

不同型号双弓混合编组时的弓网动力学特性研究^{*}

鲁文伟 周 宁 陈鸿明 王旭阳 程 尧 张卫华

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都)

摘 要 [目的] 双弓运行时, 受前弓的影响, 后弓的弓网动态受流质量往往会有所降低。有必要对双弓混编时的接触网-受电弓动态相互作用进行研究。[方法] 建立了接触网的有限元模型和受电弓的集中质量模型。首先, 分析运行时受电弓参数对后方各位置处接触线平均抬升量的影响; 然后, 以此为基础分析前弓参数对后弓动力学性能的影响; 最后, 推广至双弓混编时的弓网动力学性能分析。[结果及结论] 不同受电弓引起的抬升量幅值不同, 受电弓性能越好, 抬升量幅值越低。对比受电弓集中质量模型的9个参数发现, 下框架与底架之间的阻尼 c_3 对抬升量幅值影响较大, 调整 c_3 的值可以有效提升受电弓的受流质量进而降低接触线抬升量的波动幅值。双弓混编运行时, 若前弓的动力学性能较好, 后弓的受流质量也会偏好; 若前弓的动力学性能较差, 可以通过调整 c_3 的值来降低前弓后方各位置处接触线平均抬升量的波动幅值, 进而优化后弓的动力学性能。

关键词 轨道交通; 弓网系统; 双弓受流; 双弓混合编组
中图分类号 U225

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.031

Research on Pantograph-Catenary Dynamics Characteristics in Mixed Double Pantographs Formation of Different Types

LU Wenwei, ZHOU Ning, CHEN Hongming, WANG Xuyang, CHENG Yao, ZHANG Weihua

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Due to the influence of the leading pantograph in double pantographs operation, the current collection performance of the trailing pantograph often degrades. It is necessary to study the dynamic interaction of the PC (pantograph-catenary) system when double pantographs are mixed. [Method] A finite element model of catenary and a lumped mass model of pantograph are established. Firstly, during operation the effect of the pantograph's parameters on the average uplift of the contact wires at the rear locations is analyzed; then based on this, the effect of the leading pantograph's parameters

on the trailing pantograph dynamics is analyzed; and finally it is extended to the analysis of the PC dynamics performance in the case of mixed double pantographs. [Result & Conclusion] The uplift amplitude caused by different pantographs is varied. The better the performance of the pantograph, the lower the uplift amplitude. By comparing the 9 parameters of the pantograph lumped mass model, it is found that the damping between the lower frame and the bottom frame c_3 has a significant influence on the uplift amplitude. Therefore, adjusting the value of c_3 can effectively improve the current collection quality of pantograph and thus reduce the fluctuation amplitude of contact line uplift. When two different pantographs are in mixed operation, if the dynamic performance of the leading pantograph is better, the current collection quality of trailing pantograph will also be better; if the dynamic performance of leading pantograph is poor, the fluctuation amplitude of the average contact line uplift amount at each position behind the leading pantograph can be reduced by adjusting the value of c_3 , thereby optimizing dynamics performance of the trailing pantograph.

Key words rail transit; PC system; double pantographs; mixed double pantographs formation

两列动车组或地铁列车重联运行时, 需要配备双受电弓来保证取电^[1]。此时受前弓引起的振动波影响, 后弓受流质量恶化^[2]。针对双弓受流问题, 国内外诸多学者进行了大量研究, 提出了两类主要解决方案: 第一类, 选择合理的弓间距, 以提高后弓的受流质量^[3]; 第二类, 减小前弓引起的振动波强度, 从而降低其对后弓受流的影响^[4]。然而无论是双弓间距的研究^[5-6], 还是受电弓的优化研究^[7], 都是针对两个相同型号的受电弓, 很少有针对两个不同型号受电弓的研究。随着受电弓技术的换代升级, 不同批次动车组或列车会换装不同型号的受电弓。因此, 动车组或列车重联可能会出现前后弓型号不同的情况。

^{*} 国家自然科学基金项目(52072319); 四川省科技计划重点研发项目(2021YFG0066); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(K2021J004-B、P2021J003)

