

高速公路互通立交匝道线形设计优化分析

周健朗

新疆交通规划勘察设计院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830006

【摘要】：互通立交匝道在有限空间内连续完成减速、转向、纵坡转换与分合流，局部指标合规并不必然获得连续稳定的驾驶过程。针对平面、纵断面、超高与视距分项设计容易造成参数断裂的问题，建立以运行连续性为主线的协同优化方法。通过锁定接入点、关键控制点和分合流鼻端，将曲率、纵坡、超高渐变率、停车视距及土建规模纳入同一方案集，再利用分层指标完成比选和校核。分析可见，设计优化的重点应从追求单个几何指标的极值转向控制相邻设计元素的变化节奏，并以运行安全、用地工程量和可实施性共同确定最优解。

【关键词】：高速公路；互通立交；匝道线形；协同设计；方案优化

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.073

引言

互通立交的功能并非简单地把两条道路连在一起，而是让驾驶人在路线识别、速度调整 and 方向选择的连续过程中完成转换。实务中，平面半径、纵坡、竖曲线、超高和加减速车道常由不同专业或不同阶段分别确定，满足分项下限后仍可能出现组合不良。几何参数协调、出口匝道安全评价与数据处理必须在同一互通设计链上完成衔接。本文以匝道全过程运行连续性为对象，讨论控制点锁定、平纵横协同、分合流组织及多目标评价的具体方法。

1 互通立交匝道线形设计优化的实现路径

匝道线形是一条由设计速度、曲率变化、纵坡转换、横向力分配和视距条件共同控制的空间轨迹。优化不宜从某个局部半径入手，而应先确定入口分流鼻、主要转向点、跨线位置、出口合流鼻和高程控制点的层级，再区分不可移动的刚性边界与允许调整的弹性参数。完整设计链可概括为“交通需求定功能—运行速度定节奏—空间控制定轴线—平纵横协同定形态—综合评价定方案”。对空间受限或地形破碎区段，应保留两个以上具有不同控制逻辑的候选轴线，避免在唯一初始线位上反复修补。山区互通选型中，地形、桥隧分布与用地边界必须在线形确定前进入方案比选，否则控制点只能在后续阶段被动迁就^[1]。这一前置比选能够避免后续专业深化反复移动关键控制点，并保留候选轴线之间的实质差异。

1.1 平面线形参数协同优化

平面优化的首要任务是保持曲率连续，而不是将每个圆曲线半径单独做大。当相邻设计元素的曲率差过大时，驾驶人需要在短距离内重新建立方向感，方向盘输入和横向加速度都会出现尖峰。设计时将入口速度、主曲线半径 R 、缓和曲线参数 A 、转角及出口可用长度放在同一参数表中联动调整。对环圈匝道，入口缓和段承担减速与超高建立双重任务，出口缓和段还要为合流视距和加速车道留出余量；两端不应机械地采用对称参数。连续式或半定向匝道则应减少短直线夹在同向曲线之

间的组合，必要时以卵形线或复曲线重构曲率变化。线形与数据处理技术的结合，可以让坐标、里程和曲率校核保持同一基准，并把局部调线对下游元素的影响显式化^[2]。校核不只读取最小半径，还要沿里程输出曲率梳状图，定位突变、反向切换和短元素。匝道线形协同设计与动态修正闭环见图1。

