

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.10.015

# 基于复杂网络理论的互联网租赁自行车-公交系统站的优化配置

孙文霞, 赵晓娟, 马晓静

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:** 为处理好互联网租赁自行车与轨道交通、汽车公交的竞争与合作关系, 提高公共交通出行效率, 优化公共交通网络, 通过建立互联网租赁自行车-公交系统站的配置模型, 将互联网租赁自行车站点配置融入公共交通网络规划中。利用 Space L 模型、Space P 模型分别构建公交系统有向网络模型, 在此基础上, 针对由复杂网络拓扑特性得出的公交系统网络中重要度低的节点, 结合自行车接驳距离模型以及汽车公交线路最优站间距的确定, 建立互联网租赁自行车-公交系统站的配置模型。该模型最终确定自行车配置站点时, 需要综合分析站点及其所在线路相关网络信息、环境信息, 对汽车公交线路进行调整, 进而达到通过配置自行车站点优化现有城市交通线网的目的。最后以天津为例, 对天津市 1 273 个站点, 311 条线路建立天津市公交系统网络, 选取网络中度值较低的 14 个站点所在线路进行优化配置, 并利用复杂网络拓扑特性指标对优化前后交通网络进行分析评价。结果表明: 优化后的公共交通网络平均出行站点数量降低了 1.94%, 平均换乘次数降低了 4.15%。验证了互联网租赁自行车-公交系统站的配置模型的合理性, 通过合理配置自行车站点, 在保证公共交通网络覆盖率不变的前提下, 节约站点数量, 提高了站点利用率及公共交通出行效率。

**关键词:** 交通工程; 自行车站点配置; 复杂网络; 城市公共交通; 网络规划

**中图分类号:** U491.1<sup>+</sup>7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0268(2018)10-0111-06

## Optimal Configuration of Station of Internet Rental Bicycle-transit System Based on Complex Network Theory

SUN Wen-xia, ZHAO Xiao-juan, MA Xiao-jing

(School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** In order to handle the competition and cooperative relationship among rail transit, bus and sharing bicycle, to improve public transport travel efficiency, and to optimize the public transport network, the configuration of internet rental bicycle is integrated into the public transport network planning by establishing the configuration model of internet rental bicycle-transit system station. Space L model and Space P model are used respectively to construct the bus network oriented network model. On this basis, aiming at the node of low importance in the bus system network which is derived from the topological characteristics of complex network, the internet rental bicycle-bus system station is established based on the bicycle connection distance model and determination of the optimal station spacing of bus lines. When the model finally determines the bicycle configuration site, it is necessary to comprehensively analyze the network information, the environment information of the station and the routes, and to adjust the bus routes, so as to achieve the objective of optimizing the existing urban traffic line network by configuring bicycle stations. Finally, taking Tianjin for

收稿日期: 2017-06-13

基金项目: 河北省科技计划项目 (15456132)

作者简介: 孙文霞 (1972-), 女, 河北唐山人, 副教授. (sunwenxia@hebut.edu.cn)

example, the network system of Tianjin public transit for 1 273 stations and 311 routes in Tianjin is established the routes of 14 stations with lower network median are selected for optimal configuration, and the traffic networks before and after optimization are analysed and evaluated by using the index of complex network topological characteristics. The result shows that the average number of travel sites in the optimized public transport network is reduced by 1.94%, and the average transfer coefficient is reduced by 4.15%. It is validated the rationality of the configuration model of internet rental bike- transit system stations. By reasonably configuring bike stations, the number of stations is saved, the utilization rate of buses and the efficiency of public transport trips are improved under the premise of ensuring the same coverage of public transport networks.

