

一类基于随机行走机理的优化路由改进策略*

王开 周思源 张毅锋[†] 裴文江 刘茜

(东南大学信息科学与工程学院, 南京 210096)

(2010年9月2日收到; 2011年1月17日收到修改稿)

在对随机行走过程的研究中发现: 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. 据此, 文章提出基于随机行走机理的优化路由改进策略. 该策略以节点度连乘积最小化为原则, 通过调节可变参数, 建立节点处理能力均匀分布的情况下最佳路由策略. 通过分析比较不同路由策略条件下平均路由介数中心度, 网络的临界负载量, 平均路径长度以及平均搜索信息量等性能指标, 研究结果表明, 此改进路由策略在保证网络平均路径长度较少增加的前提下, 使网络的传输能力获得最大幅度的提升.

关键词: 复杂网络, 路由策略, 负载传输

PACS: 89.75.-k

1. 引言

现实世界网络所蕴含的小世界效应^[1]、无标度特性^[2]、拓扑分形特征^[3]以及社团化结构等基本属性改变了人们以往基于规则网络和随机网络对复杂网络所建立的认识. 复杂网络理论作为复杂系统与复杂性科学研究的重要分支, 其目的在于揭示蕴涵于现实实体关系中的普遍规律, 并探索其在科学技术领域中的应用. 近年来, 随着 WWW 网、因特网、城市交通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. 如何提高现实网络的传输性能, 实现负载的高效传递则成为一个重要的研究领域. 研究表明, 尽管现实世界网络存在多种多样的形式, 但均可以将其简化为节点以及节点间连接关系的集合, 因此研究复杂网络最佳路由问题无疑具有极大的理论意义与实用价值.

目前, 一般可以通过两个方面提高网络传输能力, 即优化网络的拓扑结构和设计最佳路由策略. 由于更改已知网络的拓扑结构比较困难且开销较大, 因此更多的研究主要集中于寻找合适的路由策略方面. 其中, 最短路径路由策略(简称为 SR)是应

用最为广泛的全局路由策略^[4], 并已成为目前 Internet 主要路由方法. 文献[5]对该策略下的网络阻塞发生条件进行了研究, 发现无标度网络节点度的异构性导致节点介数的强异构性, 使得阻塞易发生在该部分高介数节点上. 文献[6—10]则提出了局域信息路由策略(简称为 LR): 数据包根据各个邻居节点的局部信息以 $\Pi_{l \rightarrow i} = k_i^\alpha / \sum_j k_j^\alpha$ 的概率随机选择一步路由策略. 在节点处理能力相同的情况下, 理论推导出当 $\alpha = -1$ 时, 网络的负载分布最为均匀, 整体传输能力达到最大. 与此同时, 文献[11, 12]提出有效路由策略(简称为 ER). 已知源节点 i 和目标节点 j , 该路由策略通过最小化代价函数: $p_{ij} = \min \sum_{n=0}^l k_n^\beta$ 选择路由路径 p_{ij} . 同样在节点处理能力相同的情况下, 发现当 $\beta = 1$ 时, 该策略有效的把网络负载从核心节点转移到边缘节点, 较多的利用了网络中度较小的节点, 在传输平均路径长度仍符合小世界网络特性的基础上, 相比于最短路径法将网络的传输能力提高了 10 倍以上.

最短路径路由策略, 局域信息路由策略以及有效路由策略构成了目前复杂网络路由问题研究中最基本的 3 类路由策略. 围绕这 3 类基础路由策略,

* 国家自然科学基金(批准号: 60672095, 60972165)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2007AA11Z210)、教育部博士点基金(批准号: 20100092120012, 20070286004)、江苏省高技术研究项目、江苏省自然科学基金(批准号: BK2010240)、国家十一五密码发展基金和国家火炬计划项目资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: yfz@seu.edu.cn

为进一步调高网络传输能力,各类改进算法相继提出.其中一类方法采用诸如节点队列长度信息、节点信息素等其他动态信息替换基础路由策略中节点度的信息^[13,14];另一类方法则根据邻居节点度、队列长度、全局拓扑结构和邻居节点排队等待时间等网络中各类静态或动态信息自适应调整路由策略^[15-17];此外,还有一类方法通过极值优化方法迭获得最优路由策略,例如,通过更改网络中边的权值以降低网络中最大介数值的最优路由优化策略^[18],以及规避网络中最大介数节点以找到次最短路径的路由策略^[19]等.

最近,我们在对随机行走过程的研究中发现: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^[20,21].该结果揭示了网络传输路径与节点度之间的内在联系.在此基础上,我们提出一类基于随机行走机理的优化路由策略^[22,23](简称为OR).该策略以节点度连乘积最小化为原则.研究表明,在路由策略下,网络中的负载分布与节点的度呈正比.当网络各个节点处理能力正比于节点度时,较之于最短路径路由策略和有效路由策略,该策略在平均路径长度上基本接近于最短路径的前提下,可以充分发挥各个节点的处理能力,最大限度地提高网络的承载能力,从而使得网络具有较高传输容量的同时拥有较短的负载传递时间.在上述研究的基础上,本文以基于随机行走机理的优化路由策略为基础,同样以节点度连乘积最小化为原则,通过调节可变参数,建立节点处理能力均匀分布的情况下最佳路由策略(简称为IR).通过分析比较不同路由策略条件下平均路由介数中心度,网络的临界负载量,平均路径长度以及平均搜索信息量等性能指标,研究结果表明,本改进路由策略在保证网络平均路径长度较少增加前提下,使网络的传输能力获得最大幅度的提升.

