

文章编号: 1674—8247(2019)06—0008—07
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.002

350 km/h 高速铁路缓和曲线与旅客乘车舒适度分析

邢烨炜¹ 戴龙钦²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 中国铁路南昌局集团有限公司南昌高铁维修段, 南昌 330100)

摘 要:高速铁路建成后,开通速度有时和设计速度不一致,造成列车通过曲线地段时,旅客乘车舒适性达不到设计标准。本文通过对不同缓和曲线线型进行分析,在确定设计标准的基础上,计算不同曲线半径、运行速度、缓和曲线类型对旅客乘车舒适性的影响。结果表明:(1)加速度时变率相同时,缓和曲线采用三次抛物线时所需缓和曲线长度分别为仅采用半波正弦、一波正弦和五次多项式等情况下的 0.625、0.476 和 0.833 倍;(2)欠/过超高、车体横向加速度与缓和曲线线型无关;(3)满足旅客乘坐舒适度要求的运行最大速度区间为 245~370 km/h,且曲线半径越小,速度区间减小;(4)三次抛物曲线车体横向加速度时变率在不同曲线半径、运行速度情况下适应性最好,在 300 km/h 时,舒适度最优。

关键词:高速铁路;乘车舒适度;理论分析;缓和曲线

中图分类号:U211.2 文献标志码:A

8

Analysis on the Transition Curve and Ride Comfort of 350 km/h High Speed Railway

XING Yewei¹ DAI Longqin²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Nanchang High-speed Railway Maintenance Section, China Railway Nanchang Bureau
Group Compang, Nanchang 330100, China)

Abstract: After the completion of high-speed railway, the actual running speed is less than the design speed, resulting in that passenger comfort can not meet the design standards in the curve section. Based on the analysis of different transition curves and the determination of design standards, the influence of different curve radius, running speed and transition curve types on passenger ride comfort is calculated in the paper. It is concluded that: (1) When the acceleration time-varying rate is the same, the length of the transition curve with cubic parabola is 0.625, 0.476 and 0.833 times of that with half wave sine, one wave sine and quintic polynomial respectively; (2) Under/over-elevation, lateral acceleration of car body has nothing to do with the transition curve; (3) The maximum speed range that meets the passenger comfort requirements is 245~370 km/h, and the smaller the curve radius, the smaller the speed range; (4) The cubic parabolic body lateral acceleration time-varying rate has the best adaptability under different curve radius and running speed, and the comfort is the best at 300 km/h.

Key words: high speed railway; ride comfort; theoretical analysis; transition curves

随着高速铁路在我国快速发展,为保证其安全运行和旅客乘车舒适度,对线路的空间几何形状提出

收稿日期:2019-04-20

作者简介:邢烨炜(1986-),男,工程师。

引文格式:邢烨炜,戴龙钦. 350 km/h 高速铁路缓和曲线与旅客乘车舒适度分析[J]. 高速铁路技术,2019,10(6):8-14.

XING Yewei, DAI Longqin. Analysis on the Transition Curve and Ride Comfort of 350 km/h High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 8-14.

了更高的要求,而高速铁路在建成投入运营后,从线路质量、地质环境、运行安全、应急处置及列车开行状态等方面考虑,实际运行速度低于设计速度,达不到设计标准时,旅客乘车舒适性往往受到影响。在高速铁路运行至曲线地段时,旅客乘车舒适性受缓和曲线形式(如曲线半径、钢轨中心距、设计超高等)和列车运行状态(如列车加减速产生的纵向加速度、运行速度等)有关。近年来国内外诸多学者对缓和曲线的空间几何形状进行了研究,从平面及立面两个角度满足行车平稳、安全过渡出发,分析曲线地段线型问题。缓和曲线除需要满足列车安全过渡的要求,同时需要满足加速度时变率的要求,总体上讲,缓和曲线是曲率及超高在空间渐变,同时满足运行安全和乘车舒适的一种三维曲线^[1-2]。目前普速铁路满足要求的三维曲线种类较多,根据列车运行速度及相关要求不同,不同的国家所采用的缓和曲线线型不尽相同,根据长期使用经验及相关计算,世界上采用的缓和曲线主要有三次抛物线型、次抛物线改善型、半波/一波正弦型等^[3-4],然而,高速铁路因其更高的标准,采用的线型只有三次抛物线型及半波正弦型^[5]。本文按线路处于理想空间状态,不同工况各项计算参数参照 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》^[6]取定范围或定值,以车体横向加速度及其时变率、欠/过超高为评价指标,在对不同缓和曲线线型进行分析的基础上,计算分析曲线半径、运行速度、缓和曲线类型对旅客乘车舒适性的影响。

1 缓和曲线线形分析

1.1 常用缓和曲线线型的方程式

根据不同出发点,缓和曲线有多种分类方式,按其超高过渡形式,可将其分为直线型和曲线型两种,其中直线型是指曲线超高值和曲率随着线路线性变化的缓和曲线,主要三次抛物线型,而曲线型是指曲线超高值和曲率随着线路非线性变化的缓和曲线,主要有半波/一波正弦型。根据我国长期理论/试验研究及现场经验,我国铁路采用的缓和曲线线型主要有三次抛物线型、五次抛物线型、半波/一波正弦型等形式。

