

适用于时速 200 km 架空刚性接触网的受电弓 关键参数分析*

田彩 冯超 代洪宇

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州)

摘要 [目的] 接触网与受电弓的匹配性直接影响弓网系统的受流性能, 随着架空刚性接触网适用的列车运行速度等级逐渐提高, 有必要开展与架空刚性接触网匹配的高速受电弓选型研究。[方法] 基于有限元分析法建立了架空刚性接触网-受电弓耦合仿真模型, 对适用于列车运行速度为 200 km/h 架空刚性接触网的受电弓关键参数进行分析; 利用正交试验设计法, 研究了受电弓多结构参数同时变化对弓网动态性能的影响。[结果及结论] 单一参数变化的相对最优取值为: 弓头等效质量为 6.4 kg, 下框架等效质量为 6.6 kg, 下臂杆等效刚度为 10 N/m, 弓头等效阻尼为 40~60 N·s/m, 下臂杆等效阻尼为 130 N·s/m。弓头等效质量变化对弓网动态响应的影响最大, 弓头等效刚度、弓头及上框架等效阻尼次之, 下臂杆等效质量的影响最小。所获得的适用于列车运行速度为 200 km/h 架空刚性接触网的受电弓优组合参数为: 弓头等效质量为 5.7 kg, 下臂杆等效质量为 4.6 kg, 弓头等效刚度为 10 373 N/m, 弓头等效阻尼为 60 N·s/m, 上框架等效阻尼为 40 N·s/m。

关键词 地铁; 刚性接触网; 受电弓

中图分类号 U264.34; U284.48

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.010

Analysis of Pantograph Key Parameters Suitable for 200 km/h Train Overhead Rigid Catenary

TIAN Cai, FENG Chao, DAI Hongyu

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] The compatibility between the ORC (overhead rigid catenary) and the pantograph directly affects the current collection performance of the PC (pantograph-catenary) system. As the train operational speed levels applicable for the ORC gradually increase, it is necessary to carry out research on the selection of high-speed pantograph types that match the ORC. [Method] Based on finite element analysis method, an ORC-pantograph coupled simulation model is es-

tablished. Key parameters of the pantograph suitable for ORC with a train operating speed of 200 km/h are analyzed. Using the orthogonal experimental design, the simultaneous variations in pantograph multiple structural parameters on PC dynamic performance are studied. [Result & Conclusion] The relative optimal values for single parameter change are as follows: the pantograph head equivalent mass is 6.4 kg, the lower frame equivalent mass is 6.6 kg, the lower arm equivalent stiffness is 10 N/m, the pantograph head equivalent damping is 40 to 60 N·s/m, and the lower arm equivalent damping is 130 N·s/m. The change in pantograph head equivalent mass has the greatest impact on PC dynamic response, followed by pantograph head equivalent stiffness, pantograph head, and upper frame equivalent damping, while the impact of lower arm equivalent mass is the smallest. The obtained optimal pantograph combination parameters suitable for ORC with a train operating speed of 200 km/h are pantograph head equivalent mass of 5.7 kg, lower arm equivalent mass of 4.6 kg, pantograph head equivalent stiffness of 10 373 N/m, pantograph head equivalent damping of 60 N·s/m, and upper frame equivalent damping of 40 N·s/m.

Key words metro; rigid catenary; pantograph

架空刚性接触网具有结构简单、安装空间小、设备维护方便、不易断线等诸多优点, 在城市轨道交通领域获得了广泛应用。目前, 架空刚性接触网已成为各大城市轨道交通隧道内架空接触网的主要形式^[1]。广州地铁 18 号线和 22 号线均采用 AC 25 kV 的架空刚性接触网, 根据最新的逐级提速试验结果可知, 列车最高运行速度能达到 176 km/h。随着科学技术的不断发展, 架空刚性接触网适用的列车运行速度逐渐提高, 由于接触网与受电弓的匹配性直接影响弓网系统的受流性能, 因此有必要开展与架空刚性接触网匹配的受电弓选型研究。目

* 广州地铁设计研究院股份有限公司自选科研项目 (KY-2022-134)

前,我国与架空刚性接触网匹配的受电弓分析多适用于列车运行速度为 160 km/h 的架空刚性接触网^[2-3],针对列车运行速度为 200 km/h 架空刚性接触网的受电弓关键参数研究相对较少。

本文针对列车运行速度为 200 km/h 的架空刚性接触网-受电弓系统匹配性问题,通过有限元仿真分析方法及正交试验设计法,对适用于列车运行速度为 200 km/h 架空刚性接触网的受电弓关键参数进行研究,确定合适的受电弓关键参数,以保证弓网系统良好的受流性能。本文研究可为适用于列车运行速度为 200 km/h 架空刚性接触网的受电弓选型及结构参数优化提供建议和参考。

1 弓网动力学性能分析

弓网耦合模型的精细程度会直接影响弓网系统的仿真计算结果,弓网耦合模型过于简单将会造成仿真结果误差较大,而弓网耦合模型过于复杂将会大幅增加计算工作量和计算成本,因此需选择合适的接触网-受电弓参数,构建弓网系统仿真分析模型。

1.1 刚性接触网参数

列车运行速度为 200 km/h 的架空刚性接触网参数如表 1 所示^[4]。

表 1 列车运行速度为 200 km/h 的架空刚性接触网参数
Tab.1 Parameters of rigid overhead catenary with a train operating speed of 200 km/h

参数	取值或型号
汇流排类型	Π 型
汇流排材料	铝合金
标准跨距/m	6
定位点刚度/(kN/m)	35(贯通式锚段关节)
拉出值/mm	±300
锚段长度/m	624
定位点静态几何偏差/mm	2

