

互通式立体交叉比选方案安全性评价研究

李瑞美, 钟小明, 周娟, 余浩, 贾嘉

华杰工程咨询有限公司, 北京

收稿日期: 2021年12月11日; 录用日期: 2022年1月20日; 发布日期: 2022年1月28日

摘要

互通式立体交叉比选方案安全性评价是公路项目安全性评价工作中的重要组成部分, 是通过定性及定量方法比较各方案的安全性, 推荐最优方案。为实现客观科学的安全评价, 文章在大量实践基础上提出了互通式立体交叉比选方案安全评价指标体系, 构建出模糊综合安全评价模型, 并通过实际案例验证了指标体系及评价模型的有效性。研究成果能为互通式立体交叉比选方案安全评价提供方法指导, 并将支撑《公路项目安全性评价规程》(T/CECS G: E10-2021)、贵州省公路项目安全性评价指南(项目编号: 2020-141-022)相关条文。

关键词

互通式立体交叉, 比选方案, 交通安全, 模糊综合评价法, 安全性评价

Study on Safety Audit of Alternative Schemes for Interchange

Ruimei Li, Xiaoming Zhong, Juan Zhou, Hao Yu, Jia Jia

Chelbi Engineering Consultants, Inc., Beijing

Received: Dec. 11th, 2021; accepted: Jan. 20th, 2022; published: Jan. 28th, 2022

Abstract

Safety audit of alternative schemes for interchange is an important part of highway safety audit. In order to recommend an optimum interchange scheme with the best traffic safety performance, alternative schemes are compared qualitatively and quantitatively for highway safety audit. To obtain objective evaluation results for safety audit, a fuzzy comprehensive safety evaluation model with indicators is proposed in the paper, based on a lot of practice. Design cases are introduced and proved the model effectiveness. The model will be a safety audit method cited by Technical

Specifications for Highway Safety Audit (T/CECS G: E10-2021) and Guizhou Provincial highway Safety Audit Guidelines (2020-141-022).

Keywords

Interchange, Alternative Schemes, Traffic Safety, Fuzzy Comprehensive Evaluation, Safety Audit

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

互通式立体交叉比选方案安全性评价(以下简称互通比选方案安评)是公路项目安全性评价的一项重要内容,需要定性及定量地分析各方案,并从交通安全角度给出最优推荐方案。目前,中外学者围绕互通比选方案安评开展了大量研究工作,大多学者及评价人员集中在从互通功能及位置特点、交通量、经济及技术指标等方面确定评价指标[1]-[6],评价方法多采用层次分析法、模糊评价法、灰色评价法、人工神经网络评价法、德菲尔法或组合运用这些方法[7]。如,李飞等[8]选用技术指标、使用指标、经济指标三个一级评价指标构建层次体系,并将遗传层次分析法与模糊综合评价法结合,得出了合理的互通式立体交叉线形。薛岭等[9]选用枢纽工程规模、运营使用效率、交通安全三个一级指标建立了评价体系,研究了基于投影寻踪法的评价方法。目前对互通比选方案安评的研究定性居多,未见以交通安全指标为主进行方案比选方法研究的相关文献,因此,实践中评价结果往往难以保证所选的方案安全性占优。《公路项目安全性评价规范》(JTJ B05-2015)(以下简称“安评规范”)[10]虽然在初步设计阶段提出要进行互通比选方案安评,但是安评规范中缺乏相应的评价方法及评价指标体系等,加上目前不同评价单位及评价人员往往受自身水平及经验限制,难以达到互通比选方案安评实际效果。为此,笔者在《公路项目安全性评价规程》(T/CECS G: E10-2021)、贵州省公路项目安全性评价指南(2020-141-022)编制过程中,对互通方案比选进行了深入的研究,建立初步设计阶段互通比选方案的安全性评价指标体系及评价模型,并进行实例验证。

2. 评价方法

在互通比选方案安评工作中,判断往往存在着模糊特性。人类的判断和偏好通常是模糊的[11],许多情况下,精确值不足以模拟真实世界的情况。本文对初步设计阶段互通比选方案安评采用模糊综合评价法。

模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation)是采用模糊数学的隶属度理论,把定性评价转化为定量评价,对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。具有结果清晰,系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决[12][13]。

3. 评价模型构建

3.1. 评价指标体系

模糊综合评价法指标分为一级指标和二级指标。笔者调查了安评及互通方案比选等方面经验丰富的专家,结合近年的安评项目实践,筛选对交通安全影响较大的因素制定下述的指标体系:

一级指标 5 个包括 A 立交构型, B 交通适应性, C 设施间距, D 设计指标符合性, E 交通安全设施布设。二级指标包括 A1 立交类型、A2 连接部形式, B1 连接部适应性等 12 个, 详细指标体系如表 1。

根据各指标表现的交通安全性能, 结合专家调查, 相应的交通安全性能评分的结果分为 5 个等级: 好、较好、一般、较差、差, 对应的评分分别为 0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100 (见表 2~6)。

Table 1. Safety evaluation indicators for interchange design comparison schemes
表 1. 互通比选方案安评指标体系

一级指标	二级指标
立交构型 A	立交类型 A ₁
	连接部形式 A ₂
交通适应性 B	连接部适应性 B ₁
	匝道适应性 B ₂
设施间距 C	设施间距 C ₁
	出入口间距 C ₂
设计指标符合性 D	主线指标 D ₁
	连接部指标 D ₂
	匝道指标 D ₃
交通安全设施布设 E	标志 E ₁
	标线与线形诱导 E ₂
	护栏 E ₃

