

山区不良地形条件下互通立交方案研究

范佳

(湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 山区高速公路互通立交在复杂地形、有限空间和生态敏感条件下, 面临工程经济、运营安全和环境保护的多重约束。结合湖南省典型山区互通项目, 系统开展了常规B型喇叭形、菱形和变异梨形3种互通方案的比选研究。通过构建涵盖线形指标、工程规模、环境影响和安全性的综合评价体系, 对各方案进行定量与定性相结合的综合比选。结果表明, 在极端地形条件下, 变异梨形互通通过立体叠合、曲线分级与桥隧协同等集约化设计策略, 在保障交通功能基础上, 可实现匝道长度缩短34.6%、挖方量减少30.5%、桥梁规模降低45.1%、占地面积节约46.8%, 并具有交通流完全分离和消除冲突点的优势。3种互通方案的设计特点、适用条件和比选方法探讨, 可为山区高速公路互通立交的选型及集约化设计提供理论和实践参考。

关键词: 山区高速公路; 互通立交; 变异梨形互通; 集约化设计; 地形适应性

中图分类号: U412.352; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0170-05

Study on Interchange Scheme in Mountainous Areas with Poor Terrain Conditions

FAN Jia

(Hunan Provincial Communications Science Research Institute Co., Ltd., Changsha 410014, China)

Abstract: Under the complex terrain, limited space and ecologically sensitive conditions, the mountainous expressway interchanges are confronted with multiple constraints such as engineering economy, operational safety and environmental protection. Combined with a typical interchange project in a mountainous area of Hunan Province, the comparison and research are systematically conducted on three types of interchange schemes such as the conventional B-shaped trumpet, rhombus and variant pear-shaped. A comprehensive evaluation system covering alignment indicators, engineering scale, environmental impact and safety performance is established to conduct a comprehensive comparison and selection of each scheme combining quantitative and qualitative methods. The results demonstrate that under extreme topographic conditions, the variant pear-shaped interchange can shorten the ramp length by 34.6%, decrease the earthwork excavation by 30.5%, reduce the bridge scale by 45.1%, and save the land occupation by 46.8% on the basis of ensuring traffic functions through intensive design strategies such as three-dimensional superposition, curve grading and bridge-tunnel coordination. And this type of interchange has the advantages of completely separating traffic flow and eliminating conflict points. The design characteristics, applicable conditions and comparison methods of the three interchange schemes are further discussed, which can provide the theoretical and practical references for the selection and intensive design of interchanges in mountainous expressways.

Keywords: mountainous expressways; interchange; variant pear-shaped interchange; intensive design; terrain adaptability

0 引言

山区高速公路互通立交作为衔接高速路网与地方交通的关键节点, 其设计需在复杂地形、有限空间和严格生态约束中, 综合权衡工程可行性、经济性与运营安全性。欧美等山区公路技术发达地区长期面临类似挑战, 其设计实践呈现出明确的集约化趋势。

例如, 瑞士、奥地利在阿尔卑斯山区广泛采用“紧凑型互通”, 通过螺旋匝道和多层结构来适应陡峻地形^[1]; 美国《AASHTO公路与城市道路几何设计政策》强调, 山岭地区应优先选用用地集约、结构精简的互通形式^[2]。这些经验表明, 山区互通设计正朝着“空间集约化、结构轻型化、环境影响最小化”的方向发展。

在国内, 山区高速公路互通选型和优化研究已取得系列成果。李旭^[3]指出, 单喇叭型及其变异形式在山区互通中具有主体地位和经济性优势; 刘峰

收稿日期: 2025-12-18

作者简介: 范佳(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 从事道路设计工作。

等^[4]提出了立交移位、倒挂式布局等非常规策略,以应对极端地形制约;朱献忠^[5]、王永强^[6]、高元柳等^[7]则从选型、线形与线位设计等方面提供了理论支持。工程实践方面,赵文彦^[8]结合临高高速案例,系统总结了在复杂地形下基于安全、造价、占地等多目标对 A/B 型单喇叭及变异形式进行综合比选的方法;陈勇俊^[9]以沙头枢纽改造为例,提出了主线上跨与变异直连式枢纽方案,体现了交通流主导与既有设施利用的协调;桂永庆等^[10]针对建武高速与杭新景高速交叉处高差大、隧道密、铁路交叉等复杂条件,通过多方案比选,推荐采用单环变形苜蓿叶形枢纽与 A 型单喇叭相结合的复合方案,实现了极端受限条件下功能、安全与经济性的均衡。此外,傅龙呈等^[11]论证了梨形互通在交通量均衡的复杂地形路段中具有结构紧凑、工程量省、安全性高的优势。