注:拉出值布置方式为类之字形。

1.2 受电弓参数

受电弓归算质量模型具有自由度少、计算效率高优点,在多刚体模型的基础上,利用动能等效原理,将受电弓等效成若干离散的质量-弹簧-阻尼单元^[5],本文采用考虑框架柔性的受电弓三质量模型,将受电弓分为弓头、上框架、下臂杆三级等效模型。参考国内某型受电弓的主要技术参数^[2],设定

其三质量块参数,如表 2 所示。

表 2 受电弓三质量块参数
Tab.2 Three-mass parameters of pantograph

参数	取值
弓头质量/kg	7.12
上框架质量/kg	6.00
下臂杆质量/kg	5.80
弓头刚度/(N/m)	9 430
上框架刚度/(N/m)	14 100
下臂杆刚度/(N/m)	10
弓头阻尼/(N·s/m)	0
上框架阻尼/(N·s/m)	0
下臂杆阻尼/(N·s/m)	70

1.3 弓网仿真系统模型

根据上述弓网参数,建立架空刚性接触网-受电弓仿真模型。汇流排及悬挂装置均采用梁等效模型,各部件之间通过耦合节点间的自由度实现连接,受电弓采用三质量块模型进行等效^[5]。

1.4 弓网动力学性能分析

在轨道交通行业内,通常采用弓网动态接触力来评估弓网受流性能。接触力的标准差可以表征弓网受流稳定性的变化情况。平均接触力 F_m 能够反映列车运行时受电弓和接触网的整体接触状态,可以表示为:

$$F_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (1)$$
$$i = 1, 2, \dots, n$$

式中:

F_i ——第 i 时刻的弓网瞬态接触力。

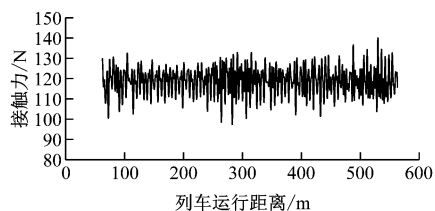
接触力标准差是评价弓网接触质量的一个重要指标,反映了接触力的离散程度,数值越小表示接触力离散程度越小,弓网关系越好,受电弓运行越平稳。接触力标准差 σ 可以表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - F_m)^2} \quad (2)$$

根据 EN 50367-2020 *Railway applications-Fixed installations and rolling stock-Criteria to achieve technical compatibility between pantographs and overhead contact line* 标准中的弓网相互作用参数评价指标,当列车运行在最高速度下的接触力标准差小于 $0.3F_m$ 时,弓网动态受流质量良好。弓网相互作用评价指标 F_p 可以表示为:

$$F_p = 0.3F_m - \sigma \quad (3)$$

基于所建立的架空刚性接触网-受电弓仿真分析模型,分析当列车运行速度为200 km/h时的弓网动态响应,如图1所示。其中:平均接触力为118.81 N;接触力标准差为6.27 N;接触力最小值为93.03 N;接触力最大值为119.13 N;接触力统计最小值为100 N; F_p 为29.37 N。



注:静态抬升力为80 N。

图1 列车运行速度为200 km/h时的弓网动态响应

Fig. 1 Pantograph-catenary dynamic response with a train operating speed of 200 km/h

由图1可知:当列车运行速度为200 km/h时,弓网动态响应的波形平稳,无异常情况。接触力平均值及 F_p 值均满足弓网相互作用参数评价指标的要求。由此可知,本文采用的受电弓三质量块参数能够满足列车运行速度为200 km/h 架空刚性接触网的受流要求。

2 受电弓关键参数设计分析

受电弓结构参数是影响弓网系统动力学特性的关键因素。在架空刚性接触网系统确定的前提下,如果受电弓结构参数不匹配,将会导致弓网振动加剧、受流质量恶化,进而导致弓网异常磨损,严重时还可能出现弓网事故等诸多问题。因此,有必要对受电弓结构参数进行优化,分析弓网的结构及参数是否匹配,研究弓头、上框架、下臂杆的质量、刚度及阻尼对弓网系统动力学特性的影响规律,以得到相对最优的受电弓结构参数,改善弓网关系,提高受流质量,降低弓网磨损。

基于所建立的架空刚性接触网-受电弓仿真分析模型,以弓网动态接触力作为评价弓网动态响应的指标,统计不同结构参数条件下的弓网接触力特征值,研究受电弓不同结构参数对弓网动态性能的影响。

2.1 受电弓等效质量对受流性能的影响

2.1.1 弓头等效质量

弓头等效质量变化对弓网动态接触力的影响

如图2所示。

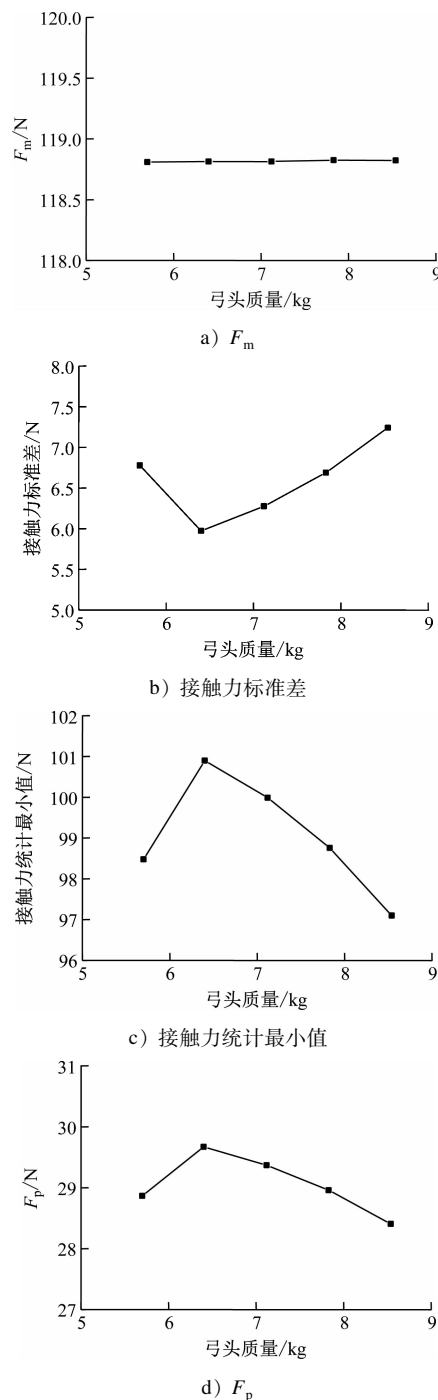


图2 弓头等效质量变化对弓网动态接触力的影响

Fig. 2 Impact of pantograph head equivalent mass changes on pantograph-catenary dynamic contact force

