

公路弯道超高设计对车辆行驶稳定性的影响

毛博永

重庆市交通规划勘察设计院有限公司 重庆 401121

【摘要】：公路弯道内车辆受到横向离心力影响，行驶稳定程度容易受到曲线半径、运行速度、路面附着条件及超高参数变化的共同制约。当前部分弯道路段存在超高取值不当、过渡衔接不顺及复杂工况适配不足等问题，易引发侧滑、侧倾和轨迹偏移。依据车辆横向受力特征，优化超高率计算、过渡段布设及多工况校核方法，可增强轮胎横向附着利用的合理性，改善车辆姿态控制能力，降低弯道运行风险，提升道路通行稳定水平。

【关键词】：公路弯道；超高设计；车辆稳定性；横向受力；行驶安全

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.066

引言

车辆驶入公路弯道后，运动方向持续改变，横向离心力随车速提高和曲线半径减小而明显增大。若路面仍保持普通横坡，轮胎需要依靠较大的横向附着力维持既定轨迹，极易出现车身偏移、轮胎侧滑甚至车辆侧倾。设置合理超高能够利用路面横向倾斜形成支撑分力，减轻轮胎承担的横向负荷，但超高并非取值越大越安全。设计速度、交通组成、路面附着系数、纵坡条件及过渡段长度均会改变车辆受力状态。部分弯道路段存在参数选取单一、过渡变化突兀、低速车辆适应性不足等情况，使设计值同实际运行需求产生偏差。因此，需要从车辆横向动力响应出发，明确超高参数对侧滑稳定、侧倾稳定和轨迹保持能力的影响，为弯道设计优化提供清晰依据。

1 公路弯道超高设计基础及车辆受力关系

1.1 弯道横向力形成机理

车辆进入弯道后，运动轨迹由直线转为曲线，惯性作用使质心产生指向曲线外侧的离心力，该力随行驶速度的平方增长，并与曲线半径成反比关系。轮胎与路面之间的附着力承担主要的横向平衡功能，当附着力不足时，轮胎侧偏角增大，车辆产生侧滑趋势。超高设置通过改变路面横向倾角，使重力分解出指向弯道内侧的分力，与离心力形成对抗关系，从而降低轮胎横向附着需求。车辆悬架系统在横向荷载作用下产生侧倾响应，轮胎垂向载荷分布发生变化，进一步影响附着性能与操控稳定。横向力、重力分力及轮胎侧向力三者之间形成动态平衡，是弯道稳定运行的核心力学基础。

1.2 超高参数计算依据

超高率取值需综合设计速度、曲线半径及路面附着系数等关键参数进行匹配，核心在于合理分配离心力由重力分力与附着力共同承担的比例。设计中通常控制横向力利用系数，使车辆在不同运行状态下均能保持稳定。曲线半径较小时，需提高超高率以补偿离心力增大带来的影响，但过超高会对低速车辆运行产生不利作用，因此需在安全与适应性之间进行平衡^[1]。超高渐变段长度依据车辆动力响应特性确定，保证横坡变化平

缓过渡，避免瞬时横向力突变。新发展理念下，参数计算逐步引入多车型组合、交通流结构及极端气候影响，使设计结果更贴近复杂运行环境需求。

1.3 车辆稳定评价指标

车辆行驶稳定性评价主要围绕侧滑稳定、侧倾稳定及轨迹保持能力展开。侧滑稳定通过横向附着利用率进行衡量，当横向力需求超过附着极限时即发生失稳现象。侧倾稳定以车辆重心高度与轮距关系为基础，通过侧倾力矩与抗倾覆力矩对比进行判定，反映车辆抗颠覆能力。轨迹稳定性则关注车辆在弯道中的路径偏离程度，与转向响应及横向位移密切相关。综合评价体系逐步引入动态响应指标，如横摆角速度、侧偏角变化率等，用于反映车辆在实际运行中的连续稳定状态。多指标协同分析能够更全面地揭示超高设计对车辆受力分布及运动姿态的影响规律。

