

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2024.05.006

公路缓和曲线长度的合理取值分析

富志鹏*, 任春宁, 张腾, 张江洪, 林宣财
(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 为给车辆由直线(圆曲线)驶入圆曲线(直线)提供合理的路径长度, 确保驾驶员能以安全、舒适、自然的状态驶入目标曲线单元, 通过对现行路线规范中缓和曲线长度取值规定的合理性分析, 发现回旋线参数取值规定易存在曲线单元间长度分配均匀、取值长度过长、不易与地形地物相协调等问题。结合美国《绿皮书》对缓和曲线取值的相关规定, 从汽车行驶轨迹、缓和曲线偏移值特征及超高过渡等方面对缓和曲线长度取值进行理论分析研究。结果表明: 在设计速度一定的情况下, 随着圆曲线半径的增加, 缓和曲线长度取值应随之减小; 随着设计速度的增加, 缓和曲线长度取值也应随之增加, 但增加值较小, 可忽略不计; 在设计速度和圆曲线半径均相同的情况下, 随着缓和曲线长度的增加, 驾驶员判断前方平曲线的曲率半径偏小, 易驶入临近车道, 不利于交通安全。另外, 根据缓和曲线偏移值特征及超高过渡所需长度研究发现, 通过控制缓和曲线偏移值1 m、缓和曲线长度200 m范围, 圆曲线半径与缓和曲线之间的变化关系较为稳定, 符合车辆行驶轨迹, 基本满足超高过渡段设置的要求。经计算得出当圆曲线半径大于1 666 m时, 缓和曲线长度宜随圆曲线半径的增大而减短。

关键词: 道路工程; 缓和曲线长度; 理论分析; 行驶轨迹; 回旋线偏移值; 超高过渡段长度

中图分类号: U412.33

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2024)05-0044-10

Analysis on Reasonable Value of Highway Transition Curve Length

FU Zhi-peng*, REN Chun-ning, ZHANG Teng, ZHANG Jiang-hong, LIN Xuan-cai
(CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: To provide a reasonable length for vehicles to move from a straight line (circular curve) to circular curve (straight line), and ensure drivers driving into the target curve at a safe, comfortable and natural state, the study analyzes the rationality of specification values of transition curve length in the current route specification. It is found that the length distribution among curve units is uniform, the length is too long, and it is not easy to coordinate with terrain and features. Combining with the relevant provisions of AASHTO on the value of transition curve, the value of transition curve length is theoretically analyzed and studied from the aspects of driving track, offset value of transition curve, and superelevation transition. The result indicates that the transition curve length decreases with the increase of circular curve radius when the design speed is fixed. With the increase of design speed, the transition curve length should also increase, but the increase value is small and can be ignored. When the design speed and circular curve radius are the same, with the increase of transition curve length, drivers would judge that the curvature radius of flat curve ahead is small. It is easy to enter the adjacent lane, which is not conducive to traffic safety. In addition, according to the study on offset value of transition curve and the length required for superelevation transition, it is found that by controlling the offset value of relaxation curve to 1 m and the length of relaxation curve to 200 m, the changing relationship between circular curve radius and transition curve is relatively stable, which is in line

收稿日期: 2022-06-10

基金项目: 中交第一公路勘察设计研究院科技创新基金项目(KCJJ2018-05)

作者简介(* 通讯作者): 富志鹏(1975-), 男, 新疆呼图壁人, 博士, 教授。(12766200@qq.com)

with the driving trajectory, and basically meets the requirements for setting superelevation transition segments. When the circular curve radius is greater than 1 666 m, the length of relaxation curve should be shortened with the increase of circular curve radius.

Key words: road engineering; transition curve length; theoretical analysis; driving track; offset value of cycloid; length of superelevation transition section

0 引言

随着中国高速公路路网建设进程的发展,山区高速公路的建设和高度城镇化地区高速公路的改扩建已稳步进入轨道。受地形及城镇控制因素的影响,高速公路设计要素技术指标取值对工程规模、社会环境等都具有较大影响,车辆在高速公路上的运行特性也逐渐受到关注^[1-4]。缓和曲线作为构成公路平面线形基本要素的重要组成部分,一方面有效模拟了车辆转弯时的行驶轨迹,使车辆从直线向圆曲线或圆曲线向直线过渡时离心力逐渐变化有助于车辆匀速行驶,另一方面缓和曲线的设置提供了曲线加宽及超高过渡的有利条件,对改善路容、避免圆曲线起终点处线形明显的转折具有显著效果。

根据国内外规范对缓和曲线的相关规定,目前各国普遍采用回旋线作为缓和曲线,而且相应规定相差不大。美国 AASHTO《公路与城市道路几何设计政策》^[5](以下简称《绿皮书》)对缓和曲线最小长度和最大长度均没有给出明确值,但从缓和曲线偏移量与驾驶员自然操作车辆产生的最大侧移量宜保持一致的角度,提出从直线与圆曲线之间的最大偏移量为 0.2 m 时缓和曲线长度为最小值。《绿皮书》从安全角度提出应对缓和曲线的最大长度进行限制,即从直线与圆曲线之间的最大偏移量为 1 m 时缓和曲线长度为最大值。另外《绿皮书》规定了使用缓和曲线的最大半径,即圆曲线半径较大时设置缓和曲线所得的行车安全和便利非常有限。同时《绿皮书》从回旋缓和曲线对驾驶的影响角度,即当回旋线长度大约等于车辆行驶中的自然轨迹长度时为最理想状态,依此提出了期望的缓和曲线长度值,即车辆匀速运行 2 s 时相应的曲线长度。日本《高速公路设计要领》^[6](以下简称《设计要领》)规定了缓和曲线的最小长度,但在实际中,由于回旋线不单纯作为缓和曲线,而是作为视觉方面能得到圆顺线形条件(在圆曲线半径的 1/3~1/1 范围内选用回旋线参数),所以取值往往比规定最小长度值大得多。同时《设计要领》规定当圆曲线半径达到一定值时,其缓和曲线可省略不设。法国规范 ICTAAL2000^[7]对缓和曲线的长度取值主要根

