

# 在道路设计中缓和曲线的应用

姜 辉

邯郸市交通运输局公路勘察设计院 河北 邯郸 056002

**摘 要:** 设计中对缓和曲线合理的选取,能使道路设计更加安全合理。

**关键词:** 缓和曲线;回旋线参数;道路设计;

依据《公路路线设计规范》(JTG D20-2017),道路的平面线形由直线、圆曲线、缓和曲线三种线形要素组成。

缓和曲线作为道路平曲线形要素之一,它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。公路平面缓和曲线应采用回旋线,即曲线半径 $R$ 与回旋线长度 $L$ 成反比,其基本公式为 $RL = A^2$ 。在道路直线和圆曲线之间设置缓和曲线可以使线形在视觉上更平顺、连续。

## 1 缓和曲线的作用

1.1 曲率变化调整,从直线(半径正无穷)向圆曲线(固定半径)变化或者不同半径曲线间的曲率变化;

在汽车驶入弯道的过程中,为保证行车安全,驾驶员通常均匀转动方向盘,据此,公路规范中要求“直线同小于不设超高的圆曲线半径相连接处,应设置回旋线。”路线规范中规定,除四级路可不设缓和曲线外,设置超高加宽段替代外,其余各级公路都应设置缓和曲线。在高等级公路中,有时候缓和曲线设置长度甚至超过了圆曲线长度。

笔者在此阐述一下,在公路设计中超高与缓和曲线是对应关系,设置超高必然设置缓和曲线。在城市道路中,由于市内交通环境复杂,车速一般较低,圆曲线超高和设置缓和曲线不是对应关系,存在不需要设置超高但需设置缓和曲线进行曲率过渡的情况。在日常公路设计中,当圆曲线半径较大,可不设置缓和曲线,但是实际情况中也经常存在大半径圆曲线设置缓和曲线的情况,这种情况会在下面篇幅单独提及。

1.2 横坡变化调整,从直线段的双向路拱横坡向弯道单向超高横坡过渡或者不同圆曲线半径之间横坡的过渡;

通常道路设计一般设置采用双向路拱横坡,由路中央向两侧倾斜;而在圆曲线上行驶时,由于汽车会产生离心力,为保证汽车在圆曲线行驶过程中保持安全稳定,通常在圆曲线范围内对路面设置超高给与车辆提供向心力;依据《公路路线设计规范》(JTG D20-

2017),当路拱横坡度发生变化,必须设置超高过渡段,超高过渡段宜在回旋线全长范围进行。

因为缓和曲线曲率变化的特性,而对于不同半径应采用不同的超高值,因此缓和曲线上每一点的超高值均应不同,是一个变化的过程。因此,不论是因超高横坡变化还是一般路段的横坡变化,在缓和曲线范围内进行变化是比较合适的。

1.3 路基宽度变化,直线段的标准宽度向圆曲线加宽之间的渐变。

当二级公路、三级公路、四级公路圆曲线半径小于或等于250m,应设置加宽,当设置回旋线时,加宽过渡段长度应采用与回旋线或超高过渡段长度相同的数值。因直线不需要设置加宽,而小半径弯道内侧加宽,故弯道加宽均应设置在缓和曲线全范围。

对于正常路段的路基宽度变化调整,对于驾驶员有一个转动方向盘调整的过程,当路基宽度变化段落设置在直线或者弯道中,由于之前驾驶员的方向盘处于固定静止角度,需要突然进行方向盘旋转,容易出现驶入对向车道或者侧翻等情况;而在缓和曲线行驶的过程中,因为回旋线曲率渐变的特性,驾驶员的方向盘一直在均匀转动,在缓和曲线范围内进行宽度调整,不会出现突然转动方向盘的情况,故把宽度变化段落设置在缓和曲线段落较为合适。

## 2 缓和曲线参数选择的考虑因素

### 2.1 满足曲率渐变的要求

缓和曲线有回旋线、三次抛物线、双纽线等几种形式,公路设计中采用回旋线作为缓和曲线的使用形式,回旋线特性是曲线半径 $R$ 与回旋线长度 $L$ 成反比,公式为 $RL = A^2$ 。