对此,本文基于有限单元法建立接触网模型和受电弓的三质量块模型,通过接触力元将二者耦合,并基于多体动力学仿真软件完成弓网动力学仿真,研究不同型号双弓混编时的弓网受流性能,并分析混编受电弓对后弓受流质量的影响。

1 建立弓网模型

1.1 接触网模型

本文采用有限元方法直接定义接触网在空间上的几何位置及拓扑关系,从而得到接触网的几何模型^[8-10]。在接触网有限元模型中:接触线和承力索采用梁单元模拟;通过分模法计算吊弦长度^[11],并采用杆单元模拟吊弦。接触网结构如图 1 所示。

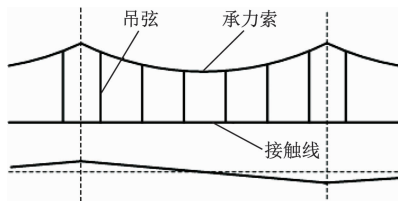


图 1 接触网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of catenary structure

接触网动力学平衡方程为:

$$\mathbf{M}_c \ddot{\mathbf{u}}_c + \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{u}}_c + \mathbf{K}_c \mathbf{u}_c = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

式中:

\mathbf{M}_c ——接触网质量矩阵;

\mathbf{C}_c ——接触网阻尼矩阵;

\mathbf{K}_c ——接触网刚度矩阵;

$\ddot{\mathbf{u}}_c$ —— t 时刻接触网节点加速度向量;

$\dot{\mathbf{u}}_c$ —— t 时刻接触网节点速度向量;

\mathbf{u}_c —— t 时刻接触网节点位移向量;

$\mathbf{f}(t)$ —— t 时刻接触网节点载荷向量。

接触网结构参数如表 1 所示。

表 1 接触网结构参数表

Tab. 1 Catenary structure parameters table

| 部件 | 张力/ kN | 线密度/ (kg/m) | 弹性模量/ (kN/mm ²) | 跨距或吊弦 间距/m |
|-----|-----------|----------------|--------------------------------|---------------|
| 承力索 | 21 | 1.068 | 103 | 48 |
| 接触线 | 27 | 1.082 | 130 | 48 |
| 吊弦 | | 0.090 | | 4,8,8,8,8,8,4 |

1.2 受电弓模型

集中质量模型是目前最常用的受电弓模型之一,具有自由度小,计算效率高的优点。本文将受

电弓简化为具有 3 个自由度的三质量块模型,如图 2 所示。该模型将受电弓分为 3 个部分^[12]。三质量块模型的运动微分方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1(z_1 - z_2) = -P_t \\ m_2 \ddot{z}_2 + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + k_2(z_2 - z_3) + \\ \quad c_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_1(z_2 - z_1) = 0 \\ m_3 \ddot{z}_3 + c_3 \dot{z}_3 + k_3 z_3 + c_2(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + \\ \quad k_2(z_3 - z_2) = F_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

m_1 ——弓头质量;

m_2 ——上框架质量;

m_3 ——下框架质量;

k_1 ——弓头与上框架之间的刚度;

k_2 ——上框架和下框架之间的刚度;

k_3 ——下框架与底架之间的刚度;

c_1 ——弓头与上框架之间的阻尼;

c_2 ——上框架和下框架之间的阻尼;

c_3 ——下框架与底架之间的阻尼;

$z_1, \dot{z}_1, \ddot{z}_1$ ——弓头位移、速度、加速度;

$z_2, \dot{z}_2, \ddot{z}_2$ ——上框架位移、速度、加速度;

$z_3, \dot{z}_3, \ddot{z}_3$ ——下框架位移、速度、加速度;

P_t —— t 时刻接触网和受电弓的动态接触力;

