

doi:10.3963/j.issn.1671-4431.2013.06.015

城市轨道交通建设时序确定方法

郭延永, 刘攀, 吴瑶

(东南大学交通学院, 南京 210096)

摘要: 为科学合理地安排城市轨道交通线路的建设时序, 提出了城市轨道交通建设时序 TOPSIS 模型。分析了城市轨道交通建设时序的 6 大影响因素, 运用主观赋权法和客观赋权法相结合的思想, 采用 AHP 与熵值法确定了轨道交通建设时序影响因素指标权重; 构建了城市轨道交通建设时序决策矩阵, 并采用极差变换法对其进行了标准化, 结合影响指标权重, 构建了加权标准化决策矩阵; 运用 TOPSIS 方法, 确定了城市轨道交通线路的正负理想建设时序方案, 通过线路与负理想方案的贴近度确定城市轨道交通线路的建设时序。最后以西安市轨道交通为案例, 验证了模型的可行性与有效性。结果表明, 运用所提出模型计算的结果与实际建设次序一致, 该模型有效可行, 具有较好的应用前景。

关键词: 城市交通; 建设时序; TOPSIS 模型; 城市轨道交通; AHP 与熵值

中图分类号: U 491

文献标识码: A

文章编号: 1671-4431(2013)06-0075-06

Development of a Method for the Construction Schedule of Urban Rail Transit Lines

GUO Yan-yong, LIU Pan, WU Yao

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to arrange the urban rail transit lines construction project reasonably, a model of the construction schedule of urban rail transit lines based on TOPSIS was proposed. Six influencing indexes of the construction schedule of urban rail transit were analyzed and the weights of that were determined by AHP and entropy using the idea of combining subjective and objective weighting methods. The decision matrix was build up and standardized by range transformation method. Also, the weighted standardized decision matrix was build up by combing the decision matrix and the indexes' weights. Using the TOPSIS model, the positive and negative ideals construction schedule of the urban rail transit lines was determined. And the construction schedule of urban rail transit lines were determined by calculating the close degree of the urban rail transit lines and the negative ideal construction schedule. Finally, a case of Xi'an rail transit was to verify the feasibility and effectiveness of the model. The result shows that the construction schedule of Xi'an rail transit lines calculated by the model is the same as the actual situation; the method is effective and feasible and has good application prospects.

Key words: urban traffic; construction schedule; TOPSIS model; urban rail transit; AHP and entropy

城市轨道交通建设是一项长期、庞大的系统工程, 在资金、人力、物力等客观条件一定的条件下, 轨道交通线路的修建顺序不仅对轨道交通网的可操作性起作用, 而且直接影响到轨道交通的运营效益, 甚至影响到城市交通的整体运行^[1-8]。由于网络中各线路服务于不同繁忙程度的交通走廊, 承担不同性质的客运任务, 并且各条线路对于城市发展的契合程度也不一样。因此, 每条线路在整个网络中的功能地位和修建时序也是有区别的。所以必须对轨道交通网的修建顺序进行深入研究, 使轨道的建设与城市社会经济的增长、人口发

收稿日期: 2013-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51238008)和国家“863”计划项目(SQ2010AA1100330010).