然而,在狭窄沟谷、大高差、隧道紧邻等多重约束叠加的极端场景下,传统互通方案仍普遍面临布线困难、结构复杂、土方工程量大、安全隐患突出等问题。为此,本文以湖南省典型山区互通为例,系统开展了常规 B 型喇叭形、菱形和变异梨形 3 种方案的比选研究,旨在为山区不良地形条件下互通立交的合理选型和集约化设计提供参考。

1 项目概况

该项目为国家高速公路网“呼和浩特至北海高速公路(G59)”的关键路段,对完善区域路网、促进地方发展及提升应急保障能力具有重要意义。研究对象为某县某镇的关键互通立交,主要承担镇域及周边车辆上下高速公路的交通转换功能。互通主线设计速度为 100 km/h,路基宽度 26 m;被交路为设计速度 40 km/h 的二级公路,路基宽 8.5 m,与项目主线顺接。

某互通 2050 年预测交通量分布图见图 1。

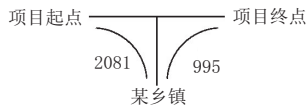


图 1 某互通 2050 年预测交通量分布图(单位:pcu/d)

2 互通布设条件分析

2.1 地形条件

互通区域属典型山区深切沟谷地貌,两侧山体高耸,中部沟谷狭窄,相对高差超过 140 m。沟谷内分布有乡道和溪流,地形约束极为严苛。

2.2 主要控制因素

互通小桩号侧紧邻隧道洞口。依据《公路立体交叉设计细则》(JTG/T D21—2014),需满足主线入口至隧道洞口最小净距不小于 100 m、隧道洞口至主线出口最小净距不小于 400 m 的规定。同时,主线走廊带内分布有民房、乡道及溪沟,进一步压缩了互通布置的可用空间。

2.3 被交路

被交路按二级公路标准设计,设计速度 40 km/h,路基宽度 8.5 m,直接连接乡镇,是地方交通的重要集散通道。

3 方案设计与比选

3.1 方案一(常规 B 型喇叭形)

受隧道洞口间距、基本农田及复杂路网等多重因素制约,为减少对自然山体的破坏,初步拟定了常规 B 型单喇叭互通方案(见图 2)。该方案展现了初步的地形适应思想,巧妙地利用既有山谷凹地布设环形匝道,并采用桥路结合的方式来衔接匝道与连接线。然而,该方案的“喇叭头”结构不可避免地形成了较长且较高的挖方边坡,这不仅与生态保护的初衷相悖,也暴露出常规方案在严峻地形条件下集约化程度的不足,从而引出了对更优方案的探索需求。

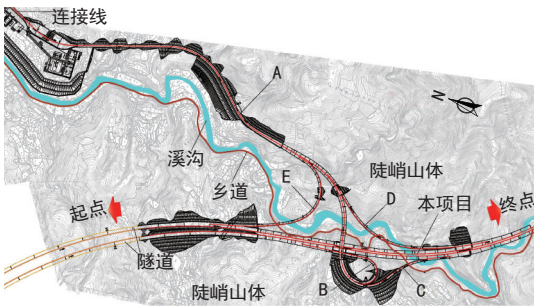


图 2 某互通方案一平面图(常规 B 型喇叭形)

匝道全长 3 545.54 m,7 座桥梁总长 1 486 m,总挖方量 110.4 万 m³,总填方量 39.8 万 m³,与地形较匹配。

方案一优点:对山体整体稳定性影响较小。

方案一缺点:(1)B 型单喇叭的内环匝道线形指标低,存在行车安全隐患;(2)桥梁规模大,工程造价高;(3)占地面积大,不利于水土保持;(4)匝道需跨越河流,桥墩对河流干扰大;(5)匝道至收费站接线距离长,交通转换效率低。

3.2 方案二(菱形方案)

基于方案一在挖方边坡上的不足,并考虑到该

互通交通量不大的特点,提出了菱形互通方案(见图3)。该方案通过将匝道尽量贴近主线、远离山体的布设方式,显著降低了山体开挖规模,体现了在土方集约方面的改进。然而,这种线形布局也带来了新问题:其设置的1处匝道平交口导致行车交织,对通行安全与运营效率构成了潜在风险。这表明,该方案在适应地形与保障行车功能之间未能取得良好平衡。



图3 某互通方案二平面图(菱形方案)

与方案一相比,方案二取消了环形匝道,改为平交形式。匝道全长3 645.33 m,7座匝道桥梁总长1 362 m,总挖方量87.1万 m^3 ,总填方量49.0万 m^3 ,与地形相适应。

