

# 绕城高速公路与城市轨道交通停车换乘 设施选址模型

王花兰\*, 刘宇成, 李子健

(兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070)

**摘要:** 绕城高速公路与市区交通网络车流交换具有不同于其他公路的特征, 其与城市轨道交通P&R设施选址要求亦不同. 以绕城高速公路特征为切入点, 在分析停车换乘设施选址原则的基础上, 选取了停车换乘需求、停车换乘可靠性和建设用地需求3类7项P&R设施选址评价指标. 运用物元评价方法, 建立了绕城高速公路与城市轨道交通P&R设施选址物元评价模型, 利用熵权法为各指标赋予权重, 通过综合关联度把待选址站点分为优、良、中、差4个等级, 选择在综合评价等级“优”的轨道交通站点附近设置P&R设施. 所建模型应用在西安市绕城高速与城市轨道交通P&R设施选址中, 结果表明, 在西安绕城高速与轨道交通P&R设施选址中, 主要制约因素是用地限制, 和实际情况吻合.

**关键词:** 交通工程; 绕城高速公路; 停车换乘(P&R)设施; 选址; 物元评价

## Location Model of Park-and-ride Facilities of Ring Expressway and Urban Rail Transit

WANG Hua-lan, LIU Yu-cheng, LI Zi-jian

(School of Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The characteristics of traffic flow exchange between ring expressway and city transport network are different with other roads, so the demands on the location of park-and-ride(P&R) facilities are different. Based on analyzing the principle of P&R facility location, we select 7 evaluation indexes belong to the categories of P&R demand, P&R facility reliability, construction land demand. The matter-element model to select the P&R facility location is established by using the method of matter-element evaluation. Meanwhile, we give the index weight employing entropy weight method. The alternative stations have been graded excellent, good, average and poor level according to their synthesis degree of association with every grade. P&R facilities should be constructed near the stations with the excellent level. The proposed methodology is applied to a case of Xi'an ring express P&R facility location. The resulting analysis shows the construction land is the most important restrict factor in location of P&R facilities, which are intuitively accountable and consistent with observed situation.

**Keywords:** traffic engineering; ring expressway; P&R facility; location; element evaluation

收稿日期: 2016-11-17

修回日期: 2016-12-21

录用日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(51468035).

作者简介: 王花兰(1969-), 女, 甘肃秦安人, 教授, 博士.

\*通信作者: wanghualan126@126.com

## 0 引言

随着我国大城市交通需求的增加和交通建设的发展,城市轨道交通和绕城高速公路(下文简称绕城高速)成为许多大城市交通系统的重要组成部分。另外,大城市职住分离人口越来越多,在上下班高峰期,大量的小汽车通过绕城高速进入中心城区,引导小汽车出行者在绕城高速出入口附近的市郊区域,通过停车换乘(P&R)设施换乘轨道交通进入中心城区,成为缓解中心城区交通压力的重要策略<sup>[1]</sup>。P&R设施选址的合理与否,直接决定了其能否把更多的入境小汽车流拦截在城市外围,起到缓解中心城区交通压力的作用<sup>[2]</sup>。

有关P&R设施选址的研究成果颇丰,代表性的成果有文献[2-12]。现有研究的切入点可分为3类:(1)基于轨道交通网络的P&R设施选址,追求换乘设施建设成本最小、换乘吸引力最大<sup>[6,8]</sup>;(2)基于出行者行为的P&R选址,以出行者费用最小为目标<sup>[2,3,5,10]</sup>;(3)综合考虑P&R设施建设和出行者出行行为,以两者成本最小为目标<sup>[4,7,9,11,12]</sup>。研究中均未明确小汽车到达P&R设施的路径。实际调查表明,通过城际高速公路、普通市郊公路、绕城高速进入主城区边缘,对P&R设施的要求不同。理论上,绕城高速和城际高速相比,与城市路网进行车流交换的互通立交更多,出入口间距小,小汽车出行者进入市区的出入口选择更灵活。和普通市郊公路相比,绕城高速系统通过互通立交匝道和城市路网连接,具有全封闭特点,小汽车通过绕城高速进入主城区,对P&R设施的要求必然不同。另外,以刻画出行者行为为切入点的选址模型中,P&R设施可靠性指标对出行者选择停车换乘意愿的影响程度很难准确度量,建设用地需求指标也无法进入模型。