回旋线参数 $A$ 代表回旋线变化的急剧程度,每一个 $A$ 值对应一个固定的回旋线,因为我们通常认为回旋线的线形同汽车的行驶轨基本一致,所以汽车在进入弯道的行驶过程是一条曲率连续的变化轨迹线,轨迹线需要的长度与车辆行驶速度、曲率变化程度,以及驾驶员旋

转方向盘的速率有关；为确保路线变化较为平顺，防止车辆在转弯过程中侵入对向车道或者驶出道路，必须确保缓和曲线有一定的长度；若缓和曲线长度太短，驾驶员对于转动方向盘的动作就比较急，特别在高速行驶中出现交通事故。

在正常驾驶过程中，为保证行驶顺畅，通常默认一个驾驶员维持方向盘或者持续转动方向盘的时间不少于3秒，故缓和曲线的长度不应小于3秒车辆的行驶距离。

## 2.2 乘客舒适性要求

在缓和曲线上行驶的过程中，因为回旋线的半径在不断变化，对应的离心力也在不停变化，如果曲率变化过快，即A值取值过大，会造成乘客的舒适性较差，造成乘客从座位上滑移出去的感觉。乘客需要一个适合的变化率，为保证乘客的行车舒适，必须把离心加速度的变化率控制在一定的范围以内。

## 2.3 超高渐变率要求

道路设计时，超高路段与一般路段的横坡变化，通常是在全缓和曲线范围内完成，路面超高是弯道外侧路面逐渐抬高的过程，如果缓和曲线过短，会导致超高渐变率过大，则路面将由于横坡的急剧变化呈现明显扭曲对行车不利。回旋线最小长度取值应满足下列公式计算。

$$L_c = \frac{B\Delta i}{P}$$

式中：B—旋转轴至路面边缘（含硬路肩）的宽度（m）

$\Delta i$ —超高坡度与路拱横坡的代数差（%）

P—超高渐变率

超高渐变率依据下表取值，表内数据为最大渐变率。

设计速度	超高旋转轴位置	
	中线	边线
120	1/250	1/200
100	1/225	1/175
80	1/200	1/150
60	1/175	1/125
40	1/150	1/100
30	1/125	1/75
20	1/100	1/50

其中，一级公路及高速公路整体式路基，旋转轴为中央分隔带两侧时，取值应按照表内边线取值。

规范中要求超高过渡宜在回旋线全长范围内进行，且为了满足排水，要求回旋线范围内超高渐变率不得小于1/330，但是实际设计中并不是全缓和曲线均匀过渡，通常都是按照表格内最大渐变率计算出由双向坡变化到

半幅抬起的单向坡的距离向上取整到5m，从半幅抬起的单向坡到设计超高值采用缓慢渐变的两种渐变率的方式。

## 2.4 满足路面加宽渐变的要求

道路设计中，当圆曲线半径小于等于250m时，需设置加宽，加宽值应根据规范取值。当设置回旋线或超高过渡段时，加宽过渡段长度应与回旋线或加宽过渡段长度相同，但是加宽渐变率不应小于1:15，有时加宽值较大，按规范极限值设置缓和曲线长度时可能导致加宽渐变率小于1:15时，这种情况下应加长缓和曲线长度，保证行车安全。

## 3 在实际设计中缓和曲线的应用

### 3.1 缓和曲线参数及长度的取值

根据笔者多年的设计经验，在实际的道路设计中，缓和曲线参数及长度的取值根据道路设计等级不同，通常采取两种情况进行设计。

① 当设计速度大于等于60Km/h时，即二级公路及以上的高等级公路设计时，一般情况下，应考虑回旋线参数与圆曲线半径相协调，即考虑缓和曲线参数与圆曲线半径之间的比值，圆曲线参数A应在R/3~R之间。规范要求当R值小于100m时，A宜大于或者等于R；当R接近100m时，A宜等于R；当R较大或接近3000m时，A宜等于R/3；当R大于3000m时，A宜小于R/3。

