DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2013.04.012

文章编号: 1009-6744 (2013) 04-0029-07

基于累计前景理论的城市轨道交通建设时序

郭延永, 刘 攀*, 吴 瑶
(东南大学 交通学院, 南京 210096)

摘要: 为明确各条线路在整个城市轨道交通线网中的修建时序,构建了城市轨道交通线路建设时序影响因素指标体系,提出了一种基于累积前景理论的城市轨道交通线路建设时序决策方法. 该方法利用奖优罚劣的[-1,1]线性变换算子对原始决策矩阵进行规范化处理,由此得到正负理想方案. 基于累积前景理论和灰色关联分析确定前景价值函数,构建城市轨道交通线路建设时序的综合前景值最大化优化模型,通过求解该模型得出最优权向量,并最终确定出城市轨道交通线路建设时序的最优方案. 最后以西安市轨道交通线网为例进行建设时序排序. 结果表明,运用所提出方法确定的结果与实际建设时序一致,该方法可为城市轨道交通建设时序提供理论指导.

关键词: 交通工程; 建设时序; 累积前景理论; 城市轨道交通; 灰色关联
中图分类号: U491 **文献标识码:** A

Construction Sequence of Urban Rail Transit System Based on Cumulative Prospect Theory

GUO Yan-yong, LIU Pan, WU Yao
(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To determine the construction sequence of each line in the whole rail transit network, this paper establishes a influencing factors system of urban rail transit construction sequence and proposes a decision-making method of construction schedule based on the cumulative prospect theory. The [-1, 1] linear transformation operator is used to standardize the original decision-making matrix, and then, the positive and negative ideal scheme are obtained. The prospect value function is developed based on the cumulative prospect theory and grey correlation analysis. An optimization model aiming at maximizing the comprehensive prospects value is also developed. The optimal weight vector is solved and the construction sequence is determined. Finally, a case study of Xi'an rail transit is studied using the proposed method. The result shows that the construction sequence of Xi'an rail transit lines is consistent with the real situation, which implies that the proposed method provides theoretical guidance for urban rail transit construction sequence.

Key words: traffic engineering; construction sequence; cumulative prospect theory; urban rail transit; grey correlation
CLC number: U491 **Document code:** A

收稿日期: 2013-04-15 **修回日期:** 2013-06-07 **录用日期:** 2013-06-13
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51238008); 863 国家高科技资助项目(SQ2010AA1100330010).
作者简介: 郭延永(1985-),男,河北邢台人,博士生.
* **通讯作者:** liupan@seu.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

轨道交通网络中不同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,并且对于城市发展的契合程度也不一样,所以城市轨道交通线路的修建顺序不仅直接影响到轨道交通的运营效益,而且对轨道交通网络整体稳定性起关键作用,甚至影响到城市交通的整体运行质量[1],因此必须对城市轨道交通线路的修建顺序进行深入研究. 目前,对城市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. 仅有的研究主要集中在两方面,一是通过约束条件模型求解线路建设时序,如费用、寿命、效益约束条件模型[2,3];二是根据节点重要度确定线路建设时序[4,5]. 虽然这些研究成果推动了城市轨道交通建设时序研究的发展,但由于主观因素太强或是定量参数不容易获取等原因,使得上述方法的应用性不强,另外也没有考虑决策者在轨道交通建设时序问题上的风险态度.

本文考虑决策者的风险态度对城市轨道交通线路建设时序的影响,将累积前景理论与灰色关联分析相结合,用于解决城市轨道交通线路建设时序问题. 首先构建了城市轨道交通线路建设时序影响因素指标体系; 然后引入累积前景理论和灰色关联分析,建立城市轨道交通线路建设时序综合前景值最大化优化模型,并通过求解该模型得出最优权向量,最终确定出城市轨道交通线路建设时序的最优方案; 最后以西安市轨道交通线网为例,运用该模型对其建设时序进行了实例验证.

2 城市轨道交通线路建设时序影响因素指标体系

确定城市轨道交通线路建设时序的关键问题是确定其影响因素. 由于影响城市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,所以城市轨道交通线路建设时序影响因素指标,至今没有一套公认的体系. 针对以上特点,本文从系统角度出发,构建了城市轨道交通线路建设时序影响因素指标体系,构建流程如下.

