

# 城市轨道交通换乘节点与网络运行效率关系研究

李明高<sup>1</sup>, 杜鹏<sup>\*1,2</sup>, 朱宇婷<sup>1</sup>, 史芮嘉<sup>1</sup>, 冯旭杰<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 3. 交通运输部 科学研究院, 北京 100029)

**摘要:** 换乘节点是城市轨道交通不同线路间转乘的必经场所, 对城市轨道交通系统运行有重要影响. 本文基于复杂网络理论, 将平均路径长度、网络局部效率和网络全局效率作为网络运行效率的评价指标, 研究了换乘节点比例、换乘节点衔接线路数及换乘节点分布与网络运行效率的变化关系. 研究表明, 网络平均路径长度随换乘节点比例、换乘节点衔接线路数增加呈幂函数降低; 网络局部效率随换乘节点比例增加呈指数下降, 网络全局效率随换乘节点比例增加呈对数增加且换乘效率越高, 增长越明显; 换乘节点衔接线路数的增加会降低网络局部效率, 增加网络全局效率; 换乘节点在各线路分布越均匀, 网络全局效率越高.

**关键词:** 城市交通; 复杂网络; 换乘节点; 网络运行; 网络效率

## Effect of Urban Rail Transit Transfer Nodes on Network Performance

LI Ming-gao<sup>1</sup>, DU Peng<sup>\*1,2</sup>, ZHU Yu-ting<sup>1</sup>, SHI Rui-jia<sup>1</sup>, FENG Xu-jie<sup>3</sup>

(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory & Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. China Urban Sustainable Transport Research Center, China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Transfer nodes, which are the place while transferring between urban rail transit lines, have great influence to urban rail transit network performance. In this paper, the average path length, network local efficiency and network global efficiency are proposed as the network performance indexes based on complex theory. Then, the effect of transfer nodes proportion, transfer nodes connecting lines and transfer nodes distribution on the urban rail transit network performance is studied. The results show that the average path length decreases by power relate to the transfer nodes proportion and transfer nodes connecting lines. The local efficiency decline by exponential as the transfer nodes proportion increases, while the global efficiency has logarithmic growth as the transfer nodes proportion increases. Transfer efficiency may affect the global efficiency and the higher the transfer efficiency is, the effect of the transfer nodes on global efficiency is more remarkable. Moreover, the local efficiency has inverse correlation with the transfer nodes connecting lines while the global efficiency has positive correlation with the transfer nodes connecting lines. The network performs well while the transfer nodes uniformly distributed in all lines.

**Key words:** urban traffic; complex network; transfer nodes; network performance; network efficiency

收稿日期: 2014-08-18

修回日期: 2014-12-08

录用日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71131001); 国家基础研究计划项目(2012CB725406); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014YJS078); 交通运输部建设科技项目(2013318221420).

作者简介: 李明高(1989-), 男, 江西抚州人, 博士生.

\*通信作者: pdu@bjtu.edu.cn

1 引言

城市轨道交通换乘节点是不同线路的衔接点,可实现不同线路间的换乘.换乘在城市轨道交通出行中占较大比重,2013年北京市地铁换乘客流量达43.9%.然而,截至2013年底,北京市轨道交通网络换乘节点比例仅为16.6%,较东京27.3%还有较大差距,且三线及其以上换乘节点比例少.随着线网规模不断扩大及网络化运营逐渐成熟,换乘节点对整个系统的运行效果的影响愈发明显.因此,研究换乘节点与网络运行效率关系具有重要意义.

城市轨道交通网络具有复杂性<sup>[1]</sup>.复杂网络研究中的一个核心问题是复杂系统结构与功能之间的关系问题,网络结构对于网络传输效率具有重要的影响<sup>[2]</sup>,因此优化网络结构、改善系统功能吸引了复杂网络领域许多学者的注意<sup>[3]</sup>.节点及节点间相互关系构成复杂网络,决定了网络特性<sup>[4]</sup>.Givoni和Rietveld<sup>[5]</sup>以荷兰铁路为对象,研究了铁路车站数量对乘客出行行为的影响.Jin等<sup>[6]</sup>结合城市轨道交通车站客流及其网络拓扑度,研究了城市轨道交通车站重要度,研究发现重要度高的车站均为换乘车站.

