

基于雷达图分析法的山区高速公路互通立交方案研究

李 兴

(北京市市政工程设计研究总院有限公司,北京市 10082)

摘 要: 山区高速公路设计难点之一就是互通立交节点的设计,目前大部分山区互通立交设计方案均采用定性分析的方法,导致立交方案的决策受人为因素的影响较大。以某山区高速公路互通立体交叉节点方案为例,基于项目的建设条件、社会条件、自然条件和工程实际,提出了先进后出全互通方案、左进全互通方案和优化后的半互通立交方案,并对各方案进行了定性分析,通过比选得出最优方案。同时,构建了以雷达图分析法为基础的综合评价指标体系,对各方案进行定量分析评价,得出量化的评价特征值,并用定量分析的结果去验证定性分析得出的最优方案的准确性,为山区互通立交设计方案的比选、决策提供依据。

关键词: 山区高速公路;互通立交;雷达图分析法

中图分类号: U41;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0047-07

Research on Interchange Scheme of Mountainous Expressway Based on Radar Image Analysis Method

Li Xing

(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. Beijing, 10082)

Abstract: One of the difficulties in the design of mountainous highways is the design of interchange nodes. Currently, most interchange design schemes in mountainous areas adopt qualitative analysis methods, which leads to a significant impact of human factors on the decision-making of interchange schemes. Taking the interchange node scheme of a mountainous expressway as an example, based on the construction conditions, social conditions, natural conditions, and engineering reality of the project, the first in, last out full interchange scheme, left in full interchange scheme, and optimized semi interchange scheme were proposed. Qualitative analysis was conducted on each scheme, and the optimal scheme was obtained through comparison. At the same time, a comprehensive evaluation index system based on radar chart analysis method was constructed to quantitatively analyze and evaluate each scheme, obtain quantitative evaluation characteristic values, and use the results of quantitative analysis to verify the accuracy of the optimal scheme obtained by qualitative analysis, providing a basis for the comparison and decision-making of design schemes for mountainous interchanges.

Keywords: mountainous highways; Interchange; Radar chart analysis method

0 引 言

高速公路作为现代交通网络的重要组成部分,其建设对于促进区域经济发展、提升出行效率具有重要的意义。互通立体交叉节点作为高速公路网络中的关键枢纽,其设计不仅要解决车辆转向、交通转换等基本问题,还需充分考虑地形地貌、环境保护、施工成本等多方面因素,其设计合理与否直接影响

到整个路网的运行效率和安全性能。

在山区等复杂的地形条件下,互通立交的布设形式越来越受到学者和设计师们的重视^[1-10]。何禄诚、宁选杰等^[1]定性分析了山区互通立交设置的原则,研究了多种立交形式在山区的适应性。孙彦卓等^[2]提出“变异单喇叭+迂回式匝道”的组合方案,采用层次分析法对比 3 种方案,解决常规设计导致的桥隧占比高、生态破坏大等问题。刘健汉等^[3-5]对山区互通立交区的设计指标进行了研究。丁飞飞^[6]提出了基于模糊评价法的山区互通立交设计方案,并对山区互通立交的选型进行了量化研究。位树

收稿日期: 2025-04-09

作者简介: 李兴(1993—),男,硕士,工程师,从事道路设计工作。

等^[7-10]对山区立交进行了分类,组合出多种立交形式,并分析了其适用性,组合后的立交更能适应地形,同时减少了对环境的破坏。目前,对于山区互通立交方案的研究,大部分学者和设计师还停留在定性分析的层面,然而,定性分析受人为因素的影响较大,亟须一套综合性、科学性的评价指标体系,用于研究山区互通立交方案的可行性。

因此,本研究聚焦某山区高速公路互通立交交叉节点设计,通过深入分析山区的地形地质特点、控制条件、交通流量特性,以及未来发展趋势等因素,提出3种互通立交方案,并对3个方案进行定性比选。本研究采用了雷达图分析法对各立交方案进行量化分析,形成了定性分析与定量分析相结合的综合性、科学性的评价体系,为山区互通立交方案的设计与选型提供了决策依据。

