

基于云模型的互通优化方案综合评价

李珍贵

(湖南省长沙市城市建设科学研究院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 为评价互通优化方案的科学性和合理性,建立序关系—云模型综合评价模型,先分析互通立交的影响因素和相关规范,提出互通立交评价指标和分级体系,然后结合序关系法确定指标权重,构造云模型正向发生器确定各二级指标的确定度向量,根据最大隶属度原则确定其评价等级;以长沙市云栖路沿线区域互通为例开展案例分析,结果表明该评价方法可解决综合评价中的模糊性和不确定性问题,可为互通优化方案对比、互通改造措施实施提供理论依据和决策参考。

关键词: 城市交通;互通立交;序关系;云模型;服务等级;综合评价

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)03-0033-05

现有互通优化评价研究主要针对城市单个立体交叉开展多指标综合评价,如陈大伟等从决策者和使用者角度建立双层规划模型,分析高速公路立交规划布局形式;沈强儒等通过交通仿真获得互通式立交区域的最小间距,进行等级划分,运用灰色聚类理论进行综合评价;为克服评价指标主观权重的问题,林雨等采用投影追踪算法获取评价指标的客观权重,构建综合评价指数对多种互通方案进行评价。而对互通群优化评价的研究较少。该文研究道路沿线多个互通立交的综合优化,实现互通系统效率的最大化。合理有效的评价方法对互通优化方案确定起到至关重要的作用。评价方法的关键在于各指标权重的确定,而传统评价方法如价值函数法、层次分析法、模糊综合评价法及神经网络法等确定权重的过程中都存在一定的主观依赖性 or 需要大量训练样本,降低了评价结果的可信度和实用性。为此,李德毅院士在概率论和模糊数学的基础上提出云模型,该模型将模糊性和随机性有机结合,可实现定性和定量的相互转换,保留原问题的随机性和模糊性。

由于评价系统的非线性和复杂性,评价过程通常存在以下问题:1) 互通优化评价通常要考虑多个评价指标的综合影响,假设对于某个互通需综合考虑 $a+b$ 种评价指标的影响,根据实际观测数据,其中 a 种评价指标计算值属于 I 级,剩下的 b 种计算指标属于 III 级,则该互通的具体划分级别难以准确衡量;2) 对于某一评价指标,仅以其数值为阈值划分指标等级不合理,如对某评价指标 U ,实际计算数值 U_1 为 3 km, U_2 为 3.1 km,二者差别很小,可能是由观测、计算误差或四舍五入造成的,而评价中可能

划分为两个不同的等级。互通优化综合评价过程不可避免地存在模糊性和随机性,而已有评价方法研究中并没有体现随机性,导致评价结果与实际存在一定偏差。为此,该文考虑评价指标的可靠度要求、评价的主观性要求及评价过程中的模糊性和随机性,构成定性与定量之间的映射,采用序关系—云模型法进行互通优化评价。

1 评价云模型

1.1 云概念

云滴是云模型的基本单元,假设 U 表示论域, C 是 U 上的定性概念,对于 $\forall x \in U$, x 相对于 C 的隶属度 $\mu(x)$ 是一个具有稳定倾向的随机数,则 $\mu(x)$ 在 U 上的分布成为云滴。大量的云滴组成云,云的整体形状反映事物的整体特性。

1.2 云产生模型

云模型是李德毅院士提出的一种定性知识描述和定性概念与其定量数值表示之间的不确定性转换模型,云的数字特征主要有期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e (熵的熵) 等。其中: E_x 表示云滴在论域空间分布的期望; E_n 表示不确定程度,由离散程度和模糊程度共同决定,在一定程度上解释模糊性和随机性的关联性; H_e 用来度量熵的不确定性,即熵的熵,反映云滴的离散程度。上述 3 个数字特征构成云数据特征向量 (E_x, E_n, H_e) , 能实现定量和定性之间的互相映射。

云可按下述算法产生:1) 产生一个均值为 E_n 、标准差为 H_e 的正态随机数 E'_n ;2) 产生一个均值为 c 、标准差为 E'_n 的正态随机数 x ;3) 令 x 为定性

