

基于驾驶模拟的十车道高速改扩建缓和曲线设置标准研究

邓飞宇¹, 刘清霞², 孙童¹, 周建³, 高沛³

(1. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004; 2. 北京中交华安科技有限公司, 北京市 100088; 3. 交通运输部公路科学研究所 公路交通安全技术交通运输行业重点实验室, 北京市 100088)

摘要: 改扩建高速公路提高设计速度后, 原有未设置缓和曲线的路段需要增设, 但增设缓和曲线带来的安全效益与投入成本并不匹配。为满足国内改扩建工程的实际需要, 研究高速公路缓和曲线的设置条件, 通过驾驶模拟实验, 基于驶入和驶出圆曲线时的驾驶稳定性分析, 提出了缓和曲线的设置标准, 结合国外相关规范规定, 确定不设缓和曲线时圆曲线半径阈值。结果表明: 当圆曲线半径低于3 000 m时, 不设置缓和曲线对驾驶员操作的影响开始增加; 曲线半径低于1 500 m时, 不设置缓和曲线对驾驶员操作产生显著影响; 最后建议当设计速度为120 km/h时, 不设置缓和曲线的圆曲线最小半径为4 000 m。研究结论能够为公路改扩建的成本控制提供参考, 有利于提高路线设计的科学性。

关键词: 十车道高速; 缓和曲线; 驾驶模拟; 轨迹偏移; 标准规范

中图分类号: U412.34; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0069-05

Study on Setting Criteria for Transition Curves in Ten-Lane Expressway Reconstruction and Expansion Based on Driving Simulation

DENG Feiyu¹, LIU Qingxia², SUN Tong¹, ZHOU Jian³, GAO Pei³

(1. Jiangsu Provincial Communications Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, China; 2. Beijing Zhongjiao Huanan Technology Limited Company, Beijing 100088, China; 3. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Key Laboratory of Highway Traffic Safety Technology and Transportation Industry, Beijing 100088, China)

Abstract: After the reconstruction and expansion of expressways to increase the design speed, it is necessary to add the road sections to those originally not to set the transition curves. However, the safety benefits brought by adding transition curves do not match the investment costs. In order to meet the practical need of the reconstruction and expansion projects in China, the setting conditions of transition curves for expressways are studied. Through the driving simulator experiments, and based on the analysis of the driving stability during entering and exiting circular curves, the criteria for setting the transition curves are proposed. In accordance with relevant foreign norms and regulations, the threshold for the radius of the circular curve is determined when no transition curve is set. The results indicate that when the radius of the circular curve is less than 3000m, the impact of not setting a transition curve on the operation of drivers begins to increase. When the curve radius is less than 1500m, not setting a transition curve will have a significant impact on the operation of drivers. Finally, it is recommended that when the design speed is 120km/h, the minimum radius of a circular curve without a transition curve is 4000 m. The research conclusion can provide the reference for the reconstruction and expansion of expressways, which is conducive to improving the scientific nature of route design.

Keywords: ten-lane expressway; transition curves; driving simulation; trajectory deviation; criteria and specifications

0 引言

目前随着我国高速公路的快速发展, 交通量增长带来了公路改扩建和设计速度提高的需求。按照现行标准, 提高设计速度后, 原来未设置缓和曲线的路段需要增设, 以满足线形协调性与超高过渡需求, 但增设缓和曲线需废弃原有的路基、路面、桥梁、隧

收稿日期: 2025-06-09

基金项目: 江苏省交通工程建设局科技项目“整体式十车道及以上高速公路关键技术研究”

