

一种基于节点资源利用率的无标度网络路由策略*

徐鹏程, 宏 晨

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要:如何实现网络负载的高效传输是复杂网络领域研究的最重要的问题之一。本文研究了节点负载处理能力异质条件下的无标度网络交通动力学过程,提出了一种基于节点资源利用率的全局动态路由策略。该策略利用网络中节点资源利用率构建了一种全局代价函数,选择使该代价函数最小的路径来进行负载传输。仿真实验结果表明该路由策略使得网络负载与节点处理能力之间得到合理匹配,以略微增加平均传输路径长度为代价,成倍地提高了网络临界新增负载量,与有效路由策略的比较进一步验证了该路由策略的网络负载传输高效性。

关键词:无标度网络;路由策略;节点资源利用率;网络拥堵

中图分类号:TP316 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)05-0109-05

A global dynamic routing strategy based on capacity utilization ratio on scale-free networks

XU Pengcheng, HONG Chen

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: How to improve the transmission efficiency is one of the most important problems in complex networks. Thus the traffic dynamic for scale-free networks with heterogeneous node capacity is studied, and a global dynamic routing strategy based on capacity utilization ratio (CUR routing) is proposed to improve the networks' transportation performance. The CUR routing strategy chooses the route according to the minimum value of the cost function which is based on the utilization ratio of node capacity. Simulation results show that, compared with the classic shortest path routing strategy, the CUR routing strategy can enhance the network capacity several times than the at the cost of a slightly growth in the average path-length. Moreover, the comparison with the efficient routing strategy also reveals the prominent performance of the CUR routing strategy.

Key words: scale-free network; routing strategy; capacity utilization ratio; network congestion

近年来,随着真实网络的小世界和无标度等统计特性被陆续发现,人们对自然界和人类社会中存在的复杂网络展开了广泛的研究^[1-4]。研究的热点主要集中在疾病传播^[5-7]、网络控制^[8-10]、演化博弈^[11-14]、级联失效^[15-17]以及交通动力学^[18-20]等领域。

现代社会中,互联网、交通运输网、万维网等网络发挥着越来越重要的作用。随着人类活动对这些网络依赖性的不断增强,网络的交通动力学特性逐渐引起人们的关注。为了使网络能正常发挥其功能,必须保证网络处于自由流通状态。因此,缓解拥堵和提高负载传输性能的网络交通动力学成为研究的重点。该领域的研究工作主要围绕两个方面展开:一是改变网络的拓扑结构;二是研究更优的路由策略。由于改变网络拓扑结构成本较高且不易实现,因此大量的研究都集中在寻找能够有效缓解网络拥堵的路由策略上。路由策

略方面的研究大致可以分为局部路由和全局路由两类。局部路由包括随机游走^[21-23]、一阶邻居搜索^[24]、二阶邻居搜索^[25]、局部信息与动态信息混合路由策略等^[26]。全局路由包括最短路由^[27]、有效路由^[18]、全局动态路由^[28]等路由策略,该类研究主要是通过最小化某种代价函数来选择负载传输的最佳路径。

目前,路由策略的研究通常是假设网络中所有节点具有相同的处理能力,从而忽略了节点处理能力对网络负载传输性能的影响。然而,实际网络中的节点处理能力大多不同,例如对空中交通网络而言,枢纽机场往往具有较大的吞吐量。网络节点处理能力异质条件下如何设计高效的路由策略较少获得关注。据此,本文在节点处理能力异质的条件下,提出了一种基于网络节点资源利用率的全局动态路由策略,并通过仿真实验对其负载传输性能进行了验证。

* 收稿日期:2013-05-08

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAG04B01);国家部委资助项目

作者简介:徐鹏程(1985—),男,江苏盐城人,博士研究生,E-mail:buaa_xupengcheng@163.com

1 网络交通动力学模型及路由策略

现实世界中的复杂网络尤其是交通网络大多为无标度网络^[29],本文选用最典型的 BA 无标度网络作为承载交通流的网络拓扑结构。其构造算法如下

(1) 拓扑生长:从一个具有 m_0 个节点的网络开始,每次引入一个新的节点,并且连接到 m 个已存在的节点上,这里 $m \leq m_0$ 。

(2) 优先连接:一个新节点与一个已经存在的节点 i 连接的概率 Π_i 与节点 i 的度 k_i 、节点 j 的度 k_j 之间满足如下关系:

$$\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (1)$$

由此构造出的 BA 无标度网络具有较短平均路径长度和较低聚类系数的特性,其度分布可以用幂律函数来近似描述。

1.1 网络交通动力学模型

本文采用的网络交通动力学模型构造方法如下:

