

基于关联熵与复合物元的 城市快速路立体交叉方案评价模型

李 锐, 任 欢, 单春林, 邵红红

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 利用可拓学中的物元分析理论和信息论中的熵理论对城市快速路立体交叉方案进行了定量研究. 首先, 在分析影响立体交叉方案因素的基础上, 构建城市快速路立体交叉方案评价指标体系. 其次, 将信息熵、关联函数和复合物元有机结合起来, 建立了城市快速路立体交叉方案评价的复合物元模型. 再次, 利用关联熵确定评价指标权重系数的基础上, 计算复合物元. 最后应用实例验证了模型的有效性. 结果表明复合物元模型计算过程简单、实用性强, 能够简明确切地反映出城市快速路立体交叉方案的优劣.

关键词: 立体交叉; 评价模型; 关联熵; 复合物元

中图分类号: TU311.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)01-0038-06

城市快速路立体交叉是城市快速路网的重要组成部分, 它不仅起到连接城市快速路网和其他城市道路网的功能, 实现道路等级的过渡, 而且立体交叉设置合理与否也直接影响城市快速路网效益的发挥. 因此, 对于城市快速路立体交叉方案进行评价比选尤为重要. 目前, 对于立体交叉方案评价方法主要是利用灰色理论、模糊理论、层次分析法、投影寻踪、Vague 集、物元分析、遗传算法等进行定量分析^[1-10], 这些方法为立体交叉方案的科学评价开辟了新思路, 但也存在着需要进一步解决的问题. 例如应用物元分析理论对立体交叉方案进行评价, 需要将立体交叉方案按照预先规定的量值范围分为优、良、中、一般四个级别, 从而计算各设计方案对于各级别的隶属程度, 其中经典域物元矩阵建立的合理与否对评价结果有较大影响. 本文提出一种基于关联熵与复合物元的城市快速路立体交叉方案评价模型, 对多元数据量化决策的物元分析方法进行改进, 完整地反映城市快速路立体交叉方案的综合水平.

1 评价指标的确定

1.1 影响城市快速路立体交叉方案的主要因素

(1) 节点交通功能

满足交通功能是城市快速路立体交叉方案最基本的要求, 立体交叉的每条匝道、每个出入口、每条变速车道以及由此组成的立体交叉整体, 其设计通行能力与预测交通量应相互适应, 满足节点的交通功能.

(2) 行车速度

城市快速路及相交道路的行车速度符合各自道路功能要求, 但往往因为立体交叉的设置而受到影响. 每一条匝道的车速, 受其采用的平面指标、纵断面指标及平纵组合的不同而不同. 立体交叉中行车速度的高低, 不仅影响通行能力, 若设计不当, 甚至会引发交通事故.

(3) 主线纵坡及匝道最小半径

城市快速路立体交叉方案主要是主线及匝道的设计, 主线线形的确定尤为重要, 其对于主线设计车速、主线的纵坡度及通行能力均有一定的影响. 匝道的线形对于车辆的分合流影响较大, 匝道的设计车速及通行能力因匝道的设计而确定. 主线纵坡的大小应满足行驶车辆舒适、顺畅、安全行驶, 匝道平曲线半径的大小直接影响到行车的安全性, 可以用曲率来衡量, 平曲线半径越大、曲率越小、行车越安全.

(4) 社会效益

收稿日期: 2013-09-06

修改稿日期: 2014-02-16

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目 (11JK0895)

作者简介: 李锐(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要从事城市交通规划、总图运输优化理论等方面的研究. E-mail: lirui7010@163.com

社会效益包括环境效益和经济效益. 立体交叉工程对环境带来的不良影响,其实质是因修建立体交叉后对自然环境和生态平衡造成的损害,桥梁面积及建筑高度不但在很大程度上决定工程造价,而且对周围环境会造成一定的影响,高路堤、深路堑及大型桥跨结构,这些都很容易形成对城市景观效果的破坏,对自然环境也会产生不同程度的影响. 占地面积是影响立体交叉方案的重要因素之一,通常立体交叉匝道的布局在满足使用功能的情况下应尽可能紧凑,以减少占地.