2. 基于随机行走机理的优化路由策略

研究发现,因特网、万维网等网络结构遵循着节点度呈幂率分布的无标度性,即 $P(k) = k^{-\gamma}$,其中 k 为节点度.为了方便与其他路由策略进行比较分析,我们采用 $\gamma = 3$ 的BA无标度网络模型.在网络中,节点数 $N = 1500$,BA网络参数 $m_0 = m = 3$,即网络平均度 $\langle k \rangle = 6$,每个节点都兼有宿主和路由器的功能,网络中每一步均随机的产生 R 个数据

包,这些数据包随机的选择目的节点.而节点 i 每步最多可以传输 C 个数据包,即节点处理能力相同,本文中设 $C = 5$.当数据包到达目的节点后将从网络中自动消失.同时,我们假设每个节点用于存放信息包的队列是无限长的,数据包在队列中也遵循先进先出的原则.

最近,我们在对随机行走过程的研究中发现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^[20,21].即给定网络中任意某条特定路径为 $C(l) = c_0 \cdots c_l$.那么粒子发现路径 C 的平均首达时间为

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

其中, k_i 为节点 i 的度, m 为网络的边数,参数 Φ 只与网络的拓扑结构有关.

该结果揭示了网络传输路径与节点度之间的内在联系.在此基础上,我们提出一类基于节点度连乘积最小化原则的优化路由策略^[22,23]:令 $i \equiv v_0, v_1, \dots, v_{n-2}, v_{n-1} \equiv j$ 为节点 i 到节点 j 的任意路径,优化路径 P_{opt} 可以通过下式求得:

$$P_{min}(l: i \rightarrow j) = \min \prod_{m=i}^j k_m, \quad (2)$$

用 $\ln(k_m)$ 代替 k_m , 变换(2)式可得

$$p(i \rightarrow j) = \min \sum_{n=0}^l \ln(k_n). \quad (3)$$

同有效路由策略相比,基于(3)式的优化路由策略选择 $\sum_{n=0}^l \ln(k_n)$ 而非 $\sum_{n=0}^l k_n$ 作为代价函数并最小化.

参考网络节点介数的概念,文献[22,23]定义平均路由介数中心度 $g(k)$ 以反映了不同度值节点在网络整体路由中所实际承担的负载

$$g(k) = \frac{1}{N} \sum_{k_s \neq l, k_i = k} \sigma_{st}(i), \quad (4a)$$

$$\sigma_{st}(i) = \begin{cases} 1 & v_s \rightarrow v_l \text{ 经过 } v_i, \\ 0 & v_s \rightarrow v_l \text{ 不经过 } v_i. \end{cases} \quad (4b)$$

其中, N_k 表示网络中度为 k 的节点的数量.图1分别给出了最短路径路由策略,及有效路由策略以及文献[22,23]所提的优化路由策略下,描述平均路由介数中心度与节点度的关系的 $g(k)-k$ 曲线.如图1(a)所示,最短路径策略中, $g(k)-k$ 曲线呈幂率关系: $g(k)-k^{1.7}$.如图1(b)所示,有效路由策略下 $g(k)-k$ 曲线呈类似泊松分布,在 $k = 15$ 附近 $g(k)$ 达到峰值.如图1(c)所示,优化路由策略下 $g(k)-k$

曲线呈现线性关系.

