



基于空间距离模型的城市公交线路综合评价

陈维亚, 吴百珂

(中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 基于空间距离模型直观、全面和易于操作等优点, 提出将空间距离模型应用于公交线路综合评价。建立基于服务水平、营运水平和技术水平的公交线路综合评价指标体系, 并用 AHP-Delphi 方法确定指标权重, 明确城市公交线路综合评价空间距离模型中空间分区的特征及含义, 并对空间距离模型的计算过程进行详细描述。对株洲市 5 条公交线路进行实例应用。研究表明: 基于空间距离模型的城市公交线路综合评价方法具有良好的实用性。

关键词: 城市公共交通; 公交线路; 空间距离模型; 综合评价

中图分类号: U293 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-7029(2018)02-0515-07

Comprehensive evaluation of urban public transit routes based on spatial distance model

CHEN Weiya, WU Baike

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In view of merits of the spatial distance model, including intuition, entirety and easy operation, this model was proposed to be applied to the comprehensive evaluation of urban public transit routes. A comprehensive evaluation index system of public transit routes was established based on service level, operation level and technical level, and AHP-Delphi method was used to determine the index weight. The characteristics and meanings of the spatial division of spatial distance model in the comprehensive evaluation for urban public transportation routes were clarified, and the calculation process of spatial distance model was described in detail. The method was applied in 5 public transit routes in Zhuzhou city. The research results show that the comprehensive evaluation method of urban public transit routes based on spatial distance model is very practical and useful.

Key words: urban public transit; bus line; spatial distance model; comprehensive evaluation

我国城市公共交通线网的发展通常是随着城市的发展而逐步发展。公交线网优化调整在城市发

展进程中是必须面临的实际问题^[1], 对城市居民出行、公交营运者收益以及城市交通状况都有很大影

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 湖南省交通厅科技进步与创新计划资助项目(JTT20140401)

通信作者: 陈维亚(1981-), 男, 湖南桃江人, 副教授, 从事交通运输规划与管理研究; E-mail: wychen@csu.edu.cn

响,在调整时需要科学谨慎。城市公交线路综合评价是公交线网优化调整的基础工作,需要通过客观科学的方法对现有公交线路进行综合评价,为城市公交线路优化调整提供依据^[2-3]。针对城市公交线路评价问题,国内外学者进行过较多的研究。杨晓光等^[4]基于统计数据对乘客出行特征和公交系统服务过程进行了分析,提出公交服务质量评价的三维体系结构。陈艳艳等^[5]从客流平衡性、可靠性、效益性和布局合理性 4 个方面构建了公交线路“健康指数”评价模型。尹峰等^[6]提出了公交服务质量评价综合指数及其计算方法。周雪梅等^[7]建立了城乡公交服务质量评价指标体系,并用服务质量差距模型和 SPA 综合评价模型研究城乡公交服务质量。如上述针对公交线路的评价,多数聚焦在公交线路服务质量和乘客满意度评价上,但从公交线路优化调整角度,需要从技术水平、营运水平、服务水平等多角度进行综合评价。基于空间距离模型直观、全面、易于操作等优点,本文将应用空间距离模型对公交线路不仅从技术水平、服务水平和营运水平等不同维度分别进行评价,还将进行综合评价,作为公交线路优化调整决策的参考依据。

1 空间距离模型的基本原理

空间距离模型是一种用于对多个评价对象或者一个评价对象的多个组成部分进行评价的方法。此方法由温素彬^[8]在《企业三重绩效评价模型——空间几何模型》一文中提出,文章从经济、生态和社会 3 个方面构建了企业的三重绩效评价指标体系,然后运用空间几何方法建立了一个企业三重绩效评价模型。

在对评价对象进行分析评价时,以全面性、科学性、系统性和可比性为原则^[9-10],将主要评价因素分为相对独立但密切相关的层面,再分别根据相关性、从属性,在各个层面分别选取适量的合理指标,对评价对象进行较为具体的单目标评价,最后在多个层面的基础上,进一步得到评价对象的整体评价。这种评价方法的三重评价层面一般形式表示如图 1。其中,每个层面的评价指标数量以 3 个为例,具体数量可以根据实际问题合理选取。

