

# 山区公路线形优化设计与行车安全评价研究

林早清

云南畅通工程勘察设计有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i9.4888

**[摘要]** 面向山区公路受地形起伏、地质灾害敏感与气象多变影响而导致线形约束强、事故风险高的问题,构建线形指标体系与行车安全评价一体化研究框架。研究以DEM与GIS提取控制点与走廊边界,完成平曲线半径与超高、纵坡坡度与坡长、平纵组合连续性的合规校核;基于V85速度预测与一致性指标计算识别突变区段,并采用交通仿真与安全性能函数结合经验贝叶斯修正实现风险量化与方案比选,成果可为山区公路线形优化与安全设施配置提供可复核依据。

**[关键词]** 山区公路; 线形优化; 一致性评价; 速度仿真; 事故风险模型

**中图分类号:** F540.3 **文献标识码:** A

## Research on Linear Optimization Design and Driving Safety Evaluation of Mountainous Highways

Zaoqing Lin

Yunnan Changtong Engineering Survey and Design Co., Ltd.

**[Abstract]** To address the challenges of strong linear constraints and high accident risks in mountainous road networks caused by terrain undulations, geological hazard susceptibility, and meteorological variability, this study establishes an integrated research framework combining linear index systems with traffic safety evaluation. The methodology utilizes DEM and GIS data to extract control points and corridor boundaries, enabling compliance verification of horizontal curve radii, overpass elevations, longitudinal slope gradients, slope lengths, and horizontal-vertical alignment continuity. V85 speed prediction models and consistency index calculations identify critical transition zones, while traffic simulation combined with safety performance functions and empirical Bayesian refinement techniques enable risk quantification and alternative scheme comparisons. The findings provide verifiable references for optimizing road alignments and configuring safety infrastructure in mountainous regions.

**[Key words]** Mountainous road; Linear optimization; Consistency evaluation; Speed simulation; Accident risk model

### 引言

山区公路常处于高边坡、深切沟谷与急弯长坡组合环境,线形设计不仅受最小半径、最大纵坡与视距约束制约,还受滑坡崩塌、汇水冲刷与冰雪低附着等外部条件放大影响,导致运行速度波动与驾驶负荷集中。为提升设计的可预期性与安全裕度,有必要将线形参数校核、运行速度预测、微观仿真冲突分析及事故频数预测纳入同一技术链路,形成从方案生成到风险闭环校正的评价方法体系,为山区公路安全提升与工程经济性优化提供支撑。

### 1 山区公路线形优化设计的约束条件

山区公路线形优化设计的约束条件具有强耦合与多源不确定特征,需在控制性地形、工程地质与行车运行边界内实现指标

协调<sup>[1]</sup>。地形约束以DEM栅格、等高线密度与坡度分级为基础,结合山脊线、沟谷线与控制点提取确定选线走廊,并通过纵坡控制线与挖填平衡约束限制路线爬升与绕行。地质约束需叠加滑坡、崩塌、泥石流易发性分区与断裂带影响范围,设置避让缓冲带并校核边坡稳定安全系数,必要时采用抗滑桩、锚索框架与排水系统的可实施性作为反向约束。水文与气象约束体现在汇水面积、洪峰流量与冲刷敏感段识别,控制桥涵孔径与路基排水体系,兼顾冰雪、团雾与横风对最小停车视距和附着系数的影响<sup>[2]</sup>。运行约束以设计速度、横向力系数与侧向余量为核心,约束平曲线半径、缓和曲线长度、超高率与超高渐变率,同时满足最大纵坡、最小凸凹竖曲线半径及平纵组合协调性要求,并以限速过渡段与连续下坡安全需求校核逃生车道与减速设施布设条件。

## 2 线形指标体系构建

### 2.1 平曲线半径与超高参数校核

平曲线指标校核以设计速度为主控变量,围绕侧向力平衡、横向附着裕度与驾驶操纵稳定性建立参数约束。半径取值需满足横向加速度与侧向摩擦需求限值,工程复核中常将侧向摩擦系数控制在0.10至0.12区间,并结合超高率共同分担横向力。对小半径复曲线与反向曲线组合,应开展曲率连续性与曲率变化率检验,控制方向盘输入频率与车辆横摆响应峰值,并结合视距展开核算停车视距与超车视距,确保夜间条件下反光标线与轮廓标引导连续,降低误判轨迹的风险<sup>[3]</sup>。