**Key words:** traffic engineering; bike station configuration; complex network; urban public transport; network planning

## 0 引言

随着互联网租赁自行车(俗称共享单车)的规模不断扩大,其与汽车公交在短距离出行中的竞争也日益凸显。作为公共出行的重要组成部分,自行车出行对原有城市公共交通产生了不容忽视的影响。因此,有必要将自行车出行考虑到城市公共交通运输规划中,并系统地协调其与公交系统(包括轨道交通和汽车公交)的关系,对公交系统网络进行调整。近年来不少学者针对自行车发展的相关问题进行了研究,涉及自行车系统的使用特性及适应性<sup>[1-4]</sup>、租赁点的规划布局<sup>[5-7]</sup>、运营管理<sup>[8-11]</sup>等方面的内容。A Faghih-Imani<sup>[12]</sup>等通过对纽约自行车和出租车系统详细调查研究证实,在人口稠密的城市地区,在3 km范围内自行车可以与汽车竞争,肯定了自行车短距离出行优势。吴志周<sup>[13]</sup>、杨柳<sup>[14]</sup>等分别基于非集计模型、Nested Logistic模型建立轨道交通换乘自行车的方式选择预测模型,明确选用自行车换乘的可行性。

综上所述,目前关于自行车相关问题的研究集中于自行车系统本身。很少有学者将自行车作为一种交通方式纳入交通网络中,构建综合交通网络模型研究交通线路规划及互联网租赁自行车站点的配置。因此,本研究基于复杂网络理论,在城市公交系统网络模型的基础上,通过研究自行车站点配置模型,重点研究自行车站点配置对现有城市交通线网的优化,为公共交通系统的研究提供新的思路和参考依据。

## 1 基于复杂网络的城市公交系统

目前针对公交系统网络的建模方法主要有 Space L, Space P, Space R 等方式<sup>[15]</sup>, Space L 方法构造的网络既较好地保留了原网络的拓扑性质,同时网络中的节点又具有明确的地理坐标; Space P 方法构建的网络主要反映了线路之间的连接关系,更适于研究网络的换乘状况。因此,本研究采用这2种方

法构建相关网络,研究网络的拓扑性质。

公交系统包含轨道交通、汽车公交,因此本研究在文献[16]的基础上,将轨道交通网络与汽车公交网络复合形成公交系统网络,构建方法如下:

(1) 基于 Space L 或 Space P 分别构建有向的轨道交通网络和汽车公交网络。

(2) 复合节点说明,若1个地点存在轨道交通和汽车公交相互衔接的换乘站,则将其视为1个节点,此类节点是轨道交通网络与汽车公交网络的有效连接点。

(3) 复合边说明,若2个节点在轨道交通网络和汽车公交网络中均有连边,则在复合网络中视为1条连边,不再重复连线。最终形成有向无权的公交系统网络。

在复杂网络理论中采用多种指标衡量网络拓扑特性<sup>[17]</sup>,本研究采用度、特征路径长度、聚类系数统计指标分析评价不同网络模型优化前后的拓扑性质,其计算公式如下。

特征路径长度:

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

式中,  $N$  为节点的总数;  $d_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  之间的最短距离聚类系数。

$$C_i = \frac{E_i}{\frac{1}{2}k_i(k_i - 1)}, \quad (2)$$

式中,  $C_i$  为聚类系数;  $E_i$  为与节点  $i$  相连的节点之间有边的数目;  $k_i$  为与节点  $i$  相连接的节点总数。

整个网络的聚类系数  $C$  可表示为:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i. \quad (3)$$

## 2 自行车站点配置模型

### 2.1 自行车接驳距离模型

自行车交通作为一种短距离出行的工具,特别是作

为公交系统的接驳工具, 得到了广大出行者的认可, 但由于自行车主要靠人力驱动, 仅在公共交通站点适当范围内, 出行者会选择自行车换乘, 一旦超出其范围, 自行车便不再是人们的最佳选择。由上可知, 当出行距离大于步行可接受距离且出行花费时间小于汽车公交出行时间, 出行者将会选择自行车出行。在一次出行中均涉及从出发地到换乘站点, 换乘站点到目的地两次步行出行, 故自行车站点接驳距离  $R$  为:

$$\begin{cases} R > R_0 \\ T_{\text{自行车}} < T_{\text{公交}} \end{cases}, \quad (4)$$

