

文章编号: 1674—8247(2021)05—0096—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.018

400 km/h 高速铁路接触网系统动态性能指标研究

鲁小兵 林宗良 杨 佳 邓云川 丁 润

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:高速铁路接触网系统设计需根据速度目标值,以特定输入下的动态性能指标为依据进行分析、设计与验证。400 km/h 高速铁路代表当前世界高速铁路技术的最高水平,但此速度等级下的接触网系统动态性能指标尚待建立。基于此,本文以标准分析和数值仿真分析为基础,结合实测数据验证,研究了接触网波动传播速度和弓网动态性能指标等内容,初步确定了相关指标范围。结果表明:基于波动传播速度的接触网系统张力体系设计宜考虑承力索影响,适当增加承力索张力可有效降低接触网关键位置处的动态抬升;弓网平均接触力 F_m 目标值宜为 $0.000\,47v^2 + 60(\text{N}) \leq F_m \leq 0.000\,97v^2 + 70(\text{N})$,弓网接触力 F 目标值宜为 $0 < F \leq 400\text{ N}$ 。

关键词:接触网系统;性能指标;波动传播速度;接触力;高速铁路

中图分类号:U225 **文献标志码:**A

96

Study on Dynamic Performance Index of Overhead Contact System of 400 km/h High-speed Railway

LU Xiaobing LIN Zongliang YANG Jia DENG Yunchuan DING Run

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

Abstract: The overhead contact system of a high-speed railway should be analyzed, designed, and verified according to the target speed of the railway and the dynamic performance index under specific input. 400 km/h high-speed railway represents the top level of high-speed railway technology in the world at present, but the dynamic performance index of the overhead contact system at this speed has yet to be established. In view of this, this paper studies the wave propagation velocity of the overhead contact system and dynamic performance index based on standard analysis and numerical simulation and by verifying with the measured data, and preliminarily determines the range of relevant indexes. The results show that the influence of messenger wire should be considered in the design of the tension system of overhead contact system based on wave propagation velocity, and increasing the tension of messenger wire properly can effectively reduce the dynamic uplift at key positions of the overhead contact system. The target value of average contact force F_m should be $0.000\,47v^2 + 60(\text{N}) \leq F_m \leq 0.000\,97v^2 + 70(\text{N})$, and the target value of pantograph contact force F should be $0 < F \leq 400\text{ N}$.

Key words: overhead contact system; performance index; wave propagation velocity; contact force; high-speed railway

弓网关系可靠性是确保高速铁路安全运行的核心技术之一。在接触网系统设计阶段,需根据速度目标值,以特定输入下的动态性能指标为依据进行分析、设

计与验证。随着京沪、成渝、鲁南、郑徐、武广等一大批 350 km/h 高速铁路的顺利开通,我国已经形成了 350 km/h 高速铁路的成套技术体系,在电气化接触网

收稿日期:2021-03-01

作者简介:鲁小兵(1988-),男,博士,工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KNSQ202056)

引文格式:鲁小兵,林宗良,杨佳,等.400 km/h 高速铁路接触网系统动态性能指标研究[J].高速铁路技术,2021,12(5):96-101.

LU Xiaobing, LIN Zongliang, YANG Jia, et al. Study on Dynamic Performance Index of Overhead Contact System of 400 km/h High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):96-101.

专业方面也积累了丰富的工程设计经验。

速度目标值 400 km/h 的高速铁路代表了当前世界高速铁路技术的最高水平。但目前世界各国均未建立 400 km/h 接触网系统设计输入及指标体系。本文以现行标准分析、数值仿真分析、实测数据分析为基础,研究接触网波动传播速度和弓网动态性能指标等内容,初步确定 400 km/h 弓网评价指标,以期为工程设计与运营维护提供参考。

