

横风下风阻制动板对高速列车气动性能影响的仿真分析*

晋永荣¹ 田 春² 陈晓丽¹

(1. 湖南铁道职业技术学院, 412001, 株洲; 2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 200092, 上海)

摘 要 [目的] 随着列车运行速度的提高, 采用多种制动方式成为高速列车紧急安全制动的有力保障, 风阻制动作为轮轨黏着制动的补充而广受关注。风阻制动板安装后, 将影响列车的流线型, 在横风条件下甚至会影响列车运行安全。为保证列车在大风环境下的行车安全和制动性能, 需要对横风下不同制动板形式对列车气动性能的影响规律进行深入研究。[方法] 采用三维、定常、不可压缩 N-S 方程和 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型, 开展有无横风和不同制动板高度对高速列车流场规律和气动力的影响研究。[结果及结论] 仿真研究结果表明, 横风下列车车身和制动板的气动阻力沿车身方向递增, 横向力则递减, 当制动板高度从 0.5 m 提高到 1.0 m 时, 制动板阻力占总阻力的比例从 54.89% 提高到 69.92%, 最高达到 56 kN; 制动板横向力占整体横向力的比例小于 1%, 不同高度制动板对列车整体横向力的影响较小; 制动板对来流有一定的滞止作用, 距离较近的制动板存在流场相互干扰; 制动板对于横向力的影响较小。通过制动板的前期设计, 风阻制动足以成为列车制动的有效方案, 且对列车的运行稳定性影响较小。

关键词 高速列车; 风阻制动板; 气动力; 流场特性; 数值模拟

中图分类号 U238; V211.24

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.10.013

Impact Simulation Analysis of Wind Resistance Brakes on High-speed Train Aerodynamic Performance under Crosswind Conditions

JIN Yongrong¹, TIAN Chun², CHEN Xiaoli¹

(1. Hunan Railway Professional Technology College, 412001, Zhuzhou, China; 2. Institute of Rail Transit, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

Abstract [Objective] As the train operational speed increases, various braking methods become essential for ensuring high-speed train emergency safety braking. Wind resistance brakes, which complement wheel-rail adhesion brakes, have garnered extensive attention. The installation of wind resistance

brake plates affects the train streamlined shape and can influence train operational safety under crosswind conditions. To ensure train operational safety and braking performance in high wind environments, it is necessary to thoroughly investigate the impact law of different brake plate configurations on train aerodynamic performance under crosswind conditions. [Method] Using three-dimensional, constant, incompressible Navier-Stokes equation and $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model, the influence of crosswind existence and varying brake plate heights on of high-speed train flow field and aerodynamic force are investigated. [Result & Conclusion] Simulation research results indicate that under crosswind conditions, the aerodynamic resistance on train carbody and brake plates increases along carbody direction, while the lateral force decreases. When the brake plate height increases from 0.5 m to 1 m, the proportion of brake plate resistance in overall resistance rises from 54.89% to 69.92%, with the maximum reaching 56 kN. The proportion of brake plate lateral force in overall lateral force is less than 1%, indicating that different brake plate heights have relatively little impact on train overall lateral force. The brake plates have a certain stopping effect on the incoming flow, and there is flow field interference between closely spaced brake plates. The influence of brake plates on lateral forces is minor. With proper preliminary design of brake plates, wind resistance brakes can be an effective train braking solution with minimal impact on train operational stability.

Key words high-speed train; wind resistance braking plate; aerodynamic force; flow field characteristics; numerical simulation

0 引言

随着列车运行速度的不断提高, 现有条件下列车的制动距离和时间随之增加, 提高制动系统的功率和感应速度已成为研究重点^[1]。由于列车的气

* 2022 年湖南教育厅科学研究项目 (22C1105)