本文以绕城高速特征为切入点,考虑绕城高速与城市路网车流交换特点,综合考虑停车换乘需求、停车换乘可靠性、建设用地需求等因素,建立服务于绕城高速与城市轨道交通间的P&R设施选址物元评价模型,并以西安市绕城高速为例,验证模型的合理性和实用性。如无特别说明,下文出现的P&R设施均指绕城高速和城市轨道交通间的停车换乘设施。

## 1 P&R设施选址原则

根据绕城高速自身特征及与市区交通网络车流交换特点,P&R设施选址应遵循以下原则:

(1) 停车换乘需求最大化。

P&R设施选址应尽可能把更多的绕城高速出入口纳入衔接范围之内,因为衔接的出入口数量和停车换乘需求量成正相关关系。此外,优先选择交通流量大的出入口附近的轨道交通站点设置P&R设施,能最大化地吸引潜在停车换乘需求。

(2) 与周边区域发展相协调。

P&R设施是设置于开发强度较小的市郊区域、服务于小汽车出行者换乘公共交通工具的接驳场所。但由于我国部分城市的绕城高速建成时间较早,经过快速城市化,绕城高速所在区域已被城区覆盖,有些区域甚至发展为城市CBD。规划P&R设施时,需考虑周边区域的实际发展和土地开发情况。

(3) 停车换乘设施间距合理化。

由于P&R设施占用了较多的土地资源,为保证各处P&R设施的充分利用且不至于产生过度竞争,P&R设施间的距离不应小于4 km<sup>[13]</sup>。

(4) 合理步行距离。

P&R设施潜在使用者在停车场和换乘站之间的步行距离与停车换乘率呈负相关关系,因此,此段距离应该控制在合理范围,一般取500 m之内为宜<sup>[14]</sup>。

## 2 P&R选址评价指标

根据绕城高速P&R设施选址原则,P&R设施的选址评价指标可分为停车换乘需求指标、停车换乘可靠性指标和建设用地需求指标3大类,如图1所示。

### 2.1 停车换乘需求指标

(1) 停车换乘需求量。

P&R设施预选址区域能够吸引的停车换乘需求量直接决定了在该地点的选址与否,是P&R设施选址评价最重要的指标。绕城高速某个出口的停车换乘潜在需求量可按式(1)计算。

