

基于换层方式的具有有限缓冲区的 动态双层网络的交通动态

孙明明, 凌翔*

(合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了缓解双层网络中底层网络节点的排队长度, 减少信息包在传输过程的旅行时间, 可以通过信息包在两层网络间传输提升网络的整体流量和传输效率。研究了动态和静态耦合网络在有限的缓存区间下, 基于信息包在两层网络间判断换层的频次不同, 信息包产生率和网络的耦合强度对改善网络传输能力和稳定性的影响。该论文通过分析丢包率、密度和平均旅行时间来比较两种换层方式的运行效率, 采用损失阈值来衡量两种换层方式下网络的稳定可靠性。结果表明在具有有限缓冲区间的双层动态网络中, 换层方式和换层概率影响网络的传输效率, 通过联合换层方式和网络间的连边数能使网络的损失阈值增大, 使网络中信息包稳定传输的能力优化, 缓解网络拥堵。

关键词: 双层网络; 动态网络; 换层概率; 损失阈值; 信息包产生率; 缓冲区间

中图分类号: U491.13; TP393.08

文献标志码: A

文章编号: 1002-4026(2025)06-0125-08

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Traffic dynamics of a finite-buffer two-layer network via layer-switching mechanisms

SUN Mingming, LING Xiang*

(College of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To alleviate queue lengths at bottom nodes in two-layer networks, reduce data packet travel time, and improve overall network traffic efficiency, this paper examines information packet transfer mechanisms between network layers. The study investigates how layer judgment frequency and network coupling strength influence transmission capability and stability in dynamic and static coupled networks with limited cache capacity. We compare the operational efficiency of two layer-switching approaches by analyzing packet loss rates, traffic density, and average travel times. Network stability and reliability are measured using loss threshold values. Results indicate that in two-layer dynamic networks with limited buffer space, both the layer-switching methodology and switching probability significantly affect transmission efficiency. By jointly optimizing the layer-switching approach and inter-layer edge distribution, the network's loss threshold can be increased,

收稿日期: 2024-11-21 修回日期: 2025-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52472312)

作者简介: 孙明明(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为复杂网络。E-mail: 2170337620@qq.com, Tel: 18705652571

* 通信作者, 凌翔, 男, 副教授, 研究方向为复杂网络。E-mail: lingxiang@hfut.edu.cn, Tel: 13637051230

enhancing stable information transmission capacity and alleviating network congestion.

Key words : two-layer network; dynamic network; layer-switching probability; loss threshold; packet generation rate; buffer

人员或物体在城市交通中移动,需要使用交通网络,交通网络一般用复杂网络^[1]来表示,研究复杂网络中的交通动态对于确保现实交通系统可行性有一定意义^[2]。复杂网络中的节点代表现实交通网络中的机场、车站或城市,复杂网络中节点之间的连线代表连接这些重要位置的链路。复杂网络的小世界特性^[3]和无标度特性^[4]已经得到了广泛的研究,复杂网络还研究了路由策略^[5]和网络拓扑^[6]在拥堵传播和拥塞^[7]出现方面的作用。与单层复杂网络^[8-12]相比,多层运输网络在许多方面更为复杂,表现出在单层网络中无法观察到的复杂现象,因此,为了更好的研究复杂网络中交通拥堵的动态变化,有必要在多层网络的背景下进一步研究这类系统。