由图2可知:随着弓头等效质量的增加,接触力统计最小值先增大后减小,接触力标准差先减小后增大,说明对于该型受电弓,随着弓头等效质量的增加,弓网受流质量先提高后下降;当弓头质量为6.4 kg时,弓网受流质量最佳。为保证弓头的跟随

性,应减小弓头质量以利于受流,建议该型受电弓弓头等效质量取为 6.4 kg。

2.1.2 上框架等效质量

上框架等效质量的变化对弓网动态接触力的影响如图 3 所示。由图 3 可知:随着上框架等效质量的增加,接触力统计最小值先减小后增大再减小,接触力标准差先增大后减小再增大,说明对于

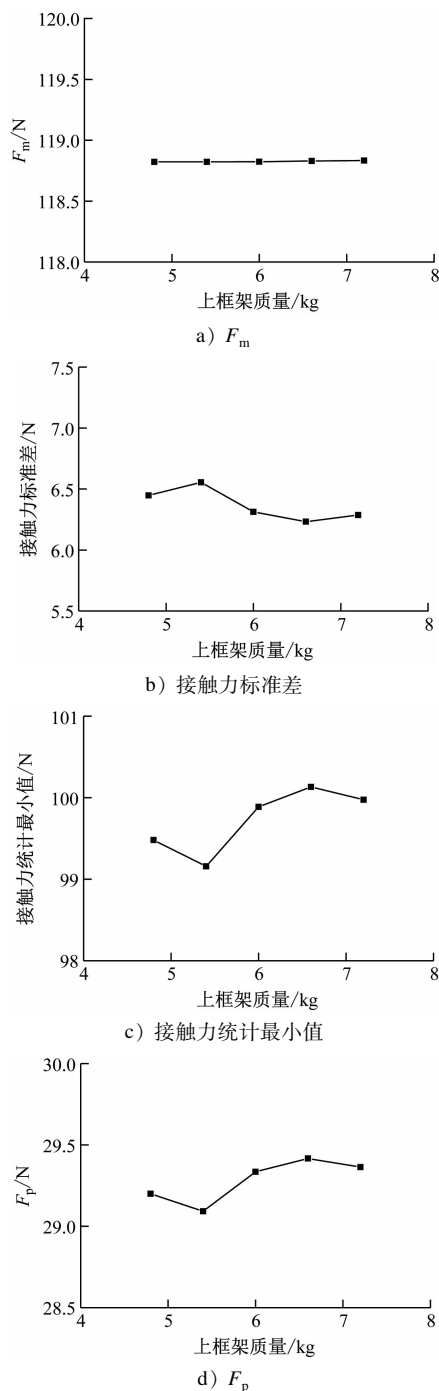


图 3 上框架等效质量变化对弓网动态接触力影响

Fig. 3 Impact of upper frame equivalent mass changes on pantograph-catenary dynamic contact force

该型受电弓,随着上框架等效质量的增加,弓网受流质量呈先下降后提高再下降的波动趋势;当上框架等效质量为 6.6 kg 时,受流质量最佳。建议该型受电弓上框架等效质量取为 6.6 kg。

2.1.3 下臂杆等效质量

下臂杆等效质量的变化对弓网动态接触力的影响如图 4 所示。由图 4 可知:随着下臂杆等效质

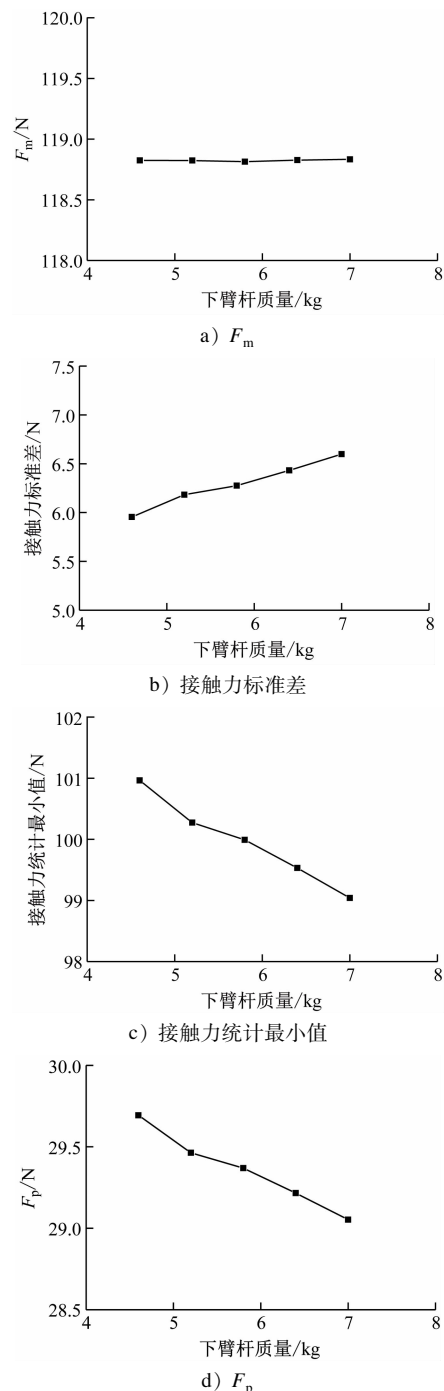


图 4 下臂杆等效质量变化对弓网动态接触力影响

Fig. 4 Impact of lower arm equivalent mass changes on pantograph-catenary dynamic contact force