1 弓网系统动力学模型

本文建立适用于 400 km/h 弓网系统的动力学仿真模型,用于弓网系统动力学的分析与验证。

1.1 接触网模型

采用 ANCF 梁单元模拟接触线和承力索^[1-3]、非线性索单元模拟吊弦。接触网单元类型如图 1 所示。

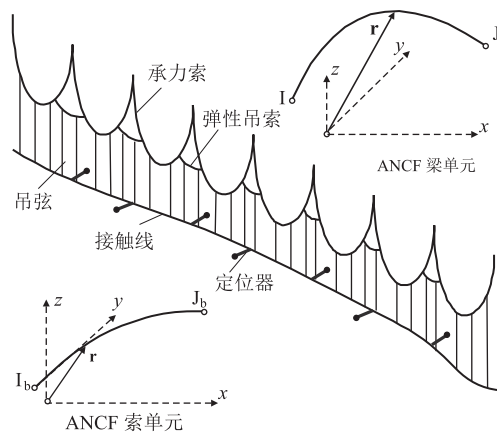


图 1 接触网非线性有限元模型单元类型图

考虑一个如图 1 所示的 ANCF 梁单元,包含位移和梯度的节点自由度向量可定义为:

$$e = [e_i \quad e_j]^T \tag{1}$$

其中,

$$e_i = [x_i \quad y_i \quad z_i \quad \frac{\partial x_i}{\partial \chi} \quad \frac{\partial y_i}{\partial \chi} \quad \frac{\partial z_i}{\partial \chi}]$$
$$e_j = [x_j \quad y_j \quad z_j \quad \frac{\partial x_j}{\partial \chi} \quad \frac{\partial y_j}{\partial \chi} \quad \frac{\partial z_j}{\partial \chi}]$$

式中: χ ——未变形结构中的局部坐标,范围为 0 到元素长度 L_0 。

变形配置 r 中的位置矢量使用形状函数矩阵 S 作为内插值来表示:

$$r = Se \tag{2}$$

$$S = [S_{12} \quad S_{34}] \tag{3}$$

其中,

$$S_{12} = \begin{bmatrix} S_1 & & S_2 \\ & S_1 & S_2 \\ & & S_1 & S_2 \\ & & & S_1 & S_2 \end{bmatrix}$$
$$S_{34} = \begin{bmatrix} S_3 & & S_4 \\ & S_3 & S_4 \\ & & S_3 & S_4 \\ & & & S_3 & S_4 \end{bmatrix}$$
$$S_1(\xi) = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3$$
$$S_2(\xi) = l_0(\xi + \xi^3 - 2\xi^2)$$
$$S_3(\xi) = 3\xi^2 - 2\xi^3$$
$$S_4(\xi) = l_0(\xi^3 - \xi^2)$$

通过轴向和弯曲变形贡献获得的应变可表示为:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^{l_0} (EA\varepsilon_l^2 + EI\kappa^2) d\chi \tag{4}$$

式中: E ——杨氏模量;

A ——截面积;

I ——线索惯性矩;

ε_l ——纵向应变;

κ ——曲率。

广义弹性力可表示为:

$$Q = (\frac{\partial U}{\partial e})^T = K_e e \tag{5}$$

引入一致的质量矩阵和瑞利阻尼矩阵,接触网的运动方程可写为:

$$M_c^c \ddot{U}_c + C_c^c \dot{U}_c + K_c^c U_c = F_c^c \tag{7}$$

1.2 弓网耦合及模型有效性验证

受电弓模型采用国际通用的三自由度归算参数模型,弓网之间的交互作用采用罚函数方法进行描述。通过静态找形结果和动态仿真结果验证弓网模型的有效性。

(1)静态找形结果的验证

承力索吊弦点高度计算结果与其他弓网仿真软件结果的对比如表 1 所示^[4]。从表 1 可以看出,本文计算结果与其他仿真软件计算结果的一致性较高。

表 1 承力索吊弦点高度计算结果表

方法	承力索吊弦点高度 /m				
	吊弦 1	吊弦 2	吊弦 3	吊弦 4	吊弦 5
PrOSA	1.02	0.88	0.78	0.72	0.70
PantoCat	1.02	0.87	0.77	0.71	0.69
SPOPS	1.01	0.87	0.76	0.70	0.68
CaPaSIM	1.02	0.88	0.78	0.71	0.69
PCaDA	1.01	0.87	0.77	0.70	0.68
Gasen-do	1.02	0.88	0.78	0.72	0.69
OSCAR	1.02	0.88	0.77	0.71	0.69
PCRUN	1.02	0.87	0.77	0.70	0.68
CANDY	1.03	0.88	0.78	0.72	0.69
PACDIN	1.03	0.88	0.78	0.72	0.70
本文方法	1.020 6	0.879 8	0.779 7	0.720 4	0.701 8

