

城市道路缓和曲线最小长度研究

董华珍

(广州地铁设计院施工图咨询有限公司, 广东 广州 510010)

摘要:为提高行车安全性及舒适性,弥补道路缓和曲线长度现行设计方法的不足,针对城市道路缓和曲线最小长度规范取值局限性及设计中存在的问题,分析研究了缓和曲线最小长度的计算方法及规范取值的侧重点,首次提出了满足汽车离心加速度变化率、考虑驾驶者操作反应时间、超高因素和视觉美观性等4种情况下城市道路缓和曲线最小长度计算模型。研究结论为:在不涉及圆曲线超高情形下,应着重考虑汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间等因素对道路缓和曲线长度的影响,当设计车速 $V \leq 50$ km/h时,缓和曲线最小长度取值与规范取值一致,当设计车速 $V > 50$ km/h时,缓和曲线最小长度取值比规范取值大5 m;在涉及圆曲线超高情形下,应综合考虑汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间、超高因素和视觉美观性等因素对道路缓和曲线长度的影响。

关键词:城市道路;缓和曲线最小长度;计算模型;超高渐变率;离心加速度

中图分类号: U411

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)12-0222-04

0 引言

道路是一条带状的三维空间实体,城市道路线形是曲线与直线连接而成的空间立体线形形状,是道路中心线的空间描绘,确定了其空间的走向及具体位置。城市道路线形设计的好坏对车辆行驶的安全性有很大影响。为此,《城市道路路线设计规范》^[1]对城市道路的线形组合设计作出了一些规定,其目的是使得城市道路线形与车辆实际的行驶速度相匹配,保证行车的舒适、安全,并强调应采用运行速度对以线形组合设计为主的道路各项综合技术指标进行检验,以保障车辆行驶的安全性。在德国、日本、法国等发达国家的路线设计规范中,对不同线形之间的组合也作了详细的规定,但其规范中的限定值较中国更为宽松,在进行路线设计时的灵活度更大^[2-6]。

从20世纪60年代开始,计算机技术开始应用于道路线形设计中,经过多年的发展,形成了诸多成熟的市政道路设计软件,如HY-SZDL、EICAD、RDCADS、纬地道路、OpenRoads Designer等。由于道路线形设计中面对的自然条件十分复杂,经常会遇到一些难处理的地形,国内外主流路线设计软件也很难设计出运行安全、舒适、适应各主要控制点的

理想线形,很容易产生对行车安全不利的线形。道路线形对交通安全和顺适性具有重要的作用,不合适的线形会造成事故、增加维护运行费用、破坏环境。

缓和曲线是道路平曲线形要素之一,它是设置在直线与圆曲线之间或两半径不同的圆曲线之间曲率渐变的曲线。它需要与沿线的地形、地物、自然景观、行车视觉相协调,为驾驶人在心理、生理和视觉上提供良好的行驶条件,设计时应处理好直线与圆曲线(或不同曲线间)的衔接。缓和曲线作为直线与圆曲线(或不同圆曲线)之间的过渡段,在道路平面设计中科学、合理的应用可以在一定程度上减少安全隐患。

本研究针对现有城市道路线形设计方法存在的不足,借鉴吸收国内外已有相关成果^[7-11],基于现有的标准、规范以及设计方法理论,首次提出了综合汽车运动学、力学和驾乘者在视觉、心理方面要求的城市道路缓和曲线最小长度计算方法,旨在提高城市道路线形设计质量,增加行车安全性。

1 应用中存在的问题

1.1 规范中存在问题

《城市道路路线设计规范》表6.3.3-2、《城市道路设计规范》(2016年版)^[12]表6.2.4-1中的道路缓和曲线最小长度取值均仅考虑了驾驶员操作和反应时间的要求,并未考虑汽车离心加速度变化率、超高因素和视觉美观性对道路缓和曲线最小长度的要求。

收稿日期: 2022-02-17

作者简介: 董华珍(1981—),女,硕士,高级工程师,主要从事城市道路设计及咨询工作。

1.2 设计中常见问题

设计人员受道路规划的限制和对缓和曲线的认识不足,道路设计中对缓和曲线的应用存在以下问题:

(1)只采用《城市道路设计规范》、《城市道路路线设计规范》规定的缓和曲线最小长度值。

(2)由于采用过长的缓和曲线而将圆曲线半径缩小。

(3)机械地应用规划线形,直接采用直线与圆曲线(或不同圆曲线)连接方式。

(4)为了避免采用缓和曲线的烦琐,不根据实际地形采用适当的半径值,而是按上述规范中所列的不设缓和曲线的最小半径值,采用大半径。

(5)设计中未考虑汽车离心加速度变化率对缓和曲线长度的要求。

(6)设计中未考虑超高因素对缓和曲线长度的要求。

(7)设计中缓和曲线长度取值未考虑视觉美观性。

由于上述规范对于缓和曲线最小长度取值的局限性和部分设计人员对缓和曲线的应用缺乏了解,致使缓和曲线得不到合理应用,道路平面线形不够顺畅、直线与圆曲线(或不同圆曲线)的衔接生硬,不能确保行车的安全和舒适。因此,提高对缓和曲线的认识和完善缓和曲线最小长度取值,对合理应用缓和曲线愈显重要。