(1) 指标的海选.

在建立城市轨道交通建设时序影响因素指标体系时,首先应保证指标的全面性. 目前,我国城市轨道交通建设时序影响因素指标相关研究有两方面,一是国内各大城市采用的指标,本文调研了广州、沈阳、南京、深圳和西安等城市的相关指标[6,7]; 二是学术文献整理得出的指标,本文梳理了 23 篇相关文献并从中挖掘高频引用指标,具有代表性的有文献[8 - 11]等. 通过对国内大城市轨道交通系统相关经验调研和相关文献中高频指标的梳理,建立了城市轨道交通建设时序影响海选指标体系,如表 1 所示.

(2) 指标的定性初选.

根据可观测性原则初步筛选指标,删除海选指标中数据无法获得的指标,使初步筛选后的指标满足可观测性,能够实际应用.

(3) 指标的定量筛选.

经过初步筛选后的指标,并不能保证指标的独立性,应该以定量化方法进行指标精选. 通过相关性分析删除同一准则层内相关系数大的指标,避免指标信息重复,以保证指标独立性; 还应通过主成分分析删除因子负载小的指标,保证筛选出的指标对结果有显著影响. 最后,根据指标体系构建流程,依据科学性和针对性原则、系统性与层次性原则、有效性与可观测性原则,构建城市轨道交通线路建设时序影响因素指标体系.

城市轨道交通建设时序影响因素指标体系构建流程如图 1 所示.

根据指标体系的构建流程和原则,以西安市轨道交通线网规划方案和南京市轨道交通线网规划方案数据为基础,进行指标体系的构建.

采用相关分析进行指标定量筛选时,将各指标值进行标准化后,应用 SPSS19.0 软件计算得到相关系数,给定临界值为 0.9[12]. 如线路长度与线路站点个数的相关系数达到 0.963,因此删除线路站点个数指标,其他指标的删除和保留如表 1 所示.

在相关性分析的基础上,利用主成分分析筛选各准则层内剩余的指标,选取累积方差贡献率达到 85% 时各个主成分中因子负载绝对值较大的指标. 本文选取第一主成分中因子负载绝对值大于 0.9 的指标和第二主成分中因子负载绝对值最大的指标[12]. 应用 SPSS19.0 软件进行主成分分析,指标的删除和保留如表 1 所示.

最终得到城市轨道交通线路建设时序影响因素指标体系含 5 个准则层,9 个指标.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　城市轨道交通建设时序影响因素

Table 1　Influencing factors of urban rail transit construction sequence

准则层	指标层	指标类型	筛选结果	新编码
[B_1] 线路结构	[U_1] 线路长度(km)	效益(定量)	保留	C_1
	[U_2] 线路站点个数(个)	效益(定量)	相关分析删除	
	[U_3] 非直线系数	成本(定量)	主成分分析删除	
	[U_4] 线路覆盖人口和就业岗位	效益(定量)	不可观测删除	
	[U_5] 位置系数①	效益(定性)	相关分析删除	
	[U_6] 线路布局的重要程度指数②	效益(定性)	保留	C_2
[B_2] 运营效果	[U_7] 日客运量(万人次)	效益(定量)	相关分析删除	
	[U_8] 日客运周转量(万人次·km)	效益(定量)	保留	C_3
	[U_9] 平均乘距(km)	效益(定量)	主成分分析删除	
	[U_{10}] 线路负荷强度(万人次/km)	效益(定量)	保留	C_4
	[U_{11}] 客运密度((万人次·km)/(km·日))	效益(定量)	相关分析删除	
	[U_{12}] 客流断面不均匀系数	成本(定量)	保留	C_5
	[U_{13}] 高峰最大断面流量(万人次/h)	效益(定量)	主成分分析删除	
	[U_{14}] 高峰小时系数	效益(定量)	主成分分析删除	
[B_3] 社会效益	[U_{15}] 轨道占公交客运量比例(%)	效益(定量)	保留	C_6
	[U_{16}] 公交出行时间的节约(min)	效益(定量)	不可观测删除	
[B_4] 战略发展	[U_{17}] 与城市土地利用的协调	效益(定性)	保留	C_7
	[U_{18}] 沿线土地开发价值	效益(定性)	相关分析删除	
	[U_{19}] 与城市布局结构的协调	效益(定性)	主成分分析删除	
	[U_{20}] 与城市景观风貌的协调	效益(定性)	主成分分析删除	
	[U_{21}] 与城市交通设施的协调	效益(定性)	保留	C_8
[B_5] 可实施性	[U_{22}] 工程难易程度	成本(定性)	保留	C_9
	[U_{23}] 工程可行性	效益(定性)	不可观测删除	