概念的一次具体量化,称为云滴,按式(1)计算该云滴 x 的 y 值, y 为 x 属于该定性概念的隶属度,则 $\{x, y\}$ 反映一次定性、定量的转换;4) 重复步骤 1~3,直到产生 N 个云滴。

$$y = e^{-(x-E_x)^2/[2(E'_x)^2]} \quad (1)$$

2 基于云模型的互通优化综合评价

2.1 评价流程(见图 1)

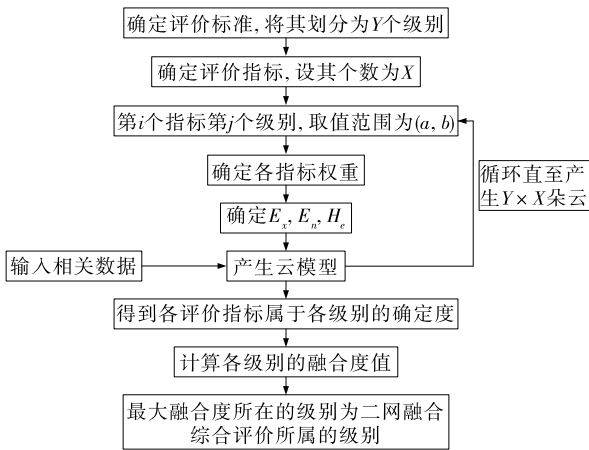


图 1 基于云模型法的互通优化综合评价流程

2.2 评价指标体系

根据城市交通运行规范,以出入口畅通为导向,在分析长沙市交通状况的基础上,结合长沙市互通优化治理经验,按照建立评价指标的可行性原则、实用性原则和专家意见,选取出入口平均间距 U_1 、出入口服务范围内干路网密度 U_2 、出入口衔接路网等级指数 U_3 、出入口平均服务范围 U_4 、出入口服务范围面积重合率 U_5 、出口负荷非均衡度 U_6 、 $U_7 = \{\text{入口负荷非均衡度}\}$ 作为互通优化方案评价指标。

2.3 基于序关系的权重系数确定方法

序关系法是先对评价指标进行定性排序,再对相邻指标进行重要性比较的理性判断,最后进行定量计算的主观赋权法。

(1) 确定指标的序关系。专家对一系列指标 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_{n-1}, U_n$, 按照重要程度从高到低排列,记为 $U_1^* > U_2^* > U_3^* > \dots > U_{n-1}^* > U_n^*$, 其中 $U_j^* > U_i^*$ 表示指标 j 在重要性上不劣于指标 i , 即指标 j 在重要性上优于或等于指标 i 。

(2) 相邻指标重要程度赋值。用 r_k 表示相邻两指标 U_{i-1}^* 和 U_i^* 之间的相对重要程度,按式(2)计算。权重 ω_i 在计算前是未知的,而 r_k 可通过专家对两两指标间的重要程度评价打分获得。指标的

相对重要程度 r_k 的赋值见表 1。根据建立的互通优化指标体系,选择不同专业背景的专家 6 名,其中交通领域专家 2 名(专家 1、专家 2)、城市规划专家 2 名(专家 3、专家 4)、道路工程专家 2 名(专家 5、专家 6),按照层次分析法的要求对各指标的重要性进行打分。

$$r_k = \omega_{i-1} / \omega_i \quad (2)$$

式中: ω_i 、 ω_{i-1} 分别为第 i 、 $i-1$ 项指标的权重。

表 1 相邻指标相对重要程度 r_k 的赋值

| r_k | 说明 |
|-------|---------------------------------|
| 1.0 | 指标 U_{k-1} 与指标 U_k 具有同等的重要性 |
| 1.1 | 介于同等的重要性和稍微重要之间 |
| 1.2 | 指标 U_{k-1} 比指标 U_k 稍微重要 |
| 1.3 | 介于稍微重要和比较重要之间 |
| 1.4 | 指标 U_{k-1} 比指标 U_k 比较重要 |
| 1.5 | 介于比较重要和非常重要之间 |
| 1.6 | 指标 U_{k-1} 比指标 U_k 非常重要 |
| 1.7 | 介于非常重要和极端重要之间 |
| 1.8 | 指标 U_{k-1} 比指标 U_k 极端重要 |