1 工程概况

1.1 项目背景

2023年7—8月,A市遭遇了连续强降雨,A市的山区受灾严重,A市的B区山区受灾后,救灾人员通过现有的山区高速公路第一时间到达了受灾现场,极大地降低了人民的生命和财产损失。A市的C区山区受灾尤为严重,C区的平均降水量达到400 mm以上,站点最大降水量超过1 000 mm。本轮降雨导致了积水、山洪和泥石流3种自然灾害,给人民群众的生命和财产安全造成严重威胁。由于C区山区无高速公路和高铁,仅有1条三级公路和1条普铁线路作为该山区进出的通道,受暴雨影响,该现况三级公路损毁严重,严重制约了社会各界对沿线村庄的救援工作。为使山区人民群众的生命和财产安全得到保障,亟须修建1条“平急两用”的山区高速公路,服务于该地区。本文研究的立交节点是本项目中重要的立交节点之一,而C区著名的旅游景区距离此立交节点约5 km。因此,研究此互通立交节点方案的合理性十分有必要。

1.2 A市C区XX高速公路的功能定位

1.2.1 构建“平急两用”的骨干路网

本项目的建成将极大地完善本地区的骨干路网,平时服务于沿线经济发展,灾时作为应急抢险的生命通道,填补了该区域生命通道的空白。

1.2.2 加快灾后恢复,振兴沿线经济

本项目所处的C区内有多个风景名胜,项目的建设将极大地提高各景区间的交通转换效率,

有利于整合本区域内的旅游资源,使其发挥更大的商业价值,从而带动本区域经济的快速发展。

1.3 A市C区XX高速公路总体设计方案

本项目的道路等级为高速公路,主线设计速度为80 km/h,双向4车道,单车道宽度为3.75 m,中央分隔带宽度为2 m,硬路肩为3 m,土路肩为0.75 m。主线整体式路基标准横断面如图1所示,主线分离式路基标准横断面如图2所示。

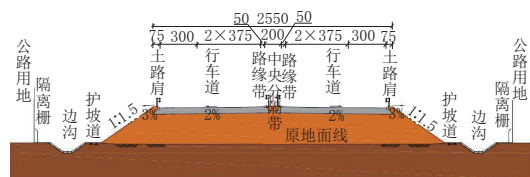


图1 主线整体式路基标准横断面(单位:cm)

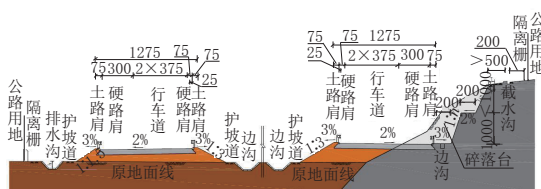


图2 主线分离式路基标准横断面(单位:cm)

2 A市C区XX高速公路与YY立交节点方案研究

2.1 YY立交节点交通量分析

此立交节点位于主线与本区域唯一进出的三级公路相交处,此三级公路是联络各大景区的唯一通道,且南北方向交通量较大。YY互通立交节点的实施,能够满足该地区景区及周边居民中、长距离交通转换的需求,带动区域发展;同时,在灾害发生时期,可以作为快捷的生命救援通道,保障区域灾后恢复重建。

根据交通量预测,本立交2046年最大的转向交通量为3 093 pcu/d,方向为由东向南;最小的转向交通量为1 136 pcu/d,方向为由北向西。其余左转方向交通量为1 187~2 272 pcu/d,右转交通量为1 472~2 956 pcu/d(见图3)。

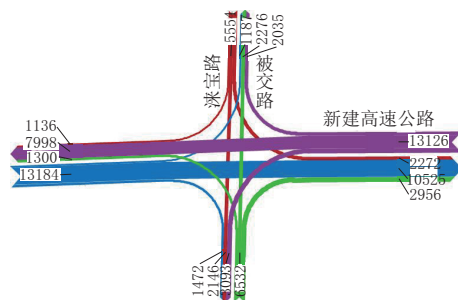


图3 2046年交通量预测图(单位:pcu/d)