量的增加,接触力统计最小值逐渐减小,接触力标准差逐渐增大。由此可知,对于该型受电弓,随着下臂杆等效质量的增加,弓网受流质量下降。从改善弓网动力性能角度来看,可以在原来基础上适当减少下臂杆等效质量。

2.2 受电弓等效刚度对受流性能的影响

2.2.1 弓头等效刚度

弓头等效刚度的变化对弓网动态接触力的影响如图5所示。

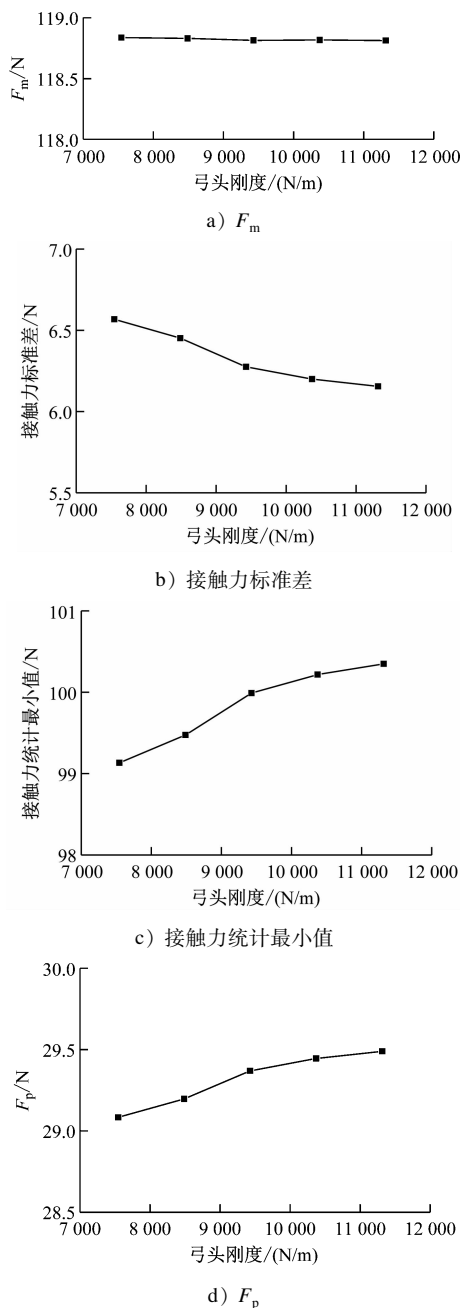


图5 弓头等效刚度变化对弓网动态接触力影响

Fig.5 Impact of pantograph head equivalent stiffness changes on pantograph-catenary dynamic contact force

由图5可知:随着弓头等效刚度的增加,接触力统计最小值逐渐增大,接触力标准差逐渐减少,且变化趋势逐渐趋于平缓。由此可知,对于该型受电弓,随着弓头等效刚度的增加,弓网受流质量逐渐提高,但提高程度逐渐趋于平缓。从改善弓网动力性能的角度来看,可以在原来基础上适当增加弓头等效刚度。

2.2.2 上框架等效刚度

上框架等效刚度的变化对弓网动态接触力的影响如图6所示。

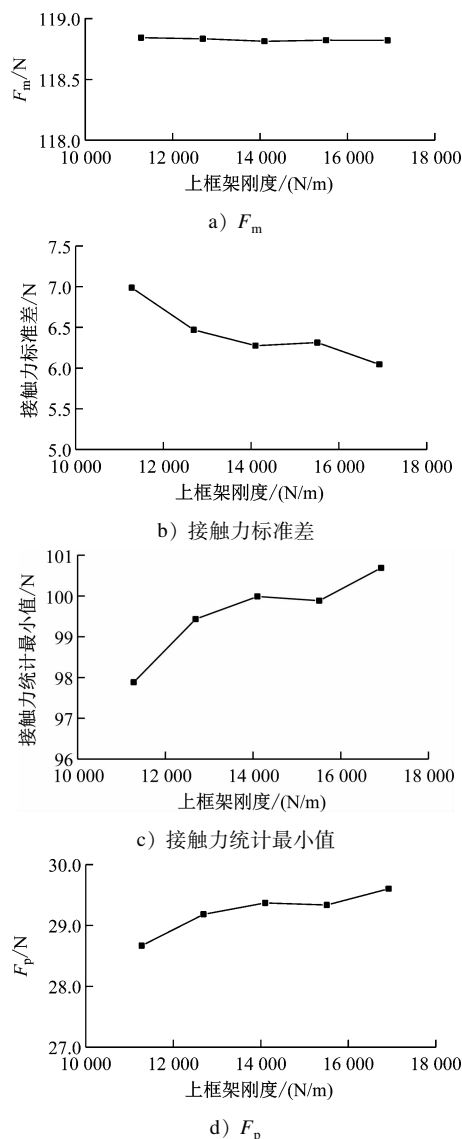


图6 上框架等效刚度变化对弓网动态接触力影响

Fig.6 Impact of upper frame equivalent stiffness changes on pantograph-catenary dynamic contact force