在以往的大多数研究中,通信基础设施被认为是静态网络,其中节点是不可移动的,它们之间的链接是不变的。然而,在现代世界中出现了许多具有移动节点的通信网络。一个典型的例子是自组织网络^[13],其中移动节点通过无线链路相互通信,如果一个节点的距离小于一个临界值,则它可以向另一个节点传输数据包。由于动态网络的结构比静态网络要复杂得多,因此动态网络的流量拥塞特征与静态网络有所不同。Yang等^[14]提出了一种随机路由来研究移动网络上的运输动态,并且发现了吞吐量对节点移动速度和通信范围的依赖性。Yang等^[15]提出了一种自适应路由策略,通过交通感知参数将地理距离与局部交通信息相结合,以提高动态网络的交通容量。其次,人们对存储容量有限的多层网络进行了研究,观察到一些有趣的现象,如慢即快效应和 Braess 悖论^[16]。在多层网络中,扩散过程和拥塞也得到了探索。同时,还分析了两层变化机制随两层连接速度对拥塞的影响^[17]。目前关于多层网络换层方式对网络传输的影响的研究仍有以下缺失:多层网络信息包的换层方式对网络拥堵的研究仍然不足;多层网络中因为节点移动造成的拥塞对节点队列长度和节点路由的动态影响还没有被明确地考虑过;根据现实的通信网络,多层网络中节点存储信息包的容量通常是有限的,但缺乏对多层网络间耦合强度变化是否会对网络的稳定性造成的影响的研究。

综上,本文把动态网络和静态网络耦合起来,其中网络中每个节点都具有有限的缓冲空间,网络中信息包传输采用了两种换层方式。网络模型中动态网络使用了一种自适应路由策略^[18]来提高网络性能,静态网络采用最短路由。研究了换层方式和信息包产生率对网络传输效率的影响,通过研究损失阈值,分析在不同换层方式下耦合强度改变对双层网络稳定性的影响。研究结论有助于通过一定的路由策略和换层方式,改善具有有限缓冲空间的双层网络中信息包的拥堵情况,缓解节点的排队长度对网络造成的运输压力,提升网络的流量,提高了网络的运输效率和增强网络的稳定性。

1 理论模型

1.1 网络模型

本文使用动态网络和静态网络相耦合的网络,下层网络为 BA^[4]网络,平均度为 16,节点数为 1 000,上层网络为动态网络。上层网络让 1 000 个节点在具有周期性边界条件的 $L \times L$ 区域上移动^[18],本文中, $L=5$ 。在 $t=0$ 的时刻,所有节点都随机分布在正方形区域上。在每个时间步长中,每个节点的移动方向 θ 发生随机变化,但在整个仿真过程中,所有节点的移动速度 v 都相同。由于节点是移动的,它们的位置随时间 t 而变化。每个节点 i 的位置和移动方向的演变如下:

$$\begin{aligned} x_i(t+1) &= x_i(t) + v \cos \theta_i(t), \\ y_i(t+1) &= y_i(t) + v \sin \theta_i(t), \\ \theta_i(t+1) &= \theta_i(t) + \psi_i(t), \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, $x_i(t)$ 和 $y_i(t)$ 分别为节点 i 在 t 时刻的水平坐标和垂直坐标。 $\psi_i(t)$ 表示节点 i 在时间 $t+1$ 和时间

t 之间的移动方向的变化,这里是 $[-\pi, \pi]$ 区间内的一个随机数。我们使用欧几里德距离来描述节点之间的位置关系。节点 i 和节点 j 在 t 时刻的欧氏距离定义为:

$$D_{ij}(t) = \sqrt{[x_i(t) - x_j(t)]^2 + [y_i(t) - y_j(t)]^2}。 \quad (2)$$

每个节点具有相同的通信半径 r 。如果两个节点在一个时间步长上的欧氏距离小于 r ,则可以相互通信,则视这两个节点为临时邻居。因此,一个节点的所有临时邻居都被定义为该节点当前通信区域内的所有节点。

1.2 交通模型

在本文的交通模型中,下层网络每个节点都可以创建、传递和接收信息包,上层网络只传递和接收信息包。在每个时间步长中,对于下层网络中每个节点以信息包产生率生成信息包,并被传递到网络的另一个节点。信息包在网络中随机选择起点和终点。每个节点都有一个有限的缓冲空间来存储信息包。为简单起见,每个节点的缓冲区大小都是相同的,并表示为 B ,这意味着所有节点中的队列长度都不能超过 B ,节点中的信息包队列按照先入先出(FIFO)的规则传输。本文中一个节点在每个时间步长中最多可以向其当前的邻居传递 1 个信息包。

