/k \propto k^{0.7}$ 表明负载阻塞仍将首先发生在度值最高的节点上. 对于有效路由策略, $B(k)$ 呈近似泊松分布,且在 $k \approx 20$ 处出现峰值. 表明大量路径通过度值为 20 左右的节点,高度值节点的负载得以充分转移,但其处理能力却无法得到有效发挥. 网络的负载阻塞将首先发生在度值约为 20 的节点上. 而对于优化路由策略 $B(k) \propto k$, 节点的平均路由中心度与节点度成线性关系,网络负载得到了最为合理的分配. 通过不同度值节点的负载量与节点的处理能力实现了完美结合. 此时,临界负载量 R_c^{opt} 正比于 N^2 , 而与单个节点的度值无关.

图 5(a) 为采用优化路由策略的 BA 网络在非阻塞状态下的实际负载分布情况. 数量众多的低度值节点分担了网络中的绝大部分负载. 可见,优化路由策略成功地实现了负载由高度值核心节点到低度值边缘节点的有效转移,从而大幅减轻了核心节点的负载压力. 如图 5(b) 所示,当网络进入阻塞状态后,负载的分布情况基本保持不变,仍然主要分布于度值较低的节点上,且未出现个别节点负载量剧增的现象. 说明与上文的分析结果相一致,网络的承载能力与单个节点的度值之间不存在相关性.

负载的平均传输时间是对网络传输性能进行评

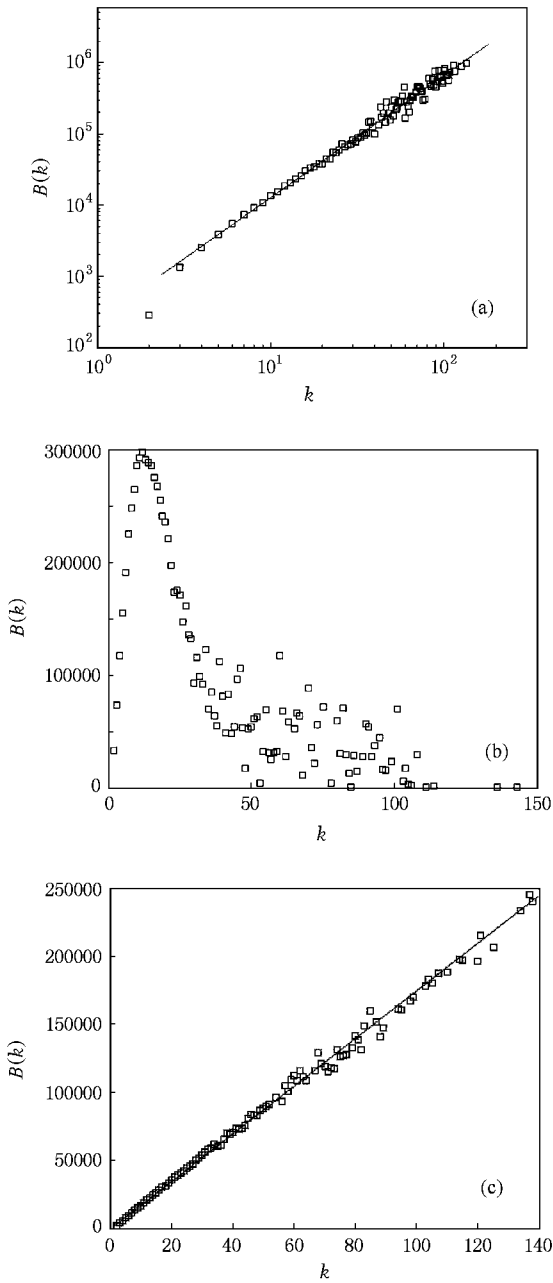


图 4 BA 网络节点平均路由中心度 $B(k)$ 分布(网络节点数 $N = 1500, \langle k \rangle = 4$) (a)采用最短路由策略;(b)采用有效路由策略;(c)采用优化路由策略

价的重要标准之一. 定义负载的平均传输时间为

$$\langle T \rangle = \frac{1}{N(F)} \sum_{i \in F} T_i, \quad (8)$$

其中, F 为特定时间内通过网络的负载集, $N(F)$ 为 F 中所包含的负载量, T_i 为负载 i 的传输时间. 图 6 为网络负载的平均传输时间与单位时间内新增负载量 R 的关系. 当网络处于非阻塞状态时,负载将以极短的时间完成从源节点到目标节点的传输.