(1) 每一时间步,网络中产生 R 个负载,随机选取其目标节点和源节点,所有节点兼有转发和接收负载的功能。

(2) 假设节点处理能力与该节点的度成正比,即每个时间步度为 k 的节点最多可处理 $C(k) = k$ 个负载。

(3) 假设每一节点处等待传递的队列长度为无限长,并按照先进先出(First In First Out, FIFO)的规则依次进行传输,当负载传输到目标节点,则从网络中删除该负载。

在上述网络交通动力学模型中,随着单位时间内新增负载量 R 的逐渐增大,网络将由自由流通态进入拥堵态,其间存在一个临界新增负载量 R_c 。本文借助序参数 η 与 R 的关系来分析上述网络状态的变化,设

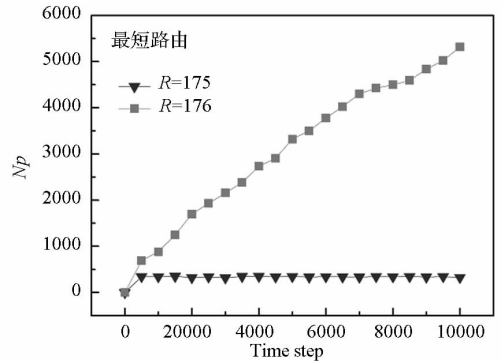
$$\eta(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C}{R} \frac{\langle \Delta N_p \rangle}{\Delta t} \quad (2)$$

其中 $\Delta N_p = N_p(t + \Delta t) - N_p(t)$, $N_p(t)$ 为 t 时刻网络的总负载量, $\langle \cdot \rangle$ 表示基于时间窗 Δt 取平均^[30]。当 $R < R_c$ 时,网络的新增负载量与可传输负载量基本相等,此时网络处于自由流通态;当 $R > R_c$ 时,部分节点的负载处理能力将小于其接收的负载量,此时网络将出现拥堵。由此可见,临界负载量 R_c 能够很好地刻画网络整体交通性能。

1.2 路由策略

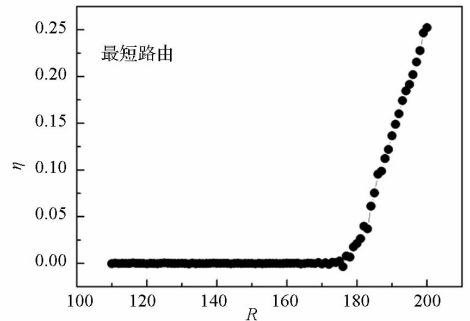
最短路由策略已被人们熟知并被广泛应用于

各种网络,本文先对最短路由策略在网络节点处理能力异质条件下的传输性能进行分析。本文仿真实验均采用初始网络节点个数 $m_0 = m = 2$ 、网络规模 $N = 500$ 的 BA 无标度网络。图 1(a) 为采用最短路由策略时网络中负载随时间变化曲线,从图中可以看出,当新增负载量 $R = 175$ 时,网络中负载量基本平稳,网络处于自由流通态;当新增负载量 $R = 176$ 时,网络中负载量不断累积增多,网络此时进入拥堵态。从图 1(b) 的 $\eta - R$ 对比曲线也可看出序参数在 $R = 175$ 处发生相变,表明此时最短路由策略的临界负载量 $R_c = 175$ 。



(a) 网络中负载总量随时间变化曲线

(a) The evolution of packet number



(b) $\eta - R$ 曲线

(b) $\eta - R$ curve

图 1 最短路由策略网络负载随时间变化及 $\eta - R$ 曲线

Fig. 1 The evolution of packet number and $\eta - R$ curve under the shortest path routing strategy