笔者在《城市道路路线设计规范》对于缓和曲线最小长度取值时仅考虑驾驶员操作和反应时间的基础上,研究汽车离心加速度变化率、超高因素和视觉美观性对缓和曲线最小长度的影响。

2 缓和曲线最小长度计算模型

当汽车通过缓和曲线从直线进入圆曲线(或从圆曲线进入另一圆曲线)时,为了使驾驶者能够从容地转动方向盘,以便比较准确地把车辆保持在它应占有的车道之内,并且能够让驾乘者在汽车转向过程中保持连续协调、舒适的视觉感受,缓和曲线长度应不小于某个限度,这个限度(即缓和曲线最小长度)主要依据汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间、道路超高渐变率以及驾驶者视觉条件等进行计算。因此,在实际应用时,要综合考虑按离心加速度变化率计算的缓和曲线最小长度允许值 L_{s1} 、按驾驶员操作和反应时间计算的缓和曲线最小长度允许值 L_{s2} 、按道路超高渐变率计算的缓和曲线最小长

度允许值 L_{s3} 、按满足视觉条件计算的缓和曲线最小长度允许值 L_{s4} ,然后取其中的最大值来最终确定缓和曲线最小长度。

2.1 按汽车离心加速度变化率计算

通过缓和曲线段,汽车的离心加速度从直线上的0,逐渐增加到进入圆曲线时的最大值。为了保证车辆行驶稳定,其离心加速度的变化率应限制在一定的范围内。缓和曲线所需长度可根据上述条件确定。

在等速行驶的情况下,汽车离心加速度变化率 $a_p^{[13-14]}$ 为:

$$a_p = \frac{a}{t} = \frac{v^2}{Rt} = \frac{v^3}{RL_s} \quad (1)$$

$$\text{由此得: } L_s = 0.0214 \frac{V^3}{Ra_p} \quad (2)$$

式中: a_p 为离心加速度变化率, m/s^3 ; a 为汽车离心加速度, m/s^2 ; t 为汽车在缓和曲线上行驶的时间, s ; v 为设计速度, m/s ,当单位为 km/h 时,设计速度用 V 表示; R 为圆曲线半径, m ; L_s 为缓和曲线长度, m 。

在安全行车情况下,市政道路一般要求汽车离心加速度变化率 $^{[1,12-14]} a_p \leq 0.6 \text{ m/s}^3$ 。我国道路设计中 $^{[1,12]}$ 采用 $a_p = 0.6 \text{ m/s}^3$,代入式(2)得:

$$L_s \geq 0.035 \frac{V^3}{R} \quad (3)$$

$$\text{即: } L_{s1} \geq 0.035 \frac{V^3}{R} \quad (4)$$

2.2 按驾驶者操作反应时间计算

缓和曲线不管其参数如何,都不可使车辆在其上的行驶时间过短,而使司机驾驶操纵过于匆忙,应使驾驶员有足够的时间适应线形变化,也使乘客感到舒适。一般认为驾驶者操作反应时间 T 不短于 $3 \text{ s}^{[1,12-14]}$,因此:

$$L_s = v \cdot T = \frac{V}{3.6} \cdot T \quad (5)$$

代入 $T=3 \text{ s}$,可得:

$$L_{s2} = 0.833V \quad (6)$$

2.3 按道路超高渐变率计算

《城市道路路线设计规范》第6.4.6条要求,超高缓和段长度与缓和曲线长度两者中应取最大值作为缓和曲线的计算长度。道路由直线上的正常路拱断面过渡到圆曲线上的超高断面时,必须在其间设置超高缓和段。超高缓和段最小长度 $L_e(\text{m})$ 计算公式为:

$$L_e = \frac{b \cdot \Delta i}{\varepsilon} \quad (7)$$

缓和曲线长度 L_s 应不短于超高缓和段最小长度

L_e , 即 $L_s \geq L_e$, 有:

$$L_s = \frac{b \cdot \Delta i}{\varepsilon} \quad (8)$$

式中: b 为超高旋转轴至路面边缘的宽度, m; Δi 为超高横坡度与正常路拱坡度的代数差, %; ε 为超高渐变率。

即有:

$$L_{s3} = \frac{b \cdot \Delta i}{\varepsilon} \quad (9)$$

2.4 按驾驶者视觉要求计算

考虑线形舒适和美观要求, 缓和曲线参数 A 宜根据地形条件及线形要求确定^[12, 15]。根据视觉要求, 试验所得缓和曲线起点至终点切线角的变化 β 宜控制在 $3^\circ \sim 29^\circ$ ^[12-14], 即 $\beta = \frac{L_s}{2R} = \frac{A^2}{2R^2}$, 代入 β 范围变化