其中,

$$T_{\text{自行车}} = \frac{2R_1}{V_{\text{步行}}} + T_{\text{存、取车}} + \frac{R - 2R_1}{V_{\text{自行车}}}, \quad (5)$$

$$T_{\text{公交}} = \frac{2R_2}{V_{\text{步行}}} + T_{\text{候车}} + \frac{R - 2R_2}{V_{\text{公交}}}, \quad (6)$$

式中,  $R$  为居民出行距离, 即从家到公共站点;  $R_0$  为居民步行到公共交通站点可接受距离;  $T_{\text{自行车}}$  为选用自行车作为接驳工具所需时间;  $T_{\text{公交}}$  为选用汽车公交作为接驳工具所需时间;  $R_1$  为自行车站点与出发地 (或目的地) 间的平均步行距离;  $V_{\text{步行}}$  为步行速度;  $T_{\text{存、取车}}$  为存、取自行车的总时间;  $V_{\text{自行车}}$  为自行车的行驶速度;  $R_2$  为汽车公交站点与出发地 (或目的地) 间的平均步行距离;  $T_{\text{候车}}$  为等待汽车公交的时间;  $V_{\text{公交}}$  为汽车公交的运行速度。

## 2.2 接驳对象站间距模型

目前汽车公交线路站间距的确定主要是考虑居民步行出行距离, 即其站点的覆盖率是以步行范围作为基础确定。采用自行车作为接驳工具时, 站点的覆盖率就会增加, 站间距就需要重新确定, 以保证资源的合理利用。

$$S^* = 2\sqrt{2L_a T_l V_a}, \quad (7)$$

式中,  $S^*$  为最佳站间距;  $L_a$  为出行距离;  $T_l$  为停车损失;  $V_a$  为接驳方式速度。

根据已有研究和经验数据可确定不同出行方式速度, 见表 1。当选择自行车作为接驳工具时, 由于自行车的速度是步行的 2 倍, 由最佳站间距式 (7) 可知, 其对应的最佳站间距应为现阶段以步行为基础设站的  $2^{1/2}$  倍, 即采用自行车作为接驳工具后, 站间距最大可调整为 1.4 km 设站。

表 1 不同出行方式速度对比表

Tab. 1 Comparison of speeds of different trip modes

| 不同出行方式                     | 步行 | 自行车 | 汽车公交 |
|----------------------------|----|-----|------|
| 速度/(km · h <sup>-1</sup> ) | 5  | 10  | 15   |

## 3 互联网租赁自行车 - 公交系统站的配置

目前, 国内城市多数通过提高公交站点覆盖率和线网密度来改善公共交通现状, 但容易造成线路重复、站点过多, 导致出行效率降低, 不能实现预期效果。因此, 本研究基于复杂网络计算各站点节点度值, 对度值较低站点所在线路进行优化, 利用自行车站点替代公交站点, 使汽车公交线路跨站行驶或保持上下行一致避免绕行。互联网租赁自行车 - 公交系统站的配置流程如图 1 所示。

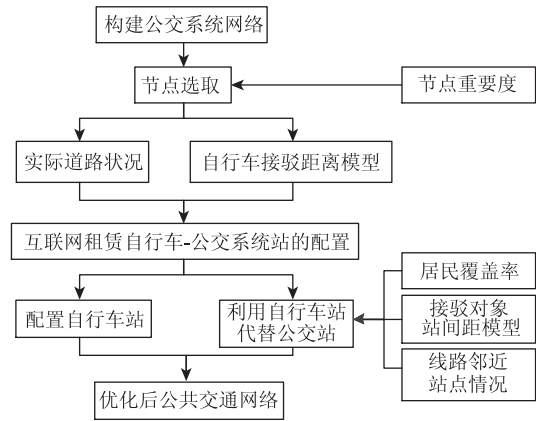


图 1 互联网租赁自行车 - 公交系统站的配置流程图

Fig. 1 Flowchart of configuration of internet rental bicycle-transit system stations