当圆曲线半径取值在100m~3000m之间时，A值应线形内插取值。

② 对低等级公路设计时，尤其是四级公路，大部分是乡道村道，为了避免各种控制因素，弯道转角大、线形指标较低，经常会出现圆曲线半径在60m~100m之间，如果按照A值与圆曲线相协调，取A值等于R，会出现缓和曲线长度100m甚至更长，而导致圆曲线长度30m~40m，甚至十几米的情况，从整个平曲线的角度考虑极为不均衡，在这种情况下，可以按照回旋线—圆曲线—回旋线的长度大致接近为宜来取值。

高等级公路设计车速较高，驾驶员的反应时间较短，行驶过程不应迅速转动方向盘，对于缓和曲线要求与圆曲线匹配，高速公路经常会出现缓和曲线长度大于圆曲线长度的情况。低等级公路因为指标较低，曲线长度短，考虑A值与圆曲线的难度较大，通常考虑长度大致接近。

### 3.2 各种类型曲线之间的缓和曲线的应用

在道路设计中，经常使用的有很多类型曲线，基本型、S形、卵形、复合型、凸形、C形等形式，其中常用的有S形曲线、卵形线及复合曲线，下面笔者就这几类曲线类型进行简单的阐述。

### ① 基本曲线型

基本型的曲线是设计中最常用的曲线，由直线—缓和曲线—圆曲线—缓和曲线—直线的顺序构成，在道路设计中俗称“三单元”。

基本型曲线的两个缓和曲线的参数可以相同，也可以不同。如果不同，应注意 $A_1:A_2$ 不应大于2。

当圆曲线半径大于不设超高最小半径时，默认对应设计车速下，车辆驶入该半径圆曲线时，驾驶员仅需要轻微旋转方向盘，把方向盘由竖直方向旋转至小角度倾斜即可，由圆曲线驶入直线时，也仅仅需要松开方向盘让方向盘自动回正即可。故道路设计时大半径圆曲线无需进行平曲线曲率过渡，即直线与该半径圆曲线之间的差值较小，不需要设置回旋线即可满足行车要求。

### ② S形曲线

按规范要求，两个反向曲线之间应设置足够长的直线长度，当直线长度不满足要求时，可用回旋线将两反向曲线连接组成S形曲线。反向曲线间的直线长度宜大于2倍设计车速。

1) 当相邻两圆曲线均为需要设置超高的圆曲线时，可正常通过调整圆曲线半径或者缓和曲线参数，使两曲线间的直线段长度为0。两回旋线参数宜相等；当不相等时，应使 $A_1:A_2$ 小于2，有条件时宜小于1.5。当 $A_2 \leq 200$ 时， $A_1$ 与 $A_2$ 之比应小于1.5。这一要求在道路设计中经常被提及，互通中偶尔也会被要求满足。

2) 当相邻反向圆曲线一个需要设置超高，另一个不需要设置超高时，不设超高圆曲线在径相衔接处同样应设置缓和曲线，另一侧与直线相连处可不设置缓和曲线。因不设超高圆曲线可以默认与直线的半径差值较小不设缓和曲线，但是相邻曲线单元为反向曲线，如不设置缓和曲线，驾驶员的方向盘与驶入直线的情况不同，仅仅松开方向盘回正并不满足线路走向需求，还需同时反向旋转方向盘，使驾驶员不容易控制车辆走向产生危险。

3) 当相邻两圆曲线均为不需设置超高的圆曲线，这种情况在平时道路设计中是应该避免的，因两个大半径不设超高圆曲线意味着在该段选线时受控制因素较少，故路线采取了较高的指标，这种情况可以通过缩小圆曲线半径使两圆曲线之间出现满足2倍车速的直线距离，如果两圆曲线半径在不设超高圆曲线半径临界值，无法通过缩小圆曲线半径增加直线段，直接设置缓和曲线并调整圆曲线半径，就正常调整为需要设置超高的圆曲线半径。

