DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250634

基于熵权-物元可拓模型的交叉口评价研究

牛　凯
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300074)

摘　要: 交叉口评价是提高交叉口通行效率、改善交叉口安全状态的基础和前提。为提高交叉口评价的科学性、准确性及客观性,引入可拓学理论,构建了基于熵权-物元可拓模型的交叉口评价方法。该方法选取饱和度、延误指数、排队长度、交通冲突指数、交叉口几何特征、交叉口设施配置作为评价指标,采用熵权法计算各指标权重,同时利用物元可拓的分析方法对交叉口进行了综合评价。研究结果表明,基于熵权-物元可拓模型的交叉口综合评价方法不仅可以评价交叉口的等级,而且能看出偏向该等级的程度,评价结果可为交叉口的改善设计提供数据支撑。

关键词: 交叉口评价;熵权法;可拓学
中图分类号: U491.1　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0064-05

Research on Intersection Evaluation Based on Entropy Weight-Matter-Element Extension Model

NIU Kai
(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: Intersection evaluation is the foundation and prerequisite for improving intersection traffic efficiency and enhancing intersection safety. To enhance the scientificity, accuracy and objectivity of intersection evaluation, the theory of extenics is introduced and the evaluation method for intersections based on the entropy weight-matter-element extension model is constructed. This method selects the saturation, delay index, queue length, traffic conflict index, intersection geometric features and intersection facility configuration as the evaluation indexes. The entropy weight method is used to calculate the weight of each index, and the matter-element extenics analysis method is employed to conduct a comprehensive evaluation of intersections. The research result indicates that the comprehensive evaluation method for intersections based on the entropy weight-matter-element extension model can not only evaluate the grade of intersections, but also indicate the degree of bias towards this grade. The evaluation results provide data support for the improvement design of intersections.

Keywords: intersection evaluation; entropy weight method; extenics

0　引　言

交叉口评价是完成交叉口整治类项目的一项基础工作,方法主要有单指标评价法[1-2]和综合评价法[3-7]。单指标评价法大多基于某一项指标(如交通冲突)对路口进行评价;综合评价法主要有层次分析法[8]、模糊综合评价法[9]、数据包络法[10]、灰色关联度法[11]等。

影响交叉口安全和效率的因素较多,既包含定量指标,也涉及定性指标。与其他方法相比,本文所用的熵权-物元可拓模型评价方法得到的评价结果更加客观。该方法利用熵权法对指标赋权,同时利用物元可拓相关理论对交叉口进行评价,评价结果可为交叉口整治类工程项目提供数据支撑。

1　评价指标的选取

交叉口的评价指标众多[12-13],按照主要特征可分为2类:一类是效率指标[14-15],如饱和度;另一类是安全性指标[16-26],如交通冲突。本文综合考虑交叉口的安全和效率,选取了饱和度、延误指数、排队长度、交通冲突指数、交叉口几何特征、交叉口设施配置[27]作为评价指标。交叉口评价指标见表1。

收稿日期:2025-06-20
作者简介:牛凯(1993—),男,硕士,工程师,从事交通设计工作。

表 1　交叉口评价指标

指标分类	评价指标	确定方法
效率指标	饱和度	交叉口饱和度是反映交通服务水平的重要指标之一,饱和度为交通量与通行能力之比
	延误指数	描述信控路口运行状态的综合评估指数。综合考虑路口的停车延误和停车次数形成路口延误指数,延误指数=停车延误+10×停车次数
	排队长度	根据航拍数据,利用车辆的坐标信息可确定排队长度
安全指标	交通冲突指数	对不同类型冲突加权求和得到
	交叉口几何特征	综合考虑交叉口的形式、视距、车道设置、渠化等因素通过专家打分计算得出
	交叉口设施配置	综合考虑标志标线、路面状况、信号灯设置及配时等因素通过专家打分计算得到