$$F_i = f_i \lambda \delta g(x_i) \quad (1)$$

式中: $f_i$ 为绕城高速出口*i*的日均车流量(veh/d); $\lambda$ 为小汽车占车流量比例; $\delta$ 为进入城市CBD区域车流

量所占比例; $g(x_i)$ 为潜在使用者停车换乘率。

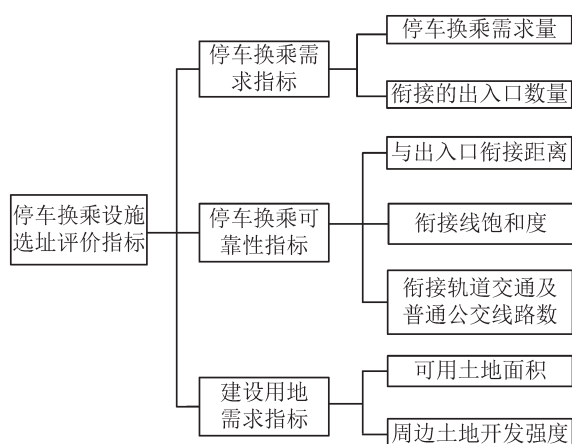


图1 P&R设施选址评价指标

Fig. 1 Evaluation indexes of P&R facility siting

据调查,平均车速为30 km/h时,P&R设施距出口3.5~4 km时可吸引50%有停车换乘意愿者,结合德克萨斯模型<sup>[15]</sup>,得出

$$g(x_i) = \exp\left(-\frac{\pi}{64}x_i^2\right) \quad (2)$$

式中: $x_i$ 为P&R设施预选址中心与绕城高速*i*出口的距离(km)。

### (2) 衔接的出入口数量。

P&R设施衔接的绕城高速出入口数量与停车换乘量正相关,衔接的出入口数量越多,停车换乘需求越稳定,且不同方向车流可选择合适的出口进入P&R设施,不会因走回头路而过多地损失P&R设施的潜在使用者。

## 2.2 停车换乘可靠性指标

### (1) 与出入口衔接距离。

P&R设施与绕城高速出入口衔接距离直接决定停车换乘的可靠性,距离越远意味着途中经过的路口数量越多、遇到交通事故的概率越大,这些都会影响P&R设施潜在使用者的行为。

考虑到绕城高速与城市路网衔接线的相对封闭性,P&R设施与绕城高速出入口衔接距离以衔接线的末端点到P&R设施中心的直线距离计算。

### (2) 衔接线饱和度。

城区外围小汽车通过绕城高速进入换乘停车场,必须经过衔接线,衔接线的交通状况对小汽车出行者是否采取停车换乘方式进入市区具有明显的影响。

### (3) 衔接轨道交通及普通公交线路数。

P&R设施吸引范围内轨道交通及普通公交线路越多,备选换乘方案也越多,受交通拥挤、突发事件、线路故障等影响越小,同时也为P&R设施使用者提供更多的路径选择。

## 2.3 建设用地需求指标

### (1) 可用土地面积。

研究表明人们的步行换乘距离最大为500 m,超过500 m后,换乘人数将与步行距离成反比下降<sup>[15]</sup>。因此,可用土地面积以轨道交通站点为圆心,周边500 m半径内可建设P&R设施的最大地块面积计。考虑过道和防火通道,公共停车场每个小汽车泊位面积按20 m<sup>2</sup>计算。参考北京、上海等停车换乘模式相对成熟的P&R设施设置经验,P&R设施的泊位数不小于200。

### (2) 周边土地开发强度。

土地开发强度越高,大面积建设停车设施的可能性越小。考虑到数据获取的局限性,本文采用公式“土地开发强度=总建筑面积/基地面积×建筑平均层数/总用地面积”对轨道交通站点周围1 km<sup>2</sup>区域内平均土地开发强度做近似估计。

## 3 P&R设施选址物元评价模型

P&R设施选址涉及7个2级指标,这些指标均属连续型参量,在选址评价时指标界限很难严格确定。物元评价方法利用物元分析法建立事物多指标性能参数评定模型,通过关联函数和关联度判断评价事物属于某集合的程度,能较准确地反映事物的综合水平。该方法仅涉及到矩阵运算,较好地避免了指标界限在无法严格确定情况下存在的计算偏差<sup>[16]</sup>。故选取物元评价方法,建立P&R设施选址模型,具体步骤如下:

### Step 1 确定待评物元。

根据物元定义,把P&R设施选址记为事物*N*,把P&R设施选址评价指标记为特征*C*=( $c_1, c_2, \dots, c_n$ )<sup>T</sup>,特征*C*的量值记为*V*=( $v_1, v_2, \dots, v_n$ )<sup>T</sup>, $n=7$ 。P&R设施选址评价物元矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}, \text{即 } R = (N, C, V)$$

**Step 2 确定经典域和节域物元矩阵.**

P&R设施选址评价用优、良、中、差4个等级表示,第j(j=1,2,3,4)个评价等级表示为 $N_j$ , $c_i$ 表示该等级的第i(i=1,2,⋯,7)个评价指标,每个评价指标的取值范围称为其经典域,用 $V_{ij}$ 或者 $\langle a_{ij}, b_{ij} \rangle$ 表示,则第j个评价等级经典域的物元矩阵为

