

计及流固耦合的受电弓气动特性研究

王 雨¹, 王 启^{2*}, 饶 辉³

¹成都轨道交通集团有限公司技术信息部, 四川 成都

²成都轨道交通产业技术研究院有限公司科技发展部, 四川 成都

³成都地铁运营有限公司总工办, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月9日; 录用日期: 2025年6月30日; 发布日期: 2025年7月11日

摘 要

为了研究受电弓流固耦合作用对受电弓气动特性影响, 基于计算流体动力学理论, 建立受电弓的空气动力学模型, 采用雷诺时均方法(RANS), 模拟受电弓的非定常气动力; 利用有限元分析协同仿真平台, 建立受电弓的结构动力学模型, 并通过系统耦合求解器, 完成流体压力和结构位移计算数据交换, 实现受电弓的双向流固耦合分析。研究结果表明: 流固耦合作用主要引起受电弓上框架升力增大和下臂杆升力减小, 对受电弓其他部件的升、阻力影响相对较小。上框架、下臂杆气动升力受流固耦合作用影响较为明显, 表明上框架与下臂杆的结构柔性与非定常流场存在较强的耦合机制。

关键词

受电弓, 双向流固耦合, 气动阻力, 气动升力

Aerodynamic Characteristics of Pantograph with Fluid-Structure Interaction

Yu Wang¹, Qi Wang^{2*}, Hui Rao³

¹Technical Information Department, Chengdu Rail Transit Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Science & Technology Development Department, Chengdu Rail Transit Industry Technology Research Co., Ltd., Chengdu Sichuan

³Chief Engineer Office, Chengdu Metro Operation Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Jun. 9th, 2025; accepted: Jun. 30th, 2025; published: Jul. 11th, 2025

Abstract

In order to study the effects of fluid-solid coupling on the aerodynamic characteristics of the

*通讯作者。

文章引用: 王雨, 王启, 饶辉. 计及流固耦合的受电弓气动特性研究[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(3): 249-255.

DOI: 10.12677/dsc.2025.143025

pantograph, the aerodynamic model of pantograph was established based on the theory of computational fluid dynamics. The Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) was applied to simulate the unsteady aerodynamic forces of the pantograph by Fluent simulation. The structure dynamics model of pantograph was established by the Workbench co-simulation platform. The System Coupling solver was also used to complete the data transfer of fluid pressure and structure displacement to realize the bidirectional fluid-solid coupling analysis of the pantograph. The results show that the effect of fluid-solid coupling mainly causes the upper frame lift of the pantograph to increase and the lower frame lift to decrease. The effect of fluid-solid coupling has less influence on the lift and drag force of other components of the pantograph. The aerodynamic lift forces on the upper frame and lower arm are significantly influenced by fluid-structure interaction (FSI), indicating a strong coupling mechanism between the structural flexibility of these components and the unsteady flow field.

Keywords

Pantograph, Bidirectional Fluid-Solid Coupling, Drag Force, Lift Force

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受电弓的流固耦合关系指受电弓在运行时与受电弓周围的空气、运行环境之间的相互耦合作用关系[1]。受电弓的运行速度和姿态影响空气的流动,空气的流动同样影响受电弓的运行速度和姿态,从而使空气和受电弓组成一个耦合的大系统。随着列车的高速化发展,空气、受电弓和运行环境之间的耦合作用明显加强,流固耦合动力学问题的研究越来越受到国内外学者的重视[2]。单向流固耦合分析指在流体计算域和结构计算域之间只进行一次数据传递,双向流固耦合分析则需要每个求解步内相互传递流固耦合数据。