(3) 按式(3)计算各指标权重 ω_n , 其余指标 U_i^* ($i=1, 2, \dots, n-1$) 的权重可通过式(4)逐级推出。根据上述公式计算出的城市互通立交评价指标的权重见表 2。

$$\omega_n = \left[1 + \sum_{k=2}^n \left(\prod_{i=k}^n r_i \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\omega_{k-1} = r_k \omega_k \quad (4)$$

表 2 城市互通立交评价指标的权重

| 一级指标 | 权重 | 二级指标 | 权重 |
|-------------|------|--------------------|------|
| 区域出入口几何条件 A | 0.40 | 出入口平均间距 U_1 | 0.15 |
| | | 服务范围内干路网密度 U_2 | 0.12 |
| | | 出入口衔接路网等级指数 U_3 | 0.13 |
| 区域出入口服务范围 B | 0.33 | 出入口平均服务范围 U_4 | 0.17 |
| | | 出入口服务范围面积重合率 U_5 | 0.16 |
| 区域出入口非均衡度 C | 0.27 | 出口负荷非均衡度 U_6 | 0.13 |
| | | 入口负荷非均衡度 U_7 | 0.14 |

2.4 基于服务质量的评价等级划分

依据互通出入口实际调查数据,将互通立交服务等级分为很好(I级)、好(II级)、一般(III级)、差(IV级)和很差(V级),各指标的分级区间见表 3。

2.5 云模型数字特征的计算

对于出入口平均间距、出入口平均服务范围、出入口服务范围面积重合率等变量,其隶属等级都具

表 3 互通立交出入口评价指标的分级

| 分级 | 出入口 平均间距/km | 出入口平均 服务范围/km ² | 出入口服务范围 面积重合率/% | 出入口负荷 非均衡度 | 服务范围内干路网 密度/(km·km ⁻²) | 出入口衔接 路网等级指数 |
|-----|----------------|-------------------------------|--------------------|---------------|---------------------------------------|-----------------|
| I | 5 | 45 | 40 | 0~0.08 | 2.5 | 0.5 |
| II | 3~4,5~6 | 25~45,45~55 | 30~40,40~50 | 0.08~0.12 | 2~2.5,2.5~3 | 0.45~0.5 |
| III | 2~3,6~7 | 15~25,55~65 | 20~30,50~60 | 0.12~0.15 | 1.5~2,3~3.5 | 0.4~0.45 |
| IV | 1~2,7~8 | 10~15,65~75 | 10~20,60~70 | 0.15~0.18 | 1~1.5,3.5~4 | 0.35~0.4 |
| V | 0~1,>8 | 0~10,>75 | 0~10,>70 | 0.18~0.21 | 0.5~1,4~4.5 | 0.25~0.35 |

有上下边界,特征形如 $D[D_{\min}, D_{\max}]$, 其云数字特征按下式计算:

$$\begin{cases} E_{xij} = (D_{ij\min} + D_{ij\max})/2 \\ E_{nij} = (D_{ij\max} - D_{ij\min})/6 \\ H_e = c \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_{xij} 、 E_{nij} 分别为第 i 项指标第 j 个等级的期望、熵; $D_{ij\min}$ 、 $D_{ij\max}$ 分别为第 i 项指标第 j 个等级的下界和上界; H_e 为超熵; c 为常数,实际操作中可根据变量的模糊度进行调整,一般取 0.01 或 0.02。

2.6 基于正向云触发机制的确定度计算方法

以 E_n 为期望,生成以 H_e^2 为方差的正态随机数 E'_n ;以 E_x 为期望,生成以 E'^2_n 为方差的正态随机数 x 。对于论域 U 中的每个 u_{ij} ,都有:

$$u(x_{ij}) = \exp[-(x_{ij} - E_{xij})^2 / (2E_{nij}^2)] \quad (6)$$

以出入口平均间距为例,5 个评价等级隶属于 5 个云模型,其中隶属于等级 I 的数字特征为(0,1.5,0.01),生成标准正态云的步骤为:1) 生成以 0 为期望、0.01² 为方差的正态随机数 $R = \text{normrnd}(0, 0.02)$;2) 生成以 0 为期望、 R^2 为方差的正态随机数 $x_i = \text{normrnd}(0, R)$;3) 按照式(7)计算隶属度 $u(x_i)$;4) 重复步骤 1~3,直至还原出 2 000 个云滴。

