

文章编号: 1674—8247(2018)03—0012—06

高速铁路坡段长度研究

蒋登伟¹ 谢毅¹ 易思蓉² 林晓龙¹ 陈文豪¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘要:坡段长度是高速铁路重要的技术参数之一,影响到高速铁路的安全性和舒适性。本文通过理论分析、动力仿真及对比分析国内外取值等方法,从不同工况下的受力情况、列车运行的平稳性、经济适用性等方面分析研究,提出最小坡段长度应不小于450 m,且不同坡度对应最小坡段长度宜根据竖曲线半径和相邻坡度代数差予以计算。最后对最大坡段长度予以研究,并建议最大坡度为12‰时,最大坡段长度不受限制;最大坡度为15‰时,最大坡度地段的坡段长度不宜大于9 km;最大坡度为20‰时,最大坡度地段的坡段长度不宜大于5 km。

关键词:高速铁路; 坡段长度; 研究

中图分类号: U211 **文献标志码:** A

Study on the Length of Slope Section of High-speed Railway

JIANG Dengwei¹ XIE yi¹ YI Sirong² LIN Xiaolong¹ CHEN Wenhao¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The slope length is one of the important technical parameters of the high speed railway, which affects the safety and comfort of the high speed railway. In this paper, through theoretical analysis, dynamic simulation and comparative analysis of domestic and international value methods, on the basis of stress conditions under different working conditions, the train running stability and economic applicability analysis and research, the minimum slope length should not be less than 450 m, and the minimum slope length corresponding to different slopes should be calculated according to the vertical curve radius and the adjacent slope algebraic difference. Finally, the maximum slope length is studied, and it is suggested when the maximum slope is 12‰, the maximum slope length is not restricted; when the maximum slope is 15‰, the maximum slope length should not be more than 9 km; when the maximum slope is 20‰, the maximum slope length should not be more than 5 km.

Key words: high-speed railway; slope length; study

坡段长度^[1]是铁路线路的主要技术参数之一。为了更好地适应地形起伏,减少路基、桥隧等工程数量,需采用较短的坡段长度;但较长的纵断面坡段长度,又可以促进列车运行的平稳性。因此合理的坡段长度取值应为两者的统一,既满足列车运行平稳性,又

尽可能节约工程投资。

目前,国内外对该参数的研究,更多基于经验数据和以往对中低速铁路的研究,缺乏对高速铁路全面而系统的研究。本文通过理论分析、对比分析国内外数据及仿真分析的方法,对该参数进行了系统研究。对

收稿日期:2017-11-13

作者简介:蒋登伟(1974-),男,高级工程师。

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2016G002-A)

引文格式:蒋登伟,谢毅,易思蓉,等. 高速铁路坡段长度研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(3):12-17.

JIANG Dengwei, XIE Yi, YI Sirong, et al. Study on the Length of Slope Section of High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(3):12-17.

于最小坡段长度,我国颁布的 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》中,对不同条件下的取值做了统一规定;本文中则首次提出,在不同的坡度代数差、竖曲线半径等条件下,以保证最小取值为前提,应针对不同条件分别进行计算得出该数值,使最小坡段长度能更好地适应不同的设计需求。最反文中计算确定了最大坡度所对应的最大坡段长度。

1 最小坡段长度

列车车钩纵向受力和列车行驶平稳性是最小坡段长度的主要影响因素^[2]。

1.1 车钩纵向受力条件要求的最小坡段长度

客货共线普速铁路,当列车通过变坡点时,部分车辆受变坡点前后不同列车运行阻力及车钩间存在游间的影响而产生局部加速度,进而行车平稳受到影响,且车辆间产生冲击作用,增大了列车纵向力。因此坡段长度要保证在这种不利情况下不会断钩。