上层网络为了将信息包传递到其终点,节点在其邻居中搜索,如果包的目的地是包当前所在节点的邻居,则包将在下一个时间步直接发送到其目标节点,然后立即从网络中删除,否则,根据下面提出的自适应路由策略,将信息包转发到合适的邻居节点。假设在时间 t 时信息包在节点 s 中,它的目标节点 j 不是节点 s 的邻居。对于节点 s 的每个邻居节点 i ,与节点 j 有一个有效距离,即:

$$d_{\text{eff}}^{ij}(t) = h \frac{D_{ij}(t)}{L'} + (1 - h) \frac{q_i(t)}{B}, \quad (3)$$

其中, $q_i(t)$ 是节点 i 在 t 时刻的队列长度, h 是一个可调参数($0 \leq h \leq 1$)。式(3)中,设置了 $L' = \frac{L}{2}$ 。然后,在时间 $t + 1$ 时,节点 s 将以最小的 $d_{\text{eff}}^{ij}(t)$ 值将信息包发送给邻居节点 i 。下层 BA 网络采取全局路由策略,即最短路由策略。

1.3 两种换层方式

本文对双层网络采取两种换层方式,第一种换层方式是指双层网络中的下层网络设置好一个 $0 \sim 1$ 之间的换层概率,随机产生一个概率小数,当概率小数小于换层概率时,信息包从下层网络传输到上层,否则在下层网络中传输直到终点。信息包在下层网络产生且只进行一次判断,一旦信息包传输到上层,就一直在上层网络传输直到终点;第二种换层方式是下层网络设置好一个 $0 \sim 1$ 之间的换层概率,随机产生一个概率小数,当概率小数小于换层概率时,信息包从下层网络传输到上层,否则在下层网络传输。信息包在每个时间步都判断一次,选择在上层传输,还是在下层传输,信息包一旦传输到上层,就一直在上层网络传输,否则就在下层网络传输直到终点。

2 模拟结果和分析

本章模拟是在上下层网络节点数都为 1 000 的耦合网络上运行的,双层网络节点的有限缓存空间 B 设为 100,采用 20 000 个时间步,原始信息包库有 500 000 个信息包,每个节点的发送能力 C 设为 1,上层动态网络节点移动速度 $v = 1$,参数 $h = 0.7$ 。

2.1 不同换层方式的信息包产生率和换层概率

信息包在双层网络中传输,流量是指信息包从起点顺利到达终点的包数,能够一定程度衡量网络的运行效率。图 1(a)是双层网络在第一种换层方式下不同信息包产生率的换层概率和流量的关系图,图 1(b)是双层网络在第二种换层方式下不同信息包产生率的图,图 1(c)是两种换层方式下不同信息包产生率下流量最优值对应的换层概率。从图中可以看出同样的信息包产生率下,第一种换层方式的流量值总体大于第二

种换层方式,第一种换层方式的流量最优值对应的换层概率大于第二种换层方式。

在信息包产生率为 0.3 时,第一种换层方式的流量峰值点对应的换层概率为 0.5,第二种换层方式为 0.3;信息包产生率为 0.5 时,第一种换层方式流量峰值点对应的换层概率为 0.4,第二种换层方式为 0.2。主要是由于双层网络中的上层网络是动态网络,每个时间步的节点位置都在转移,信息包传输效率受到影响,第二种换层方式每个时间步信息包都判断一次,造成每个时间步都有传输到上层网络的信息包,容易造成网络的拥堵,所以流量值小于第一种换层方式。此外由于第二种换层方式信息包每个时间步都有判断的机会,所以传输到上层网络的概率加大,流量最优值对应的换层概率小于第一种换层方式。