交叉口几何特征指标通过实测和专家打分进行　　分析计算得到,结果见表 2。

表 2　交叉口几何特征指标打分标准

影响因素		问题排序		
		严重问题(40~60 分)	一般问题(60~85 分)	不严重问题(85~100 分)
纵坡度		> 6%	3%~6%	< 3%
交叉角度		< 60°	60°~80°	80°~90°
视距		通视三角区有遮挡物,对视线有较大影响	通视三角区有小型遮挡物,对视线有一定影响	通视三角区无遮挡物
车道设置	车道宽度	L<2.75 m,L>4.5 m	2.75 m<L<3.25 m 3.75 m<L<4.5 m	3.25 m<L<3.75 m
	专用车道	左、右转交通量很大,无设置专用车道或专用车道设置很短	专用车道设置较为合理	专用车道设置很合理
	路肩	W<0.3 m	0.3 m<W<1 m	W>1 m
渠化		渠化与交通量不匹配	渠化与交通量较匹配	渠化合理

交叉口设施配置指标通过设计打分表进行分析　　计算得到,结果见表 3。

表 3　交叉口设施配置指标打分表

影响因素		问题排序		
		严重问题(40~60 分)	中等问题(60~85 分)	不严重问题(85~100 分)
信号灯	信号相位	信号相位设置不合理,存在很大延误	信号相位设置较合理,存在一定延误	信号相位设置合理
	可视性	信号灯模糊,无法识别状态	信号灯分辨状态较困难	信号灯能清晰分辨状态
	设置位置	不合理	较合理	合理
标志	可视性	标志牌被遮挡或夜间反光性差	标志牌未遮挡,夜间反光性一般	标志未遮挡,夜间反光性好
	信息量	标志信息量很大,难以理解	标志信息量较大,理解困难	标志信息量适中
标线	可视性	标线污秽,可视性差	标线变色,大部分可看清	标线可视性很好
路面	路面平整性	很差,车辆容易突然停止或减速	有少量车辆突然停止或减速现象	基本无车辆突然停止或减速现象
	路面抗滑性	抗滑性很差,对车速影响严重	抗滑性一般,对车速有一定影响	抗滑性良好,对车速基本无影响

2　基于熵权法确定评价指标权重

熵权法[28-29]来源于信息论。根据熵值可看出指标的离散程度,熵权法赋权的主要流程如下。

2.1　数据标准化

在评价指标的选择过程中,既存在一些正向的评价指标(指标越高结果越好),又存在一些负向指标(指标越高结果越差)。

对于正向指标,标准化方法的表达式为:

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{1}$$

式中:r_{ij}为第j个评价对象的第i项评价指标标准化后的数值;x_{ij}为第j个评价对象的第i项评价指标;$x_{\min}$为评价指标的最小值;$x_{\max}$为评价指标的最大值。

对于负向指标,标准化方法的表达式为:

$$r_{ij}=\frac{x_{\max}-x_{ij}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{2}$$

2.2　计算各个指标的信息熵

根据标准化后的指标,计算各个指标的信息熵,表达式为:

$$H_i=-\frac{1}{\ln(n)}\sum_{j=1}^{n}\frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}r_{ij}}\ln\left[\frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}r_{ij}}\right],i=1,2,\cdots,m \tag{3}$$

式中:H_i为各个指标的信息熵。

2.3　确定各个指标的权重

根据信息熵计算各个指标的权重,表达式为:

$$w_i=\frac{1-H_i}{\sum_{i=1}^{m}H_i},0<w_i<1,\ \sum_{i=1}^{m}w_i=1 \tag{4}$$

式中：w_i表示第i个指标的权重；m表示指标的个数。

3　基于物元可拓理论的交叉口综合评价

3.1　确定物元结构

将评价对象分解成n个特征，每个特征对应一个量值，构成n维的物元R[30-32]。

3.2　确定经典域和节域

假设交叉口有n个指标，分别为$C_1, C_2, \cdots, C_n$，其对应的经典域记为R_i，表达式为：

$$R_i = \begin{bmatrix} & C_1 & v_{i1} \\ N_i & C_2 & v_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & C_1 & [a_{i1}, b_{i1}] \\ N_i & C_2 & [a_{i2}, b_{i2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & [a_{in}, b_{in}] \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中：N_i表示对应的评价等级；C_1，C_2，$\cdots$，C_n表示评价指标；$v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{in}$表示评价指标在不同等级下对应数值的取值范围。