2 弯道超高设计中的主要问题

2.1 超高率取值适配不足

超高率确定过程中存在对设计速度依赖过强的情况，未充分考虑交通流中不同车型的动力特性差异及运行速度离散性，导致高低速车辆在同一断面受力状态差异明显。部分路段对附着系数取值偏保守或偏理想化，忽视气候变化及路面磨损对附着能力的削弱，使超高分担横向力的比例偏离实际需求。山区或复杂地形条件下，曲线半径受限，超高率调整空间有限，若缺乏精细化校核，易造成横向力分配失衡。参数选取缺乏多工况动态修正机制，难以兼顾安全性与运行舒适度之间的协同关系。

2.2 超高过渡衔接不顺

超高渐变区段设计存在长度控制不合理及横坡变化速率不均匀的问题，导致车辆在进入或驶离弯道过程中横向力变化呈现突变特征。横坡旋转方式单一，未结合道路纵断面及排水条件进行综合优化，使局部区域出现横向排水不畅或受力不连续现象^[2]。渐变段与直线段连接位置设置不当，造成驾驶操作负担增加，影响车辆姿态调整的连续性。设计中对动态响应过

程关注不足,缺乏对横摆角速度变化的约束,使超高过渡未能充分发挥缓冲横向力的作用。

2.3 复杂运行工况考虑不全

弯道超高设计多以理想干燥路面和均匀交通条件为基础,未充分纳入雨雪天气、低附着状态及重载车辆比例变化等因素对稳定性的影响。不同车种在重心高度、轴距及悬架特性方面差异显著,统一参数难以满足多类型车辆的安全需求。交通流密集条件下,车辆跟驰状态改变横向操控空间,叠加超高设计不足,易引发稳定风险。智能交通与车路协同背景下,车辆运行状态呈现动态变化特征,传统静态设计方法缺乏对实时运行环境的响应能力,难以实现精细化适配。

3 设计偏差对车辆稳定状态的影响

3.1 超高不足引发侧滑风险

弯道超高不足时,路面横向倾斜提供的内向分力无法有效抵消离心作用,车辆横向力主要依赖轮胎附着承担,附着利用率迅速升高并逼近极限值。横向载荷集中于外侧车轮,轮胎侧偏角持续增大,接地应力分布不均导致附着能力进一步衰减,形成不利循环。路面附着系数受湿滑、污染及磨损影响后,安全裕度明显压缩,横向稳定边界提前到达。重心较高车辆在横向力作用下侧倾响应增强,悬架压缩与回弹不均衡,削弱轮胎有效接触面积,使侧滑发生概率进一步提高。车辆横摆响应难以维持稳定,轨迹偏移逐渐累积,驾驶修正频率增加,运行平顺性降低。多车道条件下,不同车速车辆横向稳定差异加剧,车流运行状态出现不均衡,整体通行安全水平受到影响。

3.2 超高偏大造成低速偏移

弯道超高偏大时,重力分解形成的内向分力超过离心力需求,低速运行车辆无法获得足够的外向平衡力,产生向内侧滑趋势。轮胎受力由横向附着主导转变为重力分力主导,内侧车轮垂向载荷增加,外侧车轮载荷减小,造成轮胎抓地状态失衡。车辆在弯道内侧轨迹偏移,需通过持续转向修正维持行驶路径,转向系统负荷增大,操控稳定性下降^[3]。低速重载车辆受影响更为明显,车辆姿态调整滞后,车身横向摆动幅度增大。排水坡度与超高叠加后,局部路面水膜分布不均,进一步改变附着条件,使低速运行稳定性持续波动。交通流中速度差异较大的情况下,超高偏大导致车辆受力状态分化明显,运行一致性降低,弯道区域交通组织难度增加。

3.3 渐变失衡加剧车身摆动

超高渐变区段设计失衡时,横坡变化速率不连续或过渡长度不足,车辆进入弯道过程中横向力变化呈现突变特征。悬架系统在短距离内承受快速变化的侧向荷载,减振系统难以及时吸收能量,车身产生明显横摆与侧倾耦合振动。轮胎垂向载荷在左右侧之间频繁转移,附着利用状态不稳定,影响连续行驶过程中的轨迹控制精度。横摆角速度与侧偏角变化不同步,车

