

文章编号: 1674—8247(2023)03—0027—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.03.006

电气化铁路受电弓动态包络线研究

黄鑫 赖馨 王彦哲 杨洋 冯原 杨佳

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:良好的弓网系统动态特性是确保电气化铁路可靠运营的关键,受电弓的横向偏移量和上下抬升量是影响弓网耦合安全性的重要参数。本文通过对比分析国内外标准,详细介绍了动态包络线的计算方法,调研收集了国内外铁路动态包络线实测数据,通过弓网系统仿真探讨了影响受电弓动态包络线范围的决定性参数。研究成果可为电气化铁路受电弓动态包络线标准制定提供系统思路。

关键词:受电弓-接触网系统;动态包络线;横向偏移量;上下抬升量;定位器状态

中图分类号: TU264.3⁺4

文献标识码: A

A Study on Kinematic Envelope of Pantograph for Electrified Railways

HUANG Xin LAI Xin WANG Yanzhe YANG Yang FENG Yuan YANG Jia

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

Abstract: Good kinematic characteristics of the pantograph-OCS system are the key to ensuring the reliable operation of an electrified railway, and the lateral offset and uplift of pantograph are important parameters affecting the safety of pantograph-OCS coupling. Based on the comparative analysis of standards at home and abroad, in this paper, the calculation method of kinematic envelope is introduced in detail, the measured data of kinematic envelopes of railways at home and abroad are investigated and collected, and the decisive parameters affecting the range of kinematic envelope of pantograph are discussed through pantograph-OCS system simulation. The findings of this paper can provide systematic ideas for the formulation of standards for kinematic envelopes of pantographs for electrified railways.

Key words: pantograph-OCS system; kinematic envelope; lateral offset; uplift; positioner status

电力机车通过安装在车顶的受电弓与接触网滑动接触取得电能,当电力机车运行时,受电弓在水平方向和垂直方向不停运动。受电弓动态包络线指运行状态中的受电弓在垂直方向的上下振动及左右摆动可能达到的最大轮廓线。列车行驶过程中无论接触网导线发生多大偏移,都必须始终处于动态包络线范围内,且动态包络线范围内不得有任何影响受电弓运行的接触网零部件。

本文对比分析国内外受电弓动态包络线的取值标准,介绍动态包络线的计算方法,调研统计国内运

营电气化铁路的动态包络线数据,探讨影响受电弓动态包络线取值的决定性参数和保证弓网良好运行状态的措施及对策。研究成果可为更高速度电气化铁路受电弓动态包络线的计算和标准制定提供借鉴和思路。

1 受电弓动态包络线计算及标准比较分析

列车高速运行时,受电弓-接触网系统相互作用构成耦合振动系统,弓网耦合性能是评价弓网系统性

收稿日期:2022-03-08

作者简介:黄鑫(1987-),女,高级工程师。

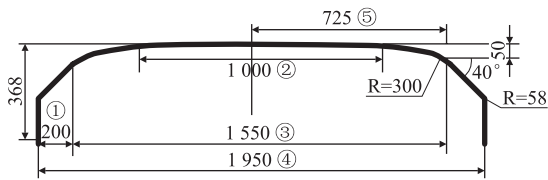
引文格式:黄鑫,赖馨,王彦哲,等. 电气化铁路受电弓动态包络线研究[J]. 高速铁路技术,2023,14(3):27-31.

HUANG Xin, LAI Xin, WANG Yanzhe, et al. A Study on Kinematic Envelope of Pantograph for Electrified Railways [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3):27-31.

