

87.11
YBJ

236743

87.11
YBJ

曲线型超高顺坡缓和曲线 在既有线上的应用

杨本籍等编

人 民 铁 道 出 版 社

曲线型超高顺坡缓和曲线 在既有线上的应用

杨本籍等编



人 民 铁 道 出 版 社

1979年·北京

内 容 简 介

本书是在总结我国目前常用的直线型超高顺坡缓和曲线经验基础上编写的。它比较系统地探讨了缓和曲线的性质、线型、长度设计及铺设方法，重点分析了始终点曲率一次微分为零的Ⅱ类曲线型缓和曲线，并推荐在既有线上应用。此外，还汇编了有关计算资料和数据。参加本书编写的有：杨本籍、邓德祥、刘进安、杨谷生等同志。

本书可供铁路线路设计、施工、养护、学校等部门有关专业工作人员参考。

曲线型超高顺坡缓和曲线 在既有线上的应用

杨本籍等编

人民铁道出版社出版

责任编辑 于宗远

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092☆ 印张：4.375 字数：98 千

1979年2月第1版 1979年2月第1次印刷

印数：0001—6,500 册

统一书号：15043·6154 定价：0.37元

前 言

大跃进以来，各铁路院校和各局工务工程员工，结合我国的实际情况，研究高速、重载下，缓和曲线合理的几何结构；试铺曲线型超高顺坡缓和曲线，曾做了大量的工作。七十年代，又对改善山区线路短缓和曲线，作了进一步的试验研究。

改善山区线路大量存在的小半径短缓和曲线，是挖掘和发挥现有线路潜力、提高行车的平稳度、巩固线路维修质量、延长线路设备使用期限的关键之一。

本书希望向读者较系统地介绍曲线型超高顺坡缓和曲线的理论知识及其在国内外的研究与应用情况；推荐适于我国线路条件的线型，使这项技术能在改进现有线路设备，提高行车速度的工作中，发挥作用。也供新建高速铁路参考。

本书承上海铁道学院童大坝教授、铁道部科学研究院朱文升工程师审阅。编写过程中，得到成都铁路局科研所和桐梓工务段的大力支持，谨此表示感谢！

由于编写人员的政治和业务水平有限，加以调查研究和资料收集均不完善，难免存在缺点和错误，诚恳地希望读者提出宝贵意见，以便作进一步的修改与补充。

1978.8.

目 录

本书使用符号	1
第一章 绪论	4
第一节 缓和曲线概况	4
第二节 缓和曲线应具备的性质	11
第二章 “4-3-4型”缓和曲线	21
第三节 “4-3-4型”缓和曲线的曲率方程 和支距方程	22
第四节 设计正矢和超高值的计算	34
第五节 对于“4-3-4型”缓和曲线的评述	42
第三章 “代Ⅱ类”缓和曲线	44
第六节 缓和曲线方程的一般表达式	44
第七节 缓和曲线的支距方程和正矢计算式	47
第八节 几何参数 μ 的取值范围、三族缓和曲线的 特例	51
第九节 半波正弦型缓和曲线、评述	62
第十节 (复)缓和曲线	67
第四章 缓和曲线的长度设计	77
第十一节 在超高顺坡上车辆运行的动力特征	77
第十二节 缓和曲线的技术参数	83
第十三节 各族缓和曲线的长度设计	95
第五章 既有线上曲线型超高顺坡缓和曲线的铺设 设计	106
第十四节 铺设设计方法	106
第十五节 新线设计中的缓和曲线设计和夹直	

线长度问题的建议	113
第十六节 养护维修与观察检查	117
参考文献	119
附录一 “4-3-4型”缓和曲线正矢系数表	120
附录二 “代Ⅱ类”缓和曲线曲线系数与正矢 系数表	128
附录三 半波正弦型缓和曲线曲线系数与正矢 系数表	132
附录四 “移动圆心、改变半径”法计算系数表	133