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & V_{1j} \\ & c_2 & V_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & V_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{1j}, b_{1j}) \\ & c_2 & (a_{2j}, b_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & (a_{ij}, b_{ij}) \end{bmatrix}$$

P&R设施选址评价中各指标的允许取值范围为节域,用 $V'_i$ 或者 $\langle a'_i, b'_i \rangle$ 表示(i=1,2,⋯,7),节域物元矩阵为

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & v'_1 \\ & c_2 & v'_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & v'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & (a'_1, b'_1) \\ & c_2 & (a'_2, b'_2) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_i & (a'_i, b'_i) \end{bmatrix}$$

参考相关规范并结合实际情况,确定各指标的经典域和节域如表1所示.

表1 P&R设施选址评价指标经典域和节域

Table 1 Classical domains and discussion fields of evaluation indexes of P&R facility siting

一级指标	二级指标	优(经典域)	良(经典域)	中(经典域)	差(经典域)	节域
停车换乘需求指标	停车换乘需求量 $c_1$	[120,250]	[80,119]	[40,79]	[0,39]	[0,250]
	衔接的出入口数量 $c_2$	[3,4]	[2,3]	[1,2]	[0,1]	[0,4]
	与出入口衔接距离 $c_3$	[0,1]	[1,2]	[2,3.5]	[3.5,5]	[0,5]
停车换乘可靠性指标	衔接线饱和度 $c_4$	[0,0.6]	(0.6,0.8]	(0.8,1.0]	(1,2]	[0,2]
	衔接轨道交通和普通公交线路数 $c_5$	[7,15]	[4,6]	[1,3]	[0,1]	[0,15]
建设用地需求指标	可用土地面积 $c_6$	[10 000,20 000]	[7 500,10 000)	[5 000,75 000)	[0,5 00)	[0,20 000]
	周边土地开发强度 $c_7$	[0,0.5]	(0.5,0.8]	(0.8,1.5]	(1.5,3]	[0,3]

**Step 3 确定关联度.**

P&R设施选址评价等级由待评物元与各等级物元的关联度确定.第i(i=1,2,⋯,7)个指标相对于评价等级j(j=1,2,3,4)的关联度按式(3)计算.

$$k_j(v_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, v_{ij})}{|b_{ij} - a_{ij}|}, & v_i \in V_{ij} \\ 0.5, & v_i = a_{ij} \text{ 或 } v_i = b_{ij} \\ \frac{\rho(v_i, v_{ij})}{\rho(v_i, v'_i) - \rho(v_i, v_{ij})}, & v_i \notin V_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\rho(v_i, v_{ij})(i=1,2,\dots,7; j=1,2,3,4)$ 为各指标量值与经典域的距,即与不同经典域区间的接近程度,表达了此指标属于“优”、“良”、“中”、“差”的可能性; $\rho(v_i, v'_i)(i=1,2,\dots,7)$ 为各指标量值与节域的距,即与节域区间的接近程度<sup>[16]</sup>,其式为

$$\begin{cases} \rho(v_i, V_{ij}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \\ \rho(v_i, V'_i) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a'_i + b'_i) \right| - \frac{1}{2}(b'_i - a'_i) \end{cases} \quad (4)$$

**Step 4 计算综合关联度,确定评价等级.**

综合关联度为各指标关联度与指标权系数乘积之和,即

$$K_j(N_v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i k_j(v_i) \quad (5)$$

式中: $K_j(N_v)$ 为P&R设施选址评价 $N_v$ 关于等级j的综合关联度; $k_j(v_i)$ 为 $N_v$ 关于等级j的单指标关联度; $\lambda_i$ 为第i项指标权重.