动阻力与车速的平方成正比,风阻制动对更高车速列车的制动具有更大优势,风阻制动是一种新型制动方式,因此探明风阻制动板对高速列车气动性能的影响具有重要意义。

日本学者对高速列车的风阻制动开展实车试验,结果表明表面风阻制动装置在紧急制动时具有良好的可靠性和较高应用价值,可以作为车速 350 km/h 以上列车制动的辅助方式^[2]。国内主要通过风洞试验和数值模拟开展高速列车风阻制动装置研究。同济大学通过建立风阻制动装置三维数值模型,对不同运行速度条件下的制动效果及周围流场的变化情况进行分析,并开展首套风阻制动装置的风洞试验,验证了数值计算正确性。2014 年沪昆线进行 350 km/h 实车试验,结果表明风阻制动装置可以缩短制动距离^[3]。文献[4-5]研究多个制动板之间的相互干扰效应,发现制动板之间的距离越大干扰效应越小,同时制动性能更加优越。文献[6-7]设计固定位置的 8 套风阻制动板,分析列车制动板纵向布置规律。文献[8]研究了风阻制动装置的基本原理、开闭机构、响应时间等性能和技术指标,并采用数值模拟进行不同工况下制动力的计算评估。目前,各国学者主要关注明线运行时制动板的形状对其气动性能的影响,而列车的运行场景复杂多变,现有研究较少涉及横风和隧道运行下的情景。我国新疆百里风区常年处于大风环境,仿真分析表明来流风与列车的复杂耦合作用更加激烈,对列车横向气动力有较大影响,使列车运行的安全稳定性能面临更为严峻的考验^[9]。为保证列车在大风环境下的行车安全和制动性能,很有必要研究横风下不同制动板形式对列车气动性能的影响规律。

为此,本文探索横风下不同制动板高度时高速列车的空气动力学特性,对 0.50 m、0.75 m 和 1.00 m 三种不同高度制动板的列车周围流场和气动力进行分析,研究结果可为高速列车制动板的风阻性能及设计提供参考依据。本文研究的制动板的实景图见图 1,当列车需要制动时,从车身上升起风阻制动板,从而产生制动力。

1 CFD(计算流体力学)数值计算方法

1.1 几何模型

使用三车编组列车模型,包括头车、中间车和尾车。忽略车体外部某些复杂的细部结构,如车门、车窗、受电弓等,并将对于计算结果影响较小的

部分进行简化处理,如车厢与车厢连接位置的风挡结构以及转向架等。车体的主体结构高度为 3.70 m,宽度为 3.38 m;头车和尾车的长度都为 25.45 m,中间车长度为 24.50 m。每节车均设计 2 个风阻制动板,制动板沿车身纵向对称布置;首个制动板距离车头鼻尖点 13 m,其余制动板位置如图 2 所示。

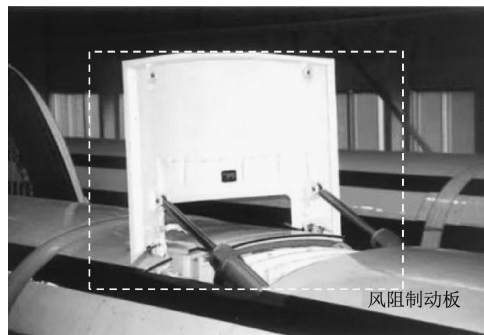


图 1 高速列车制动板实景图

Fig. 1 Photo of high-speed train brake plates

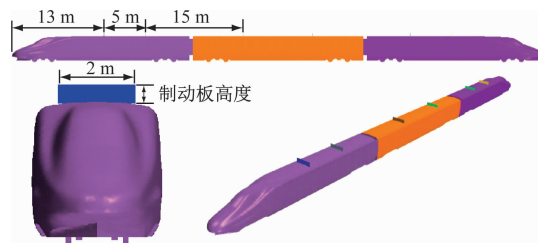


图 2 列车模型和制动板位置图

Fig. 2 Diagram of train model and brake plate position

制动板几何参数与计算工况如表 1 所示。

表 1 计算工况设置

Tab. 1 Calculation working condition settings

工况	制动板尺寸/m			车速/ (m/s)	横风速度/ (m/s)
	长度	高度	厚度		
1	2.00	0.50	0.10	97.22	0
2	2.00	0.50	0.10	97.22	35
3	2.00	0.75	0.10	97.22	35
4	2.00	1.00	0.10	97.22	35