(2)动态仿真结果的验证

本文仿真结果与 EN 50318 – 2018 规范^[5]建议范

围的对比如表 2 所示。从表 2 可以看出,本文模型仿

真计算结果全部符合 EN 50318 – 2018 规范标准。

表 2 仿真结果与 EN 50318 – 2018 规范对比表

速度/(km/h)	275				320			
	1		2		1		2	
受电弓	范围	仿真	范围	仿真	范围	仿真	范围	仿真
平均值/N	141.5 ~ 146.5	143.1	141.5 ~ 146.5	144.4	166.5 ~ 171.5	169.4	166.5 ~ 171.5	168.8
标准差/N	31.9 ~ 34.8	33.3	50.0 ~ 54.5	51.6	49.5 ~ 62.9	53.7	30.2 ~ 43.8	42.3
标准差(0 ~ 5 Hz) /N	26.4 ~ 28.9	27.2	41.2 ~ 45.4	42.8	38.7 ~ 44.4	40.1	14.3 ~ 23.3	19.0
标准差(5 ~ 20 Hz) /N	16.2 ~ 22.4	19.3	25.2 ~ 34.7	29.3	29.0 ~ 46.2	35.7	29.0 ~ 46.2	37.9
最大值/N	211.9 ~ 244	222.9	241 ~ 290	260.4	295 ~ 343	295.0	252 ~ 317	269.5
最小值/N	71 ~ 86	85.8	14 ~ 50	34.5	55 ~ 82	60.0	51 ~ 86	59.7

2 接触网波动传播速度

2.1 设计速度

接触网设计应考虑线路最高设计速度及验收速度(设计速度的 110%)。弓网受流应满足线路最高设计速度,其接触力相关统计量、离线率、定位点抬升等均须满足标准要求;验收速度下,弓网关系应满足基本受流要求;试验速度下,弓网关系应保证安全性要求,不得出现钻弓、侵限界等安全问题。

2.2 波动传播速度

接触网波动传播速度与设计速度的关系如表 3 所示。

表 3 接触网波动传播速度与设计速度的关系表

序号	项目	速度要求	承力索
1	TB 10009 – 2016 ^[6]	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	波动传播速度计算不考虑承力索张力和质量
2	TB 10621 – 2014 ^[7]	设计速度与接触线波动传播速度之比不应大于 0.7	
3	EN 50119 – 2020 ^[8]	列车运行速度应该小于波动传播速度的 70%	
4	日本	新干线最高运营速度为波动传播速度的约 70% 以下	波动传播速度计算考虑承力索张力和质量
5	意大利	最大速度为波速的 0.7 倍	
6	俄罗斯	运行速度应该小于波动传播速度的 70%	
7	UIC 799	$V_{\max} + 40 (> 300 \text{ km/h})$	

从表 3 可以看出,除 UIC 799 外,设计速度与接触网波动传播速度之比不应大于 0.7 已成为国内外铁路行业的共识。在计算波动传播速度时,国标和欧标不考虑承力索的影响,日本、意大利、俄罗斯和UIC 799考虑了承力索的影响。

2.3 计算分析

本文采用接触网初步设计参数进行仿真,分析承力索张力对弓网动态特性的影响。运行速度为 400 km/h,接触线采用 150 mm² 铜合金导线,承力索采用 120 mm² 铜合金绞线,要求波动传播速度不小于

572 km/h。根据只包含接触线的波动传播速度,计算可得接触线额定工作张力不小于 34 kN;根据既包含接触线又包含承力索的波动传播速度,计算可得接触线额定工作张力为 34 kN时承力索额定工作张力不小于 27 kN。不失一般性,采用 DSA380 受电弓,接触线张力取 36kN,承力索张力分别取 17 kN、19 kN、21 kN、23 kN、25 kN 和 28 kN,仿真结果如图 2 ~ 图 4 所示。