文献[3]采用单向流固耦合方法,研究了高速列车运行时对屏蔽门的压力作用,且在风洞中完成了不同横风风速和风偏角的屏蔽门压力测量。文献[4]采用单向流固耦合方法,获得了横风作用下的高速铁路噪声屏障流体分布,将计算结果作为输出荷载传递给结构分析模块,获取噪声屏障的等效应力和变形分布。文献[5]研究多场耦合对弓网系统的影响时,建立了流固耦合模型,将作用在受电弓各部件的气动力引入多刚体受电弓模型,计算考虑空气动力的总抬升力。文献[6]采用计算流体动力学和多体动力学相结合的方法,研究高速列车过站台时的风致振动问题。文献[7]研究了侧风环境下高速列车通过站台的安全性。给出了流固耦合振动下列车姿态的变化规律。文献[8]研究了流固耦合作用下列车高速交会的安全特性,提出了更符合实际列车交会情况的流固耦合振动仿真方法。文献[9]研究了高速列车气动特性和气动力作用下的高速列车动力学特性,通过实时传递气动参数和姿态参数,实现高速列车流固耦合联合仿真,并且研究了横风环境下的高速列车流固耦合动力学行为。文献[10]提出一种快速高效计算的平衡状态方法,实现了车辆-轨道耦合动力学和列车空气动力学的联合仿真。文献[11]分别建立列车空气动力学模型和车辆-轨道耦合动力学模型,并实现两个模型间的计算数据传递建立高速列车流固耦合模型。

郭迪龙等[12]采用脱体涡模拟(DES),对高速列车受电弓的非定常气动特性进行深入研究。认为受电弓脱体涡的强度、脱落频率对受电弓气动升力系数影响很大,侧向力随横风速度的增大而增大,为高速受电弓的优化设计提供了依据。肖友刚等[13]采用大涡模拟法和 FW-H 方程计算截面为矩形、圆形、椭圆

形时受电弓绝缘子的气动噪声,并从降低气动噪声的角度出发,确定优化的绝缘子截面形状为椭圆形,且椭圆的长轴应跟气流流向一致。戴志远等[14]建立了多种不同直径上臂杆和下臂杆的受电弓模型,从气动力及流场特性的角度研究了受电弓上下臂杆直径对受电弓气动性能、气动抬升力的影响规律,为受电弓设计优化的参数选择提供了依据。Dai 等[15]对带挡板受电弓的气动抬升力进行了数值研究,确定了挡板角度的最佳范围,并提出了一种确定挡板角度的优化方法,得到了不同工况下挡板升力随其角度的变化关系。Yao 等[16]利用改进延迟分离的涡模拟(IDDES)和声学有限元方法(FEM),对 300 km/h 速度下运行的受电弓的空气动力特性进行了分析,对原受电弓结构进行改造,将绝缘子和底架包裹起来,使气动阻力和气动噪声得到了有效降低。Guo 等[17]以 CRH380BL 受电弓为基本原型,引入了开放式的上下臂、对上下臂开槽和翼型弓头三种减少气动噪声的措施,从而设计了一种新的受电弓,并通过大涡模拟(LES)和 Ffowcs Williams-Hawkins (FW-H)方程方法全面验证了其空气声学性能。

综上所述,列车车体的流固耦合动力学问题已经得到了学者们的重视和研究[18]-[21],但对于受电弓流固耦合问题的研究还相对较少,且停留在单向流固耦合阶段。本文基于 CFD/CSD 耦合方法,重点分析受电弓关键部件在流固耦合作用下的气动力分布特性,旨在揭示动态变形对气动稳定性的影响机制,为弓网系统动态设计提供理论支撑。

2. 受电弓双向流固耦合模型

2.1. 受电弓空气动力学模型

本文湍流模型选用 Reynolds 平均法(RANS)进行计算,采用二方程的剪切应力输运 SST $k-\omega$ 模型。采用压力基算法求解 RANS 方程,时间项用一阶隐式格式,梯度和力用二阶格式,动量、湍动能和耗散项用二阶迎风格式。受电弓模型采用 1:1 大小的三维实体模型,如图 1 所示,包括滑板、弓头支架、上框架、下臂杆、拉杆以及底架等部件。为提高计算效率,受电弓作简化处理,部件仅保留关键部件,即前后滑板、上框架与下臂杆。本文选取受电弓模型的高度为特征长度,即特征长度 $H = 1.334 \text{ m}$ 。流场的速度方向长度取 $26 H$,垂直速度方向为 $12 H \times 6 H$ 的矩形面。受电弓流场计算区域,如图 2 所示。选取的流场计算区域避免了区域边界对受电弓周围流场结构的影响,保证了流场与实际情况相吻合。