Table 2. The assessment grade of interchange forms

表 2. 立交构型评分表

一级指标	二级指标	差	较差	一般	较好	好
立交构型 A	立交类型 A ₁	1) 采用部分互通, 部分流向路线十分复杂, 绕行距离很长; 2) 互通式立体交叉施工对被交路影响较大, 交通组织复杂, 难以保证安全; 3) 改扩建互通形式对既有公路影响较大, 施工期交通组织复杂, 难以保证交通安全	1) 采用部分互通, 部分流向路线复杂, 绕行距离长; 2) 互通式立体交叉施工对被交路存在影响, 交通组织复杂, 保证安全代价较高; 3) 改扩建互通形式对既有公路存在影响, 施工期交通组织复杂, 保通和保证交通安全代价较高	1) 采用全互通, 各流向基本清晰, 部分方向绕行距离较长; 2) 互通式立体交叉施工对被交路存在影响, 交通组织较复杂, 需要做专项设计; 3) 改扩建互通形式对既有公路存在影响, 施工期交通组织复杂	1) 采用全互通, 各流向基本清晰顺畅, 绕行距离较短; 2) 互通式立体交叉施工对被交路存在影响, 交通组织需进行重点考虑; 3) 改扩建互通形式对既有公路存在影响, 施工期交通组织较复杂	1) 采用全互通, 各流向清晰顺畅, 绕行距离很短; 2) 互通式立体交叉施工对被交路影响很小, 交通组织便利; 3) 改扩建互通形式对既有公路影响较小, 施工期交通组织便利
		(80, 100]	(60, 80]	(40, 60]	(20, 40]	(0, 20]

Continued

连接部形式 A ₂	1) 采用变异、复合互通形式, 连续出口布局, 端部间距不满足规范要求, 对驾驶员判断造成严重影响; 2) 交织区长度不足且未设置集散车道, 或先左后右的匝道布局, 或匝道形式与主流向不匹配, 车辆行驶方向与匝道展线方向偏差很大 (80, 100]	1) 采用变异、复合互通形式, 连续出口布局, 端部间距满足规范要求, 对驾驶员判断造成较大影响; 2) 交织区长度不足且未设置集散车道, 或匝道形式与主流向不匹配, 车辆行驶方向与匝道展线方向偏差大 (60, 80]	1) 立交形式常见, 出口统一, 对驾驶员判断未造成明显影响; 2) 交织区长度不足但设置集散车道, 匝道形式与布局不符合主流向与驾驶行为规律, 车辆行驶方向与匝道展线方向偏差较大 (40, 60]	1) 立交形式常见, 出口统一, 对驾驶员判断未造成影响; 2) 未设置交织区, 匝道形式与布局基本符合主流向与驾驶行为规律, 车辆行驶方向与匝道展线方向基本一致 (20, 40]	1) 立交形式常见, 出口统一, 对驾驶员判断未造成影响; 2) 未设置交织区, 匝道形式与布局符合主流向与驾驶行为规律, 车辆行驶方向与匝道展线方向一致 (0, 20]
----------------------	---	--	--	---	--

Table 3. The assessment grade of adaptability of traffic

表 3. 交通适应性评分表

一级指标	二级指标	差	较差	一般	较好	好
交通适应性 B	连接部适应性 B ₁	部分连接部交通适应性严重不足, 服务水平达到五 - 六级 (80, 100]	部分连接部交通适应性不足, 服务水平达到四级 (60, 80]	部分连接部交通适应性一般, 服务水平达到三级 (40, 60]	连接部交通适应性较好, 服务水平达到二级 (20, 40]	连接部交通适应性良好, 服务水平达到一级 (0, 20]
	匝道适应性 B ₂	部分匝道交通适应性严重不足, 分、合流区、交织区等服务水平达到五 - 六级 (80, 100]	部分匝道交通适应性不足, 分、合流区、交织区等服务水平达到四级 (60, 80]	部分匝道交通适应性一般, 分、合流区、交织区等服务水平达到三级 (40, 60]	匝道交通适应性较好, 分、合流区、交织区等服务水平达到二级 (20, 40]	匝道交通适应性良好, 分、合流区、交织区等服务水平达到一级 (0, 20]

Table 4. The assessment grade of distance between facilities

表 4. 设施间距评分表

一级指标	二级指标	差	较差	一般	较好	好
设施间距 C	设施间距 C ₁	互通式立交之间, 与临近设施净距及设置辅助车道后的长度均不满足规范要求 (80, 100]	互通式立交之间, 与临近设施净距不满足规范要求, 但设置辅助车道后的长度满足规范极限值 (60, 80]	互通式立交之间, 与临近设施净距满足规范要求 (40, 60]	互通式立交之间, 与临近设施净距满足规范要求, 交通流安全转换自由度较高 (20, 40]	互通式立交之间, 与临近设施间距满足标志设置与交通流安全转换需要 (0, 20]
	出入口间距 C ₂	互通式立交内相邻出入口间距及设置辅助车道后的长度均不满足规范要求 (80, 100]	互通式立交内相邻出入口间距不满足规范要求, 但设置辅助车道后的长度满足规范极限值 (60, 80]	互通式立交内相邻出入口间距满足规范要求 (40, 60]	互通式立交内相邻出入口间距满足规范要求, 交通流安全转换自由度较高 (20, 40]	互通式立交内相邻出入口间距满足标志设置要求, 交通流安全转换自由度高 (0, 20]

