

公路线形指标对道路通行效率与能耗影响机理研究

王陆峰

江西赣北公路勘察设计院 江西九江 332000

摘要: 公路线形作为公路设计的核心要素,其指标合理性直接决定道路通行效率与车辆能耗水平。本文基于交通流理论与能源消耗模型,系统分析平面线形(直线长度、圆曲线半径、缓和曲线参数)、纵断面线形(坡度、坡长、竖曲线半径)及横断面线形(车道宽度、路肩宽度、车道数)三大类指标对通行效率与能耗的影响机理。通过实际工程案例验证,结合 VISSIM 交通仿真与油耗模拟数据,量化不同线形指标下的车速波动幅度、行程延误时长及单位里程能耗差异。研究表明:合理的圆曲线半径($\geq 600\text{m}$)可使通行效率提升 23%,3% 以下的平缓坡度能降低车辆能耗 18%-25%;车道宽度与路肩宽度的协同优化可减少车辆横向干扰,进一步提升通行稳定性。

关键词: 公路线形指标;通行效率;车辆能耗;交通流特性;线形优化

引言

作为陆地交通网络核心载体的公路,其通行效率与能耗水平因直接关联区域经济发展与生态环境保护,在机动车保有量持续增长的情况下,传统“重通行、轻效率”“重建设、轻能耗”的公路设计理念已难以适配“双碳”目标与智慧交通发展需求。公路线形指标通过改变车辆行驶轨迹、速度状态及驾驶行为而形成对通行效率与能耗的连锁影响,即平面线形的曲率变化会导致车辆频繁加减速,纵断面的坡度起伏直接增加发动机负荷,横断面的空间布局则影响车辆横向避让频率。当前,国内外学者多聚焦单一线形指标(如坡度、车道宽度)的独立影响,却缺乏对指标体系协同作用机理的系统研究。

1 公路线形指标体系与影响维度界定

1.1 线形指标体系的具体构成要素

依据空间维度划分的公路线形指标体系,主要包含平面线形指标、纵断面线形指标以及横断面线形指标这三大类别。其中,用于确定车辆在水平方向行驶轨迹的平面线形指标,具体涵盖直线段的最大与最小长度限制、圆曲线的最小半径标准、缓和曲线的合理长度设置以及交角点偏角的大小控制,这些要素共同影响着行车方向的连续性与平顺程度;主要反映道路在纵向上起伏变化情况的纵断面线形指标,具体包括路线的最大允许纵坡、不同坡度下的坡长限制条件、竖曲线的最小半径要求,以及凸形与凹形竖曲线的各项技术参数,它们直接关系到车辆爬坡能力、行车安全性与舒适性

^[1];涉及道路断面宽度布置与空间分配的横断面线形指标,主要内容有单车道的宽度标准(一般取值范围为 3.5 米至 3.75 米)、左右路肩的宽度要求(通常在 0.5 米到 3 米之间)、车行道数量的设定以及中央分隔带的宽度设计,这些指标直接影响车辆的横向通行空间、侧向净空以及交通流之间的干扰程度。

1.2 关于通行效率与能源消耗的综合评价维度

在通行效率评价方面,通常采用平均行程车速、交叉口或瓶颈处的行程延误时间、道路或车道组的实际交通容量以及车辆排队的最大长度或平均排队长度这四项核心指标进行全面衡量,且行程延误分析需进一步区分自由流、稳定流、饱和流等不同交通运行状态以准确评估路网服务水平;在车辆能源消耗评价方面,主要以单位里程燃油消耗量(常用单位为升/百公里)为核心评价指标,同时辅以发动机负荷率、怠速运行时间占总行程时间的比例、加减速操作频率等辅助性指标以更全面反映能效特征,需要特别指出货车因总质量大、动力系统特性不同,在能耗特性上与客车存在显著差异,其能耗对纵坡变化尤为敏感,实际运行中能耗波动幅度可达 30% 至 50%,故在指标分析与应用中需区别对待。

2 平面线形指标对通行效率与能耗的影响机理

2.1 直线长度设计:平衡驾驶稳定性与注意力集中效应

作为公路平面线形基础构成形式的直线段,其长度设计需在合理区间内精确把控:过长(长度大于 2000 米)的直线段容易诱发驾驶员视觉疲劳与注意力涣散,进而导致超

速行驶及应急反应时间延长,如江苏京沪高速公路某典型路段实际监测数据显示,当直线长度超过1800米时,该路段车辆超速比例上升达17%且紧急制动频次增加22%,显著降低了道路的通行安全水平和运行效率;而过短(长度小于200米)的直线段会引发线形频繁切换,迫使驾驶员连续调整方向,增加操控负荷,像河北太行山高速公路某山区路段运行数据表明,直线长度不足150米时,货车平均车速下降12公里/小时且单位里程燃油消耗增加8%。现行行业标准推荐高速公路在平原区域直线长度宜控制在500~1500米,山区路段以300~800米为宜,通过“较长直线配合较短曲线”或“较短直线衔接平缓曲线”的线形组合策略,能在维持车辆行驶稳定性的同时有效保持驾驶员注意力,实现安全与效率的统筹优化。