值, 有 $A \in \left(\frac{R}{3}, R\right)$ 。

实践经验认为^[13-14], 当 $A \in \left(\frac{R}{3}, R\right)$ 时, 回旋线缓和曲线能满足平面视觉的要求, 使线形协调。这是由于当 $A < \frac{R}{3}$ 时, 缓和曲线仅为接近回旋线原点附近的一小段, 曲线过短, 不容易看出, 不能满足视觉上的圆顺; 当 $A > R$ 时, 则曲线过长, 在缓和曲线终点处曲率增加极快, 行车须时常刹车而导致不圆顺的感觉。

从回旋线特性有:

$$R \cdot L_s = A^2 \quad (10)$$

将 $A \in \left(\frac{R}{3}, R\right)$ 代入式(10), 可以得到缓和曲线最小长度的取值范围为:

$$L_s \in \left(\frac{R}{9}, R\right) \quad (11)$$

$$\text{即有: } L_{s4} = \frac{R}{9} \quad (12)$$

3.5 计算模型结论

根据上述缓和曲线最小长度计算公式和式(4)、式(6)、式(9)、式(12)计算结果, 缓和曲线最小长度为:

$$L_s = \max(L_{s1}, L_{s2}, L_{s3}, L_{s4}) \\ = \max\left(0.035 \frac{V^3}{R}, 0.833V, \frac{b \cdot \Delta i}{\varepsilon}, \frac{R}{9}\right) \quad (13)$$

缓和曲线最小长度 L_s 合理取值范围为:

$$L_s \in [\max(L_{s1}, L_{s2}, L_{s3}, L_{s4}), R] \quad (14)$$

即:

$$L_s \in \left[\max\left(0.035 \frac{V^3}{R}, 0.833V, \frac{b \cdot \Delta i}{\varepsilon}, \frac{R}{9}\right), R\right] \quad (15)$$

3 计算结果及取值建议

3.1 计算结果及分析

由上述计算方法, 缓和曲线最小长度计算结果见表 1。表 1 中:“规范取值”指《城市道路路线设计规范》表 6.3.3-2 中的缓和曲线最小长度取值; b 取值时未考虑加宽, 设计速度为 100 km/h、80 km/h 时暂按单向 4 车道 16 m 计, 60 km/h、50 km/h 时暂按单向 3 车道 11 m 计, 40 km/h、30 km/h 时暂按单向 2 车道 7.5 m 及 7.25 m 计, 20 km/h 时暂按单向 1 车道 5 m 计; 道路设计路拱横坡度 i 按 2% 计, 超高横坡度按《城市道路路线设计规范》最大超高横坡度取值。

表 1 缓和曲线最小长度计算值 单位: m

计算模型	设计速度 / (km · h ⁻¹)						
	100	80	60	50	40	30	20
规范取值	85	70	50	45	35	25	20
$L_{s1} \geq R$ 为设超高 $0.035 \frac{V^3}{R}$ 半径最小值 (极限值)	87.5	71.7	50.4	43.8	32.0	23.6	14.0
$L_{s2} = 0.833V$	83.3	66.6	50.0	41.7	33.3	25.0	16.7
$L_{s3} = \frac{b \cdot \Delta i}{\varepsilon}$ 绕中线旋转	288.0	256.0	115.5	105.6	45.0	36.3	20.0
R 为不设超高半径	177.8	111.1	66.7	44.4	33.3	16.7	7.8
$L_{s4} = \frac{R}{9}$ R 为设超高 半径最小值 (一般值)	72.2	44.4	33.3	22.2	16.7	9.4	4.4

计算结果表明: (1) 考虑驾驶者操作反应时间条件下, 计算结果与规范取值相适应。(2) 考虑汽车离心加速度变化率条件下, 当设计车速 $V \leq 50$ km/h 时, 计算结果与规范取值相适应; 当设计车速 $V > 50$ km/h 时, 计算结果略高于规范取值。(3) 考虑超高因素条件下, 计算结果为规范取值的 1.5 ~ 3.4 倍。(4) 考虑视觉美观性条件下, 当 R 为不设超高半径, 设计车速 $V \leq 50$ km/h 时, 与规范取值相适应; 设计车速 $V > 50$ km/h 时, 计算结果为规范取值的 1.3 ~ 2 倍。(5) 考虑视觉美观性条件下, 当 R 为设超高半径最小值(一般值)时, 计算结果小于规范取值。