2.2 YY 立交设置互通立交的必要性、可行性分析

2.2.1 上位规划支撑

此节点与主线相交的道路等级为规划二级公路,且此节点前、后 10 km 范围内无规划二级及以上等级道路与本项目相交,为此,上位规划在此节点处设置了互通立交。

2.2.2 沿线文旅、人口支撑

此节点所在镇人口规模为 9 132 人,约占本项目沿线辐射村、镇总人口的 34.5%。此节点所在镇是本区域旅游景点最多、景色最好、高峰期参观游览人数最多的镇,为本区的经济发展发挥了不可替代的作用。

2.2.3 构建“平急两用”生命救援通道的需要

此节点所在镇人口众多,高峰时段接待游客数量庞大,在灾害来临时,能够为游客和当地居民提供一条高效、便捷的生命救援通道。

2.2.4 沿线地形、地势决定

此互通节点前期确定的位置是在原线位 K20 附近,此处 2 个隧道洞口的间距约为 1.6 km,且与被交路的高差较小。但由于主线需穿越国家级地质公园,设计团队与国家地质局和属地管理部门进行沟通,后两者均不同意线位穿越地质公园;此外,线位向南需多次跨越现状普铁线路和现状河道,且还涉及生态涵养保护区,因此,线位只能向北侧偏移。受基本农田、现状居民住房、地形地势条件等因素的限制,以及经过多次现场踏勘选线和专家会论证,最终确定了此互通立交节点位置的合理性和唯一性(见图 4)。

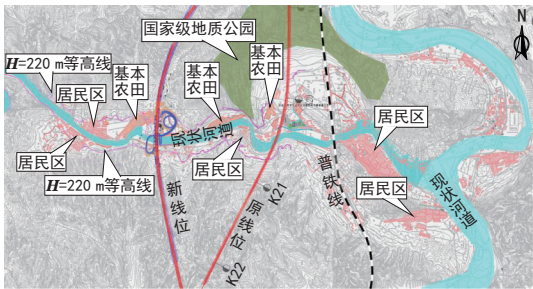


图 4 互通节点位置确定图

2.3 YY 立交节点的建设条件和制约因素

2.3.1 主线和隧道控制因素分析

立交区主线为大半径圆曲线,两侧隧道洞口间距为 600 m,主线高程为 250 m,现状被交路高程为 190 m,主线与被交路高差为 60 m。

2.3.2 现状建设条件分析

YY 立交西北象限为陡峭山体,不具备立交展线

的条件;东北象限存在大片的基本农田、烈士碑亭和大户人家的墓地;西南象限存在大片的居民住房;东南象限南侧存在国家地质公园和基本农田(见图 5)。



图 5 YY 立交布置控制因素分析图(单位:m)

2.3.3 相交河道情况分析

河道平行于被交路布置,立交区现状河道上口宽度为 40 ~ 80 m,河道规划 100 a 一遇洪水位为 191.18 m。

2.3.4 被交路概况

被交路现状等级为三级公路,现状路面宽度为 6 m,双向 2 车道;规划等级为二级公路,规划路面宽度为 8 m,路基宽度为 10 m,规划布置双向 2 车道(见图 6)。



图 6 被交路现状图

3 YY 立交节点方案研究

该立交节点发挥着连接 C 区著名景区与高速公路的作用,有设置全互通立交的需求;且此节点建成后发挥着本区域旅游景点门户的作用;在旅游旺季,本区域将迎接大批的游客,这对此立交节点提出了较高的景观要求。

该节点设计首先考虑布设山区常规的双喇叭互通立交方案,结合 2 个隧道洞口间距 600 m 的现状,不满足《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)布置全互通立交 2 个隧道洞口间距最小值须达到 1 260 m 的要求^[11]。因此,加大 2 个隧道洞口的间距,布设了 2 个全互通立交方案。方案一:先后后