作者简介: 邓飞宇(1974—), 男, 硕士, 研究员, 从事公路与城市道路设计工程研究工作。

道、排水等工程,带来的安全效益与投入成本并不匹配,也不符合规范“合理、充分利用原有工程”的原则^[1]。

在道路设计中,缓和曲线作为重要的线形组合要素,影响着车辆行驶的安全。一般来说缓和曲线就是设置在直线与圆曲线之间或半径相差较大的两个转向相同的圆曲线之间的一种曲率连续变化的曲线^[2]。根据国内外学者的研究,在车辆行驶过程中,当速度较大或者路线曲率发生突变的情况下,容易发生车辆偏移原有车道的情况,进而形成一条超出车道范围的轨迹。因此从提升行车安全的角度出发,有必要设置一条渐变轨迹以引导驾驶人,从而使驾驶人不会超越所在车道的边缘线,减少车辆的左右摆动,提高驾驶人的舒适性。

从视觉上看,圆曲线和直线视觉差异极大,对驾驶人而言,突然的圆曲线与直线的转换要求驾驶人采取更大角度的范围调整,整体过程并不顺畅,而通过设置缓和曲线,可以保证过渡段连续圆滑,增加线形的流畅性,同时从外观上看也感到安全^[3]。但当直线与大半径圆曲线相连接或车辆行驶速度较低的时候,现有车道宽度足够驾驶人将车辆保持在车道范围内,此时再设置缓和曲线意义不大,所以我国标准规范中规定(见表1),超过不设超高的圆曲线最小半径时可不设置缓和曲线^[4]。

表1 不设超高的圆曲线最小半径 单位:m

设计速度/ (km·h ⁻¹)	120	100	80	60	40	30	20
路拱≤2%	5 500	4 000	2 500	1 500	600	350	150
路拱>2%	7 500	5 250	3 350	1 900	800	450	200

从各方学者的研究来看,关于缓和曲线的设置条件、长度等内容开展了大量的研究,陆钰彬等人^[5]以驾驶舒适性、超高渐变段长度、线形美观等为影响因素,得出了不同平曲线半径下缓和曲线的长度大小,为公路路线的设计提供借鉴与参考;张治国^[6]也针对缓和全线提出了长度取值的建议,其采用的方法是通过行驶舒适度、视觉所需长度、规范规定等方面进行建模,结合实测数据标定完成长度取值研究;胡昌亮等人^[7]通过收集高速公路上的事故案例,通过分析事故与线形的关系,提出即使圆曲线半径大于不设超高最小半径,也宜设置缓和曲线和超高的设计改进建议;王贵山等人基于实践经验,针对《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)中缓和曲线的规定进行了深入分析,提出了更加符合实际工程

中缓和曲线的应用方法,提高了路线设计的科学性和应用性^[8-9]。

综上可见,缓和曲线的设置一方面是考虑车辆车道保持及超高过渡的安全要求,另一方面是考虑线形顺适和驾驶员舒适性要求。但我国目前不设置缓和曲线的圆曲线半径阈值是根据行驶舒适性要求,按照横向力系数最小值,计算不设超高圆曲线最小半径确定的。没有按照缓和曲线发挥的作用来确定,导致不设缓和曲线的圆曲线半径阈值偏大、偏保守。国外相关规范规定的不设置缓和曲线的圆曲线半径阈值普遍比国内低,有的地区甚至不强制要求设置缓和曲线。

为满足国内实际工程需要,本文对高速公路缓和曲线设置条件进行分析。通过开展高速公路不同曲线半径路段的驾驶模拟实验,基于进入和驶出圆曲线时的驾驶稳定性提出缓和曲线的设置标准,并合国外相关规范规定与国内驾驶模拟实验结论,确定我国不设缓和曲线时圆曲线半径阈值。

1 国外缓和曲线规定

美国对线形指标的研究最为深入,很多发达国家均参考美国标准制定自己国家的线形标准,而德国高速公路修建历史最为悠久,日本公路建设条件与我国较为相似,线形指标也具备一定的通用性。因此本文对以上3个国家的缓和曲线规定进行分析。

1.1 美国 AASHTO 规定

根据美国《公路与城市道路几何设计》(AASHTO—2011)规定^[10],如图1所示,在平曲线的缓和曲线中可以通过使用回旋线或者复合曲线把圆曲线很自然的引入,使直线和圆曲线之间很好的连接,其结果是伴随着曲线的出现,离心力的出现也将是一个缓慢的过程,车辆的方向变化也是一个逐渐渐变的过程。