作者简介: 郭延永(1985-), 男, 博士生. E-mail: guoyanyong11@126.com

通讯作者: 刘攀(1979-), 男, 教授, 博导. E-mail: liupan@seu.edu.cn

展以及交通需求滋长紧密结合。

目前,国内外针对轨道交通线网建设时序的理论研究较少,往往在整个线网布局研究中简略地论述,或是零星地分布在一些咨询稿和项目报告中。一些文献虽然提出了定性分析或是定量计算的方法,但由于主观因素太大或是定量参数不容易获取等原因,使得这些方法的应用性不强。成华等^[9]在定性分析轨道交通线路功能的基础上,以建设资金为约束条件,建立了费用-效益优化轨道交通建设时序模型,但模型约束条件较多,求解算法复杂,对于实际应用并不容易实现。陈群等^[10]分析了城市轨道交通的效应和线网分级,以项目全寿命周期费用、平均建设费用曲线和待建线路的预期收益为依据,在定量计算和定性分析的基础上得出了轨道交通线路的建设时序。黄睿等^[11]以轨道交通线网分级为依据,进行了基于节点重要度理论的轨道交通建设时序研究,但模型中所涉及到的“节点”更大程度上依赖于城市总体规划,致使模型中确定的线路建设时序实质上是依赖于城市总体规划的结果。Luo X Q等^[12]在分析轨道交通建设时序影响因素的基础上,运用模糊数学理论,提出了基于加权灰色关联度的城市轨道交通建设时序方法。此外《城市轨道交通线网规划编制标准》^[13]中也未提出轨道交通建设时序的规定内容。以上研究成果推动了轨道交通建设时序研究的发展,但这些研究仅是以资金、寿命或效益等单因素为目标考虑轨道交通建设时序,并未从影响轨道交通建设时序的多因素全面统筹考虑建设时序问题。

为科学合理地安排轨道交通建设时序,文中提出了基于TOPSIS模型的城市轨道交通建设时序方法,综合考虑了轨道交通在6方面主要影响因素下的建设时序。运用主观赋权法和客观赋权法相结合的思想,充分考虑专家经验以及数据本身蕴涵的信息,采用AHP与熵值法综合确定了影响指标的权重。通过构建加权标准化决策矩阵,计算轨道交通线路建设项目与正负理想建设时序方案的距离,进而通过其与负理想方案的贴近度来确定整个轨道交通线网的建设时序。

1 轨道交通建设时序影响因素

确定轨道交通建设时序的关键问题是确定其影响因素。影响轨道交通线路建设的因素较多,涉及到技术、社会效益和城市发展等因素,但至今没有一套完整的体系,也没有相关的规范明确指出。文献^[14-17]中对城市轨道交通线网评价指标体系做了一个很好的梳理,对城市轨道交通建设时序影响因素起到借鉴作用。因此文中在选择轨道交通建设时序影响因素时采用专家主观评定和比较判定法。影响因素指标筛选的流程如下:

1) 问卷调查。通过整理与轨道交通建设时序相关的因素,设计轨道交通建设时序影响因素调查问卷。问卷的发放对象涉及到高校教授,从事轨道交通规划、设计与施工的经验丰富的工程师等。

2) 指标筛选。回收问卷,整理调查得到的数据,采用德尔菲法对各指标进行敏感性分析^[18],筛选出认可度较高的指标。

根据以上流程,文中提出了表1中6个具有代表性的影响因素。

表1 城市轨道交通建设时序影响因素

目标层	指标层	反映内涵	确定方法
轨道交通建设 时序影响因素	$[U_1]$ 线路客流负荷强度	反映线路的繁忙程度和承担城市交通	客流预测
	$[U_2]$ 轨道交通日客运周转量	公共客流的程度	客流预测
	$[U_3]$ 城市发展方向吻合指数	反映线路与城市布局的契合程度	专家评估
	$[U_4]$ 位置系数		专家评估
	$[U_5]$ 线网布局重要程度指数	反映线路本身在线网中的重要性	专家评估
	$[U_6]$ 沿线土地开发效益	反映线路对周边土地的开发效益	专家评估

轨道交通线路的客流负荷强度指该线路所承担的日客运量与线路长度之比。单位线路长度承担的客流量,反映线路客流繁忙程度。客流负荷强度越大,则线路的建设次序越高。

轨道交通日客运周转量指线路承担的日客运量与线路长度的乘积。该值越大,线路的建设次序越高。

城市发展方向吻合指数可以用轨道交通线路走向与城市总体规划中拟定的城市发展方向的吻合程度表示。城市发展方向吻合指数越大,则线路的建设次序越高。

位置系数是对轨道交通线路在城市空间上所处位置定性分析的量化表述。按照历经区域“核心区>中

间区>外围区”和历经方式“直径线>半径线”的原则,位置系数越大,则线路的建设次序越高。

线网布局重要程度指数是轨道交通线路在整体线网中所起的作用和地位的量化表述。一般轨道交通线网按功能可划分为骨架线、辅助线和延伸线。网布局重要程度指数越大,则线路的建设次序越高。