### 2.2 纵坡坡度与坡长匹配校核

纵坡校核应从车辆动力学与制动安全双维度建立坡度与坡长的匹配指标,重点约束重车爬坡速度损失与长下坡制动热衰退风险。山区路段纵坡常取6%至8%,当连续爬坡导致重车末端速度低于40 km每小时或与小客车形成超过20 km每小时的速度差时,应触发爬坡车道设置论证,并复核爬坡车道起点视距与渐变段长度,避免并入冲突。长下坡段应以坡度与坡长乘积刻画风险强度,工程筛查常将坡度不小于5%、连续坡长超过2 km作为重点风险阈值,同步开展制动能量与制动鼓温升趋势评估,校核紧急停车带或避险车道的布设条件。

### 2.3 平纵组合连续性检验

平纵组合连续性检验面向三维线形一致性,核心在于避免几何突变引发视觉错觉、速度突降与驾驶工作负荷集中。检验应将平曲线、竖曲线、缓和曲线与超高过渡段统一到同一里程基准,核查平曲线控制点与竖曲线顶点的相对位置关系,防止小半径平曲线与凸竖曲线叠加造成视距遮挡与转弯预判不足<sup>[4]</sup>。可采用运行速度一致性指标进行量化约束,通常以相邻线元85百分位运行速度差控制在10 km每小时以内作为判据,并对速度梯度与曲率变化率进行分级筛查。

## 3 线形优化设计方法

### 3.1 选线走廊比选权重评价

选线走廊比选应在GIS环境下构建多准则评价体系,其开发框架如图1所示,将地形约束、灾害敏感性、工程规模与用地生态约束转化为可计算因子并进行空间叠加。基础层建议采用5至10 m分辨率DEM提取坡度与起伏度,结合水系缓冲区、居民点影响区、基本农田与生态保护红线形成硬约束边界,并对滑坡、崩塌、泥石流易发区设置避让带,避让距离宜控制在200至300 m范围以降低不良地质穿越概率。评价因子可按坡度分级赋值,坡度大于35度区段施加惩罚系数以抑制高填深挖方案。权重确定宜采用层次分析法形成主观权重,再以熵权法对指标离散度进行客观修正,得到稳定权重向量;工程实践中地形起伏与坡度权重可取0.30左右,地质灾害敏感性0.20左右,桥隧比与土石方规模0.25左右,用地生态约束0.25左右。综合适宜度指数可采用加权线性叠加或TOPSIS贴近度计算输出走廊排序,并同步给出挖填平衡指标与平均运距估算,通常将挖填比控制在0.90至1.10、平均运距控制在1.5 km以内作为经济性筛选阈值,为后续

线形参数优化提供走廊边界与控制点清单。

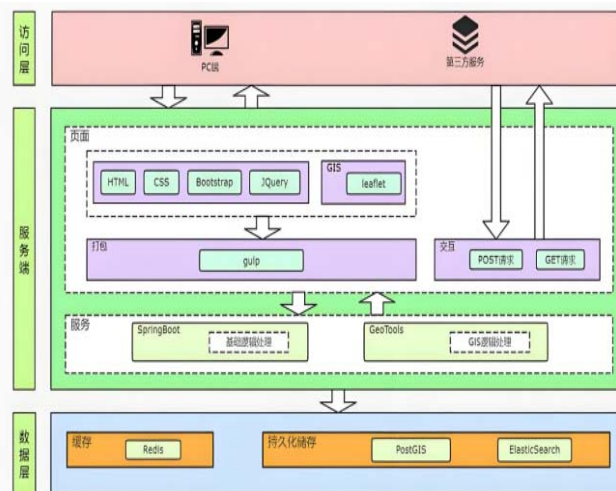


图1 GIS环境开发框架

### 3.2 平纵断面协同优化

平纵断面协同优化应以三维线形一致性和工程可实施性为目标,建立平曲线半径、缓和曲线长度、竖曲线半径、纵坡坡度与坡长等决策变量的联合迭代机制。约束条件需同时满足设计速度对应的最小半径与超高率限制,山区路段超高率上限常取6%至8%,侧向摩擦系数按0.10至0.12控制以保证侧向余量;纵坡一般控制在6%至8%,当连续长下坡坡度不小于5%且坡长超过2 km时需触发制动安全复核并约束安全设施预留条件。求解策略可采用动态规划进行纵断面控制线搜索,再用遗传算法或模拟退火对平面线形参数进行全局寻优,迭代输出每轮的桥隧比、最大填挖深度、边坡稳定安全系数校核结果与速度一致性等级,直至各指标收敛且满足施工组织与运维条件要求,实现几何线形与工程规模的同步最优<sup>[5]</sup>。

### 3.3 交叉口与特殊路段线形整合

交叉口与特殊路段的线形整合应以运行连续性与冲突可控为原则,将几何线形、交通组织与安全设施在同一里程链上统筹协调。平面交叉口宜布设在直线或大半径曲线段,交叉口前后线形应保持视距贯通与超高稳定,进口道纵坡宜小于3%以保障起步、停车与排队稳定;交叉口间距在山区可控制在300至500 m,以降低干扰叠加。

