DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.016　　文章编号：1000-128X(2023)02-0136-06

考虑接触轨轨缝的靴轨系统动态特性研究

喻文彬
（中铁建电气化局集团第四工程有限公司，湖南 长沙　410114）

摘　要：在城市轨道交通中，列车供能除采用架空接触网系统外还常采用靴轨系统。在靴轨系统中，集电靴沿接触轨滑行，振动行为复杂，易受线路条件和结构本身的影响。当接触轨出现轨缝时，集电靴通过会产生较大冲击力，造成靴轨系统受流工况恶化。文章基于多体动力学和有限元理论，搭建靴轨耦合动力学模型，并与实测数据相对比，验证模型准确性。基于所搭建的模型，考虑在标准规定的最恶劣的接触轨轨缝条件，分析靴轨系统在不同速度和轨缝方向下的动态性能。结果表明，相对于前低后高轨缝的工况，集电靴通过前高后低轨缝时，车辆运行速度对靴轨系统受流质量的影响更加严重。

关键词：城市轨道交通；集电靴–接触轨系统；轨缝；受流质量；多体动力学方法
中图分类号：U231；U264.3^{+}4　　**文献标识码：**A

Research on dynamic characteristics of shoegear-conductor rail system considering conductor rail joint gap

YU Wenbin

(The 4th Engineering Co., Ltd. of China Railway Construction Electrification Bureau Group, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In urban rail transit, in addition to overhead catenary system, the electric shoegear-conductor rail system is often used for energy supply of trains. In the shoegear-conductor rail system, the electric shoegear slides along the conductor rail, and the vibration behavior is complex and vulnerable to the influence of line conditions and the structure itself. When the conductor rail has rail joint gap, the shoegear passing through will generate large impact force, resulting in the deterioration of the current collection quality of the shoegear-conductor rail system. Based on multi-body dynamics and finite element theory, this paper built a shoegear-conductor rail coupling dynamics model, and compared it with measured data to verify the accuracy of the model. Based on the model, the dynamic performance of the shoegear-conductor rail system at different speeds and with rail joint gaps in different directions was analyzed, considering the worst conductor rail joint gap conditions specified in the standard. The results show that when the shoegear passes through the front-high-rear-low rail joint gaps, the vehicle running speed has a more serious influence on the current collection quality of the shoegear-conductor rail system compared to the front-low-rear-high rail joint gaps.

Keywords: urban rail transit; shoegear-conductor rail system; rail joint gap; current collection quality; multi-body dynamics method

0　引言

地铁是城市轨道交通中最常见的交通工具，目前地铁车辆受流系统主要有2种：“架空接触网–受电弓”系统（弓网系统）和“集电靴–接触轨”系统（靴轨系统）。对于弓网系统，无论是柔性网还是刚性网系统，均有较为成熟广泛的研究[1-4]，而对于靴轨系统的研究相对较少。在国内地铁常用的下接触式靴轨系统中，接触轨是平行于行走轨的金属导电轨，集电靴安装在

基金项目：国家自然科学基金项目（52172408）
通信作者：喻文彬（1982—），男，高级工程师，主要从事高速铁路和地铁施工技术支持和项目管理等相关工作；E-mail: 29673083@qq.com
引用格式：喻文彬. 考虑接触轨轨缝的靴轨系统动态特性研究[J]. 机车电传动, 2023(2): 136-141.
Citation: YU Wenbin. Research on dynamic characteristics of shoegear-conductor rail system considering conductor rail joint gap[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(2): 136-141.

转向架两侧的限界内，并通过滑板与接触轨滑动取流，集电靴通过滑板将电能从牵引网传输到车辆上，满足对车辆供能的需求[2]。

在采用靴轨系统的地铁线路中，集电靴与接触轨间良好的受流质量是车辆安全运行的保障，保持集电靴与接触轨间良好的匹配性尤为重要。接触轨由多段定长（15 m或18 m）的轨排通过中间接头连接而成[3]。接触轨热胀冷缩、接头安装误差和地基下沉等因素都会造成连接处产生轨缝、台阶等问题，进而导致集电靴通过该位置时产生冲击力，造成靴轨系统受流质量恶化[4-6]。

