

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.042

高速列车受电弓射流减阻主动控制研究

韩思远¹, 王东镇¹, 李新康¹, 巩译泽², 隋明君²

(1. 中车工业研究院(青岛)有限公司, 山东 青岛 266109; 2. 国家高速列车青岛技术创新中心, 山东 青岛 266109)

摘要:为提高受电弓空气动力学性能,实现受电弓减阻主动控制,在不改变受电弓整体造型的基础上,研究不同射流孔位置、速度和角度对受电弓整弓阻力以及周边流场的影响,达到降低风阻的目的。针对基础仿真模型进行合理的计算域尺寸选择与网格无关性验证,确保仿真模型网格数量既能满足计算精度也能满足计算效率要求。通过该仿真模型与风洞试验结果进行仿真与试验对标,确保仿真与试验数据误差合理。基于高精度空气动力学仿真模型,在导流罩尾部布置射流孔,在同样工况下进行减阻效果的对比,选出射流孔开孔位置,对不同的射流速度以及射流方向进行减阻效果对比,选出最优减阻工况。研究结果表明,在导流罩尾部合理位置布置射流孔,可以起到较好的减阻效果,以应对更高速度工况下的受电弓使用性能要求。

关键词:高速列车;受电弓;主动控制;射流;空气动力学;减阻

中图分类号:U264.3⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0221-06

Research on Active Control of Drag Reduction by Jet for High-Speed Train Pantograph

Han Siyuan¹, Wang Dongzhen¹, Li Xinkang¹, Gong Yize², Sui Mingjun²

(1. CRRC Academy (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266109, China;

2. National Innovation Center of High Speed Train, Qingdao 266109, China)

Abstract: To improve the aerodynamic performance of the pantograph and achieve active control of drag reduction, without altering the overall shape of the pantograph, the effects of different jet hole positions, velocities, and angles on the total drag of the pantograph and the surrounding flow field are studied to reduce wind resistance. A reasonable computational domain size is selected for the baseline simulation model, and grid independence verification is conducted to ensure that the number of grid cells meets both calculation accuracy and efficiency requirements. The simulation model is validated against wind tunnel test results to ensure reasonable agreement between simulation and experimental data. Based on a high-precision aerodynamic simulation model, jet holes are arranged at the tail of the fairing, and drag reduction effects are compared under the same operating conditions to select the jet hole opening position. Different jet velocities and directions are compared to select the optimal drag reduction condition. The research results indicate that arranging jet holes at a reasonable position at the tail of the guide vane can have a good drag reduction effect, achieve a good drag reduction effect, sufficient to meet the performance requirements of the pantograph under higher speed conditions.

Keywords: high-speed train; pantograph; active control; jet; aerodynamics; drag reduction

0 引言

《交通强国建设纲要》明确强调了强化节能减排措施和环境污染治理工作,并前瞻性地规划了对速度等级达到 400 km 的高速铁路轮轨客运列车系统的科学技术储备研究。这意味着中国在推进高速铁路建设的进程中,正坚定地朝着更加环保、节能以及突破速度极限的方向演进与发展^[1]。在高速列车的整体设计环节,优化其空气动力学性能,是决定列车整体性能的核心要素之

一;故空气动力学理论构成了支撑这一性能优化不可或缺的科学理论基础^[2]。由于空气阻力与速度的平方成正比,以 CRH2 型动车组在惰行试验中所体现的数据为例,当列车运行速度从 250 km/h 提升至 350 km/h 时,其整车总阻力呈现了 84.2% 的显著增长。其中,气动阻力的增长部分占据了总阻力增量的 94.5%。这充分说明在高速运行条件下,气动阻力对列车总阻力的影响巨大,它成为决定高速列车能耗和性能的关键因素^[3]。其中受电弓在高速列车整车系统中属于明显突起部

基金项目:山东省重大科技创新工程计划资助项目(2021ZDPT02)

