

# 公路缓和曲线应用探讨

王贵山, 柳银芳, 林宣财, 李瑞杰

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:**该文分析缓和曲线设置的必要性和作用,基于 JTG D20—2017《公路路线设计规范》对缓和曲线的规定和国内外关于缓和曲线长度的计算机理,探讨 JTG D20—2017《公路路线设计规范》中缓和曲线规定的适用性。通过对现行规范有关缓和曲线规定的分析,并结合设计中积累的经验,提出相对现行规范规定而言更具指导意义和操作性的缓和曲线应用方法,以期实现路线线形的设计更科学化、人性化。

**关键词:**缓和曲线;最小长度;最大长度;运用建议

汽车在道路直线或圆曲线上行驶时,一般驾驶员都能在正常车道宽度内按合适的轨迹行驶。然而当行驶速度较高且存在曲率变化较大时,车辆就需要较长的过渡轨迹,从而导致车辆产生侧向位移,有时还会占用邻近的车道。此种情况下应设置缓和曲线,可以使驾驶员很容易将车辆控制在自己的车道内,在直线与圆曲线、半径相差较大的圆曲线之间,均应考虑缓和曲线的设置。

## 1 设置缓和曲线的作用

公路设置缓和曲线的作用主要体现在以下方面:

(1) 曲率连续变化,便于车辆行驶。缓和曲线实际上是模拟车辆转弯时的轨迹。设置缓和曲线将减少车辆占用邻近车道,有助于车辆的匀速行驶。

(2) 为离心加速度变化提供渐变过程,使车上人员感觉更舒适。车辆在曲线道路上行驶,会产生离心力,而离心力的大小与曲率大小成正比。设置合适的缓和曲线,可以给驾驶员提供一个自然且易于跟踪的路线,车辆在进入或离开圆曲线时,离心力会逐渐地增加或减小。

(3) 为超高横坡度变化提供渐变过程,行车更加平稳。缓和曲线为超高缓和段的合理布置提供了方便。正常横坡断面与平曲线上的全超高断面之间的过渡,可在缓和曲线长度内严格地按照速度与曲率半径计算所需长度来渐变实现。

(4) 缓和曲线设置有利于圆曲线加宽的过渡。采用缓和曲线,可为小半径平曲线处的加宽提供灵活性。

(5) 为直线与圆曲线、圆曲线与圆曲线间提供线性渐变过渡,提高线形美观性。公路与城市道路的路容通过设置缓和曲线可得以改善。直线与圆曲线、圆曲线与圆曲线相连接时,在连接处曲率发生突变,导致视觉上有不平顺的感觉。通过设置缓和曲线,使线形连续顺滑,提高了线形的美观性。

## 2 缓和曲线规范相关规定

JTG D20—2017《公路路线设计规范》中对缓和曲线的规定如下:

(1) 表 7.4.3 回旋线的长度应符合下列规定:①回旋线的长度应根据圆曲线半径的增大而增大;②圆曲线按要求需设置超高时,回旋线长度应不小于超高过渡段所需的长度;③回旋线最小长度应符合表 1 的规定。

表 1 表 7.4.3 回旋线最小长度

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

(2) 表 9.2.4 中回旋线的运用应符合下列要求:

① 设计速度大于或等于 60 km/h 时,回旋线应作为必要的线形要素加以运用。回旋线—圆曲线—回旋线的长度以大致接近为宜。两个回旋线的参数也可根据地形条件设置为非对称的曲线,但  $A_1 : A_2$  不应大于 2.0 ( $A$  为回旋线长度);② 回旋线参数宜根据线形要求及地形条件确定,与圆曲线半径相协调。回旋线的确定宜在下述范围内选定: $R/3 \leq A \leq R$  ( $R$  为圆曲线半径),但:当  $R < 100$  m 时, $A$  宜大于或等于  $R$ ;当  $R$  接近于 100 m 时, $A$  宜等于  $R$ ;当  $R$  较大或接近于 3 000 m 时, $A$  宜等于  $R/3$ ;当  $R > 3 000$  m 时, $A$  宜小于  $R/3$ 。

