

基于累积前景理论的城市公交线网灰关联优化

李晓伟^{1,2}, 陈红³, 周继彪³, 尹毫企³, 李志平⁴

(1. 西安建筑科技大学土木学院, 陕西 西安 710055; 2. 公路大型结构安全教育部工程中心, 陕西 西安 710064;
3. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 湖北省襄阳市公路管理局, 湖北 襄阳 441003)

摘要:在给出公交线网优化的目标函数和约束条件的基础上, 考虑决策者风险态度对公交线网优化决策的影响, 提出了一种基于累积前景理论的公交线网灰关联优化模型. 该模型通过 $[-1, 1]$ 线性变化将决策矩阵标准化, 应用 TOPSIS 法得到正负理想方案作为城市公交线网优化决策的参考点; 将正负理想方案和公交优化方案分别作为参考数列和被比较数列, 应用关联分析法构建了正负关联系数矩阵, 基于累积前景理论及其正负前景价值函数构建了正负前景价值矩阵和方案综合前景值最大化的非线性规划模型, 应用极值法求解模型得出最优权向量, 最终确定出最优方案. 西安市公交线网优化实例表明该方法能够较好地对线网进行优化调整, 更加符合人类的思维模式.

关键词:交通工程; 公交线网; 前景理论; 灰色关联; 决策

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)04-0495-08

城市公共交通系统是城市交通系统的重要组成部分, 随着我国城市化进程的加快, 机动车保有量的激增, 优先发展公共交通已成为解决我国城市交通问题的根本出路. 公交线网优化作为发展公共交通的关键问题, 设计科学合理的公交线网优化方法, 并基于这些方法构筑科学的优化模型对于布设高效率的公交线网起着决定性意义^[1]. 针对城市公交线网优化, 国内外学者进行了不少研究^[1-14], 一类是纯理论的研究, 即试图以单纯的定量模型解决公交网络优化问题, 如公交线网的非线性 0—1 规划模型和运用双层规划方法建立的模型; 另一类是以定性为主兼顾定量, 在优化过程中部分由定量模型解决, 如“逐步设计, 优化成网”方法和城市公交线网调整优化 PSO 算法等.

前景理论是由 Kahneman 等^[15]提出的, 是理性决策研究没有意识到的行为模式. Kahneman 等认为个体通过将概率转化为决策权重函数, 可对不同结果分派非概率权重, 成为经济学领域引用率最高的研究成果之一. 随后, 他们又提出了累积前景模型^[16], 该模型引入了 Choque 容量的概率, 较好地解决了强势占优以及多个结果的处理问题. 近年来, 前景理论得到国内学者的广泛关注和研究^[17-23], 在交通运输领域集中在出行者路径选择行为的研究, 如赵凛^[21]等基于前景理论, 在出行路径通行时间有限离散分布条件下, 对出行者的路径选择行为进行建模; 徐红利^[22]等通过对一份出行者路径选择的调查数据进行分析, 基于前景理论提出了通过具体效用度量对出行者路径选择行为进行分析的方法; 杨志勇^[23]等在前景理论的基本框架下, 研究了实时交通信息影响下的路径选择问题等.

在城市公交线网优化的实际工作中, 决策者往往出于政策、城市空间发展等诸多因素的考虑对于方案存在主观上的风险偏好, 而这种偏好会直接影响最终的决策结果, 因此有必要在公交线网优化决策中考虑决策者的风险心里因素; 而传统的优化方法则假设决策者是绝对理性, 且具有完全的信息和相同的喜好, 忽略了决策者对公交线网优化的风险态度. 鉴于此, 本文将累积前景理论与灰色关联分析法相结合, 在给出公交线网优化目标函数和约束条件的基础上, 考虑决策者的风险态度对公交线网优化的影响, 构建了基于累积前景理论的公交线网灰关联模型, 使其更符合人类的决策模式, 并以西安市的公

收稿日期: 2012-02-27 修改稿日期: 2012-07-04

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点资金项目资助(2006BAJ18B06); 交通部科技教育司资金项目资助(2008319812020); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(CHD2011ZY006)和长安大学基础研究支持计划专项基金资助

作者简介: 李晓伟(1985-), 男, 河南信阳人, 博士, 主要从事交通系统规划、设计.

交线网优化为例,说明了该方法的科学性和有效性.