第一作者简介:韩思远(1991—),男,工程师,硕士,研究方向为空气动力学,redcap91@163.com。

件,具备比较大的减阻空间。

国内外的研究者在受电弓空气动力学性能开发等方面做了大量的工作。秦登等^[4]针对不同升弓高度对受电弓气动特性及周围流场的影响进行了深入研究。张卫华等^[5]在京沪高速铁路先导段的实际运行条件下,对 DSA380 型高速受电弓进行了全面的实地测试。试验过程中成功收集到了该受电弓在实际工况下的气动阻力、气动抬升力、表面压力分布、结构应力状态以及由空气流动引发的振动特性等真实数据。张弘、张建辉等^[6-7]对受电弓进行了严谨的风洞测试,并将所得数据与前期理论分析结果进行了对照验证;结果显示,理论预测的各项指标与风洞试验获取的实际数据基本一致,从而证实了理论分析的有效性和准确性。张冰等^[8]在武广高速铁路线路上,对 SSS400 型受电弓进行了详尽的气动力性能测试实验,并通过对收集数据的深入分析,探究了气动力因素对受电弓与接触网间受流效果的具体影响。付善强等^[9]在中国航空工业气动研究院的 FL-9 风洞设施中,对横风环境下的高速受电弓进行了专门试验,深入研究了受电弓整体所承受的气动力作用及其因风引起的振动特性。通过结合线路现场试验和风洞模拟试验,对受电弓各项关键参数进行动态检测分析,全面揭示高速受电弓在实际运行中的空气动力学性能特征。然而,此类综合测试方法虽然能够为评估和完善高速弓网系统的性能提供详实的数据支持和科学依据,但其投入的成本较高^[10]。

本文主要通过搭建高精度仿真模型,基于仿真分析的方式,在受电弓不同合理部位安装射流孔,对列车高速状态运行下受电弓区域附近的流场进行优化,目的为降低受电弓在运行过程中所受到的空气阻力,提升受电弓空气动力学性能。

1 原始受电弓几何模型及仿真

1.1 原始受电弓几何模型及气动阻力分析

高速列车受电弓作为高铁整车系统中少有的突起部件,其对整车气动阻力影响较为明显。本文计算模型采用 CR400AF 列车的一款改进型受电弓。该受电弓基于 CR400AF 受电弓针对底架进行了导流罩包覆设计。空气动力学仿真模型在最大程度保留受电弓外表面造型的情况下,针对不必要结构进行了合理简化,如图 1 所示。

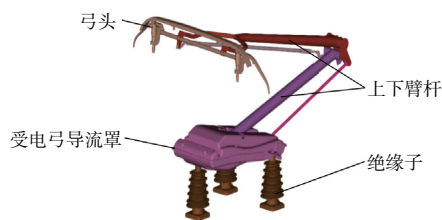


图 1 受电弓模型示意图

1.2 计算域与边界条件设置

根据实际运行工况,受电弓姿态分为升弓开口、升弓闭口、落弓开口、落弓闭口 4 种。根据以往研究经验以及仿真与试验对比,升弓开口为受电弓运行条件最恶劣的工况,所以本文选取受电弓升弓开口工况进行射流减阻空气动力学性能研究。

为确保仿真误差精度满足要求,首先在 400 km/h 速度下对原始受电弓网格模型进行气动阻力仿真分析。仿真模型采用六面体网格进行划分,边界层划分采用 10 层边界层,增长率 1.2 沿受电弓表面法向方向进行过渡。为确保首层网格的 Y^+ 值能满足湍流模型壁面函数要求,模型需要对第一层网格厚度进行控制。流体计算域初始尺寸为 $30\text{ m} \times 12\text{ m} \times 14\text{ m}$,网格模型数量为 252 万,初始仿真模型计算域如图 2 所示。后续将会对计算域尺寸进行调整并进行网格无关性验证,确保在满足计算精度要求的同时,尽可能快速高效完成计算,便于进行后续的射流减阻优化。