1.2 计算区域及边界条件

为避免边界条件对所关心区域流场结构的影响,并保证区域内流场的充分发展,计算流域的长、宽、高分别设定为 300 m、80 m、40 m;列车初始位置头车鼻尖点距入口边界 50 m,尾流区长 170 m。为了保证背风侧涡旋结构的充分发展,列车纵轴线距侧风入口边界 25 m,背风侧涡旋发展区长 50 m。计

算区域及边界条件设置如图 3 所示。

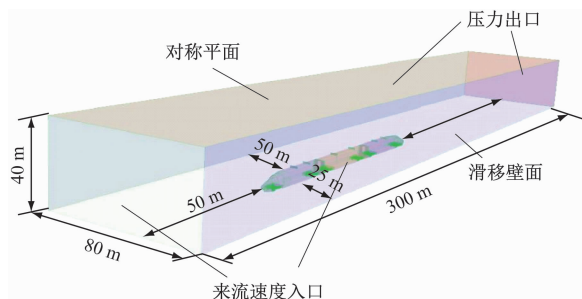


图 3 计算区域及边界条件示意图

Fig. 3 Diagram of computational domain and boundary conditions

横风下列车车身的阻力主要受摩擦阻力和压差阻力的影响,制动板前后会形成较大压差,其阻力主要受压差阻力影响。由于列车迎风侧和背风侧的非对称涡旋结构作用,车体和制动板会产生相应的横向力。因此,高速列车明线运行时,计算区域采用相对风速法给定边界条件来模拟列车与气流之间的相对运动,即列车运行前方边界给定与车速方向相反的风速。计算中给定列车前方速度入口边界的均匀来流速度为 97.22 m/s;沿车宽方向的侧向均匀来流风速为 3.00 m/s。地面设置滑移壁面条件,滑移速度与列车运行速度一致,以模拟列车地面之间的相对运动。车体表面定义成固定壁面,顶面定义为对称平面。

1.3 方法与设置

本文列车运行速度为 350 km/h,对应的马赫数为 0.29,气流可以采用不可压缩。大气压强为 101 325 Pa,定义空气流体密度恒定为 1.225 kg/m³,空气动力黏度 1.789 4 × 10⁻⁵ Pa·s。采用车高 3.7 m 作为特征长度,列车周围流场雷诺数 Re 大于 5 × 10⁵,即列车周围流场处于湍流状态。

采用三维、非定常、不可压缩 Navier-Stoke 方程和 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型进行求解,选用 SIMPLE 算法模拟速度-压力耦合过程,对流项和扩散项均采用中心二阶迎风格式用于离散。在计算中迭代步数为 3 × 10⁵ 次,收敛残差小于 1 × 10⁻⁶。

2 网格无关性验证

如图 4 所示,列车与计算区域表面网格最小尺寸分别为 0.10 m 和 0.25 m。在列车周围、制动板区域以及列车底部设置了 2 个加密区,在列车表面边界层区域附着 10 层棱柱形结构网格,靠近壁面的