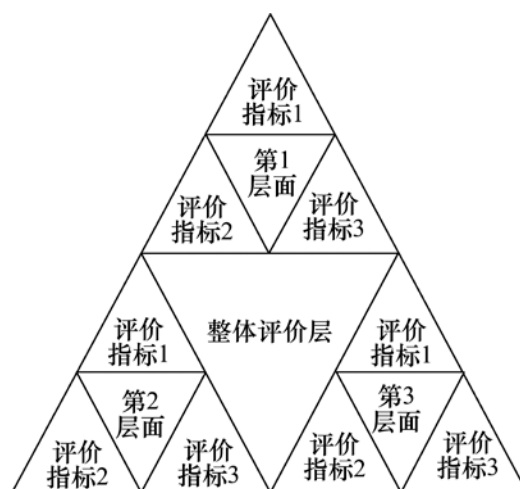


图1 三重评价层面形式

Fig. 1 Triple evaluation level

在对多个评价对象进行评价时,为了可以将评价结果及优劣比较更加直观形象的展示,将评价过程和评价结果以三维立方体的形式表现。其中,立方体的X轴、Y轴和Z轴分别代表评价的3个层面,在空间模型中称为3个维度,经计算得到的最优点成为综合评价点,根据此点在空间模型中的位置便可以判定评价对象综合水平的优劣,计算出现有水平与理想水平之差,评价对象的各个层面的优劣也可以在此过程中显现出来。三重空间距离模型如图2。

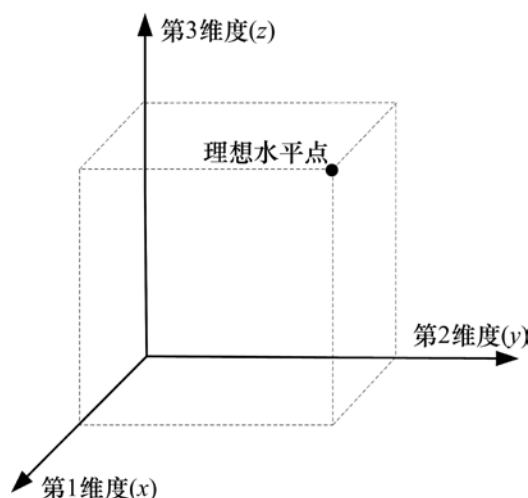


图2 空间距离模型三维立体图

Fig. 2 Three-dimensional schemes of the spatial distance model

2 公交线路综合评价的空间距离模型

2.1 公交线路综合评价指标体系的建立

在应用空间距离模型对城市公交线路进行综合评价前，需要首先建立合理的综合评价指标体系。面向公交线路优化调整的公交线路综合评价指

标应该涉线路调整的多个影响因素，指标的选取应该具有系统性、客观性、科学性、可操作性和协调统一性^[11]。参考现有研究^[12-14]，结合城市公交线路优化调整的特点，评价指标分为技术水平、服务水平和营运水平 3 个方面，根据重要性和相关性，应用 AHP—Delphi 法对评价指标及权重进行确定^[15]，最后得到了 3 个方面共 16 个指标及其权重，见表 1。

表 1 城市公交线路评价指标权重

Table 1 Urban public transportation route evaluation index weight																
技术水平								服务水平					营运水平			
评价指标	线路长度 X_{11}	非直线系数 X_{12}	平均站距 X_{13}	港湾停靠站比 X_{14}	站点设备齐全 X_{15}	运营车数 X_{16}	空调车投放 X_{17}	高峰满载率 X_{21}	运送速度 X_{22}	行车正点 X_{23}	发车频率 X_{24}	责任事故间隔里程 X_{25}	百公里油耗 X_{31}	客运人次 X_{32}	营运里程 X_{33}	营运收入 X_{34}
指标权重	0.268	0.189	0.043	0.137	0.026	0.269	0.068	0.176	0.125	0.223	0.284	0.192	0.217	0.266	0.192	0.325

2.2 城市公交线路综合评价空间距离模型的计算步骤

在建立了城市公交线路综合评价指标体系之后，根据体系中的 3 个层面：技术水平、服务水平、营运水平，对应建立空间距离模型的 3 个维度，如图 3 所示。空间距离模型的实际过程就是将评价指标体系中的 3 个评价层面的评价结果换算成空间点，直观立体地展示在三维立体空间模型中。具体的计算步骤如下。