注: ① 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.

② 线网布局的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; 按照“骨架线 > 辅助线 > 延伸线”的原则,网布局的重要程度指数越大,则线路的建设次序越高.

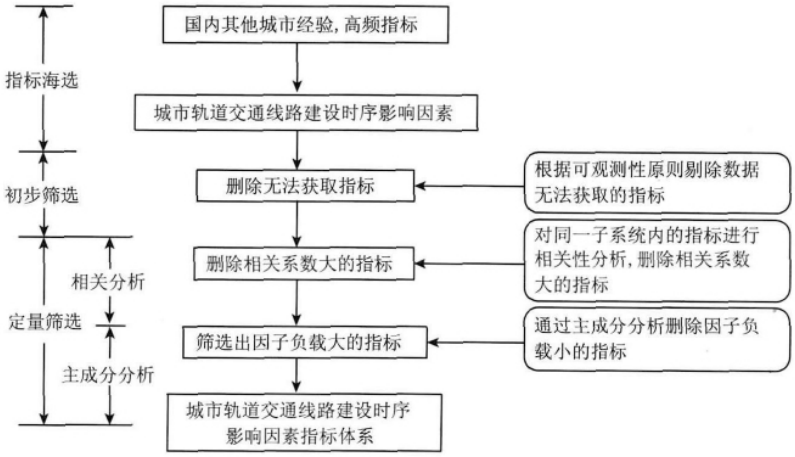

图 1　城市轨道交通建设时序影响因素指标体系构建流程

Fig. 1　Construction process of influencing factors system for urban rail transitconstruction sequence

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 基于累积前景理论的城市轨道交通建设时序决策方法

3.1 决策矩阵规范化处理与灰色关联分析

城市轨道交通线路的建设时序可以归结为这样一个数学问题: 一个具有 n 条线路的城市轨道交通线网,有 m 个影响其建设时序的指标,按照收益最大化思想,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,可作为城市轨道交通线路的建设时序.

定义 1 设有 n 条城市轨道交通线路 $A=\{A_1,A_2,\cdots,A_n\}$,影响其建设时序的指标为 $C=\{C_1,C_2,\cdots,C_m\}$,$N=\{1,2,\cdots,n\}$,$M=\{1,2,\cdots,m\}$,则表示线路集 A_i 对指标集 C_j 的决策矩阵为

$$\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{n\times m},\ i\in N,j\in M \tag{1}$$

决策矩阵提供了分析决策问题的基本信息,以下分析方法均以决策矩阵作为分析的基础.

一般情况下,指标可分为 3 种类型: 效益型指标、成本型指标和区间型指标. 从表 1 中可以看出,影响轨道交通线路建设时序的指标仅有效益型指标和成本型指标. 因各指标的量纲不同,需将原始决策矩阵进行规范化处理,本文采用 $[-1,1]$ 线性变换算子,具体作法是如下.

令 $z_j=\dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{ij},\quad j\in M$

(1) 若 C_j 为效益型指标,则

$$b_{ij}=\frac{x_{ij}-z_j}{\max\{\max\limits_j(x_{ij})-z_j,z_j-\min\limits_j(x_{ij})\}} \tag{2}$$

(2) 若 C_j 为成本型指标,则

$$b_{ij}=\frac{z_j-x_{ij}}{\max\{\max\limits_j(x_{ij})-z_j,z_j-\min\limits_j(x_{ij})\}} \tag{3}$$

标准化处理后的指标决策矩阵表示为

$$\boldsymbol{B}=(b_{ij})_{n\times m},\ i\in N,j\in M \tag{4}$$

在前景理论中,决策者在进行决策时,往往会根据某些参考点来衡量决策的收益和损失. 在参考点上,人们更重视预期与结果的差距而不是结果本身. 因此,参考点的选择直接影响到决策的结果. 借鉴 TOPSIS 方法的思想,本文以正理想方案和负理想方案作为参考点.