能的重要指标。因此,准确计算动态包络线数值范围不仅是车辆设计、制造、运用过程中的根本依据,更是电气化铁路安全运行的重要保障。

1.1 受电弓动态包络线横向偏移量计算

中国高速铁路一般采用宽 1 950 mm 的标准类型受电弓,如图 1 所示。



注:①绝缘材料制成的弓角(投影长度最大 200 mm);
②滑板长度,最小为 1 000 mm;
③弓头的导电范围 1 550 mm;
④弓头长度 1 950 mm;
⑤弓头工作区域 1 450 mm

图 1 弓头长度 1 950 mm 受电弓轮廓图(mm)

参照 TB/T 3271 - 2011《轨道交通受流系统受电弓与接触网相互作用准则》计算侧向风作用下容许的接触线偏移量,接触线高度取 5 300 mm,受电弓弓头长度取 1 950 mm,接触线偏移量取 0.55 m 或(1.7 - L2)m 中两者的较小值。

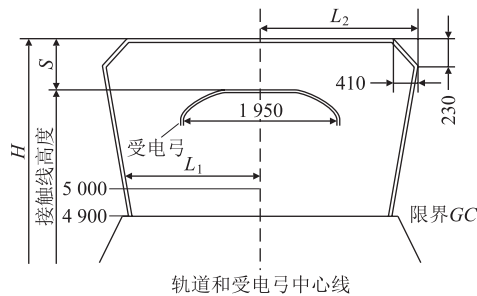


图 2 1 950 mm 受电弓弓头在线路上通过的空间尺寸图(mm)

受电弓横向摆动极限位置计算如式(1)所示。

$$L_2 = b_w + e_p + \frac{2.5}{R} + \frac{l - 1.435}{2} + 0.15 \times (C_1 - 0.066)(H - 0.5) + T_1 + \frac{0.015 \times H}{S_r}$$

(1)

受电弓最大横向偏移量为:

$$L_{\max} = \frac{L_2 - b_w}{2}$$

(2)

式中: L_1 ——接触导线高度 H 有关;

L_2 ——抬升预留值 S 有关;

CWH ——接触线高度,其中 $H = CWH + S$;

b_w ——受电弓弓头长度;

e_p ——机车车辆特性引起的动态位移,其中

$$e_p = e_{pu} + (H - 5) \times 0.04;$$

e_{pu} ——受电弓在 $H = 5$ m 的位移为 0.11 m;

R ——轨道水平曲线半径;

l ——轨距,我国标准轨距为 1.435 m;

C_1 ——倾斜;

T_1 ——轨道横向位移,其中 $T_1 \leq 0.025$ m;

T_2 ——轨道横向位移,其中 $T_2 = 0.015 \times \frac{H}{S_r}$;

S_r ——轮轨接触点的距离。

接触网最大横向偏移的计算应考虑受电弓相对于轨道中心的运动以及受电弓滑板的工作范围,计算实例中受电弓动态包络线横向偏移量如表 1 所示。

表 1 受电弓动态包络线横向偏移量计算表

欠倾斜系数	抬升预留/m	包络线半宽/ (L_2/m)	横向偏移量/mm
0	0.12	1.131 75	156.75
	0.15	1.132 95	157.95
	0.225	1.135 95	160.95
0.066	0.12	1.180 46	205.46
	0.15	1.181 96	206.96
	0.225	1.185 70	210.70

TB/T 3271 - 2011《轨道交通受流系统受电弓与接触网相互作用准则》中,国外接触线从轨道中心线最大横向偏移量如表 2 所示。

表 2 欧洲交流系统接触网最大横向偏移量表(m)

项目	国家						
	奥地利	瑞士	德国	丹麦	挪威	瑞典	斯洛伐克
接触线标称高度	5.3/5.5/5.75	5.3	5.5	5.5	5.6	5.5	5.5
滑板长度	1.03	0.696	1.03	1.03	1.03	1.0	1.2
弓头最大宽度	0.65	0.6	0.62	0.6	0.65	0.65	0.6
在侧风作用下,接触线从轨道中心线最大横向偏移量	0.55	0.4	0.55	0.385	0.55	0.5	0.55

