

碳滑板磨耗型面对弓网动力学性能影响*

王旭阳¹ 周 宁¹ 支兴帅¹ 李智威¹ 张卫华¹ 鲁小兵² 杨 佳² 杨邑宏³

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都; 2. 中铁二院工程集团有限公司, 610031, 成都;

3. 中国测试技术研究院, 610021, 成都)

摘 要 [目的] 碳滑板异常磨耗型面会降低弓网动态耦合性能, 使受流质量变差, 加速碳滑板与接触线磨损。为了找出使弓网动态接触性能变差的关键碳滑板磨耗参数, 有必要研究碳滑板磨耗型面对弓网动力学性能的影响。[方法] 建立了考虑碳滑板磨耗型面的受电弓刚柔混合动力学模型, 研究不同碳滑板磨耗型面对弓网动力学性能的影响, 通过地铁线路实测数据验证了模型的准确性。在此基础上, 通过实测磨耗后碳滑板磨耗型面数据对碳滑板磨耗型面进行建模, 研究了不同型面下的接触力响应。[结果及结论] 对未服役型面接触力有较大影响的是跨距通过频率的基频以及受电弓垂向运动的倍频, 对服役型面各个频率段对接触力均有影响; 当碳滑板表面高度差小于 1.5 mm 时, 接触力标准差与最大值迅速增大; 当碳滑板表面高度差在 1.5 ~ 3.0 mm 时, 接触力标准差与最大值保持相对稳定状态; 当碳滑板表面高度差超过 3.0 mm 时, 接触力标准差与最大值快速增大, 最大值超过 300 N。

关键词 轨道交通; 弓网系统动力学; 碳滑板磨耗型面; 有限元柔性体; 打磨型面

中图分类号 TM922.6

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.04.009

Influence of Carbon Contact Strip Wear Profile on the Dynamic Performance of Pantograph-Catenary System

WANG Xuyang¹, ZHOU Ning¹, ZHI Xingshuai¹, LI Zhiwei¹, ZHANG Weihua¹, LU Xiaobing², YANG Jia², YANG Yihong³

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China; 3. National Institute of Measurement and Testing Technology, 610021, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The carbon contact strip abnormal wear profile will reduce the dynamic coupling performance of

the pantograph-catenary (PC), deteriorate the current collection quality, and accelerate the wear of the carbon contact strip and the contact wire. In order to find out the key carbon contact strip wear parameters that deteriorate the PC dynamic contact performance, it is necessary to study the influence of the carbon contact strip wear profile on the PC dynamic performance. [Method] A rigid flexible hybrid dynamic model of the pantograph considering the carbon contact strip wear profile is established, to study the influence of different carbon contact strip wear profiles on the PC dynamic performance. The accuracy of the model is verified by the measured data of the subway line. On this basis, the carbon contact strip wear profile is modeled through the measured wear profile data of the carbon contact strip after wear, and the contact force response under different profiles is studied. [Result & Conclusion] The fundamental frequency of the span passing frequency and the multiple frequency of the pantograph vertical movement make a greater contribution to the not-in-service profile, and each frequency band has influence on the contact force for the profiles in service; when the height difference of carbon contact strip is less than 1.5 mm, the standard deviation and maximum value of the contact force increase rapidly; when the height difference of carbon contact strip is 1.5 ~ 3.0 mm, the standard deviation and maximum value of the contact force remain in relatively stable state; when the height difference of carbon contact strip exceeds 3.0 mm, the standard deviation and maximum value of the contact force increase rapidly, with the maximum value exceeding 300 N.