最短路由策略通常会选择度值较高的核心节点来传输信息包,甚至可能在一条最短路径上经过多个核心节点,在网络节点负载处理能力异质的条件下,由于核心节点拥有更大的处理能力,因此,当网络处于自由流通态时,最短路由策略能取得较好效果,但随着新增负载量 R 的增加,即使核心节点拥有较大处理能力,过分依赖核心节点也会造成其负载过重,从而导致网络拥堵。所以在网络节点处理能力异质条件下设计路由策略时,需考虑节点负载与处理能力的实时匹配状态。据此,本文提出一种基于节点资源利用率的全局动态路由(Global dynamic routing strategy based on capacity

utilization ratio,以下简称 CUR 路由策略),这里资源指节点处理能力,定义节点资源利用率为

$$U(i) = \frac{n(v_i)}{C(v_i)} \quad (3)$$

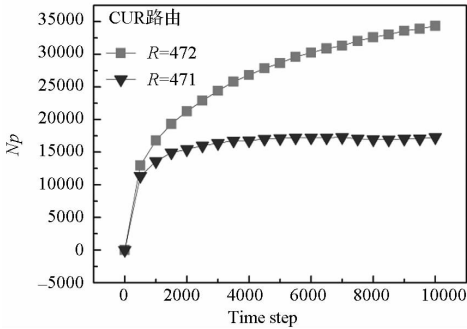
其中 $n(v_i)$ 为在节点 v_i 排队的负载量, $C(v_i)$ 为节点 v_i 的处理能力,在节点 v_i 到节点 v_j 之间所有路径中,选择途经节点的资源利用率之和最小的一条路径来传输负载,设 $v_i \equiv v_0, v_1, \dots, v_{n-2}, v_{n-1} \equiv v_j$ 为节点 v_i 到节点 v_j 的任意路径,则负载传输路径可通过下式求得:

$$P(v_i \rightarrow v_j) = \min \sum_{i=0}^{n-1} \left[1 + \frac{n(v_i)}{C(v_i)} \right] \quad (4)$$

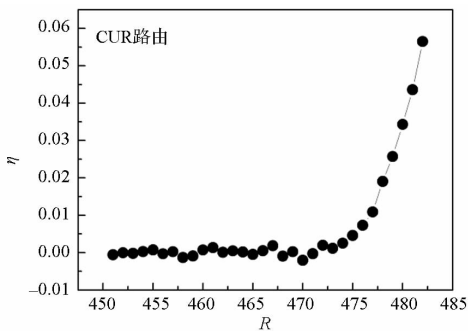
通过该公式求得的路径可以综合考虑到网络中节点实时的资源利用率信息,使节点的负载与处理能力得到相应的匹配,实现网络负载的高效传输。

2 仿真实验及结果分析

本节对所提出 CUR 路由策略的负载传输性能进行仿真实验。首先看网络在不同新增负载量 R 下负载随时间变化情况及 $\eta - R$ 对比曲线。从图 2(a) 中可以看出,当 $R = 471$ 时,网络中负载总数基本保持稳定,而当 $R = 472$ 时,网络中的负载不断累积增加,表明网络陷入拥堵。从图 2(b) 中的 $\eta - R$ 看出序参数在 $R = 471$ 时发生相变,得出 CUR 路由策略的临界负载量 $R_c = 471$,可见 CUR 路由策略能有效提升网络临界负载量。



(a) 网络中负载总量随时间变化曲线
(a) The evolution of packet number



(b) $\eta - R$ 曲线
(b) $\eta - R$ curve

图 2 CUR 路由策略网络负载变化及 $\eta - R$ 曲线
Fig. 2 The evolution of packet number and the $\eta - R$ curve under the CUR routing strategy

平均传输距离反映了负载在网络中传输距离的大小,更小的平均传输距离意味着更优的负载传输性能。图 3 为 CUR 路由策略和最短路由策略在不同网络规模下的平均传输距离对比。如图 3 所示,当网络规模 $N = 500$ 时,两种路由策略的平均传输距离分别为 $L_{\text{最短路由}} = 3.89$ 和 $L_{\text{CUR}} = 4.37$ 。可见 CUR 路由策略仅以增加 12.3% 的平均传输距离,就将网络临界负载量提高了 2.69 倍。