本书使用符号

R ——圆曲线半径；

L ——缓和曲线长度；

k ——缓和曲线曲率， $k = \frac{1}{\rho}$ ；

K ——缓和曲线终点曲率， $K = \frac{1}{R}$ ；

ρ ——缓和曲线曲率半径；

l ——缓和曲线上任意点至始点弧长；

p ——缓和曲线内移距；

H_0, h ——圆曲线和缓和曲线超高度；

ZH——直缓点；

HZ——缓直点；

HY——缓圆点；

YH——圆缓点；

v ——列车运行速度， $v_{\max}$ 表示最高行车速度；

v_0 ——计算外轨超高的速度；

S_1 ——两轨中心间距，一般取 $S_1 = 1500$ 毫米；

g ——重力加速度；

a_H ——未被平衡的横向加速度；

Δh ——未被平衡超高度；

G ——车辆重量，冲量；

$2d$ ——车辆两侧弹簧之间距离；

κ ——车辆弹簧刚度；

M_0 ——车辆所负担的质量；

P_v ——垂直动压力；

f ——第一章中外轮沿外轨升（降）速度， $[f]$ 表示容许值；

f ——第二章中缓和曲线设计正矢；

ψ ——车轴与水平面倾斜角；

L_0 ——曲线型超高顺坡缓和曲线长；

L_3 ——现行三次缓和曲线长；

p_H ——曲线型缓和曲线内移距；

p_3 ——现行三次缓和曲线内移距；

F ——圆曲线设计正矢；

y ——缓和曲线支距（纵坐标）；

i ——第二章中正矢法整正曲线的两测点间距（半弦长）；

i ——第四章中曲线外轨超高顺坡坡度， $[i]$ 表示容许值；

S ——圆曲线轨距加宽值；

s ——缓和曲线轨距加宽值；

β ——曲线的切线倾角或称走向角；

μ ——缓和曲线的几何参数；

ω_1 ——轨枕结构自振频率；

ω_2 ——车辆的自振频率；

$T_0 = \frac{L_0}{v}$ ——车辆驶经缓和曲线（顺坡）全长所需时间；

$\theta = \frac{\pi}{L_0}$ ——车辆通过缓和曲线的干扰力频率；

n ——防止车辆倾复的稳定系数；

Δn ——缓和曲线附加稳定系数； $[\Delta n]$ 表示容许值；

h_a ——外轮升（降）加速度， $[h_a]$ 表示容许值；

I_0 ——车辆对轨距中心的转动惯量；

- α_a ——车辆倾转角加速度, $[\alpha_a]$ 表示容许值;
- α_0, β_0 ——横向未被平衡加速度及其变化率, $[\alpha_0]$ 、 $[\beta_0]$ 表示容许值;
- ϕ_a, ϕ_β ——车辆平面转向角加速度及其变化率, $[\phi_a]$ 、 $[\phi_\beta]$ 表示容许值;
- k_h, ρ_h ——超高度顺坡曲线的曲率与曲率半径, $[k_h]$ 表示容许值;
- H ——车辆重心距轨顶面的高度;
- $2b$ ——客车固定轴距, 采用全金属客车刚距, $2b = 17$ 米;
- q ——圆曲线中点拨移量, $[q]$ 表示容许值;
- α ——曲线转向角;
- δ ——轮轨游间。

第一章 绪 论

第一节 缓和曲线概况

铁路线路是铁路运输的重要技术设备，是行车的基础。曲线线路是铁路线路的薄弱环节。

线路平面和立面的几何条件，都直接影响机车车辆和轨道的相互作用力。这种相互作用力，与列车运行的平稳性、线路的稳定性有密切的关系。

机车车辆在铁路曲线上运行，将发生它在直线上运行所没有的力，其中包括：向着曲线外(内)侧的离(向)心力、车辆绕竖直轴和水平轴转动加速度引起的各种惯性力、转动车架的转向力等。要运行平稳，列车从直线驶入曲线，或从曲线驶入直线，这些力，都不应该突然发生或突然消失。为了实现这项要求，自十九世纪中叶，世界各国便开始在铁路曲线的直线和圆曲线间插入一段缓和曲线。缓和曲线是曲率从零逐渐变化到等于圆曲线曲率的曲线。外轨超高、轨距加宽都在缓和曲线上渐变，使附加动力平缓地增长和消失。