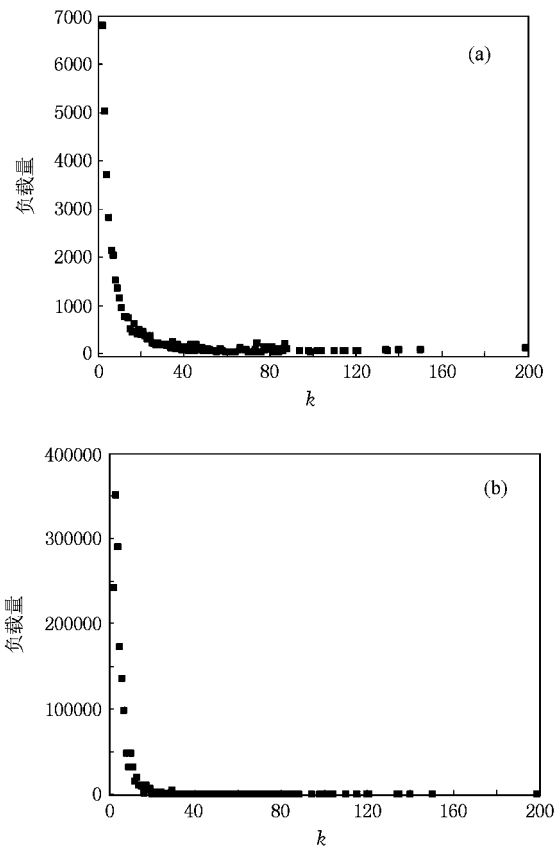


图 5 采用优化路由策略的 BA 网络实际负载分布(所有状态的运行时间均为 5000,网络节点数 $N=1500, \langle k \rangle=4$) (a)网络处于非阻塞状态($R=800$);(b)网络处于阻塞状态($R=1100$)

随着网络单位时间内新增负载量的逐渐增大,直至超过临界值 R_c ,负载的平均传输时间也将随之增大.对照图 2 可以发现,图 6 中的临界值与上文通过 η 与 R 关系得到的 R_c 基本一致.

随着网络规模的增大,网络节点间的平均路径长度也将相应的增加. Watts 和 Strogatz 指出现实世界复杂网络存在小世界效应,其平均最短路径长度与网络节点数之间成对数关系^[5].此外,文献[24]指出有效路径也具有同样的特性.因此,本文就优化路径的平均路径长度与网络规模的关系进行了研究.如图 7 所示,结果表明两者也呈对数关系,即 $L_{opt} \propto \ln N$,且优化路径与最短路径的平均长度极为接近.由于传输路径长度直接影响到负载传输的效率和成本,因此该结果表明优化路由策略具有极高的实际应用价值.

最后,本文分析了网络平均节点度 $\langle k \rangle$ 对优化路由策略性能的影响.针对 BA 无标度网络,分别取 $m \in [2, 10]$, 对应于 $\langle k \rangle \in [4, 20]$.如图 8 所示,随着 $\langle k \rangle$ 的增加,优化路由策略的平均路径长度逐渐

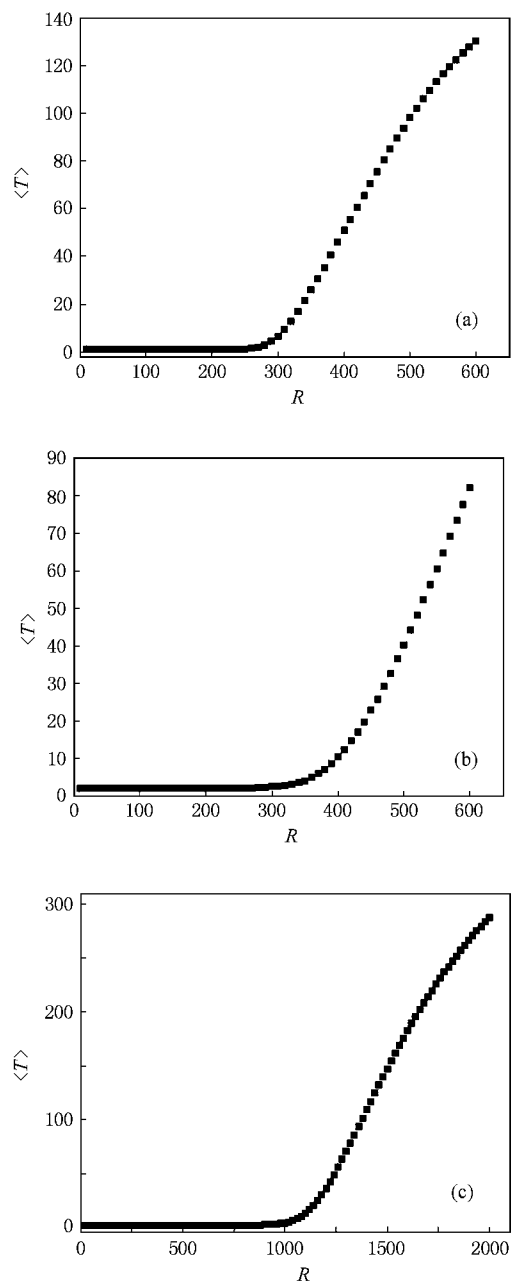


图 6 基于 BA 网络的负载平均传输时间 $\langle T \rangle$ 与单位时间内新增负载量 R 的关系(网络节点数 $N=1500, \langle k \rangle=4$) (a)采用最短路由策略;(b)采用有效路由策略;(c)采用优化路由策略