换乘节点可增加乘客出行路径数量,对乘客出行行为有重要影响.Guo等<sup>[7]</sup>研究了换乘费用对乘客出行行为的影响;基于城市轨道交通换乘特点,部分学者建立了考虑换乘的路径广义费用模型,研究考虑换乘条件下的乘客路径选择行为<sup>[8]</sup>.

既有研究多侧重于换乘与乘客行为、换乘节点的运行效率评价等方面,而从网络结构及功能

角度研究较不充分,即换乘节点对轨道交通网络哪些方面有影响、换乘节点哪些方面会影响网络运行效率、影响程度多大等问题的研究相对不足.

本文采用逻辑网络拓扑方法对城市轨道交通网络进行拓扑,将网络平均路径长度、网络局部效率、网络全局效率作为网络运行效果评价指标.在此基础上,基于轨道交通网络演化模型,研究了换乘节点比例、换乘节点衔接线路数量、换乘效率及换乘节点分布与城市轨道交通网络运行效率关系.

2 网络拓扑

节点和节点间的相互连接关系构成网络 $G=<V,E>$ ,其中 $V$ 为点集合, $E$ 为两个节点间的边集合.根据网络拓扑方法,可将网络分为物理网络 $G^{\phi}=(V^{\phi},E^{\phi})$ 和逻辑网络 $G^{\lambda}=(V^{\lambda},E^{\lambda})$ , $V^{\phi}=V^{\lambda}$ ,物理网络的边为实际网络的物理连接关系,逻辑网络的边 $e^{\lambda}=(u^{\lambda},v^{\lambda})$ 为物理网络中连接节点 $u^{\phi},v^{\phi}$ 的路径的映射<sup>[9]</sup>,该路径可根据实际情况进行定义,如可为两点间的最短路径等.

城市轨道交通网络的物理网络为以车站为节点,连接车站之间的轨道线路为边构成的网络(图1(a)).本文将物理网络中节点间不经过换乘能直接到达的路径定义为城市轨道交通网络的逻辑网络的边,如图1(b)所示.本文定义的逻辑网络能很好地反映城市轨道交通网络的换乘状况,因此,本文用逻辑网络研究换乘节点对城市轨道交通网络运行的影响.

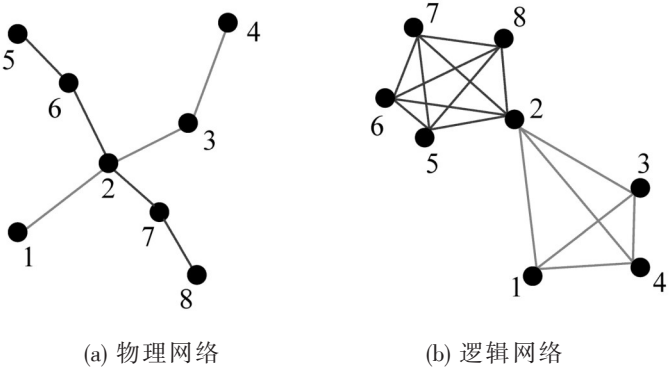


图1 城市轨道交通网络拓扑图

Fig.1 Urban rail transit network topology

### 3 网络运行效率指标

网络运行效率的评价指标有很多,而乘客最为关心的是出行时间效率、换乘次数,网络平均路径长度,网络效率可分别反映换乘次数、出行时间效率,因此本文从城市轨道交通服务对象角度考虑,将网络平均路径长度、网络全局效率和网络局部效率作为网络运行效果的评价指标.

#### 3.1 网络平均路径长度

无权网络中两个节点  $i$  和  $j$  之间的距离为连接这两个节点间的最短路径的边数,逻辑网络拓扑结构中,两节点间的距离减1即为节点  $i$  到节点  $j$  的换乘次数.网络平均路径长度  $L$  为所有节点对之间距离的平均值,网络平均路径长度可以反映网络中任意OD间换乘便捷程度.

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} d_{ij} \quad (1)$$

式中  $N$  为网络节点个数;  $d_{ij}$  为节点  $i, j$  间的最短路径长度.