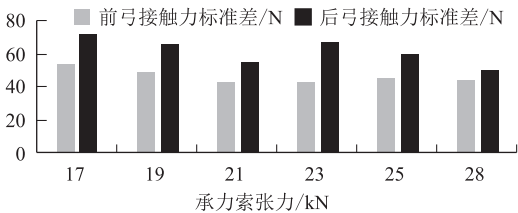


图 2 不同承力索张力下接触力标准差图

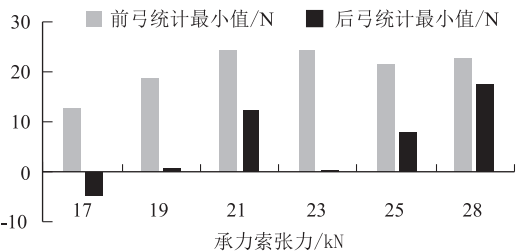


图 3 不同承力索张力下接触力统计最小值图

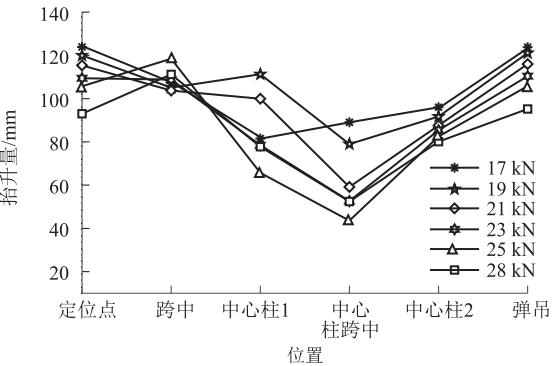


图 4 不同承力索张力下不同位置处接触线抬升图

从图 2 ~ 图 4 可以看出,承力索张力对接触力的

影响在全局范围内呈非线性,但对定位点和弹吊等接触网关键位置处动态抬升的影响呈线性,即承力索张力越大,对定位点抬升的抑制效果越明显。当列车以 400 km/h 及以上速度运行时,弓网系统的安全显得尤为突出,需对接触线抬升重点考虑。结合现行规范和仿真结果,应将承力索张力纳入接触网波动传播速度计算(定义为复合波动传播速度),同时在接触网张力体系设计中综合考虑承力索的影响。

3 弓网动态性能指标

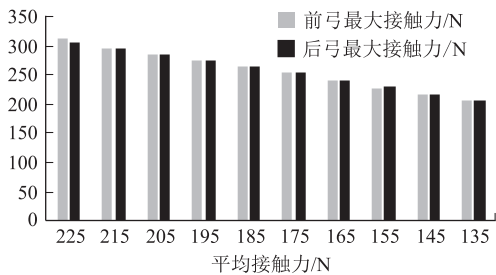
在接触网系统设计中,弓网关系层面的动态性能指标主要包括:最大平均接触力、最小平均接触力、最大接触力、最小接触力、接触力最大标准偏差等,其中关注重点在最大平均接触力、最小平均接触力和最大接触力三项。本节通过现有标准分析、仿真分析和实测数据对比展开研究。

3.1 现有标准分析

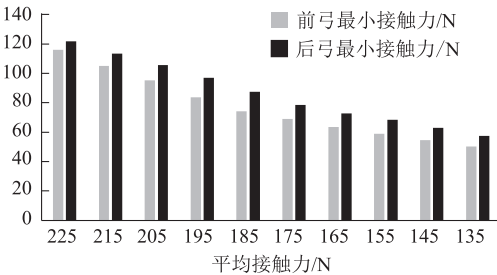
国内外主要标准对弓网接触力的相关规定如表 4 所示。

表 4 国内外主要标准对弓网接触力的规定表

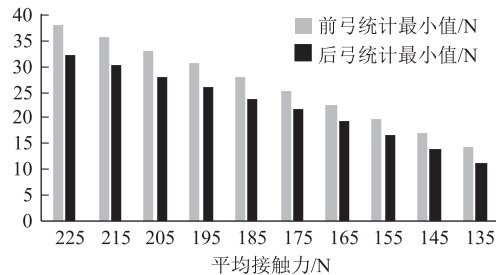
规范	速度 /(km/h)	平均接触力 /N	接触力 /N
TB 10621 - 2014	350	$F_m \leq 180$ (条文解释 $F_m \leq 0.000\ 97v^2 + 70$)	$0 < F \leq 350$
TB 10009 - 2016	250 ~ 350	$F_m \leq 0.000\ 97v^2 + 70$	$0 < F \leq 350$
EN 50119 - 2020	> 320	-	$0 < F \leq 400$
EN 50367 - 2020	> 200	$0.000\ 47v^2 + 60 \leq F_m$ $\leq 0.000\ 97v^2 + 70$	-
UIC 799 - 2002	> 300	-	$F \leq 250$