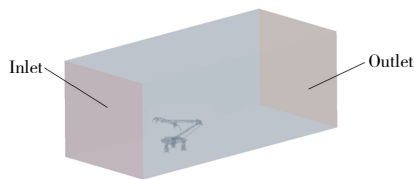


图 2 计算域示意图

1.3 网格无关性验证

在空气动力学仿真分析的过程中存在各式各样的误差,其中很多误差难以被完全消除。误差的存在从一定程度上看也是合理的。即使是试验也存在人为误差与模型一致性误差,要求空气动力学仿真分析结果与风洞试验结果完全一致也不易做到。对于空气动力学仿真来讲,针对流体网格进行合理的细化是提高模型计算精度的有效措施。但同时随着网格量的增多,模型计算时间也会变长,所以需要针对不同的模型采用合适的网

格划分方法与网格数量,高效并且较为准确地获取理想的结果。

一般来讲,越细致的流体网格计算精度越高,但显然这与实际的工程应用和研发过程是相违背的。因为随着网格数量的增加,计算精度的提升并不明显,与此同时消耗的计算资源则是巨大的。所以采用合理的计算网格数量既可以满足计算精度要求,又可以提高仿真及优化效率。在实际计算中,网格的精细程度对结果的影响可以达到忽略不计的时候,可认为获得了网格无关解。

首先针对计算域尺寸进行调整,确保受电弓模型与计算域达到合理的阻塞比,计算域尺寸对计算结果影响较小,以及计算域前后尺寸空间满足计算要求,调整结果如表 1 所示。

表 1 计算域尺寸调整

计算域尺寸 W×H/m	网格量/万	受电弓阻力/N
12.0×14.0	252	3 085.2
14.0×14.0	266	3 070.1
16.0×14.0	279	3 059.3
16.0×16.0	301	3 050.2
16.0×18.0	312	3 048.4
18.0×18.0	315	3 047.9

经过对不同计算域尺寸的受电弓阻力对比发现,当计算域尺寸调整到 16.0 m×16.0 m 后再增大尺寸后,受电弓阻力变化较小,说明该计算域尺寸设置相对合理,满足计算要求,选择该尺寸计算域进行后续的网格无关性验证及射流优化仿真。

在完成合理计算域尺寸设置后,针对受电弓表面网格进行细化。目的是为了更精确的捕捉到受电弓表面造型,真实地反映出受电弓近壁面流场状态;同时针对加密区进行网格细化,确保受电弓周边体网格尽可能反映出流场的真实结构。网格数量调整及计算结果如表 2 所示。

表 2 网格数量调整

网格量/万	受电弓阻力/N
301	2 801.2
369	2 860.3
425	2 905.1
480	2 924.8
525	2 935.8
576	2 942.0
639	2 949.3

经过调整受电弓网格尺寸和计算域加密尺寸,网格数量逐渐增加,在网格数大于 480 万之后,受电弓阻力受到计算域的影响较小。考虑到节省计算资源,选择 480 万的网格数设置即可以满足计算要求,后续基于该网格数与风洞试验结果对比仿真与试验之间的误差。

1.4 模型风洞试验对标

空气动力学的研究主要采用两种手段,分别是通过仿真分析和风洞试验,两种手段各有优缺点,无法互相替代。仿真分析可以在没有样件的情况下进行流场仿真、造型优化。其特点是可以花费较少的时间周期成本直观地观察到空间流场结构,便于根据流场结构对零部件结构进行造型优化。相比风洞试验,仿真无法作为工程开发中的验证手段,风洞试验结果更真实可靠。但风洞试验无法观察到空间流场结构,不便于进行空气动力学性能优化,且试验成本比较高。在空气动力学性能开发当中,通常采用仿真与试验相结合的方式,这样可以发挥两种方式各自的优势,高效并且节约成本,同时又可以获得真实的试验验证结果。本文首先采用试验结果与仿真进行对比,确保仿真精确度满足要求,再基于对比后的仿真设置方法通过空气动力学仿真的方式进行后续的优化。具体情况如表 3 所示。