Key words rail transit; PC system dynamics; carbon contact strip profile; finite element flexible body; grinding profile

采用刚性悬挂接触网时, 受电弓碳滑板极易出现异常磨耗问题^[1-3]。碳滑板异常磨耗会出现波浪形磨耗型面^[4]。不同的波浪形磨耗型面会不同程度地降低弓网动态耦合性能, 使受流质量变差, 进

* 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); 上海申通地铁国资委科研项目(2023020)

一步加速碳滑板与接触线磨损,进而降低列车运行安全可靠,增加运营成本。对此,本文建立考虑碳滑板表面形貌特征的精细化模型,研究不同碳滑板磨耗型面对弓网动力学性能影响,找出使弓网动态接触性能变差的关键碳滑板磨耗参数,以期为碳滑板出现磨耗型面之后改善弓网动态接触性能、延长碳滑板寿命提供解决方案。

1 弓网耦合动力学模型

1.1 刚性悬挂接触网等效模型

刚性接触网由悬挂机构、汇流排与接触线组成。悬挂机构主要承受接触网垂向载荷,一般被简化为带有集中质量的弹簧机构^[5];汇流排与接触线等效为等截面的梁单元^[6]。刚性悬挂接触网等效模型如图 1 所示。简化后的刚性接触网振动微分方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

式中:

- M ——接触网质量矩阵;
- C ——接触网阻尼矩阵;
- K ——接触网刚度矩阵;
- \ddot{x} ——接触网节点加速度向量;
- \dot{x} ——接触网节点速度向量;
- x ——接触网节点位移向量;
- $F(t)$ ——接触网节点载荷向量, t 表示时间。

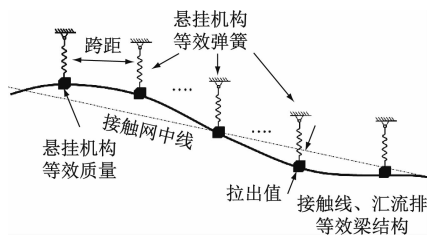


图 1 刚性悬挂接触网等效模型

Fig. 1 Equivalent model of rigid suspension catenary

1.2 受电弓刚柔混合模型

受电弓模型为刚柔混合模型,如图 2 所示。将弓头碳滑板与接触网接触部分视为柔性体,受电弓其余部分视为刚体。碳滑板柔性体部分采用有限元实体网格离散,碳滑板表面形貌特征可通过有限元节点在碳滑板表面分布来体现。碳滑板底部节点与受电弓刚体部分采用固定约束连接,实现刚体与柔性体之间力的传递。

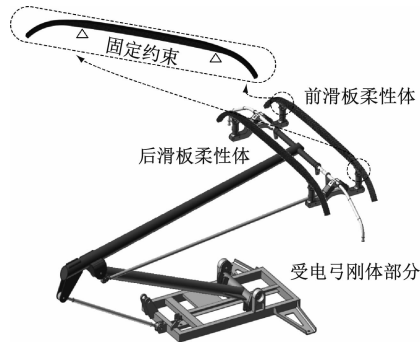


图 2 受电弓刚柔混合模型

Fig. 2 Rigid-flexible hybrid model of pantograph

1.3 考虑碳滑板磨耗型面的弓网耦合动力学模型

在刚性悬挂接触网等效模型与受电弓刚柔混合模型基础上,建立考虑碳滑板磨耗型面的弓网耦合动力学模型,采用基于赫兹接触理论的 Lankarani 接触力模型计算接触力^[7]:

$$F_N = k\delta^{n_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\dot{\delta}|^{n_2} \delta^{n_3} \quad (2)$$

式中:

- F_N ——接触力;
- k ——接触刚度;
- c ——接触阻尼;
- δ ——接触点与柔性曲面法向距离;
- n_1 ——刚度指数;
- n_2 ——阻尼指数;
- n_3 ——冲击指数。

1.4 模型准确性验证

依据弓网动态相互作用验证标准 EN 50318: 2019 *Current collection systems-Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact wire (english version)*^[8],将仿真数据与线路实测数据对比,以验证弓网耦合动力学模型准确性。对设计速度为 100 km/h 的深圳某地铁线路进行弓网动态受流试验,统计得到弓网接触力实测数据,并与仿真数据对比,结果如表 1 所示。由表 1 可见,该线路的弓网接触压力实测数据与仿真数据均符合 EN 50318:2019 要求。