1 公交线网优化的基本问题

1.1 优化原则

城市公交线网优化的核心内容就是在考虑社会经济发展与道路网布局背景下,基于公共交通需求时空分布特征,运用科学方法对城市公交线网进行系统研究,确定公交线路的合理布局,使城市公交线网的客流分配能符合客流的实际运行状况,方便顾客出行、提高公交企业效益、促进城市交通的可持续发展.因此在公交线网优化中,应该考虑以下原则:①方便顾客出行原则:线路的走向要与主要客流流向一致,为更多的乘客提供乘车服务.按最短距离布设线路,使全服务区乘客总出行时间最小,方便居民出行.②提高公交企业效益原则:使规划区域的线路网络覆盖率大、路线重复系数低,尽可能的利用城市已有道路,使线路上的客流分布均匀,充分发挥运载工具的运能.③考虑城市交通的可持续发展原则:公交线路系统的布设不仅符合当前城市客流发生和分布的客观规律,而且反映城市未来发展的交通变化,与城市总体规划相匹配,进而引导城市空间向合理方向发展.

1.2 目标函数

公交线网优化的目标为广义费用最小化和服务最大化,实现公交运营者与使用者期望的公交线网优化的低成本、高效益目标,使公交网络的社会成本最小化、社会效益最大化.考虑数据的可测性,本文在总结前人研究成果的基础上,结合西安市的实际情况,从空间维、时间维和价值维3方面选择乘客总出行时间、乘客直达率、用户费用和运营费用、线网覆盖率等4个指标建立公交线网优化目标函数.

(1)全体乘客总出行时间的函数表达式

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} T_{ij} \quad (1)$$

式中: T —公交总出行时间(min); a_{ij} —公交节点*i*到节点*j*的公交乘客量(人次); T_{ij} —公交节点*i*到节点*j*的公交出行总时间; n —交通小区数目.

(2)乘客直达率的函数表达式

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n K_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ij} \quad (2)$$

式中: V —乘客直达率; K_{ij} —线路起终点(*i, j*)之间直达乘客量,人·次; D_{ij} —交通小区*i*至*j*间的*O—D*量,人·次; n —通行公交车辆的道路网结点数; m —交通小区总数.

(3)用户费用和运营者费用的函数表达式

$$P = \sum_s \sum_t f_s T_s(x) + \lambda \sum_s \sum_t c_s B_s I_s \left(\sum_k x_s^k \right) \quad (3)$$

式中: P —用户费用和运营者费用之和; f_s —公交配对节点,到*t*的公交乘客量(人次); T_s —在一个给定的公交网络向量(X)情况下,公交配对节点*s*到*t*的公交出行总时间(h); λ —出行时间花费与公交网资金投入之间的权重; c_s —公交配对节点*s*到*t*单车成本; B_s —公交配对节点*s*到*t*所需要的车辆保有量; $I_s \left(\sum_k x_s^k \right)$ —公交配对节点*s*到*t*间线路建设费用.

(4)线网覆盖率的函数表达式

$$\partial = \sum_{i=1}^m l_{Ri} / \sum_{i=1}^m l_{Ai} \quad (4)$$

式中: ∂ —线网覆盖率; l_{Ri} —第*i*区公交路线长度; l_{Ai} —第*i*区道路网长度.

1.3 约束集

基于城市道路交通规划设计规范(GB 50220—95),结合城市公交系统规划的多种因素和西安市的实际情况,确定了公交线网优化的6个主要约束指标及其值域:(1)线路长度 $l, 5 \text{ km} \leq l \leq 15 \text{ km}$; (2)线路非直线系数 $\rho \leq 1.4$; (3)线路的客流量不均匀系数 $o, 0 \leq o \leq 1.5$; (4)乘客平均转换次数 $r, 0 \leq r \leq 2$; (5)线路负载效率系数 $\eta, 0.6 \leq \eta \leq 1$; (6)线路重叠系数 $e \leq 3$.