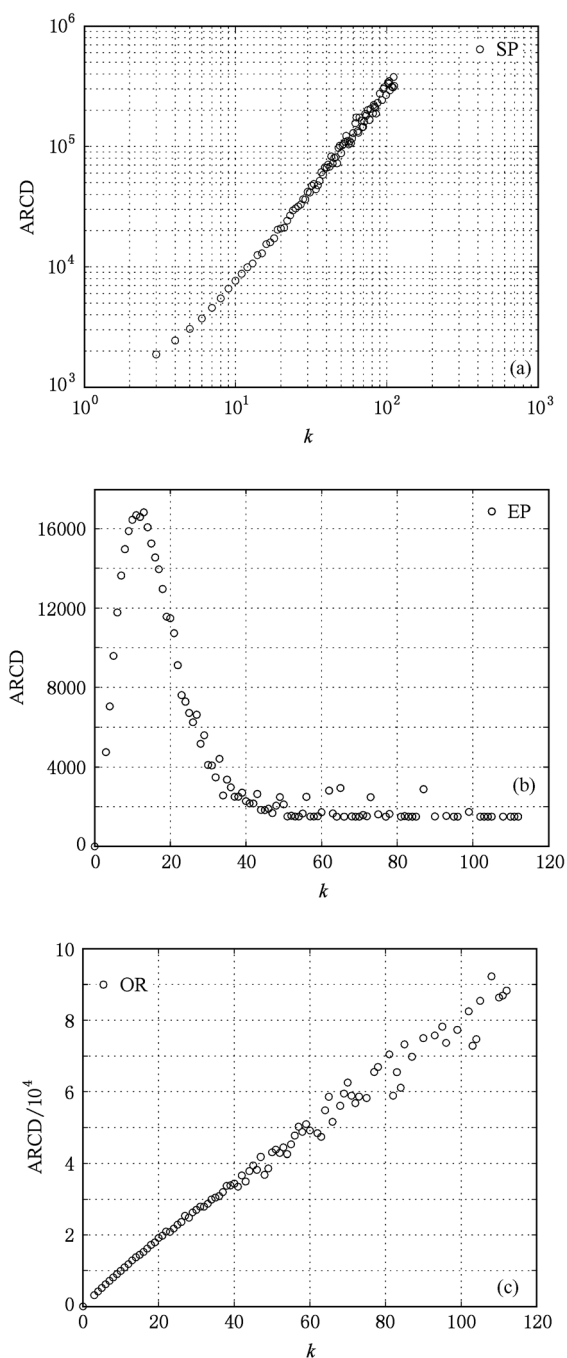


图1 BA网络中平均路由中心度(ARCD)的分布(网络节点数 $N = 1500$, 网络平均节点度 $\langle k \rangle = 6$) (a)采用最短路由策略; (b)采用有效路由策略;(c)优化路由策略

在具体的传输过程中,网络的传输能力与各个节点的处理能力间存在密切关系.当网络各个节点处理能力正比于节点度时,如图1(c)所示,由于优化路由算法使得平均路由介数中心度与节点的度间呈现线性关系,因此可以充分发挥各个节点的处理能力.相反考虑最短路径路由策略,如图1(a)所

示,对于节点度较小的节点,节点的实际承担负载和节点处理能力大致匹配,而随着 $g(k)$ 随节点度 k 幂率增长之后,对于节点度较大的节点,节点的实际承担负载超出了节点处理能力,负载阻塞将发生在节点度最大的节点上;对于有效路由策略,如图1(b)所示,呈泊松分布的平均路由介数中心度与节点度的关系完全无法充分发挥各个节点的处理能力,对于节点度较大的节点,其高处理能力没有充分发挥;而对于节点度较大小节点,处理能力又远不能满足实际的负载需求,大量的负载集中在 $k = 15$ 附近的节点上,并最终发生拥塞.此时各个节点的实际负载完全匹配节点的处理能力.因此较之于最短路径路由策略和有效路由策略,优化路由策略可以充分发挥各个节点的处理能力,最大限度地提高网络的承载能力,从而使得网络具有较高传输容量的同时拥有较短的负载传递时间.当网络各个节点处理能力正比于节点度时,试验结果表明,由于优化路由策略下,节点处理能力,节点的实际负载以及节点度三者完全匹配,此时网络具有最优传输性能.而由于最短路径路由策略下,阻塞发生在节点度较大的节点,此时网络的整体处理较强,因此网络具有次优传输性能.对于有效路由策略,由于阻塞发生在节点度较小的节点($k = 15$),此时网络的整体处理较弱,因此网络具有较差的传输性能.三种路由策略下,其 R_c 分别为 $R_c^{SR} = 372$, $R_c^{ER} = 315$, $R_c^{OR} = 920$.因此,在优化路由策略下,网络中的负载分布与节点的度成正比.当网络各个节点处理能力正比于节点度时,较之于最短路径路由策略和有效路由策略,该策略在平均路径长度上基本接近于最短路径的前提下,可以充分发挥各个节点的处理能力,最大限度地提高网络的承载能力,从而使得网络具有较高传输容量的同时拥有较短的负载传递时间^[22,23].

3. 各个节点处理能力相同情况下的改进路由策略

如上所述,在网络各个节点处理能力确定的情况下,只有当路由算法使得节点的平均路由介数中心度 $g(k)$ 完全匹配各个节点的处理能力时,网络才具有最优传输性能.如图1(c)所示,由于优化路由策略使得节点处理能力,节点的实际负载以及节点度三者完全匹配,因此当网络各个节点处理能力正比于节点度

时,该路由策略使得网络具有最优传输性能.而参考图 1(c)可以推知,在网络模型中的节点处理能力相同的条件下,理想的平均路由介数中心度与节点度的关系应该是一条幅值较低的水平线,其中幅值较低说明各个节点的网络负载都很低,关系呈现水平线则说明各个节点的网络负载相同.

在(3)式中引入控制参数 α , 可得

$$p(i \rightarrow j) = \min_{n=0}^l (\ln(k_n))^\alpha. \quad (5)$$

改进路由参数 α 的变化范围是 $\alpha \in (-\infty, \infty)$, 当 $\alpha = 0$ 时,改进路由策略即为传统意义上的最短路径策略;当 $\alpha = 1$ 时,改进路由策略即为文献[20]中所提出的优化路由策略.本文目的以(5)式为策略函数,通过调节控制参数 α , 得到节点处理能力均匀分布时数据包的最佳传输途径.不同控制参数 α 条件下,基于(5)式路由规则下平均路由介数中心度与节点度的关系如图 2 所示.