逼近最短路由策略,当 $\langle k \rangle=18$ 时二者已基本相等.此外,相对于最短路由策略,随着网络平均节点度的增大,优化路由策略对网络传输能力的提升作用越趋显著.分析其中原因,主要是由于平均节点度的增大导致节点间最短路径数量的增多,优化路由策略取最短路径的概率也随之增大.而其所取的最短路径必然是源节点与目标节点间所有路径中的最佳者.

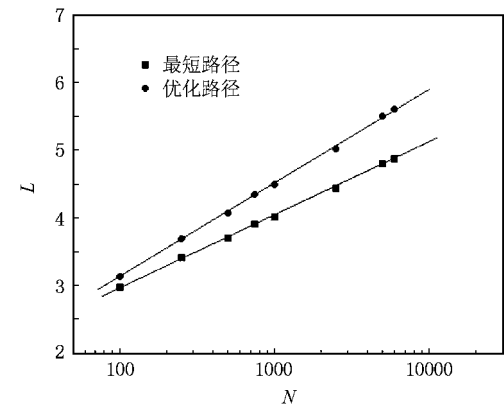


图 7 BA 网络平均路径长度与网络规模的关系(网络平均节点度 $\langle k \rangle = 4$)

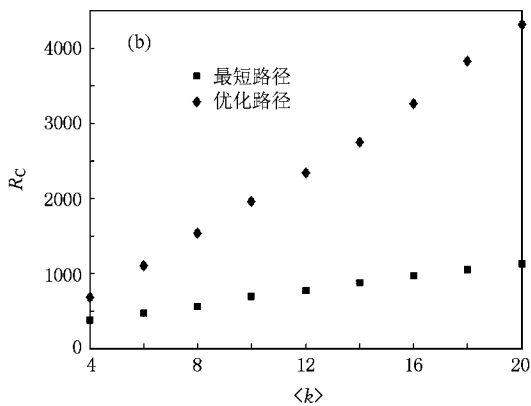
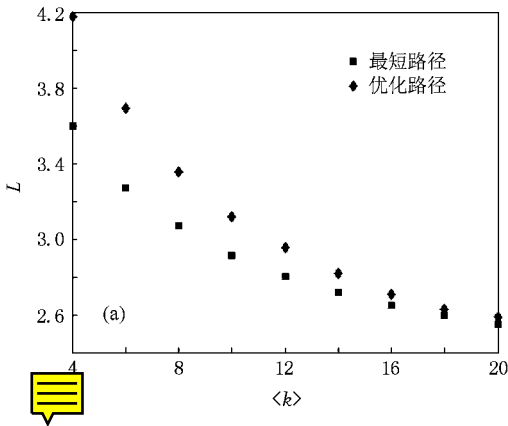


图 8 BA 网络平均节点度对优化路由策略性能的影响(网络节点数 $N = 1000$) (a) 平均路径长度与平均节点度的关系；
(b) 网络临界负载量与平均节点度的关系

径.在保持复杂网络小世界特性的同时,实现了负载在网络度高节点和度低节点之间的合理分布.在不增加或略增加平均路径长度的前提下,大大提升了网络的承载能力.对网络临界负载量、节点平均路由中心度、负载分布以及平均负载传递时间等特征量

4. 结 论

网络的负载传输性能从微观角度看,表现为单个负载的传递时间,即节点间的平均路径长度;从宏观系统角度看,则表现为非阻塞状态下,单位时间内网络所能承载的最大负载量.因此,高性能的路由策略不仅要缩短负载的传输路径,而且要尽可能的提高整个网络的承载能力.基于此,本文针对复杂网络的无标度特性提出了一种基于节点度的优化路由策略.该策略将源节点和目标节点间所有可能路径中,途经节点度的连乘积最小者作为负载传送的最佳路

的分析表明,该策略的性能远远优于传统的最短路由策略以及有效路由策略.因此,对于小规模或中等规模网络,优化路由策略具有极高的实用价值.即使对于大规模网络也可通过将其划分为多个子网的方式来运用该策略实现高效路由.