由表 1 及计算结果可知, 《城市道路路线设计规范》表 6.3.3-2 中的缓和曲线最小长度取值, 主要侧重于驾驶者操作反应时间影响。当设计车速 $V \leq 50$ km/h 时, 规范取值与考虑汽车离心加速度变化率、视觉美观性基本相适应; 当设计车速 $V > 50$ km/h 时, 规范取值不满足汽车离心加速度变化率、视觉美观性要求。缓和曲线最小长度规范取值不适用于涉

及圆曲线超高情形。

3.2 取值建议

根据上述计算结果及分析,缓和曲线最小长度取值建议:(1)在不涉及超高因素条件下,着重考虑汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间等因素对缓和曲线长度的影响,当设计车速 $V \leq 50$ km/h 时,缓和曲线最小长度取值与规范取值一致;当设计车速 $V > 50$ km/h 时,缓和曲线最小长度取值比规范取值大 5 m。(2)在涉及超高因素条件下,应综合考虑汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间、超高因素和视觉美观性等因素对缓和曲线长度的影响。

将表 1 的计算值取整为 5 m 的整倍数,可得缓和曲线最小长度建议值,如表 2 所示。表 2 中:括号内数值为规范取值;考虑道路超高渐变率对缓和曲线最小长度要求时,建议按实际超高横坡度计算。

表 2 缓和曲线最小长度建议值							单位:m
考虑因素	设计速度 /(km·h ⁻¹)						
	100	80	60	50	40	30	20
不涉及圆曲线超高情形:考虑汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间等情形	90 (85)	75 (70)	55 (50)	45 (45)	35 (35)	25 (25)	20 (20)
涉及圆曲线超高情形:考虑汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间、道路超高渐变率以及驾驶者视觉条件等情形(绕中线旋转为例)	290	260	120	110	45	40	20

4 结 语

(1)《城市道路路线设计规范》表 6.3.3-2 中的缓和曲线最小长度取值,主要侧重于驾驶者操作反应时间影响,并未考虑其他因素的影响,且缓和曲线最小长度规范取值不适用于涉及圆曲线超高的情形。

(2)在不涉及圆曲线超高情形下,着重考虑汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间等因素对缓和曲线最小长度的影响,当设计车速 $V \leq 50$ km/h

时,缓和曲线最小长度取值与规范取值一致;当设计车速 $V > 50$ km/h 时,缓和曲线最小长度取值比规范取值大 5 m。

(3)在涉及圆曲线超高情形下,应综合考虑汽车离心加速度变化率、驾驶者操作反应时间、超高因素和视觉美观性等因素对缓和曲线最小长度的影响。

(4)城市道路平面缓和曲线设计中,不仅要考虑汽车运动学和力学的要求,同时也要考虑驾乘者在视觉和心理方面的要求,科学、合理地应用缓和曲线,处理好直线与圆曲线(或不同圆曲线)之间的过渡。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.CJJ 37—2012,城市道路设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

[2] 雷斌.中法高速公路线形设计安全与指标对比研究[D].西安:长安大学,2009.

[3] 王佐,李宏斌,陈波.欧洲高速公路几何设计规范的技术要点[J].公路,2008(9):50-53.

[4] 赵立廷,李宏斌.国内外高速公路总体设计的差异比较[J].公路,2008(9):4-6.

[5] 刘春雷.法国《公路设计指南》中有关几何设计的综述[J].交通科技,2016(2):146-148.

[6] 日本道路公团.日本高速公路设计要领[M].西安:陕西旅游出版社,1991.

[7] 曾志刚,杜朝阳.中美规范下缓和曲线最小长度对比分析[J].交通科技,2020(6):89-92.

[8] 潘兵宏,王开明,赵胜林,等.可用作公路缓和曲线的 K 型曲线数学模型及其特点分析[J].长安大学学报(自然科学版),2020(3):33-41.

[9] 宋占峰,王健,李军.缓和曲线正交拟合的 Levenberg-Marquardt 算法[J].西南交通大学学报,2020(1):144-149.

[10] 尚涛.不完整缓和曲线坐标计算方法的探讨[J].科学技术创新,2021(23):44-46.

[11] 张星.国内外道路线形设计技术指标对比研究[D].西安:长安大学,2011.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.CJJ 193—2012,城市道路路线设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[13] 孙家骊.道路勘察设计[M].北京:人民交通出版社,2012.

[14] 杨少伟,吴明先,符铎砂.道路勘察设计[M].北京:人民交通出版社,2009.

[15] 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(1):1-4.