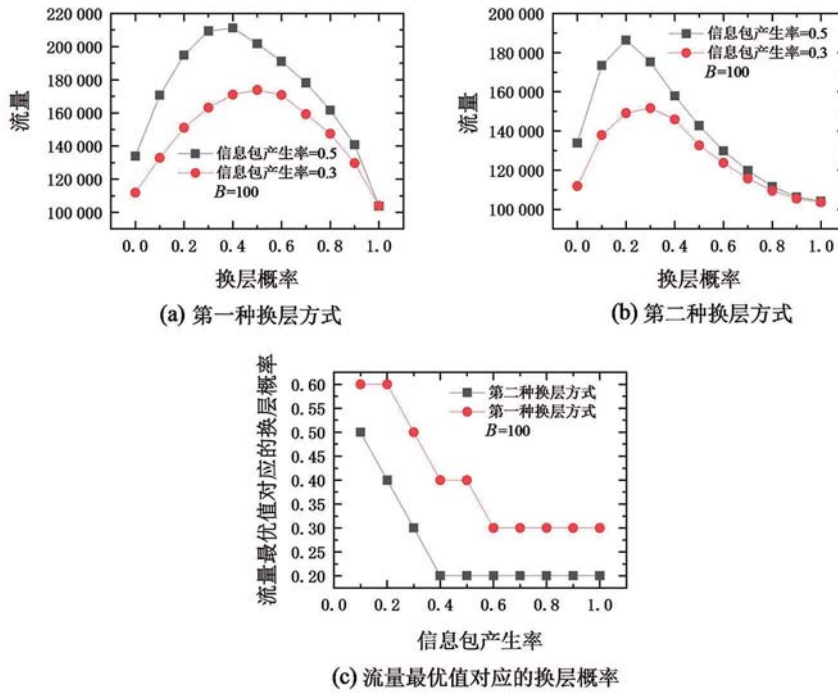


图 1 两种换层方式下不同信息包产生率的换层概率和流量的关系

Fig.1 Relationship between layer-switching probability and network traffic for varying packet-generation rates under two layer-switching strategies

由于双层网络每个节点都有固定有限的缓冲空间,当传输到节点的信息包数超过该节点的缓冲空间,信息包就会被丢弃,从而产生丢包率。丢包率是指无法到达终点的信息包数相对于实际生成的总包数的百分比。

网络的流量值和丢包率也有关系,流量最优值点是双层网络丢包率最少的情况。双层网络节点的有限缓存空间 B 设为 100,如图 2(a)指的是第一种换层方式不同信息包产生率下换层概率和丢包率的关系图,图 2(b)是第二种换层方式下的丢包率,图 2 丢包率最低点对应的换层概率与图 1 流量峰值对应的换层概率相符合。

网络密度是指网络中信息包总数相对于网络中所有节点的缓冲空间总和的百分比。图 2(c)是第一种换层方式下双层网络的网络密度,图 2(d)是第二种换层方式下的网络密度。图 2 的密度图有临界换层概率值,与图 1 的流量峰值点对应的换层概率相符合,当换层概率小于临界换层概率时,信息包在网络中累积;大于临界换层概率时,很多 hub 节点的缓冲区间都满,网络的密度处于近乎不变的值。

平均旅行时间定义为信息包从起点到终点所花费的时间步长,用来衡量信息包的传输速率。图 3(a)是第一种换层方式不同信息包产生率下换层概率和平均旅行时间的关系图,图 3(b)是第二种换层方式下的图。