F_0 ——受电弓的静态抬升力。

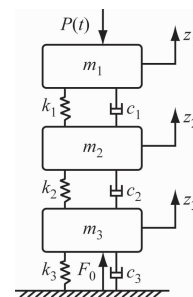


图 2 受电弓集中质量模型

Fig. 2 Pantograph lumped mass model

为便于研究,本文按某项目情况将前后弓分别选为 CX 型受电弓和 DSA380 型受电弓。受电弓三质量块参数见表 2。

1.3 弓网耦合模型

接触性能是评估弓网相互作用的关键属性之一。接触方法的选择更会直接影响到计算结果的准确性。本文在多体动力学软件中通过接触力元来模拟受电弓和接触网的接触^[13],不仅考虑了接触体的几何外形,而且具有计算效率高的优点。接触

表2 受电弓参数表

Tab.2 Pantograph parameters table

| 受电弓型号 | m_1/kg | m_2/kg | m_3/kg | $k_1/(\text{N/m})$ | $k_2/(\text{N/m})$ | $k_3/(\text{N/m})$ | $c_1/(\text{Ns/m})$ | $c_2/(\text{Ns/m})$ | $c_3/(\text{Ns/m})$ | F_0/N |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| CX 型 | 5.30 | 9.98 | 9.00 | 6 000 | 8 971 | 0.50 | 5 | 5 | 350 | 70 |
| DSA380 型 | 7.12 | 6.00 | 5.80 | 9 430 | 14 100 | 0.10 | 0 | 0 | 70 | 70 |

力元采用线性力法,其接触力计算方法与罚函数法类似^[14],可表示为:

$$F = \begin{cases} 0, & z_p \leq z_c \\ k_c(z_p - z_c), & z_p > z_c \end{cases} \quad (3)$$

式中:

z_p ——弓头垂向位移;

z_c ——接触位置处接触线的垂向位移;

k_c ——接触刚度;本文中, $k_c = 50 \text{ kN/m}$ ^[15]。

1.4 弓网模型验证

根据 EN 50318:2018 *Railway applications current collection systems-validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line*^[16]中弓网仿真模型的验证要求,建立双受电弓的弓网模型并进行仿真验证。其中,前后弓的运动速度分别为 275 km/h 和 320 km/h,前后弓间距为 200 m。弓网模型仿真验证结果如表 3 所示。

表3 弓网模型仿真验证结果

Tab.3 Simulation verification results of the PC model

| 速度/ (km/h) | 受电弓 | 接触力 平均值/N | 接触力 标准差/N | 接触力标准差/N | | 实际最大 接触力/N | 实际最小 接触力/N | 接触线垂向 位移/mm | 离线率 |
|---------------|-----|--------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|-----|
| | | | | 频率为 0 ~ 5 Hz | 频率为 > 5 ~ 20 Hz | | | | |
| 275 | 前弓 | 144.41 | 33.96 | 27.22 | 16.31 | 236.68 | 76.35 | 47.97 | 0 |
| | 后弓 | 146.62 | 53.64 | 42.33 | 26.12 | 279.96 | 44.16 | 67.75 | 0 |
| 320 | 前弓 | 167.93 | 60.85 | 39.22 | 43.46 | 334.75 | 59.18 | 49.70 | 0 |
| | 后弓 | 168.14 | 43.29 | 23.18 | 37.79 | 314.44 | 23.19 | 34.51 | 0 |

经比较,表 3 的仿真结果符合 EN 50318:2018 的规定要求。由此可见,该建模方法具备足够的精度和准确度,可以被用来进行弓网相互作用的仿真。

2 单弓工况的动力学性能

目前研究表明:双弓运行时前弓会在接触点的后方引起呈一定周期变化的振动波形,后弓的受流质量也会随着弓间距的变化而周期性地变差^[2];因此,可以通过将后弓放置于合适的位置来改善后弓的受流质量。然而很少有研究将目光放置于前弓。本文以前弓为基础,先分析受电弓参数对振动波的影响(表现为接触线抬升量),由于前弓引起的振动波会对后弓的动力学性能产生影响,进而引申至前弓的参数对后弓动力学性能的影响。