第一层网格中心距离壁面 0.1 mm。

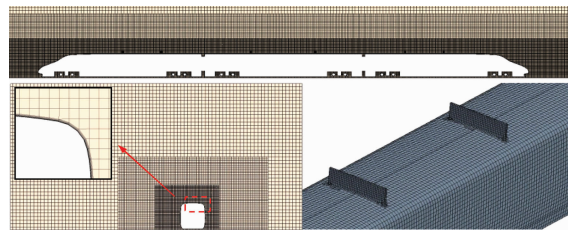


图 4 计算网格

Fig. 4 Computation grid

为比较网格密度对结果的影响,使用了 3 套网格进行对比。这 3 套网格的边界层厚度逐渐增加,近壁面第一层网格厚度和每层厚度的增长比率不改变,粗、中和细 3 套网格数量分别约 1 612 万个、3 128 万个、5 221 万个。无横风下三套网格 350 km/h 运行速度的列车总阻力如表 2 所示。由表 2 及模拟分析可知:安装制动板可提供较大的气动阻力并改变了列车的气动性能;粗网格较中等网格的整车阻力大 16 N,较细网格的整车阻力大 27 N。考虑计算的精确度和经济性,中等网格足以保证网格无关性需求,因此,本文采用中等网格进行计算区域的网格离散,边界层第一层厚度 0.1 mm,层数共有 10 层,每层厚度的增长比率为 1.2,网格总数约为 3 128 万个。

表 2 网格无关性验证对比

Tab. 2 Grid independence verification comparison

网格分类	网格数量/万个	边界层数	第一层厚度/mm	增长率/%	列车总阻力/N	制动板总阻力/N
粗网格	1 612	8	0.1	1.2	18 690	22 744
中等网格	3 128	10	0.1	1.2	18 674	22 751
细网格	5 221	12	0.1	1.2	18 663	22 739

3 计算结果及分析

3.1 横风下车体及制动板气动力变化规律

将车头第一块制动板记为板 1,沿列车纵轴依次命名。表 3 和表 4 分别为有无横风和不同制动板形式时高速列车的气动阻力、横向力构成情况。

对每种工况列车和制动板分别建立阻力和横向力监测,仿真时长为 3 s,系由于仿真初期列车流场不断发展,后期才呈现稳定状态。本文选取 1 s 和 3 s 内的气动力平均值作为样本值。从表 3 可知:无横风时(工况 1),沿列车前进方向制动板的阻力总体呈现减小趋势,制动板的阻力占总阻力的

54.89%,可见在紧急情况下足以提供较大的空气制动力。在横风作用下,中间车和尾车的阻力要大于头车的阻力,整车的阻力主要受中间车和尾车的影响;同时,越靠近列车尾部,车辆和制动板的阻力越大;可见横风下列车的气动性能受迎风侧和背风侧非对称涡旋结构影响,极大地改变了列车的气动力分布。随着制动板高度从0.5 m增加到1.0 m,其阻力占比从54.89%提高到69.92%。因此,通过制动板的前期设计,风阻制动足以成为列车制动中的有效方案,在满足弓网关系和限界要求下,较高的制动板能提供更大的风阻制动力。

35 m/s 强侧风条件下,安装制动板后列车的横向力变化如表4所示,无横风下(工况1)列车的横向力主要受尾流区涡旋脱落影响,基本不存在倾覆危险。然而,在35 m/s 强侧风时,0.5 m 高制动板时头车的横向力达到141 kN,越靠近尾车,横向力越小。当制动板高度变化时,对整体横向力的影响相对较小。需要强调的是:制动板自身所受横向力占比小于总横向力的1%,安装制动板对列车的运行稳定性影响不大,主要的作用是提供制动力,该特点完全符合列车制动需求。

表3 不同工况下高速列车气动阻力构成

Tab.3 Composition of high-speed train aerodynamic resistance under different working conditions

工况	车辆阻力/N			制动板阻力/N						总阻力/ N	制动板阻力占比/%
	头车	中间车	尾车	板1	板2	板3	板4	板5	板6		
1	7 069	4 745	6 876	4 873	3 336	4 227	3 639	3 753	2 917	41 435	54.89
2	5 621	6 036	12 321	3 859	4 269	4 567	4 679	5 143	5 776	52 271	54.13
3	5 677	6 096	12 444	5 788	6 404	6 850	7 018	7 715	8 664	66 658	63.67
4	5 649	6 066	12 383	7 641	8 454	9 042	9 264	10 184	11 437	80 119	69.92

表4 不同工况下高速列车横向力构成

Tab.4 Composition of high-speed train lateral force under different working conditions