### 3 缓和曲线最小长度

规范中规定的缓和曲线最小长度是按 3 s 行程计算得到的。国际上大部分是根据车辆的侧向偏移及驾驶的舒适度规定缓和曲线的最小长度。舒适度判定标准:当车辆驶入曲线,合适的缓和曲线长度不会让驾驶员随着向心加速度的增加产生不舒适的感觉;侧向偏移情况判定标准:缓和曲线要有足够的长度使车辆在正常的轨迹下行驶,其侧向偏移量不会超出自己的行车道。根据这两个标准可以确定出缓和曲线的最小长度,其计算公式见式(1)、(2)。

国际制:

$$L_{s,\min} = \sqrt{24(P_{\min})R} \text{ 或 } L_{s,\min} = 0.0214 \frac{V^3}{RC} \quad (1)$$

美国制:

$$L_{s,\min} = \sqrt{24(P_{\min})R} \text{ 或 } L_{s,\min} = 3.15 \frac{V^3}{RC} \quad (2)$$

式中: $L_{s,\min}$  为缓和曲线的最小长度(国际制单位为 m,美国制单位为英尺); $P_{\min}$  为直线与圆曲线间的最小侧移值; $V$  为设计速度; $R$  为圆曲线半径(m); $C$  为向心加速度的最大变化率; $P_{\min}$  的推荐值为:国际制 0.2 m、美国制 0.66 英尺(1 英尺=0.304 m)。该取值与驾驶人员自然驾驶车辆可能产生的最小侧移值是基本相同的。 $C$  的最小值推荐采用国际制:1.2 m/s<sup>3</sup>、美国制:4.0 英尺/s<sup>3</sup>。较低的  $C$  值会使缓和曲线更长,在缓和曲线上行驶,车上人员会感到更舒适。

### 4 缓和曲线最大长度

根据国际经验,缓和曲线段的最大长度也需要进行限制。如果缓和曲线长度采用过长(与圆曲线的长

度有关),同样会出现安全问题。缓和曲线过长会误导驾驶员认为接近直线部分的缓和曲线为直线,可能会导致车辆驶入相邻的车道或开到路肩上,增加行车安全风险,不利于行车。所以设计应对缓和曲线最大长度进行限制,以减小这种误导发生的几率,缓和曲线最大长度的计算见式(3):

$$L_{s,\max} = \sqrt{24(P_{\max})R} \quad (3)$$

式中: $L_{s,\max}$  为缓和曲线的最大长度(国际制单位为 m,美国制单位为英尺); $P_{\max}$  为直线与圆曲线间的最大侧移值(1.0 m 或 3.3 英尺); $R$  为圆曲线半径(m); $P_{\max}$  的推荐值为 1.0 m 或 3.3 英尺,该值与驾驶人员自然操作车辆产生的最大侧移量基本相同。

### 5 路线规范关于缓和曲线长度规定的适用性分析

规范要求缓和曲线的长度应随圆曲线半径的增大而增大,主要是从它们的协调性上考虑。但当圆曲线半径较大、缓和曲线太长时,反而容易出现问題。前面已提到缓和曲线过长会误导驾驶员认为接近直线部分缓和曲线为直线。另外,由于缓和曲线上曲率是变化的,对于驾驶员来说本身就是一种不舒适的行驶条件,缓和曲线太长对汽车行驶来说反而是不理想的线形。而且当圆曲线半径较大时,长度也较长,组合的平面线形并不会显得突兀,能够满足协调性方面的要求,这样既可以减小误导发生的可能性,又不会使得行驶条件恶化。

规范认为当  $R < 100$  m 时, $A$  宜大于或等于  $R$ ;当  $R$  接近于 100 m 时, $A$  宜等于  $R$ 。但是若缓和曲线长度和圆曲线长度相差太大,则会违背协调性的原则。当  $R < 100$  m 时,圆曲线长度是比较小的,按照规范规定设置缓和曲线,容易使得缓和曲线相对圆曲线太长,平面线形组合容易接近于凸形曲线(图 1),对行车不利。即使当  $R = 100$  m,如果交点偏角不大,仍然会出现这种不利情况,如图 2 所示。