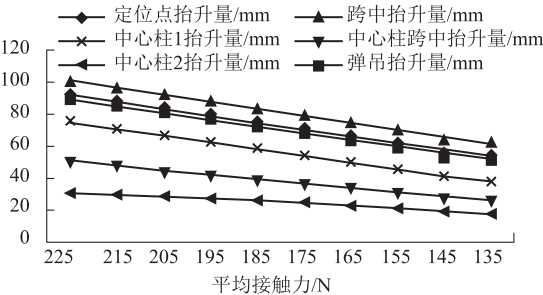
(a) 接触力最大值



(b) 接触力最小值



(c) 接触力统计最小值



(d) 接触网关键点抬升

图 5 法维莱受电弓仿真结果图

从表 4 可以看出:

(1) TB 10621 - 2014、TB 10009 - 2016 ($v \geq 250$ km/h)和国外标准对最大平均接触力的规定均为 $0.000\ 97v^2 + 70$ 。

(2) TB 10621 - 2014($v \geq 200$ km/h)、TB 10009 - 2016($v \geq 250$ km/h)对最小平均接触力均无规定, EN 50367 - 2020规定最小平均接触力为 $0.000\ 47v^2 + 60$ 。

(3) TB 10009 - 2016($v \geq 250$ km/h)规定最大接触力为 350 N, EN 50119 - 2020 规定 99.73% 的接触力需在 $F_m \pm 3d$ (d 为接触力标准差) 范围内,但最大接触力($v \geq 320$ km/h)不能超过 400 N。

(4) 国内外规范对最小接触力的规定均为大于 0。

3.2 仿真分析

本文通过弓网系统仿真,分析现有标准对最大平均接触力、最小平均接触力和最大接触力的规定在 400 km/h 条件下的适用性。采用 400 km/h 接触网系统参数初步研究成果,接触线参数为 150 mm²/36 kN, 承力索参数为 120 mm²/28 kN, 平均接触力在 225 N ($0.000\ 97v^2 + 70$) ~ 135 N ($0.000\ 47v^2 + 60$) 之间每隔 10 N 取值。