出全互通方案;方案二:左进全互通方案。基于对行车运行的安全性、环境保护、立交功能、工程投资等因素的考量,本研究提出了优化立交方案三——半互通方案。以下分别对3个方案进行分析。

3.1 方案一:先入后出全互通方案

为设置全互通立交,需将主线向西南方向偏转,并将主线高程提高到280 m,以增大2个隧道洞口的间距。调整主线后,2个隧道洞口的间距为1 200 m,主线与现状被交路的高差为90 m,立交匝道规模为5.8 km,匝道设计速度为30 km/h。先进后出全互通方案需设置辅助车道,辅助车道长度为800 m(见图7)。

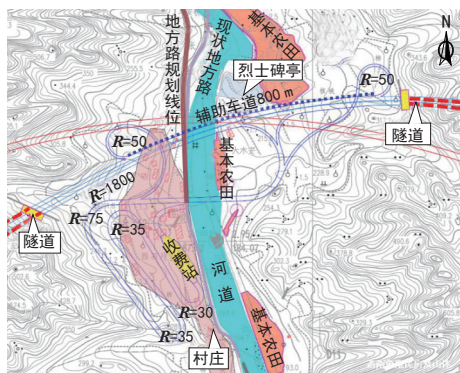


图7 先进后出全互通方案平面图(单位:m)

3.2 方案二:左进全互通方案

左进全互通方案需将主线向西南方向偏转,并将主线高程提高到250 m,2个隧道洞口的间距为700 m,主线与现状被交路的高差为60 m,匝道规模为6.5 km,匝道设计速度为30 km/h(见图8)。

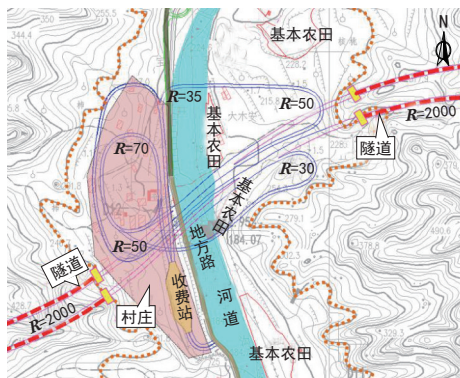


图8 左进全互通方案平面图(单位:m)

3.3 方案三:半互通方案

半互通方案立交区主线为大半径圆曲线,两个隧道洞口的间距为600 m,主线高程为250 m,现状被交路的高程为190 m,主线与被交路的高差为60 m,立交匝道规模为2.9 km,匝道设计速度为35 km/h(见图9)。

结合交通量分析,可知远景年(2046年),从西向

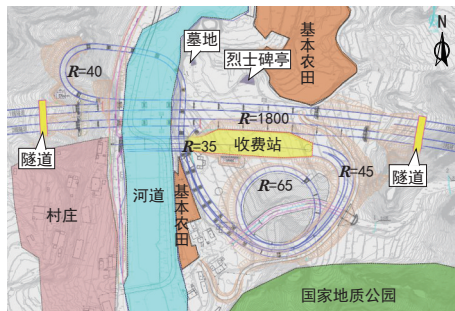


图9 半互通方案平面图(单位:m)

南的最大交通量为1 472 pcu/d;从南向西的最大交通量为1 300 pcu/d;从南向西、从西向南的交通量均不大;而从东向南的最大交通量为2 956 pcu/d,从南向东的最大交通量为3 093 pcu/d。因此,从交通远景年的交通需求方面分析,设置从南向东、从东向南的半互通立交方案是合理的。

综合考虑主线线形、交通功能、远景年交通量、立交节点布置、占地拆迁影响等因素设置半互通立交;立交只能满足向东方向的上、下高速需求,向西方向上、下立交的功能缺失(见图10)。



