

文章编号: 1674—8247(2021)02—0011—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.002

400 km/h 高速铁路接触网系统研究展望

高仕斌¹ 刘志刚¹ 杨 佳^{1,2}

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

摘 要:目前我国已形成了 350 km/h 高速铁路的成套技术体系,但该技术体系对 400 km/h 高速铁路的适用性需要重新评估。在高速铁路中,受电弓-接触网系统是列车的唯一供能系统,也是决定高速铁路列车运行速度的关键因素。目前,国内外尚无 400 km/h 线路开通运行,其理论研究需在充分总结 350 km/h 研究成果的基础上开展。本文对 400 km/h 高速铁路接触网系统进行了数值仿真研究分析,并提出了 400 km/h 高速铁路接触网系统的研究展望:(1)总结目前 350 km/h 高速铁路接触网系统技术的研究成果与短板;(2)分析仿真方法对 400 km/h 高速铁路接触网系统的适应性;(3)研讨 400 km/h 接触网系统动态性能指标的确定方案。

关键词:接触网系统;性能指标;仿真分析;接触力;高速铁路

中图分类号:U225,U238

文献标志码:A

Research Prospect for Overhead Contact System of 400 km/h High-speed Railway

GAO Shibin¹ LIU Zhigang¹ YANG Jia^{1,2}

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

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

Abstract: At present, China has formed a complete technical system for 350km/h high-speed railway, but the applicability of the technical system to 400 km/h high-speed railways needs to be re-evaluated. In high-speed railway, the pantograph-catenary system is the only energy supply system for trains, and also the key factor to determine the operation speed of high-speed railway trains. At present, no 400 km/h track has been put into operation at home and abroad, so the theoretical research should be carried out on the basis of fully summarizing the research results of 350 km/h high-speed railways. In this paper, the overhead contact system of 400 km/h high-speed railway is studied and analyzed by numerical simulation, and the research prospect for overhead contact system of 400 km/h high-speed railway is put forward: (1) Summarize the existing research results and shortcomings of overhead contact system technology of 350 km/h high-speed railway. (2) Analyze the adaptability of simulation method to overhead contact system of 400 km/h high-speed railway. (3) Discuss the scheme of determining the dynamic performance indicators of overhead contact system of 400 km/h high-speed railway.

Key words: overhead contact system; performance indicators; simulation analysis; contact force; high-speed railway

受电弓-接触网系统的动态特性决定了高速列车能否可靠运行。目前我国已在 350 km/h 速度级高速

铁路接触网系统的设计、施工、运营维护上积累了许多经验,但限于理论规范、试验数据的不足,弓网系统动

收稿日期:2021-03-01

作者简介:高仕斌(1963-),男,教授。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KSNQ202056)

引文格式:高仕斌,刘志刚,杨佳. 400 km/h 高速铁路接触网系统研究展望[J]. 高速铁路技术,2021,12(2):11-16.

GAO Shibin, LIU Zhigang, YANG Jia. Research Prospect for Overhead Contact System of 400 km/h High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2):11-16.

态性能指标制定方面落后于欧洲国家。当列车速度提升至 400 km/h 时,接触网系统不仅要面临速度上 50 km/h 的提升,还要面临空气阻力造成的弓网稳定受流指数的增长。因此,350 km/h 速度级高速铁路接触网系统的经验能否直接适用仍是个未知数。

高速铁路线路试验成本高,难度大,仿真分析方法成为了接触网系统研究的主要手段。为引领高速铁路技术的发展,针对 400 km/h 高速铁路接触网系统的研究,本文提出以下三个研究开展方向:(1)总结 350 km/h 高速铁路接触网系统技术体系的研究成果与不足;(2)研究适用于 400 km/h 高速铁路接触网系统的仿真分析手段;(3)结合现有高速铁路检测数据和冲高试验数据,确定相关弓网接触力评价标准。