将经典域不同等级的数值做并集运算，得到的结果称之为节域物元矩阵，记为R_p，表达式为：

$$R_p = (P, C, V_p) = \begin{bmatrix} & C_1 & v_{P1} \\ P & C_2 & v_{P2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{Pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & C_1 & [a_{P1}, b_{P1}] \\ N_i & C_2 & [a_{P2}, b_{P2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & [a_{Pn}, b_{Pn}] \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：P为评价等级的集合；$v_{P1}, v_{P2}, \cdots, v_{Pn}$为对于所有评价等级的指标的取值范围，即节域。

3.3　构建待评价物元矩阵

将待评价交叉口的指标进行量化，可构成待评价物元矩阵，记为R_0，表达式为：

$$R_0 = (P_0, C, V) = \begin{bmatrix} & C_1 & v_1 \\ P_0 & C_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：P_0表示待评价物元；$v_1, v_2, \cdots, v_n$表示评价指标的实际取值。

3.4　计算关联系数$K_i(V_i)$

关联系数是用函数表达形式来表示的被评价单元与评价等级的关联程度，计算方法如下：

$$K_i(v_i) = \begin{cases} -\dfrac{P(v_i, v_{ij})}{|v_{ij}|} & v_i \in v_{ij} \\ \dfrac{P(v_i, v_{ij})}{P(v_i, v_{pj}) - P(v_i, v_{ij})} & v_i \notin v_{ij} \text{且} P(v_i, v_{ij}) \neq 0 \\ -P(v_i, v_{ij}) - 1 & v_i \notin v_{ij} \text{且} P(v_i, v_{ij}) = 0 \end{cases} \tag{8}$$

其中$|v_{ij}|$、$P(v_i, v_{ij})$、$P(v_i, v_{pj})$的取值分别为：

$$|v_{ij}| = |b_{ij} - a_{ij}| \tag{9}$$

$$P(v_i, v_{ij}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \quad (i = 1, 2, \cdots, n;\ j = 1, 2, \cdots, m) \tag{10}$$

$$P(v_i, v_{pj}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{pj} + b_{pj}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pj} - a_{pj}) \quad (j = 1, 2, \cdots, m) \tag{11}$$

上述式中：a_{ij}、b_{ij}分别为第j个评价指标、第i个评价区间的下、上限值；a_{pj}、b_{pj}分别为第j个评价指标所有取值区间的最小、最大值。

3.5　确定综合关联度$K_i(p)$

综合关联度表示评价指标与不同等级的相近程度，表达式为：

$$K_i(p) = \sum_{i=1}^{n} w_i k_i(v_i) \quad (j = 1, 2, \cdots, n) \tag{12}$$

式中：$K_i(p)$表示第i等级的关联度；w_i表示指标的权重。

若$K_j = \max K_j(p) > 0$，则交叉口的评价结果为等级j。反之对一切j，有$K_j(p) \leqslant 0$，则表明待评价物元并不在所分的等级之中，需要重新调整参数计算，从而得到最终的评价结果。

4　实例验证

以某十字信号交叉口为例，对上述模型进行验证。现状该路口3个方向通过压缩中分带的形式进行了展宽，仅方向3未展宽，车道宽度为3 m；交叉口的信号配时方案与交通量的匹配程度不佳，路面平整性及抗滑性较差，对车速有一定影响。现状路口的交通渠化见图1。