高速铁路上运行动车组,列车采用密接式车钩,国内外相关研究与实践表明,高速铁路的最小坡段长度不受车钩强度条件限制。

为了探明不同纵断面条件在牵引和紧急制动两种工况下对动车组纵向力的影响情况,本次研究中对 CRH380A 动车组在各种组合的纵断面上运行时,坡段长度对列车纵向受力状态进行了仿真分析,对列车通过各种最大坡度地段的凸形纵断面坡顶和凹形纵断面坡底进行仿真计算^[3-4]。列车在牵引工况下的最小坡段长度对列车纵向力的影响关系如图 1 所示;紧急制动工况下最小坡段长度对列车纵向力的影响关系如图 2 所示。

仿真计算数据表明:

(1) 紧急制动工况下的列车纵向力大于牵引工况下的值。无论是牵引工况还是紧急制动工况,列车通过变坡点时的纵向力均小于 0.5 MN 评价标准值。

(2) 牵引工况下,随着坡段长度的增加,最大车钩力由波动逐渐趋于稳定。一般情况下,随牵引初速度的增大,最大车钩力减小,牵引初速度越低,最大车钩力越快趋于稳定。在分坡平段长度不小于 600 m 时,最大车钩力基本趋于稳定,此时分坡平段长度对最大车钩力影响很小。

(3) 紧急制动工况下,车钩力变化规律与牵引工况下相似,列车制动初速度越小,车钩力越容易趋于稳定。在紧急制动时,由于各个车辆的制动缸压力上升很快,作用到各个车辆上的车钩力突然增大,因此与牵引工况相比,其车钩力明显增大,且波动更大。

(4) 当制动初速度分别为 40 km/h、80 km/h、

120 km/h,且坡段长度不小于 600 m 时,最大车钩力基本趋于稳定;当制动初速度为 250 km/h、300 km/h、350 km/h,且坡段长度大于或等于 1 200 m 时,波动减弱,最大车钩力波动趋于稳定,波动变化在 ± 10 kN 左右,此时分坡平段长度对最大车钩力影响很小。

因此,从纵向受力的角度考虑,高速客运专线的最小坡段长度大于 1 200 m 后,坡段长度的变化对列车纵向力的影响可忽略不计。

1.2 列车运行平稳条件要求的最小坡段长度

1.2.1 计算原理

(1) 保证同坡段两端竖曲线不重叠

为保证列车运行平稳性,同坡段两端所设的竖曲线不应在坡段中间重叠,如图 3 所示,因此要求最小坡段长度满足:

$$l_{\min} \geq \frac{R_{sh1} \cdot \Delta i_{\max}}{2} + \frac{R_{sh2} \cdot \Delta i_{\max}}{2} \quad (1)$$

式中: l_{\min} ——最小坡段长度(m);

Δi_{\max} ——相邻坡段最大坡度差(‰);

R_{sh} ——竖曲线半径(m)。

(2) 竖曲线上产生的车辆垂向振动不影响旅客舒适度

列车经过坡段两端竖曲线时,竖曲线上产生离心加速度,同时在线形变化点前后由于线路曲率的变化而产生一定的振动激扰,激扰振动的相位差(即两个激扰振动产生的时间差)受列车运行速度和竖曲线间直坡段长度控制,其激扰振动是否会产生叠加则与列车振动衰减特性有关。

理论上列车垂向运行平稳、旅客乘坐舒适所要求的夹直坡段最小长度由“列车在竖曲线出入口产生的振动不致叠加”确定,它与列车振动、衰减特性及列车运行速度有关。根据实验结果,列车在竖曲线出入口产生的振动通常在半个周期前后达到反向最大,在一个半到两个周期内基本衰减完。假设车辆振动的周期为 $T(\text{sec})$,则竖曲线间的夹直坡段最小长度如图 4 所示:

$$L_j \geq \frac{n \cdot T \cdot V_{\max}}{3.6} + L_q \quad (2)$$

式中: L_j ——夹直坡段长度(m);

n ——转向架振动消失所经历的周期数,根据试验结果,一般取 1.0~2.0;

T ——车辆振动衰减时间(s),可根据相关试验结果或仿真分析确定;

V_{\max} ——旅客列车路段设计速度(km/h);