$$u(x_i) = \exp[-(x_i - 0)^2 / (2R^2)] \quad (7)$$

3 实例分析

以长沙市云栖路沿线区域为例,利用序关系—云模型对互通优化方案进行综合评价。云栖路区域出入口对外交通主要是宁乡、韶山、娄底、湘潭的车流进出长沙城区,同时有一些往南、往北的交通流在绕城高速公路上进行转换。云栖路区域对应的对外交通线为长韶娄(长沙—韶山—娄底)、长潭(长沙—湘潭)西高速公路,区域内包含学士、岳麓、坪塘互通。学士互通位于长潭西与绕城高速公路交汇处,长潭西高速公路对接道路为云栖路,互通东侧范围从交汇点沿长潭西高速公路 1 000 m,互通南侧范围从交汇点沿绕城高速公路 700 m。岳麓互通位于

长韶娄与长潭西高速公路交汇处,北侧延伸范围到医专路,南侧延伸范围到大塘路,西侧从交汇点外延 800 m,东侧延伸范围到学士路。坪塘互通主线为绕城高速公路,东侧延伸范围到坪塘大道(见图 2)。



图 2 云栖路沿线区域范围示意图

根据现状调查结果,云栖路沿线区域互通主要存在以下问题:1) 区域内互通的负荷非均衡程度分别为 0.11、0.12,其中学士互通所服务的交通流较大,区域内各互通利用程度较不均衡,应通过改造岳麓互通周边及坪塘互通对学士互通进行分流。2) 岳麓互通为变异苜蓿叶形,其收费站距离学士路非常近,存在入口上高速公路排队过长的问题。另外,该互通连接长韶娄与长潭西高速公路,与绕城高速公路无连接,进入三环线需通过学士互通,增加了学士互通的交通压力,需进行优化。3) 坪塘互通为局域型出入口,单喇叭形,对接道路为坪塘大道,为主干道,衔接道路平均行程车速为 32.51 km/h,轻度拥堵。现状坪塘互通进出车流占比为 1.47%,为全部出入口中利用率最低的出入口,需通过改造提高其交通吸引力,为学士互通分流,并满足大王山旅游区开发所诱增的交通需求。

根据互通优化基础理论和规划方案,对该局域的岳麓互通和坪塘互通进行优化。为了均衡学士互通与岳麓互通的流量,根据规划方案,莲坪大道、含浦路、洋湖大道未来将进行快速化改造。为加强与长韶娄高速公路的对接,实现快速道路相交节点的打通,考虑新增匝道进行分流,主线形式和对接道路

不发生变化。具体方案如下:1) 考虑学士路上下高速公路的交通流向、周边用地及地形限制,暂设置2条苜蓿叶式左转匝道,便于进出高速公路(见图3);2) 莲坪大道与含浦路交叉口设置左转匝道,含浦路与洋湖大道交叉口设置左转匝道,方便从长韶娄和绕城高速公路下来的车流进行方向变换,直达河西核心区域。



图3 岳麓互通优化示意图

坪塘互通中绕城高速公路上跨坪塘大道,绕城高速公路为双向四车道,坪塘大道为双向六车道,距相交节点约400 m处布设与绕城高速公路相连接的匝道,坪塘转向绕城高速公路的交通需求可沿该匝道分离;绕城高速公路在坪塘大道西侧,距相交节点

点约650 m处布设与坪塘大道相连接的匝道,绕城高速公路转向坪塘大道的交通需求可沿该匝道分离。规划中坪塘大道为快速路,在“高接快”的情况下,加之坪塘附近大王山旅游项目的开发,需对坪塘互通进行改造,建议将单喇叭形互通改造为全苜蓿叶式立交。4条左转弯匝道均采用环形,通过苜蓿叶形立交桥时,直行车辆按照原方向行驶;右转弯车辆通过右侧匝道行驶;左转弯车辆直行通过立交桥后转进匝道再右转270°(见图4),以满足未来大王山旅游区的交通需求,并分担学士互通的交通压力。