各缓和曲线具有相同的表达式结构,通常采用其曲率的一阶导数表示,如式(1)所示^[3]。

$$k' = Al^m(l_0 - l)^n + B\sin\left(\frac{\pi l}{l_0}\right) \quad (1)$$

式中: A 、 B ——待定系数;

m 、 n 、 r ——指数。

对于缓和曲线的其他参数,如图1所示。

当列车通过缓和曲线起、中点时,因曲率发生变

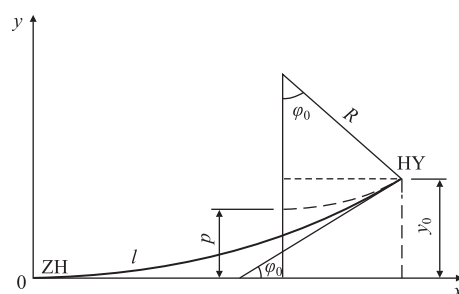


图1 缓和曲线参数

化,列车在未被平衡的离心力作用下对钢轨产生冲击,但当运行速度与设计速度相差较小时,冲击作用较轻,对钢轨的磨耗不大,直线型缓和曲线以其设计、施工相对简便,被建议作为首选线型,如三次抛物线型曲线或其改善型。

当式(1)中指数 m 、 n 、 r 为零时, $k' = A + B = C$ 。

$$k = \int k' dl = \int C dl = Cl。$$

在HY点处,即 $l = l_0$ 时,曲率 $k = 1/R$,带入式(1)

$$\text{得 } C = \frac{1}{Rl_0}, \text{ 即 } k' = \frac{1}{Rl_0}。$$

通过对曲率 k 进行两次积分,可得三次抛物线型缓和曲线的纵坐标,如式(2)所示。

$$y = \int \left(\int k dl \right) dl = \frac{l^3}{6Rl_0} \quad (2)$$

三次抛物线型缓和曲线相对其他线型来说,其线型简单,同时设计、施工相对简便,不考虑特殊要求时作为首选线型^[7]。但是,目前还没有发现一类完美无缺的线型,可以满足任何要求,如三次抛物线型缓和曲线在起终点立面位置存在折角,轮轨间产生竖向作用力,且列车运行速度越大,作用力增大,同时运行平稳性减小,为消除这一情况,通常在产生折角的位置增加一段圆曲线过渡,即为三次抛物线改善型缓和曲线^[8]。

同理,当参数 A 、 B 、 m 、 n 、 r 取值不同时,可以得到不同类型缓和曲线,部分如表1所示。

1.2 其他国家铁路采用的缓和曲线线型

铁路运输在世界交通体系中处于大动脉的地位,而高速铁路快速发展能更好的满足人们的出行需求,运行速度的提升,不仅是国家综合国力的体现,同时是各个国家争相发展的目标。随着社会发展,旅客不再仅仅满足运行速度的提升,对乘车舒适度提出了新的、更高的要求,而常用的缓和曲线线型是基于普速铁路发展起来,不能很好的适应高速列车旅客乘车舒适度的要求。为了解决或改善这种状况,诸多国家进行了相关研究,如表2所示,简要对各主要国家铁路缓和曲

表 1 常见的缓和曲线线型方程

线形	系数取值	曲率的一阶导数	曲率方程	线形方程
三次抛物线	$m = n = r = 0$	$\frac{1}{Rl_0}$	$\frac{l}{Rl_0}$	$\frac{x^3}{6Rl_0}$
五次曲线	$A \neq 0, B = 0$ $m = n = 1$	$Al(l_0 - l)$	$\frac{1}{R} \left[3 \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 - 2 \left(\frac{l}{l_0} \right)^3 \right]$	$\frac{l_0^2}{2R} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{l}{l_0} \right)^4 - \frac{1}{5} \left(\frac{l}{l_0} \right)^5 \right]$
七次曲线	$A \neq 0, B = 0$ $m = n = 2$	$Al^2(l_0 - l)^2$	$\frac{1}{R} \left[10 \left(\frac{l}{l_0} \right)^3 - 15 \left(\frac{l}{l_0} \right)^4 + 6 \left(\frac{l}{l_0} \right)^5 \right]$	$\frac{l_0^2}{2R} \left[\left(\frac{l}{l_0} \right)^5 - \left(\frac{l}{l_0} \right)^6 + \frac{2}{7} \left(\frac{l}{l_0} \right)^7 \right]$
九次曲线	$A \neq 0, B = 0$ $m = n = 3$	$Al^3(l_0 - l)^3$	$\frac{1}{R} \left[35 \left(\frac{l}{l_0} \right)^4 - 84 \left(\frac{l}{l_0} \right)^5 + 70 \left(\frac{l}{l_0} \right)^6 - 20 \left(\frac{l}{l_0} \right)^7 \right]$	$\frac{l_0^2}{6R} \left[7 \left(\frac{l}{l_0} \right)^6 - 12 \left(\frac{l}{l_0} \right)^7 + \frac{15}{2} \left(\frac{l}{l_0} \right)^8 - \frac{5}{3} \left(\frac{l}{l_0} \right)^9 \right]$
半波正弦	$A = 0, B \neq 0$ $r = 1$	$B \sin \left(\frac{\pi l}{l_0} \right)$	$\frac{1}{2R} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi l}{l_0} \right) \right]$	$\frac{l_0^2}{6R} \left\{ \frac{3}{2} \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 - \frac{3}{\pi^2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi l}{l_0} \right) \right] \right\}$
一波正弦	$A = 0, B \neq 0$ $r = 2$	$B \sin^2 \left(\frac{\pi l}{l_0} \right)$	$\frac{1}{R} \left[\frac{l}{l_0} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi l}{l_0} \right) \right]$	$\frac{l_0^2}{6R} \left\{ \left(\frac{l}{l_0} \right)^3 - \frac{3}{2\pi^2} \left[\frac{l}{l_0} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi l}{l_0} \right) \right] \right\}$