L_q ——客车全轴距。

考虑到车辆并非刚体,可取 $L_q = 0$;取 $n = 1$,则

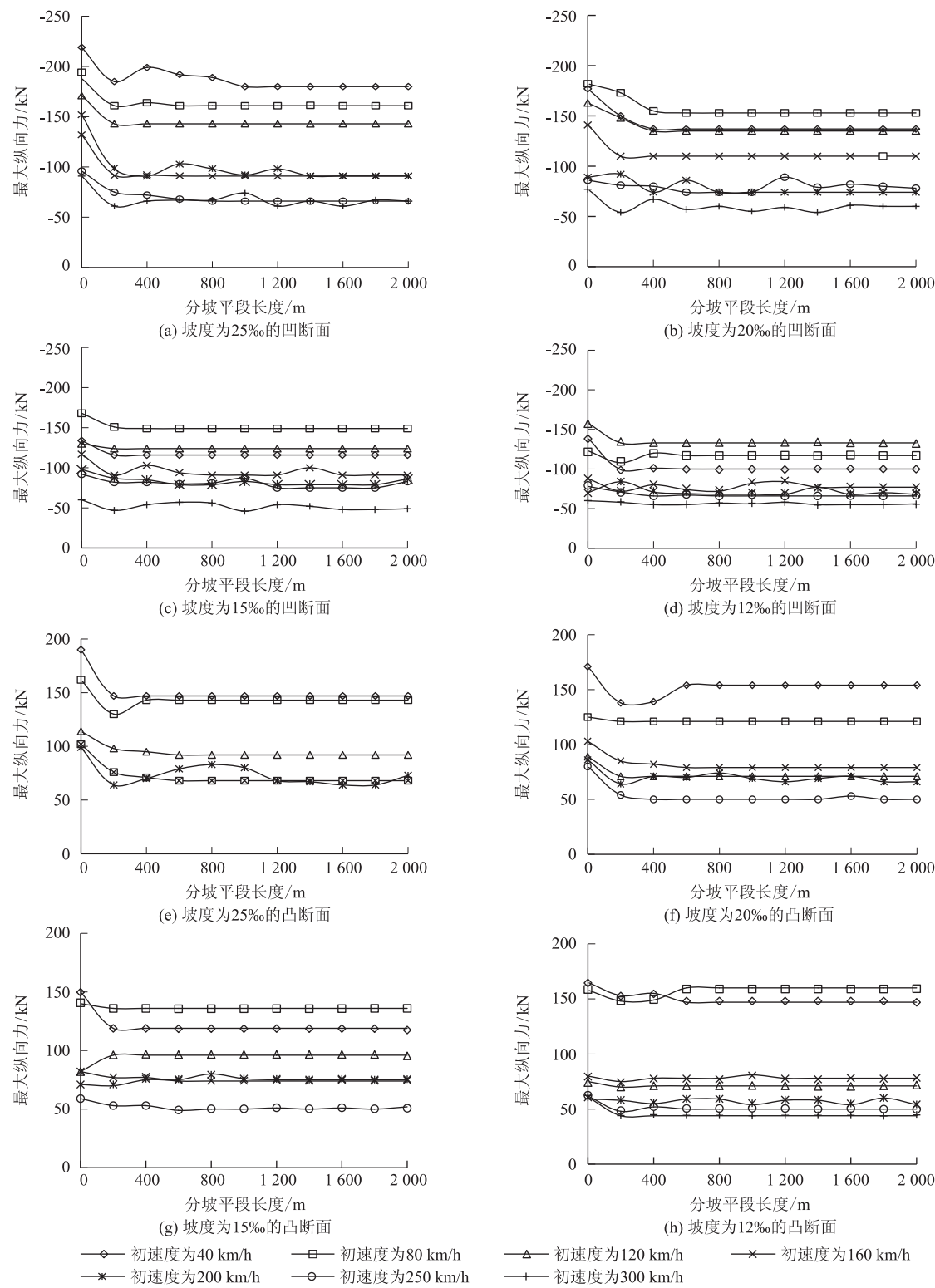


图1 牵引工况下最大纵向力随坡段长度关系变化规律图

式(2)可简化为:

$$L_j \geq \frac{T \cdot V_{\max}}{3.6}$$

(3)