注: 邻近设施包括: 隧道、服务区、同向分离式断面、停车区、加油加气站、观景台、U 型转弯、避险车道、各类检查站等设施。

Table 5. The assessment grade of design index compliance with specifications
表 5. 设计指标符合性评分表

一级指标	二级指标	差	较差	一般	较好	好
设计指标符合性 D	主线指标 D ₁	1) 识别视距范围内的主线平纵面指标不满足规范极限值要求； 2) 互通立交分合流识别视距严重受限，进出口视距三角区内视线严重遮挡，障碍物不可移动； 3) 主线位于急弯陡坡或连续纵坡路段且无改善余地	1) 识别视距范围内的主线平纵面指标满足规范极限值要求。但互通范围内的主线平纵面指标不满足规范一般值要求； 2) 互通立交分合流识别视距受限，进出口视距三角区内有难以移动的障碍物； 3) 主线位于急弯陡坡或连续纵坡路段，可通过工程或管理等措施改善	1) 识别视距范围内的主线平纵面指标满足规范一般值要求。但互通范围内的主线平纵面指标不满足规范一般值要求； 2) 互通立交分合流识别视距受限，进出口视距三角区内有可处理的障碍物	1) 互通区主线指标满足标准规范极限值要求； 2) 互通立交分合流识别视距满足规范要求	1) 互通区主线指标满足标准规范一般值要求； 2) 互通立交分合流识别视距满足规范条件较好
	连接部指标 D ₂	1) 变速车道长度不满足规范要求。双车道匝道连接部未设置辅助车道； 2) 互通立交进出口位于连续纵坡路段坡底附近，连接部形式不利于出口减速	1) 变速车道长度满足规范要求，但未按修正系数延长，双车道匝道连接部未设置辅助车道； 2) 互通立交进出口位于连续纵坡路段坡底附近	1) 变速车道长度满足规范要求，按修正系数延长	1) 变速车道长度不满足规范要求。双车道匝道连接部未设置辅助车道； 2) 互通立交进出口位于连续纵坡路段坡底附近，连接部形式不利于出口减速	1) 变速车道长度满足规范要求，但未按修正系数延长，双车道匝道连接部未设置辅助车道； 2) 互通立交进出口位于连续纵坡路段坡底附近
	匝道指标 D ₃	1) 匝道平纵面指标不满足规范极限值要求且难以调整； 2) 匝道运行速度协调性不良且难以调整； 3) 匝道连续分合流鼻端间距不满足规范要求； 4) 主流方向匝道横断面及变速车道选择难以满足交通量和行车需求	1) 匝道平纵面指标满足规范极限值要求； 2) 匝道运行速度协调性不良； 3) 匝道连续分合流鼻端间距不满足规范要求； 4) 主流方向匝道横断面及变速车道选择难以满足交通量和行车需求	1) 匝道平纵面指标满足规范极限值要求； 2) 匝道运行速度协调性不良，通过调整可以满足要求； 3) 匝道连续分合流鼻端间距不满足规范要求，通过调整可以满足要求； 4) 主流方向匝道横断面及变速车道选择基本合理	1) 匝道平纵面指标满足规范极限值要求； 2) 匝道运行速度协调性较好； 3) 匝道连续分合流鼻端间距满足规范要求； 4) 主流方向匝道横断面及变速车道选择合理	1) 匝道平纵面指标满足规范一般值要求； 2) 匝道运行速度协调性很好； 3) 匝道连续分合流鼻端间距满足规范要求； 4) 主流方向匝道横断面及变速车道选择合理
		(80, 100]	(60, 80]	(40, 60]	(20, 40]	(0, 20]
		(80, 100]	(60, 80]	(40, 60]	(20, 40]	(0, 20]
		(80, 100]	(60, 80]	(40, 60]	(20, 40]	(0, 20]

Table 6. The assessment grade of traffic safety facilities
表 6. 交通安全设施评分表

一级指标	二级指标	差	较差	一般	较好	好
	标志 E ₁	互通出口上游预告标志设置非常困难, 设置位置、版面设计和信息量选择非常困难, 很难满足驾驶人需求	互通出口上游预告标志设置困难, 设置位置、版面设计和信息量选择存在困难, 影响驾驶人视认	互通出口上游预告标志设置基本无难度, 设置位置适合可预留, 版面设计和信息量合适, 基本满足视认性	互通出口上游预告标志能正常设置, 设置位置适合可预留, 版面设计和信息量较简单, 满足驾驶人视认性	互通出口上游预告标志设置能正常设置, 设置位置适合预留, 版面设计简单和信息量合理, 驾驶人视认性好
		(80, 100]	(60, 80]	(40, 60]	(20, 40]	(0, 20]
交通安全设施布设 E	标线与线形诱导 E ₂	1) 出入口未进行标线渠化, 或渠化标线设置空间十分局促, 设置十分困难, 设置渠化标线与标记视认性与诱导效果很差, 不符合驾驶行为规律, 对驾驶人有误导作用。匝道无线形诱导设施 2) 互通区无照明与执法设施	1) 出入口未进行标线渠化, 或渠化标线设置空间较局促, 设置有一定困难, 设置渠化标线与标记视认性与诱导效果差, 不符合驾驶行为规律。匝道无线形诱导设施 2) 互通区无照明与执法设施	1) 出入口未进行标线渠化, 设置渠化标线与标记视认性与诱导效果一般。匝道设置线形诱导设施 2) 互通区无照明与执法设施	1) 出入口设置渠化标线与标记视认性较好, 基本符合驾驶行为规律。匝道设置线形诱导设施 2) 互通区设置照明	1) 出入口设置渠化标线与标记视认性好, 符合驾驶行为规律。匝道设置线形诱导设施 2) 互通区设置照明与执法设施
		(80, 100]	(60, 80]	(40, 60]	(20, 40]	(0, 20]
	护栏 E ₃	出口端部无防护, 或车辆碰撞端部的可能性很高	出口端部无防护, 或车辆碰撞端部的可能性较高	出口端部设置防撞桶, 或车辆碰撞端部的可能性一般	出口端部设置防撞垫, 或车辆碰撞端部的可能性较小	出口端部设置防撞垫, 或车辆碰撞端部的可能性小
		(80, 100]	(60, 80]	(40, 60]	(20, 40]	(0, 20]