(1) 法维莱受电弓仿真结果

法维莱受电弓时,弓网接触力统计值和接触线关键位置抬升量如图 5 所示。

(2) DSA380 受电弓仿真结果

DSA380 受电弓时,弓网接触力统计值和接触线关键位置抬升量如图 6 所示。

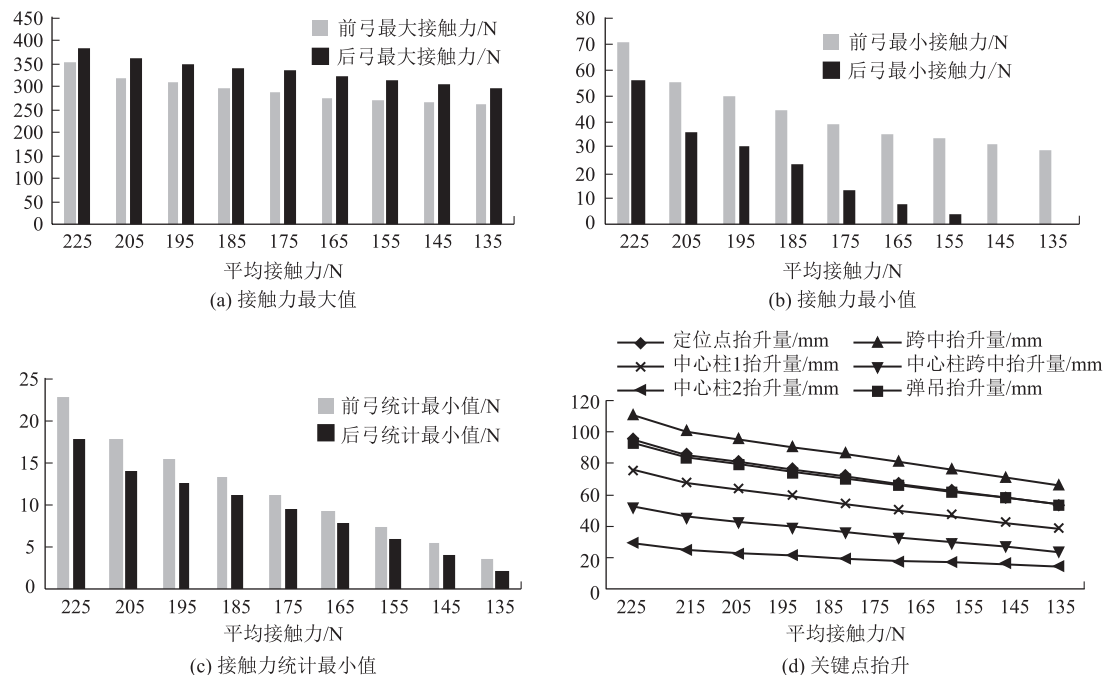


图6 DSA380 受电弓仿真结果图

从法维莱受电弓和 DSA380 受电弓在最大平均接触力($0.000\ 97v^2 + 70$)和最小平均接触力($0.000\ 47v^2 + 60$)之间的仿真结果可以看出,在 400 km/h 接触网初步设计参数下,弓网接触力相关统计值均满足标准要求,在 134 N 和 145 N 抬升力时,DSA380 受电弓锚段关节内有单点最小值为 0,这可通过系统参数优化加以解决;接触力最大值基本在 $F_m \pm 3d$ 范围内,仅 DSA380 受电弓后弓在锚段关节个别点上的值大于 $F_m + 3d$,但仍然小于 400 N。

3.3 实测数据分析

通过实测数据进一步分析弓网接触力平均值和最佳的取值范围。

(1) 京沪高速铁路实测数据

京沪高速铁路实测后弓接触力曲线如图 7 所示。

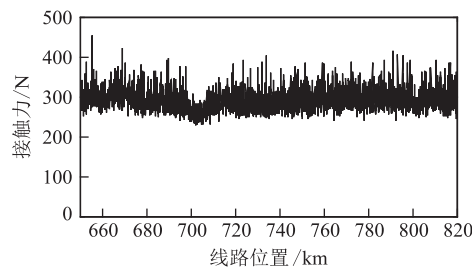


图7 京沪高铁实测后弓接触力曲线图

从图 7 可以看出,DSA380 受电弓在 380 km/h 下的后弓接触力均小于 400 N。需要说明的是,此接触力是京沪高速铁路先导段张力体系的实测数据,并非

400 km/h 接触网系统设计参数下的数据。在优选参数下,弓网接触力可得到进一步优化。

不同速度下,京沪高速铁路接触力实测数据拟合公式和现行标准接触力计算公式的结果对比如图 8 所示。

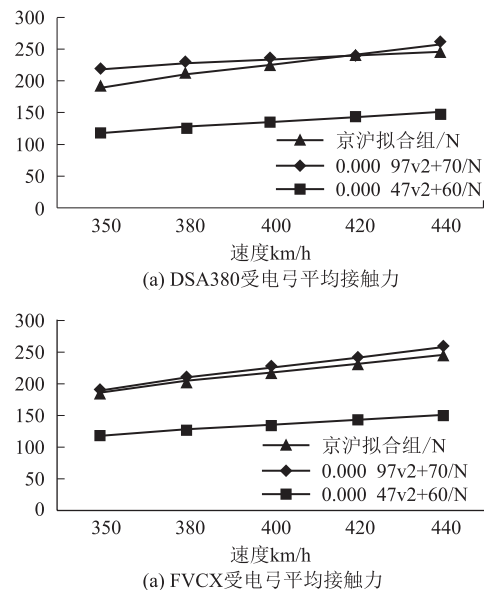


图8 实测平均接触力与标准平均接触力的比较图

从图 8 可以看出:随着列车速度的逐渐增大,DSA380 受电弓的实测数据平均接触力逐渐靠近通用计算公式最大值,并在 420 km/h 时超过通用计算公式最大值。不同速度下,法维莱受电弓的实测数据拟合

