

· 改革开放40周年专题: 技术经济 ·

基于复杂网络的城市轨道交通末班车衔接研究



□吴建军¹ 尹浩东¹ 郭欣¹ 刘浩² 魏运³

[1. 北京交通大学 北京 100044; 2. 北京交通信息中心 北京 100161;

3. 北京城建设计发展集团股份有限公司 北京 100037]

[摘要] 成网条件下,城市轨道交通网络末班车衔接状况是评价城市轨道交通管理和运营服务水平的一项重要标志。基于网络构建方法,提出了以实际线路末班车运营时刻表建立城市轨道交通网络末班车衔接矩阵的网络化表示方法,其中点表示城市轨道交通网络换乘站点,边表示换乘站之间是否衔接;建立了衡量城市轨道交通末班车换乘衔接性的评价指标;分析了网络特征参量(度、最短路径、衔接比例等),并以北京市地铁网络进行了实例研究,为研究城市轨道交通网络末班车的换乘衔接问题提供了可量化的评价方法和新的思路。

[关键词] 城市轨道交通; 末班车; 衔接; 复杂网络

[中图分类号] U231+4

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2018)-1017

Coordination of the Last Train in Urban Rail Transit Based on Complex Network

WU Jian-jun¹ YIN Hao-dong¹ GUO Xin¹ LIU Hao² WEI Yun³

(1. Beijing Jiaotong University Beijing 100044 China; 2. Beijing Transportation Information Center Beijing 100161 China; 3. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited Beijing 100037 China)

Abstract The coordination of the last train in the urban rail network is an important evaluation index for the management and operational service. Based on the complex network, we propose an approach to calculate the coordination of the last train in the urban rail network according to the actual published timetable. Firstly, the adjacency matrix is built where the elements shows the coordination situation of last trains. In the constructed network, the nodes represent the transfer stations while the links indicate the connective between two transfer stations. Then, we analyze network characteristic parameters (degree, shortest path, proportion of coordination, etc.). The proposed approach provides a quantitative evaluation model and a new viewpoint for the issue of coordination of the last train in the urban rail network.

Key words urban rail transit; the last train; coordination; complex network

[收稿日期] 2018-07-07

[基金项目] 科技部国家重点研发计划(2017YFC0803305); 杰出青年科学基金(71525002); 国家重点研发计划(2016YFB1200402); 北京市青年拔尖人才计划(2016000021223ZK33)。

[作者简介] 吴建军(1973-)男,博士,北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室教授;尹浩东(1988-)男,北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室博士后;郭欣(1989-)女,北京交通大学交通运输学院师资博士后;刘浩(1977-)男,博士,北京交通中心研究员;魏运(1982-)男,博士,北京城建设计发展集团股份有限公司教授级高工。

引言

随着城市化进程的加速, 公共交通已经成为城市居民出行的主要选择。它具有运量大、快速准时、安全高效等优点, 同时节能环保、节约土地资源, 显著缓解地面交通压力。城市轨道交通是大众出行的主要载体, 是城市功能正常运转的重要支撑, 其发展趋势呈现了集中型、网络化、多模式的发展态势^[1]。近年来, 各大城市相继发展城市轨道交通网络, 截止截至2017年末, 中国内地共计34个城市开通城市轨道交通并投入运营, 开通城市轨道交通线路165条, 运营线路长度达到5033公里^[2]。此外, 在“十三五”期间, 各大城市将在城市轨道交通上投入更大的人力和物力。随着城市轨道交通新线路的不断建设和投入使用, 城市轨道交通系统朝着高密度、高效率、网络化的趋势发展。共计14个城市已呈现100公里以上的网络化运营态势, 并且网络客流量持续攀升, 早晚高峰时段大部分线