由图6可知:随着上框架等效刚度的增加,接触力统计最小值呈现先增大后减小再增大的趋势,接触力标准差变化趋势则相反。由此可知,对于该型

受电弓,随着上框架等效刚度的增加,弓网受流质量先提高后下降再提高。鉴于大幅增加上框架等效刚度对于弓网质量提高的幅度有限,建议该型受电弓保持原有的上框架等效刚度。

2.2.3 下臂杆等效刚度

下臂杆等效刚度的变化对弓网动态接触力的影响如图 7 所示。

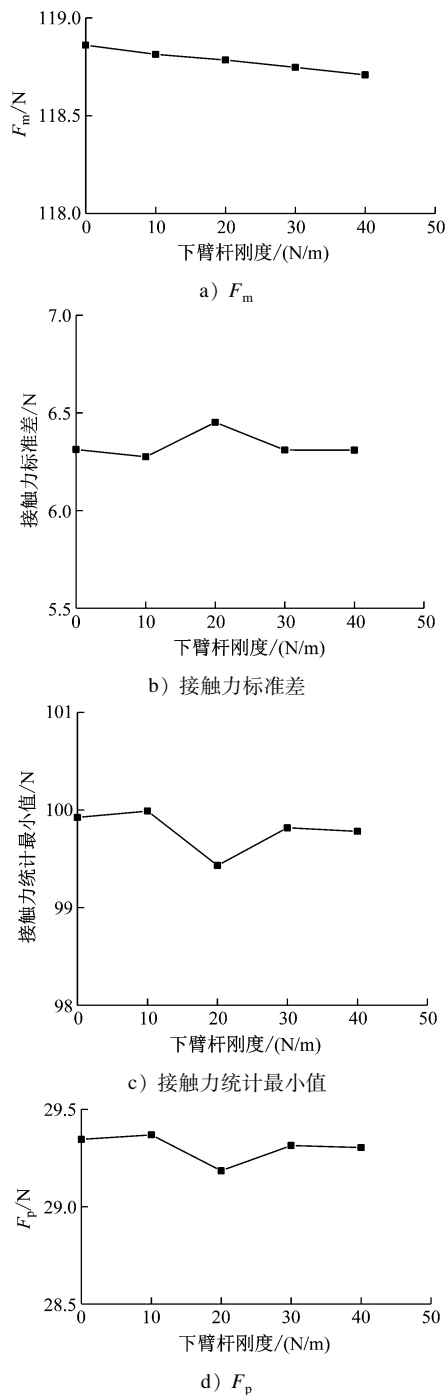


图 7 下臂杆等效刚度变化对弓网动态接触力影响

Fig. 7 Impact of lower arm equivalent stiffness changes on pantograph-catenary dynamic contact force

由图 7 可知:随着下臂杆等效刚度的增加,接触力统计最小值及接触力标准差均出现了波动情况;当下臂杆等效刚度为 10 N/m 时,对应的弓网接触力统计最小值有最大值,接触力标准差有最小值。由此可知,此时的弓网受流质量最佳,建议该型受电弓下臂杆等效刚度取为 10 N/m。

2.3 受电弓等效阻尼对受流性能的影响

2.3.1 弓头等效阻尼

弓头等效阻尼的变化对弓网动态接触力的影响如图 8 所示。

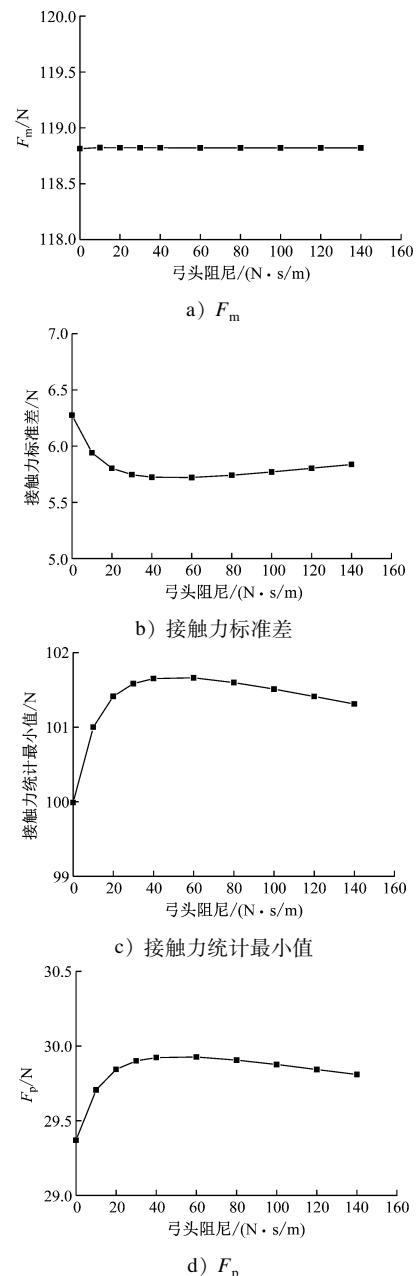


图 8 弓头等效阻尼变化对弓网动态接触力影响

Fig. 8 Impact of pantograph head equivalent damping changes on pantograph-catenary dynamic contact force

由图8可知:随着弓头等效阻尼的增加,接触力统计最小值先增大后减小,接触力标准差先减小后增大;当弓头等效阻尼取为40~60 N·s/m时,受流质量相对最佳。由此可知,对于该型受电弓,随着弓头等效阻尼的增加,弓网受流质量先提高后下降。建议该型受电弓弓头等效阻尼取为40~60 N·s/m。