工况	车辆横向力/N			制动板横向力/N						总横向力/N	制动板横向力占比/%
	头车	中间车	尾车	板1	板2	板3	板4	板5	板6		
1	168	-203	-157	1	-4	-1	-2	3	-1	-196	2.21
2	141 055	56 201	24 622	156	129	105	104	90	92	222 555	0.30
3	142 918	57 638	24 729	239	225	186	179	153	142	226 408	0.50
4	147 576	58 016	24 652	354	305	278	241	208	184	231 814	0.68

注:数值前的负号表示力的方向与来流方向相反。

3.2 流场特性分析

为对比横风下不同制动板形式对车体周围流场的影响,对计算区域进行切片并用风速进行着色渲染,如图5所示。其选取两种不同视角:水平面在车体鼻尖点高度,纵垂直面在车体宽度的中心位置(简称车体中心对称面)。

从图5可知:无横风时,由于制动板对来流的阻滞作用,在制动板顶部发生流动分离,改变了列车顶部的流场分布,制动板附近的剪切层分离过程提供了在高速运行时的制动力;若制动板的布置距离较近,会发生制动板分离涡的相互干扰。同时,列车尾流区的涡旋是造成列车阻力的主要成分,列车高速运行时,在尾部产生卡门涡旋结构,这些涡旋结构按照一定的时间序列脱落,在车尾附近形成小涡,随着往后的逐渐发展,小涡逐渐融合破碎产生

较大涡旋结构,最终形成尾流区。

在横风环境下,列车背风侧从头车表面的流线型部分和6个制动板区域产生流动分离,这些涡旋结构沿车体向后发展同时不断的融合脱落,脱体涡具有不连续性和间歇性的特点,制动板的存在使得背风侧的流场更为复杂。这种非对称的流场结构分布使得列车产生横向力,但不同高度制动板对流场的影响相对较小,这也解释了表4横向力的分布规律。由于制动板的侧面迎风面积较小,制动板本身在横风下所受横向力不大。

3.3 表面压力分布

列车周围流场的改变会导致列车表面的壁面剪切力和压力产生相应变化,最终呈现为列车整体气动性能的重新构成。图6展示了列车表面的流线分布。由图6可知:无横风时(工况1)在头车鼻

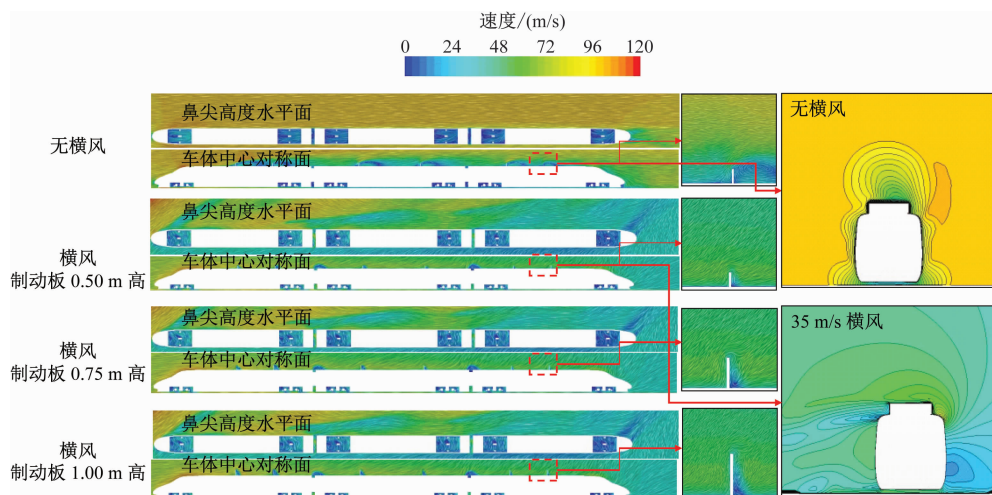


图 5 列车周围流速分布

Fig. 5 Distribution of flow velocity around train

尖点处形成压力驻点,列车表面剪切力在宽度方向上均呈现对称分布;而在横风环境下,头车压力驻点前移至左侧迎风面的位置,在列车流线型头尾车和制动板位置,壁面剪切应力均有较大改变。

