

城市快速路纵断面设计中坡长与视距协调优化方法研究

袁野 梁朝阳*

雄安城市规划设计研究院有限公司，河北 保定 071700

[摘要]城市快速路运行安全性和行车舒适性的提升让坡长与视距协调优化方法的研究变得格外关键，建立坡长和驾驶视距协调评价模型并把驾驶行为、制动特性以及不同交通流条件综合起来分析不合理坡长设置对视距遮挡、事故风险的影响，运用多目标优化算法使坡度设置和视距要求达成动态平衡，研究结果显示优化坡长设计能有效提高道路通行视距的连续性且减少因视距不够而产生的交通安全隐患、工程应用价值相当显著。

[关键词]城市快速路；坡长设计；视距协调；交通安全；优化模型

DOI: 10.33142/ucp.v2i6.18556

中图分类号：U412.33

文献标识码：A

Research on the Coordinated Optimization Method of Slope Length and Sight Distance in the Vertical Section Design of Urban Expressways

YUAN Ye, LIANG Chaoyang*

Xiong'an Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071700, China

Abstract: The improvement of operational safety and driving comfort of urban expressways has made the research on the coordinated optimization method of slope length and sight distance particularly crucial. A coordination evaluation model for slope length and driving sight distance is established, and the impact of unreasonable slope length setting on sight distance obstruction and accident risk is analyzed by integrating driving behavior, braking characteristics, and different traffic flow conditions. Multi objective optimization algorithms are used to achieve dynamic balance between slope setting and sight distance requirements. The research results show that optimizing slope length design can effectively improve the continuity of road sight distance and reduce traffic safety hazards caused by insufficient sight distance. The engineering application value is quite significant.

Keywords: urban expressway; slope length design; visual distance coordination; traffic safety; optimization the model

引言

现代城市交通里城市快速路是重要载体，其纵断面设计直接影响驾驶视野和行车安全，高交通强度与复杂地形条件下坡长设置不合理会使视距容易不足从而产生安全隐患和交通拥堵，既要保障视距连续性又得兼顾地形限制和工程成本已成为当下道路设计的关键问题，围绕坡长和视距协调优化探索科学设计方法有助于提升道路运行效率且能给智能交通和精细化设计提供技术支撑。

1 城市快速路纵断面设计中坡长与视距问题概述

城市快速路纵断面设计里，坡长和视距这两事儿直接关乎道路安全与运行效率，需将它们之间的关系和存在的问题系统地捋一捋，以便给后续的优化研究打个基础。

1.1 城市快速路坡长设计的基本原则与挑战

城市快速路主要目标是提高通行效率、缩短出行时长，其纵断面设计需兼顾交通功能和地形适应性，坡长作为纵坡设置的重要参数，与车辆动力性能、驾驶安全、油耗、施工成本等紧密相关，一般要依据设计速度、车辆类型、地形状况和环境保护要求合理确定坡长，但在实际工程中，由于城市空间紧张、地形复杂或者用地受限，常出现坡度过大或者坡长设置不合理的情况，从而导致车辆制动难、

视距不够、交通事故多发等问题，这些情况表明坡长设计在城市快速路建设里非常关键，急需系统研究和优化，并且要结合智能驾驶、绿色交通等未来交通发展趋势更新迭代传统坡长设计理念，才能满足更高层次的城市交通运行需求。

1.2 驾驶视距要求与城市道路安全的关系

行车安全的基本条件是要有足够的驾驶视距，特别是在快速路段，由于速度快时反应时间和制动距离的情况，对视距要求严格，视距不足会影响驾驶人的判断能力且在突发情况下增加发生事故的风险。按设计规范，城市快速路需满足停车视距、变道视距、超车视距等要求，但在纵坡大的路段，道路起伏或者周边设施遮挡常使实际视距达不到设计标准，视距有障碍会让驾驶更不确定，在夜间或者雨雾天气很容易引发多车连环碰撞或者追尾事故，纵断面设计时充分考虑视距因素，协调好坡度和视距的关系是提升道路安全性能的一个核心要素，进一步来说，视距设计得科学合理能增强驾驶人对前方交通环境的感知能力，有效提升交通运行效率，减少急刹车、强制变道等突发操作，全面降低事故率和通行干扰，有力支撑城市交通系统稳定运行。