2.2 圆曲线半径选择: 关乎行驶阻力与速度保持能力

在公路平面设计中,圆曲线半径这一核心参数,其大小直接影响车辆过弯时的离心力大小与行驶阻力程度,如较大半径(不小于600米)的圆曲线产生较小离心力,使车辆能以接近路段设计速度的较高速度平稳通过,像河北太行山高速公路某半径600米的弯道段,客车平均速度可达92公里/小时,与直线段车速差异仅3%,能源消耗波动控制在5%以内;而曲线半径过小(如低于300米)则要求车辆大幅减速驶入,据江苏某一级公路半径250米弯道监测结果,货车为抵抗离心力需将车速从70公里/小时降至52公里/小时,这一加速一减速循环导致能耗上升15%~20%,还易形成交通瓶颈,引发后续车辆排队与通行延误;当圆曲线半径小于250米时,应设置相应缓和曲线实现线形顺适过渡,且缓和曲线长度与圆曲线半径的比值建议控制在1:10至1:20之间,以保证车辆转向平顺,最大限度降低因速度突变导致的效率损失与能耗上升^[2]。

3 纵断面线形指标对通行效率与能耗的影响机理

3.1 坡度大小对车辆运行的影响机理及其能耗关联分析

纵断面坡度作为道路设计中的关键参数,其数值大小直接决定车辆发动机的负荷状态与能源消耗水平,具体而言,坡度对能耗的作用机制主要体现在:在平缓坡度条件下(通常指坡度 $\leq 3\%$)车辆能保持相对平稳的匀速行驶状态且发动机运行在经济工况区间,能源利用效率较高,如河北太行山某高速公路一段坡度为2.5%的路段实测数据显示货车单位里程油耗约为32L/100km,与平坦路段相比能耗差异

仅4%,表明缓坡对车辆能耗影响较有限;而在陡坡路段(坡度 $> 5\%$)货车往往需降低挡位以提高牵引力爬坡,此时发动机负荷率显著上升,可从常规的60%急剧增加至90%以上,以江苏某山区高速公路一段坡度为6%的典型路段为例,该条件下货车百公里油耗急剧上升至48L,较平缓路段增幅高达50%,同时因车速明显下降——普遍降至35~40km/h,极易引发路段通行效率下降和交通拥堵,实测表明后续车辆因爬坡延误时长平均增加15~20分钟/辆^[3]。

3.2 坡长限制在道路纵断面设计中的关键作用

坡长作为与坡度协同作用的重要参数,直接影响车辆能否保持稳定行驶状态且其限制是否合理关系到能耗与通行效率的整体表现:在合理坡长范围内(如5%坡度对应的坡长不超过800m)车辆通常能一次性通过坡段而无需中断行驶,如河北某高速公路一段坡度为5%、坡长800米路段的观测数据显示货车爬坡后仍可维持约45km/h车速,未出现显著效率损失或额外能耗上升;然而,当实际坡长超过规范限制(如5%坡度下坡长延长至1200米以上时),货车因发动机长时间高负荷运行易过热或动力不足,部分车辆需中途停车冷却或休息,像江苏某高速一个坡度为5%、坡长1500米的路段上,大货车因爬坡困难导致停车频率高达12辆/小时,致使该路段通行能力下降约30%,同时因车辆频繁怠速和重新启动,该路段货车平均能耗较规范坡长条件上升了22%;针对连续陡坡或超长坡段的情况,现行标准要求设置爬坡车道(宽度一般不小于3.5米)及避险车道,目的是将低速行驶的大型货车从主线车流中分离,减少其对整体交通流的干扰并提升道路安全与能效水平。

3.3 竖曲线半径: 优化纵向视线与速度连续性

竖曲线半径对驾驶员视线范围与车辆纵向行驶平稳性存在影响,其中大半径竖曲线(凸形 $\geq 10000\text{m}$,凹形 $\geq 4000\text{m}$)有着视线开阔且车辆可平稳过渡的效果,像河北某高速12000m凸形竖曲线段,客车平均车速能保持95km/h且能耗波动小于3%;而小半径竖曲线(凸形 $< 6000\text{m}$,凹形 $< 2000\text{m}$)则出现视线受阻的情况,使得驾驶员需减速观察,例如江苏某高速5000m凸形竖曲线段,车辆因视线遮挡致使速度骤降10~15km/h并形成短时间拥堵,能耗也因加减速增加10%。