2 优化的原理与具体步骤

2.1 优化原理

前景理论^[15]主要从收益和损失的角度来分析问题,它认为人们对待收益和损失的态度是不对称的:面临收益时,往往趋向于“风险规避”;面临损失时,往往趋向于“风险追求”。收益和损失的评价依据是选定的参照点。人们在不确定性情况下对待风险的偏好,在概率上是非线性的关系,这个假设与公交线网优化决策原则相一致,因此,由它得到的结果更符合实际的公交线网优化决策行为。关联度分析^[24]是分析系统中各要素之间关联程度或相似程度的方法,其基本思想是依据关联度对系统排序,在灰色理论应用中最为广泛;由于城市公交线网系统是一个多因素,多层次的复杂的灰色系统,且系统中各优化目标并不相互独立,存在着样本量少、数据离散等情况,因此可以用灰色关联分析方法来判断方案与参考点的关联程度。

2.2 具体步骤

城市公交线网优化,设有 n 个待选的决策方案 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 优化目标为 $G = \{G_1, G_2, G_3, G_4\} = \{\text{总出行时间, 乘客直达率, 用户费用和运营者费用, 线网覆盖率}\}$. 另记 $i \in N, j \in M, N = \{1, 2, 3, \dots, n\}, M = \{1, 2, 3, 4\}$, 优化目标的权重为 $w = (w_1, w_2, w_3, w_4)$, $Y = (y_{ij})_{n \times 4}$ 表示方案集 A_i 对指标集 G_j 的决策矩阵:

$$Y = (y_{ij})_{n \times 4} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & y_{n3} & y_{n4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

步骤一:标准化决策矩阵

对四个优化目标进行标准化处理,基于优化目标计算方法和含义的分析,可确定总出行时间 G_1 、用户费用和运营者费用 G_3 为成本型指标;乘客直达率 G_2 、线网覆盖率 G_4 为效益型指标。

对成本型指标 G_j , 令:

$$r_{ij} = \frac{\max(y_j) - y_{ij}}{\max(y_j) - \min(y_j)} \quad \text{其中: } (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 3) \quad (6)$$

对效益型指标 G_j , 令:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_j)}{\max(y_j) - \min(y_j)} \quad \text{其中: } (i = 1, 2, \dots, n; j = 2, 4) \quad (7)$$

且: $\max(y_j) = \max\{y_{ij} / 1 < i < n\}$; $\min(y_j) = \min\{y_{ij} / 1 < i < n\}$.

则指标决策矩阵标准化处理后可表示为:

$$R = (r_{ij})_{n \times 4} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix} \quad (8)$$

步骤二:确定理想方案

根据前景理论,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. 本文借鉴 TOPSIS 方法的思想,以正负理想方案作为参考点. 具体确定方法参考文献 7.

正理想方案为: $A^+ = (r_1^+, r_2^+, r_3^+, r_4^+)$

负理想方案为: $A^- = (r_1^-, r_2^-, r_3^-, r_4^-)$

步骤三:计算正负关联系数矩阵

根据灰色关联分析方法^[24],将理想方案 A^+ 、负理想方案 A^- 作为参考数列,将方案 A_i 作为被比较数列,确定 A_i 与正负理想方案 A^+ 和 A^- 关于指标 G_j 的关联系数分别为下式(9)、(10):

$$\xi_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^+|}{|r_{ij} - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^+|} \quad (9)$$

$$\xi_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|}{|r_{ij} - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|} \quad (10)$$

式中: ρ 为分辨系数, $\rho \in [0,1]$,一般取 $\rho = 0.5$.则正负关联系数矩阵分别可表示为下式:

$$\xi^+ = \begin{bmatrix} \xi_{11}^+ & \xi_{12}^+ & \xi_{13}^+ & \xi_{14}^+ \\ \xi_{21}^+ & \xi_{22}^+ & \xi_{23}^+ & \xi_{24}^+ \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_{n1}^+ & \xi_{n2}^+ & \xi_{n3}^+ & \xi_{n4}^+ \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\xi^- = \begin{bmatrix} \xi_{11}^- & \xi_{12}^- & \xi_{13}^- & \xi_{14}^- \\ \xi_{21}^- & \xi_{22}^- & \xi_{23}^- & \xi_{24}^- \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_{n1}^- & \xi_{n2}^- & \xi_{n3}^- & \xi_{n4}^- \end{bmatrix} \quad (12)$$

步骤四:确定方案正负前景矩阵

根据王正新^[20]等人的研究成果,方案 A_i 关于指标 G_j 的正前景价值可量化为 $v_{ij}^+ = (1 - \xi_{ij}^-)^{0.88}$;负前景价值可量化为 $v_{ij}^- = -2.25 [-(\xi_{ij}^+ - 1)]^{0.88}$.