定义 2 正理想方案是假设影响轨道交通建设时序的指标都达到最优值时的建设时序方案; 负理想方案是假设影响轨道交通建设时序的指标都达到最差值时的建设时序方案,设 $b_j^+=\max\{b_{ij},i\in N\}$,$b_j^-=\min\{b_{ij},i\in N\}$,$j\in M$,则正负理想方案分别为

$$A^+=\{b_1^+,b_2^+,\cdots,b_m^+\} \tag{5}$$

$$A^-=\{b_1^-,b_2^-,\cdots,b_m^-\} \tag{6}$$

由灰色关联分析方法,城市轨道交通线路 A_i 与正负理想方 A^+ 和 A^- 关于指标 C_j 的关联系数分别为

$$\xi_{ij}^+=\frac{\min\limits_i\min\limits_j|b_{ij}-b_j^+|+\rho\max\limits_i\max\limits_j|b_{ij}-b_j^+|}{|b_{ij}-b_j^+|+\rho\max\limits_i\max\limits_j|b_{ij}-b_j^+|} \tag{7}$$

$$\xi_{ij}^-=\frac{\min\limits_i\min\limits_j|b_{ij}-b_j^-|+\rho\max\limits_i\max\limits_j|b_{ij}-b_j^-|}{|b_{ij}-b_j^-|+\rho\max\limits_i\max\limits_j|b_{ij}-b_j^-|} \tag{8}$$

式中 $\rho\in[0,1]$ 为分辨系数,一般 $\rho=0.5$.

则正负关联系数矩阵分别可表示为

$$\boldsymbol{\xi}^+=(\xi_{ij}^+)_{nm},\ i\in N,j\in M \tag{9}$$

$$\boldsymbol{\xi}^-=(\xi_{ij}^-)_{nm},\ i\in N,j\in M \tag{10}$$

3.2 方案的综合前景值

以正理想方案为参考点,则 $b_{ij}<b_j^+$,城市轨道交通线路 A_i 劣于正理想方案,对于决策者而言是面临损失的,此时决策者是追求风险的. 以负理想方案为参考点,则 $b_{ij}>b_j^-$,城市轨道交通线路 A_i 优于负理想方案,对于决策者而言是面临收益的,此时决策者是厌恶风险的.

根据 Tversky 等[13] 在累计前景理论中给出的价值函数,可得城市轨道交通线路 A_i 的各指标对应的前景效用价值函数

$$v(b_{ij})=\begin{cases}(1-\xi_{ij}^-)^{\alpha},\\ \quad\text{以负理想方案为参考点}\\ -\theta\ [-(\xi_{ij}^+-1)]^{\beta},\\ \quad\text{以正理想方案为参考点}\end{cases} \tag{11}$$

式中 参数 α 和 β 分别表示收益和损失区域价值幂函数的凹凸程度,$\alpha,\beta<1$ 表示敏感性递减,$\alpha=\beta=0.88$; 系数 θ 表示损失比收益更明显的特征,$\theta=2.25$.

定义 3 由式(11)得城市轨道交通线路 A_i 关于指标 C_j 的正前景值为 $v^+(b_{ij})=(1-\xi_{ij}^-)^{\alpha}$,记为 v_{ij}^+; 负前景值为 $v^-(b_{ij})=-\theta\ [-(\xi_{ij}^+-1)]^{\beta}$,记为 v_{ij}^-,则正负前景价值矩阵为

$$\boldsymbol{V}^+=(v_{ij}^+)_{nm},\quad i\in N,j\in M \tag{12}$$

$$\boldsymbol{V}^-=(v_{ij}^-)_{nm},\quad i\in N,j\in M \tag{13}$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