在进行互联网租赁自行车 - 公交系统站的配置时需要遵循以下原则:

(1) 由于本研究主要针对度值较低的点进行优化, 因此所选站点均配置自行车站, 以扩大站点覆盖范围, 提高站点利用率;

(2) 在满足自行车接驳距离模型和实际道路无限行的情况下进行互联网租赁自行车 - 公交系统站的配置;

(3) 配置过程中, 尽量保持线路上下行一致, 减少绕行, 降低非直线系数;

(4) 在考虑优化线路的居民覆盖率、接驳对象站间距模型、邻近站点线路通过情况下利用自行车站代替公交站, 即实现线路跨站运行。

## 4 算例分析

### 4.1 复杂网络系统分析

本研究范围涉及红桥区、南开区、和平区、河东区、河西区、河北区、北辰区 7 个区外环线以内的 311 条公交线路, 5 条地铁线路, 总计 1 273 个公交、地铁站点。该数据统计截止于 2017 年 3 月。根

据获得数据建立天津市公交系统网络, 借助 PAJEK 软件构建公交系统停靠站网络模型, 如图 2 所示。由图可知, 该网络中心密集程度明显高于外围, 符合城市交通发展从中心向外围扩散的特性, 也较为符合天津市的地理现状及公共交通分布状况。



图 2 基于邻接站点的公交系统复合网络示意图

Fig. 2 Schematic diagram of public transport system complex network based on adjacent stations

经统计并利用 MATLAB 计算得出基于 Space L 构建的公交系统网络特性指标如表 2 所示。

表 2 Space L 网络特性指标

Tab. 2 Characteristics indexes of Space L network

| 最大度值 | 最小度值 | 平均度值 | 特征路径长度 | 聚类系数    |
|------|------|------|--------|---------|
| 24   | 1    | 3.57 | 17.02  | 0.153 4 |

由表 2 可知: (1) 平均度值为 3.57, 即任意站点平均有 3 或 4 条线路经过。(2) 特征路径长度即平均最短距离为 17.02, 表明居民出行平均需要乘坐 17 站可到达目的地, 略高于 2009 年赵俊红等<sup>[18]</sup>计算得出的天津公共交通无向网络平均最短距离长度 16.26。随着公共交通的不断发展, 平均路最短距离应该逐渐减小, 由于本研究构建的是有向网络, 将公交线路上下行站点差异、单行公交线、环线等情况考虑其中, 因此得出的天津公共网络的平均路径长度高于早期结论。(3) 聚类系数用于研究相邻的节点之间连接的紧密程度, 因此不必考虑边的方向。对于有向图, 将其当成无向图来处理。计算得出网络的聚类系数为 0.153 4, 相对较低, 说明物理空间上, 网络较为稀疏, 还有较大的发展空间。网络聚类系数大, 说明节点与附近各个节点连接紧密度越高, 越便于市民乘车。比较大的聚类系数还表明如果网络中的某个节点因某种原因被取消时, 对原有直达节点之间的连接不会构成太大的影响, 网络的容错性较高。

基于 Space P 构建的公共交通换乘网络中, 计算得出该网络的平均度为 109.75, 表明天津市任意站点出发不经过换乘平均可直达 109 个站点。在换乘网络中, 度越大, 从该站点出行换乘的可能性就越小, 该地居民出行就越方便; 相反, 度越小, 从该

站点出行换乘的可能性就越大。平均最短距离为 2.17, 表示居民从某站点出发平均需要 2 次左右的换乘可以达到目的地。网络的平均聚集系数为 0.56, 站点聚集系数较大, 说明天津市公共交通总体换乘状况较好。站点聚集系数越大, 表明该站点的相邻站点间的换乘状况越好。