表 2 国外主要国家铁路缓和曲线特征

国家	缓和曲线线型	缓和曲线长度	超高方式
日本	半波正弦	$l_0 = \max(h_0, 0.009\ 7v_{\max})$	内轨逐降 1/2 超高 外轨逐升 1/2 超高 (曲线型超高顺坡)
法国	三次抛物线改善型	$l_0 \geq h_0 v_{\max}/180$	内轨不动,外轨逐渐升高(直线型超高顺坡)
德国	三次抛物线	$l_0 \geq 0.648v_{\max} (160 \leq v \leq 250\ \text{km/h})$ $l_0 \geq 0.777\ 6v_{\max} (250 \leq v \leq 360\ \text{km/h})$	
西班牙		$l_0 \geq 360$ (一般); $l_0 \geq 280$ (困难);	
意大利		$l_0 \geq av_{\max}/(3.6f)$	
瑞典		$l_0 \geq 171.5$	
中国		$l_0 \geq \max(h_0/i_{\max}, h_g av_{\max}/3.6fs)$	

注: v_{\max} ——列车运行速度; h_0 ——最大超高拓; h_g ——欠超高; a ——横向加速度; f ——横向加速度时变率; s ——钢轨中心距

线特征进行介绍。
铁路缓和曲线长期以来都是铁路研究的重点^[9]。选择缓和曲线线型,应以运行安全性和乘坐舒适度为基础,再结合综合演算、现场勘测和后期维护进行综合考虑,特别是针对提速线路,应着重考虑乘车舒适度对缓和曲线选取不可忽略的影响^[4]。英国铁路所采用的缓和曲线为在原始三次抛物型曲线两端的立面上各增加一段二次方圆曲线过渡;而法国铁路参考了英国铁路的方法,在原始三次抛物型曲线两端的立面上各增加一段 40 m 长的余弦曲线过渡^[10]。根据英、法等国对三次抛物型缓和曲线的改进经验,我国铁路学者提出适应自身国情的缓和曲线改进方案,即在原始三次抛物型曲线两端的立面上各增加一段半径不小于竖曲线半径的圆曲线过渡。

2 计算参数及公式

2.1 计算参数

为保证列车运行的安全性和旅客乘坐舒适度

的要求,缓和曲线应满足车辆运行时车体横向加速度及其时变率、欠/过超高等要求。

2.1.1 车体横向加速度

既有线路实设超高不会随着列车运行变量的变化而改变,根据列车通过该区段时受力情况可知,仅有一个运行速度使水平离心力和向心力达到平衡状态。然而,列车实际运行时,在曲线区段运行状态会发生改变,速度处于变化状态,此时列车会产生横向加速度,旅客乘车舒适度会受到影响,对于同一曲线,不同速度必有相应车体横向加速度与其对应。因此,为保证列车运行的安全性和旅客乘坐舒适度的要求,车体横向加速度值应处于容许范围内。综上,车体横向加速度可作为旅客乘车舒适度的重要评价指标,列车运行通过曲线地段产生的横向加速度应处于允许值范围内。
根据列车通过曲线区段时受力情况可知,横向加速度 a_n 计算公式为^[11]:

$$a_n = \frac{v^2}{R} \cos \gamma - g \sin \gamma = \frac{v^2}{R} \frac{\sqrt{s^2 - h^2}}{s} - g \frac{h}{s} \quad (3)$$

式中: s ——钢轨中心距(1.5 m);
 R ——曲线半径;
 v ——列车运行速度;
 h ——超高;
 a_n ——车体横向加速度。

国内外大量专家学者通过理论计算及对大量工程实例进行分析,总结出未被平衡的离心加速度与旅客乘车舒适度之间具有以下关系^[12]:

- (1)当 $a_L < 0.04 \text{ g}$ 时,列车经过曲线区段时旅客对离心加速度无明显感觉;
- (2)当 $a_L = 0.05 \text{ g}$ 时,列车经过曲线区段时旅客对离心加速度有一定感觉,但是没有产生不舒适的感觉;
- (3)当 $a_L < 0.07 \text{ g}$ 时,列车经过曲线区段时,旅客对离心加速度有一定不舒适的感觉,但一般可以长时间忍受;
- (4)当 $a_L < 0.1 \text{ g}$ 时,列车经过曲线区段时,旅客对离心加速度有不舒适的感觉,但这种感觉仅可以不频繁的承受。