沿线土地开发效益是轨道交通线路对其沿线房价增值的量化表述。在城市系统中土地是稀缺资源,与此同时区位条件越优越,土地价值越高,进而导致开发强度愈来愈高。

2 影响指标权重确定方法

传统的指标权重确定方法分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法主要是由专家根据经验主观判断而得到,如 AHP 法、Delphi 法等,这种方法也较为成熟,但客观性较差。客观赋权法是根据指标的原始数据进行处理而得到权重,它不依赖于人的主观判断,客观性较强,如变异系数法,熵权法等。轨道交通线路建设时序是一项复杂的系统工程,既要考虑相关专家的丰富经验,又不能忽略指标本身所蕴涵的信息,因此将主观赋权法和客观赋权法相结合来确定指标的权重将大大改善采用单一赋权方法所带来的决策偏差。文中采用 AHP 法和熵权法确定影响轨道交通建设时序指标的权重,具体过程如下:

1)AHP 法:其基本原理是采用 1~9 比较尺度法构造判断矩阵,经层次单排序及一致性检验和层次总排序及一致性检验,求得指标权重。设 AHP 法求的指标 j 的权重为 w'_j 。

2)熵权法:若现有 n 个对象, m 个评价指标,原始评价值数据矩阵 $A = (x_{ij})_{n \times m}$, ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)。由于在熵中的变量取值范围在 0~1 之间,为了确保符合要求,需要对原始评价数据进行预处理,这里采用归一化的方法进行处理,即 $r_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}$,得到处理后矩阵 R ,其中元素 r_{ij} 不再具有概率意义。

对于某个指标 x_j ,其信息熵为 $e_j = -k \sum_{j=1}^n r_{ij} \ln(r_{ij})$,其中 $k = 1 / \ln n$ 。

则第 j 个指标的熵权 w''_j 定义为 $w''_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j)$ 。

结合 AHP 法和熵权法最终得到第 j 个指标的综合权重为

$$w_j = \frac{w'_j w''_j}{\sum_{j=1}^m w'_j w''_j} \tag{1}$$

3 轨道交通建设时序 TOPSIS 模型

TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)法是 Hwang 和 Yoon^[19]于 1981 年首次提出的处理指标决策问题的多方案排序和选择的经典方法。TOPSIS 的基本思想是:设定一个虚拟的最优解(称为正理想解),它的各个指标值都达到各备选方案中的最好值;一个虚拟的最劣解(称为负理想解),它的各个属性值都达到各备选方案中的最坏值。方案排序的规则是把各备选方案与正理想解和负理想解做比较,若其中有一个方案最接近正理想解,而同时又远离负理想解,则该方案是备选方案中最好的方案。图 1 为 TOPSIS 方法示意图。

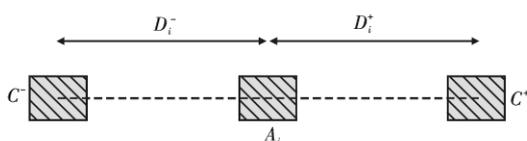


图1 TOPSIS方法示意图

在轨道交通线路建设时序中,假定存在一个最优建设时序方案(正理想建设时序方案)和一个最劣建设时序方案(负理想建设时序方案),借鉴 TOPSIS 思想,某一条线路的具体建设时序可根据该线路与最优和最劣建设时序方案的距离来判定。所以,轨道交通线路的建设时序问题可以归结为这样一个数学问题:一个具有 n 条线路的轨道交通线网,有 m 个影响指标,按照与理想建设时序的贴近度,在某个特定影响指标 m_i 下, n 条线路有一个固定的排序。在综合考虑 m 个指标的情况下,确定 n 条线路的排序,可作为建设时序方案。