值均处于通用计算公式最大值和最小值之间,且较为靠近最大值。

(2) 郑徐高速铁路实测数据

郑徐高速铁路实测后弓接触力曲线如图 9 所示。

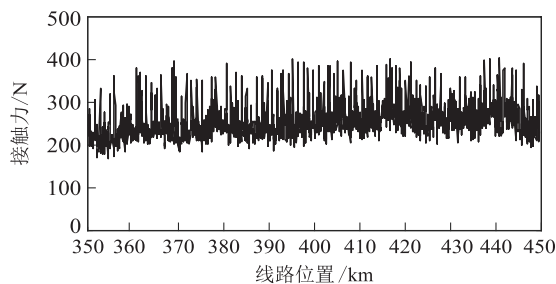


图 9 郑徐高铁实测后弓接触力曲线图

综合分析京沪高速铁路和郑徐高速铁路弓网接触力的实测数据,得出以下结论:

(1) 不同受电弓对弓网接触力的影响较大,且后弓接触力波动程度较前弓剧烈,此结果同仿真结果一致。

(2) 采用法维莱受电弓时,京沪高速铁路 420 km/h 和郑徐高速铁路 400 km/h 的后弓接触力均小于 400 N;采用 DSA380 受电弓时,京沪高速铁路 420 km/h 和郑徐高速铁路 400 km/h 的后弓接触力有部分超出 400 N。值得说明的是,该实测数据为两条线路既有参数下的测量数据,而非 400 km/h 接触网系统设计参数的实测结果。

(3) 在 400 km/h 接触网初步设计参数下,接触线 ($150 \text{ mm}^2/36 \text{ kN}$)、承力索 ($120 \text{ mm}^2/28 \text{ kN}$) 和两种主流高速受电弓 (DSA380 和法维莱) 在 400 km/h 下的前后弓仿真接触力均小于 400 N。

(4) 接触力实测数据平均值在 $0.000\,97v^2 + 70$ 和 $0.000\,47v^2 + 60$ 之间,且接近于上限值。

基于以上分析,弓网平均接触力目标值可为 $0.000\,47v^2 + 60 (\text{N}) \leq F_m \leq 0.000\,97v^2 + 70 (\text{N})$,弓网

接触力 F 目标值可为 $0 < F \leq 400 \text{ N}$ 。

4 结束语

高速铁路接触网系统设计需在确定接触网系统动态性能指标的基础上展开,本文通过仿真分析、标准对照和实试验证,对接触网波动传播速度和弓网动态性能指标进行了深入研究,结果表明:(1) 弓网平均接触力 F_m 目标值宜为 $0.000\,47v^2 + 60 (\text{N}) \leq F_m \leq 0.000\,97v^2 + 70 (\text{N})$,弓网接触力 F 目标值宜为 $0 < F \leq 400 \text{ N}$;(2) 基于波动传播速度的接触网系统张力体系设计宜考虑承力索影响,适当增加承力索张力可有效降低接触网关键位置处的动态抬升。

参考文献:

- [1] SHABANA A A. Definition of ANCF Finite Elements[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2015, 10(5): 054506.
- [2] BAUCHAU O A, HAN Shilei, MIKKOLA A, et al. Comparison of the Absolute Nodal Coordinate and Geometrically Exact Formulations for Beams[J]. Multibody System Dynamics, 2014, 32(1): 67–85.
- [3] SONG Yang, RÖNNQUIST A, NÄVIK 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.
- [4] 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.
- [5] BS EN 50318–2018 Railway Applications. Current Collection Systems. Validation of Simulation of the Dynamic Interaction between Pantograph and Overhead Contact Line[S].
- [6] 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].
- [7] TB 10621–2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621–2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [8] BS EN 50119–2020 Railway Applications. Fixed Installations. Electric Traction Overhead Contact Lines [S].