作为研究旅客乘车舒适度不可缺少的部分,国内外学者在列车动力方面进行了大量研究,在对其进行评价方面,国家铁路相关部门做出了相应的规定^[13],当列车运行至曲线区段时,车体未被平衡的加速度应当满足以下条件。

$$a_{ec} < 0.784 \text{ m/s}^2 \quad (4)$$

2.1.2 车体横向加速度时变率

因为列车运行至曲线地段时,无法匀速通过,故列车的车体横向加速度不是恒定的,如果该加速度变化曲线不平缓或存在离散点,则旅客乘车舒适度将会受到极大影响。我们用车体横向加速度时变率来表示车体横向加速度快慢,该参数大小受运行速度、曲线超高、钢轨中心距、缓和曲线线型等影响,同时车体横向加速度时变率可以直观反应列车运行时旅客乘车舒适度。因此车体横向加速度时变率可作为列车通过曲线地段时旅客乘车舒适度的重要评价指标,在其值计算中将列车假定为1个质点,同时忽略轨道不平顺性,列车在匀速和变速两种状态下车体横向加速度时变率公式如下^[14]。

列车匀速状态时车体横向加速度时变率:

$$f = \frac{da_n}{dT} = \frac{v^3}{s} \frac{\sqrt{s^2 - h^2}}{s} \frac{dk}{dl} - \left(kv^3 \frac{h}{s \sqrt{s^2 - h^2}} + \frac{vg}{s} \right) \frac{dh}{dl} \quad (5)$$

列车变速状态时车体横向加速度时变率:

$$f = \frac{da}{dT^n} = v \left[\left(3ka_l + v^2 \frac{dk}{dl} \right) \frac{\sqrt{s^2 - h^2}}{s} - \left(kv^2 \frac{h}{s \sqrt{s^2 - h^2}} + \frac{g}{s} \right) \frac{dh}{dl} \right] \quad (6)$$

式中: a_l ——列车加减速产生的纵向加速度(仅考虑均匀加减速)。

常见缓和曲线线型车体横向加速度时变率计算参数,如表3所示。

表3 常见的缓和曲线计算参数表

线形	曲率 k	$\frac{dk}{dl}$	$\frac{dh}{dl}$
三次抛物线	$\frac{l}{Rl_0}$	$\frac{1}{Rl_0}$	$\frac{h}{l_0}$
五次曲线	$\frac{1}{R} \left[3 \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 - 2 \left(\frac{l}{l_0} \right)^3 \right]$	$\frac{3}{2Rl_0}$	$\frac{3h}{2l_0}$
半波正弦	$\frac{1}{2R} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi l}{l_0} \right) \right]$	$\frac{\pi}{2Rl_0}$	$\frac{\pi h}{2l_0}$
一波正弦	$\frac{1}{R} \left[\frac{l}{l_0} - \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi l}{l_0} \right) \right]$	$\frac{1}{Rl_0}$	$\frac{h}{Rl_0}$

目前,对于铁路线路运行品质等级的划分在国际上没有一个固定的统一标准,我国主要通过对列车运行动态进行还原模拟的方式,计算列车通过曲线地段的车体横向加速度时变率,根据其计算结构对铁路线路的运行品质进行评定,如表4所示。

表4 加速度时变率的舒适度条件

指标	舒适度条件		
	优秀	良好	一般
横向加速度时变率	-	0.15	0.25

2.1.3 欠超高允许值 $[h_q]$

线路欠超高允许值 $[h_q]$ 大小根据旅客乘车舒适度取值,根据京津城际铁路及广深城际铁路运营阶段实测结果,欠超高允许值的取值区间宜为(40 mm, 90 mm),如表5所示。

2.1.4 过超高允许值 $[h_g]$

线路过超高允许值 $[h_g]$ 取值考虑到高速铁路运行时以高速铁路为主,故其大小根据旅客乘车舒适度取值,因此认为过超高允许值与欠超高允许值相同,如表5所示。

表5 超高允许值(mm)

舒适度条件	优秀	良好	一般
欠超高允许值	40	60	90
过超高允许值	40	60	90

2.2 曲线参数

缓和曲线参数只有曲线长度及线路超高,其中曲线长度综合考虑超高顺坡率允许值、车体横向加速度时变率允许值、车体倾斜角度允许值等相关参数。

根据我国现行 TB 10098-2017《铁路线路设计规范》^[15],最大超高顺坡率不大于 2‰,因此,基于超高顺坡率要求的缓和曲线长度为:

$$L_1 \geq \frac{h}{i_{\max}} = 0.5h \tag{7}$$

式中: i_{\max} ——最大超高顺坡率。

基于车体横向加速度时变率(即欠超高时变率限值)的满足旅客乘车舒适度要求的缓和曲线长度为:

$$L_2 \geq \frac{v_G}{3.6} \frac{h_q}{[\beta]} \tag{8}$$

式中: v_G ——设计最高速度(km/h);