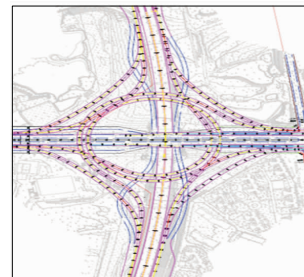


图4 坪塘互通优化示意图

云栖路沿线区域优化前后各评价指标的计算结果见表4。

表4 云栖路沿线区域优化前后各指标的计算结果

| 时间 | 出入口平均 间距/km | 衔接道路 干路网密度 | 衔接道路 等级指数 | 平均服务 范围/km ² | 服务范围 重叠率/% | 出口负荷 非均衡度 | 入口负荷 非均衡度 |
|-----|----------------|---------------|--------------|----------------------------|---------------|--------------|--------------|
| 现状 | 4.54 | 1.75 | 0.386 | 49.6 | 30.69 | 0.11 | 0.12 |
| 优化后 | 4.54 | 1.75 | 0.457 | 49.6 | 30.69 | 0.05 | 0.09 |

通过正向正态云发生器,以每个评价等级的标准正态云值中的 E_n 为均值、 H_e 为标准差产生一个正态分布随机数 E'_n ,将实测值作为 E_x 分别

代入式(5)~(7),计算各评价指标在各等级下的隶属度。互通立交优化前后各评价指标的隶属度见表5。

表5 云栖路沿线区域互通立交优化前后各评价指标的隶属度

| 二级指标 | 优化前各等级的隶属度 | | | | | 优化后各等级的隶属度 | | | | |
|-------|------------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|---------|
| | I | II | III | IV | V | I | II | III | IV | V |
| U_1 | 0.009 5 | 0.000 0 | 0.998 5 | 0.498 6 | 0.000 0 | 0.204 3 | 0.497 0 | 0.000 1 | 0.660 1 | 0.114 2 |
| U_2 | 0.386 7 | 0.270 1 | 0.000 0 | 0.596 4 | 0.140 2 | 0.000 0 | 0.223 2 | 0.017 9 | 0.999 8 | 0.011 9 |
| U_3 | 0.031 4 | 0.734 0 | 0.232 3 | 0.900 0 | 0.000 0 | 0.031 5 | 0.934 1 | 0.231 0 | 0.000 0 | 0.000 0 |
| U_4 | 0.005 5 | 0.415 6 | 0.886 7 | 0.604 6 | 0.002 4 | 0.000 0 | 0.571 2 | 0.925 5 | 0.391 7 | 0.005 4 |
| U_5 | 0.000 0 | 0.411 1 | 0.000 1 | 0.864 5 | 0.001 6 | 0.000 0 | 0.947 4 | 0.258 6 | 0.000 0 | 0.003 1 |
| U_6 | 0.110 9 | 0.682 7 | 0.591 7 | 0.137 5 | 0.494 0 | 0.115 4 | 0.678 7 | 0.682 5 | 0.111 9 | 0.601 1 |
| U_7 | 0.020 0 | 0.307 3 | 0.379 1 | 0.066 1 | 0.033 2 | 0.127 9 | 0.678 0 | 0.000 6 | 0.459 5 | 0.008 9 |

按指标加权方法将权重系数矩阵与隶属度矩阵合成得到各指标的综合评判向量,按最大隶属度原

则进行服务质量等级评价,优化前后的评价结果分别见表6、表7。

表 6 云栖路沿线区域互通立交优化前综合评价结果

| 一级指标 | 各等级综合隶属度 | | | | | 下列方法的评价结果 | |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|-----------|-------|
| | I | II | III | IV | V | 云模型 | 模糊评价法 |
| 区域出入口几何条件 | 0.140 7 | 0.990 1 | 1.969 3 | 0.702 2 | 0.527 2 | 一般 | 一般 |
| 区域出入口服务范围 | 0.418 1 | 1.004 1 | 0.232 4 | 1.496 4 | 0.140 2 | 差 | 差 |
| 区域出入口非均衡度 | 0.005 5 | 0.826 7 | 0.886 8 | 1.469 1 | 0.004 0 | 差 | 差 |
| 综合 | 0.195 7 | 0.950 6 | 1.103 8 | 1.171 3 | 0.258 2 | 差 | 差 |