[1] Newman M E J 2003 *SIAM Review* **45** 167

[2] Albert R, Jeong H, Barabási A L 1999 *Nature* **401** 130

[3] Liu H K, Zhou T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 106 (in Chinese) [刘宏鲲、周 涛 2007 物理学报 **56** 106]

[4] Yan D, Qi G N 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3799 (in Chinese) [闫 栋、祁国宁 2006 物理学报 **55** 3799]

[5] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440

[6] Guo J L, Wang L N 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5635 (in Chinese) [郭进利、汪丽娜 2007 物理学报 **56** 5636]

[7] Fang X L, Jiang Z L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7330 (in Chinese) [方小玲、姜宗来 2007 物理学报 **56** 7330]

[8] Zhang L, Liu Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5419 (in Chinese) [张 立、刘 云 2008 物理学报 **57** 5419]

[9] Zhu Z T, Zhou J, Li P, Chen X G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2874

[10] Li H, Maresca M 1989 *IEEE Trans. Comput.* **38** 1345

[11] Crovella M E, Bestavros A, 1997 *IEEE/ACM Trans. Netw.* **5** 835

[12] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509

[13] Moreno Y, Gómez J B, Pacheco A F 2002 *Europhys. Lett.* **58** 630

[14] Moreno Y, Pastor-Satorras R, Vázquez A, Vespignani A 2003 *Europhys. Lett.* **62** 292

[15] Holme P, Kim B J 2002 *Phys. Rev. E* **65** 066109

- [16] Crucitti P, Latora V, Marchiori M 2004 *Phys. Rev. E* **69** 045104 (R)
- [17] Zhao L, Lai Y C 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026125
- [18] Kinney R, Crucitti P, Albert R, Latora V 2005 *Eur. Phys. J. B* **46** 101
- [19] Wang D, Jiang N, Jing Y W, Yu H, Zhang S Y *Acta Phys. Sin.* (in Chinese) [王 丹、姜 囡、井元伟、于 灏、张嗣瀛 物理学报] (已接受)
- [20] Yin C Y, Wang B H, Wang W X, Yan G, Yang H J 2006 *Eur. Phys. J. B* **49** 205
- [21] Macri P A, Pastore y Piontti, Braunstein L A 2007 *Phys. A* **386** 776
- [22] Chen H L, Chen Z Q, Liu Z X, Yuan Z Z *Acta Phys. Sin.* (in Chinese) [陈华良、陈增强、刘忠信、袁著祉 物理学报] (已接受)
- [23] Wang W X, Wang B H, Yin C Y, Xie Y B, Zhou T 2006 *Phys. Rev. E* **73** 026111
- [24] Yan G, Zhou T, Hu B, Fu Z Q, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046108
- [25] Wang B H, Zhou T 2007 *J. Korean Phys. Society* **150** 134
- [26] Wang S P, Pei W J 2009 *Phys. A* **388** 514
- [27] Tanenbaum A S 1996 *Computer Networks* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall) p58
- [28] Noh J D, Rieger H 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 118701
- [29] Liu Z H, Ma W C, Zhang H, Sun Y, Hui P M 2006 *Phys. A* **370** 843
- [30] Yan W M, Wu W M 1991 *Data Structure* (Beijing: Tsinghua University Press) p188 (in Chinese) [严蔚敏、吴伟民 1991 数据结构 (北京:清华大学出版社) 第 188 页]
- [31] Huitema C 2000 *Routing in the Internet* (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall) p120
- [32] Arenas A, Díaz-Guilera A, Guimerà R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3196
- [33] Erdős P, Rényi A 1959 *Publications Mathematicae* **6** 290
- [34] Newman M E J 2001 *Phys. Rev. E* **64** 016132
- [35] Newman M E J, Girvan M 2004 *Phys. Rev. E* **69** 026113

Optimal traffic routing strategy on scale-free complex networks *

Li Tao[†] Pei Wen-Jiang Wang Shao-Ping

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Received 24 February 2009; revised manuscript received 8 April 2009)

Abstract

In this paper, we propose a new routing strategy to improve the transportation performance on scale-free networks, named optimal routing strategy. It can proportionally distribute the traffic load between central nodes and the noncentral nodes. Analytical results indicate that by using the optimal routing strategy, the network capability in processing traffic is proportional to the square of the network size and is independent of each node degree. Simulations show that compared with the classic shortest path routing strategy, the new strategy can enhance the network capability several times with the small-world character and its performance is gradually improved with the increasing of the average degree. Moreover, the comparison with the efficient routing strategy also reveals the prominent performance of the new strategy.

Keywords: optimal routing strategy, complex networks, traffic transportation, network congestion

PACC: 0250, 0560, 0570J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60672095) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA11Z210).

[†] Corresponding author. E-mail: taoli@seu.edu.cn