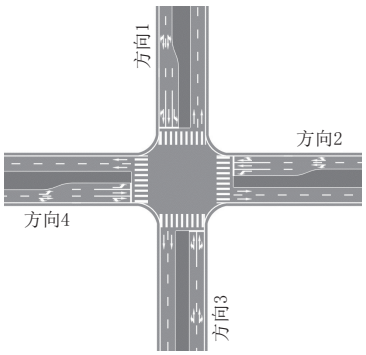

图1　交叉口渠化

4.1　交叉口指标量化

选取早高峰时段对路口的交通运行效率情况进行调研，调研结果见图2至图4。根据上述交通效率相关指标的计算方法，对交叉口的饱和度、延误指数

和排队长度进行采集和计算,得到的量化结果见表4。

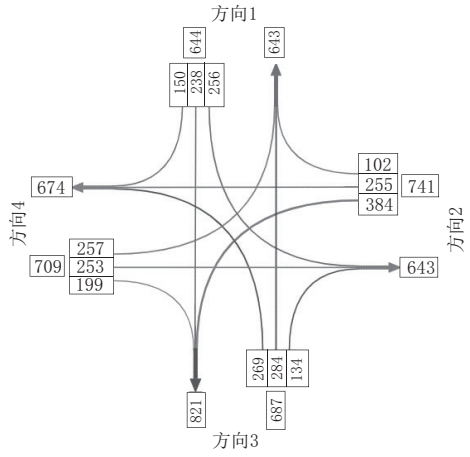

图2　交叉口交通量(单位:pcu/h)

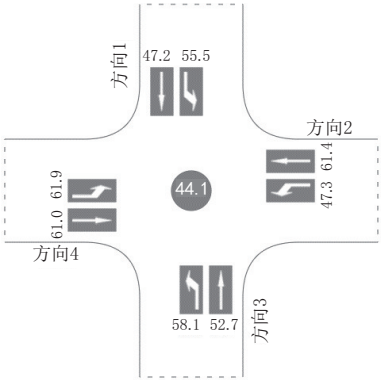

图3　交叉口的延误(单位:s/辆)

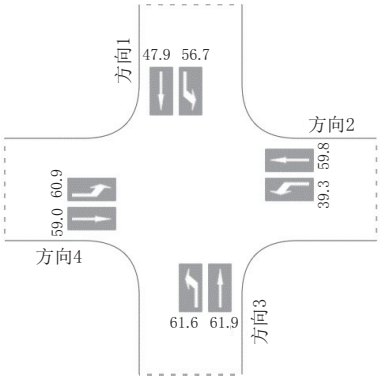

图4　交叉口的排队(单位:m)

表4　效率评价指标统计数据

饱和度	延误指数/(辆·s^{-1})	排队长度/m
0.56	44.1	74.5

该交叉口位置地势较平坦,纵坡介于3%~6%,交叉角度介于80°~90°,通视三角区内无障碍物,车道宽度为3 m,交通冲突指数为12,整体路口渠化存在优化空间。现状交叉口交通标线清晰、交通标志牌较为完善,可视性好,信号灯、电子警察配置齐全;但信号灯相位结构与交通量状态不匹配,路面平整性和抗滑性能较差。结合既有研究和专家打分结果,可得到如表5所示的安全评价指标统计表。

表5　安全评价指标统计数据

交通冲突指数/个	交通几何特征	交通设施配置
12	65分	65分

4.2　熵权法计算指标权重

以现状5个其他交叉口的数据为基础,对这5个交叉口的效率指标(饱和度、延误指数、排队长度)和安全指标(交通冲突指数、交通几何特征、交通设施配置)进行量化,得到初始矩阵X,其表达式为:

$$X=\begin{bmatrix}0.2 & 12.0 & 20.0 & 12.0 & 90.0 & 82.0\\ 0.4 & 20.0 & 25.0 & 12.0 & 80.0 & 95.0\\ 0.6 & 50.0 & 60.0 & 12.0 & 74.0 & 78.0\\ 0.8 & 88.0 & 93.0 & 24.0 & 60.0 & 80.0\\ 1.0 & 100 & 120 & 48.0 & 70.0 & 60.0\end{bmatrix} \tag{13}$$

对上述矩阵进行标准化处理,得到矩阵如下:

$$R=\begin{bmatrix}1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.63\\ 0.75 & 0.91 & 0.95 & 1.00 & 0.67 & 1.00\\ 0.50 & 0.57 & 0.60 & 1.00 & 0.47 & 0.51\\ 0.25 & 0.14 & 0.27 & 0.67 & 0.00 & 0.57\\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.33 & 0.00\end{bmatrix} \tag{14}$$