4 横断面线形指标对通行效率与能耗的影响机理

4.1 车道宽度：平衡行驶空间与道路资源

车道宽度直接影响车辆横向操作空间与干扰频率，其中标准车道宽度（3.75m）可满足大型货车与客车并行需求，像河北太行山高速 3.75m 车道段车辆横向避让频率仅 0.8 次 / 公里且平均车速达 90km/h，而窄车道宽度（ $\leq 3.5\text{m}$ ）致使大型货车行驶时易侵占相邻车道，例如江苏某一级公路 3.5m 车道段货车与客车并行冲突增加、平均车速降至 78km/h 且能耗因频繁避让增加 7%，所以对于交通量较大的高速公路推荐采用 3.75m 车道宽度且车道数需与交通需求匹配（如双向六车道可满足日均 10 万辆车次需求）。

4.2 路肩宽度：提升应急通行与干扰缓冲能力

路肩作为道路的“缓冲带”，其宽度对故障车辆停靠与主线车流稳定性有影响，宽路肩（ $\geq 2.5\text{m}$ ）可使故障车辆快速停靠避免占用主线车道，如河北某高速 3m 路肩段故障车辆清理时间缩短至 15 分钟且主线延误减少 40%，而窄路肩（ $\leq 1\text{m}$ ）易使故障车辆占用部分主线车道，像江苏某高速 1m 路肩段因车辆停靠导致拥堵频率达 2.3 次 / 天且后续车辆能耗增加 9%；同时规范要求高速公路路肩宽度硬路肩 $\geq 2.5\text{m}$ 、土路肩 $\geq 0.5\text{m}$ ，通过路肩与车道的协同设计构建“主线通行 + 路肩缓冲”的高效空间布局^[4]。

4.3 中央分隔带：减少对向车流干扰与眩光影响

中央分隔带宽度（ $\geq 3\text{m}$ 的宽分隔带如河北某高速 4m 中央分隔带配植防眩树、 $< 2\text{m}$ 的窄分隔带如江苏某一级公路 2m 分隔带无防眩设施）与绿化配置对向车流干扰影响显著，宽分隔带可有效隔离对向车流、减少眩光与超车干扰使河北某高速夜间会车事故率下降 60% 且平均车速提升 5%，而窄分隔带对向车流干扰明显致江苏某一级公路夜间车速波动幅度达 15km/h 且能耗因频繁调整速度增加 8%。

5 线形指标协同优化策略与工程验证

5.1 协同优化原则

平面 - 纵断面协同下，河北太行山高速通过避免“小半径曲线 + 陡坡”组合，将原设计的 300m 半径曲线 + 5% 坡度调整为 400m 半径 + 3% 坡度，达成货车油耗下降 18%、通行效率提升 20% 的效果；横断面 - 交通需求匹配

方面，江苏京沪高速扩建时依据交通量动态调整车道数，把双向四车道改为六车道（车道宽 3.75m，路肩宽 3m），使得高峰时段延误时长减少 35 分钟 / 辆；区域地形适配时，山区公路优先选用“缓坡 + 大半径曲线”，平原公路控制直线长度并优化竖曲线半径，以实现效率与能耗的平衡。

5.2 工程验证案例

河北太行山高速（山区段）通过线形指标优化：

平面线形：圆曲线半径最小取值 400m，缓和曲线长度按 $0.035V \times V$ 设计；

纵断面线形：最大坡度控制在 4%，坡长 $\leq 600\text{m}$ ，凸形竖曲线半径 $\geq 8000\text{m}$ ；

横断面线形：车道宽 3.75m，硬路肩宽 3m，中央分隔带宽 4m（配防眩设施）。

优化后监测数据显示：货车平均车速从 55km/h 提升至 68km/h，单位里程油耗从 42L/100km 降至 34L/100km，通行效率与能耗指标均达到行业先进水平。

6 结论

通过改变车辆行驶轨迹、速度状态与驾驶行为，公路线形指标形成对通行效率与能耗的多维度影响，其中平面线形决定水平行驶平滑性，纵断面线形主导发动机负荷水平，横断面线形影响横向干扰程度，三者协同作用构成公路交通系统的核心运行基础；研究表明，诸如圆曲线半径 $\geq 400\text{m}$ 、坡度 $\leq 4\%$ 、车道宽 3.75m 等合理的线形指标组合，可使通行效率提升 20%–30% 且使车辆能耗降低 15%–25%。

参考文献：

- [1] 周晔. 改扩建高速公路线形指标受限路段的设计方法 [J]. 交通世界, 2025, (22): 116–118.
- [2] 步佳泽, 李梦晨. 基于运行速度的双车道公路线形设计方法 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6(07): 17–19.
- [3] 李诗佳, 徐进. 山区低指标复杂线形公路行驶安全性检验方法 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(07): 2962–2973.
- [4] 闫博儒, 刘奇凤. 公路路线灵活性设计研究 [J]. 交通世界, 2025, (Z2): 160–162.

作者简介：王陆峰(1996.4–), 男, 汉, 江西人, 大学本科, 研究方向：公路与桥梁工程