由表 1 和表 2 可知,在规定的外部环境条件和机械偏差下,为保证列车安全运行,接触线和受电弓之间在水平方向上的位移不得导致接触线偏离受电弓的弓头。在列车运行条件下,接触线应处于受电弓的工作宽度范围内。动态包络线左右横向偏移量取值范围应该考虑受电弓偏离机车车辆的设计位置、机车车辆的左右晃动、轨道偏差以及接触线移动的极限位置值^[1]。

1.2 受电弓动态包络线纵向最大抬升

IEC 62486 - 2017《铁路应用 - 集流系统 - 受电弓和架空线间相互作用的技术标准》、国内标准 TB 10009 - 2016《铁路电力牵引供电设计规范》和 TB 10621 - 2014《高速铁路设计规范》中接触网定位点处的最大抬升量如表 3 和图 3 所示。

表3 欧洲标准和我国标准中规定的接触网定位点抬升量表

设计速度 v /(km/h)	欧标	$v \leq 200$	$v > 200$
	国标	120, 160, 200, 250, 300, 350	250, 300, 350
定位点处接触线自由和不受限制的抬升空间	1. 5·S0(采用限位定位器时); 2. 0·S0(采用不限位定位器时)		

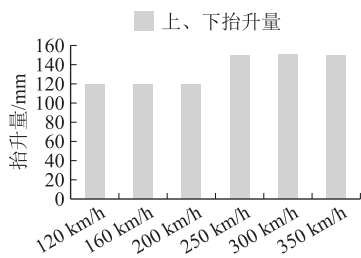


图3 我国不同时速铁路受电弓上下抬升量统计图

TB/T 3271 – 2011《轨道交通受流系统受电弓与接触网相互作用准则》中关于国外弓网系统中定位点接触线抬升允许最大值如表4所示。

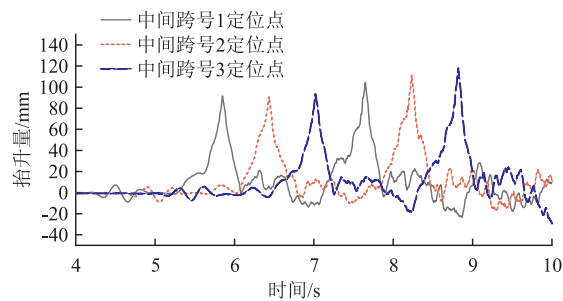
表4 国外铁路标准接触网定位点抬升量表

国家项目	德国	法国	意大利	日本	
速度/(km/h)	≤ 200	≤ 200	< 160	< 200	≥ 200
受电弓型号	DSA350S	CX25	ATR	PS207	PS9037
定位点接触线抬升最大允许值/mm	120	150	120	70	100

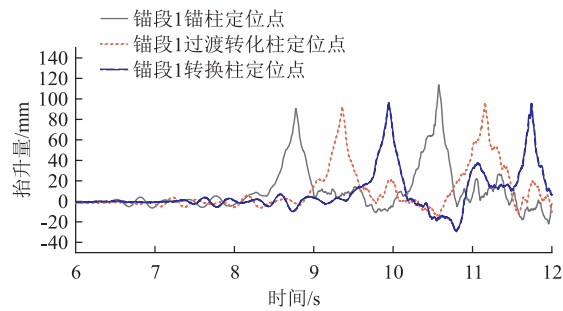
从欧盟技术规范 and 我国铁路技术标准可以看出,采用非限位定位器时定位点处接触线自由不受限的抬升空间为理论计算值或实测值的2倍,采用限位定位器时为1.5倍。我国有关设计规范按照不同速度区段取值,速度越高,动态包络线上下抬升量取值范围越大。不同受电弓选型导致了同一速度等级条件下,动态包络线最大抬升量取值的较大差异。

基于现行铁路有关技术标准,在满足弓网动态接触质量的前提下,通过仿真模拟对比在400 km/h线路速度条件下,CX型受电弓和DSA380受电弓通过时的定位点抬升量,研究探讨不同受电弓类型对动态包络线最大抬升量取值的影响,仿真结果如图4和图5所示。