3.2. 评价模型

依据上述评价指标体系, 采用模糊综合评价法构建互通比选方案安全性评价模型, 具体步骤如下:

1) 确定评价指标因素集, 设 X 为因素集

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \{X_A, X_B, X_C, X_D, X_E\} \\ X_A = \{X_{A_1}, X_{A_2}\} \\ X_B = \{X_{B_1}, X_{B_2}\} \\ X_C = \{X_{C_1}, X_{C_2}\} \\ X_D = \{X_{D_1}, X_{D_2}, X_{D_3}\} \\ X_E = \{X_{E_1}, X_{E_2}, X_{E_3}\} \end{array} \right. \quad (1)$$

2) 确定评分标准如表 7, 设评语集为 F ,

$$F = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5\} \quad (2)$$

Table 7. Standard of assessment

表 7. 评分标准表

评价结果	好	较好	一般	较差	差
评语集	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
分数	[0, 20)	[20, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]

以上给出的评分标准表中, 评分值越小则风险越小, 对交通安全的保障能力越强; 相反, 评分值越大则风险越大, 对交通安全的保障能力越差。分值越小, 方案越好, 根据比较方案的评分值, 可从交通安全角度评估出据有优势的推荐方案。

3) 确定各指标层权重

$X_i (i = A, B, C, D, E)$ 对 X 的权重:

$$W = \{W_A, W_B, W_C, W_D, W_E\} \quad (3)$$

$X_{ij} (j = 1, 2, 3)$ 对 X_i 的权重:

$$w_A = \{w_{A_1}, w_{A_2}\}; w_B = \{w_{B_1}, w_{B_2}, w_{B_3}\}; w_C = \{w_{C_1}, w_{C_2}\}; w_D = \{w_{D_1}, w_{D_2}, w_{D_3}\}; w_E = \{w_{E_1}, w_{E_2}\} \quad (4)$$

以上权重, 可由相关领域的专家给出。

4) 确定 X_i 的模糊评价矩阵 R_i , 即对每个 $X_i (i = A, B, C, D, E)$ 分别进行综合评判, 可以根据德尔菲法评定二级指标, 采用隶属函数确定模糊关系, 得到二级指标层 X_i 隶属于每个评语的程度 r_{ij} , 并由此构造评价矩阵 R_i [14]。

$$R_A = \begin{bmatrix} r_{A_{11}} & r_{A_{12}} & r_{A_{13}} & r_{A_{14}} & r_{A_{15}} \\ r_{A_{21}} & r_{A_{22}} & r_{A_{23}} & r_{A_{24}} & r_{A_{25}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_B = \begin{bmatrix} r_{B_{11}} & r_{B_{12}} & r_{B_{13}} & r_{B_{14}} & r_{B_{15}} \\ r_{B_{21}} & r_{B_{22}} & r_{B_{23}} & r_{B_{24}} & r_{B_{25}} \\ r_{B_{31}} & r_{B_{32}} & r_{B_{33}} & r_{B_{34}} & r_{B_{35}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R_C = \begin{bmatrix} r_{C_{11}} & r_{C_{12}} & r_{C_{13}} & r_{C_{14}} & r_{C_{15}} \\ r_{C_{21}} & r_{C_{22}} & r_{C_{23}} & r_{C_{24}} & r_{C_{25}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_D = \begin{bmatrix} r_{D_{11}} & r_{D_{12}} & r_{D_{13}} & r_{D_{14}} & r_{D_{15}} \\ r_{D_{21}} & r_{D_{22}} & r_{D_{23}} & r_{D_{24}} & r_{D_{25}} \\ r_{D_{31}} & r_{D_{32}} & r_{D_{33}} & r_{D_{34}} & r_{D_{35}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_E = \begin{bmatrix} r_{E_{11}} & r_{E_{12}} & r_{E_{13}} & r_{E_{14}} & r_{E_{15}} \\ r_{E_{21}} & r_{E_{22}} & r_{E_{23}} & r_{E_{24}} & r_{E_{25}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

5) 确定一级指标层的模糊综合评价集 V_i , 可由 $V_i = w_i \times R_i$ 计算得到

$$\begin{cases} V_i = (v_{i_1}, v_{i_2}, v_{i_3}, v_{i_4}, v_{i_5}) \\ V_A = w_A \times R_A = \{v_{A_1}, v_{A_2}, v_{A_3}, v_{A_4}, v_{A_5}\} \\ V_B = w_B \times R_B = \{v_{B_1}, v_{B_2}, v_{B_3}, v_{B_4}, v_{B_5}\} \\ V_C = w_C \times R_C = \{v_{C_1}, v_{C_2}, v_{C_3}, v_{C_4}, v_{C_5}\} \\ V_D = w_D \times R_D = \{v_{D_1}, v_{D_2}, v_{D_3}, v_{D_4}, v_{D_5}\} \\ V_E = w_E \times R_E = \{v_{E_1}, v_{E_2}, v_{E_3}, v_{E_4}, v_{E_5}\} \end{cases} \quad (10)$$