$[\beta]$ ——满足旅客乘车舒适度要求的欠超高时变率限值(mm/s),良好条件按 23 mm/s 取值,困难条件按 38 mm/s 取值。

基于车体倾斜角速度(即超高时变率限值)的满足旅客乘车舒适度要求的缓和曲线长度为:

$$L_2 \geq \frac{v_G}{3.6} \frac{h}{[f]} \tag{9}$$

式中: $[f]$ ——满足旅客乘车舒适度要求的超高时变率限值(mm/s),优秀条件按 25 mm/s 取值,良好条件按 28 mm/s 取值,一般条件按 31 mm/s 取值;

h ——圆曲线设计超高(mm)。

综上所述,缓和曲线长度计算公式为:

$$L = \max(L_1, L_2, L_3) = \max(0.5h, \frac{v_G}{3.6} \frac{h_q}{[\beta]}, \frac{v_G}{3.6} \frac{h}{[f]}) \tag{10}$$

曲线的均衡超高为:

$$h = 11.8 \frac{v^2}{R} \tag{11}$$

式中: v ——列车行车速度(km/h);

R ——曲线半径(m)。

3 计算分析

高速铁路建设完成后,实际运行速度往往达不到设计速度,主要原因有:(1)出于对线路质量、地质环境和运行安全等方面考虑,实际运行速度低于设计速度;(2)高速铁路由于运行速度快,在进出站时,为防止过大加减速对线路造成损伤和降低旅客乘车舒适度,在以车站为中心的前后较长距离减速进站和加速出站,这些区段实际运行速度低于设计速度;(3)当遇防洪、行人入网等情况应急处置时,往往会对线路进行限速,比如当 24 h 连续雨量达到 100 ml 及以上时,对影响区段采取限速 120 km/h 的方式,实际运行速度低于设计速度。

3.1 超高检算

以设计时速 350 km/h 高速铁路设计为依据,根据式(11)可知,均衡超高值仅与运行速度和曲线半径有关,与缓和曲线形式无关,根据式(11)计算不同实际速度条件下的均衡超高,结果如表 6 所示,表中曲线半径及对应设计超高选取自《高速铁路设计规范》。

表 6 实际运行速度 200 km/h 时曲线超高检算表

曲线半径/mm	实设超高/mm	均衡超高/mm								欠超高(负数)/过超高(正数)/mm							
		120/(km/h)	160/(km/h)	200/(km/h)	250/(km/h)	300/(km/h)	350/(km/h)	360/(km/h)	370/(km/h)	120/(km/h)	160/(km/h)	200/(km/h)	250/(km/h)	300/(km/h)	350/(km/h)	360/(km/h)	370/(km/h)
12 000	95	14.2	25.2	39.3	61.5	88.5	120.5	127.4	134.6	80.8	69.8	55.7	33.5	6.5	-25.5	-32.4	-39.6
11 000	105	15.4	27.5	42.9	67.0	96.5	131.4	139.0	146.9	89.6	77.5	62.1	38.0	8.5	-26.4	-34.0	-41.9
10 000	120	17.0	30.2	47.2	73.8	106.2	144.6	152.9	161.5	103.0	89.8	72.8	46.3	13.8	-24.6	-32.9	-41.5
9 000	135	18.9	33.6	52.4	81.9	118.0	160.6	169.9	179.5	116.1	101.4	82.6	53.1	17.0	-25.6	-34.9	-44.5
8 000	150	21.2	37.8	59.0	92.2	132.8	180.7	191.2	201.9	128.8	112.2	91.0	57.8	17.3	-30.7	-41.2	-51.9
7 000	170	24.3	43.2	67.4	105.4	151.7	206.5	218.5	230.8	145.7	126.8	102.6	64.6	18.3	-36.5	-48.5	-60.8
6 000	170	24.3	43.2	67.4	105.4	151.7	206.5	218.5	230.8	141.7	119.7	91.3	47.1	-7.0	-70.9	-84.9	-99.2
5 500	170	28.3	50.3	78.7	122.9	177.0	240.9	254.9	269.2	139.1	115.1	84.2	35.9	-23.1	-92.8	-108.1	-123.7

因欠超高与过超高允许值条件相同,故合并考虑,记过超高为正,欠超高为负,结果如图 2 所示。

由表 6、图 2 可知:(1)曲线半径增大,关系曲线趋于平缓,即欠/过超高受速度影响减小,因此高速铁路设计时,在条件允许的情况下,曲线半径越大越好;

(2)曲线半径越大,满足旅客乘坐舒适度要求的运行速度区间越大,如半径 12 000 m 时,245~370 km/h 速度区间均满足优秀条件,而半径 5 500 m 时,仅 250~310 km/h 速度区间均满足优秀条件,速度跨度仅为 12 000 m 条件下的 45%;(3)运行速度小于满足旅客