1 现有高速铁路接触网系统技术体系

400 km/h 高速铁路接触网系统研究的首要工作是理清现有 350 km/h 高速铁路接触网系统技术体系,主要聚焦在接触网振动和波动理论、弓网受流质量及评价体系、接触网系统检测监测手段和高速接触网零部件体系四个方面。

1.1 接触网振动和波动理论

目前接触网波动特性指标主要源于德国西门子公司^[1]及欧标 EN 50119-2020^[2],是基于数学推导、现场试验和工程经验总结的比较通用的接触网设计指标,包括波动传播速度、反射系数、多普勒系数、放大系数以及固有频率等。该指标在世界范围通用,也是我国接触网设计标准^[3-4]的主要参考源。

设定接触网运行速度的主要指标为接触网的波动传播速度,根据运行经验,总结接触网波动传播速度与设计速度的关系如表 1 所示。

表 1 接触网波动传播速度与设计速度的关系表

序号	标准	速度要求
1	EN 50119-2020	列车运行速度应小于波动传播速度的 70%
2	TB 10009-2016	接触线波动传播速度不应小于线路最高行车速度的 1.4 倍
3	TB 10621-2014	设计速度与接触线波动传播速度之比不应大于 0.7
4	日本	新干线最高运营速度为波动传播速度的 70% 及以下

接触网反射系数用来量化振动波在吊弦等处的反射,反射系数越小,反射波对弓网受流质量的影响越小,通常认为反射系数在 0.4 左右即可满足要求。多普勒系数是衡量受电弓前方波动放大效应的重要指标,其值应大于 0.15。放大系数反映了集中质量点(通常为吊弦点)对振动波的连续反射情况,放大系数

应在 0.4~2 之间。

1.2 弓网受流质量及评价体系

弓网受流质量的重要评价指标为弓网动态接触压力。合适的动态接触压力是确保高速列车平稳运行的前提条件。列车运行速度的提高和环境风的影响会加剧受电弓和接触网之间的振动,从而使接触线和受电弓间的接触压力产生恶化。弓网接触压力可以反映在受电弓与接触线的取流质量上,要使弓网系统保持良好受流,弓网动态接触压力需维持在合适的范围内。

通常用接触压力的统计值做指标来评价弓网受流质量,接触力的常用统计值包括最大值、最小值、平均值以及标准差。国内外主要标准对弓网接触力统计值的相关规定如表 2 所示。

表 2 国内外主要标准中对弓网接触力的规定值表

规范	速度 /(km/h)	平均接触力/N	接触力/N
TB 10621-2014	350	$F_m \leq 0.000\ 97v^2 + 70$	$0 < F \leq 350$
TB 10009-2016	250~350	$F_m \leq 0.00097v^2 + 70$	$0 < F \leq 350$
EN 50119-2020	>320	-	$0 < F \leq 400$
EN 50367-2012	>200	$0.000\ 47v^2 + 60 \leq F_m \leq 0.000\ 97v^2 + 70$	-

由表 2 可知:

(1)国内外标准均规定平均接触力的最大值为 $0.000\ 97v^2 + 70\text{ N}$ 。

(2)国内规范对最小平均接触力均无规定,欧标 EN 50367-2012^[5]规定平均接触力最小值为 $0.000\ 47v^2 + 60\text{ N}$ 。

(3)国内规范规定接触力最大值为 350 N,欧标 EN 50119-2020 规定接触力最大值为 400 N。

(4)国内外规范均规定接触力最小值应大于 0,且接触压力统计最小值应满足式(1)的要求:

$$F_{\min} = F_m - 3\sigma > 0 \tag{1}$$

式中: F_{\min} ——接触压力统计最小值;

F_m ——接触压力平均值;

σ ——接触压力标准差。

从统计学角度讲,当接触压力统计最小值为正时,弓网离线的概率将不会超过 1%。

1.3 弓网系统检测监测手段

我国采用高速铁路供电安全检测监测系统(6C 系统)作为弓网系统检测的监测手段,其中动态检测主要是检测弓网系统的动态性能,包括拉出值、接触线高度、接触压力和燃弧时间等。静态检测主要是检测高速铁路接触网支持装置零部件的状态。