6) 确定最终评价对象的模糊评价矩阵

$$S = W \times V = (W_A, W_B, W_C, W_D, W_E) \times \begin{bmatrix} v_{A_1} & v_{A_2} & v_{A_3} & v_{A_4} & v_{A_5} \\ v_{B_1} & v_{B_2} & v_{B_3} & v_{B_4} & v_{B_5} \\ v_{C_1} & v_{C_2} & v_{C_3} & v_{C_4} & v_{C_5} \\ v_{D_1} & v_{D_2} & v_{D_3} & v_{D_4} & v_{D_5} \\ v_{E_1} & v_{E_2} & v_{E_3} & v_{E_4} & v_{E_5} \end{bmatrix} = (s_1, s_2, s_3, s_4, s_5) \quad (11)$$

7) 进行归一化处理

$$\hat{s}_j = \frac{s_j}{\sum s_j}, (j=1,2,3,4,5)$$

$$\hat{S} = (\hat{s}_1, \hat{s}_2, \hat{s}_3, \hat{s}_4, \hat{s}_5) \quad (12)$$

综合评价结果：隶属于“好”这一评价等级的测度为 \hat{s}_1 ，隶属于“较好”这一评价等级的测度为 \hat{s}_2 ，隶属于“一般”这一评价等级的测度为 \hat{s}_3 ，隶属于“较差”这一评价等级的测度为 \hat{s}_4 ，隶属于“差”这一评价等级的测度为 \hat{s}_5 。根据最大隶属度原则，交通安全等级处于 $\hat{s}_j(\max)$ 最大测度对应的等级。然后，根据比较方案的评分值，提出有相对有安全优势的比较结果。

8) 计算综合评价得分

$$Y = \hat{S} \times F^T = \hat{s}_1 \bar{F}_1 + \hat{s}_2 \bar{F}_2 + \hat{s}_3 \bar{F}_3 + \hat{s}_4 \bar{F}_4 + \hat{s}_5 \bar{F}_5 \quad (13)$$

4. 评价模型应用及案例分析

4.1. 互通方案概况

本文选取 M 北枢纽互通进行实例验证。拟建的高速公路改扩建段设计速度 $v = 80 \text{ km/h}$ ，按双向八车道高速公路标准建设，路基宽度为 40.5 米。被交路为设计时速 80 km/h 双向四车道高速公路，路基宽度 24.5 m。拟建的主线与被交路共线段长 4.44 km，设置 M 北枢纽互通，实现两高速间的交通转换。

初步设计阶段拟定了 2 个同深度方案即方案一、方案二(如图 1~3)。M 北枢纽互通方案比较的范围从被交路八车道改造起点至方案二 N 南落地互通终点，包含被交路改造工程、M 北枢纽互通、N 南落地互通(方案二)、P 停车区改造。

表 8 对比了方案一和方案二，结果表明方案二工程规模较小，造价低，可保留 P 停车区，与现有 Y 枢纽、P 停车区距离较远，交通导向明确，初步设计文件推荐方案二，方案一作为同深度比较方案。