路客流量已经呈现超饱和状态。以北京为例, 2017年, 北京累计完成客运量37.8亿人次, 日均客运量1035万人次, 居全国首位^[2]。

在城市轨道交通出行中, 可将一个出行日划分成不同阶段^[3]: 早高峰阶段、晚高峰阶段、平峰阶段、首班列车阶段和末班列车阶段。在每个阶段, 时刻表优化旨在集中优化某种目标并找出最佳解决方案, 例如可选择减少乘客等待时间、减少乘客换乘时间、降低列车运营成本、提高路网可达性和增加换乘衔接方向等目标^[4]。而末班列车通常是城市轨道交通系统乘客出行、换乘的最后机会, 某些线路列车提前结束运营则会导致乘客换乘失败。且随着城市轨道交通网络化, 末班车的换乘衔接问题变得极其复杂。若不科学、合理地协调各线路列车运行计划, 将会造成乘客等待时间冗长, 换乘效率低下, 运力资源浪费等问题。据统计, 北京地铁末班车乘客出行中, 平均出行时间为2847秒, 且超过65%的乘客需要换乘才能完成其出行需求(如图1)。

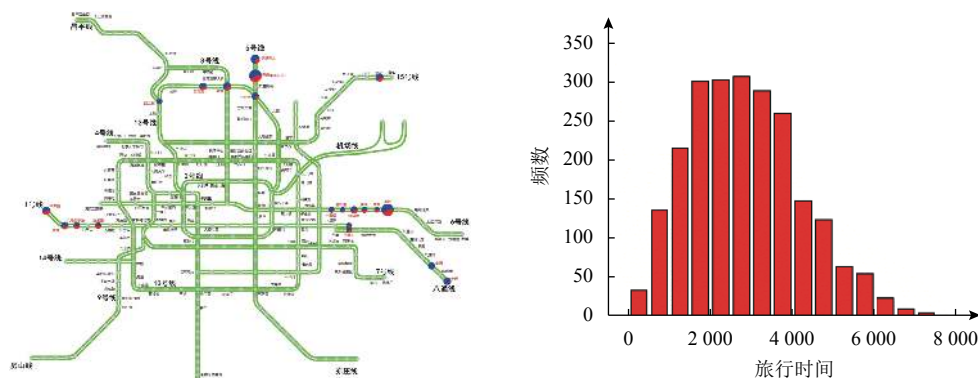


图1 北京地铁末班车乘客换乘需求和平均旅行时间

徐瑞华和李璇^[5]分析了城市轨道交通网络末班车衔接关系的复杂性及影响因素, 并给予网络线路衔接关系建立了网络末班车衔接方案优化模型。Kang等^[6]构建了优化列车运营时间的优化模型, 减少换乘冗余时间, 提升网络末班列车出行可达性。同年, Kang等拓展了其上述研究^[7], 利用改进模型最大化乘客换乘衔接次数, 有效提升末班车阶段乘客换乘效率, 减少乘客换乘等待时间。Dou等^[8]则从乘客多模式出行角度出发, 以末班列车时刻表协同优化问题为背景, 求解匹配城市轨道交通末班列车的最优公交时刻表, 提高公交与城市轨道交通衔接服务水平。陈垚等^[9]则通过压缩末班车区间运行时间与非换乘站停站时间, 实现末班车双向衔接, 用来提升路外可达

性。Yin等^[10]提出了上层为提升乘客换乘服务水平, 下层降低企业运营成本的双层规划模型, 用来解决末班车时刻表问题。2018年, Kang等^[11]则从城市轨道交通末班车辆和公交车服务接驳的角度, 解决城市轨道交通末班车时刻表优化问题, 提升乘客在公共交通网站中的可达性。

现有文献则着重优化时刻表协同换乘, 以提升路网可达性, 减少乘客在换乘站的换乘等待时间。本文则基于城市轨道交通网络分析, 建立了末班车衔接的网络模型, 采用衔接矩阵对模型的度分布、最短路径、衔接比例等网络特征量进行分析, 该方法为城市轨道交通网络末班车的换乘衔接问题提供了可量化的评价方法, 并具有较强的可扩展性以及适用性。

一、城市轨道交通网络换乘衔接的网络模型

轨道交通网络是复杂的、动态的巨系统。从其结构上看,网络形态呈现出不同的结构特性,可以综合运用系统科学与交通运输工程的方法、理论进行系统研究。本文从网络科学的观点出发,提出以城市轨道交通线路运营时刻表构建末班列车衔接矩阵的网络建模方法。