对于评判弓网系统动态性能的拉出值、接触线高度、弓网接触力和燃弧时间 4 个检测量,铁路部门采用

层次分析法确定各项检测评价量的权重系数,计算关于接触网动态性能的综合指标值(Catenary Dynamic Index)^[6-7],用于综合反映和定量评价接触网的动态性能。

目前,基于成像技术的专用接触网检测车(以下统称 4C 检测系统)已初步应用于高速铁路接触网支持装置零部件的状态检测,但接触网支持装置零部件的复杂性和多样性,给 4C 检测系统的应用带来了严峻的挑战。

1.4 高速接触网零部件体系

我国 350 km/h 高速电气化铁路接触网多采用铝合金制腕臂。其具有重量轻、美观、防腐性能好等优点且方便精确预配和安装,同时还具有良好的韧性及延展性,抗疲劳、抗振性能也较优异。

为方便设计、制造、施工和运维,降低系统寿命周期成本,提高系统的安全性、可靠性、可用性和可维护性,我国对接触网系统和装备进行了简化设计^[8]。简化腕臂结构更加简洁、合理:(1)减少了螺栓数量,方便安装,采用轻型铰接非限位弓形结构定位器,弓网匹配好,提升了安全裕度;(2)采用销轴铰接式与定位底座连接,腕臂支撑、定位管支撑采用实心型材,简化了结构和工艺,提升了可靠性;(3)对整体吊弦、中心锚结、终端锚固线夹、下锚、弹性吊索线夹、电连接装置及线岔的技术条件进行了体系化确立。简化腕臂结构示意图如图 1、图 2 所示。



图 1 简化腕臂结构和定位装置正定位示意图

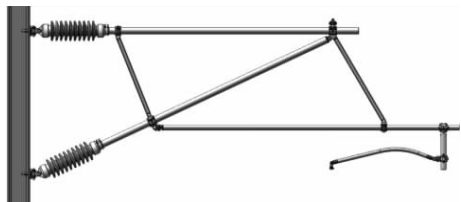


图 2 简化腕臂结构和定位装置反定位示意图

1.5 高速接触网技术体系不足

10 余年来,我国高速铁路建设成果斐然,但仍存

在理论体系落后于工程经验的问题,尤其是在标准制定方面,仍以欧标作为参考模板。现有高速铁路接触网系统的短板主要有以下几方面:

- (1) 双弓-网系统的振动和波动理论尚不成熟。
- (2) 弓-网系统离线行为及其对受流质量的影响不明确。
- (3) 缺乏弓网系统高频参数检测体系化手段。
- (4) 接触网零部件损伤机理不明确。
- (5) 现有标准基于欧标,缺乏高速弓网系统动态评估标准。

因此,我国亟需补足 350 km/h 高速铁路接触网体系的技术短板,建立 400 km/h 高速铁路接触网理论体系,形成 400 m/h 高速铁路的中国标准。

2 400 km/h 高速铁路接触网系统仿真技术

既有弓网数学模型主要针对 350 km/h 及以下速度,当列车速度超过 350 km/h 时,需着重考虑以下因素对弓网动态性能的影响:

(1) 受电弓超高速运行时,接触网的振动更加剧烈,接触线、承力索和弹性吊索的几何非线性影响更加显著,数学模型需精确描述其大变形的几何非线性。

(2) 传统索单元无法考虑线索的弯曲刚度,超高速运行时,线索的色散效应更加明显,数学模型需精确描述接触网线索的弯曲刚度。

2.1 受电弓-接触网模型

采用 ANCF 梁单元模拟接触线和承力索发生大变形时的几何非线性和弯曲刚度^[9-10],采用非线性杆单元模拟吊弦工作在不同伸缩状态表现出的不光滑非线性。借鉴土木工程中的结构找形方法计算接触网的初始形态,基于非线性有限元过程求解弓网的动态行为,建立的接触网模型如图 3 所示。所采用的受电弓模型为常用的三自由度归算参数模型,弓网之间的交互作