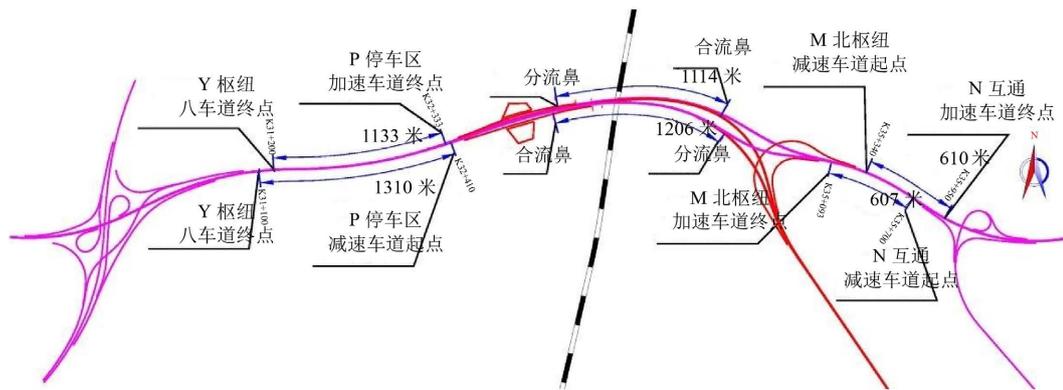


Figure 1. Network of interchange design scheme 1#
图 1. 方案一路网图

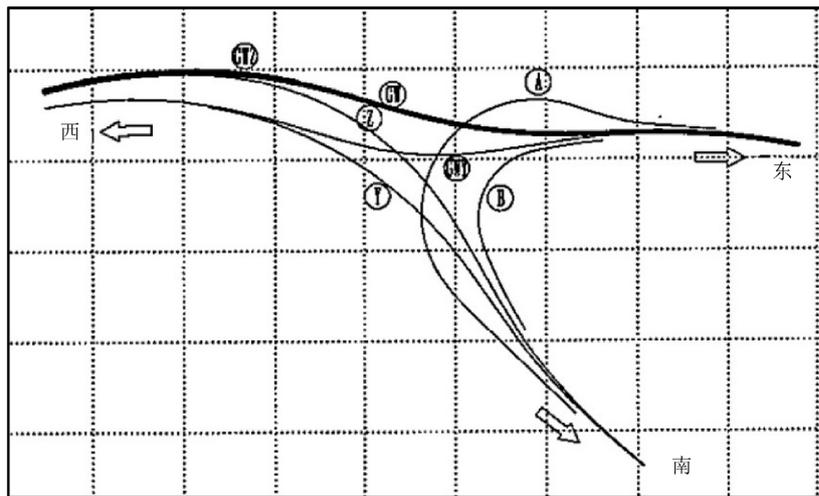


Figure 2. Interchange design scheme 1#
图 2. 方案一平面示意图

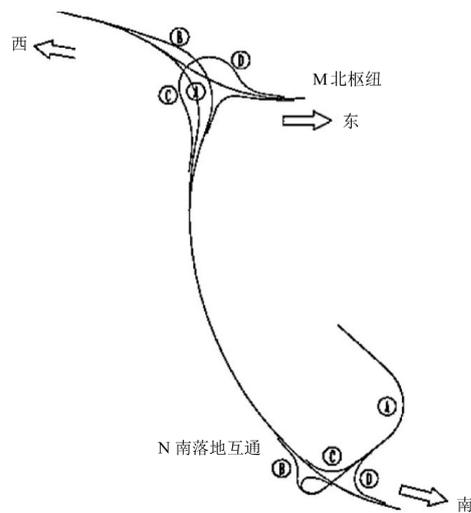


Figure 3. Interchange design scheme 2#
图 3. 方案二平面示意图

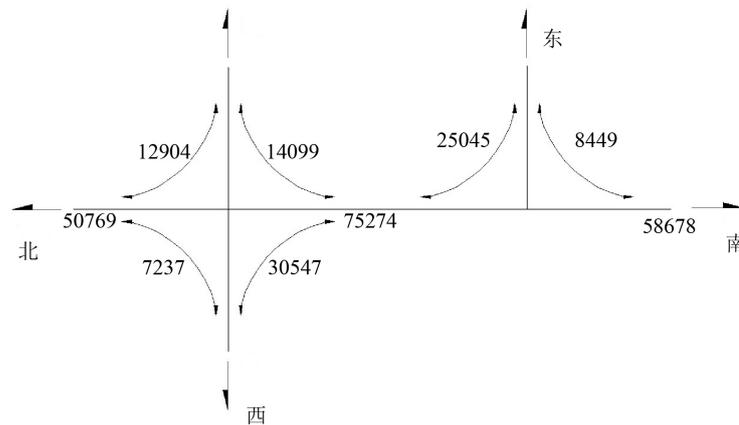


Figure 4. Forecast traffic volume of interchange in 2041 (pcu/d)

图 4. 枢纽互通 2041 年预测交通量(pcu/d)

Table 8. Comparison of different schemes for M north-interchange
表 8. M 北枢纽互通方案对比一览表

方案	一	二
概况	需将被交路 K31 + 100~K32 + 208.673 扩建为双向八车道, 长度 1.108 km。原 N 互通保持不变, 新建 M 北枢纽互通主线分流设计将西 - 东方向被交路左行交通放于左侧, 主线置于右侧	取消原 N 互通, 方案为右幅服务区扩建 + M 北枢纽(T 型) + 新建 N 南落地互通 (单喇叭)的组合形式
平面指标	主线指标相当	主线指标相当
与城际铁路关系	受城际铁路限制, 在 P 停车区附近分为两幅单向三车道下穿城际铁路, 穿过铁路之后, 再进行被交路与主线分合流, 影响小	利用铁路桥 2 跨下穿, 影响小。
与 P 停车区及相邻互通关系	可保留既有 P 停车区, 左侧场坪维持不变, 右侧场坪往南扩建, 改造 P 停车区左右侧匝道 M 北枢纽距离停车区 1114 m 和 1206 m, M 北枢纽互通与 N 互通变速车道起终点净距分别为 610 m 和 607 m, 需要设置辅助车道贯通	直接使用 P 停车区 拆除并新建落地互通, M 北枢纽距离停车区 1.5 km (净距), 满足规范要求
是否需要拼宽 J 大桥	需要拼宽 J 大桥(6 × 30 m T 梁) 187 m	需要拼宽 J 大桥(6 × 30 m T 梁) 405 m
施工保物条件	从 P 停车区之后只利用被交路西 - 东方向单幅路基, 需另新建单幅来保物	移位新建 N 南落地互通, 施工期间 N 镇车辆上下高速困难
工程规模	挖方较大	挖方相对较小, 桥梁规模最小, 工程规模相对较优。但移位新建 N 南互通, 收费站房建机电需重建

4.2. 初步设计阶段互通方案模糊综合评价

本论文对上述方案一及方案二进行模糊综合评价。参考安评规程编制过程中 23 位专家的调查结果, 并结合类似地区项目专家经验, 得到权重 w 如下表 9, 表 10。

Table 9. Weight of first-level evaluation indicator
表 9. 一级评价指标权重

指标	W_A	W_B	W_C	W_D	W_E
权重	0.3	0.15	0.2	0.2	0.15

Table 10. Weight of secondary evaluation indicator
表 10. 二级评价指标权重

指标	j		
	1	2	3
w_{A_j}	0.8	0.2	
w_{B_j}	0.85	0.15	
w_{C_j}	0.75	0.25	
w_{D_j}	0.4	0.4	0.2
w_{E_j}	0.5	0.4	0.1

方案一评价矩阵 R_i 即单因素 X_{ij} 对评语集的隶属度为(表 11):