2 碳滑板磨耗型面对弓网动力学性能影响

2.1 碳滑板磨耗型面数据

本文采用某地铁线路实际服役碳滑板的廓形数据进行研究。该碳滑板共服役 112 d,测得 20 组型面数据。不同服役时长碳滑板厚度的横向分布

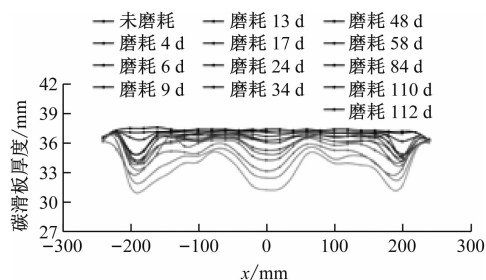
如图3所示。

表1 某线路的弓网接触力数据

Tab.1 PC contact force data of a certain line

指标	F_N 实测值/ N	F_N 仿真值/ N	相对误差/ %
均值	119.7	122.3	2.20
最大值	161.8	162.3	0.31
最小值	63.9	74.5	16.59
标准差	11.5	11.0	-4.35

注:相对误差 = (仿真值 - 实测值) / 实测值 $\times 100\%$ 。



注: x 为滑板横向坐标, 以滑板中心为 0, 以滑板右侧为正, 滑板左侧为负。

图3 不同服役时长的碳滑板厚度横向分布

Fig.3 Horizontal distribution of carbon contact strip thickness under different service periods

在考虑碳滑板磨损型面的弓网耦合动力学模型中, 碳滑板与接触线接触区域设定为柔性体。为此, 将服役碳滑板实体模型离散为实体网格单元, 并控制节点数量, 以反映碳滑板表面微小型面特征。

2.2 动力学仿真结果

设置受电弓运行速度为 100 km/h, 接触网跨距为 8 m, 仿真计算可得不同服役时期 F_N 变化情况及频谱分析结果, 如图4及图5所示。为方便描述, 根据磨损时间与接触力差异, 将碳滑板磨损型面分为服役初期(服役时长为 0 ~ 8 d)、服役中期(服役时长为 >8 ~ <70 d)与服役末期(服役时长 ≥ 70 d)。不同服役时期的碳滑板断面如图6所示。

由图4可见, 不同服役时期的 F_N 有较大差异, 且随着服役时长增加, F_N 差异变大。结合图6分析可知: 服役初期碳滑板磨损较少, 其碳滑板型面沿其长度方向高度分布均匀, F_N 在 75 ~ 163 N 范围内波动, 变化较平稳; 在服役中期, 碳滑板表面出现波浪形磨损型面, 碳滑板的拉出值对应处、中心处及其余接触区域处的碳滑板厚度有明显差别, 碳滑板表面呈明显波浪形曲面, F_N 在 52 ~ 200 N 之间波动, 变化幅度较大; 在服役末期, 碳滑板的波浪形磨