受电弓表面采用无滑移的壁面边界条件,速度入口面设置为速度入口边界,入口速度设置为 350 km/h。压力出口面设置为压力出口边界,压力出口的相对压强设置为 0 Pa;对称面即顶面和两个侧面的边界条件设置为对称边界条件;壁面采用无滑移的壁面边界条件。采用非结构四面体网格,对流场进行划分,空间流场网格为 0.8 m,受电弓表面网格为 0.01 m。受电弓表面和空间体网格,如图 3 所示。

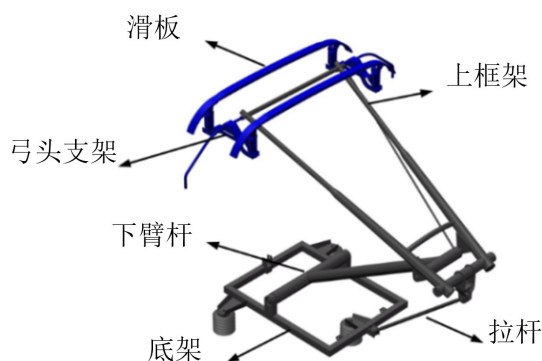


Figure 1. Pantograph model
图 1. 受电弓模型

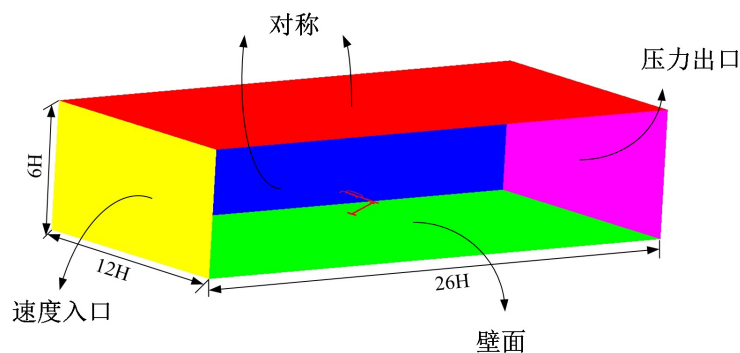


Figure 2. Pantograph calculation domain

图 2. 受电弓流场计算区域

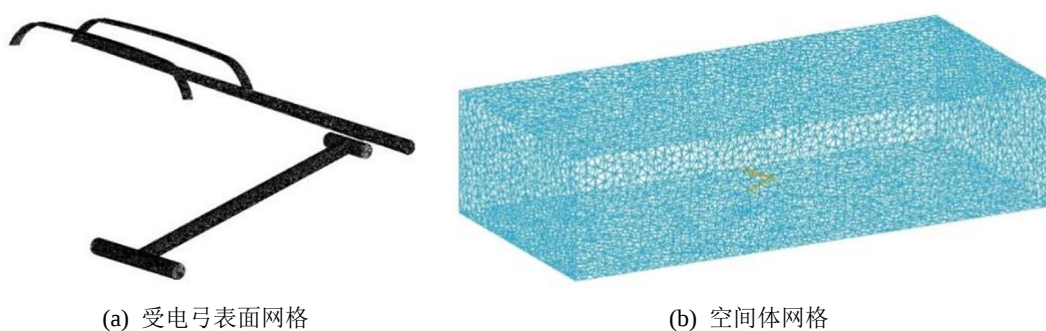


Figure 3. Pantograph surface and flow field domain mesh

图 3. 受电弓表面及空间体网格

2.2. 受电弓结构动力学模型

在结构动力学分析中, 结构动力学方程采用 Newmark 方法进行求解, 对动力学方程进行离散后, 在每个时间步长内采用 Newton-Rapson 迭代。弓头和上框架的材料采用铝合金, 下臂杆的材料采用碳素结构钢。受电弓各部件网格大小均设置为 0.01 m, 将前后滑板、上框架、下臂杆设置为流固耦合作用面, 用于传递流体和结构计算数据。忽略受电弓在运行过程中开口大小的微小变化, 根据受电弓实际约束情况, 设置受电弓各部件共 10 个面的固定约束, 具体约束情况如图 4 所示。