轨道交通运营线路有上、下行之分,为了描述这种带有方向性的线路之间的连通关系,通常将城市轨道交通网络用有向图进行表示,建立车站到顶点的映射和区间到有向边的映射关系。其中节点由城市轨道交通网络换乘站组成,边由换乘站间衔接关系确定。根据城市轨道交通每条线路末班车运营时刻表,可以得到城市轨道交通线网中各换乘站的末班列车时刻表,进而得出轨道交通网络线网末班车的衔接关系图,如图2所示,其中箭头表示轨道交通线网中不同线路末班车之间可以衔接的方向。

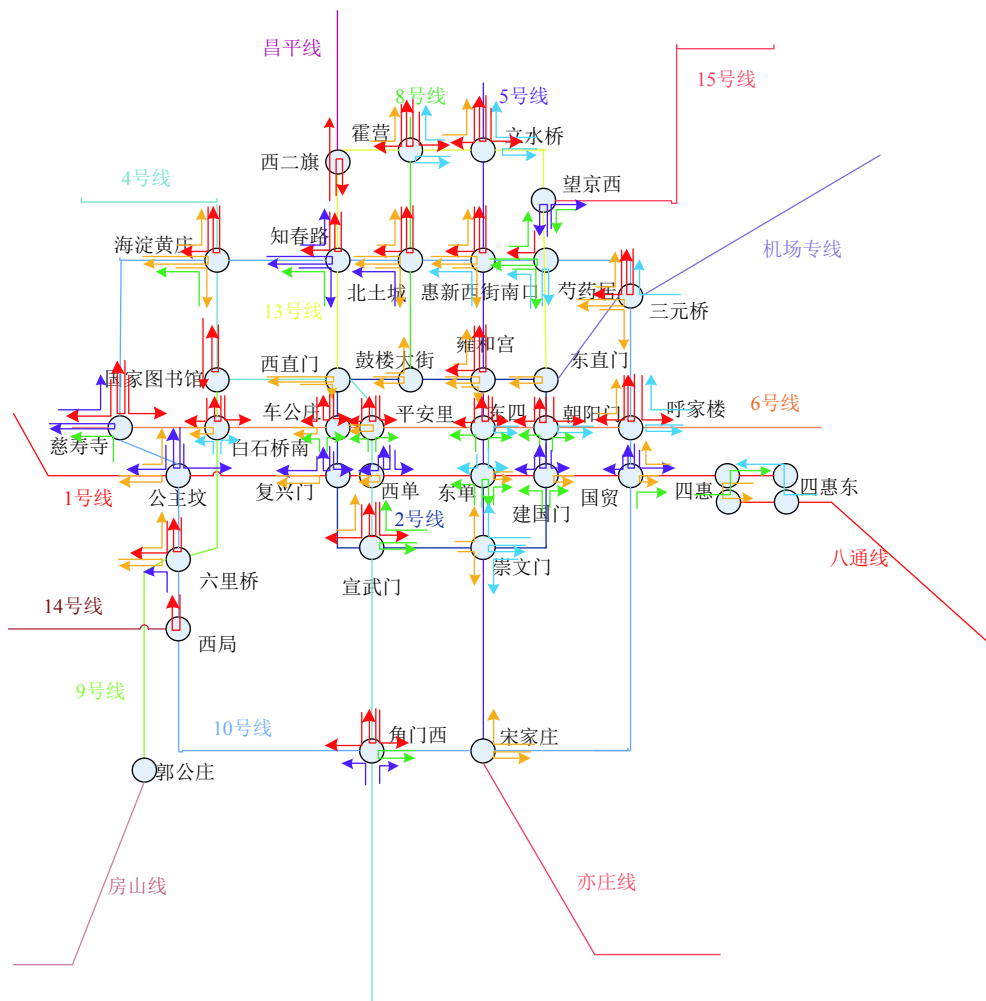


图2 北京市轨道交通网络及末班车衔接图

(一) 节点的建立

由于本文研究的是末班车乘客的换乘情况,因此普通非换乘站不予考虑。对于一个城市轨道交通网络,供乘客在不离开车站付费区及不另行购买车票的情况下,进行跨线乘坐其他线路列车,这样的城市轨道交通车站被称为换乘站。在城市轨道交通网络末班车衔接网络中,将换乘站作为网络的节点,例如2014年北京市城市轨道交通网络中有37个换乘站,那么对应的北京市轨道交通网络末班车衔