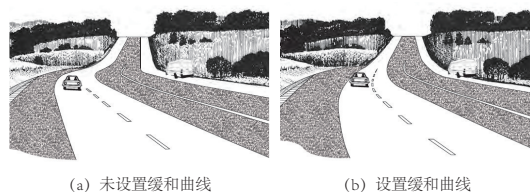


图1 缓和曲线提高线形连续性

根据驾驶经验,缓和曲线的设置能够使驾驶方向的改变处于一个渐变的过程,但是没有相关的参考文献说明为了保证行车安全而设置缓和曲线的必

要性,因此美国许多州仍采用的是不设缓和曲线的措施,他们通常的做法是根据经验规定出一定比例的直线段与圆曲线段的长度,以达到设置超高缓和的目的。理论分析证明,将大部分的缓和段放在直线段上而不是圆曲线上是一种理想的做法,缓和段的长度在直线与圆曲线间的合理分配可以减小车辆出现的横向加速度和侧向摩擦突变问题,但规范中没有定义需要设置的具体值。

1.2 德国规范规定

根据《联邦德国道路设计》^[11]、《道路横断面设计规范》(RAS-Q)^[12]、《道路路线设计规范》(RAS-L)^[13]规定,在下列圆曲线半径条件下,直线与圆曲线可直接连接。

- (1) B 种道路(城市道路), $R > 500 \text{ m}$;
- (2) A 种道路(公路),设计速度 $< 80 \text{ km/h}$ 时, $R > 1\,500 \text{ m}$;
- (3) A 种道路(公路),设计速度 $\geq 80 \text{ km/h}$ 时, $R > 3\,000 \text{ m}$;
- (4) 两反向圆曲线的半径达到上述可与直线直接相连的规定值时,可直接相连;
- (5) 当复曲线的两曲线半径比值处于最佳范围内时,可以直接相连。当相邻的两曲线半径处于应避免的范围中时,应设置交通标志。

1.3 日本规范规定

分析日本《高速公路设计要领》^[14]中缓和曲线内容,总结如下。

- (1) 直线与圆曲线连或大小不同的圆曲线相互连接时,原则上在其间设置回旋线作为缓和曲线。
- (2) 直线与圆曲线连接时,以 20 cm 位移量为界限,考虑缓和曲线最短为基础,可计算出不设缓和曲线曲线半径极限值,如表 2 所示。但为了不影响驾驶员在视觉和行驶上的顺适,取极限值的两倍作为不设缓和曲线的最大曲线半径一般值。
- (3) 不设超高曲线半径如表 3 所示。可见,对于 1.5% 横坡,设计速度为 120 km/h 时, $5\,500 \text{ m}$ 半径以

表 2 缓和曲线可省略的临界曲线半径

设计车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	标准临界曲线半径 极限值/m	标准临界曲线半径 一般值/m
120	2 100	4 000
100	1 450	3 000
80	930	2 000
60	520	1 000
50	360	700
40	230	500

下曲线需设置超高,但 $4\,000 \sim 5\,500 \text{ m}$ 半径曲线可不设置缓和曲线。不设缓和曲线段超高过渡平均分配在直线和圆曲线内。

表 3 允许反超高的曲线半径

直线部分的 横坡度/%	设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)				
	120	100	80	60	50
2.0	75 00	5 000	3 500	2 000	1 300
1.5	5 500	4 000	2 500	1 500	1000

综上所述,美国部分州、德国和日本关于缓和曲线设置条件的规定基本一致,均认为曲线半径达到一定的程度可以不设置缓和曲线,并通过设置直线缓和段完成超高过渡的目的。美国没有详细规定不设缓和曲线的具体指标,其不同的州对缓和曲线的规定不统一,有的州不采用缓和曲线。德国规定高速公路设计速度达到 80 km/h 时,曲线半径达到 $3\,000 \text{ m}$ 时即可不设缓和曲线。日本的规定最为详细,当高速公路设计速度分别为 80 、 100 、 120 km/h 时,曲线半径分别达到 $2\,000$ 、 $3\,000$ 、 $4\,000 \text{ m}$ 时即可不设缓和曲线。