另外规范要求当  $R$  较大或接近于 3 000 m 时, $A$  宜等于  $R/3$ ,此时按规范缓和曲线长度宜为  $L_s = 333$  m,内移值由公式计算得到  $P = 1.543$  m,这个值已经超过国际上采用的推荐值 1.0 m。因此,规范中对缓和曲线长度的取值方法存在值得商榷的地方。当采用国际制计算  $R = 3 000$  m 时的  $L_{s,\max} = 268$  m,这个长度值与规范计算结果 333 m 有着明显的差距,却更符合设计实际,该长度也能满足超高与加宽过渡需要。

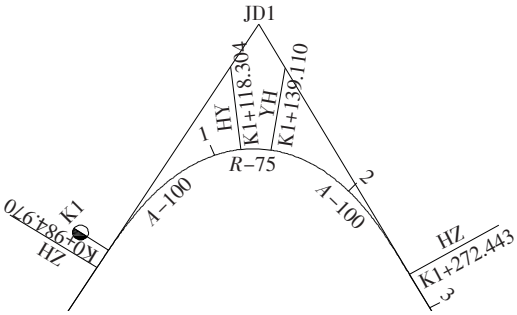


图1  $R < 100, A = 100$  (单位: m)

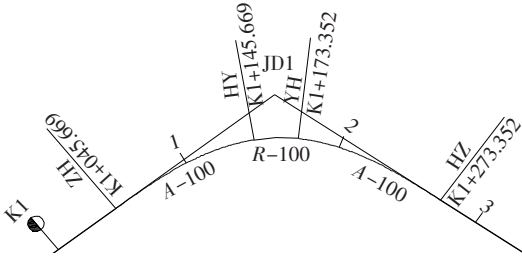


图2  $R = 100, A = 100$  (单位: m)

当 $R > 3\,000\text{ m}$ 时,即使 $A$ 小于 $R/3$ ,计算得到的 $L_s$ 值、 $P$ 值与平曲线长度仍然在增大。对于同一平曲线,缓和曲线长度选取越长,偏移值越大,将导致圆曲线半径值越小,同时必然超高值变大。且超出的长度不但起不到缓和曲线的过渡作用,而且因多出的缓和曲线曲率变化小,会让驾驶员误认为是直线,可能会导致车辆驶入相邻的车道或开到路肩上,增加行车安全风险,不利于行车。

例如,某设计速度为 $100\text{ km/h}$ 的双向四车道高速公路,半径为 $2\,000\text{ m}$ ,满足超高过渡的缓和曲线长仅需 $110\text{ m}$ 。设计人员为满足缓和曲线参数规定,缓和曲线长采用 $300\text{ m}$ ,缓和曲线偏长。如果缓和曲线采用 $110\text{ m}$ ,圆曲线半径将由 $2\,000\text{ m}$ 增大至 $2\,330\text{ m}$ ,超高由 $3\%$ 降低至 $2\%$ ,实际该种线形组合更安全、更合理(图3、4)。

例如,某设计速度为 $120\text{ km/h}$ 的双向六车道高速公路,半径为 $2\,800\text{ m}$ ,满足超高过渡的缓和曲线长仅需 $120\text{ m}$ 。设计时为满足缓和曲线参数规定,缓和曲线长取 $330\text{ m}$ ,缓和曲线过长,导致圆曲线长度仅为 $122.084\text{ m}$ ,线形的协调性较差,且圆曲线过短不利于行车安全。若缓和曲线采用 $120\text{ m}$ ,圆曲线半径将由 $2\,800\text{ m}$ 增大至 $4\,100\text{ m}$ ,圆曲线长度增长为 $541.998\text{ m}$ ,线形更为合理(图5、6)。