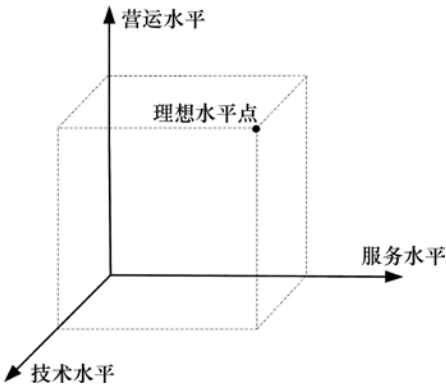


图 3 城市公交线路综合评价的空间距离模型

Fig. 3 Spatial distance model for comprehensive evaluation of urban bus lines

步骤 1：根据城市公交线路评价的指标体系，到现场获取真实数据。为了将得到的数据具有统一比较的意义，将所有原始数据根据无量纲化公式进行处理。这里取区间为[1, 5]，正向指标无量纲化公式为：

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \times 4 + 1 \tag{1}$$

其中： x_{ij} 为无量纲化后的指标； x_{ij} 为评价指标的原始数据； x_{\min} 和 x_{\max} 为所调查所有对象中该指标的最小值、最大值。但在评价指标中的线路长度和平均站距这 2 项指标，《城市道路交通规划设计规范 GB50220—95》有明确标准，因此， x_{\min} 和 x_{\max} 分别为规定中的最小值和最大值。

同时，对于评价指标中的逆向指标如非直线系数、高峰满载率和百 km 油耗，无量纲化公式为：

$$x_{ij} = \frac{x_{\max j} - x_{ij}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \times 4 + 1 \tag{2}$$

如此，经过预处理后，所有的评价指标都转换为正向指标，并且指标数值范围在[1, 5]之内。

步骤2: 计算项目的技术水平、服务水平和营运水平。

$$p_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

其中: i 为项目的各方面水平($i=1, 2, 3$); P_1 , P_2 和 P_3 为分别表示项目的技术水平、服务水平和营运水平; K_{ij} 为各评价指标的权重。

步骤3: 根据空间距离法测算项目的综合水平。此时, 公交线路所有可能的水平点 P' (P'_1, P'_2, P'_3) 都落入一个边长为 4 的效益正方体中。正方体的顶点 $U(5, 5, 5)$ 是项目的理想化的最优效益点, 顶点 $V(1, 1, 1)$ 是项目可能达到的最差效益点, 如图 4。

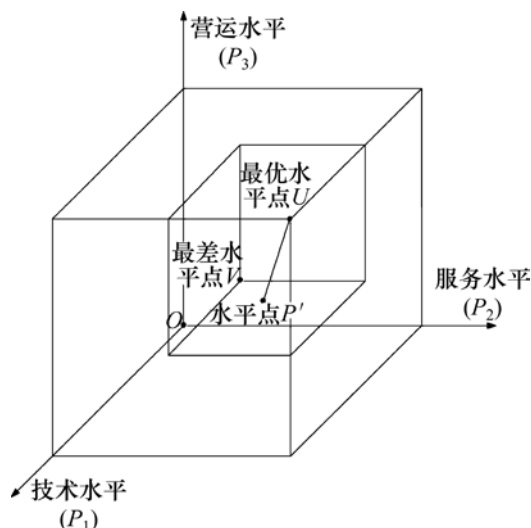


图4 公交线路综合水平的空间距离

Fig. 4 Comprehensive spatial distance of bus lines

显然, P' 点离 U 点的距离越近, 建设项目的综合效益越好, $|P'U| \in [0, 4\sqrt{3}]$ 。为了符合人们的思维习惯, 将综合效益的距离公式正向化, 则项目的综合效益距离 DP 的计算公式为:

$$DP = 4\sqrt{3} - |P'U| = 4\sqrt{3} - \sqrt{(P_1 - 5)^2 + (P_2 - 5)^2 + (P_3 - 5)^2} \quad (4)$$