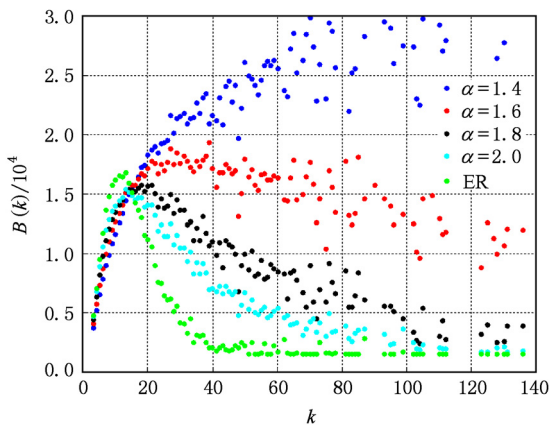


图 2 不同参数下不同控制参数 α 条件下,基于(3)式路由规则下平均路由介数中心度与节点度的关系,其中绿色点组成的曲线表示有效路由策略下平均路由介数中心度与节点度的关系

可以看出,当 $\alpha = 1.8, 2.0$ 时, $g(k)$ 的整体幅值小于 $\alpha = 1.4, 1.6$ 时 $g(k)$ 的整体幅值,这说明当 $\alpha > 1.6$ 时,各个节点的网络负载较小.进一步比较 $\alpha = 1.8, 2.0$ 时以及有效路由策略下的 $g(k)$, 可以发现,当 $k > 20$ 只有, $\alpha = 1.8$ 时的 $g(k)$ 曲线下降的较为缓慢,因此也更加接近于水平.综合考虑,通过图 2 不同控制参数条件下的 $g(k)-k$ 曲线,我们可以推知结论当 $\alpha = 1.8$ 时,网络传输能力最强.

4. $\alpha = 1.8$ 时改进路由策略性能分析

单位时间内新增数据包的临界值 R_c 是衡量一

个路由策略的性能的重要参考指标.为了得到 R_c 值,一方面, Arenas 定义了有序参数

$$\eta(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{R} \frac{\langle \Delta W \rangle}{\Delta t}. \quad (6)$$

其中, N 为网络节点数, $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t)$, $W(t)$ 为 t 时刻网络的总负载量, $\langle \dots \rangle$ 表示基于时间窗 Δt 的平均.随着网络中单位时间内新增数据包量 R 的变大,网络会由无拥塞状态过度到拥塞状态,其间存在一个临界值 R_c .当 $R < R_c$ 时,各个节点接收的数据包的平均值小于或等于其处理能力,网络中总数据包量没有明显的增加,即 $\langle \Delta W \rangle = 0$, 所以 $\eta(R) = 0$, 网络处于无拥塞状态,当 $R > R_c$ 时,某些节点接收的数据包量明显大于其处理能力, $\langle \Delta W \rangle > 0$, $\eta(R) > 0$, 且随着时间的推移,该节点队列长度不断增长,拥塞状况也会迅速的扩散到其他节点处,使整个网络进入拥塞状态. R_c 是能够保证网络处于无拥塞状态时的最大单位时间新增数据包量,因此可以衡量一个网络的整体传输能力.

另一方面,我们也可以通过如下公式估算出 R_c 值:

$$R_c = C \times N(N - 1) / g_{\max}. \quad (7)$$

其中 g_{\max} 为网络中采取最短路径策略时的介数中心度最大值.在本文中,我们引入路由参数 α , 定义 g_{\max}^α 是网络中介数中心度的最大值.因此(7)式可以改写为

$$R_c(\alpha) = C \times N(N - 1) / g_{\max}^\alpha. \quad (8)$$

我们在各个不同规模的网络中,随机取 10 组数据取平均值估算出对应于不同参数 α 的临界值 R_c .结果如图 3 所示,在 $N = 500, N = 1000, N = 1500$ 三种规模的网络中, $\alpha = 1.8$ 时对应的 R_c 值均可以达到最大,与第三节中基于 $g(k)-k$ 曲线所推测出的结论相同.此外,随着网络规模的增大,网络能达到的最大 R_c 值也在增加.图 3 中的实线是通过(8)式计算出的对应于各个路由策略的 R_c 与 α 的关系曲线,可以发现 $\alpha = 1.8$ 为本文路由策略的最优 α 值.

图 4 为各自路由策略的 $\eta-R$ 曲线.对应这三种路由策略,网络的临界负载量分别为: $R_c^{SR} = 28, R_c^{ER} = 433, R_c^{IR} = 522$, 而这三种策略的平均路径长度分别为: $L_{SR} = 3.59, L_{ER} = 5.43, L_{IR} = 4.71$.我们通过比较发现,与最短路径策略相比,改进路由策略将网络的负载能力提高了 18.6 倍,平均路径长度只增加了 31%;而有效路由策略将网络的负载能力提高了 15.5 倍,平均路径长度却增加了 51%.因

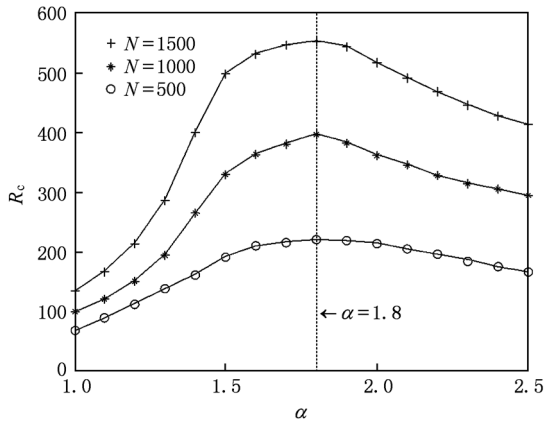


图3 BA网络中 R_c 与 α 的关系图 ($N = 500, N = 1000, N = 1500$) (点表示仿真结果,实线表示解析结果)

此,改进路由策略在网络平均路径长度只有较小增加的前提下,大幅度的提高了网络的临界负载量.