表 3 仿真与试验结果对比

速度工况/(km/h)	仿真结果/N	试验结果/N	误差/%
370	2 501.5	2 399.3	4.09
400	2 924.8	2 801.8	4.21
450	3 739.2	3 576.8	4.34
500	4 635.5	4 425.3	4.53
550	5 680.9	5 409.9	4.77
600	6 912.7	6 546.1	5.30

针对该受电弓,完成 370 km/h~600 km/h 共 6 种工况的风洞试验测试,得到完整的气动阻力试验结果。通过对比这 6 个工况的仿真与试验误差可以发现,所有工况的仿真误差均小于 6%,另外经过试验视频观察与分析误差主要来源于试验过程中的受电弓形变,该误差无法单纯通过流体仿真消除,综合考虑该误差可以被认为满足精度要求。

2 增加射流孔优化结果

本研究通过在受电弓导流罩表面安装射流孔

的方式,实现优化受电弓周边气流结构,寻找最优射流孔布置形式,以达到减阻的效果,提升受电弓空气动力学性能。

2.1 射流孔安装位置及方案

射流孔的安装位置、射流孔的尺寸、射流的速度以及射流方向都会影响到减阻效果。基于气流分离点位置的考虑,同时受电弓导流罩射流孔布置空间有限,选取射流孔 A 和射流孔 B 两个可能有效的位置分别进行研究,如图 3、图 4 所示。

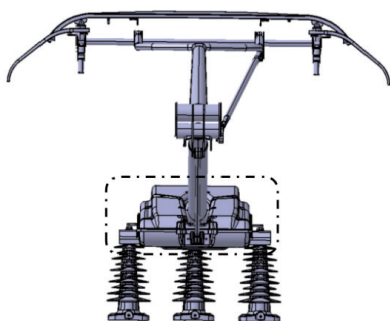


图 3 受电弓及导流罩位置示意图

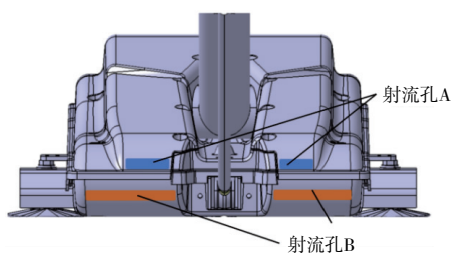


图 4 射流孔位置示意图

首先研究射流方向对减阻效果的影响,选取水平线标准上下 $\pm 10^\circ$ 以 50 m/s 的速度进行射流,如图 5 所示。对比射流孔 A 和射流孔 B 是否能起到明显减阻效果,再针对不同的射流角度进行仿真分析,对比得出最优射流角度。在此基础上,再针对不同射流速度进行对比,完成最优射流速度选取,达到最佳效果。

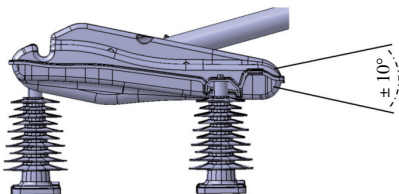


图 5 射流孔射流方向范围示意图

2.2 减阻方案及结果研究

本文以原始模型阻力值作为基础结果进行受电弓气动阻力对比,研究模型的减阻机制。模型采用稳态计算的方式,计算收敛并且受力稳定后,受力值选取计算后 300 步的平均阻力值作为结果以保证仿真精度达到要求。