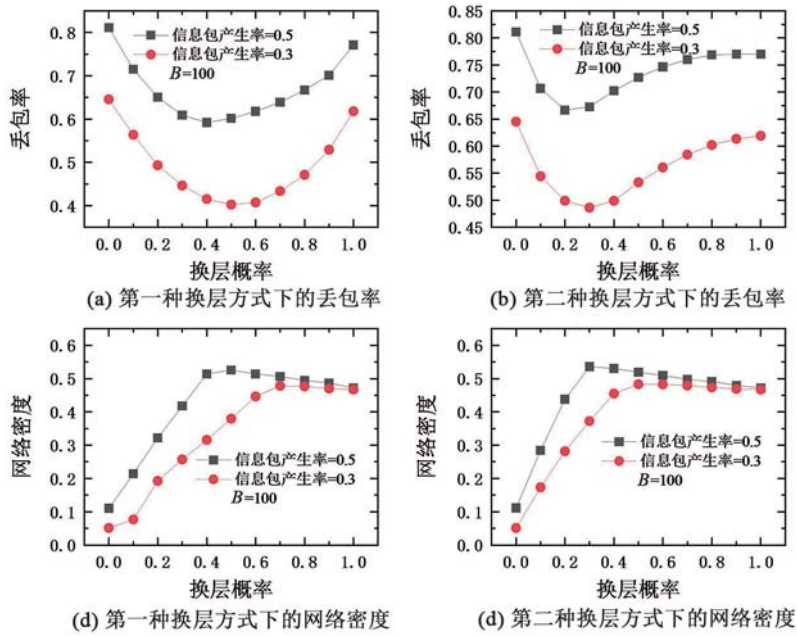


图 2 两种换层方式下不同信息包产生率的密度和丢包率与换层概率的关系

Fig.2 Relationship between network density, packet loss rate, and layer-switching probability at varying packet-generation rates under two layer-switching strategies

如图 3 所示,第一种换层方式的平均旅行时间在换层概率约处于 0.6,第二种换层方式的平均旅行时间在换层概率约处于 0.4 时,不同信息包产生率对应的平均旅行时间相同,该换层概率点称为等值点。

当换层概率小于等值点时,两种换层方式下信息包产生率为 0.5 的平均旅行时间大于信息包产生率为 0.3 时的平均旅行时间;当换层概率大于等值点时,两种换层方式下信息包产生率为 0.5 的平均旅行时间小于信息包产生率为 0.3 时的平均旅行时间。由于网络中每个节点的信息包累积度不同,排队长度不同,造成的网络负荷严重程度不同,从图 4 的节点度和节点负载可以分析,分别取等值点前和后的两个换层概率点进行分析。

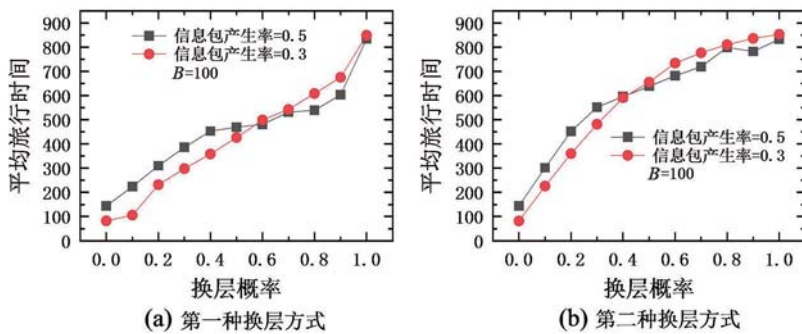


图 3 两种换层方式下换层概率和平均旅行时间的关系

Fig.3 Relationship between layer-switching probability and average travel time under two layer-switching strategies

如图 4 所示, p_1 指的是换层概率, p_2 指的是信息包产生率。图 4 (a) 和图 4 (b) 指的是第一种换层方式下换层概率分别为 0.3 和 0.7 的节点度和节点负载关系图;图 4 (c) 和图 4 (d) 指的是第二种换层方式下换层概率分别为 0.3 和 0.7 的节点度和节点负载关系图,分别取信息包产生率为 0.3 和 0.5 进行对比。

如图 4 (a) 和图 4 (c) 所示,在节点具有同样的度值时,换层概率为 0.3 时,两种换层方式下信息包产生率为 0.5 的节点负载普遍大于信息包产生率为 0.3 的节点负载,双层网络的节点排队压力增大,拥堵程度加重,所以信息包产生率为 0.5 时的平均旅行时间大于 0.3 的,网络运行效率小于信息包产生率为 0.3 时的运行效率。