设决策者面临收益和损失时的前景权重函数分别为 $\pi^+(w_j)$ 和 $\pi^-(w_j)$，则城市轨道交通线路 A_i 的综合前景值为正、负前景值之和，即

$$V_i = \sum_{j=1}^{m} v_{ij}^{+}\pi^+(w_j) + \sum_{j=1}^{m} v_{ij}^{-}\pi^-(w_j) \quad (14)$$

根据文献[13]，

$$\pi^+(w_j) = \frac{w_j^{\gamma}}{[w_j^{\gamma} + (1-w_j)^{\gamma}]^{1/\gamma}},$$

$$\pi^-(w_j) = \frac{w_j^{\delta}}{[w_j^{\delta} + (1-w_j)^{\delta}]^{1/\delta}}$$

式中　$\gamma = 0.61, \delta = 0.69$.

3.3　建设时序排序标准

设城市轨道交通线路 A_i 的影响指标 C_j 权重向量 $w_j = (w_1, w_2, \cdots, w_m)$. 对于每条轨道交通线路 A_i 而言，其综合前景值越大则修建时序越靠前. 因此可建立优化模型，其目标函数为

$$\max \quad V = (V_1, V_2, \cdots, V_n) \quad (15)$$

由于各条轨道交通线路建设时序是公平竞争的，可得到优化模型

$$\max \quad V = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} v_{ij}^{+}\pi^+(w_j) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} v_{ij}^{-}\pi^-(w_j)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{m} w_j = 1,\ w_j \geqslant 0 \quad (16)$$

采用 Matlab 软件编程求解上述模型，可得到最优解 $w^* = (w_1^*, w_2^*, \cdots, w_m^*)$. 城市轨道交通线路 A_i 的最优综合前景值为

$$V_i^* = \sum_{j=1}^{m} v_{ij}^{+}\pi^+(w_j^*) + \sum_{j=1}^{m} v_{ij}^{-}\pi^-(w_j^*) \quad (17)$$

对每条轨道交通线路的最优综合前景值 $V_i(i = 1, 2, \cdots, n)$ 按大小进行排序，便可得到城市轨道交通线路的建设时序最优方案.

4　实例应用

西安轨道交通规划(第一版)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，在客流预测和专家分析的基础上获取各项指标和指标权重信息如表 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排序.

表 2　线路各项指标值

Table 2　Index values of rail transit lines

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
A_1	36.3	9.0	14 155 187	3.08	1.91	9.1	9.8	9.5	9
A_2	26.4	9.5	10 067 766	3.61	1.58	10.2	9.7	9.8	7.5
A_3	31.8	9.7	18 326 270	2.67	1.74	9.3	9.5	9.7	8.0
A_4	34.3	8.0	8 638 996	3.15	2.02	8.5	7.5	8.5	9.2
A_5	25.7	7.8	11 274 822	2.73	2.15	8.3	7.2	8.0	9.8
A_6	37.2	8.2	11 518 063	2.94	2.07	8.2	8.1	7.1	9.5
W	[0.05,0.15]	[0.10,0.20]	[0.10,0.15]	[0.10,0.20]	[0.10,0.15]	[0.10,0.15]	[0.10,0.15]	[0.10,0.15]	[0.10,0.12]