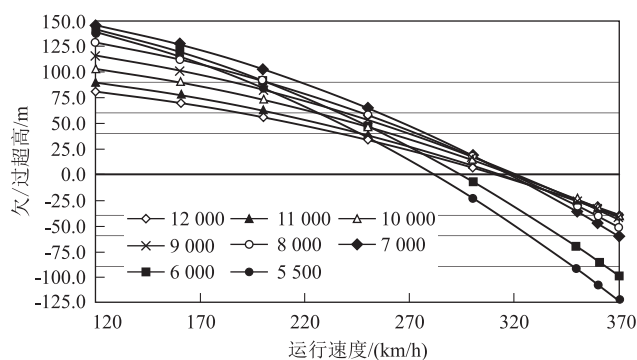


图2 欠/过超高与曲线半径、运行速度关系曲线图

乘坐舒适度要求最小运行速度条件时,均为过超高,且过超高值与曲线半径大小成反比,类似,运行速度大于满足旅客乘坐舒适度要求最大运行速度条件时,均为欠超高,且欠超高值与曲线半径大小成反比;(4)当线路参数不变的情况下,曲线半径越大,只考虑旅客乘坐舒适度情况时,未来可提速空间越大。

3.2 车体横向加速度验算

以设计时速 350 km/h 高速铁路设计为依据,根据式(3)可知,车体横向加速度仅与运行速度、曲线半径、钢轨中心距、设计超高有关,与缓和曲线形式无关,根据式(3)计算不同类型缓和曲线车体横向加速度与曲线半径、运行速度关系,结果如图3所示。

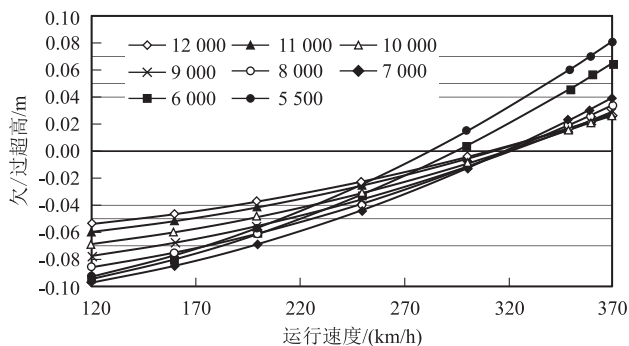


图3 车体横向加速度与曲线半径、运行速度关系曲线图

由图3可知:(1)曲线半径增大,曲线趋于平缓,车体横向加速度受速度影响减小,因此,在高速铁路设计时,在条件允许的情况下,曲线半径越大越好;(2)在此速度及曲线半径范围内,均能满足旅客可承受离心力范围,但是曲线半径越大,满足旅客乘坐舒适度要求的运行速度区间越大,如半径 12 000 m 时,190 ~ 400 km/h 速度区间可使旅客在经过曲线段时无明显感觉,而半径 5 500 m 时,仅 230 ~ 330 km/h 速度区间可使旅客在经过曲线段时无明显感觉,速度跨度仅为 12 000 m 条件下的 47.6%;(3)当线路参数不变的情

况下,曲线半径越大,只考虑旅客乘坐舒适度情况时,未来可提速空间越大。

3.3 车体横向加速度时变率验算

以设计速度 350 km/h 高速铁路设计为依据,根据式(5)、式(6)可知,车体横向加速度时变率与缓和曲线形式、列车加减速产生的纵向加速度、运行速度、曲线半径、钢轨中心距、设计超高有关。根据式(5)、式(6)计算不同类型缓和曲线匀速条件下车体横向加速度时变率最大值与曲线半径、运行速度关系,考虑到舒适程度,假定高速铁路纵向加速度为定值,本处取 $a_l = 0.55 \text{ m/s}^2$ (约 3 min 从静止加速至 350 km/h),结果如图4所示。

由图4可知:(1)同一类缓和曲线,变速运行时,加速度越大,车体横向加速度时变率越大,且曲线半径越小时,增加幅度越大;(2)速度变化时,三次抛物曲线车体横向加速度均处于良好的舒适度条件下;(3)三次抛物曲线在运行速度为 300 km/h 时,舒适度最优;(4)除三次抛物曲线外,其他三类曲线车体横向加速度仅在低速状态满足舒适度条件,常速运行通过曲线时,均有不同程度不舒适感,以五次曲线最为严重,且曲线半径越小,不舒适感越显著。

4 结论

通过对不同缓和曲线线型进行分析,在确定设计标准的基础上,计算不同曲线半径、运行速度、缓和曲线类型对旅客乘车舒适性的影响,得出以下结论:

(1)加速度时变率相同时,缓和曲线采用三次抛物线时所需缓和曲线长度分别为仅采用半波正弦、一波正弦和五次多项式等情况下的 0.625、0.476 和 0.833 倍。缓和曲线采用三次抛物线因其线型简单,测设及设计及时成熟且简便,可广泛应用。

(2)欠/过超高、车体横向加速度数值仅与运行速度、曲线半径、钢轨中心距、设计超高有关,与缓和曲线形式无关。

(3)曲线半径增大,欠/过超高、车体横向加速度受速度影响减小,因此,在高速铁路设计时,在条件允许的情况下,曲线半径越大越好;满足旅客乘坐舒适度要求的运行最大速度区间为 245 ~ 370 km/h,且曲线半径越小,速度区间减小,如曲线半径从 12 000 m 减小至 5 500 m 时,速度区间跨度从 245 ~ 370 km/h 减小至 250 ~ 310 km/h,减小率 45%;当线路参数不变的情况下,曲线半径越大,只考虑旅客乘坐舒适度情况时,未