#### 4.2 单一线路优化

根据交通报告, 得出 2.1 自行车接驳距离模型中相关参数如表 3 所示。

表 3 自行车接驳距离模型相关参数

Tab. 3 Parameters of bicycle connection distance model

| 参数 | $R_0/$<br>m | $R_1/$<br>m | $V_{步行}/$<br>$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $T_{存,取车}/$<br>min | $V_{自行车}/$<br>$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $R_2/$<br>m | $T_{候车}/$<br>min | $V_{公交}/$<br>$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ |
|----|-------------|-------------|----------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|-------------|------------------|----------------------------------------------|
| 数值 | 784         | 135         | 5                                            | 2                  | 10                                            | 500         | 5                | 15                                           |

将上述参数代入自行车接驳距离模型得出选择自行车出行距离范围  $0.784 \text{ km} \leq R \leq 4.69 \text{ km}$ , 即当在公共交通站 0.784 km 到 4.96 km 范围内, 出行者放弃步行, 利用自行车出行的时间短, 但实际上通勤出行占据公共交通出行的主导地位, 据相关统计显示 90% 的出行者能接受的自行车总出行时间不超过 15 min, 代入式 (5) 可得, 自行车出行距离不超过 1.897 km。

具体优化方案以 819 路公交线路为例。819 路公交从万新村南开往胸科医院环湖医院方向时, 由怡然庭院经詹庄子、造纸宿舍、跃进路、栖霞道到崔家码头定为 1 号路段; 从胸科医院环湖医院开往万新村南方向时, 由崔家码头经津门里、詹安璐、水东里、建新东里、欣园小区、金地紫乐府、二号桥到怡然庭院定为 2 号路段。1 号路段的詹庄子、造纸宿舍、跃进路、栖霞道站点分别有 16, 16, 18, 15 条公交线路停靠, 公交覆盖率较高, 且距其邻近的站点均不超过 1.897 km 可满足自行车覆盖; 2 号路段范围住宅小区较多意味着有更大交通需求, 其中建新里站出入度均为 1, 只有 819 路和 760 路 2 条线路停靠且均为该站向市中心方向线路并没有返回线路致使该站覆盖范围内居民出行不便, 本研究针对该线路优化方案为选取 1 号路段的 4 站公交站设立自行车站点, 使怡然庭院到崔家码头线路上下行线路保持一致。优化结果如图 3 所示。

#### 4.3 网络的优化分析

在现有公交系统网络基础上, 结合高德地图公交线路实际运行情况, 本研究选取 73 个出入度为 1 的站点进行优化, 共涉及 43 条公交线路。其优化前后站点公交系统网络站点情况如表 4 所示, 其中 1 表示存在, 0 表示不存在。

表 4 优化前后公交系统网络站点情况

Tab. 4 Stations of public transport system network before and after optimization

|    |     |     |     |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |       |       |
|----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|
| 站点 | 1   | 2   | ... | 298 | 299   | ... | 327   | ... | 397   | ... | 605   | 606 | ...   | 825   | 826   |
| 原  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1     | 1   | 1     | 1   | 1     | 1   | 1     | 1   | 1     | 1     | 1     |
| 现  | 1   | 1   | 1   | 0   | 0     | 1   | 0     | 1   | 0     | 1   | 0     | 0   | 1     | 0     | 0     |
| 站点 | ... | 986 | ... | 999 | 1 000 | ... | 1 013 | ... | 1 083 | ... | 1 222 | ... | 1 271 | 1 272 | 1 273 |
| 原  | 1   | 1   | 1   | 1   | 1     | 1   | 1     | 1   | 1     | 1   | 1     | 1   | 1     | 1     | 1     |
| 现  | 1   | 0   | 1   | 0   | 0     | 1   | 0     | 1   | 0     | 1   | 0     | 1   | 1     | 1     | 1     |



图 3 天津 819 路优化线路

Fig. 3 Optimized 819 bus route in Tianjin

优化后公交系统网络较原网络少了 14 个公交站点, 由自行车站点代替, 优化后对于由自行车 - 公交系统构成的复合网络总站点数不变, 增加了站点之间的连接, 该网络要比原公交系统网络连通性高, 优于原公交系统网络。针对优化前后的公共交通网络, 本研究分别用 Space L 和 Space P 构建网络, 并就网络的拓扑特性进行比较, 计算结果如表 5、表 6 所示。