同时,我们也比较了这三种路由策略的 $\langle T \rangle$ - R 曲线,如图5所示,根据此图得出的临界负载量值与图3的结果完全符合,从而验证了仿真结果的正确性.

由(8)式可知,临界负载量 R_c 值与网络的最大介数中心度呈反比关系.因此提高网络的 R_c 值,即可以转化为降低网络的最大介数中心度.而统计随着网络规模的增大,最大介数中心度的变化规律,成为衡量路由策略是否优秀的一个标准:最大介数中心度伴随网络规模增长的越慢,说明该路由策略越优秀.由图6所示,改进路由策略的最大介数中心度与网络规模呈幂率关系: $g_{\max} \propto N^\alpha$, 并且 $\alpha_{\text{IR}} = 1.2$.图中同时也显示了另外两种路由策略的变化关系,发现最短路径策略中 $\alpha_{\text{SR}} = 2.0$, 而有效路由策略中 $\alpha_{\text{ER}} = 1.3$.通过对比我们发现改进路由策略的最大介数中心值始终小于另外两个策略的对应值,因此表现在图7的 R_c - N 曲线中,改进路由策略的临界负载量相对于最短路径策略和有效路由策略有明显的优势.同时,我们也比较了网络平均度发生变化时,各种路由策略所对应的 R_c 值,如图8所示,随着网络平均度 $\langle k \rangle$ 的增加,改进路由策略所对应的 R_c 始终优于最短路径策略和有效路由策略.

路由策略的优劣不仅与网络的临界负载量有关,平均路径长度也是一个重要的衡量标准.随着网络规模的增大,平均路径长度也会相应增加,而路由策略是否能使网络满足 Watts 和 Strogatz 提出

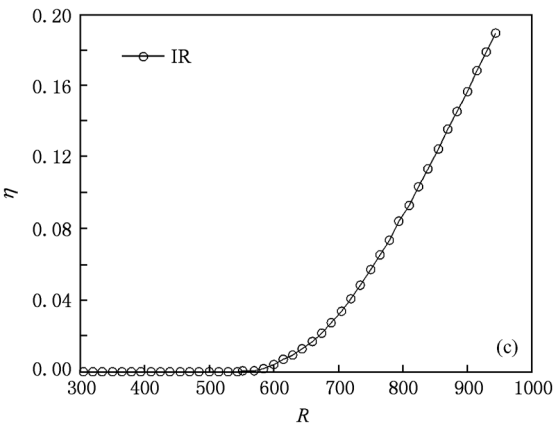
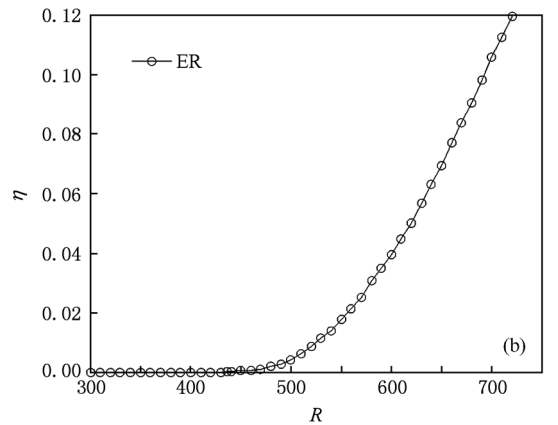
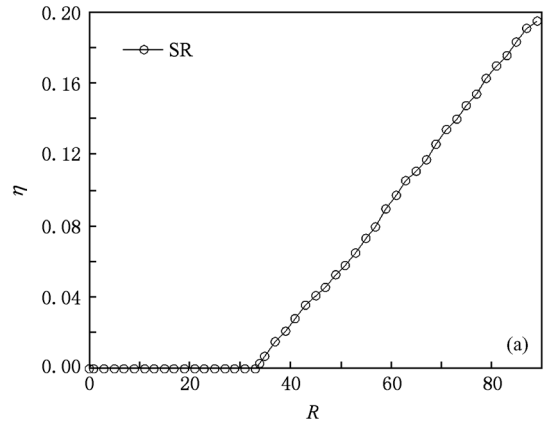


图4 BA网络中 η - R 关系曲线 (a)采用最短路径策略;(b)采用有效路由策略;(c)采用改进路由策略

的小世界效应,即网络的平均路径长度与网络的规模呈对数关系,是衡量一个路由策略是否有效地另一个重要指标.在有效路由策略中已经证明了该策略的平均路径长度相对于网络的规模呈对数关系,我们通过图9反映出改进路由策略的平均路径长度也遵循 $L_{\text{IR}} \propto \ln N$ 的关系,从而使网络满足小世界特性.在图10中,我们表示了在不同平均度的网络中,平均路径长度的对比,由图所示,本策略的平均路