2 驾驶模拟实验

2.1 实验环境

为验证不设缓和曲线对驾驶行为的影响,项目组基于 UC-winroad 软件,建立了一条 35 km 长的高速公路路段,其中圆曲线共 18 处,半径按照 500 m 的步长分布在 $1\,000 \sim 5\,000 \text{ m}$ 范围内。前 9 处为设置了缓和曲线的圆曲线路段,后 9 处为不设缓和曲线的圆曲线路段。实验路段最大纵坡为 0.5% ,以消除纵面影响。相同半径的圆曲线转向、纵面指标均相同。曲线间设置 $800 \sim 1\,000 \text{ m}$ 长度的直线段,以消除曲线间的相互影响。不设缓和曲线的圆曲线超高过渡按照美国 AASHTO 规定,采用在直线段设置 85% 超高过渡段、在圆曲线段设置 15% 超高过渡段的方案。



图 2 驾驶模拟实验

2.2 实验条件

本研究招募驾驶员被试10名(女性3名),年龄范围为22~37岁,驾龄为2~6年,均具备日常驾驶经验。实验开始前,要求被试驾驶员遵循以下要求:实验全程保持以125 km/h左右的速度匀速行驶;实验车辆不允许换道至其他车道。所有驾驶员均按照相关要求完成驾驶任务,辅助人员记录相关数据。

2.3 结果分析

完成上述实验后,项目组对实验车在进入曲线和离开曲线时的车辆轨迹相对于车道中心线的偏移情况进行统计。需要说明的是,考虑到当前驾驶模拟实验方法在国际上应用的普遍性,本文未对其有效性进行验证,同时本文采用的指标仅进行了相对比较,避免了绝对有效性验证的问题。

2.3.1 轨迹偏移量

轨迹偏移量是实验车中心位置与车道中心位置的差值^[15],反映出车辆在行驶时的横向稳定性,结果如下。

图3所示为设置缓和曲线前后,圆曲线段的车辆轨迹偏移情况。可见缓和曲线段曲率连续变化,实验车轨迹变化很小,驾驶员轻微调整车辆位置便能适应曲线变化。而不设置缓和曲线路段,曲率突变,实验车只能在圆曲线起点段调整方向,以适应曲线变化。而由于驾驶员不能确切的知道需要多大的方向盘转角才能与曲线曲率相一致,实验车需要不断的左右调整,同时可以发现经验丰富驾驶员调整幅度较小,而其他驾驶员则摆动幅度较大,在车道中线附近呈现波动的情况,对稳定性构成了一定影响。

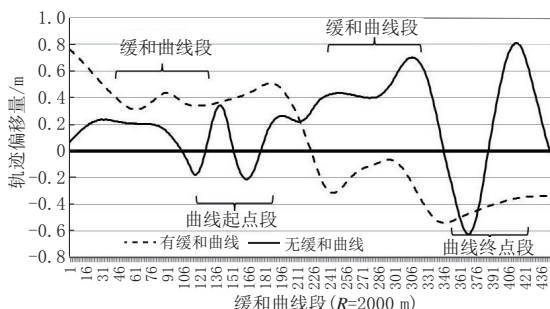


图3 车辆轨迹偏移量统计结果

由于被试者驾驶习惯不同,有的倾向于在车道中线左侧行驶,有的在右侧行驶。有的在进入缓和曲线前轨迹偏移量已经较大,几乎要压线行驶。因此仅按照轨迹偏移量并不能区分不同曲线半径设置缓和曲线的效果,因此需要进一步分析车辆的轨迹偏移率。

2.3.2 轨迹偏移率

轨迹偏移率是前后时刻轨迹偏移量的差值除以前后时刻行驶距离。即上图中波动曲线的斜率。对所有被试者通过不同半径曲线起点和终点的轨迹偏移率平均值进行统计,可以得到以下结果。其中不设置缓和曲线时,统计的是圆曲线起点至距离起点一个缓和曲线长度的点之间的轨迹。