如图4(b)和图4(d)所示,换层概率为0.7时,两种换层方式下信息包产生率为0.3时,信息包大多在hub节点有排队,hub节点往往承载着大多数信息包的传输或转运用,一旦排队过多,很可能导致网络拥堵,严重时造成网络瘫痪;而信息包产生率为0.5时信息包在周边节点排队较多,不影响网络的整体传输,所以信息包产生率为0.5时效率高于信息包产生率为0.3的效率,平均旅行时间也小于0.3时的平均旅行时间。图4的负载分析结果与图3的平均旅行时间相对应。

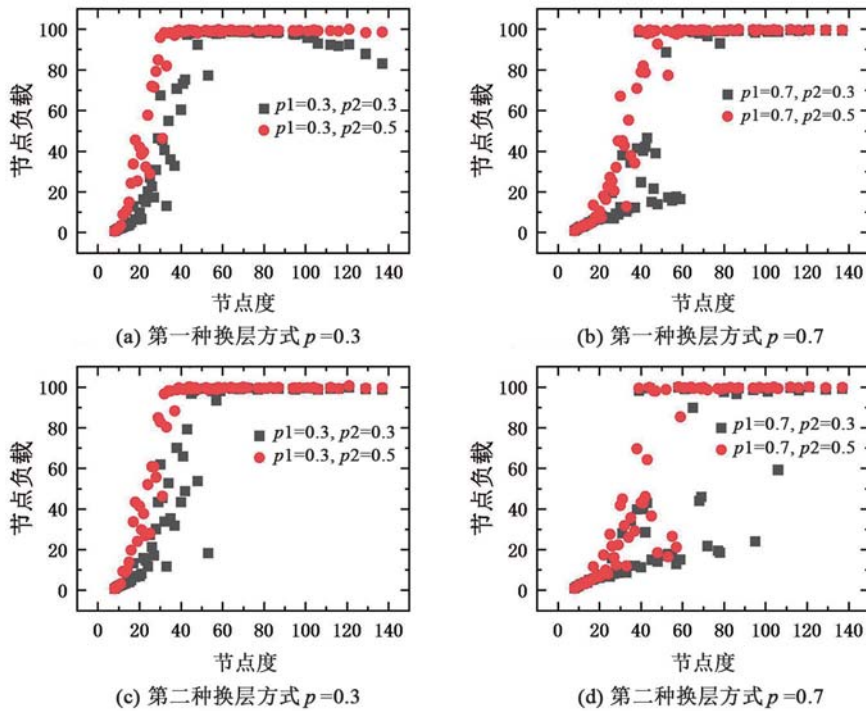


图4 两种换层方式下节点度和节点负载的关系

Fig.4 Relationship between node degree and node load under two layer-switching strategies

2.2 不同换层方式的节点缓冲空间和损失阈值

本文设置双层网络的每个节点的缓冲空间是有限的,在有限缓冲网络中,使用信息包在 t 时刻时信息包总数的序参数^[19]来分析,随着包生成速率的增加,生成的包、到达的包和丢弃的包之间始终存在动态平衡,序参数保持0。因此,本文根据信息包的丢失来反映出有限缓冲网络的稳定性和可靠性。

如图5(a)所示,是两种换层方式在换层概率为0.3时的缓冲空间 B 和流量的关系图,对于两种换层方式,流量先随着缓存空间增大而增大。当缓存空间小于250时,第二种换层方式的流量小于第一种换层方式;当缓存空间大于250时,第二种换层方式的流量明显大于第一种换层方式。当缓存空间增大到一定程度,流量值趋于不变,只有很小起伏空间。为了更好地分析处于微小波动区间的缓存空间,利用公式(4)^[20]:

$$\varphi = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{C}{\eta N} \frac{N_d(t + \Delta t) - N_d(t)}{\Delta t}, \quad (4)$$