表 5 基于 Space L 优化前后网络的拓扑特性比较

Tab. 5 Comparison of topology characteristics of network before and after optimization based on Space L

|              |       |        |        |
|--------------|-------|--------|--------|
| Space L      | 平均度   | 聚类系数   | 特征路径长度 |
| 原公交系统网络      | 3. 57 | 0. 153 | 17. 02 |
| 优化后公交系统网络    | 3. 68 | 0. 159 | 16. 69 |
| 自行车 - 公交系统网络 | 3. 76 | 0. 162 | 16. 51 |

表 6 基于 Space P 优化前后网络的拓扑特性比较

Tab. 6 Comparison of topology characteristics of network before and after optimization based on Space P

|              |         |        |        |
|--------------|---------|--------|--------|
| Space P      | 平均度     | 聚类系数   | 特征路径长度 |
| 原公交系统网络      | 109. 75 | 0. 562 | 2. 17  |
| 优化后公交系统网络    | 111. 44 | 0. 572 | 2. 08  |
| 自行车 - 公交系统网络 | 112. 64 | 0. 576 | 2. 02  |

由表 5 可得, 在 Space L 构建的网络中, 优化后的公交系统网络平均度高于原公交系统网络, 说明优化后的网络中, 任意站点通过的线路数高于原网络, 站点利用率提高; 优化后网络的聚类系数有所

提高, 说明优化后网络的线路衔接和配合度更高, 网络的容错能力提高; 特征路径长度的减少, 说明居民出行平均所需乘坐的站点数减少。

Space P 构建的网络中, 由表 6 数据可知, 优化后网络的平均度增加, 说明了优化后网络换乘的便利性提高; 聚类系数变化较小但仍有提高, 说明站点与邻接站点所在的其他线路的换乘情况有所改善, 但由于优化的节点数量少, 使得整个网络整体优化效果并不显著; 优化后网络的平均路径长度减少, 说明居民出行平均换乘次数降低。

综上, 优化后的公交系统网络, 站点衔接, 线路配合度更高, 提高了整个公共交通网络的效率和服务水平。

5 结论

本研究基于复杂网络理论, 构建了公交系统有向网络模型进行网络特性分析, 选取网络中部分节点, 结合自行车与公交系统换乘距离及自行车为接驳对象的最优站间距, 进行互联网租赁自行车 - 公交系统站的配置, 将自行车站点的设置引入公共交通网络, 对公交线路进行优化。形成一个层次清晰, 衔接紧密, 资源合理利用, 高效的公共交通出行网络。最后以天津市公交系统网络为例进行验证, 优化后的公交系统网络平均出行站点数量降低了 1. 94%, 平均换乘系数降低了 4. 15%, 验证了互联网租赁自行车 - 公交系统站的配置模型的可行性和有效性。但是该研究在进行公交线路优化时, 主要依靠相关人员经验判断, 缺乏理论指导, 建立线路优化模型是本研究今后进一步研究的方向。

参考文献:

References:

[1] FISHMAN E, WASHINGTON S, HAWORTH N. Bike Share's Impact on Car Use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia [J]. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2014, 31 (2): 13 - 20.