在常用的指标权重确定方法中,熵权法通过考察各项指标的变异程度计算指标权重系数,受主观因素影响较小,故采用熵权法确定指标权重,具体方法见文献[17].各指标权重如表2所示.



表2 指标权重

Table 2 The weight of each index

特征指标 $C_i$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
指标权重 $\lambda_i$	0.165 6	0.215 5	0.105 1	0.099 2	0.140 6	0.177 7	0.096 4

$\max\{K_j(N_i)\}$ 中对应的下标值 $j$ 即为P&R设施选址评价等级。

用地充足、同侧设置优先原则筛选出P&R设施的预选址站点如表3所示。

#### 4 案例分析

西安绕城高速现有互通立交15处,除田王立交外其他14处均与城市路网相连。于2016年动工的绕城高速通行能力提升工程完成后将有18处互通立交与城市路网相通。其中朱宏路立交为机场高速与绕城高速的互通立交,考虑到机场高速的特殊性,朱宏路立交不纳入P&R设施的衔接出口。

西安市已运营地铁1号线、2号线,同时在建多条轨道交通线路,预计2020年3、4、5、6、9、13号线将建成通车。届时,1~6号线基本涵盖西安市区内主要出行点,且1~6号线与绕城高速均有线路交汇,有多个站点连通绕城高速出入口。但并不是每一个站点都具备设置P&R设施的条件,根据建设

表3 P&amp;R设施预选址轨道交通站点

Table 3 Railway stations waiting for selectins of P&amp;R facility location

轨道交通站名	衔接出口互通立交名称
运动公园站	吕小寨立交
务庄站	杏园立交、谢王立交
纺织城站	方家村立交、田王立交、香王立交
纺南路站	纺织城立交
陆家寨站	曲江立交、金花路立交
金浮沱站	雁塔路立交
锦业路站	河池寨立交
和平村站	阿房宫立交
后卫寨站	帽耳刘立交

各站点与P&R设施相关的特征指标通过调查分析及查阅相关规划获取,具体取值如表4所示。

表4 P&amp;R设施预选址评价指标值

Table 4 The index values of railway stations waiting for selectins of P&amp;R facility location

P&R 站点	$C_1$ /辆	$C_2$ /个	$C_3$ /km	$C_4$	$C_5$ /条	$C_6$ /m <sup>2</sup>	$C_7$
运动公园站	88	1	0.7	0.68	3	11 000	1.10
务庄站	143	2	1.7	0.32	3	20 000	0.11
纺织城站	201	3	1.6	0.73	13	20 000	1.30
纺南路站	49	1	0.2	0.52	11	7 300	0.83
陆家寨站	244	2	1.3	0.53	5	20 000	0.28
金浮沱站	62	1	1.1	0.49	0	7 300	0.83
锦业路站	94	1	0.8	0.51	3	20 000	0.71
和平村站	146	1	0	0.58	4	20 000	0.58
后卫寨站	76	1	0.5	0.72	7	20 000	0.78

P&R设施预选址站点的评价等级如表5所示。

表5 P&amp;R设施预选址站点评价结果

Table 5 Evaluation results of railway stations waiting for selectins of P&amp;R facility location

P&R 站点	综合关联度矩阵	评价等级
运动公园站	$K_j(v_i) = [-0.191 0 \quad -0.089 0 \quad -0.145 2 \quad -0.389 7]$	中
务庄站	$K_j(v_i) = [-0.040 1 \quad -0.415 9 \quad -0.549 4 \quad -0.707 1]$	优
纺织城站	$K_j(v_i) = [0.090 4 \quad -0.565 0 \quad -0.645 1 \quad -0.734 9]$	优
纺南路站	$K_j(v_i) = [-0.116 7 \quad -0.318 8 \quad -0.035 7 \quad -0.464 5]$	中
陆家寨站	$K_j(v_i) = [-0.013 8 \quad -0.445 0 \quad -0.690 4 \quad -0.738 2]$	优
金浮沱站	$K_j(v_i) = [-0.529 4 \quad -0.409 3 \quad -0.175 1 \quad -0.265 9]$	中
锦业路站	$K_j(v_i) = [-0.172 2 \quad -0.378 8 \quad -0.266 7 \quad -0.637 0]$	优
和平村站	$K_j(v_i) = [-0.136 9 \quad -0.406 1 \quad -0.347 1 \quad -0.646 1]$	优
后卫寨站	$K_j(v_i) = [-0.139 1 \quad -0.406 0 \quad -0.267 7 \quad -0.620 9]$	优