#### 3.2 网络效率

网络效率是网络运行效果的重要评价指标, Latora 和 Marchiori<sup>[10]</sup> 定义了网络全局效率 ( $E_{\text{glob}}$ ) 和网络局部效率 ( $E_{\text{loc}}$ ).

网络全局效率反映城市轨道交通网络中的传输效率,网络中不同节点间的出行时间不一样,因此本文的网络效率为有权网络的网络效率,边的权重为两点间的最短出行时间,包含区段列车运行时间、非换乘节点停站时间和换乘节点中的换乘时间,网络中节点  $i, j$  间的出行效率为  $i, j$  间最短路径的倒数,网络全局效率可表示为

$$E_{\text{glob}} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} \frac{1}{t_{ij}} \quad (2)$$

式中  $E_{\text{glob}}$  为网络全局效率;  $N$  为网络节点总数;  $t_{ij}$  为节点  $i, j$  间最短时间.

节点  $i$  的局部效率为节点  $i$  的邻居节点构成的子图的网络效率,所有子图的网络效率的平均值为网络的局部效率.网络局部效率反映了系统容错性的<sup>[10]</sup>,文献[10]认为当大部分节点的邻居节点构成的子图均为非稀疏时,网络聚类系数充分逼近网络局部效率.因此,本文用网络聚类系数

计算公式计算网络局部效率.

节点  $i$  的局部效率  $E_i$  可表示为

$$E_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i-1)} = \frac{\sum_{j,m} a_{ij} a_{jm} a_{mi}}{k_i(k_i-1)} \quad (3)$$

式中  $E_i$  为节点  $i$  的局部效率;  $e_i$  为节点  $i$  的邻居节点之间相连的边数;  $a$  为网络的连接矩阵,即网络中所有节点间的连接关系构成的矩阵,若节点  $i, j$  间有边连接,则连接矩阵中元素  $a_{ij}$  为1,否则为0;  $k_i$  为节点  $i$  的邻居节点数,即所有与节点  $i$  相连的节点集合.

网络局部效率  $E_{\text{loc}}$  可表示为

$$E_{\text{loc}} = \frac{1}{N} \sum_{i \in N} E_i \quad (4)$$

式中  $E_{\text{loc}}$  为网络局部效率;  $N$  为网络节点总数

### 4 数值模拟

城市轨道交通网络形成是由单条线路逐渐形成多线路交织的复杂网络形态,其网络的演化过程依次以原网络中的某一个(或几个)节点为起点构建一个新的全局耦合网络(高聚类社团)而形成<sup>[11]</sup>.文献[11]提出了基于社团结构的地铁网络演化模型,模型构造算法如下:

(1) 初始时刻  $t=0$ , 从一个具有  $n_1$  个节点,每个节点具有  $n_1-1$  条边的全局耦合网络开始.

(2) 以概率  $p$  随机地在网络中选择  $m_1$  个节点作为新加入的全局耦合网络的起点.

(3) 以选择的  $m_1$  个节点为起点构建一个新的具有  $n_2$  个节点,每个节点具有  $n_2-1$  条边的全局耦合网络,以此类推,网络生长演化.

该算法中开始阶段  $n_1$  个节点即为初始线路的车站数,选择阶段中  $m_1$  个节点即为换乘节点,生长过程中,  $n_2$  个节点即为新增一条线路的车站数.本文应用此模型构造城市轨道交通网络结构,通过改变  $m_1$  和选择概率  $p$  的取值改变换乘站比例及换乘站衔接线路数.本文构造小规模、次小规模、中规模、次大规模、大规模5种不同规模的城市轨道交通网络,对应的线路条数分别为5、10、15、20、25,各线路的车站数均为20.分别模拟出各规模下不同  $m_1$  取值(换乘节点比例)和不同  $p$  值(换乘节点的衔

接线路数)的网络,研究不同网络结构下网络运行效率.

图2为网络平均路径长度分别随换乘节点比例、换乘节点衔接线路数的变化关系.