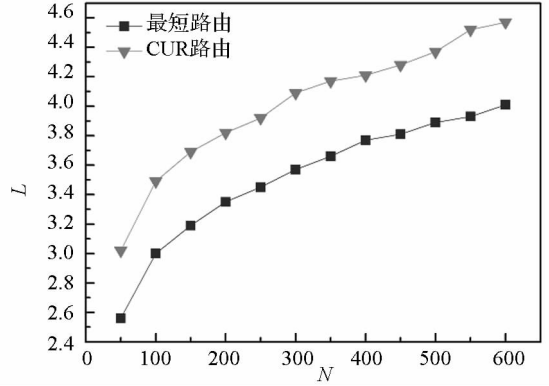


图 3 两种路由策略平均传输距离对比

Fig. 3 Average path-lengths versus network size N under two routing strategies

网络平均传输时间是衡量路由策略负载传输效率的重要标准之一,定义负载平均传输时间为

$$\langle T \rangle = \frac{1}{N(F)} \sum_{i \in F} T_i \quad (5)$$

其中 $N(F)$ 为特定时间内传输成功的负载量, T_i 为负载 i 的传输时间。图 4 为两种路由策略的平均传输时间与新增负载量 R 的关系。当网络处于自由流通态时,负载将以极短的时间完成从源节点到目标节点的传输。随着新增负载量的逐渐增大,直到超过临界负载量 R_c ,负载的平均传输时间也将随之逐渐增大。对照图 2 可以发现,图 4 中的临界值与上文通过 $\eta - R$ 得到的 R_c 保持一致,再次验证了 CUR 路由策略有效性。

为揭示 CUR 路由策略提升网络负载传输性能的内在机理,对两种路由策略的负载分布进行统计分析,定义网络节点的平均负载为

$$Load(k) = \frac{1}{N(k)} \sum_{k_i=k} Np(k_i) \quad (6)$$

其中 $N(k)$ 为度值等于 k 的节点的数量, $Np(k_i)$ 为单位时间经过节点的负载量。负载分布反映了不同度值节点所承载的负载量,同时也从另一角度反映了不同度值节点在负载传输过程中所发挥作用的大小。图 5 为两种路由策略在网络不同状态的负载分布。当 $R = 50$ 如图 5(a) 所示,最短路由策略和 CUR 路由策略的负载分布基本保持一致,所有节点上的负载均未超过其处理能力,此时网

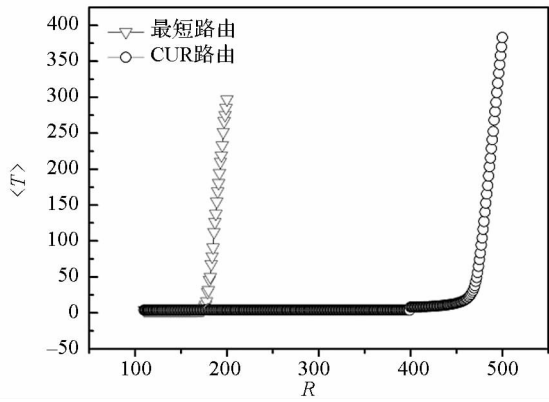
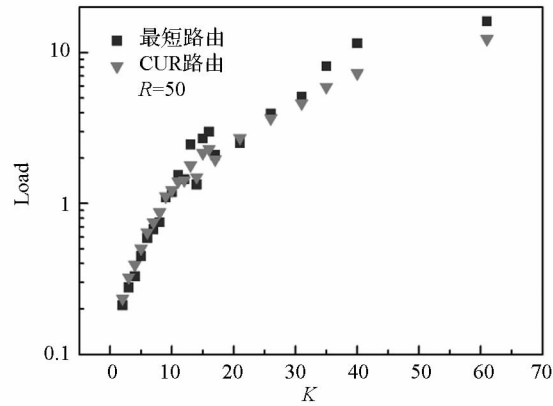


图 4 两种路由策略平均传输时间对比

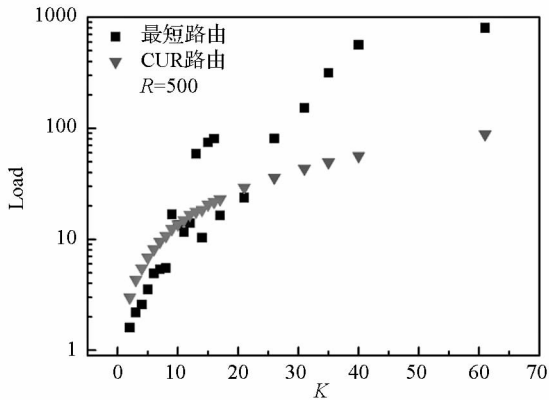
Fig. 4 The average travel time VS R under two routing strategies

络在两种路由策略下均处于自由流通态。当 $R = 500$ 时,网络采用最短路由策略和 CUR 路由策略情况下,节点上的负载均超过了其处理能力,此时网络进入拥堵态。从图 5(b) 可以发现,网络采用最短路由策略时,高度值核心节点承担了大量的负载,其中度值为 61 的节点的负载量达到了 801,远超过其处理能力。而当网络采用 CUR 路由策略时,该节点的负载量为 88,仅略大于其节点的处