结果分析:在P&R设施预选址站点中,6个站点评价等级为“优”,3个站点评价等级为“中”.评价等级“中”的3个站址的停车换乘需求量较小,均在100以下.后卫寨站的停车换乘需求量也小于100,但由于其距离绕城高速出口距离近及建设用地充裕,评价结果为“优”.

根据上述评价结果,建议在评价等级为“优”的6个轨道交通站点附近建设P&R设施.

西安市古城保护区位于城市西北,而灞河穿过城市东北区域,因此整个城市的重心在绕城高速圆环内的南部区域.绕城高速南段实际车流量及停车换乘需求明显大于北段,但南部城区开发强度大,缺乏足够的地块建设P&R设施,导致了更多的P&R设施选址在绕城高速东北段附近.模型评价结果与实际情况相吻合,说明了模型的合理性与适用性.

## 5 结 论

以绕城高速为切入点,对影响P&R设施选址的因素进行分析,选取了7项评价指标,涵盖了停车换乘需求性指标、停车换乘可靠性指标和建设用地需求指标3大类.这些指标更好地反映了绕城高速与城市轨道交通P&R设施选址的特点,且易于量化,避免了以刻画出行者行为为切入点的P&R设施选址研究中,P&R设施可靠性、建设用地等客观指标对出行者行为影响难以准确描述的缺点.通过熵权法为指标赋予权重,避免了一般主观赋权方法的人为判断干扰.运用物元评价模型对P&R停车换乘设施预选址站点进行评价,选取综合评价等级“优”的站点附近设置P&R设施.通过西安市绕城高速与城市轨道交通P&R设施选址实例,说明了所建模型的合理性和实用性.模型在实际应用中,各指标的经典域和节域有待进一步分析确定.绕城高速出入口小汽车流量、换乘停车潜在使用者比例会随着换乘设施的建设发生变化,如何在模型中考虑也待研究.

### 参考文献:

[1] PARKHURST G. Influence of bus-based park and ride

facilities on users' car traffic[J]. *Transport Policy*, 2000, 7(2): 159-172.

- [2] MARK W, HORNER AUTHOR VITAE, SARA GROVES. Network flow-based strategies for identifying rail park-and-ride facility locations[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2007, 41(3): 255-268.
- [3] JUDITH Y T, WANG, YANG H, et al. Locating and pricing park-and-ride facilities in a linear monocentric city with deterministic mode choice[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, 38(8): 709-731.
- [4] BILAL FARHAN, ALAN T MURRAY. Siting park-and-ride facilities using a multi-objective spatial optimization model[J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(2): 445-456.
- [5] JOSÉ HOLGUÍN-VERAS, WILFREDO F YUSHIMITO, FELIPE AROS-VERA, et al. User rationality and optimal park-and-ride location under potential demand maximization[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2012, 46(8): 949-970.
- [6] 何保红. 城市停车换乘设施规划方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2006. [HE B H. Study on planning methods of park-and-ride facility[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.]
- [7] 范文博. 停车换乘系统分析、评价与优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. [FAN W B. Analysis, evaluation and optimization of park-and-ride system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.]
- [8] 陈如刚. 停车换乘设施选址模型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. [CHEN R G. Study on park-and-ride facility location model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.]
- [9] 张宇. 停车换乘设施(P&R)需求量预测与选址模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. [ZHANG Y. Research on demand forecasting and site selection model of P&R facilities[D]. Changchun: Jilin University, 2015.]
- [10] 张琦. 山地组团城市停车换乘设施选址方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015. [ZHANG Q. Study on park-and-ride facilities location method of mountain-group cities[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.]
- [11] 杨明, 杨珍, 刘则承. 城市停车换乘设施选址模型[J]. 长沙: 长沙理工大学学报(自然科学版), 2015, 12(4): 11-17. [YANG M, YANG Z, LIU Z C. Urban park-and-ride facility location model[J]. Changsha: Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2015, 12(4): 11-17.]
- [12] 陈新元. 双模式交通网络下停车换乘(P&R)设施的选址及场站规模的研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. [CHEN X Y. Modelling for park-and-ride network