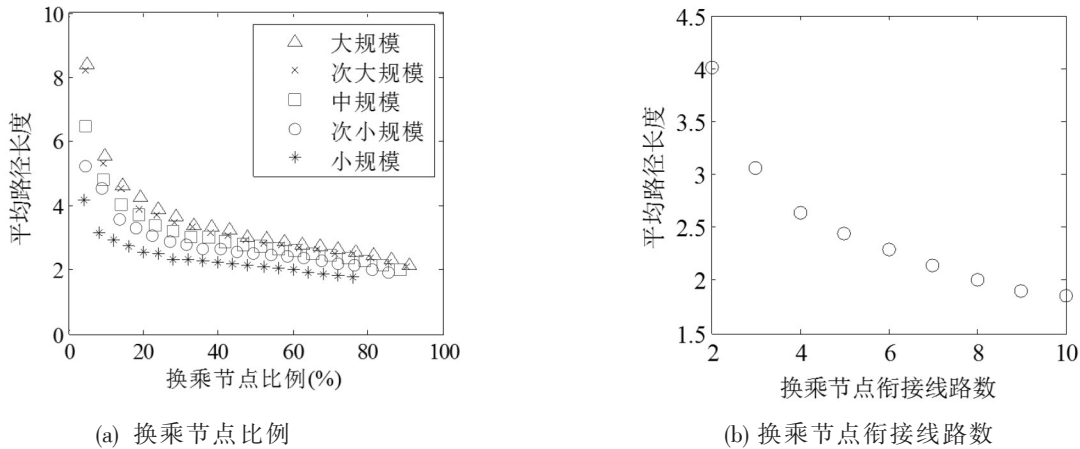


图2 网络平均路径长度与换乘节点比例、换乘节点衔接线路数变化关系

Fig.2 Relationship between network average length and transfer nodes proportion and transfer nodes connecting lines

从图2(a)可以看出,平均路径长度与换乘节点比例呈幂函数分布,当换乘节点增加到一定比例时,网络平均路径长度趋于稳定,即换乘节点比例的进一步增加对降低换乘次数的效果不显著.网络规模越大,换乘节点对网络平均路径长度的改善越明显,且到达平稳时对应的换乘节点比例越大.

换乘节点比例越多,各线路间的换乘越便捷,在换乘节点比例小的情况下,网络平均路径长度随换乘节点的比例大幅减少.由于线路走向、布局差异,线路间的换乘难以避免,当换乘节点增加到一定程度时,增加换乘节点,线网平均换乘次数难

以进一步降低.

图2(b)为换乘节点比例为10%情况下,平均路径长度随换乘节点衔接线路数的变化关系,平均路径长度随换乘节点衔接线路数呈幂函数分布,换乘节点衔接线路数越多,在该换乘节点能完成换乘的线路数越多,线网间的换乘越便捷,平均路径长度越小.

假设网络中同一线路相邻两节点时间为2,非换乘节点停站时间为1,换乘时间为5.网络全局效率、网络局部效率与换乘节点比例、换乘节点衔接线路数变化关系如图3所示.