方案二优点:(1)占地面积有所减少;(2)对山体的开挖扰动降低。

方案二缺点:(1)匝道平交存在安全隐患;(2)部分匝道与隧道洞口距离较近,需设置安全设施;(3)匝道跨越河流,桥墩对河流干扰大;(4)匝道接线长度仍不理想。

3.3 方案三(变异梨形方案)

为系统解决前2种方案在挖方规模、桥梁长度、跨河次数及行车安全方面的矛盾,提出了变异梨形互通方案(见图4)。该方案是一种针对极端地形条件的集约化布局,其核心理念在于通过空间重构、线形适应、结构协同与环境融合,实现工程与地形的主动适应。

3.3.1 设计理念与核心特征

变异梨形互通在传统型式基础上,通过以下设计策略实现高度集约:(1)立体叠合布局。采用3层及以上立体结构,实现全流向交通流分离,突破平面用地限制。(2)线形分级设置。依据转向功能和地形条件,动态优化匝道平纵面线形,在保障行车安全的前提下追求布局紧凑。(3)桥隧路基协同。将桥梁、隧道、路基及支挡结构进行一体化设计,灵活适应复杂地形与既有构造物约束,力求工程规模全局最小化。(4)生态环境融合。遵循“少开挖、低填筑、轻结

构”原则,最大限度地降低对原生地形和植被的扰动。

3.3.2 方案设计

基于上述理念,本方案灵巧紧凑的线形能更高效地顺应自然地形。C匝道采用环形匝道下穿主线(平曲线半径52 m);B匝道以桥梁形式上跨C匝道;主线与D匝道相接后再与A匝道相接;D匝道和E匝道通过精确控制高差实现其与主线的快捷连接(见图4)。最终,在确保行车线形顺畅安全的前提下,实现了最大限度减少山体开挖、节约工程用地的综合目标。

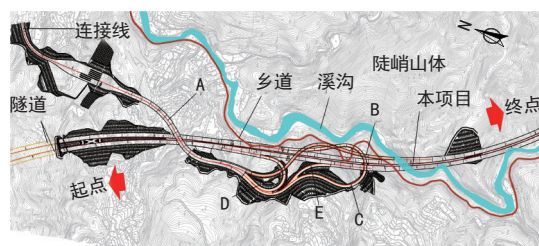


图4 某互通方案三平面图(变异梨形方案)

匝道全长2 317.48 m,5座匝道桥梁总长817 m,总挖方量76.7万 m^3 ,总填方量25.9万 m^3 ,与地形适应强。

3.3.3 方案的敏感性分析与风险考量

在肯定变异梨形互通综合优势的同时,也需对其潜在风险和适用条件进行审慎评估。

(1)地形适应性。该方案对地形起伏具有较强的适应能力,尤其适合狭窄沟谷、高差显著路段。

(2)施工难度。3层立交和曲线桥施工技术要求高,可通过BIM技术辅助、工艺创新等对施工难度进行有效控制。

(3)运营维护。全分离立交无平面冲突,后期交通管理相对简单,但立体结构需加强定期检测。

(4)扩展性。方案三布局紧凑,为远期交通量增长预留空间有限,需在设计中统筹考虑。

方案三优点:(1)空间布局极度紧凑,相较方案一节约建设用地13.92 hm^2 ,环保效益显著;(2)与地形契合度最高,减少山体开挖量33.7万 m^3 ,减少2座总长669 m的桥梁;(3)减少了跨河次数,对河流干扰最小;(4)交通流线全部分离,无冲突点,行车安全性高,转换效率优。

方案三缺点:为3层立交,对交通标志、标线的设置提出了更高要求。

3.4 综合比选指标体系

为科学评价各方案,本文遵循《公路建设项目可

行性研究报告编制办法》(交规划发[2010]178号)^[12]、《公路工程基本建设项目设计文件编制办法》(交公路发[2007]358号)^[13]中关于多方案综合比选的核心要求,并参照《公路项目安全性评价指南》(JTG B05—2015)、《公路环境保护设计规范》(JTG B04—2010)等专项标准,构建了涵盖技术可行性、工程经济性、环境影响、安全和运营4个维度的综合评价体系(见表1)。该体系遵循层次分析法的基本原理^[14],将复杂的决策问题分解为目标、准则和方案等层次,通过两两比较确定各评价指标的相对权重,从而兼顾定量工程指标与定性安全生态评价,旨在全面、客观地反映方案的综合性能。特别是针对山区互通“集约化”这一核心目标,指标体系强化了对占地面积、土石方量、结构规模等集约性指标的考量^[15]。