6 缓和曲线运用建议

由以上分析可以看出:直接用缓和曲线长度来控

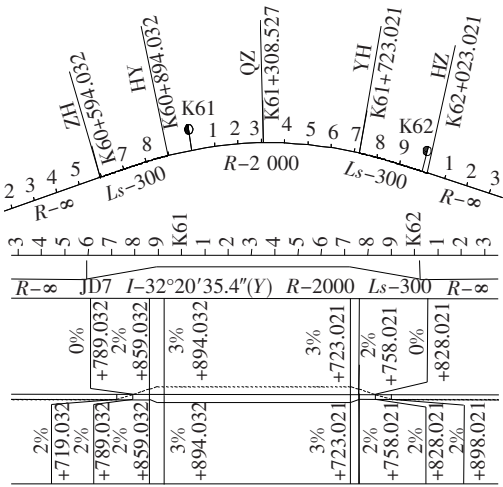


图3 满足规范缓和曲线规定的平面线形组合 (单位: m)

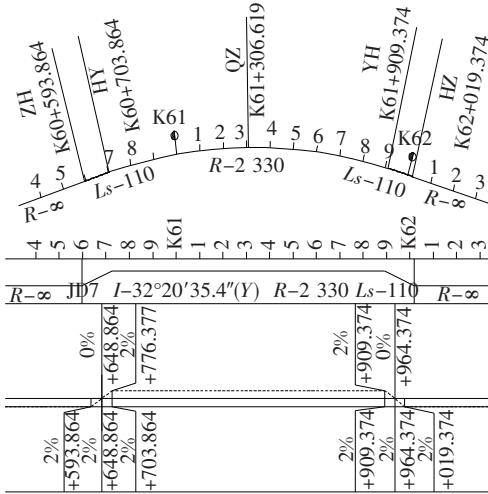


图4 放宽规范缓和曲线规定的平面线形组合 (单位: m)

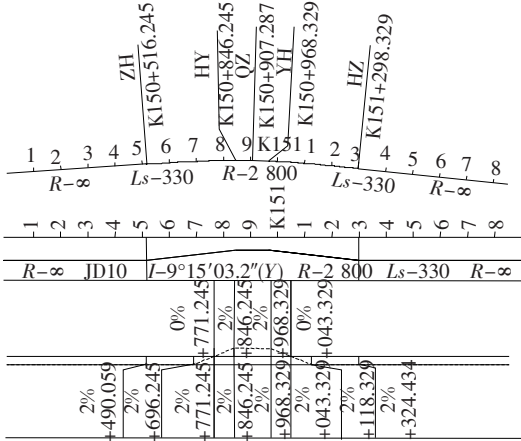


图5 满足规范缓和曲线参数规定的平面线形组合 (单位: m)

制其应用不仅可以避免平面线形组合不当,而且也不至于出现缓和曲线过长产生误导不利行车的情况出现。根据路线规范中对不同设计速度下圆曲线最小半

径的规定,结合国际上对缓和曲线最大、最小长度的计算公式,得到了不同设计速度下圆曲线最小半径一般值对应的缓和曲线最小长度和最大长度如表 2 所示。

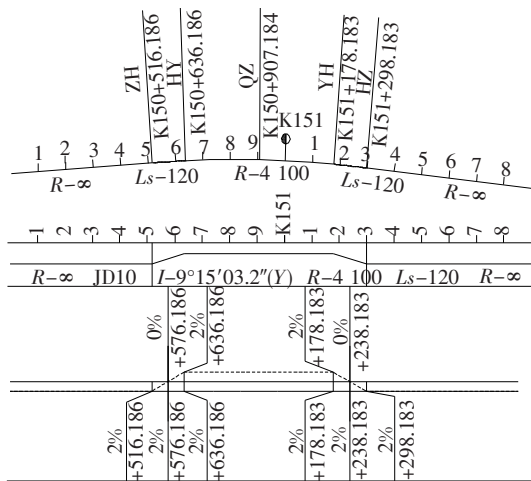


图 6 放宽规范缓和曲线规定的平面线形组合(单位:m)

