



开槽轨道对高速磁浮列车气动特性的影响

刘锋 岳思 吴晓龙 李潇 陶羽 杨明智

Influence of slotted track on aerodynamic characteristics of high-speed maglev train

Liu Feng, Yue Si, Wu Xiaolong, Li Xiao, Tao Yu, Yang Mingzhi

引用本文:

刘锋, 岳思, 吴晓龙, 等. 开槽轨道对高速磁浮列车气动特性的影响[J]. 空气动力学学报, 2026, 44(3): 11–21. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2025.0165

Liu Feng, Yue Si, Wu Xiaolong, et al. Influence of slotted track on aerodynamic characteristics of high-speed maglev train[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2026, 44(3): 11–21. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2025.0165

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2025.0165>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

线间距对时速600公里级高速磁浮列车明线交会气动性能的影响

Effect of line space on aerodynamic performance of two high-speed maglev trains passing by each other at the speed of 600 km/h in open air
空气动力学学报. 2023, 41(4): 31–40 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0122>

尾部吹气控制对城轨列车气动阻力的影响

Influence of tail-blowing control on aerodynamic drag of urban rail trains
空气动力学学报. 2023, 41(7): 120–129 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2022.0113>

关键区域优化对高速列车横风气动特性影响

Impact of key area optimization on the aerodynamic characteristics of a high-speed train in crosswind
空气动力学学报. 2026, 44(1): 137–146 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2024.0171>

龙卷风环境对桥上运动列车瞬态气动特性影响

Transient aerodynamic characteristics of a moving train on bridge in tornado environment
空气动力学学报. 2021, 39(5): 120–131 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0140>

可调缝道构型对翼型气动特性的影响

The influence of adjustable slot configuration on aerodynamic characteristics of airfoil
空气动力学学报. 2024, 42(6): 76–87 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0166>

挡风墙距离影响高速列车气动性能LES研究

Influence of windbreak distance on the aerodynamic performance of high-speed trains by large eddy simulation
空气动力学学报. 2025, 43(11): 43–55 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2024.0108>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱
电话: 0816-2463375
Email: kqdlxxb@163.com



关注微信公众号
获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2026)03-0011-11

开槽轨道对高速磁浮列车气动特性的影响

刘 锋¹, 岳 思¹, 吴晓龙¹, 李 潇¹, 陶 羽², 杨明智^{2,*}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063;

2. 中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室, 长沙 410075)

摘要: 高速磁浮列车以 600 km/h 运行时, 车底流动与轨道结构相互作用会引发不均匀的升力分布, 显著增加悬浮控制的难度与安全风险。为解决此问题, 本文以三车编组高速磁浮列车为研究对象, 采用基于可压缩 SST $k-\omega$ IDDES 湍流模型的高精度数值方法, 系统研究了轨道开槽宽度 (320 ~ 1280 mm) 对列车气动特性与流场结构的影响, 并通过风洞试验验证了数值模型的可靠性。研究结果表明: 轨道开槽宽度对列车底部压力分布、速度结构与整体气动力具有决定性影响。随着开槽宽度增大, 头车底部正压范围缩小, 尾车底部负压区范围缩小且强度减弱, 而滑橇迎风侧滞止区正压分布的范围与强度均有所增强。流场分析表明, 开槽显著改变了车轨间隙内的流动结构, 增大了间隙空气流量与高速气流分布范围, 这是导致压力分布改变和气动力变化的主要原因。综合气动力分析表明, 当开槽宽度为 960 mm 时, 整车气动阻力最小, 此时相较不开槽轨道, 头车升力降低约 10.9% (减少 22.26 kN), 尾车升力提高约 15.8% (增加 32.26 kN), 头尾车升力差显著减小, 气动平衡性达到最佳。本研究为通过轨道结构被动流动控制以提升高速磁浮列车运行平稳性与安全性提供了理论依据。

关键词: 列车空气动力学; 高速磁浮列车; 轨道开槽; 升力控制; 数值仿真; 流动控制

中图分类号: U271.9; U266.4

文献标识码: A

doi: 10.7638/kqdlxxb-2025.0165

Influence of slotted track on aerodynamic characteristics of high-speed maglev train