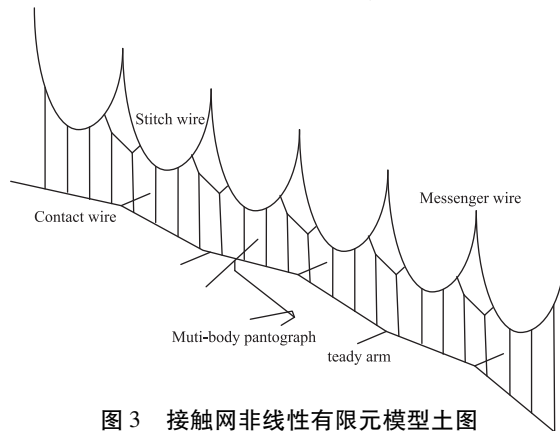


图 3 接触网非线性有限元模型土图

用采用罚函数方法进行描述,如图 4 所示。

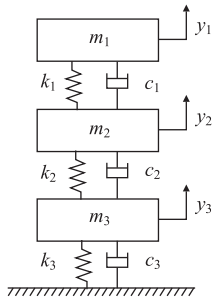


图 4 受电弓三自由度归算参数模型图

2.2 受电弓-接触网模型验证

为验证弓网仿真模型的准确性,基于 Bruni 等人^[11]总结的弓网仿真软件计算结果及欧标 EN 50318-2018^[12],通过多个仿真算例验证静态找形

结果和动态结果的正确性。模型验证结果如表 3、表 4 所示。

表 3 静态结果验证表

吊弦	弛度 /mm	结果 /mm	范围 /mm	e /(mm/N)	结果 /(mm/N)	范围 /(mm/N)
定位	0	2.560	± 5	0.316	0.326	± 0.1
1	0	-0.564	± 5	0.340	0.324	± 0.1
2	0	-2.465	± 5	0.328	0.328	± 0.1
3	0	-1.253	± 5	0.388	0.341	± 0.1
4	0	-0.672	± 5	0.407	0.359	± 0.1
5	0	-0.816	± 5	0.388	0.341	± 0.1
6	0	-1.959	± 5	0.328	0.328	± 0.1
7	0	-0.406	± 5	0.350	0.324	± 0.1
定位	0	4.723	± 5	0.316	0.326	± 0.1

从表 3、表 4 可以看出,各项静、动态结果均符合标准规定。

表 4 动态结果验证表

速度/(km/h)	275				320			
受电弓	1		2		1		2	
	标准范围	结果	标准范围	结果	标准范围	结果	标准范围	结果
F_m /N	143~144	143.1	142~144	143.2	169	169.4	169	168.8
σ /N	20.2~24.7	22.9	24.4~36.2	30.8	20.5~24.7	23.7	30.4~38.3	35.3
σ (0-5Hz)/N	11.7~15.2	13.9	17.0~18.2	17.5	11.8~13.3	12.1	20.4~24.2	23.0
σ (5-20Hz)/N	16.5~19.0	18.9	16.4~27.4	26.3	15.2~20.9	18.7	21.5~29.8	27.9
F_{max} /N	185~199	189.3	203~252	240.4	210~232	225.0	239~255	239.5
F_{min} /N	92~102	95.7	56~88	74.5	105~128	109.0	43~78	59.7

2.3 400 km/h 仿真适应性分析

基于 400 km/h 接触网系统初步设计结果,建立弓网模型仿真验证速度 400 km/h 及速度 440 km/h 时的弓网动态特性。接触网参数如表 5 所示,受电弓选用 SSS400+ 型受电弓。按照 EN 50318-2018 与 TB 10009-2016 要求进行数据处理(20 Hz 低通滤波)。