本文以拉簧式集电靴和钢铝复合接触轨系统为研究对象，使用仿真软件Simpack和ANSYS搭建的靴轨耦合动力学模型，并对比实测数据，验证该模型适用于靴轨系统动态性能分析。基于搭建的靴轨模型，分析了在标准[7]规定的最恶劣轨缝条件下不同速度和不同轨缝方向下的靴轨系统动态性能。

1　靴轨系统耦合模型

国内地铁常用的下接触式靴轨系统如图1所示。本文考虑集电靴“T”型摆臂和接触轨的弹性形变，使用Simpack和ANSYS仿真平台搭建“集电靴–接触轨”耦合动力学模型。其中，将集电靴建立为刚柔耦合动力学模型，将接触轨建立为有限元模型，两者通过多边形接触算法进行耦合。



图1　靴轨系统

Fig. 1　Shoegear-conductor rail system

1.1　集电靴刚柔耦合动力学模型

拉伸弹簧驱动式集电靴由固定部分和转动部分组成。固定部分包括绝缘底座、调整齿板、调整支架、固定卡板、阻尼减振器及熔断器等部件；转动部分包括受流支撑臂、“T”型摆臂、转轴、滑板等部件，负责集电靴的滑动取流。集电靴结构如图2所示。

针对拉簧式集电靴，采用传统的多刚体动力学分析方法求解误差较大，无法满足工程对精度的要求。对集电靴结构分析可知，集电靴的“T”型摆臂形变量最大，具有较大的柔性，“T”型摆臂的弹性形变将影响靴轨系统动力学特性的准确性[8]。因此，本文结合刚柔耦合系统动力学理论，建立“T”型摆臂柔性化，其余部分为刚性的集电靴刚柔耦合模型。集电靴建模流程如图3所示。

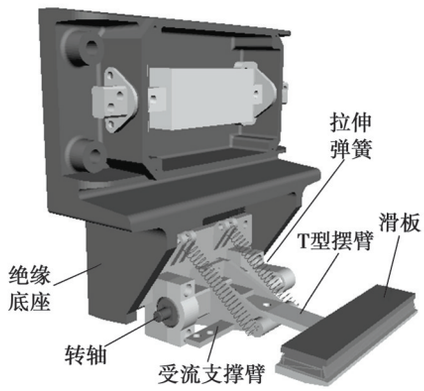


图2　集电靴结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of collector shoegear

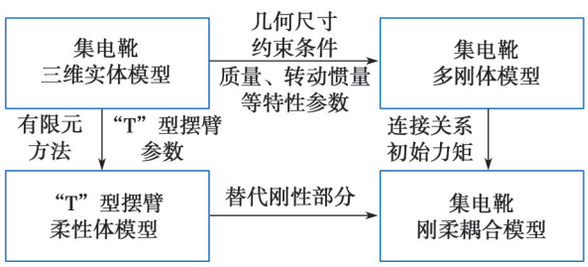


图3　集电靴建模流程

Fig. 3　Process flow chart of collector shoegear model

首先，根据集电靴设计参数在三维软件Solidworks中建立三维模型。随后，将集电靴三维导入Simpack软件，设置各部件对应的特性参数和约束关系，建立集电靴多刚体动力学模型。同时，在ANSYS软件中将“T”型摆臂处理为考虑弹性形变的柔性化有限元模型。最后，将“T”型摆臂柔性有限元模型导入集电靴多刚体模型，替代其刚性部分，搭建接近实际工况的集电靴刚柔耦合模型。

1.2　接触轨有限元模型

接触轨系统主要由钢铝复合轨、绝缘支架、中间接头和膨胀接头等零部件组成。其中，绝缘支架为接触轨系统的支撑结构，其结构型式如图4(a)所示。为简化分析，本文将绝缘支撑等效为立柱和横梁两部分，并采用应变能和动能相等原理，将绝缘支撑等效为集中质量的弹簧单元，等效力学模型如图4(b)所示。其中，横梁的长度为L_1，立柱高度为L_2。为方便接触轨的动力学分析，假设横梁自由端处受到某一作用力F，该力F使横梁和立柱发生弹性形变。此时可将绝缘支撑结构简化为线性弹簧单元，如图4(c)所示，经等效计算[3]，绝缘支架的等效刚度为

$$k_{\mathrm{eq}}=\frac{\dfrac{L_1^3}{3E_1I_1}+\dfrac{L_1^2L_2}{E_2I_2}+\dfrac{L_2}{E_2A_2}}{\left(\dfrac{L_1^3}{3E_1I_1}+\dfrac{L_1^2L_2}{E_2A_2}\right)^2+\left(\dfrac{L_1L_2^2}{2E_2I_2}\right)^2} \tag{1}$$