表1 互通方案综合比选指标体系

类别	评价指标	权重	说明
技术可行性	匝道长度/m	0.15	反映布线紧凑程度
	最小圆曲线半径/m	0.10	影响行车舒适性和安全
	最大纵坡/%	0.10	影响车辆通行能力
工程经济性	桥梁总长/m	0.15	反映结构工程规模
	土石方总量/万 m ³	0.10	反映土建工程量和环境影响
	占地面积/hm ²	0.10	反映土地资源占用
	建安费估算/万元	0.10	直接经济性指标
环境影响	最高边坡高度/m	0.05	反映生态扰动程度
	植被扰动范围/hm ²	0.05	反映生态保护水平
安全和运营	交通冲突点数量	0.05	反映行车安全风险
	隧道与匝道最小净距符合性	0.05	反映规范符合性和运营安全

3.5 方案比选

基于表1,采用模糊综合评价法^[16]对各方案进行量化评分和定性分析,结果见表2。经过综合比较,方案三(变异梨形互通)评分最高(86.7分),被推荐为实施方案。

3.6 比选结论与分析

- (1)技术性。方案三线形更优,行车安全舒适度高。
- (2)经济性。方案三建安费、土石方、占地等指标全面领先,经济效益显著。
- (3)环境性。方案三挖方量最小,边坡控制最好,对生态保护最有利。
- (4)安全性。方案三可实现全互通无冲突,隧道净距完全满足规范,运营安全性最高。

表2 互通方案对比表

指标	方案一	方案二	方案三	方案三相比方案一的优势
匝道长度/m	3 545.5	3 645.3	2 317.4	缩短 34.6%
设计速度/(km·h ⁻¹)	40	40	40	
最小圆曲线半径/m	50	50	52	
最大纵坡/%	4	4	4	
匝道桥梁长度/m	7座,共 1 486	7座,共 1 362	5座,共 817	降低 45.1%
土石方总量/万 m ³	110.4	87.1	76.7	减少 30.5%
占地/hm ²	29.75	26.26	15.83	节约 46.8%
建安费/万元	29 204	27 644	24 112	降低 17.4%
深路堑最大高度/m	52	50	50	
深路堑最大长度/m	745	562	360	
植被扰动范围/hm ²	17.85	16.18	9.82	节约 45.0%
冲突点数量	0	2	0	全分离,无冲突
隧道净距符合性	符合	局部不足	完全符合	
综合评分	68.5	72.3	86.7	
结果				推荐

4 3种互通方案的适用条件

基于上述比选研究和工程实践,常规B型喇叭形、菱形、变异梨形互通在山区不良地形条件下各有其适用场景和设计要点。表3对3种互通方案的适用条件进行了总结,结论可供类似项目选型参考。

5 结 语

- (1)在山区不良地形条件下,变异梨形互通通过立体叠合、线形分级与结构协同等集约化设计策略,能显著优化工程规模、环境影响和安全性能。
- (2)建立的“技术-经济-环境-安全”四位一体综合评价体系,为山区互通方案比选提供了系统、量化的决策方法。
- (3)层次分析法-模糊综合评价方法的深度集成应用,为类似山区复杂工程的精细化设计和科学化决策提供了可复制的技术范式和方法论参考。
- (4)建议在类似地形条件下,可优先考虑变异梨形互通方案,并结合具体工程条件进行动态优化。未来研究可进一步探索该型式在不同地形、交通量条件下的适用边界和设计参数优化。

表3 3种互通方案的适用条件总结

方案	推荐适用条件	设计注意事项
常规B型喇叭形	1. 地形相对平缓,具备布设“喇叭头”的局部开阔空间;2. 交通转换需求以某一方向为主,环形匝道方向交通量适中;3. 对山体整体稳定性要求高,需避免大规模深挖方路段	1. 应优化内环匝道线形,确保行车安全;2. 需重点处理“喇叭头”处的高边坡,加强防护和排水设计;3. 桥梁布设应尽量减少对河流、沟谷的干扰
菱形互通	1. 地形狭窄、用地极度受限,但主线与被交路高差不甚显著;2. 转向交通量较小,且左转交通可通过路网分流或允许平面交织;3. 工程造价敏感,优先追求土石方和占地的最小化	1. 必须设置完善的信号控制或停车让行标志,保障平交口安全;2. 匝道与隧道洞口距离需严格满足规范,必要时设置警示和防护设施;3. 宜进行交通仿真,评估平交口通行能力和延误
变异梨形互通	1. 地形极端复杂,如狭窄沟谷、大高差(>100 m)、隧道紧邻等多重约束叠加路段;2. 交通功能要求高,需实现全流向、无冲突的快速转换;3. 生态保护要求严格,追求最小化开挖、最少占地的绿色建设目标	1. 应采用BIM技术进行三维协同设计,解决复杂空间冲突;2. 需对曲线桥、多层立交等复杂结构进行专项施工组织设计;3. 运营期需加强立体层交通标志、标线及照明系统设置和维护

参考文献:

[1] Federal Roads Office (FEDRO). Design manual for Swiss National Roads [M]. Bern, Switzerland: FEDRO, 2018.