接网络中便有同样37个节点。

(二) 边的建立

轨道交通网络换乘站及末班车衔接图构建完成之后,便可通过在图中查找,确定两两换乘站点是否可以直接到达,间接到达以及无法到达的情况。本文将两两换乘站点间可以直接到达的情况视为两两站点间存在有向边连接。

确定好点以及点之间的连接情况后,便可以得到城市轨道交通网络衔接有向拓扑结构图,如图3所示。

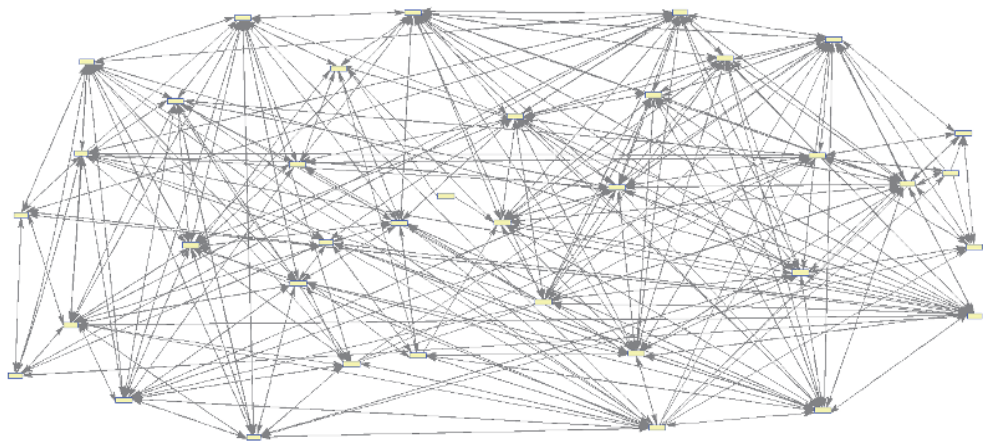


图3 北京市轨道交通网络末班车衔接有向图

根据有向网络的定义，与一条边相关联的两个节点具有一定的次序关系，任一没有多重边和自连线的有向网络，我们可以用邻接矩阵来进行表示。基于本文所研究的是城市轨道交通网换乘站末班车衔接关系，设城市轨道交通网络中共有个换乘站，我们将邻接矩阵进一步赋予其物理意义，如下：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{可以从车站} i \text{ 直接到达车站} j, \\ 0, & \text{可以从车站} i \text{ 间接到达车站} j, \\ \infty, & \text{不能从车站} i \text{ 到达车站} j. \end{cases}$$

其中 $i, j = 1, 2, \dots, N$.

根据上述三种情况，可以给出城市轨道交通网络末班车衔接矩阵。

表 1 部分北京市轨道交通网络末班车衔接矩阵

车站	公主坟	复兴门	西单	东单	建国门	国贸	四惠	四惠东	鼓楼大街
公主坟	∞	1	1	1	1	1	1	1	0
复兴门	1	∞	1	1	1	1	1	1	1
西单	1	1	∞	1	1	1	1	1	0
东单	1	1	1	∞	1	1	1	1	∞
建国门	1	1	1	1	∞	1	1	1	1
国贸	1	1	1	1	1	∞	1	1	∞
四惠	1	1	1	1	1	1	∞	1	∞
四惠东	1	1	1	1	1	1	1	∞	∞
鼓楼大街	0	1	0	0	1	0	0	0	∞

二、城市轨道交通网络换乘衔接的网络模型表征参量

(一) 度

网络理论的数学框架建立在图论上，其中每个顶点（节点）连出的所有边（连结）的数量就是这个顶点（节点）的度。有向图中，根据连出边的数目和连入边的数目，分为出度 d_{out} 和入度 d_{in} ：

$$d_{out}(v_{i_0}) = \sum_{j=i_0} e_{i,j} \tag{1}$$

$$d_{in}(v_{i_0}) = \sum_{j=i_0} e_{i,j} \tag{2}$$

(二) 最短路径

两个节点*i*和*j*相连通是指在网络中沿某些边从节点*i*能到达节点*d_{ij}*，一般从节点*d_{ij}* = ∞到达节点*d_{ij}* = 0的道路不是唯一的。两个节点*i*和*j*相连通是指在网络中沿某些边从节点*i*能到达节点*j*，一般从节点*i*到达节点*j*的道路不是唯一的。节点*i*和*j*之间的距离*d_{ij}*定义为连接这两个节点的最短路径（边数最少的路径）所包含边的数目。一般地，若*i*和*j*不连通，则*d_{ij}* = ∞，若*i*和*j*是同一个节点，则*d_{ij}* = 0。网络的平均路径长度*L*是所有节点对间的距离的平均值，即