耗型面特征最为显著, F_N 在 0 ~ 618 N 之间波动, 变化最剧烈。

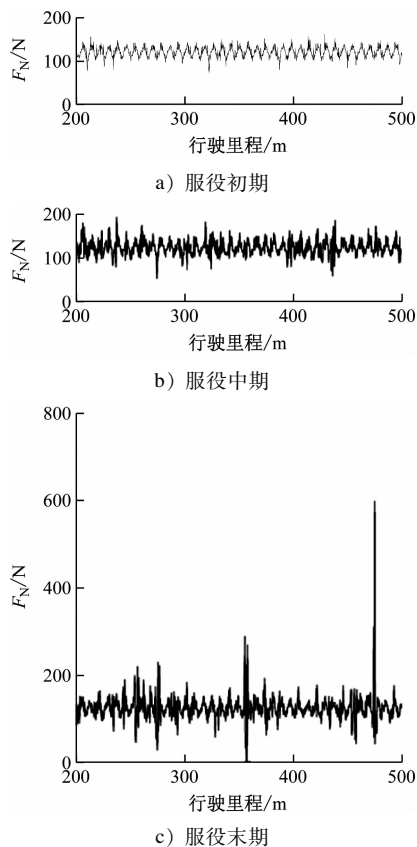


图4 不同服役时期的 F_N

Fig.4 F_N in different service periods

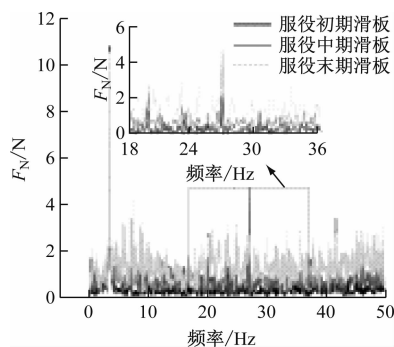


图5 不同服役时期 F_N 频谱分析

Fig.5 F_N spectrum analysis in different service periods

为了找到接触力在频谱方面的特征, 仿真分析受电弓垂向运动频率及运动模态, 结果如表2所示。在3种型面的接触力频率中, 对 F_N 影响较大的有 3.50 Hz、20.18 Hz、23.27 Hz、30.61 Hz 及 41.70 Hz 等。其中, 3.50 Hz 为受电弓的跨距通过频率^[9], 其余频率为受电弓垂向运动频率的倍频。

由图5可得, 对服役初期碳滑板接触力幅值影

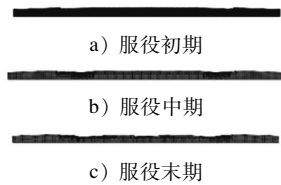


图6 不同服役时期的碳滑板断面

Fig. 6 Cross-sections of carbon contact scrip in different service periods

表2 受电弓垂向运动模式

Tab. 2 Vertical motion mode of pantograph

频率/Hz	受电弓垂向运动模式
5.13	框架与受电弓垂向正向运动
6.90	前后碳滑板垂向反向振动
11.84	框架与受电弓垂向反向振动

响较大的频率主要为跨距通过频率及受电弓垂向运动频率等几个特定频率,而其余频率对 F_N 影响较小;碳滑板服役后,各频率段对 F_N 幅值均有影响,碳滑板磨损型面产生高低差导致 F_N 振动加剧,非特定频率对 F_N 幅值影响增大,特定频率对 F_N 幅值影响变小。

2.3 不同型面对接触力的影响

碳滑板的型面不同使得接触力沿碳滑板横向的分布特征也相应不同。为分析不同型面对接触力影响,本文提出将接触力横向分布波动差 σ 为衡量型面对接触力影响大小的指标:将碳滑板沿横向等分为 N 个小区间,在每个小区间内对以碳滑板总体平均接触力 F_m 为基准计算接触力的标准差,得到分布波动差,即:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - F_m)^2} \quad (3)$$

式中:

F_i ——碳滑板横向第 i 个区间内的接触力。

σ 越大,说明接触力偏离 F_m 越大,受流质量越差;反之则越好。

在碳滑板中心位置沿碳滑板横向建立二维坐标系,分别以 x 与 σ 为横纵坐标,得到 σ 沿碳滑板横向分布规律如图7所示。

由图7 a)可知,服役时长 $t_s \in [0, 8 \text{ d}]$ 时, σ 沿型面横向位置分布较为均匀,其值在 $5 \sim 25 \text{ N}$ 范围内波动。在图7 b)中, $t_s \in (8 \text{ d}, 70 \text{ d})$, 不同横向位置 σ 呈现不同特征:在 $x = -150 \sim < 0 \text{ mm}$ 、 $x = 50 \sim < 150 \text{ mm}$ 处,与图7 a)类似, σ 在 $5 \sim 25 \text{ N}$ 范围内波动;在 $x = -200 \sim < -150 \text{ mm}$ 、 $x = 0 \sim < 50 \text{ mm}$