1) A 位置减阻研究

在受电弓底架导流罩的上方位置设置射流孔 A,射流孔开口位置分别位于受电弓下臂导流罩左右两侧,射流孔缝隙高度为 5 mm,距离两侧边界为 2 mm。射流速度选择 50 m/s,基于该速度射流方向为水平向上倾斜 10° 进行射流,再以 2° 为间隔射流方向逐步向下移动,直到达到 -10° 射流方向为止进行结果对比,结果如图 6 所示。在 -8° 的时候受电弓阻力最大达到 2 946.5 N,随着角度逐渐变小,阻力值在 2° 的时候达到最小阻力值 2 908.2 N,随后基本维持稳定。总的来看,随着射流角度的变化增加,受电弓整弓的阻力值随之减小,但减小程度比较有限,所以该射流孔 A 方案不予采纳,不继续针对射流孔 A 进行减阻研究。

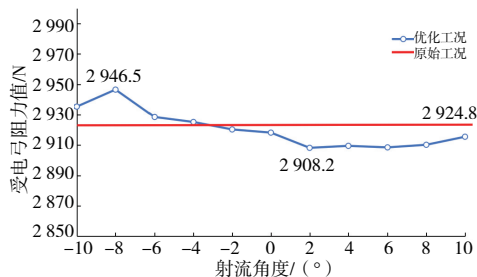


图 6 射流孔 A 位置不同射流角度工况结果

2) B 位置减阻研究

由于 A 位置射流减阻效果有限,不宜采纳射流孔 A 优化方案,恢复至不增加射流孔 A 的受电弓导流罩状态。继续基于射流孔 B 进行减阻研究,射流孔 B 开口位置布置在导流罩下部气流分离区域,开口位置分别位于受电弓下臂杆左右两侧,射流孔缝隙高度为 5 mm,距离两侧边界为 2 mm。射流速度选择 50 m/s,基于该速度工况射流方向为水平向上倾斜 10° ,再以 2° 为间隔射流方向逐步向下移动,直到达到 -10° 为止,结果图 7 所示。在射流角度达到 -10° 左右时受电弓阻力最大达到 3 001.2 N,在通过调节射流孔角度后发现,射流角度达到 0° 以后基本达到稳定,上下波动较小,在 2° 的时候阻力值达到最低为 2 789.8 N,减阻效果为较好。

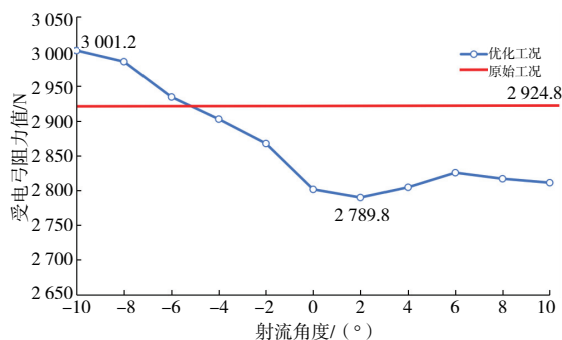


图7 射流孔B位置不同射流角度工况结果

与射流孔A相比,射流孔B的减阻效果明显优于射流孔A,后续基于最优射流角度对射流孔B再进行不同射流速度的减阻对比。基于2°射流角度的方案进行不同射流速度的测试,射流速度测试从40 m/s速度开始,基于该速度以10 m/s速度逐步增加,直到达到140 m/s。结果对比如图8所示,随着射流速度的增加,受电弓阻力值随着射流速度的增加整弓阻力随之逐渐减小,当速度达到90°时,整弓阻力值达到最小值为2722.2 N,随后随着射流速度的增加,整弓阻力也逐渐增加。所以当射流速度在90 m/s的速度时,减阻效果为最好。