则正负前景矩阵可分别表示为:

$$V^+ = \begin{bmatrix} v_{11}^+ & v_{12}^+ & \dots & v_{14}^+ \\ v_{21}^+ & v_{22}^+ & \dots & v_{24}^+ \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1}^+ & v_{n2}^+ & \dots & v_{n4}^+ \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$V^- = \begin{bmatrix} v_{11}^- & v_{12}^- & \dots & v_{14}^- \\ v_{21}^- & v_{22}^- & \dots & v_{24}^- \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1}^- & v_{n2}^- & \dots & v_{n4}^- \end{bmatrix} \quad (14)$$

步骤五:构建综合前景模型并求解

对于每个方案 A_i 而言,其综合前景值总是越大越好^[15].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 $\pi^-(w_j)$,则方案 A_i 的综合前景值为正负前景值之和^[16],即: $V_i = \sum_{j=1}^m v_{ij}^+ \pi^+(w_j) +$

$$\sum_{j=1}^m v_{ij}^- \pi^-(w_j).$$

$$\text{其中: } \pi^+(w_j) = \frac{w_j^{\gamma^+}}{[w_j^{\gamma^+} + (1 - w_j)^{\gamma^+}]^{1/\gamma^+}}, \pi^-(w_j) = \frac{w_j^{\gamma^-}}{[w_j^{\gamma^-} + (1 - w_j)^{\gamma^-}]^{1/\gamma^-}}, \gamma^+ = 0.61, \gamma^- =$$

0.69.

因此可建立优化模型,其目标函数为: $\max V = (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5)$.由于各方案之间是公平竞争的,可得到优化模型 (M_1) :

$$\max V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}^+ \pi^+(w_j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}^- \pi^-(w_j) \quad s.t. \sum_{j=1}^m w_j = 1, w_j \geq 0, w \in H.$$

求解上述模型,可得到最优解 $w^* = (w_1^*, w_2^*, w_3^*, w_4^*, w_5^*)$.方案 A_i 的最优综合前景值 (M_2) 为:

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

对每个方案的最优综合前景值 $V_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 按大小进行排序,便可得到整个方案集的排序和最优方案.

3 实证分析

西安市公共交通运输规划拟定了五种方案,通过数据调查对其优化目标属性值进行计算(如表2所示),且各优化目标权重信息为 $\begin{cases} 0.1 \leq w_1 \leq 0.2; 0.25 \leq w_2 \leq 0.4; \\ 0.25 \leq w_3 \leq 0.4; 0.1 \leq w_4 \leq 0.2 \end{cases}$.考察5种方案的约束指标(如表3所示),与前文约束条件进行比较,可知各方案均满足城市公交线网优化的约束条件.

根据公式(5-14)对其进行优化比选.

STEP1:标准化决策矩阵

构建决策矩阵为:

$$Y = \begin{bmatrix} 52 & 52 & 473 & 47.3 \\ 101 & 67 & 1\,599 & 57.1 \\ 53 & 42 & 473 & 38.2 \\ 97 & 52.5 & 1\,313 & 55.4 \\ 66 & 37.5 & 803 & 33.0 \end{bmatrix}$$

标准化决策矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.491\,5 & 1 & 0.593\,4 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0.979\,6 & 0.152\,5 & 1 & 0.215\,8 \\ 0.081\,6 & 0.508\,5 & 0.254\,0 & 0.929\,4 \\ 0.714\,3 & 0 & 0.706\,9 & 0 \end{bmatrix}$$

STEP2:确定理想方案 $A^+ = (1, 1, 1, 1)$, $A^- = (0, 0, 0, 0)$

STEP3:计算正负关联系数矩阵

$$\zeta^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0.495\,8 & 1 & 0.551\,5 \\ 0.333\,3 & 1 & 0.333\,3 & 1 \\ 0.960\,8 & 0.371\,1 & 1 & 0.389\,3 \\ 0.352\,5 & 0.504\,3 & 0.401\,3 & 0.876\,4 \\ 0.636\,4 & 0.333\,3 & 0.630\,5 & 0.333\,3 \end{bmatrix}$$

$$\zeta^- = \begin{bmatrix} 0.333\,3 & 0.504\,3 & 0.333\,3 & 0.457\,3 \\ 1 & 0.333\,3 & 1 & 0.333\,3 \\ 0.337\,9 & 0.766\,2 & 0.333\,3 & 0.698\,6 \\ 0.859\,6 & 0.495\,8 & 0.663\,1 & 0.349\,8 \\ 0.411\,8 & 1 & 0.414\,3 & 1 \end{bmatrix}$$