辆姿态调整出现滞后现象,增加方向控制难度。渐变段与直线段衔接不平时,横向力释放与叠加过程缺乏连续性,车辆在短时间内经历多次受力重分配,动态稳定性受到干扰。高标准设计要求下,渐变区段需兼顾车辆动力响应特性与道路几何连续性,否则车身振动叠加效应将持续放大,对行驶舒适性与安全性均产生不利影响。

4 车辆稳定导向下的超高优化方法

4.1 分车型确定超高控制参数

车辆类型差异对弯道行驶稳定性的影响显著,超高控制参数需依据不同车辆的动力学特征进行分级确定。重型车辆具有较高重心与较大轴载,侧倾力矩显著,横向稳定裕度相对较小,对超高分担离心力的依赖程度更高;轻型车辆则具备较好的操控响应能力,但在高附着利用状态下更易出现轨迹偏移。参数设计应基于车辆重心高度、轮距、悬架刚度及轮胎侧偏特性等关键指标,构建分车型稳定评价体系,对横向附着利用率及侧倾安全系数进行分区控制。设计速度对应不同车型运行速度分布,应通过统计分析交通流结构,确定代表性控制车型,并在参数计算中引入修正系数,以保证多类型车辆在同一弯道条件下均具备合理的稳定性边界。超高率分配需兼顾高低速车辆需求,通过控制附着分担比例,使横向力在不同车辆间实现均衡分配。新发展理念强调精细化与差异化设计,应结合智能交通数据,对车辆运行状态进行动态分析,逐步形成基于数据驱动的参数优化机制,提高超高设计对复杂交通环境的适配能力。

4.2 优化超高渐变区段长度

超高渐变区段作为连接直线与圆曲线的重要过渡结构,其长度与变化规律直接影响车辆横向力的变化过程。渐变长度不足时,横坡变化速率过大,车辆在短时间内承受较强的横向力突变,悬架系统难以及时完成姿态调整,导致横摆与侧倾响应叠加;渐变长度过长则会延缓横向力建立过程,影响弯道内稳定状态的形成。优化设计需从车辆动力响应角度出发,对横坡变化率进行连续性控制,使横向力逐步建立并平稳过渡^[4]。渐变区段应结合道路纵断面、平曲线半径及设计速度进行协同设计,确保空间几何形态的连续性与一致性。横坡旋转方式需根据车道结构合理选择,保证不同车道横向受力变化同步,避免局部应力集中。新发展理念强调安全、舒适与功能协同,渐变区段设计应引入动态评价指标,对横摆角速度变化率及侧偏角变化趋势进行约束,提升车辆运行过程中的稳定连续性。同时,应结合排水性能与结构耐久要求,确保渐变段在长期使用过程中保持稳定的几何形态和功能状态。

4.3 强化多速度工况联合校核

弯道超高设计不应仅以单一设计速度为依据,应构建覆盖不同运行速度范围的多工况联合校核体系。车辆在实际运行中存在显著速度离散性,不同速度条件下离心力大小及附着需求

差异明显,若仅依据设计速度进行参数确定,易造成部分速度区间内稳定性不足。多速度校核需选取典型运行速度区间,对横向附着利用率、侧倾安全系数及轨迹稳定指标进行综合分析,确保各速度条件下均满足稳定性要求。低速状态下需重点校核重力分力对车辆内偏趋势的影响,高速状态下则应控制附着利用率避免接近极限值。联合校核过程中,应结合路面附着条件变化,对干燥、湿滑及低附着状态进行分级分析,形成多维度稳定评价体系。新发展理念推动数字化与智能化应用,可通过交通数据采集与仿真技术,对不同速度分布及交通流状态进行动态模拟,实现超高参数在多工况下的适应性优化。通过构建全过程校核机制,使设计结果在复杂运行环境中保持稳定可靠,提高弯道整体通行安全水平。