2.1 单弓工况的动力学分析

以简单链型悬挂接触网为分析对象,参数按表 1 取值。在单弓工况下,分析不同受电弓的受流质量差异及受电弓后方接触线在运行时的抬升量变化。

采样点的布置如图 3 所示。在受电弓运动时,采样点以相同的速度随受电弓移动,各采样点与受

电弓之间的距离保持不变,采样点的间隔为 10 m。

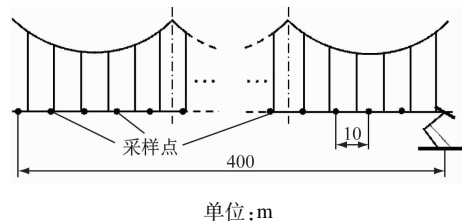


图3 采样点布置

Fig.3 Layout of sampling points

选取 CX 型受电弓和 DSA380 型受电弓,以 250 km/h 速度以单弓工况沿接触网运动。计算各采样点处的接触网平均抬升量,绘制接触线平均抬升量随受电弓与采样点间距离的变化曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知:单弓运行时,受电弓后方接触线抬升量随受电弓与采样点的距离呈周期性波动;不同型号的受电弓在同一条接触线上运行时,波动的空间周期相同;与 CX 型受电弓相比,DSA380 型受电弓引起的接触线波动幅值明显更大。

经弓网耦合模型计算,受电弓的接触力时程曲线如图 5 所示。

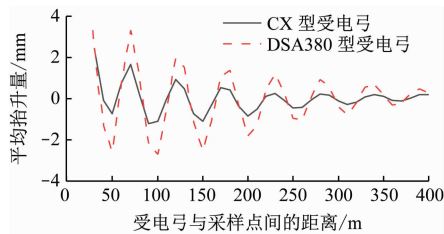


图4 不同单弓的接触线抬升量均值变化曲线

Fig. 4 Change curves of contact wire average uplift values for different single pantographs

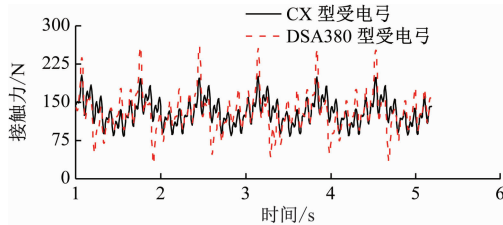


图5 不同单弓接触力比较

Fig. 5 Comparison of contact forces for different single pantographs

由图5可以看出, DSA380型受电弓的动力学性能较差。对于接触力标准差, DSA380型受电弓为38.9 N, CX型受电弓为25.7 N。这说明 DSA380型受电弓接触力的波动更为激烈, 其动力学性能也相对较差。

结合图4和图5不难发现, 不同受电弓的动力学性能会有所差异, 而动力学性能较差的受电弓会引起其后方不同位置处的接触线产生较大的平均抬升量。

2.2 动力学参数影响分析

2.2.1 确认关键参数

对于受电弓的集中质量模型来说, 不同受电弓的差异主要体现在9个参数(见表2)的不同。为确认影响接触线抬升量变化的关键参数, 以 DSA380型受电弓为基础, 在9个参数中, 依次取1个参数按 CX型受电弓相应参数取值, 并保持其他参数不变, 计算各采样点处的相应接触线平均抬升量, 绘制相应的接触线平均抬升量变化曲线如图6所示, 统计相应的受电弓接触力如表4所示。

由图6可以看出: 当将 DSA380型受电弓的质量和刚度分别按 CX型受电弓相应参数取值时, 受电弓后方接触线的抬升量曲线几乎未发生变化, 说明质量参数及刚度参数取值对受电弓后方接触线抬升量影响较小; 当改变 c_3 时, 接触线平均抬升量幅值降低, 接近 CX型受电弓的接触线平均抬升量, 说明 c_3 为影响接触线抬升量变化的关键参数。