据曲线的弯曲状况(14 倍的超高差值)和平曲线直观的舒适状况(圆曲线半径的 1/9)二者的最大值来确定,至少应等于最低的 2 个数值。中国《公路路线设计规范》(JTG D20—2017,下以编号简称)中相关规定与日本规定基本一致,规定了缓和曲线最小长度,不设缓和曲线的圆曲线半径值,同时根据圆曲线半径取值区间对缓和曲线参数值给予不同的规定。

国内学者对缓和曲线长度取值与安全性的关系研究较多。王贵山等^[8]结合工程项目实际运用经验,为保证排水通畅,灵活运用缓和曲线的规范规定,尽量将缓和曲线取短。徐进等^[9]用公路-驾驶员-车辆-环境仿真系统模拟了切弯和跟弯模式下车辆在弯道上的行驶过程,指出回旋线会改变“切弯”行驶时车辆轨迹与弯道线形之间的拓扑关系,并且回旋线越长这种影响越显著。杨轶等^[10]通过对缓和曲线的理论分析和应用,提出在隧道出入口路段方向盘冻结 3 s 导致的行车轨迹同原有路线的偏移作为判别隧道出入口线形一致性的标准。富志鹏等^[11]、任春宁等^[12]基于中间带宽度变化方式的研究,建立了中间带宽度增宽值和缓和曲线长度之间的关系,结果表明合理的缓和曲线设置可为道路前后中间带宽度变化提供有效的过渡条件,并使路线线形保持连续性,保证交通安全。范爽^[13]、路宁^[14]、涂圣文等^[15]、王浩等^[16]基于交通事故资料,采用相关性分析研究交通事故与缓和曲线之间的关系、各曲线要素之间的组合关系,指出缓和曲线长度的取值与交通安全运行有着非常密切的关系。程国柱等^[17]基于仿真试验,针对道路几何指标,根据影响路侧安全程度进行排序,分析了不同车型在平曲线路段的速度特性。郭应时等^[18]研究了山岭区双车道公路角度变化率对事故分布规律的影响,提出了事故率最低点对应的角度变化率。

综上所述,《绿皮书》明确提出回旋线长度过长会误导驾驶人认为前方圆曲线的半径较小而出现安全问题。除此之外,国内外对缓和曲线最大长度取值研究偏少,且研究方法主要集中于缓和曲线长度与事故耦合关系、不同平曲线组合的运行速度特征分析等方面,并未在量化指标方面有相关结论,对

实际运用的指导缺乏理论支撑。故本研究从理论推导层面出发,一方面基于车辆运动学理论,从汽车转弯行驶轨迹的研究中分析了缓和曲线的最大长度取值,另一方面对《绿皮书》及其他各国规范中所指出的缓和曲线上车辆行驶偏移特征及超高过渡角度对缓和曲线长度取值进行量化分析研究,进而提出缓和曲线长度的合理取值。

1 缓和曲线长度取值规定及存在的问题

1.1 缓和曲线取值规定

JTG D20—2017 规范对最小缓和曲线长度以 3 s 行程距离为基数给出了明确的规定,但对缓和曲线最大长度没有进行规定。回旋线长度取值基本规定为:回旋线长度应随圆曲线半径的增大而增长;回旋线长度应不小于超高过渡段长度;回旋线最小长度应符合相关规定(见表 1)。

表 1 回旋线最小长度

Tab. 1 Minimum length of cycloid

设计速度 (km·h ⁻¹)	120	100	80	60	40	30	20
回旋线最小长度/m	100	85	70	50	35	25	20

同时,在回旋线的运用中提出回旋线的长度宜与圆曲线半径相协调的规定,即回旋线的参数 A (缓和曲线采用回旋线作为道路线形时的参数值)宜为圆曲线半径 R 的 $1/3 \sim 1$,具体规定为:当 $R < 100$ m 时, $A \geq R$ 为宜;当 R 接近于 100 m 时, $A = R$ 为宜;当 R 较大或接近于 3 000 m 时, $A = R/3$ 为宜;当 $R > 3 000$ m 时, $A < R/3$ 为宜;回旋线、圆曲线、回旋线之间的长度以“三三分”为宜。

1.2 回旋线参数取值规定合理性分析

调查表明, JTG D20—2017 规范中回旋线长度应随圆曲线半径的增大而增大,回旋线的参数 A 宜为 $R/3 \leq A \leq R$,对缓和曲线长度的取值影响非常大。在实际运用中,多数设计者忽视了以回旋线长度取值的基本规定,而被回旋线与圆曲线半径相协调的规定所牵制,出现了不合理的设计。经综合分析研究,认为回旋线长度取值的基本规定较为合理,但回旋线参数取值的规定存在较多问题,主要问题如下。

(1) 根据 $R < 100$ m 时, $A \geq R$ 为宜,计算缓和曲线长度时,缓和曲线长度必然大于等于圆曲线半径。由于 $R < 100$ m 时,圆曲线长度往往比较短,按规定设置缓和曲线后,很容易出现缓和曲线长度比圆曲线长度长得多,平面线形组合出现接近于凸形线形,如图 1 (a) 所示。如果平曲线偏角较小,仍然会出现这种类似凸形组合线形,如图 1 (b) 所示。