1.2 评价指标的选取

城市快速路立体交叉方案评价需要考虑的因素很多,通过搜集国内外城市立体交叉建设、设计、管理及方案评价等方面的相关研究,共搜集评价指标60余项^[11],因此选择评价指标时,

应结合城市快速路立体交叉方案评价的特点,根据系统性原则、科学性原则、一致性原则、独立性原则、可比性原则、可测性原则、稳定性原则来建立合理的指标体系. 根据上述影响因素的分析,将评价指标分为功能指标、技术指标、效益指标等三类,选取通行能力、快速路设计速度、快速路纵坡、匝道设计速度、匝道最小半径、桥梁面积、占地面积、建筑高度等建立评价指标体系,如图1所示.

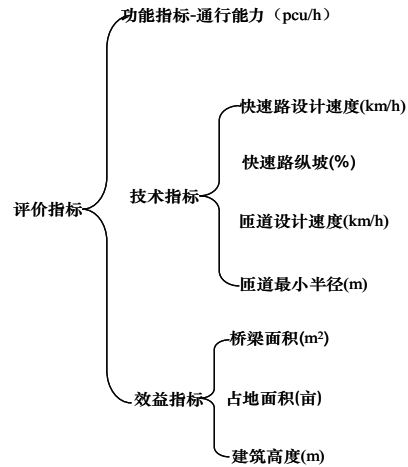


图1 城市快速路立体交叉方案评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of urban expressway interchange

2 基于复合物元分析的立体交叉评价模型

2.1 物元的概念

某一事物的名称、事物的特征、特征的量值组成物元,其表达形式为 $R=[M \ C \ X]$, M 表示事物的名称, C 表示事物具有的特征, X 表示与事物特征相对应的特征量值,如果特征量值具有不确定性,称为熵物元,如果一个事物 M 需用 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 及其相应的量值 x_1, x_2, \dots, x_n 来描述,则称它为 n 维物元

$$R = \begin{bmatrix} M & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & M & M \\ & c_n & x_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

对应模糊特征值的 n 维物元称为 n 维熵物元,如果熵物元中事物为方案,特征为信息熵,则称为复合物元.

2.2 构建立体交叉的复合物元

如果有 m 个立体交叉方案用 n 项指标及其对应的量值来描述,则称其为 m 个立体交叉方案的 n 维复合物元

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & K & M_m \\ C_1 & x_{11} & x_{21} & K & x_{m1} \\ C_2 & x_{12} & x_{22} & \Lambda & x_{m2} \\ M & M & M & O & M \\ C_n & x_{1n} & x_{2n} & K & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: M_i 为第 i 个立体交叉待评方案, C_j 为立体交叉方案的第 j 项评价指标, x_{ij} 为第 i 个待评方案对应于第 j 项指标的量值.

2.3 立体交叉复合物元的标准化处理

为了以下使用方便,需要进行标准化处理. 通行能力、快速路设计速度、快速路纵坡、匝道设计速度、匝道最小半径为效益型指标,记为 J^+ ,采用式(3)进行标准化处理. 桥梁面积、占地面积、建筑高度为成

本型指标, 记为 J^- , 采用式(4)进行标准化处理.

$$\delta_{ij} = \frac{(x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij})}{(\max_{1 \leq i \leq n} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij})}, (i=1,2,K,n; j \in J^+) \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \frac{(\max_{1 \leq i \leq n} x_{ij} - x_{ij})}{(\max_{1 \leq i \leq n} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq n} x_{ij})}, (i=1,2,K,n; j \in J^-) \quad (4)$$

经过标准化处理后的 m 个立体交叉的 n 维复合物元为

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & K & M_m \\ C_1 & \delta_{11} & \delta_{21} & K & \delta_{m1} \\ C_2 & \delta_{12} & \delta_{22} & L & \delta_{m2} \\ M & M & M & M & M \\ C_n & \delta_{1n} & \delta_{2n} & K & \delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4 立体交叉方案评价指标关联函数及权重系数的确定

评价指标权重的确定直接影响评价结果, 采用关联熵法来确定各指标的权重系数. 权重系数的确定首先要确定关联函数, 当 $y_j = \max_{1 \leq i \leq m} \delta_{ij}$, $j=1,2,\Lambda,n$, 理想参考数列为 $Y = \{y_1, y_2, \Lambda, y_n\}$, 则复合物元的第 j 项指标 C_j 具有的关联函数为

$$\varsigma_{ij} = \frac{\min_i \min_j |\delta_{ij} - y_j| + 0.5 \max_i \max_j |\delta_{ij} - y_j|}{|\delta_{ij} - y_j| + 0.5 \max_i \max_j |\delta_{ij} - y_j|} \quad (6)$$