式中：k_{eq}为绝缘支架等效刚度；L_1为等效横梁长度；E_1为等效横梁弹性模量；I_1为等效横梁截面惯性矩；L_2为等效立柱高度；E_2为等效立柱弹性模量；I_2为等效立柱截面惯性矩；A_2为等效立柱截面积。

绝缘支架的等效质量为

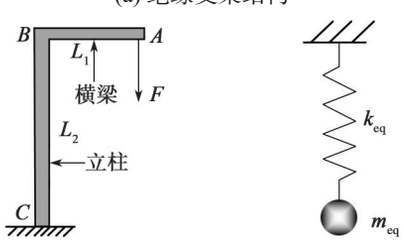
$$m_{eq}=\frac{\rho_1 A_1 L_1 E_2 I_2+\rho_2 A_2 L_2 E_1 I_1}{\sqrt{(E_2 I_2)^2+(E_1 I_1)^2}} \tag{2}$$

式中：A_1为等效横梁截面积；m_{eq}为绝缘支架等效质量；ρ_1为等效横梁线密度；ρ_2为等效立柱线密度。

将接触轨绝缘支撑立柱和横梁的参数代入式(1)和式(2)中，得到绝缘支撑结构模型的等效刚度为3.1×10^6 N/m，等效质量为2.15 kg。



(a) 绝缘支架结构

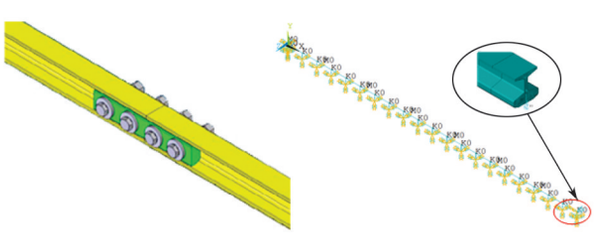


(b) 绝缘支架力学模型　　(c) 绝缘支架等效模型

图4　绝缘支撑模型

Fig. 4　Insulation support model

本文利用有限元软件ANSYS建立接触轨有限元模型，钢铝复合接触轨截面呈“工”字型，考虑接触轨的弹性形变，采用梁单元进行模拟；绝缘支架经过等效后采用弹簧单元和质量单元进行模拟。在实际地铁线路中，一个锚段的接触轨由多根轨排连接而成，而中间接头用于轨排的连接，如图5(a)所示。为体现接触轨的动力学特性，将中间接头简化为结构质量单元MASS21，该质量单元可以模拟中间接头的集中质量特性。接触轨模型的有限元截面如图5(b)所示。



(a) 接触轨连接示意图　　(b)接触轨的有限元截面

图5　接触轨有限元模型

Fig. 5　Finite element model of conductor rail

1.3　靴轨接触模型

靴轨系统间的接触关系是研究该系统的关键。本文采用软件Simpack内置的多边形接触[9]（Polygon Contact Model, PCM）算法，模拟集电靴与接触轨间的接触特性。该三维接触模型利用接触片的区域离散化来检验接触，并通过弹性基础模型计算接触力，如图6所示。

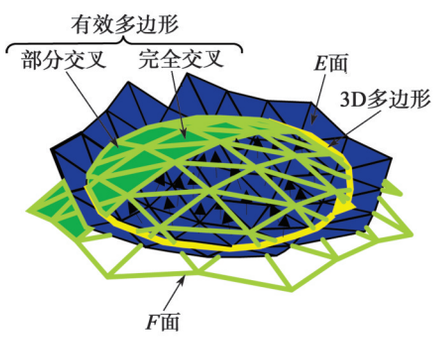


图6　多边形接触模型

Fig.6　Polygonal contact model

PCM接触模型是基于接触双方的几何外形进行求解，因此需要导入接触轨的几何外形文件用于求解计算。接触模型设置完成后，通过静力平衡分析，完成集电靴工作位置的调整，完成靴轨耦合动力学模型的建立。