图10 半互通方案效果图

3.4 YY立交节点方案比选

针对本节点互通立交3个方案的技术、经济指标等进行对比(见表1)。

对先进后出全互通方案、左进全互通方案和半互通立交方案3个互通立交方案进行定性比较。

3.4.1 方案一:先进后出全互通方案

优点:一是实现了全互通的功能,减少了跨河次数;二是未侵占基本农田和烈士碑亭。

缺点:一是主线线形较差,主线半径 $R=1\ 800\text{ m}$;匝道采用迂回展线虽然克服了高差,但是线形指标较差,且匝道最小半径 $R=30\text{ m}$ 。二是先进后出的交通组织方式存在交织段,相较于右进右出的交通组织方式存在安全隐患。三是主线进洞高程为290 m,利用西南象限迂回展线,西南象限内的村庄需整体拆迁,拆迁量为 $8\ 762.6\text{ m}^2$,且对山体破坏性较大,景观效果较差,立交占地规模为 $368\ 002\text{ m}^2$,工程总投资约为9.84亿元。

表 1 方案对比表

方案对比指标	方案一:先入后出全互通方案	方案二:左进全互通方案	方案三:半互通方案
立交匝道规模/km	5.8	6.5	2.9
匝道设计速度/(km·h ⁻¹)	30	30	35
匝道最小曲线半径/m	30	30	35
匝道最大纵坡/%	4	4	3.8
占地面积/m ²	368 002	321 335	133 334
拆迁面积/m ²	8 762.6	8 762.6	900
对景观的影响	较大	较大	较小
施工工艺难度	大	适中	小
立交功能	实现全互通	实现全互通	半互通
安全隐患大小	中	很大	无
工程费+征地拆迁费/亿元	9.84	9.67	3.49
推荐意见	同深度比较	同深度比较	推荐

3.4.2 方案二:左进全互通方案

优点:一是实现了全互通的功能,降低了主线进洞高程,减少了工程规模;二是未侵占基本农田和烈士碑亭。

缺点:一是主线线形较差,主线半径 $R=2\,000\text{ m}$;匝道采用螺旋展线虽然克服了高差,但是线形指标较差,且匝道最小半径 $R=30\text{ m}$ 。二是采用左进全互通方案,车辆从匝道进入主线时,需从主线左侧快车道汇入主线,存在较大的安全隐患。三是方案利用西南象限迂回展线,西南象限内的村庄需整体拆迁,拆迁量为 $8\,762.6\text{ m}^2$ 。四是立交需跨越河道 2 次,立交占地规模为 $321\,335\text{ m}^2$,工程总投资约为 9.67 亿元。

3.4.3 方案三:半互通方案

优点:一是降低了主线进洞高程,且主线线形较好;二是未侵占基本农田和烈士碑亭;三是半互通方案利用西北、东南象限台地迂回展线,无需拆迁西南象限内大片的村庄,可以最大限度地减少对山区自然生态的破坏,立交的景观效果较好,实现了“平急两用”、绿色交通的设计理念;四是立交总投资较少,立交占地规模为 $133\,334\text{ m}^2$,工程总投资约为 3.59 亿元。

缺点:一是未实现全互通的功能,只能解决从南(北)向东和从东向南(北)方向的交通转换需求;二是跨越现有河道 2 次。

通过上述分析可知,在匝道技术指标方面,方案一、方案二的匝道最小曲线半径为 30 m ,匝道设计速度为 30 km/h ;方案三的匝道最小曲线半径为 35 m ,匝道设计速度为 35 km/h 。方案三的技术指标比方案一、方案二高。

在占地面积、拆迁面积和立交匝道规模方面,方案一、方案二的占地面积、拆迁面积和立交匝道规模相近;方案三的占地面积、拆迁面积和立交匝道规模均是最少的。

在对景观的影响方面,方案一、方案二均需将西南象限内的村庄整体搬迁并开山展线,对山体的破坏性较大,景观效果较差;方案三利用东南象限的台地展线,对山体的破坏性较小,且立交的景观效果较好。