表 2 圆曲线最小半径一般值对应回旋线长度计算结果

设计速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	圆曲线最小半 径一般值/m	缓和曲线最 小长度/m	缓和曲线最 大长度/m
20	30	12	27
30	65	18	39
40	100	22	49
60	200	31	69
80	400	44	98
100	700	58	130
120	1000	69	155

注:考虑中国高等级公路路基宽度普遍较国外公路宽,超高过渡时需要的缓和曲线长度较国外长,故在实际运用时为满足超高过渡的需要,部分时候可设置略大于表 2 缓和曲线最大长度的规定值。

通过上述分析并结合在设计中积累的经验,缓和曲线运用建议采用以下设置原则:

(1) 缓和曲线长度需要满足超高、加宽过渡要求。

(2) 当  $R \leq 100$  m 时,圆曲线长度较短,平曲线组合宜满足“三分三”原则,即缓和曲线—圆曲线—缓和曲线长度宜接近,且缓和曲线长度不超出表 2 所计算出的最大、最小值,保证平曲线组合的协调性。

(3) 当  $100 \text{ m} < R \leq 400$  m 时,缓和曲线长度随着  $R$  值增大而增大,宜在最大、最小长度中间值附近取值,并尽量满足“三分三”原则。

(4) 当  $400 \text{ m} < R \leq 2\,000$  m 时,缓和曲线长度参

考原路线规范中  $R/9$  的取值,且保证取值在最大、最小值范围内, $R=400$  m 的计算结果与表 2 中公式计算得到的最小值相同, $R=2\,000$  m 的计算结果与表 2 中公式计算得到的最大值相同。

(5) 当  $R > 2\,000$  m 时,缓和曲线的长度可根据圆曲线半径的增大而适当减小,但不得小于表 2 中公式计算的最小值。

(6) 大于不设超高圆曲线半径的缓和曲线设置。对于地形条件好,由两圆曲线半径均大于不设超高的最小半径组成的 S 形曲线,考虑到运营时运行速度一般都大于设计速度,且不设缓和曲线的 S 形曲线视觉效果较差,对于该种线形,建议设置缓和曲线,同时设置 2% 超高,以达到良好的视觉效果,且与运行速度更适应;对于圆曲线半径大于不设超高最小半径的基本型曲线,由于技术指标高,车辆行驶速度可能略高于设计速度,可按提高一档的指标设置缓和曲线,即设计速度为 80 km/h,  $2\,500 \text{ m} \leq R < 4\,000$  m 时仍设置缓和曲线、设置 2% 超高;设计速度为 100 km/h,  $4\,000 \text{ m} \leq R < 5\,500$  m 时仍设置缓和曲线、设置 2% 超高;设计速度为 120 km/h,  $5\,500 \text{ m} \leq R < 7\,000$  m 时仍设置缓和曲线、设置 2% 超高。

## 7 结语

设计合理的缓和曲线,可以为驾驶员提供一条自然、舒适、美观、易于操纵的过渡路线,避免路线平面组合不协调和产生误导。该文基于 JTG D20—2017《公路路线设计规范》对缓和曲线长度的规定,分析了国内外关于缓和曲线的计算机理,探讨了规范中缓和曲线规定的适用性。通过分析并结合设计中积累的经验,提出了更具指导意义和操作性的缓和曲线实际运用建议,以期实现缓和曲线的设计更科学化、人性化。

## 参考文献:

- [1] 许金良,等.道路勘测设计[M].5版.北京:人民交通出版社,2018.
- [2] JTG D20—2017 公路路线设计规范[S].
- [3] 杨永前,黄红明.S形曲线超高过渡设计方法研究[J].中外公路,2017(6).
- [4] 刘利民,王智.三次抛物线与线性超高渐变的对比研究[J].中外公路,2018(3).
- [5] 范琪,陈敬.回旋线在公路平面设计中的应用[J].公路,2018(9).