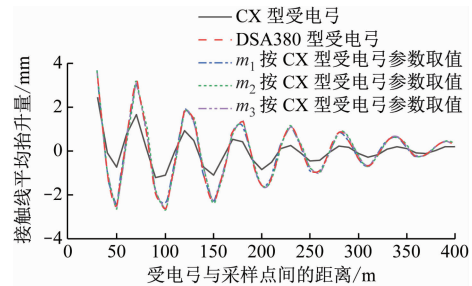
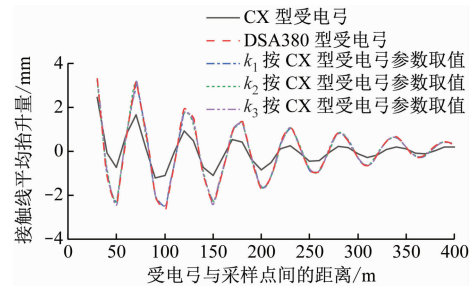
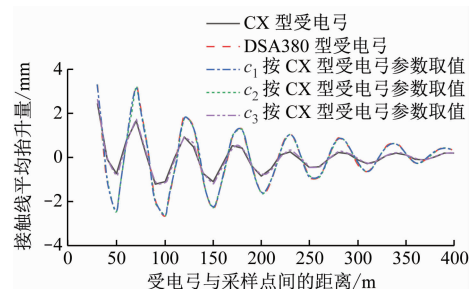
a) 质量参数(m_1 、 m_2 、 m_3)变化b) 刚度参数(k_1 、 k_2 、 k_3)变化c) 阻尼参数(c_1 、 c_2 、 c_3)变化

图6 不同参数取值时的接触线平均抬升量变化曲线

Fig. 6 Change curves of contact wire average uplift amount under different parameter values

表4 不同参数取值时的接触力

Tab. 4 Contact forces under different parameter values

| 按 CX 型受电弓 取值的参数 | 接触力/ N | | | |
|--------------------|--------|-------|--------|-------|
| | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 标准差 |
| m_1 | 259.84 | 21.52 | 129.89 | 35.11 |
| m_2 | 272.54 | 34.85 | 130.21 | 42.74 |
| m_3 | 270.56 | 25.87 | 130.04 | 43.39 |
| k_1 | 255.65 | 35.77 | 130.11 | 39.76 |
| k_2 | 265.39 | 14.18 | 131.77 | 43.84 |
| k_3 | 259.56 | 28.52 | 130.40 | 38.44 |
| c_1 | 259.21 | 29.62 | 130.54 | 38.29 |
| c_2 | 258.92 | 29.67 | 130.70 | 38.17 |
| c_3 | 233.98 | 68.72 | 129.51 | 33.78 |
| 无 | 260.22 | 29.36 | 130.87 | 38.89 |

从表4中可以看出: 当 m_2 、 m_3 、 k_2 按 CX型受电

弓取值时,接触力标准差明显增大,受电弓受流质量较差;当 m_1 、 k_1 、 k_3 、 c_1 、 c_2 按 CX 型受电弓取值时,接触力标准差基本不变,说明这些参数对受流质量影响较小;当 c_3 按 CX 型受电弓取值时,接触力标准差最低,说明此时的受电弓受流质量最优。

结合图 6 和表 4 可以发现,当将 DSA380 型受电弓的 c_3 按 CX 型受电弓取值时,不仅会优化受电弓的受流质量,还会降低受电弓后方接触线平均抬升量幅值,使之接近 CX 型受电弓的相应值。这也间接说明受电弓的动力学性能越好,受电弓后方接触线的平均抬升量幅值就会越低。

2.2.2 关键参数的影响

为了进一步分析 c_3 对接触线抬升量和受电弓动力学性能的影响,以 DSA380 型受电弓为例,分别将 c_3 增大为 140 Ns/m、210 Ns/m、280 Ns/m、350 Ns/m、420 Ns/m、490 Ns/m、560 Ns/m。各位置处接触线平均抬升量如图 7 所示。