表 5 接触网参考模型基本参数表

接触网		
材料 参数	接触线(CW)	线密度: 1.34 kg/m; 张力: 36 kN; 杨氏模量: 120 kN/mm ² ; 横截面积: 150 mm ²
	承力索(MW)	线密度: 1.06 kg/m; 张力: 28 kN; 杨氏模量: 120 kN/mm ² ; 横截面积: 120 mm ²
	吊弦	线密度: 0.089 kg/m; 线夹质量: 155 g (CW), 140 g (MW); 拉伸刚度: 100 kN/m
	定位器	线密度: 0.780 kg/m
	弹性吊索	线密度: 0.31 kg/m; 张力: 3 500 N; 杨氏模量: 110 kN/mm ² ; 横截面积: 35 mm ²
结构 参数	结构高度: 1.6 m; 吊弦间隔: 12 m; 吊弦数量: 5; 跨距长度: 60 m; 拉出值: ± 0.3 m; 定位器长度: 1.2m; 屋脊高度: 20 mm	

仿真结果全局接触压力统计值如表 6 所示,锚段关节接触压力统计值如表 7 所示。

表 6 全局接触压力统计值表

速度 /(km/h)	受电弓	最大 接触力 /N	平均接 触力 F_m /N	最小接 触力 /N	接触力 标准差 σ /N	$0.3F_m - \sigma$ /N	定位器 最大抬升 /mm
400	前弓	321.4	223.8	105.6	38.8	28.4	100.0
	后弓	347.9	223.8	76.8	45.8	21.4	
440	前弓	418.4	255.9	146.5	51.8	25.0	140.0
	后弓	514.9	255.3	0	89.0	-12.4	

表 7 锚段关节接触压力统计值表

速度 /(km/h)	受电弓	最大接 触力/N	平均接 触力 F_m /N	最小接 触力/N	接触力 标准差 σ /N	$0.3F_m - \sigma$ /N
400	前弓	321.4	224.1	105.6	42.6	24.6
	后弓	342.7	224.2	76.8	51.7	15.5
440	前弓	418.4	255.9	146.5	55.3	21.5
	后弓	514.9	254.9	0	94.3	-17.9

由表 6、表 7 中可知,在现行数据处理标准下,接触网优化设计方案可满足 SSS400+ 型受电弓 400 km/h 和 440 km/h 的单弓运行要求,可满足 SSS400+ 型受电弓 400 km/h 下的双弓运行要求,表现在:

(1)400 km/h 和 440 km/h 时,全局接触网、锚段关节位置的前弓接触力统计指标值均符合相关要求,但随着运行速度的增加,最大接触力、平均接触力、最小接触力、接触力标准差、定位器最大抬升量均出现显著升高趋势,可能会导致受电弓磨损加剧、拉弧频繁,引发电气安全事故,因此对于 400 km/h 以上接触网,应考虑纳入辅助评估指标,避免将接触力作为唯一评估标准。

(2)28 kN/36 kN 张力方案的理论最大运行速度为 411 km/h,与 440 km/h 的运行速度之间存在矛盾。现行标准规定 20 Hz 低通滤波仅限于 350 km/h 以下的运行状态,对于 400 km/h 及以上的弓网系统,现行标准所得评估结果的可靠性无法验证。

3 400 km/h 接触力评价标准

由上述 400 km/h 级接触网分析结果可知,采用国内外现行弓网系统评价标准(20 Hz 低通滤波)对 400 km/h 及以上的弓网系统进行评价时,评估结果与经验标准均存在较大差异(极限运行速度 > 接触网波动速度×0.7)。因此需提出适用于 400 km/h 的接触力评价标准。

以欧标 EN 50318 – 2018 为例,该标准提出的 20 Hz 滤波阈值特别指出:“滤波范围应包含吊弦间距相关频率和跨距相关频率”。对于 350 km/h 及以上弓网系统,吊弦相关频率已上升至 20 Hz 以上范围(如

图 5 所示)。因此,现行数据处理标准不仅无法满足 400 km/h 及以上弓网系统动态性能评价的需求,还会造成评价结果可靠性的下降。

基于现有标准及相关研究,本文提出 3 种新型弓网系统动态性能评价标准(如表 8 所示),分析不同标准下所得接触力是否满足 400 km/h 及以上运行要求,探索匹配于 400 km/h 及以上弓网系统的接触力评价标准。其中,截止间距为标准中 20 Hz 采样频率下运行速度对应的采用间距。