2　靴轨系统耦合模型验证

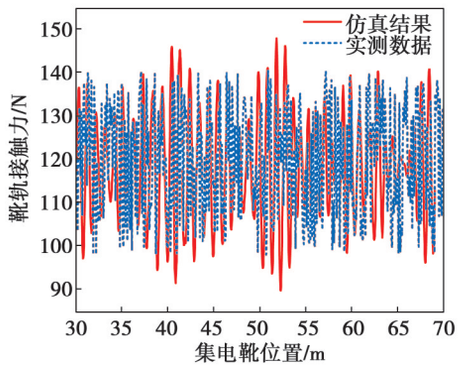
本文使用广州地铁靴轨系统在速度40 km/h、60 km/h和120 km/h下运行的实测接触力验证仿真模型，靴轨接触力的仿真结果和实测数据波形对比如图7所示，接触力统计值对比如表1所示。

表1　仿真结果与实测数据统计值对比

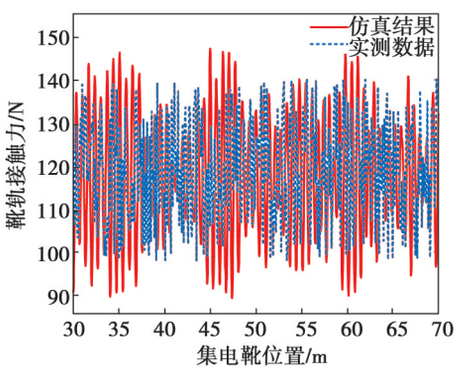
Table 1　Statistical comparison between simulation results with measured data　　N

速度/(km·h^{-1})		最大值	最小值	平均值	标准差
40	实测数据	140.50	95.90	118.38	12.52
	仿真结果	145.72	90.63	118.15	12.13
	误差/%	3.72	5.51	0.19	3.12
60	实测数据	141.30	93.90	118.02	12.65
	仿真结果	146.53	90.27	117.72	13.24
	误差/%	3.70	3.87	0.25	4.66
120	实测数据	157.30	112.10	131.72	14.17
	仿真结果	152.16	107.58	130.02	13.86
	误差/%	3.27	4.03	1.29	2.19

从图7可知，靴轨接触力的仿真结果与实测数据波形基本一致；由表1可知，靴轨接触力仿真结果与实测数据的统计值误差均在10%以内，说明本文建立的模型可以用于靴轨系统动态性能分析。



(a) 运行速度 40 km/h



(b) 运行速度 60 km/h

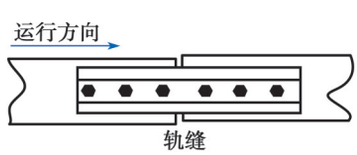
图 7　仿真结果与实测数据对比

Fig.7　Comparison of simulation results and measured data

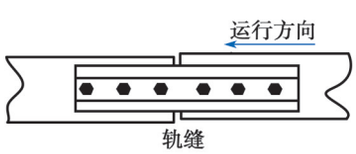
3　轨缝对靴轨动态特性的影响分析

3.1　接触轨轨缝建模

《城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求》（CJ/T 414—2012）[7]中规定接触轨轨缝宽度不超过 2 mm，轨面高差不超过 0.2 mm，故本节考虑轨缝对靴轨动态特性影响最大的情况，创建含接触轨轨缝的有限元模型，以分析靴轨系统瞬态动力学响应。模型中轨缝宽度为 2 mm，轨面高差为 0.2 mm，根据地铁车辆上行和下行的特点，设置“前低后高”和“前高后低”2 种工况，结构示意图如图 8 所示。



(a) 前低后高



(b) 前高后低

图 8　接触轨轨缝结构示意图

Fig. 8　Schematic diagram of the conductor rail joint gap

3.2　不同速度下靴轨系统动态特性

对接触轨轨缝“前高后低”和“前低后高”2 种情况分别进行不同速度下的仿真分析，运行速度设置为 40 km/h、60 km/h、80 km/h、100 km/h、120 km/h 共 5 种工况。靴轨系统在不同轨缝方向、不同速度条件下的接触力统计值见表 2 和表 3。

表 2　轨缝“前低后高”情况下接触力统计值

Table 2　Statistical value of contact force under the condition of front-low-rear-high rail joint gap

速度/(km·h^{-1})	最大碰撞力/N	碰撞次数/次	离线时间/ms
40	727.87	4	15.7
60	744.06	4	16.5
80	756.82	5	16.5
100	772.73	5	16.2
120	815.26	5	16.8