接下来,计算出每个指标的熵值H:

H=[0.564 5 0.420 6 0.439 4 0.166 5 0.1616 1 0.590 7]

计算不同指标的权重w:

w=[0.14 0.18 0.18 0.25 0.12 0.13]

4.3　交叉口评价

4.3.1　建立经典域、节域

根据上述方法,构建本交叉口的经典域和节域,见表6。

表6　经典域和节域数值表

R	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_P
C_1	[0,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,0.9)	[0.9,1)	[1,2]	[0,2]
C_2	[0,20)	[20,35)	[35,55)	[55,80)	[80,100]	[0,100]
C_3	[0,10)	[10,20)	[20,30)	[30,40)	[40,80]	[0,80]
C_4	[0,4)	[4,8)	[8,10)	[10,15)	[15,50]	[0,50]
C_5	[90,100)	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60]	[0,100]
C_6	[90,100)	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60]	[0,100]

4.3.2　构建待评价物元矩阵

依据本交叉口各个评价指标的量化值,构建待评价物元矩阵R_0:

$$R_0=\begin{bmatrix} & C_1 & 0.56\\ & C_2 & 44.1\\ N_0 & C_3 & 74.5\\ & C_4 & 12\\ & C_5 & 65\\ & C_6 & 65\end{bmatrix} \tag{15}$$

4.3.3　计算关联系数

结合经典域、节域、待评价物元矩阵和关联系数的计算公式，可获得关联系数，见表7。

表7　关联系数表

关联系数	权重	优秀	良好	中等	一般	较差
$K_1(C_1)$	0.14	0.067	−0.067	−0.300	−0.370	−0.440
$K_2(C_2)$	0.18	−0.353	−0.171	0.455	−0.198	−0.449
$K_3(C_3)$	0.18	−0.921	−0.908	−0.890	−0.863	0.138
$K_4(C_4)$	0.25	−0.400	−0.250	−0.143	0.500	−0.200
$K_5(C_5)$	0.12	−0.417	−0.300	−0.125	0.500	−0.125
$K_6(C_6)$	0.13	−0.417	−0.300	−0.125	0.500	−0.125
汇总	1	−0.424	−0.341	−0.187	0.007	−0.198

评价结果K可以用如下矩阵表示：

$$K\begin{Bmatrix}\text{优秀} & -0.424\\ \text{良好} & -0.341\\ \text{中等} & -0.187\\ \text{一般} & 0.007\\ \text{较差} & -0.198\end{Bmatrix} \tag{16}$$

根据物元可拓理论可知，K的取值越大，代表评价结果偏向该评价等级的程度越大。由于$\max K = K_4 = 0.007 > 0$，所以该交叉口的评价等级结果为“一般”。该评价结果受交叉口交通几何特征、交通设施配置2个指标的影响较大，主要原因为交叉口渠化仍存在优化空间，信号灯相位结构与交通量状态不匹配，路面平整性及抗滑性能较差。后续应对方向3进口道重新渠化，并优化信号配时方案，提高道路的平整性和抗滑性，从而提高交叉口的评价等级。

5　结　语

（1）运用物元可拓学理论对交叉口的整体状态进行评价，面对交叉口的评价指标多而杂的问题，采用熵权法来确定各指标的权重，克服了传统指标赋权的主观性，使赋权结果更科学。

（2）基于熵权-物元可拓模型的交叉口综合评价方法相对于其他方法而言，不仅可以评价交叉口的等级，而且能看出偏向该等级的程度，评价结果更加科学、客观、准确，可为后续交叉口的改善设计提供数据和理论支撑。

参考文献：

[1] 陈礼美，杨涵．基于交通冲突的十字交叉口安全水平评价[J]．汽车实用技术，2025，50(2)：151-156.