1.2.2 车辆振动衰减时间仿真计算

对于两竖曲线间夹坡段长度,应保证车辆通过竖曲线产生的振动消失后再进入下一竖曲线。通过动力

学仿真分析,并计算出高速列车出竖曲线后的振动衰减时间。通过动力学仿真分析,得出高速列车通过竖曲线和出竖曲线后的振动衰减过程如图5、图6所示。

高速列车以350 km/h速度经过R=15 000~25 000 m竖曲线后的振动衰减基本完成需要的时间大

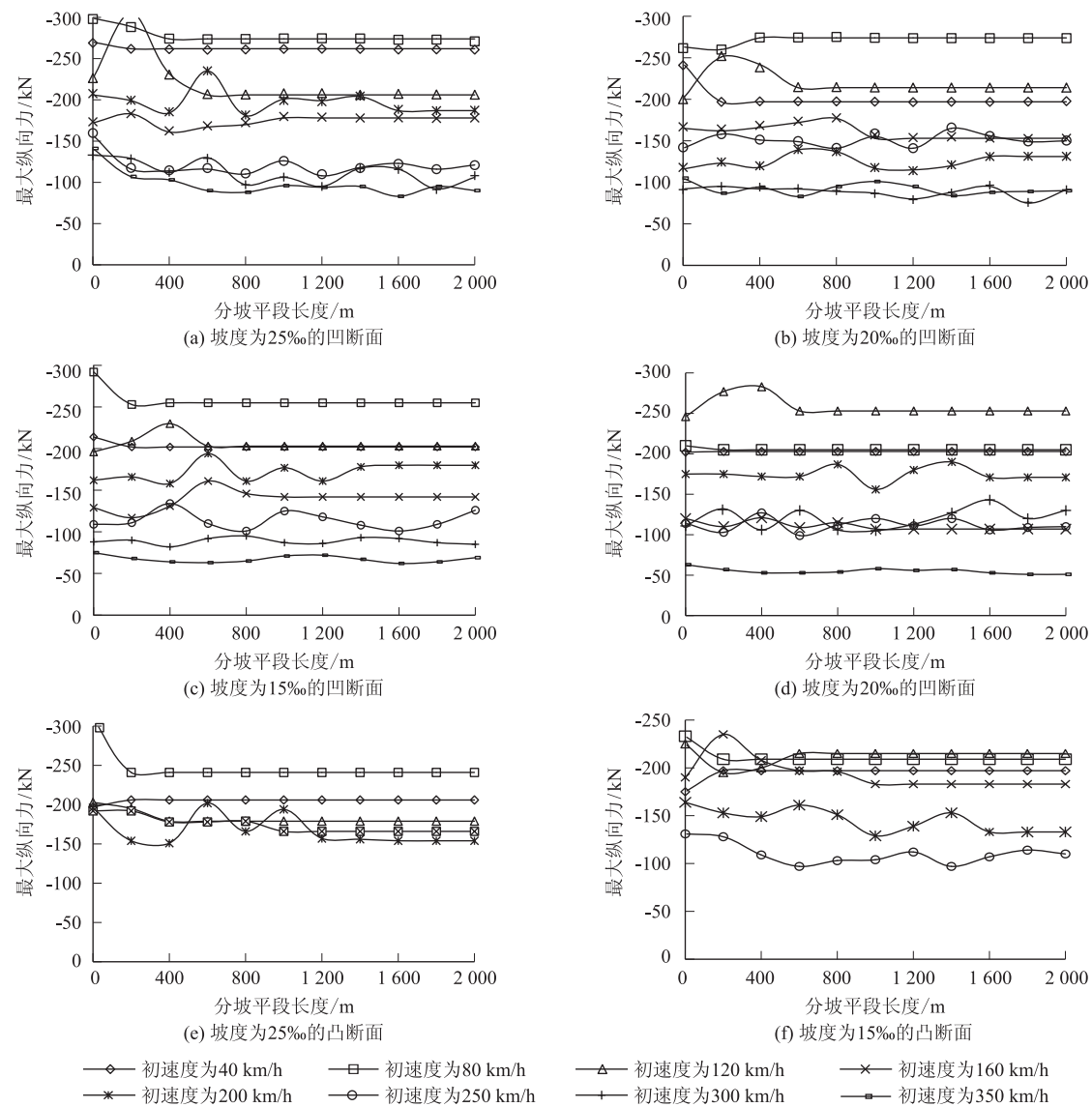


图2 紧急制动工况下最大纵向力随坡段长度关系变化规律图

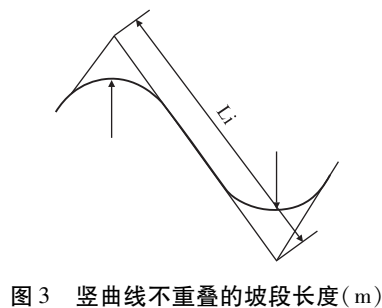


图3 竖曲线不重叠的坡段长度(m)

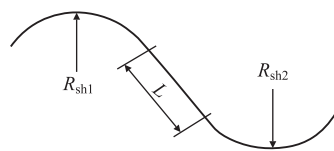


图4 竖曲线间夹坡段长度(m)

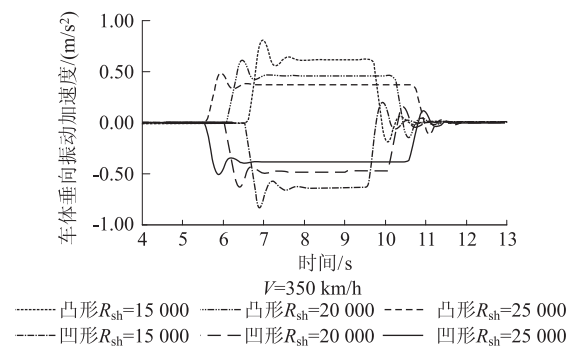


图5 不同竖曲线半径下的振动衰减过程

约为1.25~1.65 s,根据式(3)得出相应夹坡段长度为120~160 m,换算长度为0.35~0.46 V_{\max} 。

1.2.3 国内外研究与工程实践

对于两竖曲线间夹坡段长度,德国、日本两国的高

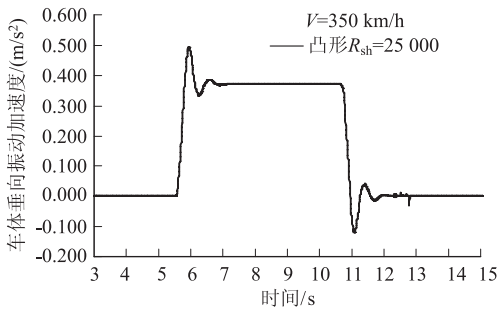


图6 高速列车出竖曲线时的时程曲线