DP 即项目的综合效益值。 $DP \in [0, 4\sqrt{3}]$, DP 值越大, 项目的综合效益越好。

步骤4: 为了进一步比较不同项目的各方面效益, 将效益正方体进一步划分。用 3 个球面将正方体分割成 4 个空间: A , B , C 和 D 。4 个区域的区域直观图见图 5。

$$(P_1 - 5)^2 + (P_2 - 5)^2 + (P_3 - 5)^2 = 4$$

$$(P_1 - 5)^2 + (P_2 - 5)^2 + (P_3 - 5)^2 = 16$$

$$(P_1 - 5)^2 + (P_2 - 5)^2 + (P_3 - 5)^2 = 32$$

再用正方体对角线和直线 $L_1(P_1=P_2=5)$, $L_2(P_2=P_3=5)$, $L_3(P_1=P_3=5)$ 构成的面将每块空间分成 3 个部分, 整个效益正方体共分为 12 个部分, 4 个区域的透视图见图 6。

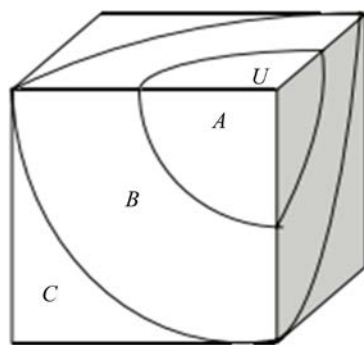


图5 4个区域直观图

Fig. 5 Dimensional view of four partitions

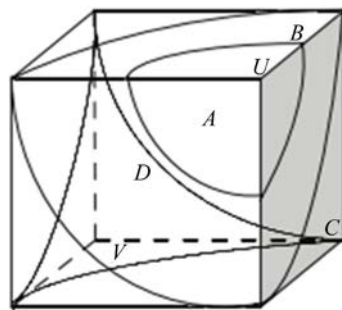


图6 4个区域透视图

Fig. 6 Perspective view of four partitions

2.3 城市公交线路综合评价空间距离模型的空间分区特征

根据上述步骤4的空间划分, 将公交线路综合评价的效益空间分区各部分的特征及效益含义表述如表2所示。

3 实例应用

选取位于株洲市城区的 5 条主要公交线路: T1 路, T2 路, T19 路, T23 路和 T45 路, 采用本文的空间距离模型对每条线路进行实例评价分析。5 条线路的原始指标数据如表 3。

表 2 效益空间分区的特征及含义

Table 2 Characteristics and meaning of benefit spatial partition

区域		原始的综合 水平距离	正向化的综 合水平距离	各项水平之间的关系	水平坐标点解释	
A	优秀 空间	A_1	[0,2)	$(5,4\sqrt{3}]$	$P_1>P_2$ 且 $P_1>P_3$	综合水平优秀， 技术水平相对较高
		A_2	[0, 2)	$(5,4\sqrt{3}]$	$P_2>P_1$ 且 $P_2>P_3$	综合水平优秀， 服务水平相对较高
		A_3	[0, 2)	$(5,4\sqrt{3}]$	$P_3>P_1$ 且 $P_3>P_2$	综合水平优秀， 营运水平相对较高
B	良好 空间	B_1	[2, 4)	(3, 5]	$P_1>P_2$ 且 $P_1>P_3$	综合水平较好，有上升空间， 技术水平相对较高
		B_2	[2, 4)	(3, 5]	$P_2>P_1$ 且 $P_2>P_3$	综合水平较好，有上升空间， 服务水平相对较高
		B_3	[2, 4)	(3, 5]	$P_3>P_1$ 且 $P_3>P_2$	综合水平较好，有上升空间， 营运水平相对较高
C	问题 空间	C_1	$[4,4\sqrt{2})$	(1.343, 3]	$P_1>P_2$ 且 $P_1>P_3$	综合水平较差，问题较多， 技术水平相对较高
		C_2	$[4,4\sqrt{2})$	(1.343, 3]	$P_2>P_1$ 且 $P_2>P_3$	综合水平较差，问题较多， 服务水平相对较高
		C_3	$[4,4\sqrt{2})$	(1.343, 3]	$P_3>P_1$ 且 $P_3>P_2$	综合水平较差，问题较多， 营运水平相对较高
D	失败 空间	D_1	$[4\sqrt{2},4\sqrt{3})$	(0, 1.343]	$P_1>P_2$ 且 $P_1>P_3$	综合水平很差， 技术水平相对较高
		D_2	$[4\sqrt{2},4\sqrt{3})$	(0, 1.343]	$P_2>P_1$ 且 $P_2>P_3$	综合水平很差， 服务水平相对较高
		D_3	$[4\sqrt{2},4\sqrt{3})$	(0, 1.343]	$P_3>P_1$ 且 $P_3>P_2$	综合水平很差， 营运水平相对较高