有时在互通设计中，因为互通的平纵较复杂，驾驶员对于互通范围内的行驶有足够的心理预期，且互通设计中的影响因素较多，故仅可在互通中采用S形曲线大半

径直接衔接，无需设置回旋线。

### ③ 卵形线

当两个同向曲线径相衔接或插入直线长度不足时，应设置一个缓和曲线把两个圆曲线相连，该缓和曲线曲率由第一个圆曲线半径 $R_1$ 直接过渡为第二个圆曲线半径 $R_2$ ，如果同向两曲线有超高加宽，该缓和曲线也相应对超高加宽进行过渡，卵形线由直线—缓和曲线—圆曲线—缓和曲线—圆曲线—缓和曲线—直线的顺序构成，在道路设计中俗称“五单元”。

正常回旋线是从正无穷变化到 $R$ ，因为卵形线中的缓和曲线单元曲率是从 $R_1$ 变化到 $R_2$ ，是一个完整回旋线中间一部分，而基本回旋线的计算公式为 $RL = A^2$ ，对于卵形线间缓和曲线的 $R$ 的取值，可按照公式 $R = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 - R_2}$ ，且两圆曲线间的缓和曲线参数宜 $R/2 \leq A \leq R_2$ 。其中 $R_1$ 是大半径圆曲线半径， $R_2$ 是小半径圆曲线半径。

卵形线不仅适用于同向两个需设置超高的圆曲线相连接，只要同向圆曲线相连接，均设置回旋线。

同向圆曲线不能跟S形曲线般采用两个正常圆曲线直接径相相接，是因为正常圆曲线的缓直点的半径是正无穷，如果采用正常圆曲线同向相接的方式，方向盘需从第一个圆曲线上行驶时的固定角度到公切点的缓慢回正，再缓慢旋转方向盘到下一个圆曲线的固定角度的复杂过程，对驾驶员行驶中的判断不利，容易误导驾驶员已经驶入直线而忽视相邻的仍然是个同向曲线的情况。

### ④ 复合曲线

对于同向大半径圆曲线与小半径圆曲线相接时，中间设置一个缓和曲线构成卵形线困难的情况，可采用在两个圆曲线之间设置两个缓和曲线的方法，两个缓和曲线曲率在相接处相同，与一个缓和曲线的区别是采用了两个缓和曲线参数 $A$ 值，且应注意两个回旋线参数之比以小于1.5为宜。

常规道路设计中不使用该方法，笔者在实际工作中，仅仅在互通式立体交叉的B形喇叭中，为了把分流鼻端提至桥前使用过该方法。

### ⑤ 凸形曲线

凸形曲线是指将两同向回旋线在曲率相同处径相衔接组成的曲线，可以视作圆曲线长度为0的平曲线，该种情况不符合驾驶员的心理预期，整个平曲线一直在旋转方向盘，不符合道路设计每个单元长度都大于3s的规定，笔者在平时的设计中未使用过该种曲线类型。

### ⑥ C形曲线

C型曲线是受地形条件或其他特殊情况，将两同向圆

曲线在回旋线曲率为零出径相衔接组合而成的曲线，可以视作两个同向曲线的直线段长度为0。

C形曲线属于道路设计中极其不利的线形，极易发生事故，应严格限制使用。

#### 结论

路线设计中有直线、圆曲线、缓和曲线三种平面要素，对于直线及圆曲线的使用方法及情况均比较明了，唯有缓和曲线的使用比较复杂，曲率超高横坡等变化在不断

进行，事故发生率最高的地方也常是缓和曲线的位置，故笔者结合自己实际设计中碰到的情况，对缓和曲线的作用、选用原则及实际设计中的应用进行简单地探讨。

#### 参考文献

- [1]许金良，道路勘测设计第五版
- [2]刘子剑，互通式立体交叉设计原理与应用
- [3]公路路线设计规范，JTG D20-2017