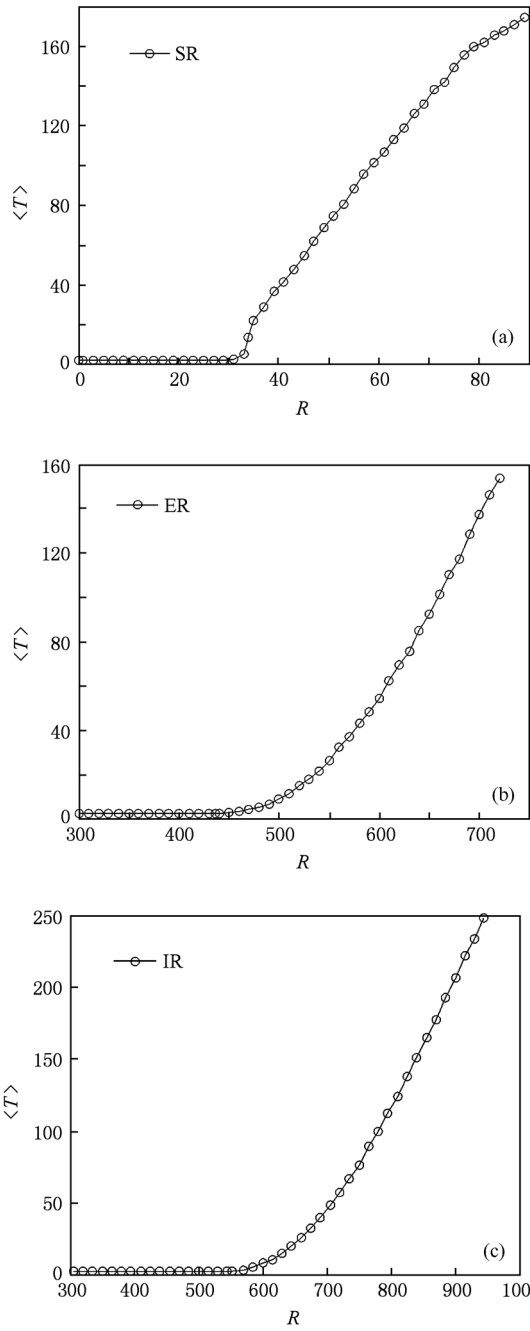


图5 BA网络中 $\langle T \rangle$ - R 关系曲线 (a)采用最短路径策略; (b)采用有效路由策略;(c)采用改进路由策略

径长度虽然大于最短路径策略,但是明显小于有效路由策略.因为网络平均路径长度的大小直接影响到传输的效率和成本,所以改进路由策略具有很大的实际应用价值.

此外,为了衡量在网络中搜寻目标节点的难易程度,文献[24,25]定义了搜索信息量 S .首先,假设节点传递数据包的时候是随机选择下一个目标节点的,且不会把数据包传递回上一个节点,那么

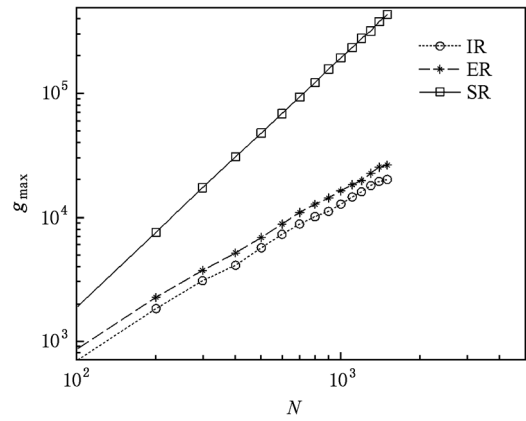


图6 BA网络中最大介数中心值与网络规模的关系(网络平均节点度 $\langle k \rangle = 6$)

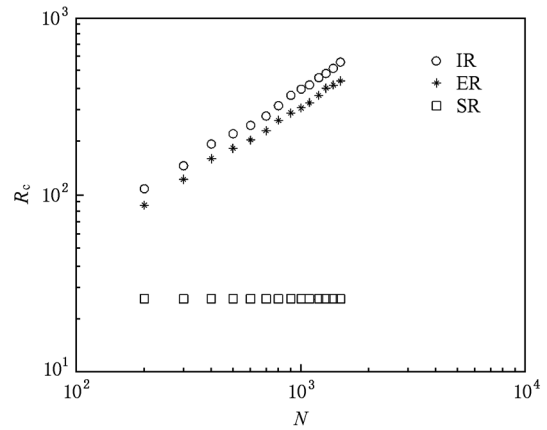


图7 BA网络中临界负载量值与网络规模的关系(网络平均节点度 $\langle k \rangle = 6$)

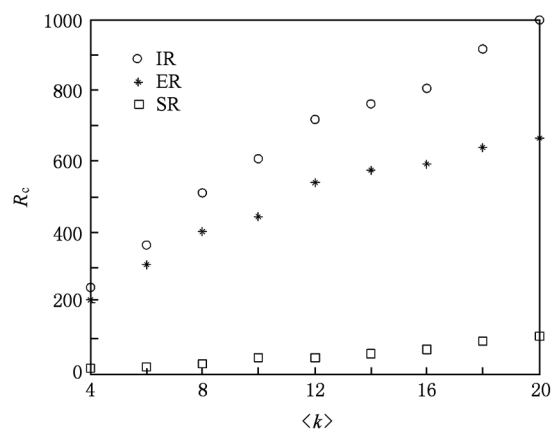


图8 BA网络中临界负载量值与网络平均度的关系(网络节点数 $N = 1500$)