立体交叉第 j 项指标 C_j 的熵为

$$F_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (7)$$

其中 $f_{ij} = \varsigma_{ij} / \sum_{i=1}^m \varsigma_{ij}$, $j=1,2,\Lambda,n$; $i=1,2,\Lambda,m$

由于(7)式中 $F_j \in [0,1]$, 令偏差度为 $k_j = 1 - F_j$, 则立体交叉第 j 项评价指标 C_j 的权重系数为

$$\omega_j = k_j / \sum_{j=1}^n k_j \quad (8)$$

由式(8)构造立体交叉指标权重的复合物元

$$R_{\omega j} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \Lambda & C_n \\ \omega_j & \omega_1 & \omega_2 & \Lambda & \omega_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.5 确定立体交叉的复合关联熵物元

M 个立体交叉方案的复合关联熵物元为

$$R_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \Lambda & M_i & M_m \\ H_i & H_1 & H_2 & \Lambda & H_i & H_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & \Lambda & M_i & \Lambda & M_m \\ H_i - \sum_{j=1}^n P(\omega_j \delta_{1j}) \ln P(\omega_j \delta_{1j}) & \Lambda & - \sum_{j=1}^n P(\omega_j \delta_{1j}) \ln P(\omega_j \delta_{1j}) & \Lambda & - \sum_{j=1}^n P(\omega_j \delta_{1j}) \ln P(\omega_j \delta_{1j}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $P(\omega_j \delta_{ij}) = \omega_j \delta_{ij} \cdot \left[\sum_{j=1}^n \omega_j \delta_{ij} \right]^{-1}$, $i=1,2,L,m$; $j=1,2,L,n$.

3 实例分析

上海市某立体交叉作为射线快速路与中环线转换的节点, 要为长距离、快速交通服务, 按由快速路系

统和主干路系统组成的“双系统”考虑，除满足中环线的快速通行外，应以解决中环线与主要相交道路间快速转换为主，兼顾次要相交道路与中环线的快速衔接，并满足相

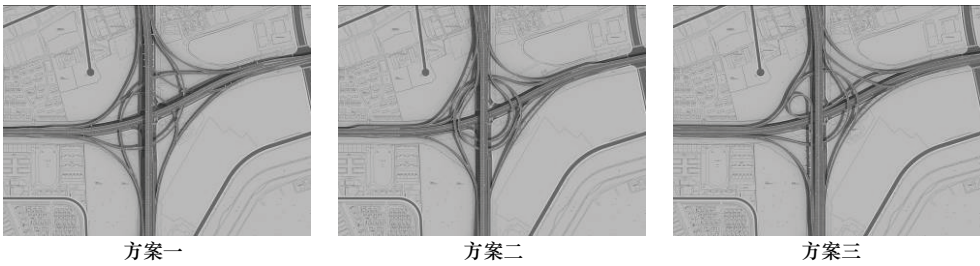


图 2 上海市某立体交叉方案
Fig.2 Urban expressway interchange in Shanghai

交主要与次要道路地面交叉口的各向互通，形成三个立体交叉设计方案，如图 2 所示. 方案一交通功能强，主要流向突出，次要功能亦通行能力大；方案二各流向功能均衡，均能满足交通需求，但主流向不突出，有绕行；方案三主次分明，主要流向顺畅直截，次要流向苜蓿叶匝道标准偏低，且为满足单出口设计，并未节省造价. 立体交叉方案各评价指标值如表 1 所示.