3.1 构建标准化决策矩阵

城市轨道交通建设时序中,设有 n 条排序的线路 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。建设时序影响指标为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$, $M = \{1, 2, \dots, m\}$,则初始决策矩阵为

$$A = (x_{ij})_{n \times m} \quad (i \in N, j \in M) \tag{2}$$

由于轨道交通建设时序影响指标的评价标准各不相同,为了消除不同量纲指标对决策的影响,需要构造

标准化矩阵 Y 。在多属性决策问题中,指标属性类型一般有效益型、成本型、固定型、偏离型和区间型等。目前常用的规范化方法有向量规范化法、极差变换法、线性比例变换法、比重变换法和指数变换法等,这些规范化方法一般都是把属性值统一变换到 $[0,1]$ 的范围内。文中根据轨道交通建设时序影响因素的属性采用极差变换法对其进行标准化。

极差变换法将最好的属性值规范化为 1,将最坏的属性值规范化为 0,其余属性值采用线性插值的方法得到其规范化值。极差变换法需要使用属性值中的极值,并将其作为常数按照相应公式来规范化其他属性值。

对于效益型属性指标 U_j ,变换公式为

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (i \in N, j \in M) \quad (3)$$

对于成本型属性指标 U_j ,变换公式为

$$b_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (i \in N, j \in M) \quad (4)$$

经过极差变换法,可得到标准化决策矩阵

$$B = (b_{ij})_{n \times m} \quad (i \in N, j \in M) \quad (5)$$

3.2 加权标准化决策矩阵

轨道交通建设时序影响指标权重为 $\omega_j = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$,将标准化决策矩阵的每列和各指标相应的权重相乘得到加权标准化矩阵

$$C = (c_{ij})_{n \times m} = (b_{ij}\omega_j)_{n \times m} \quad (i \in N, j \in M) \quad (6)$$

3.3 轨道交通线路建设时序判定

1)确定正负理想建设时序方案 借鉴 TOPSIS 思想,定义“正理想建设时序”是假设影响轨道交通建设时序的 6 个指标都达到最优值时的建设时序,而“负理想建设时序”是假设指影响轨道交通建设时序的 6 个指标都达到最差值时的建设时序。则正负理想建设时序方案为

$$\begin{cases} C^+ = \{(\max_j c_{ij} | X_j \in J_1), (\min_j c_{ij} | X_j \in J_2)\} \\ C^- = \{(\min_j c_{ij} | X_j \in J_1), (\max_j c_{ij} | X_j \in J_2)\} \end{cases} \quad (i \in N, j \in M) \quad (7)$$

式中, C^+ 和 C^- 分别为正理想建设时序方案和负理想建设时序方案; J_1 和 J_2 分别为效益型指标集和成本型指标集。

2)确定评判对象与理想建设时序方案的距离 设城市轨道交通线路 A_i 建设时序到正理想建设时序方案的距离为 D_i^+ ,到负理想建设时序方案的距离为 D_i^- ,计算其欧几里德距离为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (c_{ij} - c_j^+)^2} \quad (i \in N, j \in M) \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (c_{ij} - c_j^-)^2} \quad (i \in N, j \in M) \quad (9)$$

式中, D_i^+ 和 D_i^- 分别为评判对象与正理想建设时序方案和负理想建设时序方案的距离; c_j^+ 和 c_j^- 分别为 C^+ 和 C^- 中对应的元素。

3)确定评判对象与负理想建设时序方案的贴近度 城市轨道交通线路 A_i 到负理想建设时序方案的贴近度为

$$E_i = \frac{D_i^+}{D_i^- + D_i^+} \quad (i \in N) \quad (10)$$

贴近度 E_i 反映了评判对象靠近正理想建设时序方案同时也远离负理想建设时序方案的程度。从式 (10) 可以看出, $0 < E_i < 1$, 当 E_i 接近 0 时, D_i^+ 愈接近 0, 轨道交通线路 A_i 即愈靠近正理想建设时序方案而远离负理想建设时序方案, 该线路建设需求就愈高; 当 E_i 接近 1 时, D_i^- 愈接近 0, 方案愈靠近负理想方案而远离正理想建设时序方案, 该线路的建设需求就愈低。

4 实例应用

西安轨道交通规划(第 1 版)推荐方案中有 6 条地铁线路, 线网规模 191.7 km。根据线网规划推荐方案和客流测试结果, 6 条轨道交通线路的建设时序影响指标计算结果如表 2 所示。采用上述方法对西安市轨道交通线路建设时序进行实例分析。