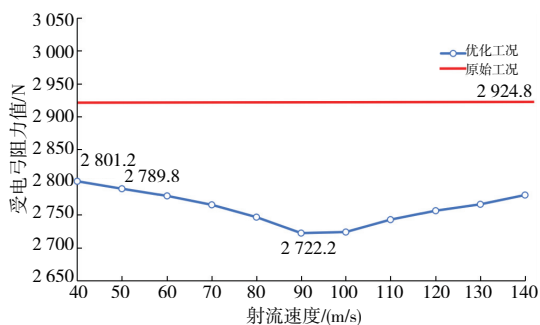


图8 射流孔B位置不同射流速度工况结果

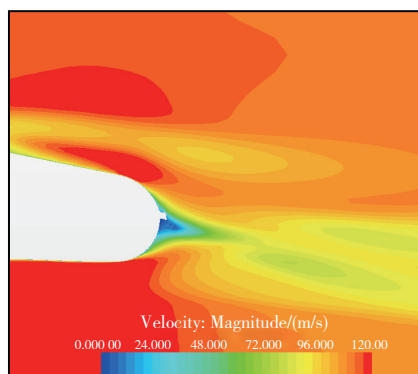
2.3 最佳减阻方案后处理结果对比

射流孔的开孔位置是依据原始受电弓气流分离点进行开口,目的是为了改变尾部分离流场的分离点位置,同时不破坏尾流的平衡状态。下文针对原始方案与最优方案进行后处理,并进行对比。

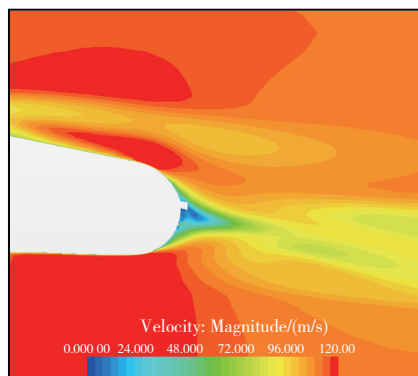
1) 速度云图

图9为原始方案与最优方案的纵向切面速度云图(本刊黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。由不增加射流孔的案例(原始方案)射流孔区域切面速度云图可见,受电弓导流罩尾部区域产生了

很明显的尾涡,而导流罩前后压差阻力是该区域主要的阻力来源。在安装合理的高速射流孔后,由于高速射流的作用,尾部低速区气流速度增加,改变了原有尾部涡流的形状,首先就是贴近受电弓导流罩的尾涡区域减小,其次相对远离受电弓导流罩的尾涡尺度明显变小。说明射流孔有效抑制了气流分离,改变了分离区的尾涡形状和气流速度,起到了一定的减阻作用。



(a) 原始方案

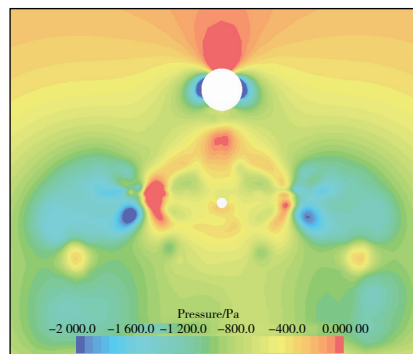


(b) 最优方案

图9 受电弓射流孔区域切面速度云图对比

2) 尾部切面压力云图

图10为原始方案与最优方案的尾部压力背面云图。



(a) 原始方案

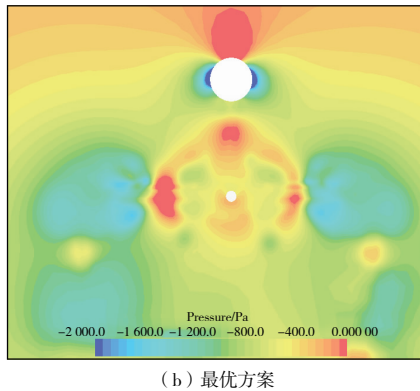


图 10 射流孔切面区域尾流压力云图

从受电弓尾部压力云图可见,相比原始受电弓方案,最优射流方案压力变化比较明显,受电弓尾部中间区域压力明显变大,原始方案中两侧较明显负压区基本消失,说明受电弓导流罩区域压差阻力变小。通过安装射流孔,尾部射流改变了尾部的气流流动结构,也抑制了从模型周边流入尾部分离区的气流,这导致尾流区域压力有所变化。