- A Fixed Support
- B Fixed Support 2
- C Fixed Support 3
- D Fixed Support 4
- E Fixed Support 5
- F Fixed Support 6
- G Fixed Support 7
- H Fixed Support 8
- I Fixed Support 9
- J Fixed Support 10

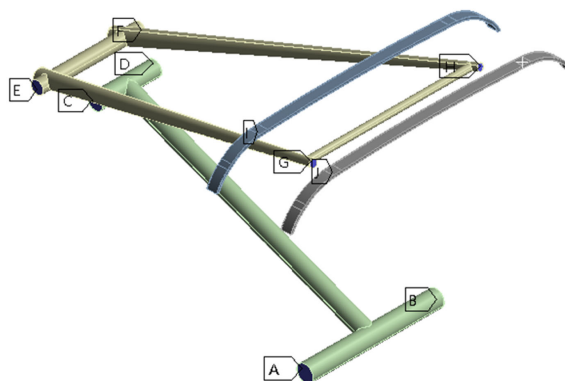


Figure 4. Constraints of the pantograph

图 4. 受电弓约束

2.3. 流固耦合方法

本文采用有限元协同仿真平台实现流固耦合(FSI)分析,通过其内置的 System Coupling 模块集成流体计算与结构求解,实现压力-位移双向数据交换。该方法通过项目流程图实现多物理场协同仿真,流体域与结构域采用双向数据交换机制,流体压力载荷通过 MPCCI 接口映射至结构表面,结构变形通过 RBF 动网格技术反馈更新流体域几何。耦合计算采用二阶隐式时间推进格式,时间步长设置为 0.001 s,收敛标准为界面力残差小于 1%。