2.3.2 上框架等效阻尼

上框架等效阻尼的变化对弓网动态接触力的影响如图9所示。

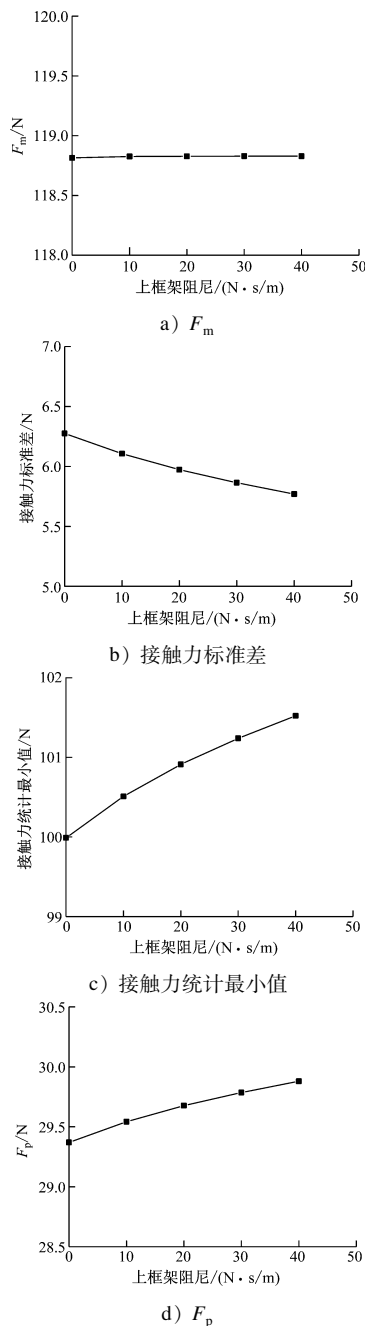


图9 上框架等效阻尼变化对弓网动态接触力影响

Fig. 9 Impact of upper frame equivalent damping changes on pantograph-catenary dynamic contact force

由图9可知:随着上框架等效阻尼的增加,接触力统计最小值逐渐增大,接触力标准差逐渐减小。由此可知,对于该型受电弓,随着上框架等效阻尼的增加,弓网受流质量逐渐提高。从改善弓网动力学性能角度来看,可以在原来基础上适当增加上框架等效阻尼。

2.3.3 下臂杆等效阻尼

下臂杆等效阻尼的变化对弓网动态接触力的影响如图10所示。

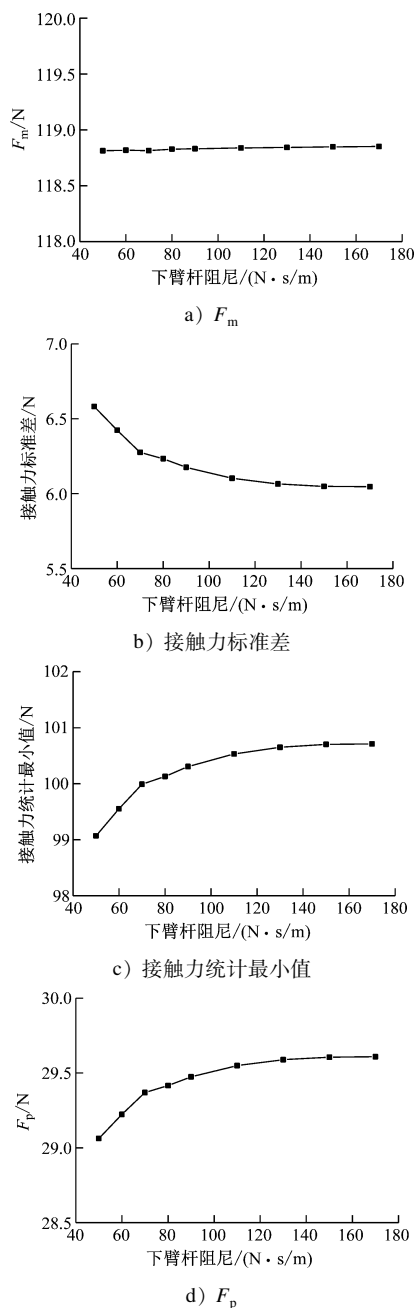


图10 下臂杆等效阻尼变化对弓网接触力影响

Fig. 10 Impact of lower arm equivalent damping changes on pantograph-catenary dynamic contact force

由图 10 可知:随着下臂杆等效阻尼的增加,接触力统计最小值逐渐增大,接触力标准差逐渐减小,变化趋势均趋于平缓。由此可知:对于该型受电弓,随着下臂杆等效阻尼的增加,弓网受流质量逐渐提高,但提高程度逐渐减小;当上框架等效阻尼为 $130 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 时,下臂杆等效阻尼的增加对弓网受流质量的改善作用已不明显。从改善弓网动力学性能角度来看,建议该型受电弓下臂杆等效阻尼取为 $130 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 。

3 多参数影响规律分析

在实际工程中,弓网动态响应是多因素相互作用的结果,单参数相对最优取值组合后的弓网动态相互作用并不一定是最优的。因此,只研究单参数变化对弓网动态的影响,无法得到多参数同时作用时对弓网动态相互作用的影响规律。

基于上述分析结果,采用正交试验设计法^[6],分析弓头等效质量 m_1 、下臂杆等效质量 m_3 、弓头等效刚度 K_1 、弓头等效阻尼 C_1 、上框架等效阻尼 C_2 同时变化时,对弓网动态性能的影响,并以此确定弓网动力性能的最大影响参数,获得能够改善弓网受流质量的优水平组合,从而为适用于列车运行速度为 $200 \text{ km}/\text{h}$ 架空刚性接触网受电弓的结构优化及设计提供建议和参考。采用正交试验设计法建立的受电弓因素水平表如表 3 所示。

表 3 受电弓因素水平表

Tab.3 Pantograph factor levels

水平	因素				
	$m_1/$ kg	$m_3/$ kg	$K_1/$ (N/m)	$C_1/$ (N·s/m)	$C_2/$ (N·s/m)
1	5.70	4.6	7 544	0	0
2	6.40	5.2	8 487	20	10
3	7.12	5.8	9 430	40	20
4	7.83	6.4	10 373	60	30
5	8.54	7.0	11 316	80	40

选取 5 个受电弓关键因素,每个因素具有 5 个水平,选用 $L_{25}(5^5)$ 正交试验表,共进行 25 组试验,每个试验号由 5 个因素的特定水平组合,将每组试验参数作为弓网仿真模型中受电弓的输入参数进行弓网动态响应仿真,进而获得弓网动态接触力特征值。受电弓正交试验及其结果如表 4 所示,受电弓正交试验结果如图 11 所示。由表 4 可知:对 25