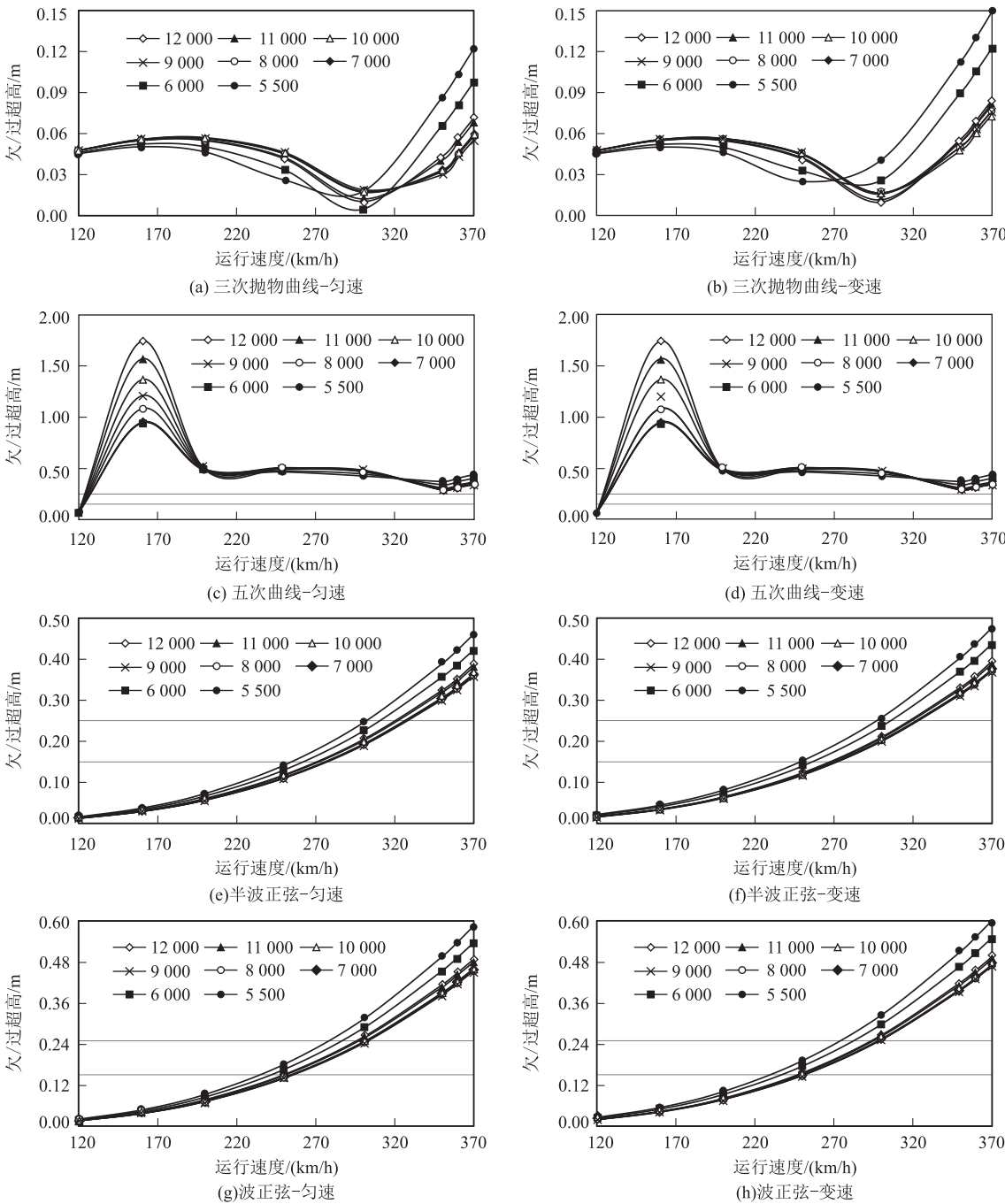


图4 车体横向加速度时变率最大值与曲线半径、运行速度关系曲线

来可提速空间越大。

(4) 同一类缓和曲线,变速运行时,加速度越大,车体横向加速度时变率越大,即旅客乘车舒适性减小,且曲线半径越小时,增加幅度越大;三次抛物线车体横向加速度时变率在不同曲线半径、运行速度情况下适应性最好,在 300 km/h 时,舒适度最优。

参考文献:

[1] LIPIČNIK M. New Form of Road/Railway Transition Curve[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(6): 546-556.

[2] HABIB Z, SAKAI M. Pythagorean Hodograph Quintic Transition between Two Circles with Shape Control [J]. Computer Aided Geometric Design, 2007, 24(5): 252-266.

[3] 吴耀庭. 铁路曲线及其养护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. WU Yaoting. Railway Curve and its Maintenance [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.