在匝道进出主线安全性方面,方案二存在较大的安全隐患;方案一先入后出的设计存在交织段,也有一定的安全隐患;方案三的安全性较好,无交通组织方面的安全隐患。

在立交功能方面,方案一、方案二均可实现全互通功能,但实现全互通需要付出的代价过大。半互通方案可以实现当地与高速的连接,可以发挥“平急两用”的功能。

在投资方面,方案一、方案二的总投资约是方案三的 3 倍。

综合考虑以上各因素,结合互通区的交通量和 社会影响等因素,方案三具有明显的优势,拟作为推荐方案,但该方案存在立交功能缺失的问题。为评价方案三的合理性和可行性,运用雷达图分析法对 3 个方案进行综合分析,为互通立交方案的决策提供依据。

4 山区互通立交设计方案定量分析

4.1 雷达图分析法

山区互通立交设计方案比选是一项涉及多要素的综合性评价。本研究结合山区互通立交设计过程中体现出的控制因素较多的特点,采用雷达图分析法对山区互通立交设计方案进行评价,评价结果可以为山区立交设计方案的比选、决策提供依据。目前,航空、企业、工程等多个领域均已广泛应用了雷达图分析法,它能够同步展现和分析多个指标,且表达、展现清晰,结果一目了然。雷达图分析法示意图如图 11 所示。

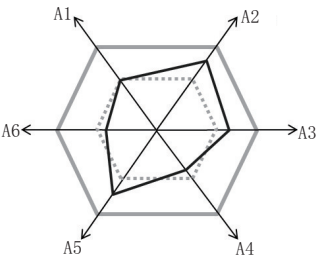


图 11 雷达图分析法示意图

雷达分析法的原理是有多个控制指标需要评价,每一个指标用对应的射线进行呈现和表达;需评价的多个指标数据组成一个封闭的多边形,多边形的周长和面积反映了评价的结果。多边形的周长体现了评价结果的均衡性,多边形的周长越长,表明其结果越均衡;多边形的面积体现了整体评价的量化结果,多边形的面积越大,表明评价的结果越优。雷达分析法有以下3个分析步骤。

4.1.1 特征向量的提取

第*i*项评价指标的多边形面积 S_i 的计算公式见式(1);第*i*项评价指标的多边形周长 L_i 的计算公式见式(2)^[12-14]。

$$S_i = \sum_{j=1}^k \frac{1}{2} n_{ij} n_{i(j+1)} \sin \theta$$
$$L_i = \sum_{j=1}^k \sqrt{n_{ij}^2 + n_{i(j+1)}^2 - 2n_{ij} n_{i(j+1)} \cos \theta}$$

(1)

(2)

式中: k 为评价指标的数量; n_{ij} 为第*i*项评价内容的第*j*项要素指标数据; $n_{i(j+1)}$ 为第*i*项评价内容的第*j*+1项(第*j*+1项为第*j*项相邻近的要素)要素指标数据; θ 为雷达分析图中2个相邻要素射线的夹角。

4.1.2 评价向量的构造

雷达图分析法一般用于多个比选方案的对比分析,在提取了特征向量后,相关的参数计算公式见式(3)~(4)^[12-14]。

$$v_{i1} = \frac{S_i}{S_{i\max}}$$
$$v_{i2} = \frac{4\pi S_i}{L_i^2}$$

(3)

(4)

式中: v_{i1} 为第*i*项评价指标的面积比,该项值越大,反映其在该评价内容中的作用越突出; v_{i2} 为第*i*项评价指标的面积与具有相同周长的面积的比值,该项值越大,反映该评价内容的指标均衡性越好。

4.1.3 评价函数的确定

为反映整体评价的结果, f_i 的值越大,表明整体方案越优。整体评价 f_i 的计算公式见式(5)^[12-14]。

$$f_i = \sqrt{v_{i1} \times v_{i2}}$$

(5)