4.1 影响指标权重确定

根据第 2 节中 AHP 法和熵权法确定影响轨道交通建设时序的 6 个指标的权重, 如表 3 所示。

表 2 线路决策指标值

线路	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
A_1	3.08	14 155 187	9.8	9.0	9.5	9.2
A_2	3.61	10 067 766	9.7	9.5	9.8	9.8
A_3	2.67	18 326 270	9.5	9.7	9.7	9.0
A_4	3.15	8 638 996	7.5	8.0	8.5	9.5
A_5	2.73	11 274 822	7.2	7.8	8.0	8.0
A_6	2.94	11 518 063	8.1	8.2	7.1	7.5

表 3 熵值法确定的参数权重

影响指标	ω'_i (AHP)	ω''_i (熵权法)	ω_i
U_1	0.14	0.142	0.115
U_2	0.12	0.092	0.064
U_3	0.21	0.199	0.241
U_4	0.18	0.218	0.227
U_5	0.19	0.186	0.203
U_6	0.16	0.163	0.150

4.2 构造标准化决策矩阵

根据式(2)~式(5)分别构建决策矩阵和标准化决策矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 3.08 & 14\ 155\ 187 & 9.8 & 9.0 & 9.5 & 9.2 \\ 3.61 & 10\ 067\ 766 & 9.7 & 9.5 & 9.8 & 9.8 \\ 2.67 & 18\ 326\ 270 & 9.5 & 9.7 & 9.7 & 9.0 \\ 3.15 & 8\ 638\ 996 & 7.5 & 8.0 & 8.5 & 9.5 \\ 2.73 & 11\ 274\ 822 & 7.2 & 7.8 & 8.0 & 8.0 \\ 2.94 & 11\ 518\ 063 & 8.1 & 8.2 & 7.1 & 7.5 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.44 & 0.57 & 1.00 & 0.63 & 0.90 & 0.74 \\ 1.00 & 0.15 & 0.96 & 0.89 & 1.00 & 1.00 \\ 0 & 1.00 & 0.88 & 1.00 & 0.96 & 0.65 \\ 0.51 & 0 & 0.12 & 0.11 & 0.52 & 0.87 \\ 0.06 & 0.27 & 0 & 0 & 0.33 & 0.22 \\ 0.29 & 0.30 & 0.35 & 0.21 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.3 加权标准化矩阵和正负理想建设时序方案

根据式(6)构造加权标准化矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} 0.051 & 0.036 & 0.241 & 0.143 & 0.184 & 0.111 \\ 0.115 & 0.010 & 0.231 & 0.202 & 0.204 & 0.150 \\ 0 & 0.064 & 0.212 & 0.227 & 0.196 & 0.098 \\ 0.059 & 0 & 0.029 & 0.025 & 0.106 & 0.131 \\ 0.007 & 0.017 & 0 & 0 & 0.067 & 0.033 \\ 0.033 & 0.019 & 0.084 & 0.048 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(7)确定正负理想建设时序方案为

$$C^+ = \{0.115, 0.064, 0.241, 0.227, 0.204, 0.150\}, C^- = \{0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

4.4 计算距离及相对贴近度

根据式(8)~式(10)计算轨道交通线路 A_i 到正负理想建设时序方案距离和与负理想建设时序方案的贴近度, 如表 4 所示。

从表 4 可以看出: $E_5 > E_6 > E_4 > E_3 > E_1 > E_2$ 。根据以上排序, 各线路的建设时序为: 2 号线 → 1 号线 → 3 号线 → 4 号线 → 6 号线 → 5 号线。事实上, 西安市地铁 2 号线已建成通车; 1 号线与 2008 年开始建设, 预计将于 2013 年建成通车; 3 号线于 2011 年开始建设, 预计 2015 年建成通车; 4 号线于 2012 年开始地形勘测, 计划于 2013 年开工建设。可以看出文中所提方法得到的建设时序与实际轨道交通建设时序一致, 从侧面反映了该方法的可行性。