其中 C 为发送能力,固定为1; η 为信息包产生率; N 为网络节点数; $N_d(t)$ 为直到时间 t 为止被丢弃的信息包数目;存在一个损失阈值 η_c ,超过这个阈值就会发生连续的包丢失, η_c 是衡量网络在节点具有有限缓冲空间时,信息包保持稳定可靠传输能力的自然指标。

Φ 是指上层网络和下层网络间连接的边数与节点数的比值,称为耦合强度。在换层概率为0.3时,图5(b)是第一种换层方式在 Φ 不同时,不同缓冲区间的损失阈值;图5(c)是第二种换层方式在 Φ 不同时,不同缓冲区间的损失阈值。可以看出当缓冲空间增大,损失阈值并不是一直增大,而是有个下降的波动。图5(b)中 Φ 为0.4时损失阈值随缓冲空间先增大后减小,如图5(c)所示, Φ 为0.6和0.4时损失阈值存在波动,随

缓冲空间先增大后减小。说明在两种换层方式下,当耦合强度 Φ 变化时,第二种换层方式的损失阈值普遍大于第一种换层方式,损失阈值会随着缓冲空间达到一个最大值点,然后下降,说明不是缓冲空间越大网络的稳定性越好,缓冲空间越大,反而可能会使网络性能变差。

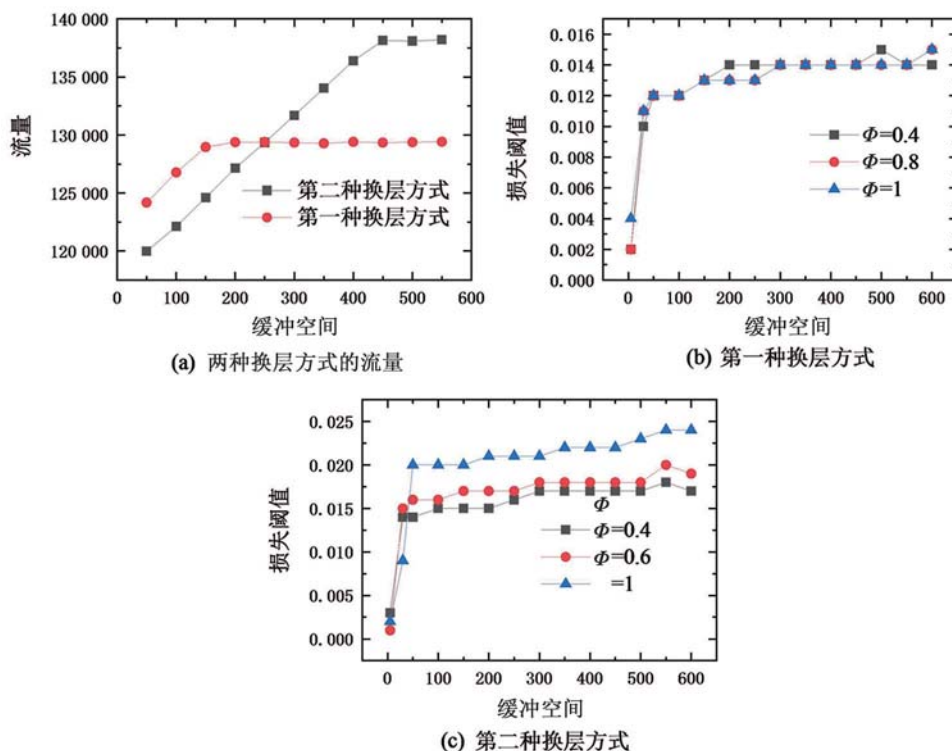


图5 两种换层方式下的节点缓冲空间与损失阈值的关系

Fig.5 Relationship between node buffer capacity and loss threshold under two layer-switching strategies