3. 流固耦合对受电弓气动力影响分析

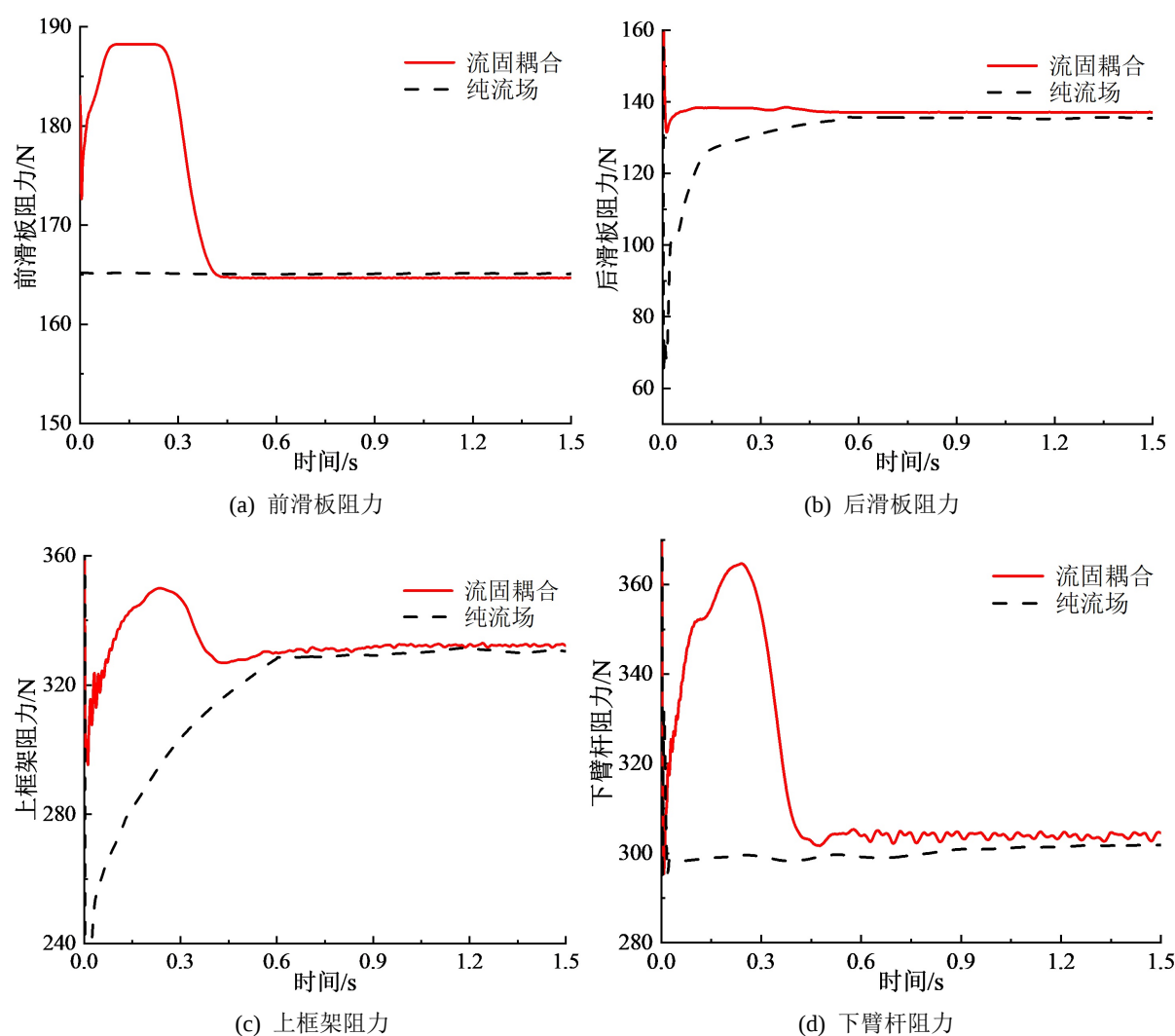


Figure 5. Pantograph drag force time-history curve simulated by fluid-solid coupling and fluid

图 5. 受电弓各部件流固耦合与纯流场气动阻力时程曲线

本文针对高速列车受电弓在典型运行速度 350 km/h 下,受电弓设置为开口方向,采用双向流固耦合方法(FSI)与纯计算流体力学(CFD)方法对受电弓气动力特性作对比分析。图 5 比较了流固耦合作用和纯流场作用时的受电弓各部件阻力时程曲线。由图分析可得:受电弓各部件气动阻力收敛后,流固耦合作用下前滑板阻力较纯流场降低约 0.5%,流固耦合作用与纯流场作用差异不显著,表明前滑板结构变形对

前缘气动干扰有限。流固耦合作用下的后滑板、上框架、下臂杆阻力比纯流场作用时增大约 1%~1.5%。上框架、下臂杆流固耦合气动阻力时程曲线波动程度较大。该现象反映出受电弓上框架与下臂杆因结构柔性导致的流致振动放大效应, 对弓网动态接触力稳定性具有重要影响。

图 6 比较了流固耦合作用和纯流场作用时的受电弓各部件升力时程曲线。流固耦合作用下的前滑板、上框架升力比纯流场作用时增大。流固耦合作用下的后滑板、下臂杆升力比纯流场作用时减小。下臂杆气动升力为负值, 表明其气动升力方向与前、后滑板及上框架相反, 流固耦合作用下的下臂杆升力比纯流场作用时减小。上框架、下臂杆气动升力受流固耦合作用影响明显, 气动力变化可达 8 N, 这反映了结构柔性与非定常流场之间的较强的耦合作用机制。