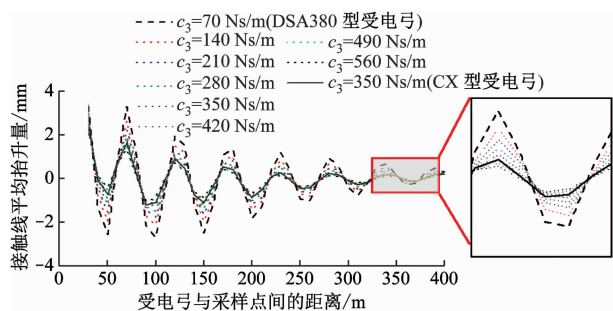


图 7 不同 c_3 的接触线平均抬升量变化曲线

Fig. 7 Change curves of contact wire average uplift amount under different c_3

从图 7 可以看出:随着 c_3 的提升,各位置处接触线平均抬升量的幅值逐渐降低;当 c_3 升至 350 Ns/m(与 CX 型受电弓取值相同)时,各位置处接触线平均抬升量的幅值会降至与 CX 型受电弓相同水平;继续提升 c_3 的值,接触线平均抬升量幅值仍会继续降低,但降幅会放缓。可见,接触线平均抬升量幅值不能通过调整 c_3 的值而无限降低,存在理论极限值。

统计不同 c_3 的受电弓接触力,如表 5 所示。由表 5 可见,随着 c_3 的提升,接触力标准差呈现先降低后升高的趋势,但总体上都低于 DSA380 型受电弓的接触力 38.89 N;接触力最大值不断降低的同时,接触力最小值也在升高。从总体上来说,随着 c_3 的提升,受电弓的动力学性能也在不断优化。

表 5 不同 c_3 的受电弓接触力

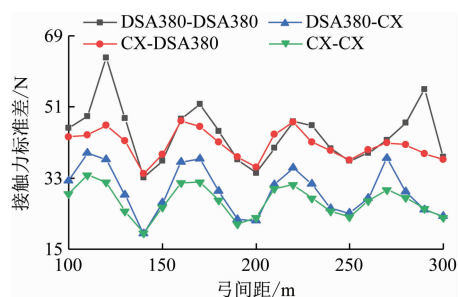
Tab. 5 Pantograph contact forces under different c_3

| c_3 / (Ns/m) | 接触力/N | | | |
|-------------------|--------|-------|--------|-------|
| | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 标准差 |
| 70 | 260.22 | 29.36 | 130.87 | 38.89 |
| 140 | 243.13 | 65.69 | 130.86 | 33.84 |
| 210 | 234.67 | 71.34 | 130.56 | 33.09 |
| 280 | 230.56 | 72.71 | 130.92 | 33.13 |
| 350 | 231.36 | 74.17 | 130.74 | 33.72 |
| 420 | 229.76 | 74.07 | 130.74 | 34.28 |
| 490 | 226.16 | 73.80 | 130.62 | 34.83 |
| 560 | 226.22 | 72.78 | 130.24 | 35.37 |

3 双弓混编工况的动力学性能

3.1 双弓编组

不同受电弓所引起的受电弓后方接触线平均抬升量幅值各不相同,当双弓运行时平均抬升量幅值的差异势必会对后弓的受流产生影响。为了研究双弓混编工况下受电弓对弓网动态特性的影响,使用 CX 型受电弓和 DSA380 型受电弓混编进行双弓受流计算。不同编组下的后弓接触力标准差-弓间距曲线如图 8 所示。



注:DSA380-CX 表示前弓为 DSA380 型受电弓、后弓为 CX 型受电弓的编组;余类同。

图 8 不同编组下的后弓接触力标准差-弓间距曲线

Fig. 8 Standard deviation-interval curves of trailing pantograph contact force under different formations

根据图 8,按后弓接触力标准差由高到低对各编组排序:DSA380-DSA380、CX-DSA380、DSA380-CX、CX-CX。结合单弓工况的分析,不难发现,将动力学性能较好的受电弓(CX 型受电弓)作为双弓混编时的前弓,会在一定程度上优化后弓的动力学性能。

3.2 双弓混编优化方案及验证

单弓工况下, c_3 为影响受电弓动力学性能和接

触线平均抬升量的关键参数。由此提出双弓混编工况下的动力学性能优化方案:在双弓混编工况下,通过调整前弓 c_3 来降低受电弓后方接触线平均抬升量幅值,进而优化后弓的动力学性能。

为了验证优化效果,将 DSA380-CX 下前弓的 c_3 按 CX 型受电弓取值,并将此时的 DSA380 型受电弓编号为“DSA380GAI”,对比后弓为 CX 型受电弓时混编工况下的接触力标准差,结果如图 9 所示。