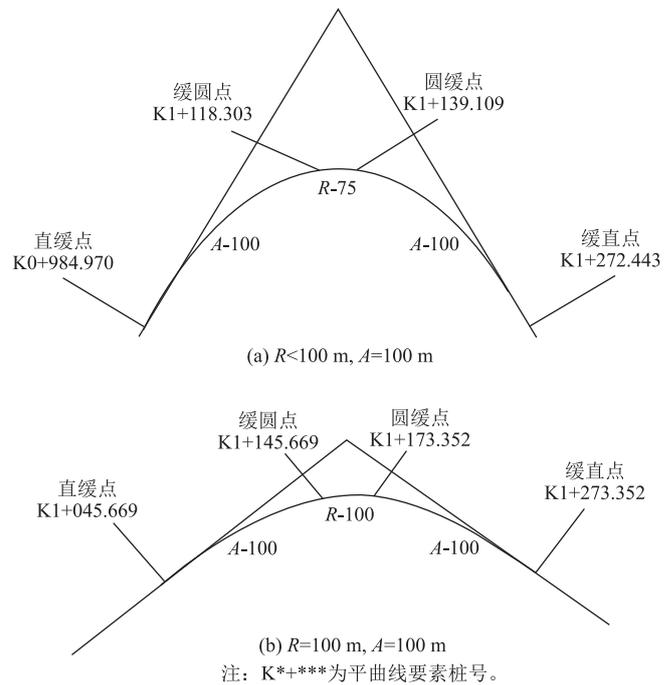


图 1 当 $R \leq 100$ m 时回旋线参数的运用

Fig. 1 Application of cycloid parameters when $R \leq 100$ m

(2) 由于 JTG D20—2017 规范对回旋线参数运用的规定中没有考虑平面转角的影响,对回旋线、圆曲线、回旋线之间的长度以“三三分”为宜的规定较难掌握,而且该规定容易与其他规定出现矛盾,如 $R < 100$ m 时,与 $A \geq R$ 为宜的规定不一致(见图 1)。圆曲线半径较大时,平曲线长度比较长,也难以按“三三分”掌握。

(3) 根据 R 较大或接近于 3 000 m 时, $A = R/3$ 为宜的规定,计算回旋线参数、缓和曲线长度,其结果如表 2 所示。由表 2 可知:圆曲线半径 $\leq 1 000$ m 时,缓和曲线长度不满足超高过渡段设置长度的要求;当设计速度为 100 km/h、圆曲线半径 ≤ 700 m 和设计速度为 80 km/h、圆曲线半径 ≤ 400 m 两种情况,缓和曲线长度均不满足最小长度要求;当圆曲线半径 $\geq 2 000$ m 时,随着圆曲线半径的增大,超高过渡所需要的长度越来越短,但 A 值按 $R/3$ 计算得到的缓和曲线长度增加较多,与超高过渡需求相悖。

(4) 根据 $R > 3 000$ m 时, A 宜 $<$ 于 $R/3$ 的规定, A 可取 $R/3$,也可取 $R/6$,取值范围非常大,造成缓和曲线取值随意性大。如表 2 所示,当 $R = 5 000$ m 时, $A = R/3$,缓和曲线长度为 556 m,而超高值仅为 2%,超高过渡段所需要的长度为:四车道高速公路短于 90 m,六车道短于 120 m,八车道短于 150 m,缓和曲线取值与超高过渡段需求不相称,而且缓和曲线偏移值达到 2.58 m。

表2 不同圆曲线半径对应的回旋线参数、缓和曲线长度及超高值

Tab. 2 Cycloid parameters, transition curve lengths and superelevation values corresponding to different circular curve radii

圆曲线半径/m	400	700	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000
回旋线参数/m	133	233	333	667	1 000	1 333	1 667
缓和曲线长度/m	44	77	111	222	333	444	556
设计速度 80 km/h	7	5	3	2	—	—	—
设计速度 100 km/h	8	6	5	3	2	2	—
设计速度 120 km/h	—	8	6	3	2	2	2

注: $A=R/3$; 超高值以最大超高 8% 为取值依据。

(5) A 值随着圆曲线半径的增大而增大的规定造成较多设计者误以为缓和曲线长度取值越长越好, 在依据回旋线参数的规定设计时, 总是采用较长、甚至过长的缓和曲线, 出现较多与设置缓和曲线的目的与意义不相符的问题。

(6) 当圆曲线半径较小时, 缓和曲线取值受缓和曲线最小长度和超高过渡段长度的规定值限制, 最小值有底限。当圆曲线半径较大时, 规范对最大长度没有限制, 因此, 经常发现有缓和曲线长度取值超过 300 m 甚至更长的情况。高速公路圆曲线半径一般在 400~5 000 m 之间, 但缓和曲线长度取值大于 200 m 现象非常普遍。有经验的专家认为, 当设计速度在 20~60 km/h 时, 缓和曲线长度的取值宜在 JTG D20—2017 规范规定的最小长度基础上小幅上浮, 取最小值的 1~2 倍; 当设计速度在 80~120 km/h 时, 取最小值的 1.5~2.5 倍, 但缺乏理论依据, 同时按此上限取值最大长度仍然偏长。

1.3 缓和曲线长度过长存在的问题

(1) 容易引发车辆行驶轨迹偏离行车道。缓和曲线的设置有助于车辆由直线平稳过渡到圆曲线路段, 缓和曲线基本拟合车辆转弯时的行驶轨迹与车辆逐渐受离心力作用的渐变过渡相符。但随着缓和曲线长度的增长, 如果长度过长, 易造成驾驶员对前方圆曲线曲率半径的误判。在缓和曲线末端车辆行驶轨迹的曲率出现大于圆曲线曲率易引发车辆驶入相邻车道, 对行车安全不利。

(2) 容易造成超高过渡段设置不合理。缓和曲线长度应考虑缓和曲线上设置超高过渡段的长度, 而缓和曲线长度较长, 如果在缓和曲线全段过渡, 则容易出现超高过渡渐变率较小。当超高渐变率小

于 1/330 时, 易出现排水不畅的现象; 当超高渐变率虽大于 1/330, 但接近该值时, 由正常路拱过渡到反向路拱的路段长度则较长, 排水困难路段加长, 在阴雨天气路面摩阻力系数明显变小, 对行车安全不利; 如果在缓圆点或圆缓点开始按规范规定的超高渐变率过渡, 则容易出现一段坡差较大的反超高路段, 对行车舒适性、交通安全性影响较大。