STEP4:确定方案正负前景矩阵

$$V^+ = \begin{bmatrix} 0.699\,9 & 0.539\,3 & 0.699\,9 & 0.584\,0 \\ 0 & 0.699\,9 & 0 & 0.699\,9 \\ 0.695\,7 & 0.278\,3 & 0.699\,9 & 0.348\,1 \\ 0.177\,6 & 0.547\,4 & 0.383\,9 & 0.684\,7 \\ 0.626\,9 & 0 & 0.624\,6 & 0 \end{bmatrix}$$

$$V^- = \begin{bmatrix} 0 & -1.231\,6 & 0 & -1.111\,1 \\ -1.574\,8 & 0 & -1.574\,8 & 0 \\ -1.130\,1 & -1.496\,1 & 0 & -1.457\,8 \\ -1.534\,8 & -1.213\,4 & -1.432\,6 & -0.357\,5 \\ -0.923\,8 & -1.574\,8 & -0.937\,0 & -1.574\,8 \end{bmatrix}$$

STEP5:确定权重值及最优方案

以各方案的综合前景值最大化为目标,建立优化模型:

$$\begin{aligned} \max V &= \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 v_{ij}^+ \pi^+(w_j) + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 v_{ij}^- \pi^-(w_j) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} 0.1 \leq w_1 \leq 0.2, 0.25 \leq w_2 \leq 0.4, \\ 0.25 \leq w_3 \leq 0.4; 0.1 \leq w_4 \leq 0.2, \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

求解上述模型,得到最优解:

$$w^* = (0.2, 0.25, 0.4, 0.15)$$

将最优权重代入 M_2 得:

表2 各方案目标函数考察值

Tab. 2 The objective function values of programs

A_i	G_1	G_2	G_3	G_4
A_1	52	52	473	47.3
A_2	101	67	1 599	57.1
A_3	53	42	473	38.2
A_4	97	52.5	1 313	55.4
A_5	66	37.5	803	33.0

表3 约束条件考察值

Tab. 3 The values of constraint indexes

A_i	l	ρ	o	r	η	e
A_1	11.50	1.40	1.43	1.5	0.85	2.0
A_2	13.60	1.32	1.48	1.8	0.88	1.5
A_3	12.00	1.20	1.36	2.0	0.79	1.8
A_4	10.80	1.14	1.42	1.3	0.68	2.3
A_5	14.00	1.26	1.30	1.9	0.74	2.1

$$V_1^* = 0.128\ 5; V_2^* = -0.659\ 2; V_3^* = -0.188\ 2; V_4^* = -0.886\ 4; V_5^* = -1.013\ 4.$$

将 V_i^* 按从大到小的顺序排列,便可得到各方案的最优排序:

$$A_1 > A_3 > A_2 > A_4 > A_5$$

4 结束语

前景理论更适合研究不确定性情况下决策者的实际决策行为,为分析公交线网优化决策问题提供了一个更加有效的工具.本文在前人研究的基础上,结合相关的技术规范给出了公交线网优化优化的定量化目标函数,确定了约束条件;基于累积前景理论和灰色系统理论,构建了方案综合前景值最大化的优化模型.最后通过西安市公交线网优化实例说明了该方法的有效性与实用性.由于不同城市公交优化的侧重点不同,在实际应用中,如果确知投资者所持的风险态度,则可对模型中的优化指标及参数作适当调整,以便科学地描述不同城市不同心理特征对决策行为的影响.