表 3　轨缝“前高后低”情况下接触力统计值

Table 3　Statistical value of contact force under the condition of front-high-rear-low rail joint gap

速度/(km·h^{-1})	最大碰撞力/N	碰撞次数/次	离线时间/ms
40	844.52	6	24.7
60	1 609.62	7	37.5
80	2 650.12	8	49.5
100	3 372.51	8	54.9
120	4 089.98	9	63.0

表 2 可知，在轨缝“前低后高”情况下，随车辆速度从 40 km/h 提高至 120 km/h，最大碰撞力、碰撞次数、离线时间虽略有增长，但增长幅度较小，整体基本保持不变；最大碰撞力维持在 800 N 左右，碰撞次数维持在 4~5 次，离线时间维持在 16 ms，属于小离线。因此，“前低后高”工况对靴轨系统受流质量的影响有限。

由表 3 可知，在轨缝“前高后低”情况下，随着车辆速度从 40 km/h 提高至 120 km/h，最大碰撞力从 844.52 N 提高至 4 089.98 N，碰撞次数从 6 次提高至 9 次，离线时间从 24.7 ms 增加至 63.0 ms。因此，当集电靴通过轨缝“前高后低”工况时的碰撞问题最为恶劣，对靴轨系统受流质量影响最严重。

结合靴轨受流质量的评价指标[10]，在最恶劣的轨缝条件下，车辆运行速度在 80 km/h 以下时，可以较好地控制离线时间小于 50 ms，保证靴轨系统间的受流质量。

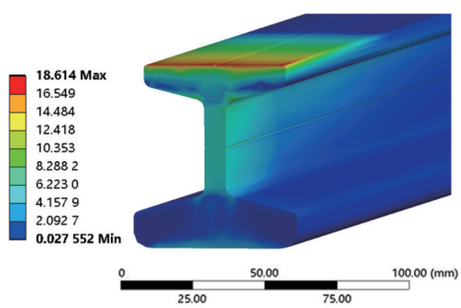
3.3　轨缝影响下靴轨系统结构性能分析

基于不同速度下受轨缝影响的靴轨碰撞力分析结果，分别对碰撞力载荷作用下的集电靴和接触轨的结构性能进行分析。施加不同速度下的靴轨碰撞力载荷，得到靴轨系统在不同轨缝方向下的结构应力分析结果，具体如表 4 和图 9 所示。

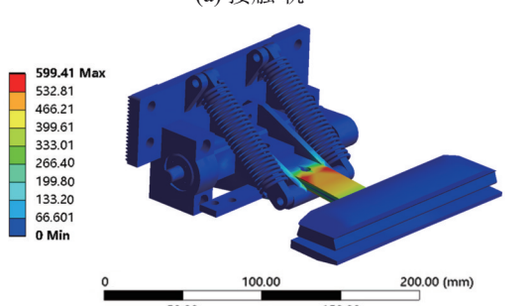
表4 轨缝影响下靴轨系统结构应力值

Table 4 Shoegear-conductor structural stress value under the condition of the conductor rail joint gap MPa

速度/(km·h^{-1})	集电靴应力		接触轨应力	
	前低后高	前高后低	前低后高	前高后低
40	106.57	123.72	17.657	17.752
60	109.06	235.86	17.660	17.908
80	110.82	388.47	17.662	18.204
100	113.17	494.30	17.670	18.409
120	119.47	599.41	17.678	18.614



(a) 接触 轨



(b) 集电靴

图9 轨缝影响下靴轨结构应力云图(120 km/h)

Fig. 9 Shoegear-conductor structural stress cloud under the condition of the conductor rail joint gap (120 km/h)

根据表4和图9可知，在轨缝“前低后高”的情况下，随着车辆速度的提高，接触轨结构的最大应力值变化较小，均维持在17.6 MPa左右，而在轨缝“前高后低”情况下，接触轨最大应力值为由17.752 MPa升至18.614 MPa，但仍远小于接触轨材料屈服极限，因此轨缝对接触轨的结构性能影响较小。