我国铁路规定：直线与圆曲线间、复心曲线的两个圆曲线间都应该以缓和曲线连接。

依照曲率的变化规律，缓和曲线分为两大类：

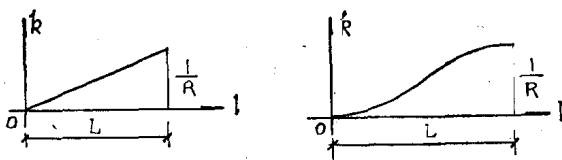


图 1-1

1. 曲率呈直线形渐变

$$k = \frac{1}{C} \cdot l$$

式中 C ——缓和曲线的参数, $C = RL$ 。

2. 曲率呈曲线型渐变

$$k = k(l)$$

铁路的曲线线路还需设置外轨超高, 其作用是:

1. 减少外轨多受的垂直压力和横向压力, 尽量使两轨的受力均等;
2. 平衡离心加速度, 使列车安全、平稳地通过曲线, 旅客不致感觉不适;
3. 防止车辆向曲线外侧倾复;

选定圆曲线的外轨超高, 系基于使车轮对曲线内外股的垂直压力相等, 即所谓“均衡超高”。

目前, 在缓和曲线上, 超高设置的方法是使曲线的内股钢轨保持水平, 曲线的外股钢轨递升。

曲率和超高直线形渐变的缓和曲线, 线型方程简单, 在目前的轨道结构条件下, 铺设和养护也比较容易, 为多数铁路所采用。

牵引动力在蒸汽机车时代, 列车运行速度受机车性能的限制。世界各国早期修建的铁路, 线路设计标准和缓和曲线线型是与当时低速行车相适应。随着内燃机车与电力机车出现, 又不断发展和改进, 列车的运行速度大幅度提高。现行缓和曲线的缺点逐渐暴露, 主要是在缓和曲线的始终点: 平面上发生轮缘冲撞外轨、离心力骤然发生促成线路外挤, 正矢不断扩大; 立面上因外轨超高直线顺坡, 出现几何折角, 产生突发的、巨大的垂直冲击力。在这些水平的和垂直的动

力反复作用下，外轨偏磨、曲线的方向和水平发生变形，养路维修质量难予保持。造成列车通过时摇晃。

在我国，随着社会主义革命与社会主义建设的发展，牵引动力的革新，列车运行的速度、密度、轴重都在日益提高。因此，对行车的基础也提出了更高要求。现行缓和曲线因存在上述缺点与运输繁忙和高速行车的需要不相适应，尤其在曲线半径小、缓和曲线短、行车速度较高的线路上最为明显。

我国铁路，曲线线路占很大的比重。1958年以来，许多铁路局的科技人员和工务员工，为解决缓和曲线线路变形快，晃车，以及轮轨磨耗问题提出并采取过一些措施。国内外对适应高速行车的缓和曲线线型亦提出过各种建议。“正弦型”和“S”型超高顺坡缓和曲线，已用于日本和西德的高速铁路。

现国内外已设计出十几种缓和曲线，兹列举其中六种如表1—1。

我国铁路修建于不同的历史时期，其中的低标准旧线和山区Ⅲ级铁路，线路设计标准较低。当前，普遍反映缓和曲线的长度不足。为了适应运输生产的发展，有步骤地解决线路设备的薄弱环节，现行《铁路工务规则》（第71条）要求“加强半径为800米以下的曲线”。

关于缓和曲线，《规则》在第78条里规定：

“在圆曲线两端均应设置缓和曲线，其长度（米）一般不应短于 $10 \times \text{超高度（米）} \times \text{最高行车速度（公里/小时）}$ ，特别困难地段，不短于 $7 \times \text{超高度（米）} \times \text{最高行车速度（公里/小时）}$ ，计算结果取10米整数。”

根据这项规定，势必大量的曲线需要延长缓和曲线。缓和曲线问题已成为既有线技术改造中一个突出的问题。

如果不变缓和曲线线型而将缓和曲线延长,例如,延长 n 倍 ($n > 1$),缓和曲线的内移距将由 $\frac{L^2}{24R}$ 变为 $\frac{n^2 L^2}{24R}$, 增大 n^2 倍。势必造成线路偏移,路基需予加宽,拨改后也一时难以稳定。某些情形下,甚至难以实施(当线路受到桥隧、高堤深堑限制的时候)。但是,由表 1—1 得知,曲线型超高顺坡缓和曲线的内移距 P_H 都较现行缓和曲线的 P_s 小,故有可能将缓和曲线改变线型延长而圆曲线位置不变。