(3) 容易造成平曲线曲率半径减小, 降低行车舒适度。当平面转角一定时, 随着缓和曲线长度的增长, 平面圆曲线的半径和长度将减小, 车辆在圆曲线路段的向心力将增加, 驾驶员和乘客的舒适度将会随之下降。重心较高的大型车发生侧移甚至侧翻的风险增大。而且在山岭地区, 因地形条件限制, 曲线转角往往偏大, 缓和曲线长度对平曲线走向影响较为显著, 缓和曲线长度较长易使路线与地形适应性差, 进而导致工程规模显著增加。

(4) 容易造成与地形、地物不协调。山岭地区因地形条件复杂, 当曲线转角偏大时, 缓和曲线长度取值过长对平曲线走向影响较为显著, 片面地采用过长缓和曲线可能带来与地形、地物的不协调。

1.4 美国相关规定及参考价值

(1) 美国相关规定

《绿皮书》对缓和曲线的最小值、最大值和期望值均给出明确的建议值。期望值采用车辆在设计速度下运行 2 s 时相应的曲线长度 (见表 3); 最小长度采用车辆在直线与圆曲线之间的缓和曲线上的最小偏移值为 0.2 m 时计算所得的值; 最大长度采用最大偏移值为 1 m 时计算所得的值, 缓和曲线最大长度与驾驶人自然操作车辆产生的最大侧移量是一致的。

表3 期望的缓和曲线长度

Tab. 3 Expected length of transition curve

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
缓和曲线长度/m	11	17	22	28	33	39	44	50	56	61	67	72

(2) 美国相关规定的参考价值

根据美国对缓和曲线最小长度与最大长度的取值规定,中国 JTG D20—2017 规范规定的圆曲线最小半径一般值对应的缓和曲线最小长度与最大长度见表 4。缓和曲线最大长度计算值与中国超过渡段长度较为接近,因此缓和曲线最大长度以缓和曲线偏移值为 1.0 m 作为控制值具有参考价值。

表 4 圆曲线最小半径一般值对应缓和曲线最小长度和最大长度
Tab. 4 Minimum and maximum lengths of transition curve corresponding to general minimum radius of circular curve

设计速度/(km·h ⁻¹)	20	30	40	60	80	100	120
圆曲线最小半径一般值/m	30	65	100	200	400	700	1 000
缓和曲线 长度/m	最小值	12	18	22	31	44	58
	最大值	27	39	49	69	98	130

2 高速公路缓和曲线长度合理取值分析

2.1 基于车辆转弯行驶轨迹的缓和曲线长度取值研究

根据相关研究对车辆由直线进入圆曲线的行驶轨迹进行分析(见图 2)。假定车辆前后轮轴距为 d (m),车辆以速度 v (m/s) 等速行驶,驾驶员以角速度 w (rad/s) 匀速转动方向盘,行驶时间 t (s) 后,则前轮转动 Φ (rad),汽车的行驶轨迹曲线半径为 r (m),算式为:

$$r = \frac{d}{\tan \Phi} = \frac{d}{\tan(kwt)}, \quad (1)$$

式中, k 为与车辆性能参数相关的系数,根据车辆性能参数,不同车辆的转向比等于方向盘转动角度与前轮转动角度的比值,其取值与车辆本身的特征有关,针对特定车辆转向比参数为大于 1 的常数,故

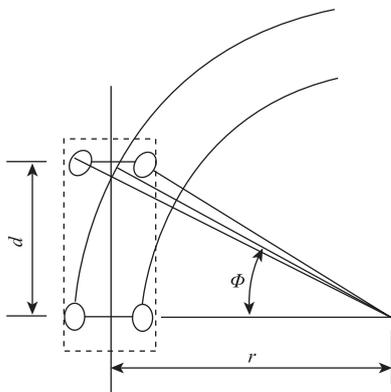


图 2 汽车转弯行驶轨迹

Fig. 2 Vehicle turning trajectory

$\Phi = \frac{wt}{\text{转向比}} = kwt$, 则 k 为小于 1 的系数。因 Φ 值很小,可近似地认为 $r \approx \frac{d}{kwt}$ 。故行驶时间 t 后,行驶的距离(弧长) l 为:

$$l = vt \approx v \frac{d}{kwr} = \frac{d}{k} \times \frac{v}{w} \times \frac{1}{r}. \quad (2)$$

式(2)为汽车等速行驶,以不变角速度转动方向盘所产生的轨迹,其行驶的距离(弧长)即为平曲线路段宜设置的缓和曲线长度。

由式(2)可知缓和曲线长度的取值除了与车辆本身的特征和性能有关外,其余主要与车辆的行驶速度、方向盘转动角速度及前方圆曲线曲率半径有关,其相关关系为:

(1) 在设计速度一定,驾驶员以舒适自然的不变角速度转动方向盘时,随着前方圆曲线曲率半径的增加,缓和曲线的长度取值应随之减小。

(2) 在同一圆曲线曲率半径下,驾驶员以舒适自然的不变角速度转动方向盘时,随着设计速度由 v_1 增加至 v_2 ,缓和曲线的长度取值也随之增加,反之则减小。缓和曲线长度增加值 Δl 为:

$$\Delta l = l_{v_2} - l_{v_1} = \frac{d}{kwr}(v_2 - v_1). \quad (3)$$

根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014),高等级道路的公路设计速度取值差为 20 km/h (5.6 m/s),低等级道路为 10 km/h (2.8 m/s)。车辆轴距同样可参考 JTG B01—2014 标准中不同车型所对应指标,即车辆轴距在 3.8~14.3 m 之间浮动。车辆行驶经时间 t 后其前轮转过的角度 Φ ,根据回旋线图式^[19](见图 3)、道路线形组合及路容景观要求,最大值为 45° (0.76 rad),而圆曲线曲率半径则为 15~5 500 m。故随着设计速度的增加,所需要的缓和曲线长度应随之增加,但缓和曲线长度的增加值(在均取最不利因素下的计算值)有限,圆曲线半径较小时,缓和曲线长度增加值不超 10 m,圆曲线曲率半径大于 1 000 m 时,缓和曲线长度增加值不到 5 m。而从缓和曲线设置本身的性质来看,设计速度对缓和曲线长度的取值影响较小,可忽略不计。