参考文献 References

- [1] 刘好德. 公交线网优化设计理论及实现方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
LIU Hao-de. Research on bus transit routes network design theory and implement method[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [2] 胡启洲, 张卫华. 城市公交线网优化的灰色关联度决策模型[J]. 系统工程学报, 2007, 22(6): 607-612.
HU Qi-zhou, ZHANG Wei-hua. Grey related degree model for the optimization of urban public transport network [J]. Journal of Systems engineering, 2007, 22(6): 607-612.
- [3] 王志栋. 公交线网优化模型的建立[J]. 大连铁道学院学报, 1997, 12(4): 31-34.
WANG Zhi-dong. Mode setting-up of public traffic line network[J]. Journal of Dalian railway institute, 1997, 12(4): 31-34.
- [4] 韩 印, 李维斌, 李晓峰. 城市公交线网调整优化 PSO 算法[J]. 中国公路学报, 1997, 12(3): 100-105.
HAN Ying, LI Wei-bin, LI Xiao-feng. The algorithm PSO of adjustment and optimization for public traffic network [J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 12(3): 100-105.
- [5] QUENTIN K W, HONG K L. A mixed integer formulation for multiple-route transit network design[J]. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 2003, 12, 2(4): 299-308.
- [6] 吴世江, 史其信, 陆化普. 基于交通效率的城市公共道路网布局模型[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 117-120.
WU Shi-jiang, SHI Qi-xin, LU Hua-pu. Traffic efficiency-based urban public traffic network distribution model[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 117-120.
- [7] FAN W, MACHEMEHL R B. Optimal transit route network design problem with variable transit demand: genetic algorithm approach[J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132(1): 40-51.
- [8] 王 峰, 郭大忠, 李淑庆. 基于功效系数法的城市公交线网优化模型[J]. 公路交通技术, 2007, 12(5): 105-108.
WANG Feng, GUO Da-zhong, LI Shu-qing. Urban public traffic network optimization model based upon efficacy coefficient method[J]. Technology of Highway and Transport, 2007, 12(5): 105-108.
- [9] 胡启洲, 邓 卫, 周 媛. 公交线网优化的物元分析法[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33(1): 25-28.
HU Qi-zhou, DENG Wei, ZHOU Yuan. An extension method for the optimization of public traffic line network[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2009, 33(1): 25-28.
- [10] 林柏梁, 杨富社, 李 鹏. 基于出行费用最小化的公交网络优化模型[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 81-85.
LIN Bo-liang, YANG Fu-she, LI Pen. Designing optimal bus network for minimizing trip times of passenger flows [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(1): 81-85.
- [11] 宋一凡, 高自友. 拥挤条件下的公交平衡配流[J]. 中国公路学报, 1999, 12(4): 91-95.
SONG Yi-fan, GAO Zi-you. Transit equilibrium assignment under congestion [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(4): 91-95.
- [12] 王 炜. 实用公交线网规划方法研究[J]. 东南大学学报, 1990, 6(4): 81-88.
WANG Wei. A practical method of transit network planning [J]. Journal of Southeast University, 1990, 6(4): 81-88.
- [13] LEE Y, VUCHIV V R. Transit network design with variable demand[J]. Journal of Transportation Engineering,

- 2005, 131 (1): 1-10.
- [14] 胡启洲, 张卫华. 基于信息熵的公交线网优化方案余弦排序[J]. 系统工程理论与实践, 2008(12): 121-127.
HU Qi-zhou, ZHANG Wei-hua. Cosine prioritizing method for the optimization scheme of public traffic network based on information entropy[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2008 (12): 121-127.
- [15] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. *Economica*, 1979, 47 (2): 263-291.
- [16] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [17] 周 维, 王明哲. 基于前景理论的风险决策权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(2): 74-78.
ZHOU Wei, WANG Ming-zhe. Weighting risk and uncertainty based on prospect theory[J]. *Systems engineering Theory and Practice*, 2005, 25(2): 74-78.
- [18] 向钢华, 王永县. 基于累积前景理论的有限理性威慑模型[J]. 系统工程, 2006, 26(12): 108-110.
XIANG Gang-hua, WANG Yong-xian. The model of bounded rational deterrence based on cumulative prospect theory[J]. *Systems Engineering*, 2006, 26(12): 108-110.
- [19] 王坚强, 孙 腾, 陈晓红. 基于前景理论的信息不完全的模糊多准则决策方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(8): 1198-1202.
WANG Jian-qiang, SUN Teng, CHEN Xiao-hong. Multi-criteria fuzzy decision-making method based on prospect theory with incomplete information [J]. *Control and Decision*, 2009, 24(8): 1198-1202. (in Chinese)
- [20] 王正新, 党耀国, 裴玲玲, 等. 基于累积前景理论的多指标灰关联决策方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(2): 232-236.
WANG Zheng-xin, DANG Yao-guo, PEI Ling-ling. Multi-index grey relational decision-making based on cumulative prospect theory [J]. *Control and Decision*, 2010, 25(2): 232-236.
- [21] 赵 凇, 张星臣. 基于“前景理论”的路径选择行为建模及实例分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7), 82-86.
ZHAO Lin, ZHANG Xing-chen. A traveler route choice model based on prospect theory and case [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(7), 82-86.
- [22] 徐红利, 周 晶, 陈星光. 基于前景理论的路径选择行为规则分析与实证[J]. 交通运输系统工程与控制, 2007, 7 (6): 95-101.
XU Hong-li, ZHOU Jing, CHEN Xing-guang. Analysis and demonstration of the traveler's route choice behavior rule based on the prospect theory [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2007, 7(6): 95-101.
- [23] 杨志勇, 颜桂云. 基于前景理论的实时信息下路径选择模型研究[J]. 石家庄铁道学院学报: 自然科学版, 2008, 21 (4): 47-83.
YANG Zhi-yong, YAN Gui-yun. Model research of route choice under real-time information based on prospect theory [J]. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute: Natural Science*, 2008, 21(4): 47-83.
- [24] 杜 栋, 庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[D]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
DU Dong, PANG Qing-hua. Modern comprehensive evaluation methods and featured case [D]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