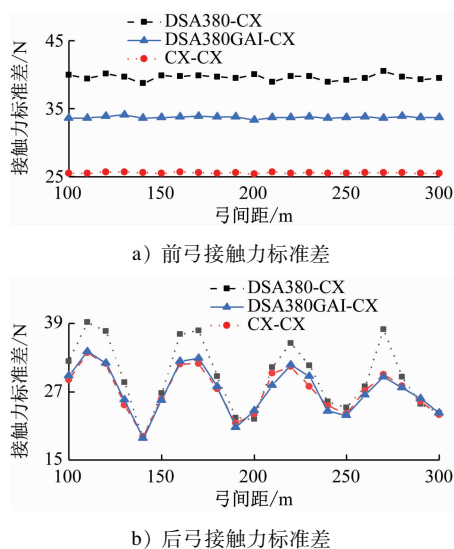


图 9 后弓为 CX 型受电弓时混编工况下的接触力标准差
Fig. 9 Standard deviation of contact force under mixed formations working condition with CX trailing pantographs

从图 9 来看,无论前弓还是后弓,按接触力标准差由高到低对各编组的排序均为: DSA380-CX、DSA380GAI-CX、CX-CX。尤其是后弓接触力标准差,DSA380GAI-CX 已接近 CX-CX 的水平。这表明通过改变前弓的 c_3 ,既能降低前弓的接触力标准差,也能在一定程度上优化后弓的动力学性能。

4 结语

通过对单弓及双弓混编情况下的弓网系统进行动力学仿真,分析了受电弓动力学参数对受电弓后方接触线平均抬升量幅值的影响,讨论了双弓混编时优化后弓动力学性能的方法。结果表明:

1) 不同受电弓会引起受电弓后方接触线平均抬升量呈现随弓网距离变化的、幅值不同的波动。

2) 不同受电弓的受流性能有优劣之分。受流性能较好的受电弓所引起的后方接触线平均抬升量波动幅值较小,而受流性能较差的受电弓所引起的波动幅值则较大。

3) 受电弓的受流性能受下框架与底架之间的阻尼 c_3 影响较大。通过调整 c_3 的值可以在一定程度上优化受电弓的受流质量,同时降低受电弓后方各位置处接触线的平均抬升量幅值。

4) 双弓混编工况下,对于相同型号的后弓,若前弓的受流质量越好,则其后方各位置处接触线的平均抬升量幅值越低,进而使后弓具有较好的受流质量。

5) 双弓混编运行时,若后弓的受流性能较差,可通过调整前弓 c_3 来优化后弓的受流质量。

参考文献

- [1] 毕艳祥,刘加华,江志彬. 市域快速轨道交通线不同编组列车混合运行影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(12): 54.
BI Yanxiang, LIU Jiahua, JIANG Zhibin. Mixed running of different marshalling trains and its impact on URT[J]. Urban Mass Transit, 2006, 9(12): 54.
- [2] ZHANG W, ZHOU N, LI R, et al. Pantograph and catenary system with double pantographs for high-speed trains at 350 km/h or higher[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(1): 7.
- [3] 周宁,张卫华. 双弓作用下弓网动力学性能[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(4): 552.
ZHOU Ning, ZHANG Weihua. Dynamic performances of pantograph-catenary system with double pantographs[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(4): 552.
- [4] BUCCA G, CARNEVALE M, COLLINA A, et al. Adoption of different pantographs' preloads to improve multiple collection and speed up existing lines[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(S1): 403.
- [5] 吴燕,吴俊勇,郑积浩,等. 高速受电弓-接触网动态受流性能及双弓距离的研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 38.
WU Yan, WU Junyong, ZHENG Jihao, et al. Study on current-collection of high-speed pantograph-catenary system and distance between two pantographs[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 38.
- [6] XU Z, SONG Y, LIU Z. Effective measures to improve current collection quality for double pantographs and catenary based on wave propagation analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6299.
- [7] LIU Z, JÖNSSON P A, STICHEL S, et al. On the implementation of an auxiliary pantograph for speed increase on existing lines[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(8): 1077.
- [8] YAO Y, ZOU D, ZHOU N, et al. A study on the mechanism of vehicle body vibration affecting the dynamic interaction in the pantograph-catenary system[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(9): 1335.
- [9] METRIKINE A V, BOSCH A L. Dynamic response of a two-level catenary to a moving load[J]. Journal of Sound and Vibration,