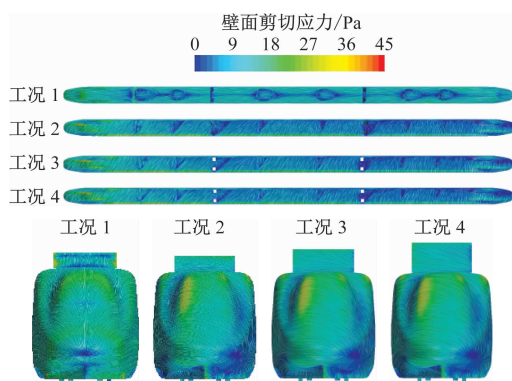


图 6 列车表面流线分布

Fig. 6 Flow distribution on train surface

图 7 展示了列车表面的压力分布。由图 7 可知:无横风时,列车的阻力主要受壁面剪切力和压力分布的影响,而制动板区域的前方为正压,后方为较大负压区,这种压力差产生较大的气动阻力,同样可以在图 8 车体顶面的压力分布中观察到,进而解释了制动板的阻力占总阻力 55% 左右的内在原因。在横风环境下,头车附近迎风区拥有较大正压,沿列车车身方向逐渐减小,背风区基本为负压状态,因此车体结构产生了较大横向力,且越靠近尾车,横向力越小。相对而言,制动板由于较小的受力面积,其横向力可以忽略不计。

图 8 展示了车体中心对称面的表面压力在不同工况下的分布情况。对车体顶面而言,在流线型和

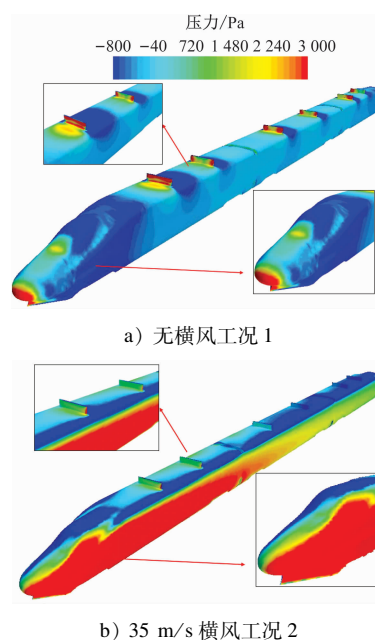


图 7 列车表面压力分布

Fig. 7 Pressure distribution on train surface

制动板位置的表面压力整体降低,有无横风的区别比较明显。对车体底部区域来说,在转向架区域压力系数的波动较大,由于横风作用,使得底部中轴线的表面压力整体从无横风下的微负压情况转变成正压状态。

4 结语

本文通过数值仿真研究手段,分析了有无横风和不同高度制动板情况下列车的气动特性,得到结论如下:

1) 横风下沿来流方向,列车车身和制动板的气

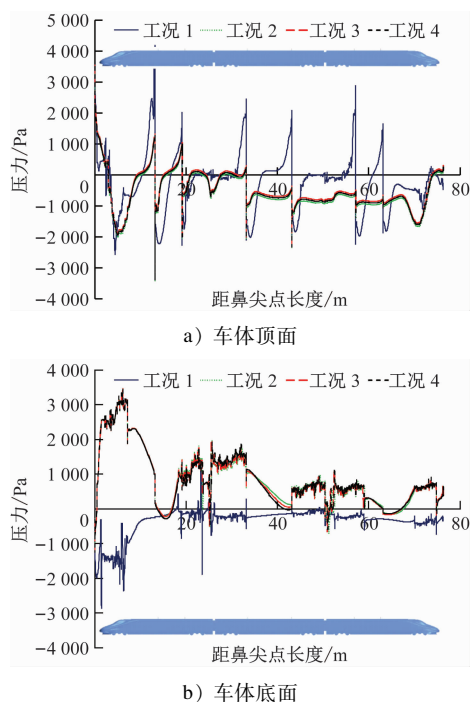


图8 车体中心对称面车体表面压力分布

Fig. 8 Surface pressure distribution on the carbody at central symmetrical plane at the carbody center