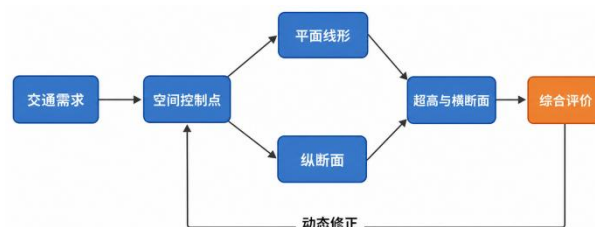


图1 匝道线形设计优化闭环

图1中，空间控制点同时约束平面线形和纵断面，两者在超高与横断面环节合流。综合评价若发现视距、工程量或专业冲突异常，反馈线应回到空间控制点，而不是只修饰末端参数。

1.2 基于视距校核的纵断面决策优化

纵断面不能只以最大纵坡和最小竖曲线半径作为合格判据。匝道的速度正在变化，纵坡、曲率与视距对制动需求的影响应在运行过程中叠加判断。凸形竖曲线与平面小半径重合时，驾驶人同时承受视线截断和转向负荷；凹形竖曲线接近分合流鼻时，路面低点、照明和标志视认也会一并成为控制条件。优化可按两步展开：第一步沿行车轨迹生成动态视点，连续检索前方路面和障碍物边界；第二步将可用视距 S_a 与不同速度状态下的需求视距 S_r 比较。可以定义视距裕度系数 $\eta_s = S_a / S_r$ ，其值越接近1，设计对边坡、护栏、墩柱和标志位置变化越敏感。式中 S_a 为沿轨迹实际可获得的视距， S_r 为相应运行条件的需求视距。该系数只用于候选方案的同口径比较，不取代现行规范验算。出口匝道的可用视距应与标志识别、换道决策和减速过程联合审查，单独满足停车视距仍可能遮蔽信息负荷风险^[3]。校核时还需沿连续里程检查最低裕度位置，防止单个断面合格掩盖相邻区段的视线突变。候选方案的视距裕度系数按式(1)计算。

$$\eta_s = \frac{S_a}{S_r} \quad (1)$$

式(1)中: η_s 为视距裕度系数; S_a 为沿行车轨迹可获得的视距, m; S_r 为相应运行条件的需求视距, m。式(1)中, 注册变量 η_s 越接近 1, 表明方案对局部障碍物和纵断面微调越敏感; S_a 与 S_r 只有在视点、轨迹和速度口径一致时才可比较。

1.3 超高渐变与横断面协同优化

超高是平面线形在横断面上的直接响应, 其数值及建立方式会同时改变横向力分配、轮迹高程和路面排水。常见的矛盾不在于最大超高不足, 而在于缓和曲线长度被减速车道鼻端、纵坡变化或桥头伸缩缝压缩后, 旋转轴与渐变节奏无法兼顾。协同优化先确定旋转轴。单向匝道可以内侧边缘或中心线为轴, 多车道匝道还要检查外侧车道的附加纵坡和轮迹差。随后将横坡过零点、全超高达到点与平面曲率变化点对应, 不让车辆在曲率已明显增大后仍长时间处于反向横坡。末端用横断面高程运算复核出入口与主线的拼接关系。若仅沿匝道中心线检查纵断, 外缘可能产生局部反坡或过大附加纵坡。匝道桥方案优化中, 线形、桥跨和构造布置需要同步收敛, 以免旋转轴调整后再被伸缩缝或桥墩位置迫使回调^[4]。旋转轴、桥面横坡和构造接缝在同一里程坐标中复核, 才能识别外侧轮迹的附加纵坡异常。

1.4 分合流区运行决策优化

分合流区是匝道线形与主线运行发生直接耦合的位置。分流端的核心是让识别、换道和减速按先后顺序完成, 合流端则需要有限长度内完成加速、寻找可接受间隙与横向汇入。设计中应先用主线交通量和匝道比例识别干扰等级, 再确定鼻端位置、加减速车道形式及辅助车道的必要性。出口前不宜将小半径平曲线、竖曲线变坡点与标志信息高负荷区叠在同一短段内。鼻端之后的主曲线参数应与出口速度相匹配, 避免“鼻端前不减速、鼻端后急制动”。合流端的匝道末端要提供稳定视线, 过长的急曲线会推迟驾驶人对主线车流的观察。对交织距离短、汇入比例高的方案, 可将几何方案导入微观交通仿真, 检查排队是否回溢至匝道主曲线。半苜蓿叶匝道的分流比例、交织长度与信号协调会共同改变排队位置, 线形和运行组织应在方案阶段联合仿真验证^[5]。排队尾端若进入主曲线, 应优先调整交织组织或辅助车道, 而非继续压缩匝道几何过渡长度。出口匝道的线形分段与视距控制关系见图 2