Table 11. Evaluation matrix of design scheme 1#
表 11. 方案一的评价矩阵

评价指标	好	较好	一般	较差	差
A1	0.25	0.75	0.00	0.00	0.00
A2	0.65	0.35	0.00	0.00	0.00
B1	0.45	0.55	0.00	0.00	0.00
B2	0.10	0.90	0.00	0.00	0.00
C1	0.00	0.00	0.10	0.90	0.00
C2	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00
D1	0.00	0.25	0.75	0.00	0.00
D2	0.10	0.90	0.00	0.00	0.00
D3	0.25	0.75	0.00	0.00	0.00
E1	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
E2	0.35	0.65	0.00	0.00	0.00
E3	0.85	0.15	0.00	0.00	0.00

计算得到方案一的一级指标层的模糊综合评价集结果如下表 12:

Table 12. Fuzzy comprehensive evaluation set of first level indicators layer for design scheme 1#
表 12. 方案一的一级指标层的模糊综合评价集

评价指标	好	较好	一般	较差	差
A	0.3300	0.6700	0.0000	0.0000	0.0000
B	0.3975	0.6025	0.0000	0.0000	0.0000
C	0.1875	0.0625	0.0750	0.6750	0.0000
D	0.0900	0.6100	0.3000	0.0000	0.0000
E	0.2250	0.2750	0.5000	0.0000	0.0000

确定评价对象的模糊评价矩阵并进行归一化处理，方案一结果如下：

$$S = W \times V = (0.2479, 0.4671, 0.1500, 0.1350, 0.0000) \quad (14)$$

同理，方案二的评价矩阵如下(表 13)：

Table 13. Evaluation matrix of design scheme 2#
表 13. 方案二的评价矩阵

评价指标	好	较好	一般	较差	差
A1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
A2	0.40	0.60	0.00	0.00	0.00
B1	0.10	0.90	0.00	0.00	0.00
B2	0.25	0.75	0.00	0.00	0.00
C1	0.25	0.75	0.00	0.00	0.00
C2	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00
D1	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
D2	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00
D3	0.00	0.25	0.75	0.00	0.00
E1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E2	0.70	0.30	0.00	0.00	0.00
E3	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

方案二归一化结果为： $\hat{S} = (0.3294, 0.6406, 0.0300, 0.0000, 0.0000)$ 。

方案一综合评价结果隶属于“好”这一评价等级的测度为 0.2479，隶属于“较好”这一评价等级的测度为 0.4671，隶属于“一般”这一评价等级的测度为 0.1500，隶属于“较差”这一评价等级的测度为 0.1350，隶属于“差”这一评价等级的测度为 0.0000，方案一的综合评分为 33.44。根据最大隶属度原则，方案一的交通安全等级处于“较好”等级。

同理，计算得方案二线的综合评分为 24.01，方案二的交通安全等级处于“较好”等级。因此，模糊综合评价结果为方案二相对更为有利。

4.3. 初步设计阶段互通方案交通安全定性分析

从交通安全角度对 M 北枢纽互通方案一与方案二定性对比分析:

1) 改扩建方案一无需拆除原有 N 互通,但是需要改造 P 停车区,且需要设置辅助车道贯通。方案二拆除被交路既有互通,移位新建 N 南落地互通,在既有 Y 枢纽、P 停车区和本互通式立体交叉区段内出口布设明确,间距满足驾驶人顺畅驾驶需求,整体交流组织简单明晰,有利于交通流转换和交通安全。

2) 下穿铁路时,方案一、方案二均可利用铁路桥 2 跨下穿,对铁路影响均较小。

3) 方案二移位新建 N 南落地互通,在施工期间 N 镇车辆上下高速困难,需另考虑接入方案。

4) 方案二南-西方向为主交通流方向,与被交路合流时由右侧合流,大交通量将从左侧汇入不利于安全,对合流区交通流畅性有影响(图 3, 图 4)。

综上所述,从交通安全角度定性对比分析看,方案二亦有优势。结合上文模糊综合评价结果,安评建议采用方案二并针对初步设计阶段方案二存在的问题提出如下调整建议:

1) M 北枢纽路段调整汇流方案: B 匝道为主交通量(交通量为次流方向的 2 倍)右侧合流,存在一定安全风险,根据《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21-2014) 10.3.3 条,建议下阶段进一步考虑优化合流形式。

2) Y 枢纽至 M 北枢纽路段承担通道功能,设计速度建议调整为 100 km/h; M 北枢纽以南路段双向六车道设计速度 100 km/h,而 Y 枢纽至 M 北枢纽路段双向 8 车道设计速度 80 km/h,与承担的通道功能匹配性不佳,设计速度建议调整为 100 km/h。

3) M 北 A、B 匝道路段最小圆曲线半径为 400 m,挖方路段视距不足,项目区属于有凝冻地区,匝道路段最小圆曲线半径无法满足最大超高值为 6%时的圆曲线半径极限值,存在长直线接小半径弯的协调性问题,建议匝道对线形进行优化,增大曲线半径。

4) 施工期移位新建 N 南落地互通,在施工图设计中对相关保通、改扩建施工组织资料进行补充完善。

4.4. 施工图设计阶段互通方案模糊综合评价

设计单位采纳了安评意见,施工图设计阶段将方案调整为主线贯通,西-南方向为主交通流向的主线分合流方式,被交路搭接主线方案,增大了 A、B 匝道半径,且避免了拼宽 J 大桥,解决了初步设计方案中的安全问题,形成施工图互通设计方案,方案示意图 5 如下。