1.3 坡长与视距矛盾在实际工程中的表现

城市快速路工程实践中坡长和视距的矛盾常见，有些快速路为适应地形快速起伏设计成短坡急变的样式，虽在空间上满足用地需求但前方道路可视性被大大削弱，像桥梁、隧道口或者匝道合流的地方坡长设计没顾上视距需求成为交通事故高发地，还有部分设计太强调视距连续性使坡长过长，不仅施工难度加大、造价上升而且周边环境也受到不良影响，这种设计上取舍的失衡说明没有科学优化方法指导时传统经验设计无法满足现代交通安全和运行效率的双重要求，要在充分明白坡长和视距协调机理的基础上探索能量化、能调控的设计优化路径以统一工程可行性和交通安全性。

2 坡长设置对驾驶视距与交通安全的影响机制分析

驾驶视距受坡长设置影响显著，坡长设置是城市快速路交通安全的重要决定因素，机制分析有助于揭示其对驾驶行为和事故风险的具体作用路径。

2.1 坡长变化对视距连续性的影响

城市快速路中，驾驶人对前方道路的可视范围直接取决于纵坡设置，坡度陡且坡长短时，前方道路起伏易遮挡驾驶人视线，视距突变从而产生视觉盲区，坡顶转折或凹坡段尤其如此，要是车辆运行速度和停车需求没被设计充分考虑，视距中断现象更明显，视距不连续状态干扰驾驶判断且打破行驶节奏，容易发生紧急制动、变道冲突等危险行为，视距连续性降低会削弱城市快速路“快速、安全”的本质特征，得靠科学坡长控制来优化设计。

2.2 坡长设置对制动与反应能力的制约

车辆在坡道行驶时坡度对其制动能力影响很大，下坡时要是坡长太长或者坡度太陡，在惯性驱使下车辆制动距离会增加且重载车辆更是容易制动失效或者出现“刹车疲劳”，上坡时坡长过短的话低功率车辆就容易频繁换挡且速度不稳定，这会干扰后车判断让行车变得紊乱，驾驶人要是不能在有限视距里及时觉察前方交通状况事故风险就会大增，并且坡长频繁变化还会加重驾驶人的认知负担使反应时间变长、应对突发事件的能力降低，设置坡长的时候得保证交通流稳定并合理匹配驾驶人的生理和心理响应机制。

2.3 坡长不当引发典型交通事故形态

城市快速路里坡长设置不当就会引发事故且有一定规律，常见的事故形态有坡顶盲区追尾、下坡制动失效引发多车连环事故、坡道合流口横向擦碰等，这些事故常出现在视距或制动距离不足的区域且频率高伤害大，一些典型工程案例中纵断面设计没协调好坡长和视距，安全隐患一到高峰期就暴露且道路拥堵加重、次生事故也被诱发，

统计数据表明城市快速路交通事故里视距问题和坡长设计失误的占比不断上升显示出设计前期预测和协调控制很重要，要实施有效预防策略得先准确识别坡长影响交通安全的核心机制。

3 坡长与视距协调关系的数学建模与参数构建

城市快速路坡长与视距要协调优化，这需要有科学的数学模型做基础，构建合理的参数体系，工程设计就有了可量化、可计算的决策依据。

3.1 协调建模的理论基础与逻辑结构

交通安全理论、驾驶行为模型和道路几何设计原理是坡长与视距协调建模的基础，要先搞清楚不同纵坡条件下停车视距、会车视距、超车视距等不同驾驶视距需求的变化规律，并且结合人因工程将驾驶人反应时间、视线高度、车辆类型等参数对视距的影响考虑进去，在纵断面设计里引入几何透视原理分析坡道起伏和道路线形对驾驶视野的遮挡情况，模型逻辑结构要有输入参数模块（坡长、坡度、车辆速度、视线高度等）、约束条件模块（规范要求、安全裕度之类的）以及目标函数模块（视距最小值、坡度变率等）才完整清晰，在工程实践里也好应用。