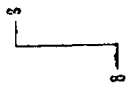
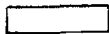
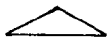
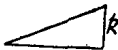
实践证明:采用曲线型超高顺坡缓和曲线来延长现行三次缓和曲线,以改善机车车辆的运行动力状况,是一项有效的挖掘和发挥现有线路潜力;适应列车重载、高速运行;保持线路稳定;降低轮轨磨耗、延长线路设备使用期限的重要措施。

上海局、沈阳局、成都局换铺“曲线型”缓和曲线的试验,都有效地克服了现行缓和曲线的弊病。

1973 年以来,贵阳铁路分局在川黔线 K205 试铺了“4-3-4型”缓和曲线,它的超高顺坡是在顺坡头尾设一段二次抛物线型竖曲线,使顺坡始终点 $\frac{dh}{dl} = 0$ 。几年的运营实践表明:改善后的缓和曲线,行车平稳度和线路稳定性有显著提高。超高顺坡、正矢和轨距递减均符合现行《铁路工务规则》的规定,且计算简便、易于实施和养护。它在曲线半径小,缓和曲线短,行车速度高的处所显示了其优越性。

调查资料证明:采用曲线型超高顺坡是减轻钢轨磨耗的重要措施。1973年,成都局钢轨磨耗调查研究组在成渝线朱杨溪站附近调查了12个曲线,在缓和曲线部分的磨耗情况表明:采用曲线型顺坡时上股磨耗较轻,在缓圆点和圆缓点附近,最为明显。

同样长度下国内

缓和曲线名称	三次缓和曲线	西德“S”型曲线 (Schramm曲线)	七次曲线 (长院赵方民曲线)
k''		 $\max k'' = \frac{4}{RL_0^2}$	 $\max k'' = \frac{5.6}{RL_0^2}$
k'	 $\max k' = \frac{1}{RL_0}$	 $\max k' = \frac{2}{RL_0}$	 $\max k' = \frac{1.875}{RL_0}$
曲率 k	 $K = \frac{1}{R}$	 $K = \frac{1}{R}$	$K = \frac{1}{R}$
曲线方程	$y = \frac{l^3}{6RL_0^2}$	$y_1 = \frac{l^4}{6RL_0^2}$ $y_2 = \frac{l^2}{2R_1} - \frac{(L_0 - l)^4}{6RL_0^2}$ $-\frac{L_0}{2R}l + \frac{L_0^3}{6.86R}$	$y = \frac{L_0^4}{R} \left\{ \frac{1}{7} \left(\frac{l}{L_0} \right)^7 - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L_0} \right)^4 + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L_0} \right)^3 \right\}$
终点倾角	$\frac{L_0}{2R}$	$\frac{L_0}{2R}$	$\frac{L_0}{2R}$
终点坐标	$\frac{L_0^3}{6R}$	$\frac{L_0^3}{6.86R}$	$\frac{L_0^3}{7R}$
内移距	$\frac{L_0^3}{24R}$	$\frac{L_0^3}{48R}$	$\frac{L_0^3}{56R}$

外几种缓和曲线

表 1—1

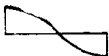
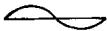
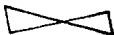
日本正弦(半波)曲线	西德正弦(一波)曲线	五次曲线
 $\max k' = \frac{4.93}{RL_0^2}$	 $\max k' = \frac{6.28}{RL_0^2}$	 $\max k' = \frac{6}{RL_0^2}$
 $\max k' = \frac{1.57}{RL_0}$	 $\max k' = \frac{2}{RL_0}$	 $\max k' = \frac{1.5}{RL_0}$
$K = \frac{1}{R}$	$K = \frac{1}{R}$	$K = \frac{1}{R}$
$y = \frac{l^2}{4R}$ $- \frac{L_0^2}{2\pi^2 R} \left(1 - \cos \frac{\pi}{L_0} \cdot l \right)$	$y = \frac{1}{2R} \left(\frac{l^3}{3L_0} + \frac{L_0^2}{4\pi^2} \sin \frac{2\pi}{L_0} l - \frac{L_0^2}{2\pi^2} l \right)$	$y = \frac{L_0^2}{2R} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{L}{L_0} \right)^4 - \frac{1}{5} \left(\frac{L}{L_0} \right)^5 \right]$
$\frac{L_0}{2R}$	$\frac{L_0}{2R}$	$\frac{L_0}{2R}$
$\frac{L_0^2}{6.8R}$	$\frac{L_0^2}{7.05R}$	$\frac{L_0^2}{6.86R}$
$\left(\frac{1}{8} - \frac{1}{\pi^2} \right) \frac{L_0^2}{R}$	$\frac{L_0^2}{61.2R}$	$\frac{L_0^2}{40R}$