表 3 实例公交线路指标数据

Table 3 Index values of the 5 example bus lines

线路番号		T1 路	T2 路	T19 路	T23 路	T45 路
技术水平	线路长度/km	9.2	11.45	10.9	9.85	15.85
	非直线系数	1.12	1.01	1.7	1.28	1.63
	平均站距/km	0.54	0.51	0.52	0.53	0.57
	港湾停靠站比例	0.48	0.44	0.55	0.42	0.38
	站点设备齐全率	0.92	0.83	0.91	0.76	0.92
	运营车数/台	36	44	24	12	26
	空调车投放比例	1	1	1	1	1
服务水平	高峰满载率	0.68	0.88	0.71	0.78	0.69
	运送速度/(km·h ⁻¹)	15.77	17.18	16.35	15.76	18.11
	行车正点率	0.89	0.76	0.71	0.84	0.78
	发车频率/(次·h ⁻¹)	9	18	12	7	9
	行车责任事故间隔里程/km	125	125	125	125	125
营运水平	百 km 油耗/升	29.05	28.24	28.9	23.77	25.09
	客运人次/万人/年	1014.52	1335.9	609.55	178.23	572.72
	营运里程/(万 km·年 ⁻¹)	4.03	5	2.8	1.5	2.69
	营运收入/(万元·年 ⁻¹)	208.3	281.33	131.97	57.7	109.6

进行归一化处理后的各指标数值如表 4。

经过空间距离模型计算得到的 5 条线路的技术水平、服务水平、营运水平及综合水平结果如表 5。

从评价结果可以看出：T2 处于优秀空间，综合水平优秀，营运水平相对较高，技术水平相对较低；T1，T19 和 T23 处于良好空间，综合水平较好，有上升空间，其中 T1 营运水平相对较高、服务水平相对较低，T19 服务水平相对较高、营运水平相对较低，T23 技术水平相对较高，营运水平相对较低；T45 处于问题空间，综合水平较差，问题较多，但服务水平相对较高、技术水平最低。

表 4 归一化处理后线路指标数值

Table 4 Normalized index values of the bus lines

	线路番号	T1 路	T2 路	T19 路	T23 路	T45 路
技术水平	线路长度	2.68	3.58	3.36	2.94	1.02
	非直线系数	4.2	3.89	1.12	4.66	1.27
	平均站距	1.55	1.13	1.08	1.03	1.88
	港湾停靠站比例	2.4	2.2	1.6	1.6	1.9
	站点设备齐全率	4.68	4.32	4.64	4.04	4.68
	运营车数	4.89	4.95	4.90	6.12	4.94
	空调车投放比例	5	5	5	5	5
服务水平	高峰满载率	3.86	4.71	3.99	4.28	3.91
	运送速度	1.62	2.74	2.08	1.61	3.49
	行车正点率	2.8	0.2	0.08	1.8	0.6
	发车频率	2.78	6.78	4.11	1.89	2.78
	行车责任事故间隔里程	5	5	5	5	5
营运水平	百 km 油耗	3.38	3.7	3.44	5.49	4.96
	客运人次	4.03	5	2.8	1.5	2.69
	营运里程	3.93	5	2.81	1.72	2.48
	营运收入	3.73	5	2.83	1.37	2.12

表 5 基于空间距离模型的公交线路评价结果

Table 5 Evaluation results of the 5 bus lines using the spatial distance model

	T1 路	T2 路	T19 路	T23 路	T45 路
技术水平	3.71	3.84	2.97	4.02	2.15
服务水平	3.26	4.1	3.09	2.85	3.01
营运水平	3.77	4.72	2.95	2.37	2.96
综合水平	4.44	5.43	3.47	3.39	2.89
所处空间	B ₃	A ₃	B ₂	B ₁	C ₂

4 结 论

1) 基于空间距离模型的公交线路评价方法可以得到城市公交线路技术水平、服务水平、营运水

平各方面的评价结果，运用科学方法对权重进行处理后还可以得到一个综合评价值，便于对比分析。

2) 空间距离模型通过空间分区对公交线路的评价更加直观、全面和科学，有利于找到城市公交线路发展过程中存在的不利因素，明确调整方向，可以作为公交线路优化调整决策的参考依据。

3) 空间距离模型操作简便，具有较强的适用性，可以将该方法推广到类似的评价领域。

参考文献：

[1] TENG J, HE C, LIU X, et al. Traffic management plan evaluation outside the station in emergent events of urban rail transit[J]. Urban Rail Transit, 2016, 2(1): 16-27.