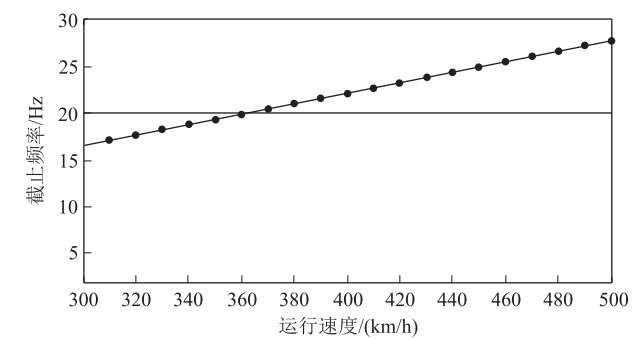


图 5 弓网系统运行速度与截止频率关系图

表 8 3 种 400 km/h 弓网系统接触力评价标准方案表

方案	I	II	III
截止间距 /m	4.44	4.86	1.25
标准依据	EN 50318 – 2018	TB 10009 – 2016	Dr. Yang Song

分别采用上述 3 种方案对仿真结果重新评价,结果如表 9 所示。

表 9 接触压力统计值表

方案	速度 / (km/h)	受电弓	最大接触力 /N	平均接触力 F_m /N	最小接触力 /N	接触力标准差 σ /N	$0.3F_m - \sigma$ /N	定位器最大抬升 /mm
I	400	前弓	361.2	223.8	88.9	45.0	22.1	100
		后弓	395.3	223.8	43.2	57.0	10.1	
	440	前弓	498.6	255.9	97.3	66.8	10	140
		后弓	590.2	255.6	0	106.4	-29.7	
II	400	前弓	361.3	223.8	100.5	44.2	22.9	100
		后弓	387.2	223.8	44.1	55.7	11.4	
	440	前弓	501	255.9	89	65.5	11.2	140
		后弓	594.9	255.5	0	104.3	-27.7	
III	400	前弓	449.6	223.8	50.4	54.9	12.2	99.9
		后弓	542.6	223.8	0	68.4	-1.2	
	440	前弓	553.3	255.9	47.4	79.3	2.5	140
		后弓	620.2	255.6	0	123.0	-46.3	

由表 9 可知:

(1)在方案 I、方案 II 两种新型评价标准下,接触网设计方案仍可满足 400 km/h 下的双弓运行要求,表现为前、后弓接触力统计指标均在许可范围内。

(2)在 3 种新型评价标准下,接触网设计方案可满足 440 km/h 下的单弓运行要求,表现为前弓接触力

统计指标均在许可范围内,但后弓统计值存在负值。

(3)在 3 种新型评价标准下,接触网设计方案无法满足 440 km/h 及以上双弓运行要求,表现为前、后弓统计指标存在负值。

(4)采用新型接触力评价标准对弓网系统的极限运行速度进行评估,所得结果与经验标准(接触网波

动速度 $\times 0.7$)接近,具有一定可靠性。

4 结束语

400 km/h 高速铁路接触网系统代表全球高速铁路接触网研究的最高水准,是建立成套400 km/h 高速铁路理论体系的重要一环,需要把能代表中国最高水平的新材料、新技术、新工艺、新工法、新体系等最新成果展现出来。本文总结了350 km/h 高速铁路接触网技术的成果及短板,探讨了仿真手段对400 km/h 的适应性并对其评价标准提出了建议。对于400 km/h 高速接触网系统,今后还需进一步健全其理论体系,形成400 m/h 高速铁路的中国标准,进一步探讨现有弓网仿真方法对400 km/h 的适应性,并结合400 km/h 运行速度的高速高频特点,进一步研究新的接触力评价标准。

参考文献:

- [1] F. Kiessling. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance[M]. Erlangen: Publicis, 2009.
- [2] BS EN 50119-2020 Railway Applications. Fixed Installations. Electric Traction Overhead ContactLines [S].
- [3] 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].
- [4] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].