3 结论

本文首先研究了双层网络中节点具有有限缓冲空间时,在两种换层方式下,信息包产生率对换层概率的影响,接着通过损失阈值^[20]的变化探讨了在不同缓冲空间下网络中信息包稳定传输的能力。研究发现,双层网络节点在不同缓存空间下,采取合适的换层方式能提升网络的流量,说明利用不同换层方式能使网络的传输效率增大,信息包达到终点的数目增多,可以极大缓解拥堵程度;此外,通过结合换层方式和网络间的连边数能够改善网络的稳定传输能力,会出现类似文献[18]的布雷斯悖论结果,值得研究。

参考文献:

- [1] LIN J Y, BAN Y F. Complex network topology of transportation systems[J]. Transport Reviews, 2013, 33(6): 658-685. DOI: 10.1080/01441647.2013.848955.
- [2] ABADI A, RAJABIOUN T, IOANNOU P A. Traffic flow prediction for road transportation networks with limited traffic data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 16(2): 653-662. DOI: 10.1109/tits.2014.2337238.
- [3] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442. DOI: 10.1038/30918.
- [4] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512. DOI: 10.1126/science.286.5439.509.
- [5] 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. DOI: 10.1140/epjb/e2006-00040-2.
- [6] RANJAN G, ZHANG Z L. Geometry of complex networks and topological centrality[J]. Physica A Statistical Mechanics and Its Applications, 2013, 392(17): 3833-3845. DOI: 10.1016/j.physa.2013.04.013.
- [7] YANG R, WANG W X, LAI Y C, et al. Optimal weighting scheme for suppressing cascades and traffic congestion in complex networks[J]. Physical Review E, 2009, 79(2): 026112. DOI: 10.1103/physreve.79.026112.
- [8] CHEN S Y, HUANG W, CATTANI C, et al. Traffic dynamics on complex networks: A survey[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012(1): 732698. DOI: 10.1155/2012/732698.
- [9] HUANG W, CHOW T W S. Effective strategy of adding nodes and links for maximizing the traffic capacity of scale-free network[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2010, 20(3): 033123. DOI: 10.1063/1.3490745.
- [10] KUMARI S, SAROHA A, SINGH A. Efficient edge rewiring strategies for enhancement in network capacity[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2020, 545: 123552. DOI: 10.1016/j.physa.2019.123552.
- [11] YAN G, ZHOU T, HU B, et al. Efficient routing on complex networks[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2006, 73(4 Pt 2): 046108. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.046108.
- [12] LIN H, XIA Y X, LIANG Y Y. Efficient routing for spatial networks[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2022, 32(5): 053110. DOI: 10.1063/5.0091976.
- [13] ABOLHASAN M, WYSOCKI T, DUTKIEWICZ E. A review of routing protocols for mobile ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 1-22. DOI: 10.1016/s1570-8705(03)00043-x.
- [14] YANG H X, WANG W X, XIE Y B, et al. Transportation dynamics on networks of mobile agents[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2011, 83(1 Pt 2): 016102. DOI: 10.1103/PhysRevE.83.016102.
- [15] YANG H X, TANG M. Adaptive routing strategy on networks of mobile nodes[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 402: 1-7. DOI: 10.1016/j.physa.2014.01.063.
- [16] MANFREDI S, DI TUCCI E, LATORA V. Mobility and congestion in dynamical multilayer networks with finite storage capacity[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(6): 068301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.068301.
- [17] MORRIS R G, BARTHELEMY M. Transport on coupled spatial networks[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(12): 128703. DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.128703.
- [18] LING X, CHEN J J, ZHANG Z K, et al. Multiple traffic states and Braess' paradox in dynamical networks with limited buffer size[J]. EPL (Europhysics Letters), 2020, 129(3): 38001. DOI: 10.1209/0295-5075/129/38001.
- [19] GAO L, SHU P P, TANG M, et al. Effective traffic-flow assignment strategy on multilayer networks[J]. Physical Review E, 2019, 100(1): 012310. DOI: 10.1103/PhysRevE.100.012310.
- [20] CHEN J, CHEN J Y, LI M, et al. Traffic dynamics considering packet loss in finite buffer networks[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(4): 048901. DOI: 10.1088/1674-1056/28/4/048901.