表 1 上海市某立体交叉方案评价指标取值
Tab.1 Evaluation index value of urban expressway interchange in Shanghai

评价指标		方案一	方案二	方案三
功能指标	通行能力 (pcu/h)	7 700	6 580	7 150
	快速路行驶速度 (km/h)	80	75	70
技术指标	快速路最大纵坡 (%)	4%	5%	2%
	匝道设计速度 (km/h)	50	40	35
	匝道最小半径 (m)	140	110	45
效益指标	桥梁面积 (m ²)	135 028	142 332	138 727
	占地面积 (亩)	316	271	320
	建筑高度 (m)	33	26	26

应用复合物元确定立体交叉方案的物元矩阵为

$$R_{\text{立交}} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 \\ c_1 & 7\,700 & 6\,580 & 7\,150 \\ c_2 & 80 & 75 & 70 \\ c_3 & 4\% & 5\% & 2\% \\ c_4 & 50 & 40 & 35 \\ c_5 & 140 & 110 & 45 \\ c_6 & 135\,028 & 142\,332 & 138\,727 \\ c_7 & 316 & 271 & 320 \\ c_8 & 33 & 26 & 26 \end{bmatrix}$$

上述评价指标的权重矩阵经公式(3)和(4)标准化处理后为

$$R_{\text{立交}} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 \\ c_1 & 1 & 0.33 & 0.50 \\ c_2 & 1 & 0.50 & 0.33 \\ c_3 & 0.60 & 1 & 0.33 \\ c_4 & 1 & 0.43 & 0.33 \\ c_5 & 1 & 0.61 & 0.33 \\ c_6 & 0.33 & 1 & 0.50 \\ c_7 & 0.86 & 0.33 & 1 \\ c_8 & 1 & 0.33 & 0.33 \end{bmatrix}$$

由公式(6)得关联函数矩阵为

$$R_{\text{立交}} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 \\ c_1 & 0.149 & 2.786 & 0.253 \\ c_2 & 0.153 & 0.143 & 5.096 \\ c_3 & 0.102 & 0.287 & 5.115 \\ c_4 & 0.153 & 0.095 & 5.081 \\ c_5 & 0.154 & 0.196 & 5.118 \\ c_6 & 1.492 & 0.279 & 0.252 \\ c_7 & 0.137 & 2.781 & 0.496 \\ c_8 & 0.152 & 2.839 & 5.061 \end{bmatrix}$$

由公式(7)和公式(8)得立体交叉指标权重的复合物元为

$$R_{\omega_i} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & c_7 & c_8 \\ \omega_i & 0.123 & 0.126 & 0.127 & 0.126 & 0.127 & 0.123 & 0.123 & 0.125 \end{bmatrix}$$

根据以上计算结果,并由公式(10)计算三个立体交叉方案的复合关联熵物元为

$$R_{\text{立交}} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ H & 1.938 & 1.536 & 1.043 \end{bmatrix}$$

经过计算得出三个立体交叉方案的优先排序关系为:方案一为最优方案,方案二次之,方案三比较差.方案一强调主方向,保证副方向,交通功能最强;设计标准高,匝道车速均大于 50 km,接口设计完善;与用地和环境协调,立交形态优美,线形流畅舒顺;而且造价较低,故推荐采用方案一.

4 结论

本文在分析城市快速路立体交叉方案设计影响因素的基础上,选取通行能力、快速路设计速度、快速路最大纵坡、匝道设计速度、匝道最小半径、桥梁面积、占地面积、建筑高度为评价指标,建立评价指标体系,采用关联熵法确定指标权重,运用物元分析理论,建立关联熵与复合物元评价模型,并举例验证了模型的有效性和可行性.

参考文献 References

- [1] 雒应, 叶亚丽. 立体交叉方案的多层次灰色理论评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(4): 45-48.
LUO Ying, YE Yali. Evaluation of Interchange Schemes by Multilevel Grey System Theory [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 45-48.
- [2] 于恩亚, 范云飞. 基于 WBS 与多层次模糊的立交方案综合评价[J]. 公路交通技术, 2007 (增): 14-17.
YU Enya, FAN Yunfei. Comprehensive Evaluation on Overpass Solution Based on WBS and Multiple Layer Fuzzy [J]. Technology of Highway and Transport, 2007 (S): 14-17
- [3] 肖恢翠, 常玉林, 桑大鹏. 基于安全因素的立交方案的 AHP 与 GST 评价[J]. 现代交通技术, 2008, 5(3): 72-75.
XIAO Huihui, CHANG Yulin, SANG Dapeng. Evaluation of the Interchange Schemes by AHP and GST Based on Security Factor [J]. Modern Transportation Technology, 2008, 5(3): 72-75.
- [4] 林雨, 张方方, 方守恩. 基于投影寻踪的互通立交方案综合评价方法[J]. 公路交通科技, 2008, 25(5): 136-139.
LIN Yu, ZHANG Fangfang, FANG Shouen. Comprehensive Evaluation Method for Interchange Design Scheme Based on Projection Pursuit [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(5): 136-139.
- [5] 曾祥纪, 蒋惠园. 基于三角模糊数的综合评价法在互通立交方案选取中的应用[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(3): 543-546.
ZENG Xiangji, JIANG Huiyuan. Application of Triangular Module in Fuzzy Synthetic Judgment on the Decision of Interchange Plan [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(3): 543-546.
- [6] 陈琨, 张翠东, 孙家骊. 基于 Vague 集的互通式立交方案综合评价方法[J]. 公路交通技术, 2008 (4): 125-127.
CHEN Kun, ZHANG Cuidong, SUN Jiasi. Synthetic Evaluation Method for Interchange Scheme Based on Vague Set [J]. Technology of Highway and Transport, 2008 (4): 125-127.
- [7] 王晓宁, 安实, 张德军, 等. 基于物元分析的立交方案综合评价方法[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33(2): 207-210.
WANG Xiaoning, AN Shi, ZHANG Dejun, et al. Interchange Project Synthesis Evaluation Method Based on the Matter element