- [2] FISHMAN E, WASHINGTON S, HAWORTH N, et al. Factors in Influencing Bike Share Membership: An Analysis of Melbourne and Brisbane [J]. *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, 2015, 71: 17–30.
- [3] FAGHIH-IMANI A, ELURU N. Determining the Role of Bicycle Sharing System Infrastructure Installation Decision on Usage: Case Study of Montreal BIXI System [J]. *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, 2016, 94: 685–698.
- [4] 潘海啸. 中国城市自行车交通政策的演变与可持续发展 [J]. *城市规划学刊*, 2011 (4): 82–86.  
PAN Hai-xiao. The Evolving Cycle Transport Policy in China and Urban Sustainable Development [J]. *Urban Planning Forum*, 2011 (4): 82–86.
- [5] LIN J R, YANG T H. Strategic Design of Public Bicycle Sharing Systems with Service Level Constraints [J]. *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, 2011, 47 (2): 284–294.
- [6] ERDOGAN G, BATTARRA M, CALVO R W. An Exact Algorithm for the Static Rebalancing Problem Arising in Bicycle Sharing Systems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245 (3): 667–679.
- [7] KADRI A A, KACEM I, LABADI K. A Branch-and-bound Algorithm for Solving the Static Rebalancing Problem in Bicycle-sharing Systems [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 95: 41–52.
- [8] ZHANG D, YU C, DESAI J, et al. A Time-space Network Flow Approach to Dynamic Repositioning in Bicycle Sharing Systems [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 10 (54): 1–20.
- [9] JIMÉNEZ P, NOGAL M, CAULFIELD B, et al. Perceptually Important Points of Mobility Patterns to Characterise Bike Sharing Systems: The Dublin Case [J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 54: 228–239.
- [10] 王在涛, 马寿峰. 公共自行车运营模式的定量研究——应用委托代理理论 [J]. *系统工程*, 2013, 31 (11): 56–59.  
WANG Zai-tao, MA Shou-feng. The Quantitative Research on Different Business Models of Bikesharing Systems with Principal-agent Theory [J]. *Systems Engineering*, 2013, 31 (11): 56–59.
- [11] 李敏迪. 车辆供给和距离效应对公共自行车借车行为影响 [J]. *公路交通科技*, 2017, 34 (2): 121–128.  
LI Min-di. Effect of Bike Supply and Distance Effect on Behavior of Borrowing Public Bikes [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34 (2): 121–128.
- [12] FAGHIH-IMANI A, ANOWAR S, MILLER E J, et al. Hail a Cab or Ride a Bike? A Travel Time Comparison of Taxi and Bicycle-sharing Systems in New York City [J]. *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, 2017, 101: 11–21.
- [13] 吴志周, 范宇杰, 陶佳, 等. 城市轨道交通公共自行车换乘需求预测方法研究 [J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2013, 37 (5): 919–923.  
WU Zhi-zhou, FAN Yu-jie, TAO Jia, et al. Bike-and-Ride Demand Forecasting in Urban Rail Transit Station [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2013, 37 (5): 919–923.
- [14] 杨柳, 王元庆, 李超. 推动城市轨道交通换乘自行车出行——基于西安经济技术开发区的实例分析 [J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2015, 35 (增1): 140–144.  
YANG Liu, WANG Yuan-qing, LI Chao. Bike-and-rail Study in Economic and Technological Development Zone of Xi'an City [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2015, 35 (S1): 140–144.
- [15] 何大韧, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
HE Da-ren, LIU Zong-hua, WANG Bing-hong. *Complex Systems and Complex Networks* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [16] 郑啸, 陈建平, 邵佳丽, 等. 基于复杂网络理论的北京公交网络拓扑性质分析 [J]. *物理学报*, 2012, 61 (19): 95–105.  
ZHENG Xiao, CHEN Jian-ping, SHAO Jia-li, et al. Analysis on Topological Properties of Beijing Urban Public Transit Based on Complex Network Theory [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61 (19): 95–105.
- [17] 邓亚娟, 杨云峰, 马荣国. 基于复杂网络理论的公路网结构特征 [J]. *中国公路学报*, 2010, 23 (1): 98–104.  
DENG Ya-juan, YANG Yun-feng, MA Rong-guo. Highway Network Structure Characteristics Based on Complex Network Theory [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23 (1): 98–104.
- [18] 赵俊红, 马军海, 李瑞山. 基于天津市公共交通网络的复杂性研究 [J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2009, 6 (4): 76–82.  
ZHAO Jun-hong, MA Jun-hai, LI Rui-shan. Complexity Research Based on Public Transport Network of Tianjin [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2009, 6 (4): 76–82.