(3) 在设计速度一定、相同圆曲线曲率半径下,随着缓和曲线长度的增加,驾驶员转动方向盘的角速度应随之较小,反之则应增加。驾驶员转动方向盘的角速度间接地反映了驾驶员对前方曲线的判断。当缓和曲线长度取值较大,驾驶员对前方平曲线的

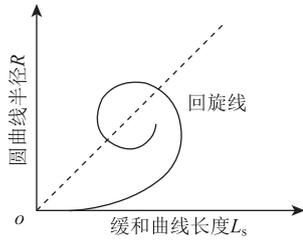


图 3 回旋线

Fig. 3 Cycloid

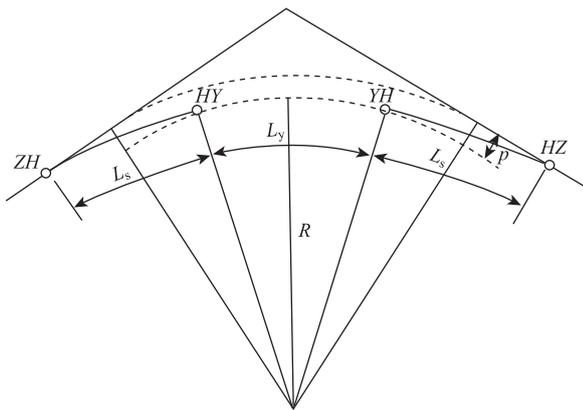
曲率半径判断偏小, 则其转动方向盘的角速度则增大, 反之则减小。倘若在缓和曲线末端, 驾驶员对前方平曲线曲率半径判断偏差较大, 则易驶入临近车道, 进而造成安全隐患, 故合理的缓和曲线设置对引导驾驶员安全驶入或驶出圆曲线具有重要意义。

2.2 基于缓和曲线偏移值特征的缓和曲线长度取值研究

根据缓和曲线设置功能分析, 合适的缓和曲线长度基本拟合了车辆由直线驶入或驶出圆曲线时的偏移值。反之, 缓和曲线偏移值的大小也对车辆由直线与圆曲线之间的过渡产生一定的影响。根据回旋线敷设缓和曲线的基本图式 (见图 4), 缓和曲线的设置较平曲线以单圆曲线敷设的偏移值 p 为:

$$p = \frac{L_s^2}{24R} - \frac{L_s^4}{2\ 688R^3}, \quad (4)$$

由式 (4) 可知平曲线设置缓和曲线的偏移值受制于缓和曲线长度和平曲线曲率半径的大小。为了充分研究平曲线偏移值与缓和曲线长度及圆曲线半径之间的关系, 本研究针对圆曲线半径为 700 ~ 4 000 m 时, 缓和曲线长度取 100 ~ 300 m, 利用式 (4) 分别计算其偏移值, 计算结果如图 5 所示。由图 5 可知:



注: L_y 为圆曲线长度。

图 4 回旋线敷设缓和曲线计算图式

Fig. 4 Calculation scheme of transition curve by means of cycloid

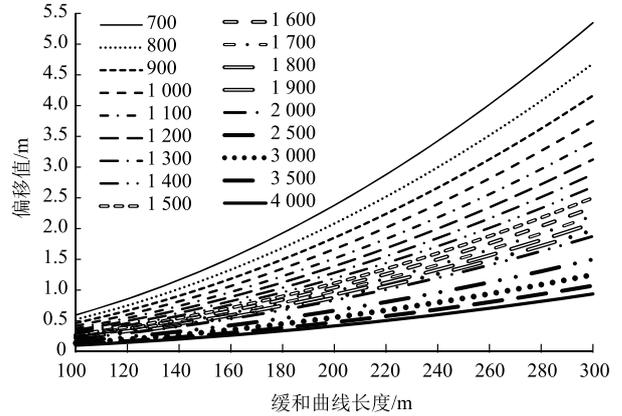


图 5 偏移值与缓和曲线长度及圆曲线半径关系 (单位: m)

Fig. 5 Relationship of offset value with transition curve length and circular curve radius (unit: m)

(1) 随着缓和曲线长度增加, 曲线偏移值呈不断增加的趋势, 但随着圆曲线半径的增加, 曲线偏移增加值不断减小。如缓和曲线长度由 100 m 增至 300 m, 当圆曲线半径 $R = 700$ m 时, 平曲线偏移值由 0.6 m 增至 5.3 m, 增加值为 4.7 m; 圆曲线半径 $R = 4\ 000$ m 时, 平曲线偏移值由 0.1 m 增至 0.9 m, 增加值为 0.8 m。

(2) 当缓和曲线长度一定时, 平曲线的偏移值随着圆曲线半径的减小而增大, 且偏移值变化幅度范围随着缓和曲线长度的增长而增大。如缓和曲线长度取 300 m 时, 圆曲线半径由 4 000 m 过渡到 700 m 时, 平曲线偏移值则由 0.9 m 过渡到 5.3 m; 缓和曲线长度取 200 m 时, 圆曲线半径由 4 000 m 过渡到 700 m 时, 平曲线偏移值则由 0.4 m 过渡到 2.4 m。

参考《绿皮书》对缓和曲线最大偏移值 1 m 的相关研究结论, 利用式 (4) 对偏移值 $p = 1$ m 时平曲线的圆曲线半径和缓和曲线之间的关系进行分析 (见图 6)。