- Analysis [J]. Journal of Wuhan University of Technology:Transportation Science& Engineering, 2009, 33(2): 207-210.
- [8] 项琴, 朱宏伟. 基于 Vague 集的立交群方案优化研究[J]. 公路工程, 2009, 34(6): 149-152.
XIANG Qin, ZHU Hongwei. Scheme Optimization Research on Interchange Group Based on Vague Set [J]. Highway Engineering, 2009, 34(6): 149-152.
- [9] 李飞, 赵倩倩, 李馨. 基于遗传层次综合评价的绥化东枢纽互通方案比选[J]. 公路工程, 2011, 36(4): 119-123.
LI Fei, ZHAO Qianqian, LI Xin. Based on the Genetic Level Comprehensive Evaluation of Sui Hua East Hub Exchange Scheme Comparison [J]. Highway Engineering, 2011, 36(4): 119-123.
- [10] 陈东波, 高德发, 马红平. 层次分析法(AHP)在立交方案评价中的应用[J]. 交通科技, 2013, 258:157-159.
CHEN Dongbo, GAO Defa, MA Hongping. Application of Analytical Hierarchy Process in Interchange Scheme Evaluation [J]. Transportation Science & Technology. 2013, 258:157-159.
- [11] 丁印成. 城市立交方案评价体系研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
DING Yincheng. Study of Urban Interchange Bridge Scheme Evaluation System [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2007.
- [12] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
CAI Wen. Matter Element Model & Application [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1994.
- [13] 李桥兴, 刘思峰. 一般位值公式及一般初等关联函数构造方法[J]. 系统工程, 2006, 24(6): 116-118.
LI Qiaoxing, LIU Sifeng. A Method to Construct the General Location Value and General Elementary Dependent Function [J]. Systems Engineering, 2006, 24(6): 116-118.
- [14] 周爱莲, 李旭宏, 毛海军. 基于模糊物元可拓的物流中心选址方案综合评价方法[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 111-115.
ZHOU Ailian, LI Xuhong, MAO Haijun. Synthesized Evaluation Method of Logistics Center Location Projects Based on Extension Fuzzy Matter-element [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 111-115.
- [15] 胡启洲, 陆化普, 蔚欣欣, 等. 基于关联熵与复合物元的公交系统综合测度模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(1): 186-192.
HU Qizhou, LU Huapu, YU Xinxin, et al. Compressive Measurement of Urban Public Traffic System Based on Relational Entropy and Complex Matter Element [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(1): 186-192.

Evaluation model of urban expressway interchange based on relational entropy and complex matter element

LI Rui, REN Huan, SHAN Chunlin, SHAO Honghong

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

Abstract: A new method based on matter element analysis theory and information entropy theory is presented to evaluate urban expressway interchange. First, evaluation index system of urban expressway interchange is established on the basis of influence factors. Secondly, information entropies, correlation functions and matter elements are combined to model urban expressway interchange. Thirdly, the model is solved on the basis of determining each index weigh by relational entropy. Finally, the model is tested by an example. The result shows that the model is both simple and practicable to reflect the advantage of the interchange scheme design.

Key words: interchange; evaluation model; relational entropy; complex matter element

(本文编辑: 吴海西)