3.2 模型关键参数选取与定量表达

数学建模里，模型的适用性和精度与参数选取直接相关，纵坡坡度 (*i*)、坡长 (*L*)、驾驶人视线高度 (*h*)、障碍物高度 (*H*)、设计速度 (*V*)、反应时间 (*t*) 这些都是核心参数，停车视距能靠公式计算，公式里 *g* 是重力加速度，*f* 是附着系数，纵坡有影响的时候，停车视距得修正成带坡度因子的形式。

$$S = Vt + \frac{V^2}{2gf} \quad S = Vt + \frac{V^2}{2g(f \pm i)}$$

凹坡、凸坡、平坡等不同路段形态下的视距计算需引入相应空间几何关系模型，就凹坡而言，要考虑驾驶人视线和障碍物之间有无遮挡并建立基于抛物线轨迹的最小视距公式，模型由这些参数和表达形式构成量化基础从而能在不同工况下灵活应用。

3.3 模型适用性验证与参数敏感性分析

要验证数学模型的工程适用性，就得结合实际的城市快速路设计案例将参数代入做仿真测试，选择不同的坡长、坡度组合方案来模拟驾驶人在各个路段视距的变化趋势以查看是否符合规范要求，再引入蒙特卡洛仿真或者灵敏度分析方法对关键参数进行扰动测试以找出影响视距计算结果的敏感因子，结果显示坡度和车辆速度对最小安全视距的影响最大，特别是坡度超 3% 的时候视距下降速度明显加快，并且大型车辆群体中视线高度变异比较大需要在模型里设置可调节的参数范围，经过这些能让模型有良好的适应性和推广价值从而给后续优化设计提供定量依

据和技术支撑。

4 基于多目标优化的坡长与视距协调设计方法

城市快速路纵断面设计得在安全性、经济性和地形适应性之间找平衡，多目标优化方法的引入利于坡长和视距协同提升，让综合效益最大。

4.1 多目标优化建模的设计思路

多目标优化方法要在多个相互冲突的目标里找出最优解集，坡长和视距协调设计时目标函数一般有驾驶视距最大化、坡度变化率与坡长总量最小化、工程造价降低等，建模型前需要弄清楚每个目标在工程里的实际意义和权重，在安全优先的快速路段驾驶视距可当成主导目标，而在空间有限或者成本敏感的地方坡长控制和土方平衡的权重可能更高，设计思路为构建目标函数矩阵，采用模糊综合评判或者层次分析法设定权重，再用约束优化技术保证解集符合规范要求，从非劣解集（Pareto 前沿）里提取出设计最优方案以达成各目标间的平衡。

4.2 优化算法的选择与实现机制

协调坡长和视距多目标优化时算法选择很关键，像遗传算法（GA）、粒子群优化（PSO）、蚁群算法（ACO）、多目标模拟退火算法（MOSA）等都是常用的优化算法，在道路设计优化问题里，非支配排序遗传算法（NSGA-II）稳定且有全局搜索能力被广泛使用，该算法能有效处理多目标函数，种群进化时会产生一系列非支配解，在保持种群多样性的情况下慢慢接近最优解，其实现机制有初始化种群、计算适应度、交叉变异操作以及依据拥挤度距离选择非劣解进入下一代，在快速路设计中把不同坡长和坡度组合当成解向量，用视距计算模型评估适应度，这样优化过程工程上能解释得通，会有多个设计方案，工程师可以筛选调整，实现人机协同优化。

4.3 优化结果的工程适应性与实例应用

工程实例的验证与应用检验表明多目标优化成果需要经历这一过程才能评估其实用性和推广价值，在典型城市快速路路段选取视距不足或者坡度变化突兀的问题区段作为优化应用对象，将原有设计方案和多目标优化结果进行对比分析，重点考察设计视距提升幅度、坡长变化是否合理、土方量变化、施工可行性以及整体造价控制等指标，实证结果显示优化后的方案在保障视距连续性上比原设计好很多且坡度过渡平滑、车辆运行能耗和事故风险均有效降低，土方工程控制更合理、经济效益和施工效率都不错，这说明多目标优化方法能为快速路纵断面设计提供有力的技术支撑且有望在未来城市道路设计中得到更广泛应用。