表 1—2 是这 12 个曲线的缓和曲线上股，经大修换轨后 7 年的平均磨耗量。

表 1—2

曲线 编号	H_0	L 米	顺 坡 坡 度	顺坡线型	ZH至HY的 平均磨耗量		YH至HZ的 平均磨耗量		附 注
					侧面	垂直	侧面	垂直	
12	120	80	1/667	直线形	9.3	3.8	7.2	3.7	单位： 毫米
13	120	75	1/625	直线形	8.9	3.8	7.9	3.7	
9	105	70	1/670	直线形	7.2	3.6	8.1	4.0	
5	100	70	1/700	直线形	6.9	3.4	6.4	3.6	
11	95	60	1/630	直线形	5.5	3.6	6.1	3.8	
8	110	60	1/535	直线形	5.3	3.2	4.7	3.3	
1	100	60	1/600	直线形	5.3	5.2	7.4	7.0	
10	115	75	1/650	直线形	4.3	3.1	6.3	3.3	
15	60	70	1/1170*	曲线形**	4.1	3.2	6.3	3.8	
16	125	60	1/480	曲线形	0	2.2	1.6	2.7	
19	110	70	1/635	曲线形	2.8	2.5	3.6	3.6	
17	110	70	1/635	曲线形	1.8	2.5	3.0	2.4	

* 为便于对比，曲线型超高顺坡坡度系以“平均坡度” $i = H_0/L$ 计算的。

** 这四个曲线的超高顺坡线型是采用“S”型。

图 1—2 是 9* 和 19* 曲线的缓和曲线上股各个测点的侧磨情况，它们的超高顺坡长度都是 70 米。从图中缓和曲线上股磨耗情况的对比可以看出：曲线型顺坡的任一点，磨耗量都较轻，在缓圆点附近，尤为显著。

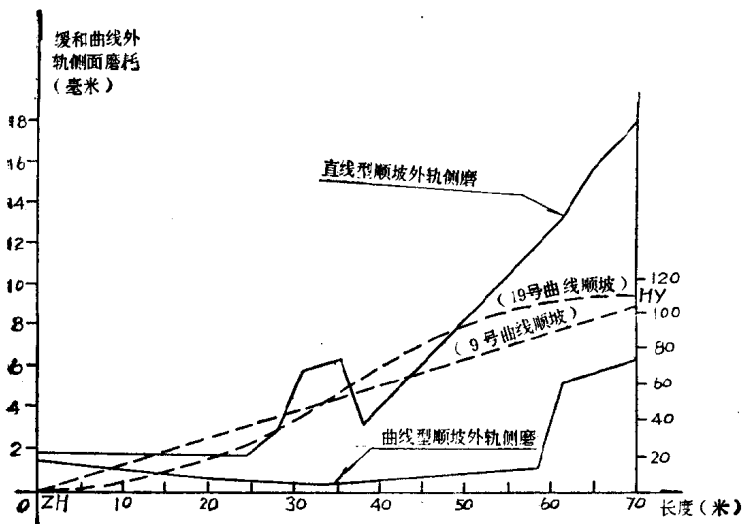


图 1-2

第二节 缓和曲线应具备的性质

高速行驶对于铁路缓和曲线有一定的要求。

在直线和圆曲线，曲率和超高是单一的；在缓和曲线，曲率和超高则是不断地变化。机车车辆在缓和曲线运行，将发生它在直线、圆曲线运行所没有的力（例如，竖直的和倾转的附加动力）。这时，车辆的运动，属于非稳态的过渡运动。为使列车运行平稳，并保持线路稳定，缓和曲线应该具备两个基本的动力条件：

第一，要避免振动和撞击。作用在机车车辆上的各种动力、车辆与线路的相互作用力，都不应该骤然发生、骤然消失，而应该是逐渐变化的。

第二，各种动力变化愈缓，车辆运行愈平稳，振动也愈小，旅客方感舒适。这就要求作用在机车车辆上的各种动力的变化率，应愈小愈好。