[2] 杨紫龙，钱勇生，曾俊伟，等．基于交通冲突技术的无信号控制T型交叉口安全评价[J]．青海交通科技，2024，36(5)：22-26.

[3] 梁春岩，曹胜月．信号交叉口人行横道服务水平多指标综合评价[J]．山东交通科技，2024(6)：131-133；136.

[4] 朱兴琳．基于不确定性理论的城市道路交叉口服务水平综合评价[J]．公路工程，2014，39(1)：116-120；149.

[5] 柴桦．基于深度学习的城市路网交叉口交通状态评价及预测[D]．贵阳：贵州大学，2024.

[6] 施继红．城市道路平面交叉口交通污染分析及综合评价[D]．长春：吉林大学，2012.

[7] 蒋欢昕，王涛，程一一，等．基于多指标融合的单交叉口运行状态实时评价方法[J]．交通信息与安全，2020，38(4)：84-94；147.

[8] 李应南，陈向科．基于层次分析法和专家打分法的交叉口交通安全评价研究[J]．中华民居(下旬刊)，2014(5)：245-248.

[9] 李小静，牟海波，刘立舰，等．模糊综合评判法在城市交叉口综合质量评价中的应用[J]．世界科技研究与发展，2012，34(3)：382-386.

[10] 徐建闽，柳坤．基于数据包络分析的交叉口信号控制效率评价方法[J]．重庆交通大学学报(自然科学版)，2021，40(11)：47-52.

[11] 程勋，郭欣．基于灰色关联度理论对道路通行能力影响因素的分析[J]．城市道桥与防洪，2021(7)：238-240；24.

[12] 周沛，熊文华．交叉口信号控制评价指标体系[J]．公路交通技术，2020，36(1)：133-139.

[13] 单昕昀．基于实时数据的信号交叉口评价指标模型优化研究——基于上海市浦东世纪公园周边区域的实证研究[J]．交通与港航，2024，11(5)：70-75.

[14] 王金鑫，钟欣，李沁远．交叉口交通信号控制效果的量化评价方法研究[J]．湖南交通科技，2024，50(3)：182-185；192.

[15] 吐尔逊·买买提，曲古拉·图马尔拜，马洁，等．基于数据驱动的交叉口通行效率评价[J]．科学技术与工程，2023，23(34)：14857-14864.

[16] 徐道祥．基于交通冲突理论的城市道路交叉口评价与优化[D]．大连：大连交通大学，2023.

[17] 修桂红．车联网环境下信号控制交叉口评价指标研究[D]．长春：吉林大学，2015.

[18] 刘云，温旭丽，马香．城市道路交叉口安全评价指标体系构建与实证研究[J]．公路交通科技(应用技术版)，2020，16(1)：361-364.

[19] 黄小芳．基于交通冲突率的常规交叉口交通安全评价与优化[J]．交通科技，2023(5)：119-123.

[20] 宋卓康．基于机非冲突的信号交叉口交通安全评价[D]．长春：吉林大学，2023.

[21] 王晓玉，李璇，寿任祯，等．国省道无信号控制交叉口安全性评价方法研究[J]．公路与汽运，2024，40(5)：37-42；48.

[22] 王肖凯．信控交叉口右转机动车与非机动车交通冲突预测与安全评价[D]．郑州：华北水利水电大学，2024.

[23] 王慧玲，姜明阳．基于贝叶斯理论的交叉口安全评价研究[J]．交通工程，2024，24(2)：82-89.

[24] 徐玥莹．车道视角下城市信号交叉口风险评价与预测研究[D]．西安：长安大学，2024.

[25] 汪勇杰，徐玥莹，苏倩，等．基于贝叶斯推理与XGBoost的城市交叉口车道风险综合评价模型[J]．交通信息与安全，2024，42(4)：12-20.

[26] 王子琦，张存保，霍礼辉，等．基于空间网格的道路交叉口交通安全评价方法研究[J]．武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2025，49(1)：203-209.

[27] 朱胜雪，陆键．公路平面交叉口安全评价指标及方法[J]．交通运输工程与信息学报，2011，9(3)：26-30.

（下转第79页）