在山区互通立交设计方案阶段,将多个方案按照以上雷达图分析法的步骤进行综合评价比选,得出量化的数据结果,为方案的最终决策提供参考依据。

4.2 案例评价

本研究基于对评价内容和评价指标的整理,运用雷达图分析法,对山区互通立交设计的3个方案进行评价。评价内容*i*=1、2、3(3项内容包括方案

一、方案二、方案三)。每一项评价内容包含评价指标*j*=1,2,...,9(9项评价指标包含立交功能、运行安全性、应急保障作用、环境保护、立交占地面积、拆迁面积、立交规模、技术指标、工程投资)。

结合《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014)、《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)的要求,以及绿色交通设计理念,形成评分标准:单项得分为0~5分(0.5分为1个评分级差)^[11,15]。为克服专家评分存在的主观因素干扰的问题,本文采用极差法对专家的评分数据进行归一化处理,消除量纲差异后再进行雷达图分析,以保证分析结果的科学性和准确性。

根据本项目的建设特点和建设意义,对不同的评价指标赋予不同的分值,评价指标赋予权重分值情况如表2所示。

表2 不同评价指标赋予权重分值

序号	评价指标	权重赋予分值/分
1	立交功能	4
2	运行安全性	5
3	应急保障作用	5
4	环境保护	5
5	立交占地面积	4
6	拆迁面积	4
7	立交规模	3
8	技术指标	3
9	工程投资	3

满足规范中“宜”的要求的指标,可得到权重赋值80%~100%的得分;满足“应”的要求但不满足“宜”的要求的指标,可得到权重赋值60%~80%的得分;不满足“应”的要求的指标,可得到权重赋值40%~60%的得分。本研究中,方案一先进后出全互通立交的雷达分析图如图12所示,方案二左进全互通立交的雷达分析图如图13所示,方案三半互通立交的雷达分析图如图14所示。图中红色虚线代表各评价指标权重的满分分值,蓝色虚线代表各评价指标权重专家打分后所得的分数值。

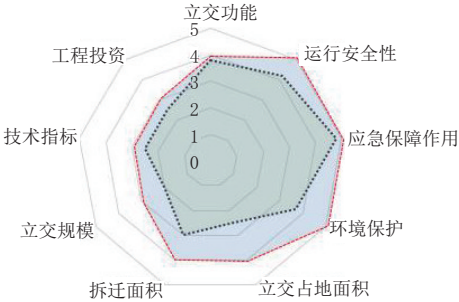


图12 方案一先进后出全互通立交的雷达分析图

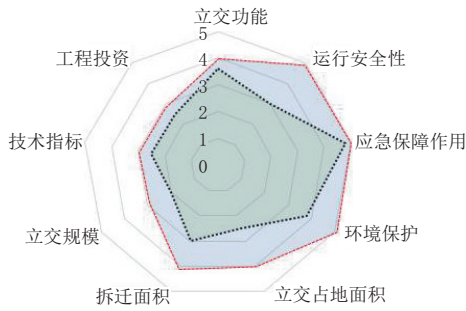


图 13 方案二左进全互通立交的雷达分析图

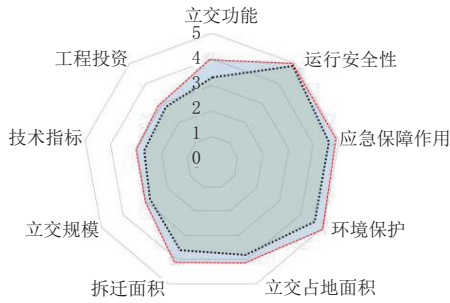


图 14 方案三半互通立交的雷达分析图

由图 12~图 14 可知,方案一、方案二的立交功能指标较高,但其他要素指标的得分不均衡;方案三的总得分较高,且在 9 个设计要素表现上更加均衡,但方案三也需要结合交通量和交通需求具体分析该立交功能不完善的问题。立交方案评价的雷达特征值如表 3 所示。