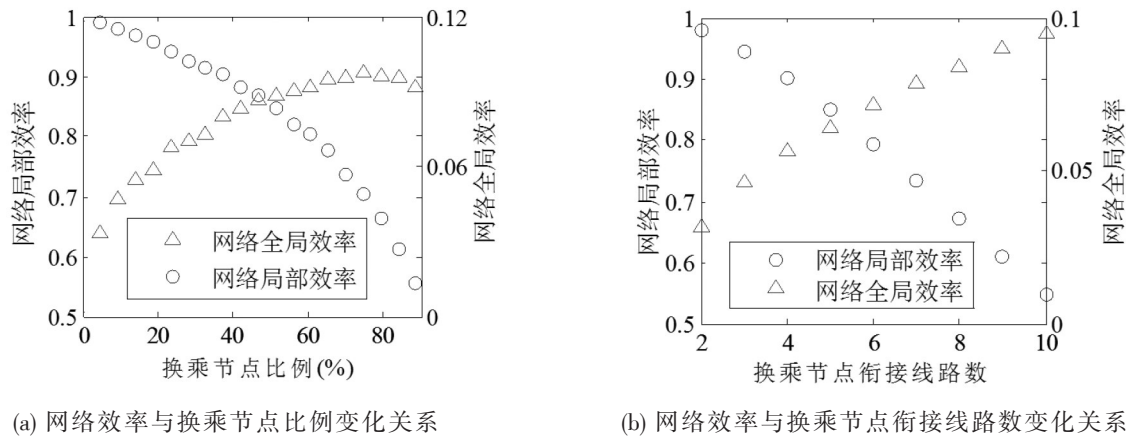


图3 网络效率与换乘节点比例、换乘节点衔接线路数变化关系

Fig.3 Relationship between network efficiency between network average length and transfer nodes proportion and transfer nodes connecting lines

从图3(a)可以看出,网络全局效率与换乘节点的比例呈  $y = 0.023\ln x - 0.036 (R^2 = 0.978)$  的对数分

布,换乘节点比例越高,网络中各点间的经过的路段数越少,路径费用越小,网络的传输效



率越高.网络局部效率随换乘节点比例增加呈  $y = -0.0074 \exp(0.0411x) + 1.01 \exp(-0.002x)$  ( $R^2 = 0.99$ ) 指数降低.换乘节点越多,各社团(线路)间的联系越紧密,换乘节点的失效对网络的局部效率影响越显著,因此,换乘节点比例越多,网络局部效率越小.

图3(b)为换乘费用为5时,网络全局效率和网络局部效率随换乘节点衔接线路数变化关系.从图3(b)可以看出,网络全局效率随换乘节点衔接线路数增加呈对数增加,换乘节点衔接线路数越多,网络中OD间路径费用越少,网络效率越高.网络局部效率随换乘节点衔接线路数增加而降低.换乘节点衔接线路数越多,各线路(社区)间联系过度依赖少数换乘节点,其他节点间的相互连接较差,网络局部效率低.

换乘节点可提高网络可达性,降低网络平均路径长度,但换乘会额外增加换乘费用.图4为换乘费用分别取  $t_h = 1, 3, 5, 7, 9$  时,网络全局效率随换乘节点比例变化关系.从图4可以看出,换乘费用从1到9,网络效率逐渐降低,且换乘费用越高,换乘节点的增加对网络效率增加的效果越不明显,当换乘费用增加到一定程度时,换乘节点对网络的运行效率的提高没有实质性的促进作用.

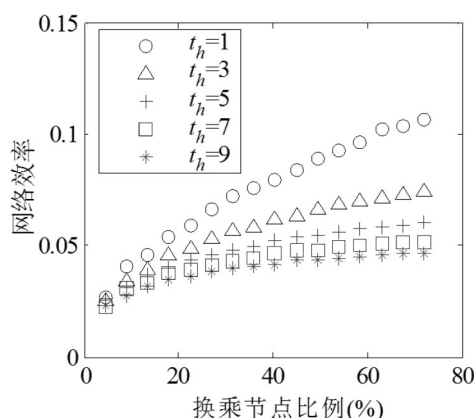


图4 不同换乘效率下网络效率与换乘节点比例变化关系

Fig.4 Relationship between network efficiency and transfer proportion in different transfer efficiency

换乘节点分布会影响线路间的衔接和可达性,影响网络的运行效果.假设次小规模网络有20个换乘站,每次演化过程改变算法阶段(2)中  $m_1$  的取值可改变换乘节点的分布.分别模拟换乘节点均

分在不同线路数量上网络运行效果.网络中同一线路相邻节点区段费用取2,非换乘节点费用取1,换乘节点费用取5,网络全局效率随换乘节点分布的线路数如图5所示.

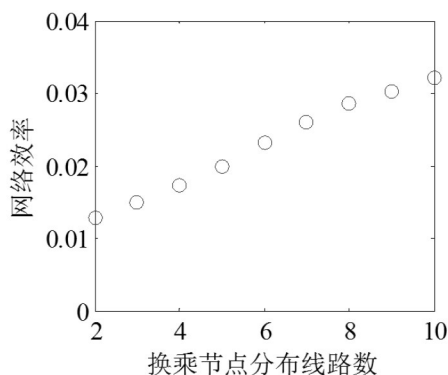


图5 网络效率与换乘节点分布线路数关系

Fig.5 Relationship between network efficiency and transfer nodes distribution

从图5可以看出,网络全局效率随换乘节点分布线路数增加呈线性增加,当换乘节点只分布在少数几条线路上时,网络为非连通网络,存在多个孤立的子网络,此时网络连通性差,各线路间衔接差,网络效率低;当换乘节点均分在每条线路上时,各线路均可通过换乘节点衔接,整个网络连通较好,网络效率较高.换乘节点的分布应使网络充分连通,避免出现孤立的线路,方便乘客出行.