- 2006, 292(3/4/5): 676.
- [10] 梅桂明, 张卫华. 受电弓/接触网系统动力学模型及特性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(1): 20.
MEI Guiming, ZHANG Weihua. Dynamics model and behavior of pantograph/catenary system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(1): 20.
- [11] 吴天行. 接触网的有限元计算与分析[J]. 铁道学报, 1996, 18(3): 44.
WU Tianxing. Analysis and calculation of catenary by FEM[J]. Journal of the China Railway Society, 1996, 18(3): 44.
- [12] 周宁, 张卫华. 基于受电弓弹性体模型的弓网动力学分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(6): 26.
ZHOU Ning, ZHANG Weihua. Analysis of dynamic pantograph-catenary interaction based on elastic pantograph model[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(6): 26.
- [13] WU T, ZHAI S, DONG W, et al. An online detection algorithm of train coupler impact based on stacked auto-encoders [C] // 2021 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS). Chengdu, China. New York: IEEE, 2021: 1.
- [14] 周宁, 蔚超, 邹欢, 等. 一种新的考虑接触角的弓网接触模型[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2): 265.
ZHOU Ning, YU Chao, ZOU Huan, et al. New pantograph/catenary contact model considering the influence of contact angle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(2): 265.
- [15] LIU Z, JÖNSSON P A, STICHEL S, et al. Implications of the operation of multiple pantographs on the soft catenary systems in Sweden[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(3): 971.
- [16] European Committee for Electrotechnical Standardization. Railway applications current collection systems-validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line: EN 50318:2018[S]. Brussels: CENELEC Central Secretariat, 2018.
- 收稿日期:2022-09-02 修回日期:2022-12-20 出版日期:2025-04-10
Received:2022-09-02 Revised:2022-12-20 Published:2025-04-10
• 第一作者:鲁文伟, 硕士研究生, 1205496172@qq.com
通信作者:周宁, 副研究员, zhou_ningbb@sina.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

(上接第 164 页)

- [5] 管攀峰, 杨志豪. 管片新型快速连接件研发及接缝力学性能分析[J]. 隧道与轨道交通, 2018(1): 1.
GUAN Panfeng, YANG Zhihao. Research & development of new fast segment connector and mechanical property analysis of segment joint[J]. Tunnel and Rail Transit, 2018(1): 1.
- [6] 柳献, 李海涛, 曹伟飏. 盾构隧道新型纵缝接头抗弯性能试验对比研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 1058.
LIU Xian, LI Haitao, CAO Weibiao. Experimental comparative study on bending performance of new longitudinal joint in shield tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 1058.
- [7] 张雨蒙, 张姣龙, 曹伟飏, 等. 盾构隧道新型衬砌结构受力性能与设计参数[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 201.
ZHANG Yumeng, ZHANG Jiaolong, CAO Weibiao, et al. Mechanical behaviors and design parameters of segmental tunnel linings with new type of joints[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 201.
- [8] 柳献, 李海涛, 管攀峰, 等. 快速接头盾构隧道衬砌结构设计参数研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 19.
LIU Xian, LI Haitao, GUAN Panfeng, et al. Research on design parameters for shield tunnel lining structure with quick connectors [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6): 19.
- [9] 张厚美, 傅德明, 过迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 28.
ZHANG Houmei, FU Deming, GUO Chi. Study on load test of segment joint in shield driven tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(6): 28.
- 收稿日期:2022-12-20 修回日期:2023-05-20 出版日期:2025-04-10
Received:2022-12-20 Revised:2023-05-20 Published:2025-04-10
• 第一作者:胡秋斌, 博士研究生, 1059781296@qq.com
通信作者:柳献, 教授, xian.liu@tongji.edu.cn
• ©《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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—56830728 转 821