CX受电弓前弓定位点最大抬升与DSA380接近,但后弓相差较大。CX后弓定位点最大抬升均比DSA380大,中间柱增加17%,关节最大增加21%。可见受电弓选型不同,弓网耦合作用时,对接触网系统定位点最大抬升量影响较大。在接触网系统设计中,需要分析不同线路速度条件下,通过系统仿真确



(a) CX受电弓在中间跨定位点抬升量



(b) CX受电弓在锚段关节定位点抬升量

图4 CX型受电弓在400 km/h时不同位置处抬升量图

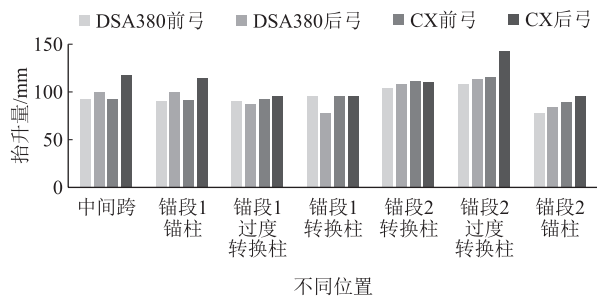


图5 CX受电弓与DSA380受电弓定位点最大抬升值比较图

定与接触网系统匹配的受电弓选型,以期与接触网系统达到最优运行状态。

2 国内、外电气化铁路动态包络线运营现状

2.1 国内电气化动态包络线横向偏移量现状

根据TB 10009 – 2016《铁路电力牵引供电设计规范》要求,我国铁路受电弓动态包络线横向偏移量应符合图6的规定。

成渝客运专线提质增效改造后,不同位置处的受电弓摆动量实测值如图7所示,受电弓动态包络线横向偏移量小于 ± 250 mm,远小于曲线处的规定值 ± 350 mm,符合TB 10009 – 2016《铁路电力牵引供电设计规范》的设计要求。

2.2 国内电气化动态包络线上下抬升量现状

根据TB 10009 – 2016《铁路电力牵引供电设计

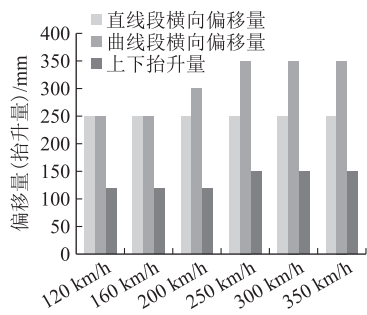


图6 不同时速受电弓动态包络线横向偏移量和上、下抬升量统计图

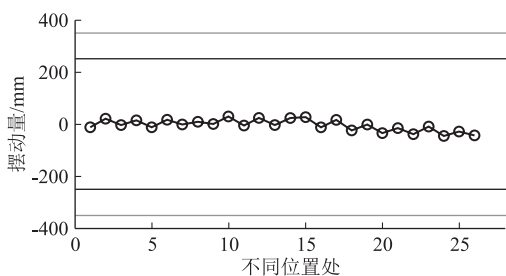


图7 成渝提质增效改造后实测受电弓左右偏移量图

规范》要求^[2],我国铁路受电弓动态包络线上下抬升量应符合规定。我国目前已运营的京沪高速铁路接触网定位点上下抬升量实测数据如图8所示。

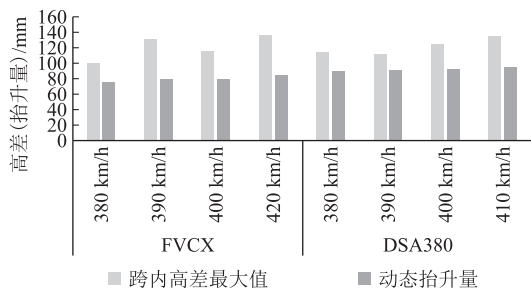


图8 京沪高速铁路接触网定位点抬升统计图

从图8可以看出,京沪高速铁路(法维莱受电弓)在不同受电弓和不同速度下的定位点抬升量小于120 mm,在个别速度和个别位置处略大于120 mm,但均小于150 mm,符合TB 10009-2016《铁路电力牵引供电设计规范》的设计要求。