集电靴在不同速度下的最大应力位置均出现在“T”型摆臂与受流支撑臂接触处，由于“T”型摆臂与受流支撑臂之间有轴向相对运动趋势，存在相互挤压的垂向作用力，故此处应力值最大。集电靴最大应力值随碰撞力增加而逐渐增大，对于轨缝“前低后高”和最高速度时最大应力值增幅为12.10%，120 km/h速度下最大应力值为119.47 MPa，小于碳钢屈服强度标准值335 MPa，因此不会发生材料失效而导致的部件发生塑性变形。但是在轨缝“前高后低”情况下，集电靴最大应力值最高可达599.41 MPa，远超碳钢屈服强度，由表4可知，当车辆速度达到80 km/h时，其最大应力值已超过材料屈服强度，因此在车辆运行中“前高后低”的轨缝极易造成集电靴结构损伤。进一步仿真计算可知，当“前高后低”轨缝的宽度及其高差缩小25%和车辆速度120 km/h的条件下，集电靴最大应力为295.37 MPa，满足材料结构强度要求。因此，若需使靴轨系统在更高速度（如120 km/h）运行时，则需提高施工精度，避免出现间隙或高差较大的接触轨轨缝。

4 结语

本文以下接触式靴轨系统为研究对象，采用有限元和多体动力学方法建立了靴轨耦合模型，通过对比仿真结果和实测数据，验证了所建立模型的准确性。在此基础上，研究了不同列车运行速度下靴轨轨缝对靴轨系统受流质量的影响。

当集电靴以不同运行速度通过“前低后高”轨缝时，靴轨间最大碰撞力维持在800 N左右，离线时间小于20 ms，此时轨缝对靴轨系统受流质量的影响较小；当集电靴通过“前高后低”轨缝时，车速与最大碰撞力、离线时间成正比，轨缝对靴轨系统受流质量的影响严重。在最恶劣的轨缝条件下，车辆运行速度控制在80 km/h以内，才能保证靴轨系统具有较好的受流质量。

参考文献：

[1] 刘志刚, 宋洋, 韩烨, 等. 高速铁路接触网研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3): 495-518.
LIU Zhigang, SONG Yang, HAN Ye, et al. Advances of research on high-speed railway catenary[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(3): 495-518.

[2] HU Zeyao, LIU Zhigang, CHEN Long, et al. Influence of structure and parameters on the dynamic performance of rigid catenary and pantograph system[M]//ZHAI Wanming, WANG K C P, ZHU Shengyang. ICRT 2021. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2022: 212-220.

[3] CHEN Long, DUAN Fuchuan, SONG Yang, et al. Three-dimensional contact formulation for assessment of dynamic interaction of pantograph and overhead conductor rail system[J/OL]. Vehicle System Dynamics, 2022: 1-24. (2022-08-22) [2022-12-16]. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00423114.2022.2112607. DOI: 10.1080/00423114.2022.2112607.

[4] CHEN Long, DUAN Fuchuan, SONG Yang, et al. Assessment of dynamic interaction performance of high-speed pantograph and overhead conductor rail system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 71: 1-14.

[5] 马沂文, 白秀梅. 城市轨道交通供电接触网类型的比较[J]. 城市轨道交通研究, 2003, 6(1): 20-24.

MA Yiwen, BAI Xiumei. A comparison of UMT electric contact systems[J]. Urban Mass Transit, 2003, 6(1): 20-24.

[6] 张静, 左小红, 靳守杰, 等. 基于有限元的靴轨系统动力学建模及参数影响规律研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(8): 45-53.
ZHANG Jing, ZUO Xiaohong, JIN Shoujie, et al. Dynamic modeling and parameter analysis of electric shoegear and conductor rail system based on finite element[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(8): 45-53.

[7] 住房和城乡建设部城市轨道交通标准化技术委员会. 城市轨道交通钢铝复合导电轨技术要求: CJ/T 414—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
Urban Rail Transit Standardization Technical Committee of the Ministry of Housing and Urban Rural Development. Technical requirements for aluminum-steel conductor rails for urban rail transit: CJ/T 414—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

[8] 李国富. 第三轨受流系统刚柔耦合动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
LI Guofu. Study on rigid-flexible coupling dynamics of third rail current collection system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

[9] HIPPMANN G. An algorithm for compliant contact between complexly shaped bodies[J]. Multibody System Dynamics, 2004, 12(4): 345-362.

[10] 王瑞. 地铁第三轨/受流器垂向耦合动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
WANG Rui. Study on vertical coupling dynamics of the third rail/shoegear[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

收稿日期：2023-02-07