进一步对施工图设计阶段的互通方案进行安全性评价(表 14),其中模糊综合评分为 11.73,结果为“好”。说明施工图方案较初步设计阶段方案二在交通安全方面更有优势,彰显安评在初步设计方案比选中的作用。

Table 14. Fuzzy comprehensive evaluation set for interchange design scheme of detailed design stage

表 14. 施工图设计阶段互通方案(枢纽)的模糊综合评价集

评价指标	好	较好	一般	较差	差
A	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
B	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C	0.5875	0.4125	0.0000	0.0000	0.0000
D	0.9800	0.0200	0.0000	0.0000	0.0000
E	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
综合评价结果	0.9135	0.0865	0.0000	0.0000	0.0000

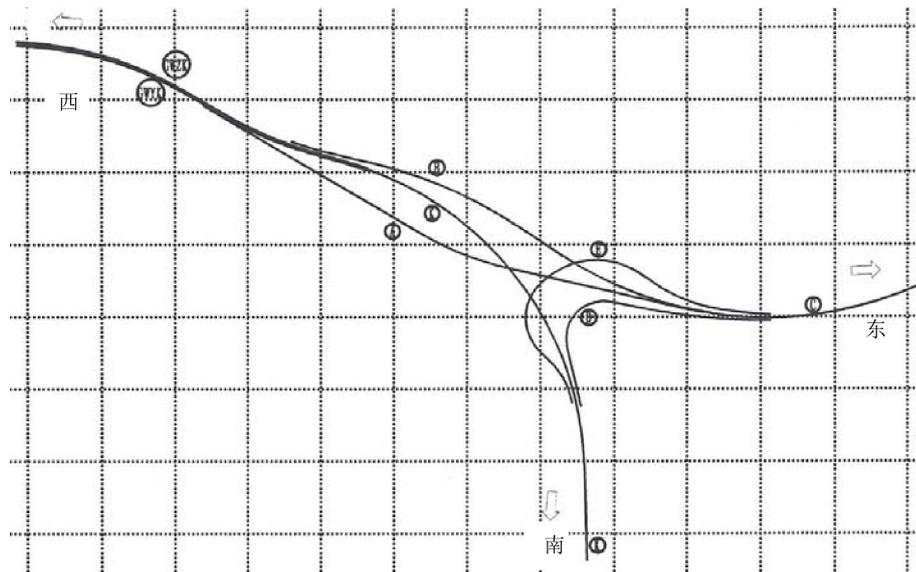


Figure 5. Interchange design scheme of detailed design stage
图 5. 施工图设计阶段互通方案(枢纽)

比较初设两个方案及施工图方案综合得分结果，如下表 15：

Table 15. Results of design scheme 1# , 2# and detailed design stage
表 15. 方案一、方案二和施工图方案评分表

评价指标	方案一	方案二	施工图方案
综合评分	33.44	24.01	11.73

5. 结语

本文针对互通比选方案安评问题，在大量的安全性评价实践和《公路项目安全性评价规程》(T/CECS G: E10-2021)研究的基础上，首先选取了 5 个对交通安全影响较大的一级指标(立交构型、交通适应性、设施间距、设计指标符合性、交通安全设施布设)并构建了一套评价指标体系。然后，本文提出模糊综合评价法定量得分及定性分析相结合的评价方法。最后，文章以 M 北枢纽互通为例进行模型验证，根据模糊综合评价得分值评估出安全占优的推荐方案，并结合定性对比分析的结果提出推荐方案的具体问题，安评建议在施工图设计阶段得到落实。因此，本文认为提出的评价指标体系及评价模型能够为互通式立体交叉比选方案安全性评价提供方法指导，文章结论将支撑《公路项目安全性评价规程》(T/CECS G: E10-2021)、贵州省公路项目安全性评价指南(项目编号：2020-141-022)相关条文。

基金项目

项目名称及编号：《公路项目安全性评价规程》(T/CECS G: E10-2021)、贵州省公路项目安全性评价指南(2020-141-022)。

参考文献

- [1] 梁子伟. 承赤高速公路头沟互通式立交方案研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [2] 陈竞飞. 复合式枢纽互通式立体交叉设计方案比选[J]. 广东公路交通, 2019, 45(4): 132-135.

- [3] 梁鹏, 付振国, 张雨. 规划重庆路互通式立体交叉方案设计及比选[J]. 山东交通科技, 2021(1): 123-126.
- [4] 王二标, 张百永. 白沙湾枢纽互通式立体交叉方案设计及比选[J]. 工程与建设, 2019, 33(1): 32-33.
- [5] 沙爱敏, 王晓东. 复合式互通式立体交叉方案比选设计[J]. 建设科技, 2016(21): 40-42.
- [6] 常军. 高速公路增设互通式立交方案比选分析[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(5): 24-26.
- [7] 付海洋. 既有互通式立体交叉适应性评价理论与方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [8] 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.
- [9] 薛岭, 丁健华, 林雨, 陈雨人. 枢纽互通式立体交叉设计综合评价体系及方法研究[J]. 现代交通技术, 2011, 8(6): 10-13.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 《公路项目安全性评价规范》(JTG B05-2015) [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [11] 梁心雨. 基于 FTOPSIS 及其拓展方法的高速公路路线方案比选研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [12] 庞京成, 宋宁宁, 任宇. 公路路线方案比选评价研究[J]. 山东交通科技, 2018, 166(3): 26-30.
- [13] 吴磊. 高速公路路线方案综合评价研究与实例分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [14] 鞠芳辉, 董云华, 李凯. 基于模糊方法的企业环境业绩综合评价模型[J]. 科技进步与对策, 2002(3): 93-95.