动阻力逐渐增加。当制动板高度从0.5 m增加到1.0 m时,制动板阻力占总阻力的比例从54.89%提高到69.92%,最高可达56 kN。

2) 横风下车所受横向力大于中、尾车的综合,制动板所受横向力占整体横向力的比例小于1%,不同高度制动板对列车整体横向力的影响较小。

3) 制动板对来流具有一定的滞止作用并产生流动分离,造成制动板前后侧形成较大压力差,为其自身提供制动力,距离较近的制动板会存在流场相互干扰。

4) 横风下列车的迎风侧和背风侧存在非对称流场结构,使得列车整体产生较大横向力,制动板由于侧面迎风较小而基本不受横向力影响,主要横向力为列车车体结构。

从本文仿真研究结果可以看出,随着风阻制动板高度的增加,能有效提供列车整体50%以上的阻力,且制动板基本不增加列车的总横向力。研究结果可为高速列车制动板的设计安装及结构安全性评估提供参考。

参考文献

[1] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版

社, 2007.

TIAN Hongqi. Train aerodynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.

[2] SHIRAKUNI N, ENDO Y, TAKAHASHI K, et al. Overview of new vehicles for the Yamanashi Maglev Test Line[C] // International Maglev Board. Proceedings of the 17th International Conference on Magnetically Levitated Systems (Maglev 2002). Munich: International Maglev Board, 2002: 05104.

[3] 夏寅荪. 速度达350 km/h及以上的高速列车非黏着制动装置的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(10): 52.

XIA Yinsun. Study on non-adhesive braking device of high-speed train with speed of 350 km/h and above[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(10): 52.

[4] 高立强, 胡雄, 孙德建, 等. 空气动力制动前排风翼板制动力影响规律[J]. 铁道学报, 2018, 40(1): 31.

GAO Liqiang, HU Xiong, SUN Dejian, et al. Influence rule of aerodynamics braking force from the front brake panel[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(1): 31.

[5] 高立强, 奚鹰, 邓阁, 等. 空气动力制动风翼板气动干扰效应研究[J]. 机械设计, 2015, 32(9): 19.

GAO Liqiang, XI Ying, DENG Ge, et al. Research on the aerodynamic interference effects of the brake panel[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(9): 19.

[6] 田春, 吴萌岭, 朱洋永, 等. 空气动力制动风翼在车上布置数值仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(3): 98.

TIAN Chun, WU Mengling, ZHU Yangyong, et al. Numerical simulation research on the arrangement of the aerodynamic braking plates in the train[J]. China Railway Science, 2012, 33(3): 98.

[7] 田春, 吴萌岭, 费巍巍, 等. 空气动力制动风翼纵向位置制动力规律[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(5): 705.

TIAN Chun, WU Mengling, FEI Weiwei, et al. Rule of aerodynamics braking force in longitudinal different position of high-speed train[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(5): 705.

[8] 汤劲松, 尹崇宏, 马飞, 等. 400 km/h高速列车风阻制动装置应用研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(3): 29.

TANG Jinsong, YIN Chonghong, MA Fei, et al. Study on the application of wind-actuated aerodynamic braking device for 400 km/h High-speed Trains[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(3): 29.

[9] 王政, 李田, 张继业. 不同类型横风下高速列车气动性能研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 203.

WANG Zheng, LI Tian, ZHANG Jiye. Research on aerodynamic performance of high-speed train subjected to different types of crosswind[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 203.

· 收稿日期:2022-07-13 修回日期:2022-08-26 出版日期:2024-10-10

Received:2022-07-13 Revised:2022-08-26 Published:2024-10-10

· 第一作者:晋永荣, 讲师, jinyongronglz@163.com

通信作者:陈晓丽, 讲师, Andy20231022@163.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