及 $x = 150 \sim 200 \text{ mm}$ 处, σ 波动范围较大,其值在 $25 \sim 45 \text{ N}$ 内波动。由图7 c)可以看出, $t_s \in [70 \text{ d}, 112 \text{ d}]$, σ 沿型面横向位置分布的变化十分明显:在 $x = -200 \sim < -150 \text{ mm}$ 、 $x = 0 \sim < 50 \text{ mm}$ 及 $x = 100 \sim < 200 \text{ mm}$ 处, σ 出现了剧烈波动,其最大值高达 100 N ;在 $x = -150 \sim < 0 \text{ mm}$ 、 $x = 50 \sim < 100 \text{ mm}$ 处, σ 变化范围为 $5 \sim 30 \text{ N}$ 。

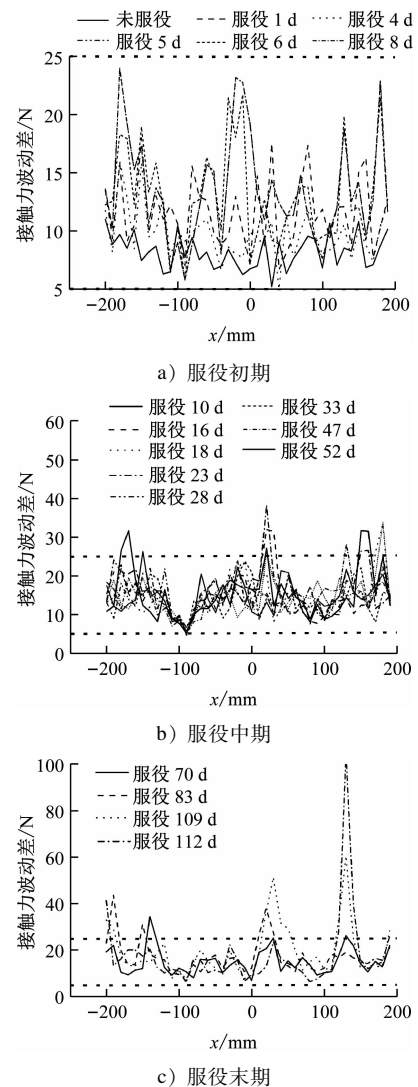


图7 接触力波动差沿碳滑板横向分布

Fig. 7 Lateral distribution of contact force fluctuation differences along the carbon contact strip

由图7可知, σ 沿碳滑板横向分布有不同特征,在 $x = -200 \sim < -150 \text{ mm}$ 、 $x = 0 \sim < 50 \text{ mm}$ 及 $x = 150 \sim < 200 \text{ mm}$ 处,型面变化,进而导致 σ 沿碳滑板横向分布变化。

结合图3分析可知,在碳滑板出现波浪形磨损后,接触力在波浪底部与波浪结束处都易出现较大

波动,受流质量因此变差。

2.4 碳滑板打磨措施

统计图3不同 t_s 下的碳滑板厚度横向分布,得到碳滑板磨耗型面高度差分布如表3所示。

表3 碳滑板磨耗型面高度差分布

Tab.3 Height difference distribution of carbon contact strip wear profile

t_s/d	接触力最大值 范围/N	型面高度差 范围/mm
[0,8]	162~211	0~1.5
(8,70)	193~255	1.5~3.0
[70,112]	234~619	3.0~3.8

由表3可知,接触力最大值与碳滑板磨耗型面高度差存在一定正相关性: $t_s < 70$ d时,碳滑板表面高度差小于3 mm,接触力最大值为255 N; $t_s \geq 70$ d时,碳滑板表面高度差大于3 mm,接触力最大值为619 N。