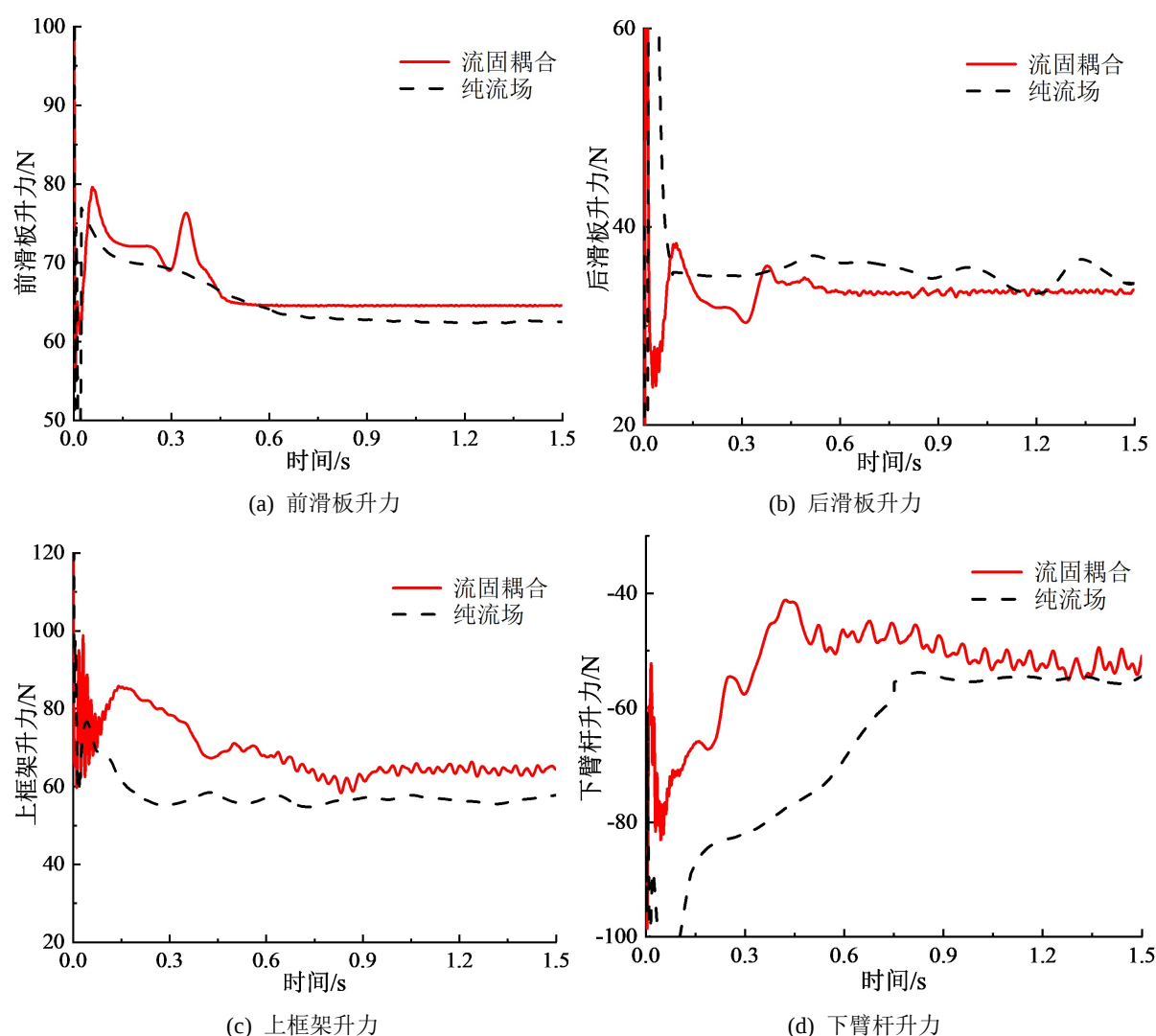


Figure 6. Pantograph lift force time-history curve simulated by fluid-solid coupling and fluid

图 6. 受电弓各部件流固耦合与纯流场气动升力时程曲线

4. 结论

考虑流固耦合作用对受电弓气动特性的影响, 研究了流固耦合作用对受电弓各部件气动力和受电弓气动抬升力, 研究结论如下:

- (1) 流固耦合作用导致上框架升力增大, 下臂杆升力减小, 对受电弓其他部件的升、阻力影响较小。
- (2) 上框架与下臂杆对流体-结构相互作用较为敏感, 其动态载荷波动幅度可达 8 N, 表明上框架与下臂杆的结构柔性与非定常流场存在较强的耦合机制。