3 影响受电弓动态包络线取值范围的参数

受电弓动态包络线会随着机车的运行状态不断变化。如果接触网系统参数不能满足电力机车受电弓耦合性能的要求,将会产生严重的安全事故,其影

响范围广,抢修时间长,对铁路交通运输造成严重的影响。

3.1 拉出值

拉出值是接触线与电力机车受电弓中心的横向距离,拉出值过大或者曲线区段跨中接触线偏移值过大,就会有电力机车钻弓或脱弓的危险,过小会使接触线与受电弓发生区域集中磨耗,大大减少受电弓的使用寿命。因此,设计接触网拉出值取值范围时,应充分考虑受电弓动态包络线横向偏移量大小,使其满足标准规范的要求。

3.2 接触线高度

TB/T 10009-2016《铁路电力牵引供电设计规范》要求,25 kV 带电体距机车车辆或装载货物间隙正常值为350 mm,接触线距轨面高度不应大于6 500 mm^[3],最低高度如表5所示。

表5 我国运行铁路不同列车匹配接触线高度表	
类别	接触线高度H/mm
客货共线	≦5 700
双层集装箱	≦6 330
仅开行动车组	≦5 150

接触网施工、检修时应严格遵守表6中的标准。当进行线路抬拨道检修施工时,调整导线高度需要考虑到接触网关键零部件,如腕臂、线夹等是否会侵入动态包络线范围内。特别是导线高度随轨面抬高时,斜腕臂距受电弓中心的距离从下到上依次减小,需要同时对腕臂做相应调整,使腕臂及其连接的接触网关键零部件位置一直保持处于受电弓动态包络线范围之外。

3.3 斜腕臂距受电弓中心的距离

接触网斜腕臂容易侵入受电弓动态包络线的工点主要出现在支柱侧面限界较小、硬横梁吊柱悬挂或铁路净空受限的工点,受电弓运行过程中必须根据受电弓宽度和运行特点,计算确定斜腕臂中心距线路中心的距离,确保斜腕臂不侵入受电弓动态包络线。斜腕臂距受电弓中心的距离示意如图9所示。

3.4 定位器坡度

目前各国电气化铁路实际运营经验证明,定位器安装是保证安全可靠性的薄弱环节,定位器坡度必须保证定位器底座不侵入受电弓动态包络线范围^[4],定位器坡度力学分析图如图10所示。不考虑外部环境如风荷载、覆冰荷载等影响时,定位器坡度计算过程为:

定位器坡度公式为:

i = tg(arctg \frac{g}{F_l^1} + arctg \frac{u}{d}) (3)