表 4 受电弓正交试验及其结果

Tab.4 Pantograph orthogonal tests and results

试验号	因素					F_p/N
	m_1	m_3	K_1	C_1	C_2	
1	1	1	1	1	1	29.257
2	1	2	2	2	2	30.242
3	1	3	3	3	3	30.790
4	1	4	4	4	4	31.058
5	1	5	5	5	5	31.153
6	2	1	2	3	4	30.655
7	2	2	3	4	5	30.768
8	2	3	4	5	1	30.556
9	2	4	5	1	2	29.642
10	2	5	1	2	3	29.924
11	3	1	3	5	2	30.250
12	3	2	4	1	3	30.049
13	3	3	5	2	4	30.314
14	3	4	1	3	5	29.829
15	3	5	2	4	1	29.737
16	4	1	4	2	5	30.188
17	4	2	5	3	1	29.556
18	4	3	1	4	2	29.146
19	4	4	2	5	3	29.167
20	4	5	3	1	4	29.126
21	5	1	5	4	3	29.365
22	5	2	1	5	4	28.471
23	5	3	2	1	5	28.741
24	5	4	3	2	1	28.622
25	5	5	4	3	2	28.567

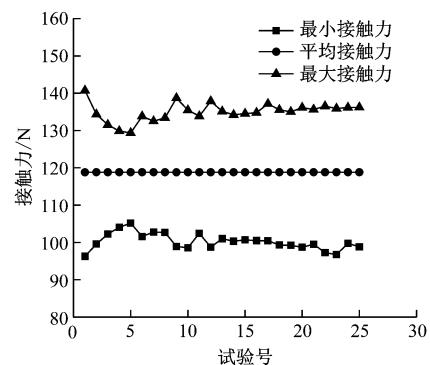


图 11 受电弓正交试验结果

Fig.11 Pantograph orthogonal test results

个水平的正交试验结果进行比较,所有试验的最小及最大接触力范围均未超出标准要求,所有试验的

F_p 值均大于0,满足标准要求,均能作为受电弓的有效设计参数。

对正交试验结果进行直观分析可以获得各项因素的极差、优水平、优组合。建立直观分析表对受电弓正交试验结果进行分析,如表5所示。选用2个评价指标进行评价: $Q_{\alpha j}$ 为各因素、各水平的平均效应,每个因素中 $Q_{\alpha j}$ 的最大值对应应该因素的优水平; R_{α} 为极差,代表每个因素的变化程度,其值越大,所对应的因素对指标的影响程度就越高。 $Q_{\alpha j}$ 和 R_{α} 可以表示为:

$$Q_{\alpha j} = \frac{\sum_{g=t_{j1}}^{t_{j5}} (0.3F_p)_g}{5} \quad (4)$$

$$R_{\alpha} = \max Q_{\alpha j} - \min Q_{\alpha j} \quad (5)$$

式中:

t_{jx} ——含 j 水平的第 x 个试验, $x=1,2,\dots,5$;

$\max Q_{\alpha j}$ —— $Q_{\alpha j}$ 的最大值;

$\min Q_{\alpha j}$ —— $Q_{\alpha j}$ 的最小值。

表5 受电弓正交试验结果直观分析表

Tab.5 Visual analysis list of pantograph orthogonal test results

项目	m_1 / kg	m_3 / kg	K_1 / (N/m)	C_1 / (N·s/m)	C_2 / (N·s/m)
$Q_{\alpha 1}$	30.500	29.943	29.325	29.363	29.545
$Q_{\alpha 2}$	30.309	29.817	29.708	29.858	29.569
$Q_{\alpha 3}$	30.036	29.909	29.911	29.879	29.859
$Q_{\alpha 4}$	29.437	29.664	30.083	30.015	29.925
$Q_{\alpha 5}$	28.753	29.701	30.006	29.919	30.136
R_{α}	1.747	0.279	0.758	0.652	0.591

注:弓头等效质量 m_1 的优水平为 $m_1(1)$;弓头等效刚度 K_1 的优水平为 $K_1(4)$;弓头等效阻尼 C_1 的优水平为 $C_1(4)$;上框架等效阻尼 C_2 的优水平为 $C_2(5)$;下臂杆等效质量 m_3 的优水平为 $m_3(1)$;该型受电弓参数的优先级排序为 m_1 、 K_1 、 C_1 、 C_2 、 m_3 。

由表5可知:由指标平均效应获得的该型受电弓参数的优水平组合为 $m_1(1)$ 、 $K_1(4)$ 、 $C_1(4)$ 、 $C_2(5)$ 、 $m_3(1)$,根据参数敏感度大小排序为弓头等效质量 m_1 、弓头等效刚度 K_1 、弓头等效阻尼 C_1 、上框架等效阻尼 C_2 、下臂杆等效质量 m_3 。随着弓头和下臂杆等效质量的增加, $Q_{\alpha j}$ 值逐渐减小,说明弓头及下臂杆等效质量越小越好;随着弓头等效刚度及弓头、上框架等效阻尼的增加, $Q_{\alpha j}$ 值变化规律不定,说明这些等效参数需选取适当值。在所有参数中,弓头等效质量的极差明显大于其他参数,说明

弓头等效质量对弓网接触力的影响更为明显,因此需适当减小受电弓弓头等效质量。在实际工程中,可以从弓角、弓头悬挂采用质量更轻的金属材料,滑板采用新型碳纤维材料或多元碳化物材料等角度出发开展进一步研究,以达到有效改变弓头质量的效果。