[2] American Association of State Highway and Transportation Officials. A policy on geometric design of highways and streets [M]. 7th ed. Washington, D.C.: AASHTO, 2018.

[3] 李旭. 山区高速公路一般互通式立交设计浅析[J]. 湖南交通科技, 2010(6): 27-29.

[4] 刘峰,王维昭,齐向军. 浅谈山区高速公路互通立交设计体会[J]. 湖南交通科技, 2012(1): 39-41.

[5] 朱献忠. 浅谈互通式立交线形设计中的几个要点[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(6): 44-47.

[6] 王永强. 单喇叭形互通式立体交叉的设计及优化[J]. 公路工程, 2008, 33(2): 104-106; 110.

[7] 高元柳. 单喇叭互通式立体交叉的线位设计[J]. 湖南交通科技, 2009, 35(3): 11-14.

[8] 赵文彦. 山区互通方案选型研究[J]. 福建交通技, 2018(3): 20-23.

[9] 陈勇俊. 山岭地区高速公路互通设计方案分析[J]. 福建交通科技, 2019(3): 20-22.

[10] 桂永庆,汤晓影. 特殊条件下互通式立交设计方案比选[J]. 福建交通科技, 2025(5): 76-79.

[11] 傅龙呈,赵丹婷. 梨形互通在山区高速公路中的优势[J]. 价值工程, 2020, 39(10): 170-172.

[12] 交规划发[2010]178号 公路建设项目可行性研究报告编制办法[S].

[13] 交公路发[2007]358号 公路工程基本建设项目设计文件编制办法[S].

[14] Saaty T L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[15] 徐一岗,程建川,杨宏志. 适应复杂地形的互通式立交群集约布设方法研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(8): 98-105.

[16] 王晓东,李建国,张明. 基于模糊综合评价的山区公路互通方案优选研究[J]. 公路工程, 2017, 42(3): 165-170.

(上接第94页)

质问题的初步研究[J]. 长沙交通学院学报, 2003, (1): 19-24.

[7] 陈孜,黄观文,白正伟,等. 基于低成本毫米级GNSS技术的膨胀土边坡现场监测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 214-224.

[8] 郝建斌,张焕,李耕春,等. 粉煤灰-剑麻纤维复合改良膨胀土强度及裂隙发育特性[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2620-2628.

[9] 孙树林,郑青海,唐俊,等. 碱渣改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1608-1612.

[10] 孔令伟,周葆春,白颖,等. 荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3036-3042.

[11] 李进. 膨胀土改良的室内试验研究及地基胀缩变形分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[12] 虞海珍,李小青,姚建伟. 膨胀土化学改良试验研究分析[J]. 岩土力学, 2006(11): 1941-1944.

[13] 叶万军,万强,申艳军,等. 干湿循环作用下膨胀土开裂和收缩特性试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(4): 541-547.

[14] 谭波,徐良,倪秋奕,等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙发育规律及影响因素[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(1): 93-99.

[15] 吕海波,曾召田,赵艳林,等. 膨胀土强度干湿循环试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3797-3802.

[16] 徐彬,殷宗泽,刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44-50.

[17] 丁锋. 粉煤灰-赤泥-钢渣微胶凝材料特性研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025(2): 289-294..

[18] 边加敏,蒋玲,王保田. 石灰改良膨胀土强度试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(2): 38-43.

[19] 高建伟,余宏明,钱玉智,等. 水泥改良膨胀土强度特性试验研究[J]. 公路, 2013, 58(12): 165-168.

[20] 冯美果,陈善雄,余颂,等. 粉煤灰改性膨胀土水稳定性试验研究[J]. 岩土力学, 2007(9): 1889-1893.

[21] 刘剑,关钰荣,王会昊,等. 水土化学力学效应研究现状与展望[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4019-4032.

[22] 丁国权,陈凯. 激光粒度仪在特殊土颗粒分析试验中的应用[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(9): 123-129.

[23] 李斌,鞠远江,宋博,等. 膨胀土裂隙对渠坡渗透性及工程效应影响研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 137-144.