[4] 练松良,刘加华,李新国,等. 客运专线缓和曲线参数合理性的试验验证[J]. 铁道学报,2006,28(6):88-92. LIAN Songliang, LIU Jiahua, LI Xinguo, et al. Test Verification of Rationality of Transition Curve Parameters of Dedicated Passenger Traffic Railway Lines [J]. Journal of The China Railway Society, 2006, 28(6):88-92.

(下转第 40 页)

- 132-136.
- [7] 章健华, 李荣飞, 刘赞群. CRTSⅢ型板式无砟轨道自密实混凝土充填层施工技术研究[J]. 中国铁路, 2013, 52(12): 33-37.
ZHANG Jianhua, LI Rongfei, LIU Zhanqun. Study on Construction Technology for Self-compacting Concrete Filling Layer of CRTSⅢ Slab Ballastless Track[J]. Chinese Railways, 2013, 52(12): 33-37.
- [8] 惠宝. 谈桥梁地段 CRTSⅢ型板式无砟轨道施工工艺[J]. 山西建筑, 2015, 41(14): 177-179.
HUI Bao. Discussion on the Construction Technology of Bridge Section CRTSⅢ Plate Ballastless Track[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(14): 177-179.
- [9] 李聪, 马超, 姬付全. CRTSⅢ型板式无砟轨道施工技术应用研究[J]. 交通建设与管理, 2014, 51(18): 205-208.
LI Cong, Ma Chao, JI Fuquan. Application of Construction Technology for CRTSⅢ Slab Ballastless Track[J]. Transportation Construction & Management, 2014, 51(18): 205-208.
- [10] 张克跃. 混凝土结构(上)—混凝土结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHANG Keyue. Concrete Structure (Book I)—Design Principle of Concrete Structure [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [11] 胡长明, 王玉洲, 马继明. 初凝后水泥浆体的弹性模量研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(2): 177-182.
HU Changming, WANG Yuzhou, MA Jiming. Elastic Modulus Research on Initial Setting of Cement Pastes[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2012, 44(2): 177-182.
- [12] 余宗明. 按混凝土强度龄期曲线推算混凝土早期强度[J]. 施工技术, 1994, 23(10): 5-8.
YU Zongming. Estimation of Early Strength of Concrete according to Age Curve of Concrete Strength[J]. Construction Techniques, 1994, 23(10): 5-8.
- [13] 阮静, 叶见曙, 谢发祥, 等. 高强度混凝土水化热的研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 53-56.
RUAN Jing, YE Jianshu, XIE Faxiang, et al. Study on Heat of Hydration on High Strength Concrete [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001, 31(3): 53-56.

(编辑: 赵立红 张红英)

(上接第14页)

- [5] 刘鑫, 刘增杰. 秦沈客运专线高速试验段线路缓和曲线动力学仿真分析[J]. 铁道学报, 2004, 26(1): 82-87.
LIU Xin, LIU Zengjie. Rail/Wheel Dynamics Simulation for the Transition Curve of the High Speed Test Section of the Qinshen Passenger Railway Line [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(1): 82-87.
- [6] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [7] 赵海燕. 高速铁路缓和曲线线型浅析[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(1): 15-17.
ZHAO Haiyan. Analysis of Transition Curved Lines on High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(1): 15-17.
- [8] 张滨. 高速铁路缓和曲线线型探讨[J]. 铁道建筑, 1995, 35(12): 13-17.
ZHANG Bin. Discussion on Transition Curve of High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 1995, 35(12): 13-17.
- [9] 周宪忠. 关于我国高速铁路缓和曲线的探讨[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 69-74.
ZHOU Xianzhong. A Discussion on China's Transition Curve on High Speed Railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(1): 69-74.
- [10] 朱文升. 4-3-4型与3次改善型缓和曲线理论上的主要特征及其差异[J]. 中国铁道科学, 1997, 18(2): 36-45.
ZHU Wensheng. The Main Features and the Differences between Transition Curves of 4-3-4 Shape and 3 Power Improved Shape [J]. China Railway Science, 1997, 18(2): 36-45.
- [11] 李木松. 高速铁路缓和曲线线型及其行车动力特性对比分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2010.
LI Musong. Comparison and Analysis on the Types of the High-speed Railway Transition Curves and Vehicle Dynamic Behavior [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2010.
- [12] TB/T 2360-1993 铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准[S].
TB/T 2360-1993 Test Method and Evaluation Standard for Dynamic Performance of Railway Locomotives [S].
- [13] 95J01-L 高速试验列车动力车强度及动力学性能规范[S].
95J01-L Specification for Strength of Motor Car and Dynamics Performance of High Speed Test Train [S].
- [14] 李向国, 李木松, 卜建清, 等. 2种铁路缓和曲线线型力学性能对比分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 1-6.
LI Xiangguo, LI Musong, BU Jianqing, et al. Comparative Analysis on the Linetype Mechanical Performances of Two Railway Transition Curves [J]. China Railway Science, 2009, 30(6): 1-6.
- [15] TB 10098-2017 铁路线路设计规范[S].
TB 10098-2017 Code for Design of Railway Line [S].

(编辑: 苏玲梅 白雪)