经过弓网系统动力学仿真,原方案及优组合方案的接触力波形对比如图12所示,两种方案的接触力特征值对比如表6所示。由图12及表6可知:相比原方案,优组合的接触力波形更为平缓,接触力标准差明显变小,振动情况明显减弱,弓网关系好,优组合方案下的弓网动态性能更优。得到适用于200 km/h 架空刚性接触网的受电弓优组合参数为:弓头等效质量5.7 kg、下臂杆等效质量4.6 kg、弓头等效刚度10 373 N/m、弓头等效阻尼60 N·s/m、上框架等效阻尼40 N·s/m。

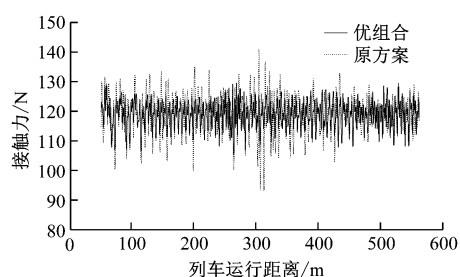


图12 受电弓优组合与原方案接触力波形对比

Fig. 12 Comparison of contact force waveforms between pantograph optimal combination and original scheme

表6 受电弓优组合与原方案的接触力统计特征值对比

Tab.6 Comparison of contact force statistical characteristic values between pantograph optimal combination and original scheme

方案	最小接触力/N	平均接触力/N	最大接触力/N	接触力标准差/N	F_p /N
原方案	93.03	118.81	140.98	6.27	29.37
优组合方案	105.41	118.82	129.36	4.23	31.41

4 结语

架空刚性接触网由于其安装方便、维护量小等优点被广泛使用,随着列车运行速度等级不断提高,选择与之匹配的受电弓参数尤为重要。本文针对适用于列车运行速度为200 km/h 架空刚性接触网的受电弓关键参数开展研究,主要获得以下结论:

1) 该型受电弓能够满足列车运行速度为200

km/h 架空刚性接触网的受流要求。

2) 针对该型受电弓,单一参数变化的相对最优取值为弓头等效质量 6.4 kg,下框架等效质量 6.6 kg,下臂杆等效刚度 10 N/m,弓头等效阻尼 40 ~ 60 N·s/m,下臂杆等效阻尼 130 N·s/m。

3) 弓头等效质量变化对弓网动态响应的影响最大,弓头等效刚度、弓头及上框架等效阻尼次之,下臂杆等效质量的影响最小。所获得的适用于列车运行速度为 200 km/h 架空刚性接触网的受电弓优组合参数为弓头等效质量 5.7 kg,下臂杆等效质量 4.6 kg,弓头等效刚度 10 373 N/m、弓头等效阻尼 60 N·s/m,上框架等效阻尼 40 N·s/m。所获得的参数取值可以作为受电弓结构参数优化的参考指标。

参考文献

- [1] 关金发, 吴积钦, 方岩. 刚性接触网的研究综述及展望[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(6): 37.
GUAN Jinfa, WU Jiqin, FANG Yan. Review and prospect of research on overhead conductor rail[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(6): 37.
- [2] 蔚超. 适用于 AC 25 kV 160 km/h 刚性接触网的受电弓选型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WEI Chao. Study on pantograph selection for AC 25 kV 160 km/h rigid catenary [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,

2019.

- [3] 孙宁, 陈珍宝, 梁坤, 等. 160 km/h 速度等级刚性接触网受电弓弓网动态仿真分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(3): 49.
SUN Ning, CHEN Zhenbao, LIANG Kun, et al. Pantograph and catenary dynamic simulation analysis for 160 km/h pantograph under rigid catenary condition [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(3): 49.
- [4] 代洪宇. 200 km/h 交流刚性接触网方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
DAI Hongyu. Research on 200 km/h AC rigid catenary scheme [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [5] 关金发. 受电弓与刚性接触网动力相互作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
GUAN Jinfa. Study on dynamic interaction between pantograph and overhead conductor rail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [6] 何映平. 试验设计与分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
HE Yingping. Experimental design and analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.

· 收稿日期:2021-08-11 修回日期:2021-09-11 出版日期:2024-07-10
Received:2021-08-11 Revised:2021-09-11 Published:2024-07-10
· 通信作者:田彩,工程师,tiancai@dsjy.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

中国中车“双碳”新方案、新装备亮相国际城市轨道交通展

6月13日,“2024北京-南京国际城市轨道交通展览会暨高峰论坛”在南京国际博览中心开幕。此次展会上,中国中车以“绿智融合,重构优化”为主题,携数字化、智能化、绿色化技术支撑下的全生命周期轨道交通系统解决方案,碳纤维复合材料应用实例,以及应用于轨道交通建设运维的新型工程装备等精彩亮相。

中国中车集中聚焦“融合重构优化”,从“系统+”业务模式、“产品+”业务模式、系列化中国标准地铁列车、系列化中国标准智能市域列车、中车双碳解决方案、多元化中小运量解决方案等6大板块,以实车亮相、实物展示、模型呈现、沙盘模拟等方式,向各国客商充分展现创新发展的最新成果。

近年来,中国中车加速打造多种以“基于场景做重构,基于逻辑做融合,基于安全做优化”的城市轨道交通装备发展理念,以及贯穿设计、建设、运营全生命周期的系统解决方案。目前,这些解决方案,已开始应用于城市轨道交通,包括:具有优异制热、环保、节能特性的新型二氧化碳空调,采用新一代洁净气体的高性能、环保型非储压灭火装置,体积小、质量轻、效率高、更环保的镉镍和镍氢蓄电池,以及以碳化硅永磁牵引逆变器、碳化硅高频辅助变流器、碳化硅永磁牵引控制单元为代表的碳化硅应用场景。

展会上,中国中车展出了自主研制的4种系列化中国标准地铁列车,以及时速160 km市域C、时速160 km市域D型动车组和时速200 km新型都市快轨列车。

(摘编自《科技日报》)