(a) 自由流通态下负载分布对比

(a) The load distribution in free flow state



(b) 拥堵态下负载分布对比

(b) The load distribution in congestion state

图 5 两种路由策略不同状态负载分布对比

Fig. 5 The load distribution in different states under two routing strategies

理能力。可见,当网络进入拥堵态后,CUR 路由策略能将负载与节点处理能力得到合理的匹配,避免过分依赖高度值核心节点,充分利用网络中各节点的处理能力。

进一步地,下文对两种路由策略的传输路径所经过节点度之和进行统计分析。当 $R = 500$ 时,最短路由策略所选择传输路径经过节点平均度之和为 62.57,而 CUR 路由策略为 44.85。我们发现最短路由策略拥有较小的平均传输距离,但其传输路径经过节点平均度之和却大于 CUR 路由策略。这说明在拥堵态时最短路由策略更倾向于选择高度值节点来传输负载,而 CUR 路由策略则倾向于选择小度值节点。图 6 为 CUR 路由策略在不同新增负载量 R 下传输路径所经过节点平均度 $\langle K \rangle$ 变化曲线。从图中可以发现,随着新增负载量的不断增大,CUR 路由策略传输负载所选择节点的平均度在不断降低,这表明当网络处于自由流通态时,CUR 路由策略充分利用高度值节点拥有更多负载处理能力这一优势,更多选择度大节点来传输负载,而随着新增负载量 R 的提升,CUR 路由策略开始根据节点资源利用率这一动态信息来选择路径,将网络负载进行了合理分配。

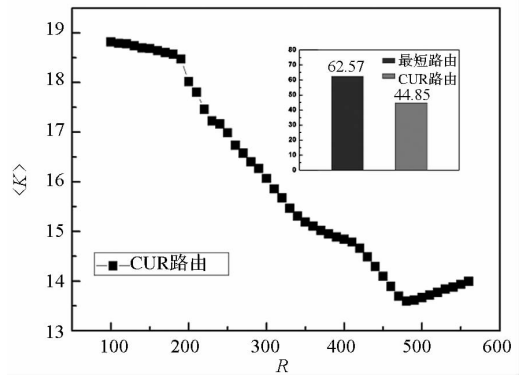


图 6 CUR 路由策略选择节点平均度

Fig. 6 The average degree of the node under two routing strategies

最后,将本文提出的 CUR 路由策略与有效路由策略^[18] 进行比较。严钢等于 2006 年提出了有效路由算法来避开核心节点来传输信息包,该策略以传输路径的节点度数和构建代价函数,即

$$L(P(i \rightarrow j); \beta) = \sum_{i=0}^{n-1} k(x_i)^\beta \quad (7)$$

有效路由策略在网络节点处理能力同质的情况下,当 $\beta = 1$ 时,获得最大网络临界新增负载量,但从图 7 发现,在网络节点负载处理能力异质条件下,当 $\beta = 0.3$ 时,有效路由策略获得最大网络临界新增负载量,而非 $\beta = 1$ 时,原因在于当 $\beta = 1$

时,有效路由策略会强制绕开高度值核心节点而选择小度值节点来传输负载,导致在节点处理能力异质的情况下,使得高度值核心节点的处理能力无法得到充分发挥。从图中发现,当 $\beta = 0.3$ 时,有效路由策略获得最大临界新增负载量 $R_c = 352$,其值依旧小于 CUR 路由策略。与有效路由策略的临界新增负载量的对比进一步验证了本文所提出的 CUR 路由策略的有效性。

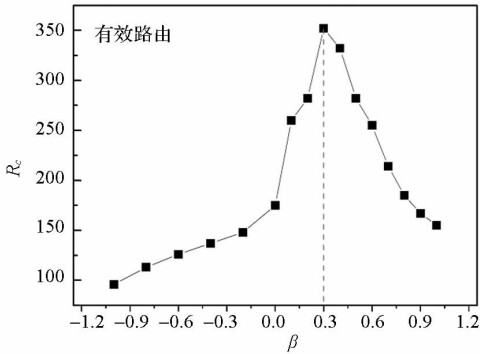


图7 有效路由策略 R_c 随 β 变化曲线

Fig. 7 The R_c versus β for scale-free network with heterogeneous node capacity

3 结论

目前,复杂网络关于路由策略的研究通常假设网络中节点具有相同的处理能力。本文从实际情况出发,研究了网络节点负载处理能力异质的交通动力学过程,提出了一种基于节点资源利用率的全局动态路由策略。该策略在源节点和目标节点之间所有可能路径中,选择途经节点资源利用率最低的路径作为传输负载的最佳路径,该策略能有效提升网络负载传输性能。通过对网络临界新增负载量、平均传输路径长度、平均传输时间及负载分布的仿真实验,验证了该策略的负载传输性能优于传统的最短路由策略及有效路由策略。