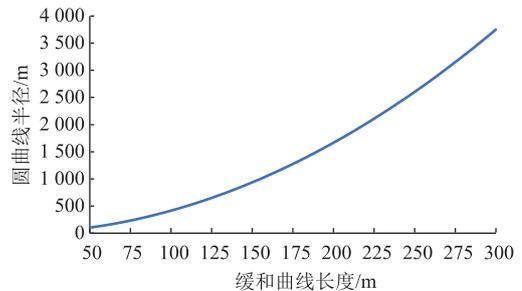


图 6 $p = 1$ m 时, 缓和曲线长度与圆曲线半径关系

Fig. 6 Relation between transition curve length and circular curve radius when $p = 1$ m

由图6可见,当偏移值一定时,随着缓和曲线长度的增长,其对应的圆曲线半径也随之增加。这与本研究2.1节随着缓和曲线长度的增加,圆曲线半径应随之减小的结论不一致。对此,基于偏移值 $p=1\text{ m}$ 时,假定缓和曲线长度以每10 m为梯度增加,对圆曲线半径的增加值速率进行分析(见图7)。

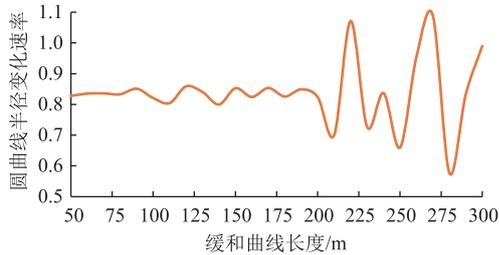


图7 $p=1\text{ m}$ 时,圆曲线半径变化速率

Fig. 7 Variation rate of circular curve radius when $p=1\text{ m}$

由图7可知,当缓和曲线长度不大于200 m时,随着缓和曲线长度的增加,圆曲线半径增加值以基本稳定的速度不断变化。当缓和曲线长度大于200 m时,随着缓和曲线长度的增加,圆曲线半径增加值变化速率起伏变化较大。根据本研究2.1节的结论,受缓和曲线长度和圆曲半径数量级别的差异,圆曲线半径增加值以基本稳定的速度变化是符合行车轨迹的。

从基于偏移值的缓和曲线长度取值角度,建议缓和曲线长度控制在200 m范围之内,此时 $p=1\text{ m}$ 时对应的圆曲半径为1 666 m,即当圆曲线半径大于1 666 m时,宜随着圆曲半径的增加,缩短缓和曲线

长度。这与车辆从直线过渡到圆曲线,前圆曲线半径较大时,其行驶时间应相应缩短的事实是相吻合的。

2.3 基于超高过渡的缓和曲线长度取值研究

缓和曲线设置的功能之一是为超高过渡段的设置提供方便。JTG D20—2017规范规定了不同设计速度对应旋转轴的超高渐变率(见表5),由此导出超高过渡段长度 L_c 为:

$$L_c = \frac{B\Delta i}{P}, \quad (5)$$

式中, B 为旋转轴至行车道(设硬路肩时为硬路肩)外侧边缘的宽度(m); Δi 为超高坡度与路拱坡度代数差(%); P 为超高渐变率。

表5 不同设计速度对应旋转轴的超高渐变率

Tab. 5 Superelevation gradient rate of rotation axis corresponding to different design speeds

设计速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	120	100	80	60	40	30	20
超高旋转轴位置 中线	1/250	1/225	1/200	1/175	1/150	1/125	1/100
超高渐变率 边线	1/200	1/175	1/150	1/125	1/100	1/75	1/50

由式(5)可知,超高过渡段长度与旋转轴至行车道外侧边缘的宽度及圆曲线路段的超高坡度均呈正比例增长关系。根据中国高速公路路基断面设置现状,其超高过渡方式基本上均为绕中央分隔带边缘旋转的方式,对此本研究以设计速度为120, 100, 80 km/h,路基宽度采用双向八车道、双向六车道、双向四车道为例,利用式(5)分别计算不同设计速度和路基宽度下由直线段路拱横坡过渡到圆曲线超高段(外侧)的过渡段长度(见表6)。

表6 不同设计速度和路基宽度下以边线为旋转轴计算所得的超高过渡段长度

Tab. 6 Superelevation transition section length with side line as rotation axis with different design speeds and subgrade widths

设计速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	车道数	B 值/m	不同圆曲线超高值(%)下超高过渡段长度/m						
			2	3	4	5	6	7	8
120	双向八车道	18.75	150	188	225	263	300	338	375
100			131	164	197	230	263	295	328
80			113	141	169	197	225	253	282
120	双向六车道	15.0	120	150	180	210	240	270	300
100			105	131	158	184	210	236	263
80			90	113	135	158	180	203	225
120	双向四车道	11.25	90	113	135	158	180	203	225
100			79	98	118	138	158	177	197
80			68	84	101	118	135	152	169

根据 JTG D20—2017 规范规定,圆曲线最小半径一般值超高值为 5%。由表 1~表 5 可知,设计速度为 80 km/h 时,超高值 $\leq 5\%$ 的超高过渡段长度短于 200 m;设计速度为 100 km/h 时,超高值 $\leq 4\%$ 的超高过渡段长度短于 200 m;设计速度为 120 km/h 时,超高值 $\leq 3\%$ 的超高过渡段长度短于 200 m;对于双向四车道,超高值 $\leq 6\%$ 时,超高过渡段长度均短于 200 m;对于双向六车道,超高值 $\leq 4\%$ 时,超高过渡段长度短于 200 m。

根据以上分析研究,高速公路缓和曲线最大长度宜以 200 m 为控制值,并结合圆曲线路段超高过渡段长度相关规定的要求计算确定。

3 回旋线取值规定的理论依据与修订建议

3.1 回旋线取值规定的理论依据

综合以上分析研究,对规范中的回旋线取值规定理论依据如下。

(1) 根据车辆由直线进入圆曲线的转弯行驶轨迹分析,在设计速度不变的情况下,驾驶员以舒适自然的不变角速度转动方向盘时,随着前方圆曲线半径的增加,缓和曲线的长度取值应随之减小;随着设计速度的增加,缓和曲线的长度取值也随之增加,但非常有限,圆曲线半径大于 1 000 m 时,缓和曲线的长度增加值不到 5 m,对缓和曲线长度取值的影响可忽略不计。因此,圆曲线半径大于 1 000 m 以上时,缓和曲线长度取值以超高过渡所需要的长度为依据较为合理。