速铁路规范无具体规定;法国高速铁路要求两竖曲线间夹坡段长度不得小于 $0.4V_{\max}$ 。

根据我国高速铁路的实际纵断面设计情况可知,相邻两变坡点坡度代数差大于 $24‰$ 的数量为少数,大部分情况下最小坡段长度采用600 m能够满足要求。

1.2.4 保证车辆振动不叠加的最小坡段长度

根据仿真计算分析,并参考国内外工程经验,满足车辆振动不叠加的最小坡段长度^[3]应当满足:

$$l_{\min} \geq \frac{R_{sh1} \cdot \Delta i_{\max}}{2} + \frac{R_{sh2} \cdot \Delta i_{\max}}{2} + l_j \tag{4}$$

式中: l_{\min} ——最小坡段长度(m);
 l_j ——最小夹坡段长度(m);
 Δi_{\max} ——相邻坡段最大坡度差(‰);
 R_{sh} ——竖曲线半径(m)。

不同速度高速铁路最小夹坡段长度可按下式计算确定,或按表1取值:

$$l_j = \begin{cases} 0.45V_{\max} & \text{一般} \\ 0.4V_{\max} & \text{困难} \end{cases} \tag{5}$$

表1 夹坡段最小长度

设计速度/(km/h)		>350	300	200<V≤250	200
夹坡段最小长度/m	一般工程条件	160	140	115	90
	困难工程条件	140	120	100	80