参考文献

- [1] 于万聚. 高速电气化铁路接触网[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
- [2] 迟江峰. 400 km/h 受电弓流固耦合特性仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [3] Belloli, M., Pizzigoni, B., Ripamonti, F. and Rocchi, D. (2009) Fluid-Structure Interaction between Trains and Noise-Reduction Barriers: Numerical and Experimental Analysis. *WIT Transactions on The Built Environment*, **105**, 49-60. <https://doi.org/10.2495/fsi090051>
- [4] Wang, H.C. and Xie, J.F. (2013) FSI Research on the Noise Barrier of High-Speed Railway in the Composite Conditions. *Applied Mechanics and Materials*, **307**, 149-155. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.307.149>
- [5] Zdziebko, P., Martowicz, A. and Uhl, T. (2017) An Investigation into Multi-Domain Simulation for a Pantograph Catenary System. *ITM Web of Conferences*, **15**, Article No. 03001. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171503001>
- [6] 崔涛, 张卫华, 张曙光, 等. 列车高速通过站台时的流固耦合振动研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 50-55.
- [7] 崔涛, 张卫华. 侧风环境下列车高速通过站台的流固耦合振动[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 404-408.
- [8] 崔涛, 张卫华, 王琰. 列车高速交会流固耦合振动数值仿真分析[J]. 机车电传动, 2013(4): 1-5.
- [9] 李田, 张继业, 李忠继, 等. 基于 Fluent 与 Simpack 的高速列车流固耦合联合仿真[J]. 计算力学学报, 2012, 29(5): 675-680.
- [10] Li, T., Yu, M., Zhang, J. and Zhang, W. (2015) A Fast Equilibrium State Approach to Determine Interaction between Stochastic Crosswinds and High-Speed Trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **143**, 91-104. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.04.002>
- [11] 李田, 张继业, 张卫华. 横风下高速列车流固耦合动力学联合仿真[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 138-145.
- [12] 郭迪龙, 姚拴宝, 刘晨辉, 等. 高速列车受电弓非定常气动特性研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(11): 16-21.
- [13] 肖友刚, 时彧. 高速列车受电弓绝缘子的气动噪声计算及外形优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(6): 72-76.
- [14] 戴志远, 李田, 周宁, 等. 上下臂杆直径对高速受电弓气动抬升力的影响[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 210-222.
- [15] Dai, Z., Li, T., Zhou, N., Zhang, J. and Zhang, W. (2021) Numerical Simulation and Optimization of Aerodynamic Uplift Force of a High-Speed Pantograph. *Railway Engineering Science*, **30**, 117-128. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00258-7>
- [16] Yao, Y., Sun, Z., Li, G., et al. (2022) Numerical Investigation on Aerodynamic Drag and Noise of Pantographs with Modified Structures. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **15**, 617-631.
- [17] Guo, J., Tan, X., Yang, Z., Xue, Y., Shen, Y. and Wang, H. (2022) Aeroacoustic Optimization Design of the Middle and Upper Part of Pantograph. *Applied Sciences*, **12**, Article No. 8704. <https://doi.org/10.3390/app12178704>
- [18] 胡可, 赵阳, 王钢, 等. 蒸气云爆炸作用下钢储罐动力响应的双向流固耦合分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15): 199-208.
- [19] Lu, X., Liu, Z., Song, Y., Wang, H., Zhang, J. and Wang, Y. (2017) Estimator-Based Multiobjective Robust Control Strategy for an Active Pantograph in High-Speed Railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **232**, 1064-1077. <https://doi.org/10.1177/0954409717707399>
- [20] Song, Y., Ouyang, H., Liu, Z., Mei, G., Wang, H. and Lu, X. (2017) Active Control of Contact Force for High-Speed Railway Pantograph-Catenary Based on Multi-Body Pantograph Model. *Mechanism and Machine Theory*, **115**, 35-59. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.04.014>
- [21] 李瑞平, 周宁, 张卫华, 等. 受电弓气动抬升力计算方法与分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 26-32.