表 3 方案评价的雷达图特征值

评价内容	S_i/m^2	L_i/m	v_{i1}	v_{i2}	f_i
方案一	34.34	23.08	0.66	6.86	2.13
方案二	30.82	22.59	0.80	6.64	2.30
方案三	45.64	26.35	0.67	7.22	2.21
平均值	36.93	24.01	0.71	6.91	2.21

通过表 3 可知:第一,雷达特征值可直观地反映本研究 3 个互通立交方案的得分情况,方案三的多边形周长、面积均是最高的,说明相较于方案一、方案二,方案三在 9 个设计要素的表现上更加均衡、综合设计效果更有优势;通过雷达特征值分析,推荐采用方案三半互通立交方案。第二,雷达特征图、特征值的分析结果与定性分析的结论一致,表明在山区互通立交方案设计中,立交功能、运行安全性、应急保障作用、环境保护、占地面积、拆迁面积、立交规模、技术指标、工程投资是关键性因素,应予以重视。

5 结 论

山区高速公路立交节点受地形、地物等因素的限制,常规的立交方案难以满足现实需求。因此,本

研究提出了先入后出的全互通立交方案和罕见的左进全互通立交方案,以满足设置全互通立交的需求。然而,先入后出的全互通方案和左进全互通方案均存在行车安全隐患、拆迁困难、占地规模较大、工程投资较高等问题。为此,本研究结合景观需求、应急保障作用、远景年交通量、场地限制、拆迁规模、工程投资等因素,提出了工程规模适中、占地面积较小、拆迁量少、景观效果好、工程代价小的半互通方案,通过定性分析、比选,得出半互通方案作为推荐方案的结论。

通过雷达图定量分析法,检验了定性分析法所得结论的科学性、准确性,且定量分析的结果与定性分析结论一致。该方案得到建设单位、当地政府、业内专家的一致认可,本研究为山区高速公路立交方案的设计、决策提供了一条新路径。

通过本案例的研究表明,雷达图分析法可以在一定程度上消除人为主观因素的干扰,可为山区高速公路互通立交方案的比选提供决策依据。

参考文献:

[1] 何禄诚,宁选杰,史刚雷.山区高速公路服务型异形互通方案研究[J].公路,2019,64(11):71-75.
[2] 孙彦卓.山区某高速公路互通立交方案设计[J].公路,2022,67(1):90-93.
[3] 刘健汉,符铎砂,苗聪.山区高速公路互通立交设计要点探讨[J].公路,2012(5):35-40.
[4] 凌天清,李金龙.山区高速公路互通立交技术指标对立交影响因素研究[J].华东公路,2012(1):68-70.
[5] 刘健汉.山区高速公路立交方案设计探讨及实例[D].广州:华南理工大学,2009.
[6] 丁飞飞.适于山区地形立交选型探讨与研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
[7] 位树.山区高速公路互通式立交变异形式及适用性[D].西安:长安大学,2014.
[8] 吴彩官,王森,周天赤,等.基于模糊评价法的复杂山区互通立交方案选型研究[J].公路交通技术,2024,40(1):8-16.
[9] 唐中华,黄诗航,李宏文.收费站和隧道净距受限条件下山区高速公路立交方案设计[J].公路交通技术,2019,35(5):10-20.
[10] 孙平,邓雪芳.复杂条件下山区高速公路枢纽互通方案选择研究[J].路基工程,2021(4):3-4.
[11] JTG/T D21—2014,公路立体交叉设计细则[S].
[12] 杜波.基于雷达图法的反恐能力评价方法[J].火力与指挥控制,2013,38(9):122-125.
[13] 海俊,宋秉龙.运用雷达图分析法开展航空运输投送能力评估探析[J].国防交通工程与技术,2021,19(5):17-19;28.
[14] 李潇潇,高钰琪,游海燕,等.雷达图法的改进及其在军队医院卫勤信息化评价中的应用[J].解放军信息管理杂志,2009,16(1):18-20.
[15] JTG D20—2017,公路路线设计规范[S].