Grey relevancy optimization model of urban public transportation network based on cumulative prospect theory

LI Xiao-wei^{1,2}, CHEN Hong¹, ZHOU Ji-biao³, YIN Hao-qi³, LI Zhi-ping⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2

. Highway Large-scale Structure Safety Engineering Center of the Ministry of Education, Xi'an 710064 China;

3. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

4. Hubei province Xiangyang City Highway Management Bureau, Xiangyang 441003, China)

Abstract: Considering the risk attitude of decision makers towards the impact of public transportation network optimization

decision, public transportation network grey relevancy optimization model is put up on the basis of cumulative Prospect Theory after elaborating objective function and constraints of public transportation network. Firstly, the $[-1, 1]$ linear transformation operator is used to standardize the original decision-making information and get the positive and negative ideal schemes which are taken as the reference points of priority by the way of TOPSIS. Secondly, the positive and negative grey relevancy matrixes are established for taking the positive and negative ideal schemes as reference sequence and taking decision-making programs as compared sequence on the base of grey system theory. Thirdly, the positive and negative prospect value matrixes and the nonlinear planning model for the maximum of comprehensive prospect value are put up on the basis of cumulative prospect theory and its prospect value functions, the optimum weight vector is solved, and the best program is derived. Finally, the case of Xi'an shows that the method can help adjust the public transportation network better and the optimization solution is quite reasonable to meet the actual needs.

Key words: *traffic engineering; public transportation network; prospect theory; grey relevancy; decision-making*

Biography: LI Xiao-wei, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13991235157, E-mail: 185381729@qq.com.

(上接第 484 页)

- [5] 中国建筑科学研究院. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
CHINA Academy of Building Research. GB50010-2002 Code for design of concrete structures[S] Beijing: China architecture and building press, 2002.
- [6] 张 航. 埋入式钢柱脚节点单调加载非线性有限元研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
ZHANG Hang. Finite element analysis on the behavior of embedded column base joint under monotonic loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2011.
- [7] 中冶集团建筑研究总院. YB9082-2006 钢骨混凝土结构设计规程[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
CHINA Academy of Metallurgical Research. YB9082-2006 Technical specification of steel-reinforced concrete structures[S]. Beijing: Metallurgical industry press, 2007.

Nonlinear finite element analysis on the behavior of edge embedded column base joint based on rotational stiffness

SHI Yun¹, ZHANG Hang²

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. China Institute of Building Standard Design & Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the face-to-face contact and slip of steel and concrete, nonlinear finite element analysis was performed using 3D solid separate model to simulate the complete process and linear buckling under monotonic loading, geometric and material nonlinear was taken into account in the models. The results of analysis are compared with the test ones. Based on the proposed model, parametric analysis was carried out to study the effect of U-type reinforcement, embedded depth, the distribution of studs, in looking for the reasonable structural requirements.

Key words: *embedded column base; FEM; embedded depth; studs; rotational stiffness*

Biography: SHI Yun, Ph. D. Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 029-84218089, Email: shiyun0305@163.com.