根据以上要求,则350 km/h 高速铁路的最小坡段长度理论计算值如表2(竖曲线半径按25 000 m^[5]、夹坡段长度按150 m 计算)所示。

表2 相邻变坡点坡度代数差对应最小坡段长度

相邻两变坡点的坡度代数差/‰	最小坡段长度/m		
	夹坡段长	2倍竖曲线切线长	坡段长度
6	150	75	225
12	150	150	300
24	150	300	450
30	150	375	525
36	150	450	600
40	150	500	750

由表2可知,高速铁路最小坡段长度由夹坡段长度和竖曲线切线长两部分组成。夹坡段长度受列车速度大小影响,对给定设计速度目标值的线路,其值为常数,可按最不利条件统一规定技术标准。竖曲线切线长部分受变坡点坡度代数差和竖曲线半径的设置条件而定。

由于高速铁路坡度代数差不受列车质量的限制,因此可设置较大的坡度代数差。另一方面,高速铁路舒适性要求较大的竖曲线半径,且不同变坡点处,竖曲线半径可能采用不同的值,因而,竖曲线切线长在不同变坡点处差别很大。因此,高速铁路的坡段长度技术标准,不应统一限制最小坡段长度,应在满足夹坡段最小长度的前提下,结合变坡点坡度代数差和竖曲线半径具体计算确定。

1.3 旅客列车不同时跨两个变坡点条件要求的坡段长度

为了提高旅客列车运行平稳性,应使旅客列车不同时跨两个变坡点,以免列车过变坡点的附加加速度叠加而影响旅客舒适,为此,坡段长度应大于远期旅客列车长度。考虑我国铁路发展趋势,运行速度大于160 km/h 的旅客列车将逐渐采用动车组,因此,动车组长度起控制作用。例如,旅客列车按16 辆编组,动车平均长度取25.0 m,并考虑列车两端15 m 的安全距离,则坡段长度宜大于450 m。

1.4 最小坡段长度对客运专线工程经济的影响

本次研究以成渝客运专线为依托,在成渝客运专线的既定平面上,选择不同的最小坡段长度进行纵断面设计,得出了不同纵断面方案,并计算了各个纵断面方案主要工程费用,验证和分析了最小坡段长度对工程投资的影响^[6]。

(1)随着最小坡段长度的增加,路基地段范围减少,土石方量减少,桥梁总长占线路总长比重显著增加,桥梁工程费用增加。例如:与最小坡段长度为2 000 m时相比,最小坡段长度为600 m 时土石方量费用减少18.5%、桥梁工程费用增加31.1%。

(2)随着最小坡段长度的增加,隧道长度变化不大,隧道工程费用呈水平波动状态,平均波动幅度约±5%。所以,最小坡段长度对隧道工程费用影响不大。

(3)由上述分析可知:最小坡段长度增加,主要工程费用也增加。根据实际工程设计数据进行一元线性回归分析,得出最小坡段长度 x 与主要工程费用 y 之间的关系模型为:

$$y = 0.015\ 3x + 89.127 \tag{6}$$

(4)综上所述,随着最小坡段长度的减小,工程投

资降幅明显。最小坡段长度为 600 m 时的主要工程费用较最小坡段长度为 2 000 m 时的主要工程费用降低约 17.89%。因此,为降低工程投资,可适当减小最小坡段长度,从而降低主要工程数量,节约工程费用。

1.5 最小坡段长度取值

两变坡点之间的坡段长度由两段竖曲线切线长和中间夹坡段长度两部分组成^[7]。由于高速铁路的竖曲线半径一般不是定值,坡度代数差又不受限制,因此其切线长部分很难确定统一标准。对高速铁路,更加科学合理方法是拟定统一的最小夹坡段长度,坡段长度根据坡度代数差、竖曲线半径及最小夹坡段长度计算确定。为此高速铁路的坡段长度^[8]应满足式(7)的要求,且计算长度不小于 450 m。

$$l_{min} \geq \frac{R_{sh1} \cdot \Delta i_{max}}{2\,000} + \frac{R_{sh2} \cdot \Delta i_{max}}{2\,000} + l_{jmin} \tag{7}$$