Step 1　跟据式(1) – 式(13)计算正负前景矩阵，结果为

$$\boldsymbol{V}^+ = \begin{bmatrix} 0.676 & 0.599 & 0.536 & 0.473 & 0.478 & 0.474 & 0.690 & 0.640 & 0.680 \\ 0.138 & 0.677 & 0.243 & 0.666 & 0.679 & 0.661 & 0.682 & 0.666 & 0.626 \\ 0.550 & 0.700 & 0.666 & 0 & 0.605 & 0.522 & 0.664 & 0.658 & 0.173 \\ 0.630 & 0.215 & 0 & 0.510 & 0.339 & 0.242 & 0.222 & 0.514 & 0.434 \\ 0 & 0 & 0.363 & 0.130 & 0 & 0.104 & 0 & 0.409 & 0.368 \\ 0.693 & 0.343 & 0.383 & 0.376 & 0.245 & 0 & 0.444 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{V}^- = \begin{bmatrix} -0.378 & -1.058 & -1.055 & -1.202 & -1.247 & -1.174 & 0 & -0.447 & 0 \\ -1.530 & -0.483 & -1.418 & 0 & 0 & 0 & -0.212 & 0 & -0.741 \\ -1.171 & 0 & 0 & -1.499 & -0.863 & -1.066 & -0.499 & -0.188 & -1.485 \\ -0.844 & -1.522 & -1.498 & -1.125 & -1.399 & -1.405 & -1.494 & -1.116 & -1.313 \\ -1.560 & -1.575 & -1.336 & -1.467 & -1.528 & -1.461 & -1.553 & -1.291 & -1.378 \\ 0 & -1.461 & -1.318 & -1.327 & -1.454 & -1.486 & -1.341 & -1.499 & -1.529 \end{bmatrix}$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Step 2 以各线路的综合前景值最大化为目标，建立优化模型

$$\max \quad V = \sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{9} v_{ij}^{+}\pi^{+}(w_j) + \sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{9} v_{ij}^{-}\pi^{-}(w_j)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0.05 \leqslant w_1 \leqslant 0.15, \quad 0.10 \leqslant w_2 \leqslant 0.20 \quad 0.10 \leqslant w_3 \leqslant 0.15 \\ 0.10 \leqslant w_4 \leqslant 0.20, \quad 0.10 \leqslant w_5 \leqslant 0.15 \quad 0.10 \leqslant w_6 \leqslant 0.15 \\ 0.10 \leqslant w_7 \leqslant 0.15, \quad 0.10 \leqslant w_8 \leqslant 0.15 \quad 0.10 \leqslant w_9 \leqslant 0.20 \\ \sum_{j=1}^{9} w_j = 1 \end{cases}$$

Step 3 求解上述模型，得到最优解

$$w^* = (0.100, 0.151, 0.103, 0.112, 0.105, 0.104, 0.102, 0.103, 0.120)$$

Step 4 将最优权重向量 w^* 代入

$$V_i^* = \sum_{j=1}^{9} v_{ij}^{+}\pi^{+}(w_j^*) + \sum_{j=1}^{9} v_{ij}^{-}\pi^{-}(w_j^*)$$

可得 $V_1^* = -0.169$，$V_2^* = 0.205$，$V_3^* = -0.323$，$V_4^* = -1.524$，$V_5^* = -2.115$，$V_6^* = -1.598$

Step 5 将 V_i^* 按从大到小的顺序排列，便可得到线路建设的最优排序方案

$$V_2^* > V_1^* > V_3^* > V_4^* > V_6^* > V_5^*$$

从以上排序可以看是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 号线于 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. 可以看出本文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.

5 研究结论

城市轨道交通线路建设时序是《城市轨道交通建设规划》中最重要的内容之一，合理的修建时序方案不仅可以为城市建设，城市交通政策提供决策依据，而且可以拉动城市经济增长，缓解城市交通压力. 本文探讨了城市轨道交通建设时序的决策方法，取得了以下结论.

(1) 构建了城市轨道交通线路建设时序影响因素指标体系. 该指标体系的构建根据可观测性原则初步筛选指标，通过相关性分析与主成分分析相结合的方法定量筛选指标，避免了指标间的信息重复，保证了筛选出的指标对结果有显著影响.

(2) 提出了基于累积前景理论的城市轨道交通线路建设时序决策方法. 该方法以规范化的决策矩阵得到正负理想方案作为参考点，依据累积前景理论和灰色关联分析确定了前景价值函数，以此构建城市轨道交通线路建设时序的综合前景值最大化的优化模型，通过求解该模型得出最优权向量，并最终确定出城市轨道交通线路建设时序的最优方案.

(3) 以西安市轨道交通线网为例，应用本文提出的方法进行建设时序排序. 案例应用结果表明，该方法可为城市轨道交通建设时序提供理论指导.

(4) 本文是在假定城市轨道交通线网方案确定，无线路处于建设中的情况下提出的城市轨道交通建设时序决策方法. 但城市轨道交通最终将成网络化发展，各线路之间将有交叉，已建成线路可能会影响后期线路的建设时序，这将是本文今后需要进一步研究的主要方向.