(2) 结合美国对缓和曲线最大长度采用最大偏移值 1 m 的规定,本研究表明:当缓和曲线长度小于 200 m 时,随着缓和曲线长度的增加,圆曲线半径增加值以基本稳定的速度不断变化;当缓和曲线长度大于 200 m 时,随着缓和曲线长度的增加,圆曲线半径增加值变化速率起伏变化较大。因此,缓和曲线长度宜控制在 200 m 范围之内,此时 $p=1$ m 对应的圆曲线半径为 1 666 m。即当圆曲线半径大于 1 666 m 时,宜随着圆曲线半径的增加,减短缓和曲线长度,这与车辆从直线过渡到圆曲线的行驶轨迹相符。

(3) 在设计速度和圆曲线半径相同情况下,随着缓和曲线长度的增加,驾驶人转动方向盘的角速度随之减小。驾驶人转动方向盘的角速度则间接反映了对前方曲线的判断,当缓和曲线长度取值过长,驾驶人对前方平曲线的曲率半径判断偏小,转动方向盘的角速度则增大,易驶入临近车道,带来安全

隐患。因此,对缓和曲线的长度宜予以合理的限制,缓和曲线合理取值对引导驾驶人安全驶入或驶出圆曲线至关重要。

(4) 根据高速公路不同设计速度、不同路基宽度、不同圆曲线半径对应的超高值及超高过渡渐变率的规定,通过计算各种条件下超高过渡所需长度的结果表明:双向四车道高速公路超高值 $\leq 6\%$ 时,超高过渡段长度均短于 200 m;双向六车道,超高值 $\leq 4\%$ 时,超高过渡段长度短于 200 m。设计速度为 80 km/h 时,超高值 $\leq 5\%$ 的超高过渡段长度短于 200 m;设计速度为 100 km/h 时,超高值 $\leq 4\%$ 的超高过渡段长度短于 200 m;设计速度为 120 km/h 时,超高值 $\leq 3\%$ 的超高过渡段长度短于 200 m;设计速度采用 100 km/h 和 120 km/h 的双向六车道或八车道高速公路,其平面指标往往较大,圆曲线超高值基本控制在 4% 范围内。因此,缓和曲线最大长度原则上宜控制在 200 m 内。

3.2 回旋线长度及参数取值规定的修订建议

综合以上研究成果,回旋线长度 L_s 和参数 A 的取值与圆曲线半径相协调的规定建议修订为:

(1) 当圆曲线半径 $\leq 1\ 600$ m 时,回旋线长度应随圆曲线半径的增大而增长,当圆曲线半径 $>1\ 600$ m 时,回旋线长度宜随着圆曲线半径的增大而减短;

(2) 当圆曲线半径 $>1\ 000$ m 以上时,回旋线长度宜采用超高过渡段长度,当圆曲线半径 $<1\ 000$ m 时,回旋线长度应不小于超高过渡段长度;

(3) 当圆曲线半径 $<1\ 000$ m 时,回旋线参数宜依据地形条件与平曲线长度在 $R/3 \leq A \leq R$ 范围内选定,具体设计时可参照(适合低等级公路,高速公路可灵活掌握):当 $R < 100$ m 时, $A \leq R$ 为宜;当 R 在 100~400 m 范围时, $A \geq R/2$ 为宜;当 R 在 400~1 000 m 时, $A \geq R/3$ 为宜。

(4) 当圆曲线长度出现短于缓和曲线长度时,应根据第(3)条规定调整回旋线参数,使回旋线、圆曲线和回旋线之间的长度保持“三三分”为宜,避免出现类似凸形组合线形;

(5) 为了更好地与地形、地物相协调,必要时可采用较长的缓和曲线,但应避免出现过小的圆曲线半径和过短的圆曲线长度,并应做好超高过渡设计,避免路面积水。

以上规定将避免出现类似凸形曲线,避免采用过长的缓和曲线,并较好地控制了缓和曲线偏移值。同时,也明确了在不得已情况下可采用较长的缓和曲线。

4 结论

本研究从回旋线取值规定的合理性、车辆转弯行驶轨迹、缓和曲线偏移值特征、路面超高过渡4个方面研究缓和曲线长度的合理取值,主要结论与建议如下。

(1) 通过对 JTG D20—2017 规范中回旋线参数取值规定的合理性分析,发现相关规定容易误导设计者采用过长的缓和曲线,并提出采用过长的缓和曲线可能存在行车舒适性、交通安全性的问题。分析了美国《绿皮书》以回旋线偏移值 1.0 m 作为缓和曲线最大长度取值依据的参考价值。

(2) 根据车辆由直线进入圆曲线的转弯行驶轨迹分析,当圆曲线半径大于 1 000 m 时,随着圆曲线半径的增加,缓和曲线长度增加值小于 5 m;随着设计速度的增加,缓和曲线的长度取值也随之增加,但非常有限,对取值的影响可忽略不计。当缓和曲线长度取值过长,驾驶人对前方平曲线的曲率半径判断偏小,转动方向盘的角速度偏大,则易驶入临近车道,带来安全隐患。缓和曲线合理取值对引导驾驶人安全驶入或驶出圆曲线至关重要。

(3) 根据缓和曲线长度与圆曲线半径增加值的变化分析,当缓和曲线长度小于 200 m 时,圆曲线半径增加值速率以基本稳定的速度不断变化。当缓和曲线长度大于 200 m 时,随着缓和曲线长度的增加,圆曲线半径增加值速率起伏变化较大。同时得出缓和曲线长度为 200 m、回旋线偏移值 $p=1$ m 时对应的圆曲半径为 1 666 m。

(4) 通过不同圆曲线半径对应的超高值及过渡段长度分析,缓和曲线长度按 200 m 控制,基本满足超高过渡段所需要的长度要求。

(5) 依据本研究结论,提出了回旋线参数与圆曲线半径相协调的修订建议。

参考文献:

References:

- [1] 马小龙,余强,刘建蓓,等. 基于无人机视频拍摄的高速公路小型车换道行为特性 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (6): 95-105.
MA Xiao-long, YU Qiang, LIU Jian-bei, et al. Analysis of Lane Change Behavior of Passenger Cars on the Freeway Using UAVs [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (6): 95-105.
- [2] 陈志贵,王雪松,张晓春,等. 山区高速公路驾驶人加减速行为建模 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (7):

167-175.