参考文献 (References)

- [1] Dorogovtsev S N, Goltsev A V, Mendes J F F. Pseudofractal scale-free web [J]. Physical Review E, 2002, 65 (6): 066122.
- [2] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. SIAM review, 2003, 45(2): 167–256.
- [3] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics[J]. Physics reports, 2006, 424(4): 175–308.
- [4] Dorogovtsev S N, Goltsev A V, Mendes J F F. Critical phenomena in complex networks [J]. Reviews of Modern Physics, 2008, 80(4): 1275.
- [5] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemic spreading in scale-free networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(14): 3200–3203.
- [6] Yan G, Zhou T, Wang J, et al. Epidemic spread in weighted scale-free networks [J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22 (2): 510.
- [7] Yang H X, Wang W X, Lai Y C, et al. Control of epidemic spreading on complex networks by local traffic dynamics [J]. Physical Review E, 2011, 84(4): 045101.
- [8] Liu Y Y, Slotine J J, Barabási A L. Controllability of complex networks[J]. Nature, 2011, 473(7346): 167–173.
- [9] Yan G, Ren J, Lai Y C, et al. Controlling complex networks: How much energy is needed? [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(21): 218703.
- [10] Wang W X, Ni X, Lai Y C, et al. Optimizing controllability of complex networks by minimum structural perturbations[J]. Physical Review E, 2012, 85(2): 026115.
- [11] Szabó G, Fáth G. Evolutionary games on graphs[J]. Phys. Rep., 2007, 446: 97.
- [12] Roca C P, Cuesta J A, Sánchez A. Evolutionary game theory: Temporal and spatial effects beyond replicator dynamics [J]. Physics of Life Reviews, 2009, 6(4): 208–249.
- [13] Perc M, Szolnoki A. Coevolutionary games – A mini review [J]. BioSystems, 2010, 99: 109–125.
- [14] Rong Z H, Li X, Wang X F. Physical Review E 76, (2007) 027101.
- [15] Watts D J. A simple model of global cascades on random networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(9): 5766–5771.
- [16] Wu Z X, Peng G, Wang W X, et al. Cascading failure spreading on weighted heterogeneous networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2008, 2008 (05): P05013.
- [17] Liu R R, Wang W X, Lai Y C, et al. Cascading dynamics on random networks: Crossover in phase transition[J]. Physical Review E, 2012, 85(2): 026110.
- [18] Yan G, Zhou T, Hu M B, et al. Efficient routing on complex networks[J]. Physical Review E, 2006, 73(4): 046108.
- [19] Wang W X, Wang B H, Yin C Y, et al. Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network[J]. Physical Review E, 2006, 73(2): 026111.
- [20] Hu M B, Ling X, Jiang R, et al. Dynamical hysteresis phenomena in complex network traffic [J]. Physical Review E, 2009, 79(4): 047101.
- [21] Noh J D, Rieger H. Random walks on complex networks[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(11): 118701.
- [22] Wang S P, Pei W J. First passage time of multiple Brownian particles on networks with applications [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(18): 4699–4708.
- [23] Yang S J. Exploring complex networks by walking on them [J]. Physical Review E, 2005, 71(1): 016107.
- [24] Wang W X, Wang B H, Yin C Y, et al. Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network [J]. Physical Review E, 2006, 73(2): 026111.
- [25] Yin C Y, Wang B H, Wang W X, et al. Traffic dynamics based on an efficient routing strategy on scale free networks [J]. The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems, 2006, 49(2): 205–211.
- [26] Wang W X, Yin C Y, Yan G, et al. Integrating local static and dynamic information for routing traffic [J]. Physical Review E, 2006, 74(1): 016101.
- [27] Zhou T. Mixing navigation on networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2008, 387(12): 3025–3032.
- [28] Ling X, Hu M B, Jiang R, et al. Global dynamic routing for scale-free networks[J]. Physical Review E, 2010, 81(1): 016113.
- [29] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. Reviews of modern physics, 2002, 74 (1): 47.
- [30] Arenas A, Díaz-Guilera A, Guimera R. Communication in networks with hierarchical branching [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(14): 3196–3199.