对于节点 i 与节点 j 之间的某条路径 $p(i \rightarrow j)$ 被搜

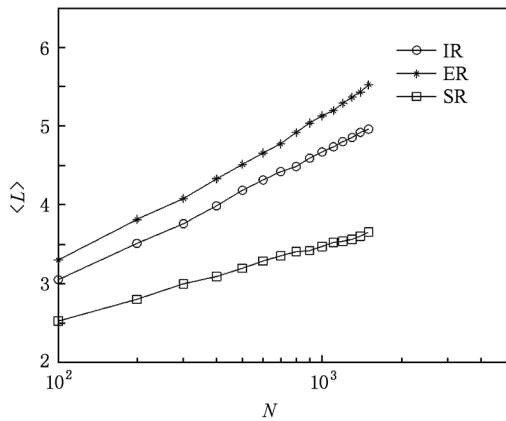


图9 网络平均路径长度与网络规模的关系(网络节点数 $N = 1500$, 网络平均节点度 $\langle k \rangle = 6$)

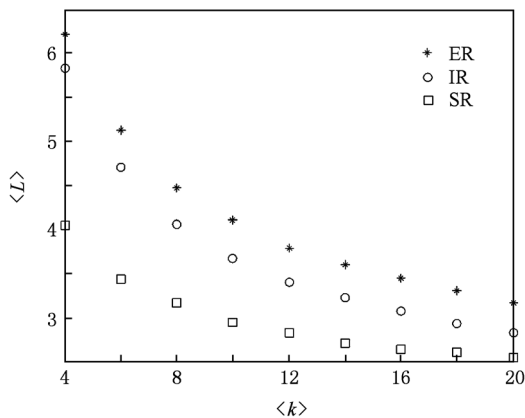


图10 BA网络中平均路径长度与网络平均度的关系(网络节点数 $N = 1500$)

索到的概率就为

$$P\{p(i \rightarrow j)\} = \frac{1}{k_i} \prod_{n \in p(i \rightarrow j)} \frac{1}{k_n - 1}. \quad (9)$$

其中 n 表示从节点 i 到节点 j 之间的路径中除去出发节点和目标节点之外的所有节点, $k_n - 1$ 表示数据包传到节点 n 点时, 不会传回上一个节点, 因此只有 $k_n - 1$ 个选择. 如果节点 i 到节点 j 之间有多条路径可以传递, 节点 i 到节点 j 的搜索信息量便被定义为

$$S(i \rightarrow j) = -\log_2 \left(\sum_{p(i \rightarrow j)} P\{p(i \rightarrow j)\} \right). \quad (10)$$

其中(10)式中的求和部分是节点 i 到节点 j 之间的所有路径求概率之和, 而在本文中两节点之间有且仅有一条路径可以传递信息. 文献[24,25]据此定义了平均搜索信息量 S_{ave} , 用来表示生成整个网络的路由表所需要的平均信息量

$$S_{ave} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_i \sum_j S(i \rightarrow j). \quad (11)$$

其中 $N(N-1)$ 是指网络路由表中总共有 $N(N-1)$ 条路径. S_{ave} 越小, 说明搜索网络中的节点所需要的信息量越小, 路由策略的传输效率越高. 因此, 图11与图12反映了对应不同规模和不同平均度的网络, 采用各种路由策略后 S_{ave} 的变化, 通过比较我们发现, 改进路由策略的平均搜索信息量始终小于其他两个策略, 因此我们可以得出, 改进路由策略能使网络具有更好的传输能力.

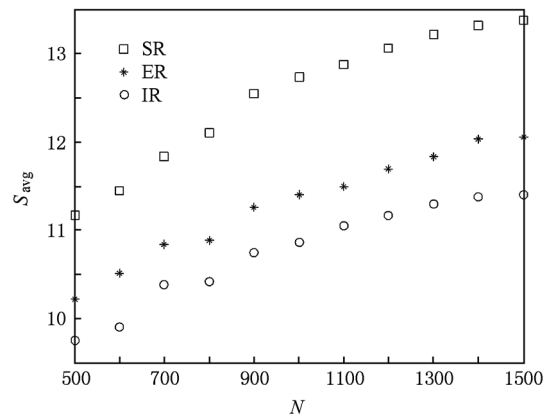


图11 平均搜索信息量与网络规模的关系(网络平均节点度 $\langle k \rangle = 6$)

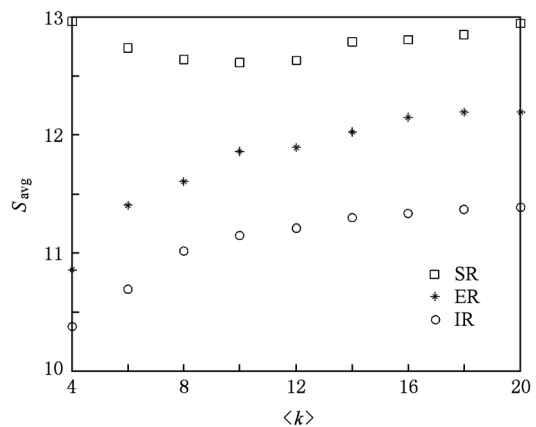


图12 平均搜索信息量与网络平均度的关系(网络节点数 $N = 1500$)

5. 结 论

本文研究了节点处理相同的情况下, 以文献[22,23]提出的优化路由为基础, 不同控制参数情况下的网络传输质量. 通过比较通过分析比较不同

路由策略条件下平均路由介数中心度,网络的临界负载量,平均路径长度以及平均搜索信息量等性能指标,研究表明,当 $a = 1.8$ 时,本改进路由策略在保证网络平均路径长度较少增加的前提下,使网络的传输能力获得最大幅度的提升.