根据EN 50119—2020《电气化铁道 接触网设计、施工及验收标准》^[9]对仿真与实测接触力指标规定,接触力最大值应不超过300 N。若碳滑板磨耗型面导致接触力大于300 N,则须采取打磨措施,使接触力恢复到标准规定范围内。

对于碳滑板表面高度差大于3.0 mm的型面,应通过打磨使表面高度差降至1.5 mm以内,从而使碳滑板重新达到稳定受流状态,延长碳滑板的使用寿命。

3 结语

针对刚性悬挂接触网及碳滑板波浪形磨耗型面,基于受电弓刚柔混合模型建立考虑碳滑板磨耗型面的弓网耦合模型,对某地铁线路上一个服役周期内碳滑板磨耗型面对动力学性能影响进行仿真计算,并进一步辨识出碳滑板磨耗型面影响动力学性能的因素,为碳滑板打磨提供合理建议。得出结论如下:

1) 出现磨耗型面之后,磨耗时间越长,对接触力幅值产生影响的频率越多,接触力波动也就越大。

2) 接触力最大值与碳滑板表面不同位置高度差存在正相关性。对高度差大于3 mm型面采取打磨措施使高度差降低至1.5 mm,可以使碳滑板重新出现接触稳定期,从而延长碳滑板使用寿命。

参考文献

- [1] 唐志强,朱佳栋.城市轨道交通架空刚性悬挂接触网弓网磨耗及改进措施[J].城市轨道交通研究,2021,24(增刊1):108.
TANG Zhiqiang, ZHU Jiadong. Pantograph catenary wear of urban rail transit overhead rigid catenary and improvement measures[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 108.
- [2] 周国祥.地铁车辆受电弓碳滑板异常磨耗分析及应对措施[J].轨道交通装备与技术,2022(5):32.
ZHOU Guoxiang. Analysis of and countermeasures for the abnormal wear of carbon contact strip for metro vehicle pantograph[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2022(5): 32.
- [3] 钟传枝,许岩,陈光雄.浸金属碳滑板/铜银合金接触线载流摩擦磨损性能试验研究[J].润滑与密封,2021,46(11):34.
ZHONG Chuanzhi, XU Yan, CHEN Guangxiong. Experimental study on friction and wear behavior of copper-impregnated metalized carbon strip/Cu-Ag alloy contact wire with electric current[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(11): 34.
- [4] 刘恩鹏,刘小梦.重庆地铁6号线列车受电弓碳滑板V形磨耗分析及其对策[J].铁道技术监督,2022,50(7):42.
LIU Enpeng, LIU Xiaomeng. Analysis and countermeasures of V-shape wear of pantograph carbon contact strip of Chongqing metro line 6[J]. Railway Quality Control, 2022, 50(7): 42.
- [5] 梅桂明,张卫华.刚性悬挂接触网动力学研究[J].铁道学报,2003,25(2):24.
MEI Guiming, ZHANG Weihua. Study on dynamics of rigid suspension catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(2): 24.
- [6] 冯晓河.考虑门式悬挂的刚性接触网-受电弓系统动态性能分析[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):59.
FENG Xiaohu. Dynamic performance analysis of rigid catenary and pantograph system considering overlap[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 59.
- [7] YAO Y, ZHOU N, ZOU D, et al. Collision dynamics analysis of lifting the pantograph[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 235(4): 450.
- [8] BSI. Railway applications-current collection systems-validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact wire (English version); OVE EN 50318: 2019[S]. London: BSI Standards Publication, 2018: 18-19.
- [9] BSI. Railway applications-fixed installations-electric traction overhead contact wires (German version) EN 50119: 2020[S]. London: BSI Standards Publication, 2020: 33-34.

· 收稿日期:2022-12-23 修回日期:2023-02-06 出版日期:2025-04-10
Received:2022-12-23 Revised:2023-02-06 Published:2025-04-10
· 第一作者:王旭阳,硕士研究生,2831407015@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