参考文献:

[1] 程斌. 轨道交通与城市交通可持续发展[J]. 中国铁道科学，2001，22(1)：108-112. [CHENG B. Sustainable development of transit communication and urban communication [J]. China Railway Science，2001，22(1)：108-112.]

[2] 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. [CHENG H，HE F H，LI J F. Methodology for time scheduling of short-term urban rail transit construction [J]. Urban Transport of China，2010，8(3)：13-16.]

[3] 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. [CHEN Q，XIE L，DONG J J. Study on decision system of city rail transportation lines construction [J].

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Urban Transport of China，2009，31(10)：51-53.]

[4] 陈元朵，徐建闽，郭京波. 基于“重要度—交通区位”的轨道交通建设项目时序确定方法研究[J]. 交通信息与安全，2010，28(3)：60-62. [CHEN Y D，XU J M，GUO J B. Scheduling of urban rail traffic construction items based on “node importance and traffic location”[J]. Transport Information and Safety，2010，28(3)：60-62.]

[5] 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. [HUANG R，LIANG Q H. Based on the nodes important degree theory of rail transit construction[J]. Urban Rapid Rail Transit，2012，25(3)：21-24.]

[6] 顾保南，等. 南京市快速轨道交通线网规划[R]. 上海：上海铁道大学，1998. [GU B N，et al. Nanjing rapid rail transit network planning[R]. Shanghai：Shanghai Railway University，1998.]

[7] 陈宽民，等. 西安市城市快速轨道交通线网规划[R]. 西安：长安大学，2005. [CHEN K M，et al. Planning for Xi’an urban rail transit network[R]. Xi’an：Chang’an University，2005.]

[8] 顾保南，方青青. 城市轨道交通路网规划的评价指标体系研究[J]. 城市轨道交通研究，2000(1)：24-27. [GU B N，FANG Q Q. A study on the evaluation index system of urban rail transit network plan[J]. Urban Mass Transit，2000(1)：24-27.]

[9] 陈旭梅，李凤军. 城市轨道交通线网方案综合评价指标体系研究[J]. 城市规划，2001，25(10)：61-64. [CHEN X M，LI F J. The studyonthe criterion system for comprehensive evaluation of the urban rail network[J]. City Planning Review，2001，25(10)：61-64.]

[10] 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(3)：129-133. [JI J L，LI F Z. A study on the synthetic evaluation index system of urban rail transit line network planning scheme [J]. Systems Engineering-theory & Practice，2004(3)：129-133.]

[11] 马超群，王玉萍，陈宽民. 基于灰色加权关联度的城市轨道线网方案评价[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2007，42(3)：38-39. [MA C Q，WANG Y P，CHEN K M. Comprehensive evaluation for urban rail transit network based on grey weight relation[J]. Journal of Chang’an University(Natural Science Edition)，2007，42(3)：38-39.]

[12] 迟国泰，曹婷婷，张昆. 基于相关主成分分析的人的全面发展评价指标体系构建[J]. 系统工程理论与实践，2012，32(1)：111-119. [CHI G T，CAO T T，ZHANG K. The establishmentof human all-around development evaluation indicators system based on correlation-principle component analysis[J]. 2012，32(1)：111-119.]

[13] Tversky A，Kahneman D. Advances in prospect theory：cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty，1992，5(4)：297-323.

(上接第 28 页)

[7] 周和平，晏克非，徐汝华，等. 基于遗传算法的公路网络设计的双层优化模型[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2005，33(7)：920-925. [ZHOU H P，YAN K F，XU R H，et al. Highway network design using bi-level programming model based on genetic algorithm[J]. Journal of Tongji University(Natural Science)，2005，33(7)：920-925.]

[8] 王炜，邓卫，杨琪，等. 公路网络规划建设与管理方法[M]. 北京：科技出版社，1997. [WANG W，DENG W，YANG Q，et al. Highway network planning，construction and management methods[M]. Beijing：Scientific and Technical Publishers，1997.]

[9] Cunha Claudio B，Silva Marcos Roberto. A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil[J]. European Journal of Operational Research，2007(179)：747-758.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net