- [2] Miandoabchi E, Farahani R Z, Dullaert W, et al. Hybrid evolutionary metaheuristics for concurrent multi-objective design of urban road and public transit networks[J]. *Networks and Spatial Economics*, 2012, 12(3): 441-480.
- [3] Panagiotis N, Grigorios K A, Beligiannis. Solving the urban transit routing problem using a particle swarm optimization based algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2014(21): 654-676.
- [4] 杨晓光, 安健, 刘好德. 公交运行服务质量评价指标体系探讨[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(4): 13-21.
YANG Xiaoguang, An Jian, LIU Haode, et al. Evaluation architecture discussion of route-level transit service quality[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, 2010, 10(4): 13-21.
- [5] 陈艳艳, 蔡熠文, 侯亚美, 等. 大城市公交线路“健康指数”评价方法[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(增): 1-6.
CHEN Yanyan, CAI Yiwen, HOU Yamei, et al. “Health-index” evaluation method of metropolitan bus lines[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2015, 35(Suppl): 1-6.
- [6] 尹峰, 李枫. 公共交通服务水平的模糊评价[J]. *上海交通大学学报*, 2000, 34(增): 100-104.
YIN Feng, LI Feng. Fuzzy evaluation on level-of-services of public transit[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(Suppl): 100-104.
- [7] 周雪梅, 石云林, 刘梅, 等. 城乡公交服务质量评价方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(7): 1031-1038.
ZHOU Xuemei, SHI Yunlin, LIU Mei, et al. Evaluation of rural public transit service quality[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(7): 1031-1038.
- [8] 温素彬. 企业三重绩效评价模型——空间几何模型[J]. *数学的实践与认识*, 2008, 38(3): 1-8.
WEN Subin. Measurement model of the triple performance of business space geometric model[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008, 38(3): 1-8.
- [9] Youse Shafahi, Alireza Khani. A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions[J]. *Transportation Research*, 2010, 9(44): 377-389.
- [10] YU Bin, YANG Zhongzhen, JIN Penghuan, et al. Transit route network design-maximizing direct and transfer demand density[J]. *Transportation Research Part C*, 2012, 5(22): 58-75.
- [11] 邓连波, 高伟, 赖天珍, 等. 基于换乘网络的城市轨道交通关联公交接驳线网优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2012, 9(6): 77-83.
DENG Lianbo, GAO Wei, LAI Tianzhen, et al. Optimal design of feeder-bus network related to urban rail transit based on transfer network[J]. *Journal of Railway Science & Engineering*, 2012, 9(6): 77-83.
- [12] 陈维亚, 陈治亚. 基于随机仿真的高频公交服务可靠性分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2009, 9(5): 130-134.
CHEN Weiya, CHEN Zhiya. Service reliability analysis of high frequency transit using stochastic simulation[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, 2009, 9(5): 130-134.
- [13] 陈春晓, 陈治亚, 陈维亚. 基于模糊逻辑的单线路公交实时控制方法[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(9): 141-147.
CHEN Chunxiao, CHEN Zhiya, CHEN Weiya. A real-time control method for single bus line based on fuzzy logic[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33(9): 141-147.
- [14] 孙黎, 凌溪蔓, 谭倩, 等. 城市大规模交通网络低效路段组合定位及分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(7): 1414-1419.
SUN Li, LING Ximan, TAN Qian, et al. Locating and researching of inefficiencies road clusters in a large-scale transportation network[J]. *Journal of Railway Science & Engineering*, 2016, 13(7): 1414-1419.
- [15] 董龙云, 史峰, 秦进, 等. 区域交通物流基础设施可持续发展水平的多层次灰色综合评价[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 6(2): 64-68.
DONG Longyun, SHI Feng, QIN Jin, et al. Multi-level grey comprehensive evaluation for sustainable development level of regional transportation and logistics infrastructures[J]. *Journal of Railway Science & Engineering*, 2009, 6(2): 64-68.

(编辑 蒋学东)