5 优化模型在典型城市快速路工程中的应用与验证

检验优化模型有效性与可行性的关键环节在于将其

应用于实际工程案例，可借助典型城市快速路的设计与调整，验证模型对视距提升和坡长优化的实际作用。

5.1 工程案例概况与问题诊断

以某典型城市快速路改扩建工程为研究对象，这一穿越丘陵起伏地区且长约 7.2 公里的工程其纵断面设计中有很多坡长较短、坡度突变的区段，由于视距不足已发生多起追尾事故，现场勘测数据表明约 30% 路段的停车视距不符合规范要求且上下匝道交织区以及桥隧过渡段视距中断严重，驾驶人的安全受到极大威胁，传统设计虽考虑了地形适应性和施工便利性但忽略了连续视距的系统优化导致道路运行质量不好，急需用多目标优化模型重构纵坡设计以提高通行安全性和行驶舒适性。

5.2 优化模型应用流程与设计调整

前期建立坡长与视距协调多目标优化模型并结合工程实际情况，先输入原始纵断面参数及包含地形高程数据、路线控制点、交通流特性以及设计速度等的约束条件，接着用 NSGA-II 算法构建解空间并对坡长、坡度组合进行编码，按照安全优先原则确定权重比例来设定目标函数，即最大化最小视距、最小化坡度变率和土方量，在优化迭代时通过约束筛选剔除不满足规范要求的解向量并实时评估各可行解的视距性能，输出的优化方案最终调整 4 处纵坡过渡段，在保持地形适应性的情况下使坡长区间平均拉长 18%、关键区段视距提升 40m 以达到连续、顺畅、可视的设计目标，并且优化设计在总土方控制范围内波动不超过±5%，工程可操作性较好。

5.3 应用效果评估与推广价值分析

要进一步评估优化方案的实施成效，就用微观交通仿真软件对优化前后的方案进行对比模拟，结果表明在早晚高峰交通流中，优化方案使车辆平均车速提升了约 12%、紧急制动频率降低 31%、车辆跟驰行为更平稳且驾驶人操控体验得到明显改善，现场复核与第三方审查结果也显示优化后的视距指标全面符合现行规范且部分关键转折点处视距冗余超 20%，给极端工况提供安全缓冲，从建设周期和造价控制方面看，设计方案没大幅改变原路线走向、施工方案调整幅度小且新增成本可控，这个优化模型在实际工程里适应性、灵活性和可推广性良好，为今后类似复杂地形下城市快速路纵断面设计提供可靠技术路径与决策依据。

6 结语

深入分析城市快速路纵断面设计里坡长和视距的协调关系并将数学建模与多目标优化方法相结合构建了一个操作性很强的系统设计模型，且在典型工程中验证了其实用性和有效性，结果显示优化后的方案在行车视距保障、道路安全性提升和行驶舒适性提高上优势明显且兼顾施工成本和工程可行性，这一研究为未来城市快速路设计提

供理论支撑和技术工具且推广应用前景广泛,对推动城市道路精细化安全化设计有着很大的积极意义。

[参考文献]

- [1]钱城.高速公路改城市快速路总体设计要点[J].交通世界,2021(28):15-16.
- [2]唐陈烨.高架快速路纵断面设计探讨——以沈海高速杏林互通及接线工程为例[J].福建建材,2021(12):80-83.
- [3]刘玉龙,杨冬冬.中法规范城市快速路设计指标对比研究[J].四川建材,2022,48(3):126-127.

[4]谢斯绵.城市快速路前期阶段需求分析与总体设计思路探讨[J].工程技术研究,2023,8(16):194-196.

[5]陈言.关于城市快速路设计时速的探讨——以腾龙大道为例[J].城市建设理论研究(电子版),2023(21):98-100.

作者简介:袁野,(1994.7—),男,汉族,毕业院校:西南交通大学;现就职单位:雄安城市规划设计研究院有限公司;^{*}通讯作者:梁朝阳(1992.10—),男,汉族,毕业院校:西安建筑科技大学;现就职单位:雄安城市规划设计研究院有限公司。