式中: l_{jmin} ——竖曲线之间的夹最小夹坡段长度,其值按下式计算:

$$l_{jmin} = \begin{cases} 0.45V_{max} & \text{一般} \\ 0.4V_{max} & \text{困难} \end{cases} \tag{8}$$

或按设计速度取表 1 中的相应值。

从列车运行品质上看,当凸形纵断面位于曲线时,由于凸形变坡点竖曲线产生向上离心力而相应加大了水平未被平衡的加速度,相对使欠超高增大。在直线上,若坡段太短,导致列车频繁地起伏运行,导致竖向离心加速度变化率增大,也可能影响旅客舒适性。因此,高速铁路纵断面坡段长度的设计,应综合考虑工程量和旅客舒适性。在工程量相差不大时,宜尽量设计为较长的坡段。

2 最大坡段长度

对于高速铁路,为了防止高速列车的牵引电机发生过热现象,当纵断面采用最大坡度时,宜限制最大坡度地段的坡段长度。

2.1 国外研究与工程实践

日本东海道新干线根据其停车后再起动主电机温升控制在 120℃ 以内的条件规定:最大坡度为 15‰,其坡段长度可达到 7 km;坡段长度短于 2.5 km 时,允许采用 18‰的坡度;坡段长度不超过 1 km 时,坡度可用到 20‰等。日本山阳新干线规定:在 10 km 路段内平均坡度不大于 12‰时,最大坡度可采用 15‰。

法国规定:对于从最小值到 3 km 坡段长度,坡度不应超过 18‰;对于 3 ~ 15 km 坡段长度,坡度逐步从 18‰降至 15‰;对于大于 15 km 坡段长度,最大坡度不超过 15‰,并建议在实际应用中,上述坡度再降 2‰;对于坡度大于 25‰的线路,建议在项目中考虑平

均坡度 25‰,最大坡长 4 km。

欧盟 2001 年底编制了泛欧高速铁路互连互通技术标准。在坡段方面规定,10 km 范围内,坡度 ≤ 25‰;6 km 范围内,坡度 ≤ 35‰;40‰的坡度作为个案处理。

2.2 坡段长度仿真分析

最大坡道上坡段长度可在一定初始速度下,以不低于设计速度 90% 运行的坡段长度作为设计最大值,已确保运营速度在一定范围内,充分、合理地发挥基础设施的功能。对最高速度为 350 km/h、200 km/h 的动车组列车进行 15‰、20‰、25‰ 和 30‰的运行模拟,结果如表 3 所示。由上述高速列车电动车组性能分析数据可以看出,在 15‰ ~ 30‰不同坡道上列车的运行速度可以达到设计速度目标值。

表 3 在最大坡度上运行一定长度后的末速度

最高速度/(km/h)	350				200		
初始速度/(km/h)	340				180		
最大坡度/‰	15	20	25	30	20	25	30
坡段长度/km	末速度/(km/h)						
1	337	335	333	332	179	175	172
2	334	331	328	324	177	171	164
3	332	327	322	317	175	166	158
4	330	323	317	310	174	163	151
5	328	320	312	303	173	160	146
6	326	317	307	297	172	157	142
7	324	313	302	291	171	154	138
8	322	310	298	285	170	152	135
9	321	308	294	280	169	151	133
10	319	305	290	275	169	149	131
11	318	302	286	270	168	148	129
12	316	300	283	266	168	147	128
13	315	298	280	261	167	146	127
14	314	296	277	258	167	145	126
15	312	293	274	254	167	145	126
16	311	292	272	251	166	144	125
17	310	290	269	248	166	144	125
18	309	288	267	245	166	144	125
19	308	287	265	242	166	144	125
20	308	285	263	240	166	143	125

2.3 最大坡度地段最大坡段长度规定

依据仿真计算结果,并参考国内外研究与实践,建议当采用最大坡度为 12‰时,最大坡段长度不受限制;当采用最大坡度为 15‰时,最大坡度地段的坡段长度不宜大于 9 km;当采用 20‰的坡度时,最大坡度地段的坡段长度不宜大于 5 km。