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N+1)} \sum_{i \geq j} d_{ij} \tag{3}$$

(三) 衔接比例数

城市轨道交通线网末班车的衔接状况可以分为两类，一类是衔接成功，一类是衔接失败。因此，我们将所有的站点对看作一个整体，并将其分成2个部分，分别定义为：末班车能成功衔接的站点对为*N₁*，末班车衔接失败的站点对为*N₂*；衔接比例数可以用下式进行计算：

$$\eta = \frac{N_1}{N} \tag{4}$$

三、北京市实证结果与分析

(一) 末班车网络度分析

从度的定义及结合具体北京轨道交通换乘站网

络末班车衔接矩阵，某换乘站出入度的值只与该换乘站所在的线路上换乘站数量及末班车时刻表有关，无法从根本上得到该换乘站在整个网络中的重要程度。因此，本文将无论是否直接衔接，只要能衔接成功均计算为该换乘站的度。这样，对某换乘站而言，其出度表示从该换乘站出发，可以到达的所有换乘站数量之和，而入度则表示所有可以到达该换乘站的换乘站数量之和。因此，度的概念可以用来反映该换乘站在末班车的衔接情况，如表2所示。

表 2 北京轨道交通网络换乘站末班车衔接矩阵度

车站	出度	入度	车站	出度	入度	车站	出度	入度
公主坟	23	34	宣武门	31	14	北土城	28	36
复兴门	25	30	车公庄	28	30	郭公庄	15	0
西单	30	31	西直门	35	11	六里桥	17	22
东单	22	29	海淀黄庄	35	36	白石桥南	13	30
建国门	25	30	国家图书馆	32	13	知春路	31	36
国贸	19	32	平安里	32	30	芍药居	29	34
四惠	14	31	角门西	24	20	三元桥	25	33
四惠东	14	32	宋家庄	27	20	呼家楼	25	35
鼓楼大街	27	18	东四	23	30	西局	16	20
雍和宫	26	21	惠新西街南口	29	36	慈寿寺	24	33
东直门	28	16	立水桥	27	19	西二旗	28	7
朝阳门	28	32	霍营	8	9	望京西	28	7
崇文门	28	22						

从表2可以看出，西直门、海淀黄庄两个换乘站的出度最大，都为35，表示从这两个换乘站出发，可以换乘到其他35个换乘站上去，其换乘效率为94.6%，只有两个站不能换乘成功；霍营换乘站的出度最小为8，表示从该站出发，只能换乘到其他8个换乘站，其换乘效率最低，为21.6%。海淀黄庄、惠新西街南口、知春路三个换乘站的入度最大，为36，表示网络中末班车可以从其他36个换乘站从该站换乘成功，其换乘效率为97.3%。入度最小的换乘站为郭公庄站，等于0，表示所有的换乘站都无法换乘到该站，其换乘效率也最低，等于0。

一般情况下，城市轨道交通末班车主要是承载从城中心向四周扩散的乘客，其主要为出城客流，对城市轨道交通网络来说，位于城中心的换乘站应满足出度大，位于偏郊区的换乘站应满足入度大。从表2可以看出，北京市轨道交通网络末班车大致满足这一要求，可以较好地满足末班车乘客出行换乘需求。

（二）最短路径

城市轨道交通形成网络以后，不同线路车站之间能够通过一次或多次换乘可达，而且具有路径选

择的多样性；特别是在“一票换乘”条件下，乘客只需一次购票即可完成在不同线路车站之间的出行。但由于各线的运营时间不同，特别是各线末班车的运营时间不同，网络上各站之间的可达关系有所不同。本文从各换乘站间的最少换乘次数作为路径选择的依据，研究末班车网络的可达性。北京市轨道交通网络换乘站末班车最短路径矩阵如下表3所示。