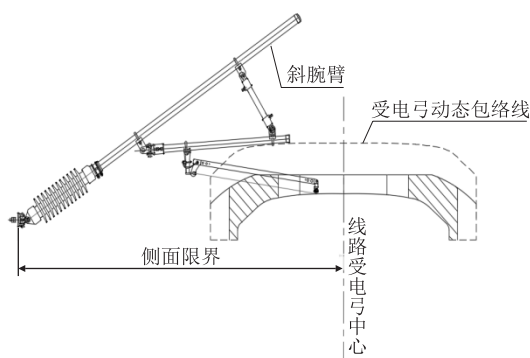


图9 斜腕臂距受电弓中心的距离示意图

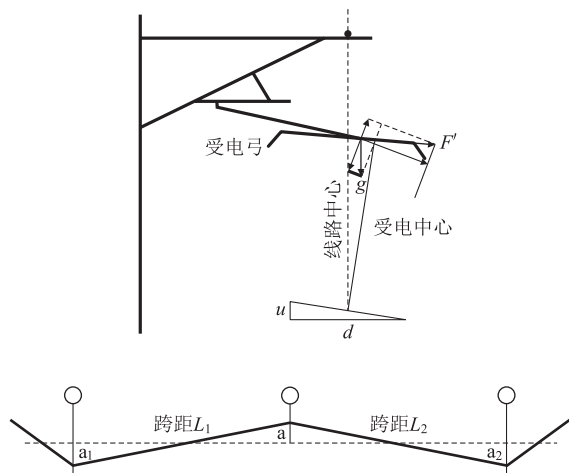


图10 定位器坡度力学分析图

其中,直线区段:

$$F^l = F \sin(\arctg \frac{\alpha + \alpha_1}{L_1}) + F \sin(\arctg \frac{\alpha + \alpha_2}{L_2}) \quad (4)$$

当 $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2, L = L_1 = L_2$ 时:

$$F^l = 2F \sin(\arctg \frac{2\alpha}{L}) \quad (5)$$

曲线区段:

$$F^l = F \frac{L}{R} \quad (6)$$

式中: g ——定位器本体及定位线夹的重量;

u ——轨道外轨超高;

d ——轨距;

F ——接触线张力;

F^l ——定位器沿受电弓滑板方向的受力;

$\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ ——接触线拉出值;

L_1, L_2 ——接触线跨距;

R ——接触线跨距。

由式(3)~式(6)可知,定位器坡度计算主要受本体、线夹的重量及定位器的影响,施工中定位器的结构形式和安装高度决定了定位器的坡度和受电弓动

态包络线取值范围。

我国电气化铁路定位器在安装时应满足定位点接触线向上抬升 200 mm 或抬升至最高点后,其最低点(包含定位器底座)高于导线面 50 mm 以上^[5]。针对限位定位器,必须根据现场安装实际情况,严格控制定位销钉间隙的大小,防止在定位点处产生硬点^[6]。

3.5 线岔和锚段关节处非支抬高量

交叉线岔处两接触线相距 500 mm 的高差时,若两支均为工作支时,线岔侧线接触线比正线接触线高 10~30 mm,侧线线岔两接触线高差 ≥ 30 mm;若一支为非工作支时,非工作支接触线比工作支接触线抬高 50~100 mm。锚段关节转换柱处非工作支的抬高必须符合设计要求,下锚支接触线的垂直投影与线路钢轨交叉处,相对于工作支,非支抬高 < 300 mm。

3.6 明确始触区的范围

始触区是涉及接触网安全的关键区域,是设计接触网系统道岔定位方式的依据。我国普遍采用的受电弓宽度为 1 950 mm,根据该种类型受电弓弓头滑板参数和仿真动态抬升量,定义距受电弓中心 600~1 050 mm 和受电弓动态抬升 150 mm 构成的空间区域为始触区^[7]。线岔始触区内不应有线夹。随着列车速度加大,受电弓动态包络线范围根据计算相应增大,规定始触区(600~1 050 mm)的范围内不得有任何接触网系统的线夹。锚段关节、线岔或有渡线交叉的处所,受电弓理论运行中心线左右 1 050 mm 范围内,各种线夹不应偏斜(相对于轨面连线);曲线区段,承力索与导线连线应垂直于轨面连线,严禁承力索向曲线外侧偏移。

4 结束语

本文介绍了受电弓动态包络线的计算,调研收集了国内外受电弓动态包络线的运营现状和数据分析。目前国内弓网标准体系关于动态包络线相关内容不完整,本文结合弓网仿真结果探讨运营中接触网系统影响动态包络线范围的决定性参数,可供制定受电弓-接触网系统设计规范时参考。对于新建铁路,可通过仿真校验受电弓-接触网系统动态包络线极限范围,提前与土建接口工程进行碰撞检查,保证接触网装备的安全绝缘间隙。

参考文献

[1] 朱飞雄. 中德两国高铁接触网设计主要参数对比研究[J]. 铁路工程技术与经济, 2021, 36(4): 27-30.