(上接第10页)

- [14] 刘磊. 时速400km 高速铁路曲线超高研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(4): 91-94.
LIU Lei. Study on Curve Superelevation of 400km/h High Speed Railway[J]. Railway Engineering, 2017, 57(4): 91-94.
- [15] 时瑾, 孙征南, 孙宪夫, 等. 现行350 km/h 高铁线路技术条件运营400 km/h 高速列车适应性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(9): 2171-2180.
SHI Jin, SUN Zhengnan, SUN Xianfu, et al. Research on the Adaptability of High-Speed Train Running at 400 km/h under Current 350 km/h High-speed Railway Technical Conditions[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(9): 2171-2180.
- [16] 张旭久. 高速铁路轨道不平顺限值及曲线通过关键动力参数取值研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
ZHANG Xujiu. Research on the Limits of Track Irregularities of High-speed Railways and the Values of Key Dynamic Parameters for Curve Negotiation. Changsha: Central South University, 2009.
- [17] 孙文峰. 既有提速平面曲线半径与曲线实设超高关系的分析[J]. 铁道标准设计, 2005, 49(4): 12-14.
SUN Wenfeng. Studying the Independence of Radius of Plane Curve to Actual Elevation of Curve for Speed-Raising on Existing Line[J].

- [5] BS EN 50367-2012 Railway Applications. Current Collection Systems. Technical Criteria for the Interaction between Pantograph and Overhead Line[S].
- [6] 王婧. 基于层次分析法的接触网区段质量评价影响因素权重确定研究[J]. 中国铁路, 2019(4): 60-64.
WANG Jing. Weight Study of Influential Factors for Assessment of OCS Section Quality Using Analytic Hierarchy Process[J]. China Railway, 2019(4): 60-64.
- [7] 张文轩, 王婧, 杨志鹏, 等. 接触网质量评价方法与评价体系[J]. 中国铁路, 2019(1): 21-25.
ZHANG Wenxuan, WANG Jing, YANG Zhipeng, et al. The Quality Assessment Method and Assessment System of Overhead Contact Line System[J]. China Railway, 2019(1): 21-25.
- [8] TJ/GD 026-2018 高速铁路简化接触网装备暂行技术条件[S].
TJ/GD 026-2018 Temporary Technical Conditions for Simplified Overhead Contact System Equipment of High-speed Railways[S].
- [9] SHABANA A A. Definition of ANCF Finite Elements[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2015, 10(5): 054-506.
DOI:10.1115/1.4030369.
- [10] SONG Yang, RÖNNQUIST A, NÅVIK P. Assessment of the High-Frequency Response in Railway Pantograph-Catenary Interaction Based on Numerical Simulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10596-10605.
- [11] BRUNI S, AMBROSIO J, CARNICERO A, et al. The Results of the Pantograph-Catenary Interaction Benchmark [J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(3): 412-435.
- [12] BS EN 50318-2018 Railway Applications. Current Collection Systems. Validation of Simulation of the Dynamic Interaction between Pantograph and Overhead Contact Line[S].
- [13] Railway Standard Design, 2005, 49(4): 12-14.
- [18] 陈修平. 高速铁路曲线超高设计的研究[J]. 铁道勘察, 2010, 36(5): 80-81.
CHEN Xiuping. Super-Elevation Design on Curves of High Speed Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2010, 36(5): 80-81.
- [19] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第四版)上册[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics(4 Edition)[M]. Beijing: Science Publishing House, 2015.
- [20] TB/T 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB/T 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [21] GB/T 5599-2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
GB/T 5599-2019 Specification for Dynamic Performance Assessment and Testing Verification of Rolling Stock[S].
- [22] 易思蓉. 铁路选线设计[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.
YI Sirong. Principle of Railway Location and Design[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Publishing House, 2017.
- [23] TB 10621-2014 高速铁路设计规范(条文说明)[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway (Clause Explanation)[S].