表 4 距离与贴近度及排序

线路	D^+	D^-	E	排序
A_1	0.118	0.358	0.248	2
A_2	0.061	0.414	0.128	1
A_3	0.130	0.385	0.252	3
A_4	0.321	0.182	0.638	4
A_5	0.395	0.077	0.836	6
A_6	0.036	0.104	0.775	5

5 结 论

a. 提出了影响城市轨道交通建设时序的6个典型指标,分析了每个指标对其建设时序的影响作用,并给出了指标定量或定性的获取方法。

b. 综合考虑专家经验和数据本身信息,采用AHP和熵权法确定了轨道交通建设时序影响指标的综合权重,改善了采用单一赋权方法所带来的决策偏差。

c. 提出了基于TOPSIS模型的城市轨道交通建设时序确定方法,该方法综合考虑了轨道交通在6个影响因素下的建设时序。基于影响轨道交通建设时序的指标建立决策矩阵,依据TOPSIS思想得到正负理想建设时序方案,通过轨道交通线路与正负理想建设时序方案的距离及贴近度来确定轨道交通线路的建设时序。

d. 以西安市轨道交通线网为例,应用文中提出的方法进行实例分析。案例应用结果表明该方法计算出的建设时序和实际建设时序一致,其可为城市轨道交通建设时序提供理论指导。

参考文献

- [1] 秦国栋. 新时期城市轨道交通发展的思考[J]. 城市交通, 2006, 4(2): 1-5.
- [2] Liu P, Lu J, Chen H. Safety Effects of the Separation Distances Between Driveway Exits and Downstream U-turn Locations[J]. Accident Analysis and Prevention, 2008, 40(2): 760-767.
- [3] 谭 瑜, 叶霞飞. 东京新城发展与轨道交通建设的相互关系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2009(3): 1-5.
- [4] Liu P, Chen H, Lu J, et al. How Arrangement of Lanes on Freeway Mainlines and Ramps Affects Safety of Freeways with Closely Spaced Entrance and Exit Ramps? [J]. ASCE Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(7): 614-622.
- [5] 袁玉玲, 王选仓. 城市轨道交通建设模式与措施[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 101-106.
- [6] Xu C, Liu P, Wang W, et al. Evaluation of the Impacts of Traffic States on Crash Risks on Freeways [J]. Accident Analysis and Prevention, 2012, 47: 162-171.
- [7] 朱 军. 按照科学发展观要求做好城轨交通建设规划[J]. 都市快轨交通, 2005, 18(1): 10-13.
- [8] 施仲衡. 科学制定城市轨道交通建设规划[J]. 都市快轨交通, 2004, 17(2): 12-15.
- [9] 成 华, 贺方会, 李俊芳. 城市轨道交通近期建设时序的确定方法[J]. 城市交通, 2010, 8(3): 13-16.
- [10] 陈 群, 谢 磊, 董建军. 城市轨道交通线路建设时序决策系统研究[J]. 城市交通, 2009, 31(10): 51-53.
- [11] 黄 睿, 梁青槐. 基于节点重要度理论的轨道交通线路建设时序[J]. 都市快轨交通, 2012, 25(3): 21-24.
- [12] Luo X Q, Guo Y Y, Wu Y. The Timing of Urban Rail Transit Construction Based on the Weighted Gray Correlation [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(97-98): 1189-1194.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50546—2009 城市轨道交通线网规划编制标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [14] 马超群, 王玉萍, 陈宽民. 基于灰色加权关联度的城市轨道交通线网方案评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 42(3): 38-39.
- [15] 纪嘉伦, 李福志. 城市轨道交通线网规划方案综合评价指标体系研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 8(3): 129-133.
- [16] 杜胜品, 孔建益, 熊 玲. 城市轨道交通线网规划方案评价指标体系研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2003, 27(6): 841-844.
- [17] 柳 林, 陈 钠, 陈季华. 城市轨道交通可持续发展评价指标体系研究[J]. 西南交通大学学报: 社会科学版, 2008, 15(5): 15-16.
- [18] 周继彪, 陈 红, 甘佐贤, 等. 公路隧道运行环境体系敏感性的灰色关联研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12): 71-77.
- [19] Hwang C L, Yoon K. Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications [M]. New York: Springer-Verlag, 1981.