表 3 北京市轨道交通网络部分换乘站末班车最短路径矩阵

0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	1	1	1	2	2	2
1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	1	2	2	1	2	2	2	0	1	1
2	1	2	1	1	2	2	2	1	0	1
2	2	2	2	2	2	3	3	1	1	0

上表中数字0代表两个换乘站之间末班车无法到达，1代表两个换乘站之间末班车可直接到达，2代表两个换乘站之间末班车需换乘1次到达，3代表两个换乘站之间末班车需换乘2次到达。

由上表可以计算出北京市轨道交通网络换乘站末班车衔接网络平均最短路径为1.014。除去换乘失败的站点，网络平均最短路径为1.512。以上数据可以看出，北京市轨道交通网络换乘站末班车衔接的平均需要换乘的次数不到1次，大部分都可以直接到达或者仅需换乘1次，说明北京市轨道交通末班车可衔接站点间衔接状况良好。

（三）衔接比例数

根据北京市轨道交通网络末班车衔接矩阵， ∞ 的个数即为末班车衔接失败的站点数，即 $N_2 = 451$ ，其所占的比例（衔接失败的比例） $N_2/N = 451/(37 \times 37) = 32.9\%$ ，则衔接成功的比例 $N_1/N = 67.1\%$ 。从数据可以看出，北京市轨道交通网络末班车衔接失败的比例较大，调整空间相对较大。

根据表2北京轨道交通网络换乘站末班车衔接矩阵度可以推出，入度越小的换乘站，能衔接成功的站点也就越少。郭公庄、霍营、西二旗、望京西等站点的入度值很小，从其地理位置分析，其均分布在北京市郊区。而末班车应该尽可能满足出城客流，相对而言，这几个站的衔接情况有待进一步做出调整。

四、结论

为了提高网络化运营条件下城市轨道交通客运服务水平和质量,应尽可能提高各线路列车尤其是末班车在换乘站的合理衔接,并将其作为网络运营计划的编制依据^[12]。目前北京市轨道交通采用各线确定的列车运行,对于合理的换乘衔接还有待进一步探讨。本文基于复杂网络,提出了城市轨道交通网末班车换乘衔接的网络模型,建立了衔接矩阵,对末班车衔接网络的节点度、最短路径、衔接比例等特征量进行了分析,最后以北京市轨道交通网络进行了实证研究。提出的方法为城市轨道交通网络末班车的换乘衔接问题提供了可量化的评价方法。

参考文献

- [1] 康柳江. 城市轨道交通末班列车运行计划协同组织优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [2] 城市轨道交通2017年度统计分析报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2018.
- [3] SALICRÚ M, FLEURENT C, ARMENGOL J M. Timetable-based operation in urban transport: run-time optimization and improvements in the operating process[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2011, 45(8): 721-740.
- [4] TONG L, ZHOU X, MILLER H J. Transportation network design for maximizing space-time accessibility[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2015, 81: 555-576.
- [5] 徐瑞华, 李璇. 城市轨道交通网络末班车衔接方案的综合优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 1510-1516.
- [6] KANG L, WU J, SUN H, ZHU X, WANG B. A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks[J]. Omega: The International Journal of Management Science, 2015a, 50: 29-42.
- [7] KANG L, WU J, SUN H, ZHU X, GAO Z. A case study on the coordination of last trains for the Beijing subway network[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015b, 72(72): 112-127.
- [8] DOU X, MENG Q, GUO X. Bus schedule coordination for the last train service in an intermodal bus-and-train transport network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 60(34): 360-376.
- [9] 陈垚, 柏赞, 冯旭杰, 等. 基于换乘站停站时间延长的城市轨道交通末班车时刻表优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(6): 228-234.
- [10] YIN H, WU J, SUN H, et al. Optimizing last trains timetable in the urban rail network: Social welfare and synchronization[J]. Transportmetrica B, 2018: 1-25.
- [11] KANG L, ZHU X, SUN H, et al. Last train timetabling optimization and bus bridging service management in urban railway transit networks[J]. Transportation Research Part B, 2015, 72(72): 112-127.
- [12] 张铭, 徐瑞华, 杨珂等. 城市轨道交通网络运营组织协调性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(11): 44-48.

编辑 何婧