- design in a bi-modal transportation network[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.]
- [13] 裴玉龙, 张茂民. 基于路网的换乘强度研究[J]. 城市交通, 2004, 2(1): 13-16. [PEI Y L, ZHANG M M. Study on transfer strength based on road network[J]. Urban Communications, 2004, 2(1): 13-16.]
- [14] 贺亚静. 大城市交通换乘设施需求预测研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014. [He Y J. Research on demand forecasting of traffic transfer facilities in big cities[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.]
- [15] BILAL FARHAN. Modeling and policy assessment for park-and-ride services as a component of public transportation[D]. Ohio State: The Ohio State University, 2003.
- [16] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术出版社, 1998. [CAI W. Matter element model and its application[M]. Beijing: Science and Technology Publishing House, 1998.]
- [17] 张文会, 李德才, 罗文文. 基于熵权的交通事故现场安全属性识别模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 136-140. [ZHANG W H, LI D C, LUO W W. Safety attribute recognition model on traffic accident site based on coefficient of entropy[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(2): 136-140.]

---

上接第38页

- [4] KLINCEWICZ J G. Enumeration and search procedures for a hub location problem with economies of scale[J]. Annals of Operations Research, 2002, 110 (1): 107-122.
- [5] ISHFAQ R, SOX C R. Intermodal logistics: The interplay of financial, operational and service issues[J]. Transportation Research Part E, 2010, 46 (6): 926-949.
- [6] CAMARGO R S D, MIRANDA G, FERREIRA R P M, et al. Multiple allocation hub-and-spoke network design under hub congestion[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36 (12): 3097-3106.
- [7] PARASKEVOPOULOS D C, GUREL S, BEKTAS T. The Congested multicommodity network design problem[J]. Transportation Research Part E, 2016 (85): 166-187.
- [8] 唐继孟, 孙全欣, 赵欣苗, 等. 枢纽延误对公铁联运竞争力的影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(6): 1-6. [TANG J M, SUN Q X, ZHAO X M, et al. Analysis of the impacts of hubs delay on rail-road intermodal transport[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(6): 1-6.]
- [9] MOHAMMADI M, JOLAI F, ROSTAMI H. An M/M/c queue model for hub covering location problem[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2011, 54(11): 2623-2638.
- [10] RAHIMI Y, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R, MOHAMMADI M, et al. Multi-objective hub network design under uncertainty considering congestion: An M/M/c/K queue system[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(5): 4179-4198.
- [11] GLOVER F. Tabu search—part I[J]. Informs Journal on Computing, 1990, 1(1): 89-98.
- [12] ERLENKOTTER D. A dual-based procedure for uncapacitated facility location[J]. Operations Research, 1978, 26(6): 992-1009.

---

上接第45页

- [12] 蒋慧峰. 基于时变综合系数的运输子系统的动力学模型[J]. 科技通报, 2014, 30(9): 191-198. [JIANG H F. Dynamic model about transportation modes based on time-invariant comprehensive coefficient[J]. Bulletin of Science and Technology, 2014, 30(9): 191-198.]
- [13] YING X W, SHI J. Road resources distribution and evolution analysis using a species competition model for improving road equity[J]. Tsinghua Science and Technology, 2008, 13(5): 651-659.