在具体的传输过程中,网络的传输能力与各个节点的处理能力间存在密切关系.在网络各个节点处理能力确定的情况下,只有当路由算法使得节点的平均路由介数中心度 $g(k)$ 完全匹配各个节点的处理能力时,网络才具有最优传输性能.在网络模型中的节点处理能力相同的条件下,理想的平均路

由介数中心度与节点度的关系应该是一条幅值较低的水平线.尽管本文提出的路由策略较之最短路径路由策略,有效路由策略,进一步的提高了网络性能,但是由于没有理想的实现节点的实际负载,节点处理能力以及节点的完美匹配,因此网络性能还有进一步提高的可能性.在下一步所需开展的工作中,我们将采用自适应的方式,通过比较 $g(k)$ - k 曲线,动态调整各个节点的实际负载,一方面降低各个节点的负载,另一方面将负载均匀分布在各个节点上,从而进一步提供网络传输性能.

-
- [1] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [2] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [3] Song C, Havlin S, Makse H A 2006 *Nature* **433** 392
- [4] Zhao L, Park K, Lai Y C 2004 *Phys. Rev. E* **70** 035101
- [5] Zhao L, Lai Y C, Park K, Ye N 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026125
- [6] Wang W X, Wang B H, Yin C Y 2006 *Phys. Rev. E* **73** 026111
- [7] Wang W X, Yin C Y, Yan G, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **74** 016101
- [8] Hu M B, Wang W X, Jiang R 2007 *Phys. Rev. E* **75** 036102
- [9] Ling X, Hu M B, Jiang R, Wang R L, Cao X B, Wu Q S 2009 *Phys. Rev. E* **80** 066110
- [10] Liu Z, Hu M B, Jiang R, Wang W X 2007 *Phys. Rev. E* **76** 037101
- [11] Yan G, Zhou T, Hu B 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046108
- [12] Yin C Y, Wang B H, Wang W X, Yan G, Yang H J 2006 *Eur. Phys. J. B* **49** 205
- [13] Ling X, Hu M B 2010 *Phys. Rev. E* **81** 016113
- [14] Ling X, Hu M B 2009 *Phys. Rev. E* **80** 066110
- [15] Wang W X, Yin C Y 2006 *Phys. Rev. E* **74** 016101
- [16] Zhang H, Liu Z 2007 *Phys. Lett. A* **364** 177
- [17] Shen Y, Pei W J, Wang K 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3783
- [18] Danila B, Yu Y 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046106
- [19] Ramasco J J, Lama M, Lopez E, Boettcher S *arXiv*: 1006.0711v1
- [20] Wang S P, Pei W J 2009 *Physica A* **388** 514
- [21] Wang S P, Pei W J *arXiv*:1007.1809v1, 2010
- [22] Tao L, Pei W J, Wang S P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5903 [李涛、裴文江、王少平 2009 物理学报 **58** 5903]
- [23] Wang K, Zhang Y F, Zhou S Y, Pei W J, Li T, Wang S P, Optimal routing strategy based on random walk on complex networks, *Physica A* (accepted)
- [24] Sneppen K, Trusina A, Rosvall M, *arXiv:cond-mat/040755v1* 2004
- [25] Rosvall M, Trusina A, Minnhagen P, Sneppen K 2005 *Phys. Rev. Lett.* 94028701

A modified optimal routing strategy based on random walk on complex networks^{*}

Wang Kai Zhou Si-Yuan Zhang Yi-Feng[†] Pei Wen-Jiang Liu Qian

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

(Received 2 September 2010; revised manuscript received 17 January 2011)

Abstract

In our original contributions, we found that the time which a random walker spends in finding a given path is directly proportional to the continued product of the degrees of all the nodes which pass through the given path. In this paper, with our original contributions, we give a modified routing strategy to improve the capacity of the network when all nodes have the same packet-delivery rates. We define an average routing centrality degree of the node to analyze the traffic load on the node with different degrees, and then we analyze the transportation capacity by using the critical value of R_c , the average packet travel time, the average path length and the search information. Both theoretical and experimental results show that compared with the shortest path strategy and the efficient path strategy, the new strategy can enhance the network capability.

Keywords: complex networks, routing strategy, traffic transportation

PACS: 89.75.-k

^{*} Projected supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60672095, 60972165), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA11Z210), the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (Grant Nos. 20100092120012, 20070286004), the Foundation of High-Technology Project in Jiangsu Province, the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2010240), the Special Scientific Foundation for the "Eleventh-Five-Year" Plan of China, and the National Torch Plan of China.

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