图4所示为进入曲线时的轨迹偏移率,可以发现设置缓和曲线的情况下,不同半径曲线段车辆偏移率呈现波动趋势,没有显著的突变情况。不设置缓和曲线的情况下,曲线半径低于1 500 m时,轨迹偏移率显著增加。图5所示为驶出曲线时的轨迹偏移率,可以发现设置缓和曲线的情况下,不同半径曲线段车辆偏移率基本稳定,波动幅度低于曲线起点段。不设置缓和曲线的情况下,曲线半径低于3 000 m时,轨迹偏移率呈现显著增加趋势,可见曲线半径低于3 000 m时,不设置缓和曲线对驾驶员操作的影响开始显著增加,当曲线半径低于1 500 m时,不设置缓和曲线对驾驶员操作的影响突变。

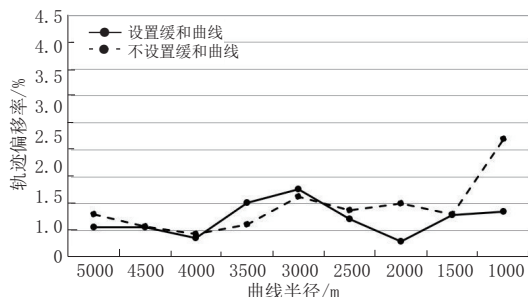


图4 驶入曲线时的车辆轨迹偏移率

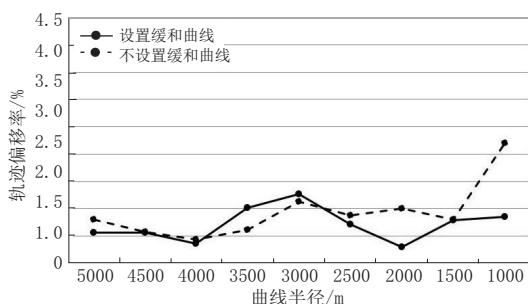


图5 驶出曲线时的车辆轨迹偏移率

由于被试驾驶员经验区别较大,经验不足驾驶员需不断调整车辆位置才能通过直线与曲线连接段。而轨迹偏移率仅观察前后时段内轨迹偏移量的变化,并不能反映实验车左右摆动,反复调整位置以适应线形变化的过程,因此需要对轨迹累计偏移差开展分析。

2.3.3 轨迹累计偏移差

轨迹累计偏移差是统计间隔内,前后时刻轨迹

偏移量的差值之和,对所有被试者通过不同半径曲线起点和终点的轨迹累计偏移差平均值进行统计,可以得到以下结果。

图6所示为进入曲线时的轨迹累计偏移差,可见设置缓和曲线前后,不同半径曲线段车辆累计偏移差基本稳定,呈现轻微波动趋势,没有显著的突变情况。图7所示为驶出曲线时的轨迹累计偏移差,可见设置缓和曲线的情况下,不同半径曲线段车辆累计偏移差基本稳定。不设置缓和曲线的情况下,曲线半径低于3 000 m时,轨迹累计偏移差呈现显著增加趋势。因此当曲线半径低于3 000 m时,不设置缓和曲线对驾驶员操作的影响开始显著增加,当曲线半径低于1 500 m时,不设置缓和曲线对驾驶员操作影响突变。