3 结束语

本文在坡段长度研究中,采用理论分析、对国内外取值的比较分析以及仿真分析的方法,从不同的角度对最小坡段长度及最大坡度对应最大坡段长度的原

(下转第 22 页)

4 结论

(1) 全长粘结型锚杆是通过与岩土体形成复合体起到对岩土体的加固和约束作用。锚杆设计应根据岩土体的破坏形式确定计算方法,根据潜在破裂面的位置确定受力大小。

(2) 锚杆几何尺寸计算中,锚杆钢筋强度、锚杆与锚固体间粘结强度宜采用强度设计值,并应考虑“锚固体与锚固地层间平均粘结应力随锚固段长度增加而减小”的应力分布规律。

(3) 锚杆基本试验对设计参数的验证中,最主要的是验证锚固体与岩土层间的粘结强度,因此,最大试验荷载预估值、试验锚杆直径及长度间应满足相应条件,使加载过程中发生锚固体与锚固地层间的破坏,从而确定二者间的粘结强度,达到指导和优化设计的目的。

参考文献:

- [1] 程良奎. 岩土锚固研究与新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3803-3811.
CHENG Liangkui. Research and New Progress in Ground Anchorage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3803-3811.
- [2] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版

社, 2011.

LI Haiguang. Design and Project Cases of New Retaining Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

- [3] GB 50086-2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].
GB 50086-2015 Technical Code for Engineering of Ground Anchorages and Shotcrete Support [S].
- [4] CECS 22-2005 岩土锚杆(索)技术规程[S].
CECS 22-2005 Technical Specification for Ground Anchors [S].
- [5] GB 50330-2013 建筑边坡工程技术规范[S].
GB 50330-2013 Technical Code for Building Slope Engineering [S].
- [6] JGJ/T 401-2017 锚杆检测与监测技术规程[S].
JGJ/T 401-2017 Technical Specification for Testing & Monitoring of Anchors [S].
- [7] 韩军, 陈强, 刘元坤, 等. 锚杆灌浆体与岩(土)体间的粘结强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3482-3486.
HAN Jun, CHEN Qiang, LIU Yuankun, et al. Bond Strength between Anchor Grout and Rock or Soil Masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3482-3486.
- [8] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339-341.
YOU Chun'an. Mechanical Analysis on Wholly Grouted Anchor [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 339-341.

(编辑: 刘会娟 苏玲梅)

(上接第17页)

理、取值等进行了研究,提出最小坡段长度取值应在满足基本要求(长度不小于450 m)的前提下根据纵断面具体条件计算获得,并分析得出最大坡度对应最大坡段长度取值。

参考文献:

- [1] 易思蓉. 铁路选线设计(第四版)[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.
YI Sirong. Principles of Railway Location and Design (Fourth Edition) [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2017.
- [2] 易思蓉. 铁道工程(第三版)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
YI Sirong. Railway Engineering (Third Edition) [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- [3] 朱颖, 易思蓉. 高速铁路曲线参数动力学分析理论与方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
ZHU Ying, YI Sirong. Theory and Method for Dynamic Analysis of Curve Parameters of High Speed Railway [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [4] 朱颖, 吕希奎, 许佑顶. 动车组牵引计算与仿真系统[M]. 北京: 中

国铁道出版社, 2015.

ZHU Ying, LV Xikui, XU Youding. Traction Calculation and Simulation System of EMU [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.

- [5] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 High Speed Railway Design Specification [S].
- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司. 高速铁路建造技术(设计卷)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. High Speed Railway Construction Technology (Design Volume) [M]. Beijing: China Railway Press, 2015.
- [7] 白宝英. 高速铁路线路纵断面设计标准及其应用研究[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(7): 4-7.
BAI Baoying. Study on the Design Standard and Application of Longitudinal Section of High Speed Railway Line [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(7): 4-7.
- [8] 郝瀛. 铁道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
HAO Ying. Railway Engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000.

(编辑: 车晓娟 苏玲梅)