## 4 行车安全评价模型与风险量化

### 4.1 一致性评价指标计算

一致性评价以运行速度连续性和线形几何突变程度为核心,通常将路线按20至50 m里程间隔离散,建立速度预测模型并输出85百分位运行速度V85序列。指标计算包括相邻线元速度差 $\Delta V$ 、速度梯度GV、曲率变化率CCR、设计一致性指数CI等,并对停车视距ASD与需求视距SSD进行逐段校核,定位视距亏损区与高工作负荷区。对平曲线段需同步核算侧向摩擦需求 $f_{需}$ 与超高率 $e$ 匹配,形成侧向余量指标SR,避免在小半径叠加长下坡时出现侧向余量不足。为便于工程判别,可将 $\Delta V$ 、GV、CCR按阈值分级并进行红黄绿标记,输出一致性风险分布图。如表1所示,圆曲线

半径降低与纵坡增大往往对应V85下降和 $\Delta V$ 增大,需作为后续优化的优先区段。

表1 线形一致性指标示例计算结果

区段编号	线元类型	半径R m	纵坡 i %	V85 km每小时	$\Delta V$ km每小时	CCR 1每米
K0+200至K0+400	直线	9999	2	68	3	0
K0+400至K0+650	圆曲线	450	3.5	62	6	0.0018
K0+650至K0+850	圆曲线	250	5.5	53	9	0.0036
K0+850至K1+050	缓和段	过渡	5.5	55	2	0.0024
K1+050至K1+250	直线	9999	1.5	65	10	0

#### 4.2速度协调性仿真分析

速度协调性仿真以三维线形为基础构建微观交通模型,常用VISSIM或Aimsun完成跟驰与换道行为刻画,并将平纵断面与超高参数映射为OpenDRIVE几何文件以保证曲率和坡度连续。模型标定可采用实测V85、车头时距分布与重车比例,跟驰可选Wiedemann 99或IDM参数组,重车动力学按功率质量比与换挡逻辑配置,典型上坡段可观测重车速度损失10至25 km每小时并形成车速离散现象。输出指标除速度剖面外,还应提取加速度分布、纵向减速度峰值、密度波传播速度与排队长度,用于识别长下坡末端与急弯入口的速度突降点。

表2 事故风险模型变量敏感性示例结果

变量	单位	弹性系数E	标准化系数 $\beta$	Sobol贡献率 %
AADT	veh/每天	0.62	0.48	31
曲线半径R	m	-0.45	-0.41	24
纵坡 i	%	0.28	0.22	12
视距亏损长度	m	0.33	0.26	15
路肩宽度	m	-0.18	-0.14	6
出入口密度	个/km	0.21	0.17	8
超高不足量	%	0.16	0.12	4

#### 4.3事故风险预测与敏感性分析

事故风险量化宜采用安全性能函数SPF与经验贝叶斯方法,对预测事故频数进行校正以降低样本波动影响。建模时可选负二项回归刻画过度离散,解释变量包含年平均日交通量AADT、曲线半径R、纵坡i、车道宽度、路肩宽度、出入口密度、视距亏损长度、超高不足量等,并输出期望事故数与置信区间。如表2所示,AADT与小半径曲线通常具有更高弹性,纵坡与视距亏损对重伤事故占比更敏感,适合作为优先治理对象。最终输出可形成区段级风险热力图与措施优先级清单,为线形优化和安全设施配置提供量化依据。

#### 5 结语

山区公路线形优化与行车安全评价需要坚持三维线形协同优化与风险量化一体推进,通过走廊比选锁定约束边界,依托平曲线超高、纵坡坡长与平纵组合连续性校核消减几何突变,结合一致性指标、速度仿真与事故风险模型识别高风险区段并验证措施有效性。研究成果可为山区公路方案比选、限速组织与安全设施配置提供可复核的技术依据,提升运行安全裕度与工程经济性。

#### 【参考文献】

- [1]倪小丰.基于地形与地貌对公路总体路线的优化设计[J].建材发展导向,2025,23(17):13-15.
- [2]甘世勇.山区高速公路不良线形路段防眩设计优化与实践[J].交通世界,2025,(16):12-14.
- [3]张驰,王茜茹,向宇杰,等.基于平纵组合的山区高速公路连续下坡路段行车安全评价方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(05):78-90.
- [4]杨佳娜.山区公路路线线形平面设计方法探讨[J].交通世界,2023,(29):95-97.
- [5]李新博.山区高速公路长大下坡路段安全评价及行车安全提升技术研究[D].重庆交通大学,2021.

#### 作者简介:

林早清(1987--),女,汉族,云南昭通人,本科,工程师,主要从事:公路设计工作。