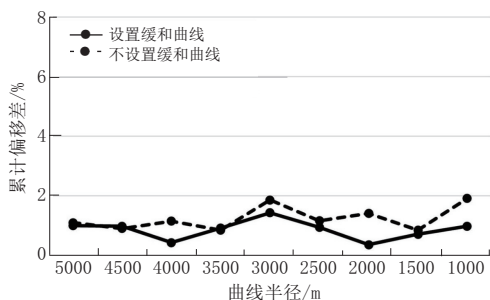


图6 驶入曲线时的车辆轨迹累计偏移差

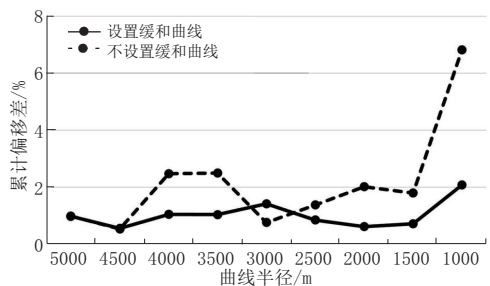


图7 驶出曲线时的车辆轨迹累计偏移差

3 缓和曲线设置条件

综上分析,从轨迹偏移量、轨迹偏移率和轨迹累计偏移差结果可见,当圆曲线半径低于3 000 m时,不设置缓和曲线对驾驶员操作的影响开始显著增加,当曲线半径低于1 500 m时,不设置缓和曲线对驾驶员操作的影响突变,该结论与日本路线规范中速度100 km/h要求时对应的曲线半径基本一致。

目前我国改扩建为双向十车道高速公路的工程项目已经不少,改扩建中普遍将设计速度提升到120km/h,因此都会面临是否设置缓和曲线的问题。

因此,为了利用现有的公路线位和设施,在确保驾驶人行车安全的前提下,同时降低改扩建成本,结合驾驶模拟实验结果,文章提出如下结论:当设计速度为120 km/h时,改扩建高速公路圆曲线最小半径为4 000 m时可以不设置缓和曲线。

4 结 语

本文通过驾驶模拟实验,研究了十车道高速公路不同曲线半径路段设置缓和曲线前后的车辆稳定性。基于进入和驶出圆曲线时的车辆轨迹偏移量、轨迹偏移率和轨迹累计偏移差指标,得到如下结论。

(1)圆曲线半径小于3 000 m时,不设置缓和曲线对驾驶员操作的影响开始增加;曲线半径小于1 500 m时,不设置缓和曲线对驾驶员操作的影响显著增加。

(2)提出120 km/h设计速度时,不设置缓和曲线的圆曲线最小半径为4 000 m。

下一步工作将结合开道路段的实际观测数据和事故资料,验证缓和曲线的设置标准和安全保障措施。

参考文献:

- [1] 代伟伟.高速公路改扩建工程线形指标受限路段设计方法研究[D].西安:长安大学,2021.
- [2] 富志鹏,任春宁,张腾,等.公路缓和曲线长度的合理取值分析[J].公路交通科技,2024,41(5):44-53.
- [3] 张志清.道路勘测设计[M].北京:科学出版社,2005.
- [4] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S].
- [5] 陆钰彬,王海珠.中外规范下缓和曲线长度取值对比分析[J].城市道桥与防洪,2024,(9):18-22;11.
- [6] 张治国.缓和曲线取值在高速公路设计中的分析与研究[J].公路,2022,67(6):74-77.
- [7] 胡昌亮,刘冉,王贵山.不设超高圆曲线路段道路几何设计探讨[J].中外公路,2021,41(5):1-5.
- [8] 王贵山,柳银芳,林宣财,等.公路缓和曲线应用探讨[J].中外公路,2021,41(1):1-4.
- [9] 胡昌亮,刘冉,王贵山.不设超高圆曲线路段道路几何设计探讨[J].中外公路,2021,41(5):1-5.
- [10] 美国州公路与运输官员协会.公路与城市道路几何设计[M].第6版.华盛顿:AASHTO,2011.
- [11] 杜尔特 W.联邦德国道路设计[M].景天然,译.北京:人民交通出版社,1987.
- [12] 联邦德国道路建设协会.RAS-Q 道路横断面设计规范[S].
- [13] 联邦德国道路建设协会.RAS-L 道路路线设计规范[S].
- [14] 日本道路公团.高速公路设计要领[S].东京:日本道路公团,1990.
- [15] 蒋生珍,高建平.双车道公路弯坡组合路段行车轨迹特性研究[J].公路,2017,62(5):174-179.