- CHEN Zhi-gui, WANG Xue-song, ZHANG Xiao-chun, et al. Modeling of Driver Acceleration and Deceleration Behavior in Mountain Freeways [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (7): 167-175.
- [3] 张驰,孟良,汪双杰,等. 高速公路曲线路段小客车制动行为侧滑风险仿真分析 [J]. 中国公路学报, 2015, 28 (12): 134-142.
ZHANG Chi, MENG Liang, WANG Shuang-jie, et al. Sideslip Risk Simulation Analysis of Passenger Car Braking Behavior on Expressway Curved Sections [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (12): 134-142.
- [4] 许金良,王恒,赵利苹,等. 考虑横风作用的公路平曲线最小半径研究 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (1): 38-43.
XU Jin-liang, WANG Heng, ZHAO Li-ping, et al. Research on Minimum Radius of Highway Horizontal Curve with Crosswind Considered [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (1): 38-43.
- [5] AASHTO. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [M]. 6th ed. Washington, D. C.: AASHTO, 2011.
- [6] 日本道路公团. 日本高速公路设计要领 [M]. 西安: 陕西省旅游出版社, 1991.
Japan Road Corporation. Essentials of Japanese Expressway Design [M]. Xi'an: Shaanxi Tourism Publishing House, 1991.
- [7] ICTAAL. Instruction on Technical Conditions for Development of Connecting Motorways [S].
- [8] 王贵山,胡昌亮,白浩晨,等. 高速公路圆曲线超高及过渡段设计研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (12): 47-55.
WANG Gui-shan, HU Chang-liang, BAI Hao-chen, et al. Study on Design of Expressway Circular Curve Superelevation and Transition Section [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (12): 47-55.
- [9] 徐进,罗庆,彭其渊,等. 回旋线设置对弯道行驶速度的影响 [J]. 中国公路学报, 2011, 24 (1): 25-33.
XU Jin, LUO Qing, PENG Qi-yuan, et al. Influence of Clothoid Setting on Cornering Speed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24 (1): 25-33.
- [10] 杨轸,唐莹,唐磊. 隧道出入口平面线形一致性 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (4): 553-558.
YANG Zhen, TANG Ying, TANG Lei. Consistency of Horizontal Alignment at Tunnel Entrance and Exit Zone [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40 (4): 553-558.

- [11] 富志鹏,林宣财,任春宁,等. 高速公路中间带宽度变化过渡段过渡方式的研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (12): 28-36.
FU Zhi-peng, LIN Xuan-cai, REN Chun-ning, et al. Study on Transition Mode of Width Change Section of Median of Expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (12): 28-36.
- [12] 任春宁,宋帅,王佐,等. 基于调整缓和曲线参数的中间带宽度变化分幅过渡研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (9): 25-32.
REN Chun-ning, SONG Shuai, WANG Zuo, et al. Study on Framing Transition of Width Change of Median Based on Adjustment of Transition Curve Parameters [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (9): 25-32.
- [13] 范爽. 高速公路平面线形指标及其组合安全性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
FAN Shuang. Study on Expressway Horizontal Alignment Indicator and Its Combination Safety [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [14] 路宁. 道路线形与交通事故关系分析 [J]. 交通运输研究, 2012 (8): 120-122.
LU Ning. Relationship Between Road Alignment and Traffic Accident [J]. Transport Research, 2012 (8): 120-122.
- [15] 涂圣文,王冰,邓梦雪,等. 考虑平纵组合的事故预测模型在双车道公路线形安全分析中的应用 [J]. 公路, 2019, 64 (7): 196-203.
TU Sheng-wen, WANG Bing, DENG Meng-xue, et al. Application of Accident Prediction Model in Safety Analysis of Two-lane Highway Alignment Considering Horizontal and Vertical Combination [J]. Highway, 2019, 64 (7): 196-203.
- [16] 王浩,孟祥海,关志强. 山区高速公路几何线形与事故率关系研究 [J]. 公路工程, 2011, 36 (4): 89-92, 135.
WANG Hao, MENG Xiang-hai, GUAN Zhi-qiang. Research on Relationship Between Traffic Accident Rate and Geometric Alignment for Mountainous Freeway [J]. Highway Engineering, 2011, 36 (4): 89-92, 135.
- [17] 程国柱,程瑞,徐亮. 基于路侧事故判别的公路平曲线车速限制研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20 (1): 222-227, 240.
CHENG Guo-zhu, CHENG Rui, XU Liang. Speed Limit in Curving Sections of Highway Based on Roadside Accidents Discriminant Analysis [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20 (1): 222-227, 240.
- [18] 郭应时,付锐,袁伟,等. 山区公路事故率与平面线形的关系 [J]. 交通运输工程学报, 2012, 12 (1): 63-71.
GUO Ying-shi, FU Rui, YUAN Wei, et al. Relation Between Accident Rate and Horizontal Alignment of Mountain Highway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12 (1): 63-71.
- [19] 杨少伟. 道路勘测设计 [M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2009.
YANG Shao-wei. Road Survey and Design [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2009.