## 5 研究结论

城市轨道交通换乘节点衔接多条线路,对网络的运行具有重要影响.本文基于复杂网络理论,将网络平均路径长度、网络全局效率和网络局部效率作为网络运行效率的评价指标,在此基础上,研究了城市轨道交通换乘节点与网络运行效率变化关系.研究结果表明:

(1) 网络平均路径长度随换乘节点比例、换乘节点衔接线路数增加呈幂函数下降;换乘节点比例对网络平均路径长度的影响存在阈值,超过阈值范围,影响不显著,且网络规模越大,阈值相应增加.在一定范围内增加换乘节点比例和换乘节点衔接线路数可显著降低网络平均换乘次数,提高网络换乘便捷性.

(2) 网络局部效率随换乘节点比例、换乘节点衔接线路数增加呈指数降低.说明换乘节点比例和

节点衔接线路数的增加会降低网络局部效率,进一步说明换乘节点对网络的重要性。

(3) 网络全局效率随换乘节点比例、换乘节点衔接线路数增加呈对数增加,且换乘效率越高,网络效率越高。

(4) 换乘节点在各线路上的分布越均匀,网络全局效率越高。换乘节点均匀分布在各线路上,网络中各线路衔接性好,乘客出行效率高。

本文定量研究了换乘节点对网络运行效率的影响,研究结果可为城市轨道交通换乘节点规划设计提供理论依据。本文的研究仅限于从网络结构角度研究换乘节点数量、衔接线路数及分布对网络运行效率的影响。综合考虑换乘节点工程造价、施工条件、实际网络特点等,如何设计换乘节点使网络局部、全局效率,乘客换乘便捷性等达到最优,这些将作为下一步研究方向。

#### 参考文献:

- [1] Zhang J H, Zhao M W, Liu H K, et al. Networked characteristics of the urban rail transit networks[J]. *Physica A*, 2013, 392: 1538–1546.
- [2] Carmi S, Wu Z, Havlin S, et al. Transport in networks with multiple sources and sinks[J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2008, 84(2): 28005.
- [3] Xue Y, Wang J, Li L, et al. Optimizing transport efficiency on scale-free networks through assortative or dissortative topology[J]. *Physical Review E*, 2010, 81(3): 037101.
- [4] Gao C, Wei D, Hu Y, et al. A modified evidential methodology of identifying influential nodes in weighted networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2013, 392(21): 5490–5500.
- [5] Givoni M, Rietveld P. Do cities deserve more railway stations? The choice of a departure railway station in a multiple-station region[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014, 36: 89–97.
- [6] Jin J, Li M, Wang Y, et al. Importance analysis of urban rail transit network station based on passenger[J]. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 2013, 5: 232.
- [7] Guo Z, Wilson H M. Assessing the cost of transfer inconvenience in public transport systems: A case study of the London Underground[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2011, 45(2): 91–104.
- [8] 刘剑锋, 孙福亮, 柏赞, 等. 城市轨道交通乘客路径选择模型及算法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2009, 9(2): 81–86. [LIU J F, SUN F L, BAI Y, et al. Passenger flow route assignment model and algorithm for urban rail transit network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2009, 9(2): 81–86.]
- [9] Kurant M, Thiran P. Layered complex networks[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(13): 138701.
- [10] Latora V, Marchiori M. Efficient behavior of small-world networks[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(19): 198701.
- [11] 丁益民, 丁卓, 杨昌平. 基于社团结构的都市地铁网络模型研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 98901–98901. [DING Y M, DING Z, YANG C P. The network model of urban subway networks with community structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 98901–98901.]