表 7 云栖路沿线区域互通立交优化后综合评价结果

| 一级指标 | 各等级综合隶属度 | | | | | 下列方法的评判结果 | |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|-----------|-------|
| | I | II | III | IV | V | 云模型 | 模糊评价法 |
| 区域出入口几何条件 | 0.447 6 | 1.853 7 | 0.683 3 | 1.231 5 | 0.724 2 | 好 | 好 |
| 区域出入口服务范围 | 0.031 5 | 1.157 3 | 0.248 9 | 0.999 8 | 0.011 9 | 好 | 好 |
| 区域出入口非均衡度 | 0.000 0 | 1.518 6 | 1.184 1 | 0.391 7 | 0.008 5 | 好 | 好 |
| 综合 | 0.189 5 | 1.533 4 | 0.675 2 | 0.928 3 | 0.295 9 | 好 | 好 |

根据表 7,优化区域出入口性能指标后,云栖路区域的评价等级从原来的一般提高到好。云模型的评判结果和传统模糊综合的评判结果一致,说明基于云模型确定隶属度的方法可行,且云模型继承了交通状态的模糊性与随机性,在一定程度上优于传统模糊综合评判模型。

根据表 2 中指标权重,专家较为关注的是出入口的几何条件和服务范围。在互通优化改造中可考虑合理布局出入口、增加互通匝道、连接点改造等方案,提高互通立交的运行效率和服务水平。

4 结语

该文针对互通评价指标多样性问题,根据交通状况建立互通立交评价体系及分级标准,解决传统评价方法的片面性和不合理性问题。传统的基于统计学的决策评价方法仅以唯一的数值概括全部的评价信息,无法反映评价过程的随机性和模糊性,而序关系—云模型评价方法可克服评价过程中的主管偏好和评判习惯,其评价结果有助于提高互通立交改善方案的针对性及有效性。

参考文献:

[1] 陈大伟,徐中,李旭宏.高速公路网互通立交布局优化模型[J].交通运输工程学报,2010,10(3).

[2] 沈强儒,杨少伟,赵一飞,等.基于交通冲突小间距互通式立交区域安全性评价方法[J].系统工程理论与实践,2015,35(1).

[3] 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).

[4] 杜栋,庞庆华,吴炎.现代综合评价方法与案例精选[M].第 3 版.北京:清华大学出版社,2015.

[5] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展,1995,32(6).

[6] 丁昊,王栋.基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J].环境科学学报,2013,33(1).

[7] 李德毅,刘常昱.论正态云模型的普适性[J].中国工程科学,2004,6(8).

[8] 马纪,刘希喆.基于序关系—熵权法的低压配网台区健康状态评估[J].电力系统保护与控制,2017,45(6).

[9] 阎岩,唐振民.基于云模型的地面机器人自主性评价方法[J].南京理工大学学报,2012,36(3).

[10] 李德毅,杜鹄.不确定性人工智能[M].北京:国防工业出版社,2005.

[11] 李德毅,刘常昱,淦文燕.正态云模型的重尾性质证明[J].中国工程科学,2011,13(4).

[12] 王炜,过秀成.交通工程学[M].南京:东南大学出版社,2000.

[13] 杜湘瑜,尹全军,黄柯棣,等.基于云模型的定性定量转换方法及其应用[J].系统工程与电子技术,2008,30(4).

[14] 李小静,刘立舰,刘林忠.基于云理论和雷达图的路网综合可靠度评价[J].计算机应用研究,2013,30(10).

[15] 李雪,赵宁,郑晷.基于云模型的道路交通安全等级评价[J].北京工业大学学报,2015,41(8).

[16] 赵蓉龙.立体交叉选型及评价系统研究[D].南京:东南大学,2005.

[17] 冯心宜.高速公路互通立交安全性评价[D].广州:华南理工大学,2010.

[18] 胡永宏,贺恩辉.综合评价方法[M].北京:科学出版社,2000.