ZHU Feixiong. Comparative Research on Main Design Parameters of (下转第 47 页)

梁结构设计应满足系数加乘的极限状态荷载效应组合,极限状态分5类强度极限状态、7类极端事件极限状态、4类使用极限状态和4类疲劳极限状态。

(2)基于AASHTO/ACI混凝土梁结构设计规范,桥上无砟轨道结构设计荷载一般情况应考虑恒载、竖向标准车辆荷载、摇摆力、离心力、纵向力、倾覆力、风载、梁轨相互作用力、地震荷载、脱轨荷载及断轨力,根据荷载方向确定各向设计荷载组合。

(3)中国无砟轨道混凝土结构极限状态设计包括承载能力极限状态和正常使用极限状态,桥上无砟轨道结构设计荷载按列车荷载、温度梯度荷载、基础变形荷载确定,考虑的荷载类型和组合状态较美国规范更粗。

(4)对于桥上无砟轨道结构设计荷载,AASHTO/ACI计算方法得到的竖向和纵向计算结果均比中国极限状态法计算结果小得多,横向计算结果较小,采用中国铁路轨道设计规范确定桥上无砟轨道结构设计

荷载更偏保守。

参考文献

- [1] 江涛,张倩倩.“一带一路”倡议下中国标准走出去的贸易效应[J].科技管理研究,2021,41(16):177-184.
JIANG Tao, ZHANG Qianqian. Trade Effect of Chinese Standards Export under the Belt and Road Initiative[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(16): 177-184.
- [2] AASHTO LRFD Bridge Design Specification[S], Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- [3] ACI 358.1R-92 Analysis and Design of Reinforced Concrete Guideway Structures[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1992.
- [4] Q/CR 9130-2018 铁路轨道设计规范[S].
Q/CR 9130-2018 Code for Design of Railway Track[S].
- [5] EN 1991-2 Eurocode 1: Actions on Structures-Part 2: Traffic Loads on Bridges[S].
- [6] 徐剑峰,吴积钦,张家玮.京沪高铁接触网定位点抬升特性研究[J].电气化铁道,2017,28(S1):205-207.
XU Jianfeng. Study on Uplift Characteristics of Catenary Anchor Points in Beijing-Shanghai High-Speed Railway[J]. Electric Railway, 2017, 28(S1): 205-207.
- [7] 隋延民.接触网定位器坡度计算及定位安全措施[J].铁道工程学报,2011,28(4):75-78.
SUI Yanmin. Calculation of Steady Arm Grade and Registration Safety Measures[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(4): 75-78.
- [8] 李刚.铝合金定位器在接触网中的应用研究[J].高速铁路技术,2018,9(5):53-55.
LI Gang. Research on Application of Aluminum-alloy Steady Arm in the OCS[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 53-55.
- [9] 邓小桃,胡卫.电气化铁路弓网关系分析及对策[J].技术与市场,2014,21(4):88-89.
DENG Xiaotao, HU Wei. Analysis on the Relationship between Pantograph and Catenary in Electrified Railway and Its Countermeasures[J]. Technology and Market, 2014, 21(4): 88-89.
- [10] TB 10009-2016 铁路电力牵引供电设计规范[S].
TB 10009-2016 Code for Design of Railway Traction Power Supply[S].
- [11] 林志海.高原高海拔地区牵引变电系统外绝缘修正设计[J].铁道标准设计,2012,56(6):138-141.
LIN Zhihai. Optimization Design for External Insulation of Electric Equipment of Traction Power Supply System in Plateau and High Altitude Area[J]. Railway Standard Design, 2012, 56(6): 138-141.