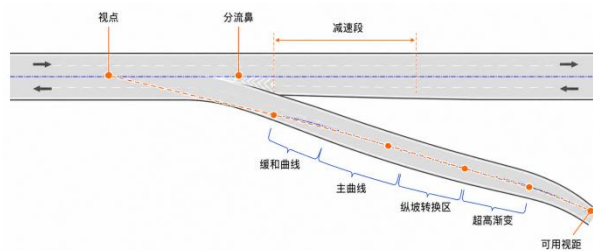


图 2 出口匝道线形控制关系

图 2 中, 视点位于分流鼻上游, 可用视距指向匝道前方目标。减速段、缓和曲线和超高渐变不应被压缩到同一短段, 纵坡转换区则宜避开曲率快速增大的位置。

1.5 多专业约束下方案决策优化

互通线形在平面上占用土地, 在纵向上决定桥墩和填挖高度, 在横断面上还影响排水、护栏、照明及标志的布置空间。单纯以路线长度或土建造价选择方案, 容易把运行代价转移到后期。决策优化先建立约束清单: 规范下限、用地红线、重要构造物净空、洪水位及环境敏感点属于不得突破的刚性条件; 半径增量、桥梁比例、填挖方和局部占地则作为可权衡变量。候选方案应保持功能等价, 不能用减少一条匝道或降低服务水平的方式换取工程量优势。同时, 对每个方案同步生成路线、桥涵、土方、用地及安全设施工程量, 检查某一指标的降低是否引起其他专业的异常增长。绿色公路理念下的互通优化应将资源占用与工程功能并行比较, 并把新增用地、高边坡和桥梁增量追溯到具体调线动作^[6]。评审记录应保留每轮调整的参数、收益和代价, 使“为何改线”能够追溯。

2 匝道线形优化实施效果评估与提升策略

优化效果不能用“线形更顺”一句话判定, 而要回到可计算、可复核的指标。评估宜采用三层结构: 第一层是刚性合规性, 任一规范控制项不满足即剔除; 第二层是运行连续性, 比较速度差、曲率变化、视距裕度和横向力变化; 第三层是工程适应性, 综合用地、桥隧比、土方、施工组织与养护可达性。三层不宜直接混成一个分数, 先做门槛筛选, 再对合格方案排序, 可以防止高工程量优势掩盖安全短板。互通安全性与线形优化应从设计要素的组合关系审查方案, 先排除组合短板, 再比较工程量和资源占用的相对优势^[7]。实施阶段还应将施工图反馈、机电设施净空和现场地质更新纳入动态复核, 避免初步设计的优势在专业深化中被消耗。

2.1 实施效果评估指标体系构建

指标体系应尽量减少重复表达。安全维度可选取最小视距裕度、最大速度降幅、曲率变化率和分合流冲突等级; 舒适维度选取横向加速度变化、超高渐变率及附加纵坡; 工程维度选取新增用地、桥梁长度、土石方和高边坡数量; 实施维度则关注控制点可调范围、专业冲突数与施工分期条件。在各方方案纲不同时, 先用同一方案集的上下限完成无量纲化, 再计算综

合值 $F = \sum w_i \cdot z_i$ 。式中 w_i 为第 i 项指标权重, z_i 为无量纲化指标值; 收益型指标与成本型指标应按相反方向处理。权重不宜由路线专业单方给定, 可由安全、建设、运营和环保参与者先独立评判, 再对差异较大的指标开展敏感性分析。若权重小幅调整就导致排序翻转, 说明候选方案并无稳定优势, 还需回到线形参数层重新优化, 而不应用主观权重确定结论。

2.2 典型匝道方案分析与效果评估

以受地形与已有构造物夹持的单车道环圈匝道为方案情景。原方案为避让桥墩, 在主曲线前布置了短直线, 同时把变坡点放在缓和曲线中段。改进方案保持分合流鼻端不变, 通过小幅平移主曲线圆心、以卵形线取代短直线, 并将竖曲线移至曲率较稳定的区段。两方案按统一情景参数口径比较: 原方案最小视距裕度 1.08、最大相邻曲率差 0.014 m^{-1} 、新增用地 7.6 hm^2 、桥梁长度 420 m; 改进方案分别为 1.24、 0.009 m^{-1} 、 7.9 hm^2 和 438 m。这组方案设定用于比较参数改变方向和工程代价。改进方案增加 0.3 hm^2 用地和 18 m 桥长, 却换取了更高的视距余量和更平缓的曲率过渡。若项目的用地红线尚有弹性, 这种交换具有合理性; 若涉及生态保护刚性边界, 则应保留原用地范围, 转而调整桥跨和缓和曲线组合。可见, 评估结果必须结合边界条件解读, 不能将某一情景下的最优参数复制到其他互通。环圈匝道候选方案的情景参数比较见表 1。