3 结语

本研究首先通过调整合理的空气动力学模型计算域尺寸以及计算网格数量并完成搭建高精度空气动力学仿真模型。针对高精度仿真模型分别对多种风速下开口升弓状态的仿真结果与风洞试验结果进行对比,高精度空气动力学仿真模型与试验精度误差小于 6%。

通过射流研究发现:受电弓导流罩产生阻力主要与尾部的气流分离涡关系较大,尾部流场变化会比较明显的影响受电弓整弓阻力变化。基于高精度空气动力学仿真模型,采用主动射流控制的方式调整尾流进行减阻研究,发现在合适位置

安装射流孔并以合理的速度和角度进行射流,可有效控制尾部气流分离,改变流场结构,达到实现减阻效果的目的,同时研究中采用的射流减阻方案也被验证是可行的。

参考文献:

- [1] 李田,戴志远,刘加利,等. 中国高速列车气动减阻优化综述[J]. 交通运输工程学报,2021,21(1):59-80.
- [2] 柳宁,李岩松,龙金兰,等. 高速列车流线型转向架与底部导流板的气动减阻效果研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(1):38-47.
- [3] 丁叁叁,刘加利,陈大伟. 600 km/h 高速磁浮交通系统气动设计[J]. 实验流体力学,2023,37(1):1-8.
- [4] 秦登,李田,张继业,等. 升弓高度对列车受电弓气动性能的影响[J]. 中国科学(技术科学),2020,50(3):335-345.
- [5] 张卫华,梅桂明,周宁. 武广客运专线弓网系统试验测试报告[R]. 成都:西南交通大学牵引动力国家重点实验室,2009.
- [6] 张弘,于正平,吴鸿标. 受电弓空气动力学模型及风洞试验研究[J]. 中国铁道科学,1995,16(1):37-49.
- [7] 张建辉,杨炯,姚勇. 高速列车受电弓减阻的风洞试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2010,7(6):116-121.
- [8] 张冰,刘会平,韩通新. 气动力作用对弓网受流影响的研究分析[J]. 铁道机车车辆,2012,32(3):132-135.
- [9] 付善强,陈大伟,梁建英,等. 高速受电弓气动特性风洞试验研究[J]. 铁道机车车辆,2013,33(3):123-126.
- [10] 刘会平,韩通新,刘摩,等. 高速受电弓空气动力学性能测量与分析[C]//中国铁道科学研究院. 中国铁道科学研究院 60 周年学术论文集. 北京:中国铁道出版社,2010:418-420.

收稿日期:2024-05-06

(上接第 188 页)

- [19] 张海峰,何其臻,陈巧红,等. 3-P(RR-RRR)SR 运动冗余并联机器人动力学系统分解建模与控制[J]. 机械工程学报,2025,61(17):66-79.
- [20] 唐博文,邵华,冯洋洋. 一种含子闭环并联机构的四自由度并联机构及尺度优化[J]. 机床与液压,2025,53(15):9-16.
- [21] 李嘉欣,李瑞琴,宁峰平,等. 基于 3T1R 并联机构的酒盒底座清废机构设计及运动学分析[J]. 机械设计与制造工程,2025,54(2):13-18.
- [22] 栾飞,李爱霞,王晓峰,等. 4PC-2R 并联机构设计及

运动分析[J]. 西北工业大学学报,2025,43(3):437-446.

- [23] 王琰,郭飞飞,梁俊侨,等. 2T1R 印花定位双模式并联机器人机构设计与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(4):71-77.
- [24] 梁栋,崔满军,宋轶民,等. 新型多驱动模式并联机器人创新设计与建模分析[J]. 机械工程学报,2025,61(19):63-77.

收稿日期:2024-06-06