5 超高优化后的行驶稳定成效

5.1 车辆横向受力趋于均衡

超高参数经优化后,路面横向倾角与离心力之间形成更为合理的力学匹配关系,车辆在弯道内所承受的横向力由重力分力与轮胎附着力共同承担,受力分配更加均匀。外侧车轮与内侧车轮之间的垂向载荷差异得到有效控制,轮胎接地状态保持稳定,横向附着利用率维持在安全区间。悬架系统在横向荷载作用下的压缩与回弹过程趋于平衡,车身侧倾角变化更加平缓,减少瞬时力集中带来的不利影响。不同车型在同一断面上的受力差异缩小,重载车辆与轻型车辆均能够在合理受力范围内运行。横向力传递路径更加连续,避免局部应力集中现象,整体受力状态呈现稳定分布特征。新发展理念强调系统协同与精细控制,优化后的超高设计能够实现道路结构、车辆动力响应及交通流状态之间的协调统一。

5.2 侧滑侧倾概率明显降低

超高优化后,离心力与重力分力之间的平衡关系得到强化,轮胎横向附着需求显著降低,侧滑发生条件被有效延后。

附着利用率在不同速度区间内保持稳定,避免接近极限状态运行,从根本上减少失稳风险。车辆重心在横向力作用下的偏移幅度减小,侧倾力矩与抗倾覆力矩之间形成更为有利的对比关系,车身稳定性得到提升^[5]。悬架系统吸收横向冲击能力增强,车身振动衰减更加迅速,横摆与侧倾耦合效应被抑制。低附着条件下,优化后的超高仍可提供必要的内向支撑分力,维持基本稳定状态。交通流中不同速度车辆的稳定边界趋于一致,整体运行安全性得到提升。稳定性改善不仅体现在极端工况下,也反映在日常运行中的持续稳定表现。

5.3 弯道轨迹控制能力增强

超高优化使车辆在弯道内的横向力变化更加连续,转向响应过程更加平顺,轨迹控制精度显著提高。横摆角速度变化趋于稳定,侧偏角增长得到有效抑制,车辆行驶路径与设计曲线保持较高一致性。方向输入与车辆响应之间的对应关系更加明确,减少修正操作频率,提升操控稳定性。渐变区段横坡变化合理分配,车辆在进入与驶离弯道过程中姿态调整连续顺畅,避免轨迹突变。多车道条件下,各车道横向受力差异减小,车辆在不同车道间切换时稳定性保持一致。新发展理念推动数字化与智能化应用,轨迹控制能力的提升为智能驾驶系统提供更稳定的运行基础,使车辆在复杂交通环境中保持良好的路径跟随性能。

6 结语

弯道超高设计以车辆横向受力平衡为核心,通过参数优化与渐变控制,实现离心力与重力分力之间的合理分担,改善不同车型在多速度条件下的稳定状态。针对超高取值、过渡衔接及工况适配等关键环节进行系统调整,有助于提升轮胎附着利用效率与车身姿态控制能力,减少侧滑与侧倾风险。多维度校核机制与精细化设计方法相结合,使弯道运行过程中的受力变化更加连续,轨迹控制更加稳定,道路通行安全性与运行品质得到有效保障。

参考文献:

- [1] 李晴晴.山区双车道公路弯道车辆运行状态分析及交通标志优化设计[D].山东理工大学,2025.
- [2] 刘思雨.考虑驾驶行为特性的山区公路弯道路段跟驰行为建模[D].昆明理工大学,2025.
- [3] 徐金元.考虑行驶轨迹偏移的山区高速公路弯道路段异质交通流特性研究[D].兰州交通大学,2025.
- [4] 陈启健,尹祖权,梁桃华,等.公路弯道盲区安全检测与预警系统设计[J].电子制作,2024,32(15):7-10.
- [5] 杨鑫.基于汽车动态安全边界的山区高速公路弯道限速策略研究[D].重庆交通大学,2021.