表 1 环圈匝道候选方案情景参数比较

方案	最小视距裕度	最大相邻曲率差/ m^{-1}	新增用地/ hm^2	桥梁长度/m
原方案	1.08	0.014	7.6	420.00
改进方案	1.24	0.009	7.9	438.00
折中方案	1.17	0.011	7.7	429.00
视距优先方案	1.30	0.008	8.2	452.00
用地约束方案	1.12	0.012	7.5	424.00
桥长约束方案	1.15	0.010	7.8	415.00

参考文献:

- [1] 董德英. 高速公路互通立交匝道线形设计优化研究[J]. 汽车画刊, 2025, (12): 185-187.
- [2] 伍奇. 互通式立交工程线形设计[J]. 工程技术研究, 2025, 10(1): 193-195.
- [3] 周鹏, 俞谦. 高速公路互通立交出口匝道安全设计与评价[J]. 运输经理世界, 2024, (19): 22-24.
- [4] 邹辉煌, 陈亚沛, 刘延. 互通立交线形设计与数据处理技术的探究[J]. 科技资讯, 2024, 22(9): 154-156.
- [5] 黎永基. 山区高速公路互通立交选型研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(8): 185-187.
- [6] 李怀兵. 互通立交线形设计与数据处理技术探究[J]. 北方建筑, 2023, 8(6): 43-46.
- [7] 陈君翔. 互通立交匝道桥设计方案优化与应用研究[J]. 大众科技, 2023, 25(7): 37-40.

表 1 中, 改进方案的最小视距裕度由 1.08 提高到 1.24, 最大相邻曲率差由 0.014 m^{-1} 降至 0.009 m^{-1} ; 代价是新增 0.3 hm^2 用地和 18 m 桥长。该交换是否合理, 应结合用地刚性边界和桥跨可调空间判断。

2.3 设计成果校核与动态提升策略

线形成果应在三维环境中完成最终校核。平面图上分开的曲线、竖曲线和超高渐变段, 在驾驶视角下可能同时发生; 二维分项检查难以发现这种空间叠加。校核顺序宜从驾驶任务出发: 先沿主线确认出口标志和鼻端的发现时机, 再沿匝道检查方向转换、纵坡变化与超高建立, 末端在合流前检查主线车流可见性。每个异常点都要回写里程、视点高度、设计速度和关联构造物, 便于定位是路线参数、土建边界还是交通工程布设导致问题。动态提升还需要管理版本。地质勘察、桥梁布跨或征地边界变更后, 不应只重算受影响的局部坐标, 而要从最早改变的控制点向下游重新检查曲率、视距、超高和工程量。后评价资料可用于校正运行速度预测和分合流判据, 但必须区分日常拥堵、偶发事件与线形固有缺陷。这一“设计—校核—变更—再校核—运营反馈”闭环, 能使匝道优化从一次性绘图转变为可追溯的工程决策过程。

3 结语

高速公路互通立交匝道的优化对象是车辆从主线驶入匝道并同时汇入道路的完整运行链, 不是孤立的最小半径或最大纵坡。以控制点为骨架, 联动调整曲率、竖曲线、超高渐变和分合流组织, 可以减少各分项指标均合规但组合效果不良的情况。方案决策应先执行刚性门槛, 再比较运行连续性与工程适用性, 并用权重敏感性检查排序稳定性。设计成果在三维驾驶视角下复核、在专业变更后沿下游重算, 才能保留优化方案在实施阶段的真实价值。后续设计还应积累运营速度、事故位置与养护记录, 持续校准视距裕度和方案权重, 使同类互通的参数选择更具工程针对性。