Liu Feng¹, Yue Si¹, Wu Xiaolong¹, Li Xiao¹, Tao Yu², Yang Mingzhi^{2,*}

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan 430063, China;

2. Key Laboratory of Traffic Safety on the Track of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The interaction between the underbody flow of a high-speed maglev train and the track structure at 600 km/h results in a non-uniform lift distribution, substantially complicating suspension control and introducing safety risks. To address this issue, this study investigates a three-car formation using a high-precision numerical approach based on the compressible SST $k-\omega$ IDDES turbulence model. The effects of slotted track width (320–1280 mm) on aerodynamic characteristics and flow structures are systematically examined, with wind tunnel tests validating the numerical model. Results show that slotted track width critically governs the pressure distribution, velocity field, and aerodynamic forces on the train underside. As slot width increases, the positive pressure zone beneath the leading car contracts, reducing its lift; conversely, the negative pressure zone under the trailing car weakens while the positive pressure region near the skid's windward side expands and intensifies, increasing trailing car lift. Flow field analysis indicates that the slot-induced modifications to the train-track gap flow enhance the airflow rate and high-speed flow coverage, driving changes in pressure distribution and aerodynamic forces. Comprehensive assessment reveals that at a slot width of 960 mm, total

收稿日期: 2025-06-15; 修订日期: 2025-07-30; 录用日期: 2025-08-10; 网络出版时间: 2026-02-10

作者简介: 刘锋 (1983—), 男, 高级工程师, 研究方向: 铁道工程. E-mail: 004392@crfdisi.com

通信作者: 杨明智 (1972—), 男, 教授, 研究方向: 列车空气动力学及行车安全. E-mail: yqymz@126.com

引用格式: 刘锋, 岳思, 吴晓龙, 等. 开槽轨道对高速磁浮列车气动特性的影响[J]. 空气动力学学报, 2026, 44(3): 11–21.

Liu Feng, Yue Si, Wu Xiaolong, et al. Influence of slotted track on aerodynamic characteristics of high-speed maglev train[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2026, 44(3): 11–21 (in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2025.0165

aerodynamic drag is minimized, leading to a 10.9% reduction (22.26 kN) in leading car lift and a 15.8% increase (32.26 kN) in trailing car lift compared to the non-slotted track, thereby significantly reducing the lift difference between cars and achieving optimal aerodynamic balance. This study provides a theoretical foundation for enhancing the stability and safety of high-speed maglev trains via passive flow control through slotted track design.

Keywords: train aerodynamics; high-speed maglev train; slotted track; lift control; numerical simulation; flow control

0 引言

高速磁浮列车通过车轨之间的电磁力实现悬浮、导向、驱动和制动功能,并具有快启快停、运力强大、安全可靠等优势^[1-3]。已安全运行 20 余年的上海磁浮列车 TR08,其运营最高时速达到 430 km/h^[4]。2021 年,《国家综合立体交通网规划纲要》明确要求推进超大城市间高速磁浮通道布局和试验线路建设。在国家“十三五”磁浮专项支持下,600 km/h 速度等级常导高速磁浮国产化样车已下线^[5-6]。

当前,高速磁浮列车的气动特性研究手段主要有数值仿真^[7-8]、风洞试验^[9-11]和实车试验^[12-13]等。在数值仿真方面,Zhou 等^[14]详细研究了时速 600 km/h 磁浮列车明线运行时的气动力、列车风及尾涡形成机理与演变过程;王峰等^[15]模拟了高速磁浮列车在线间距 5.1、5.4、5.6 m 条件下的明线交会气动特性,结果表明增大线间距能有效缓解高速磁浮列车交会时的气动升力、侧向力及倾覆力矩,为磁浮列车运行安全性研究提供一定参考;孟石等^[16]研究发现轨道间隙对低速磁浮列车底部气流速度、底部压力和列车升力有明显影响。在风洞试验方面,Wong 等^[17]对不同头尾形状磁浮列车气动力进行了研究,但风洞试验中地面静止,没有考虑地面效应对磁浮列车的影响。Pulliam 等^[18]和 Tyll 等^[19]在弗吉尼亚理工大学风洞中测试了不同车底形状、不同轨道梁形状以及轨道静止/运动条件下,磁浮列车的表面压力分布、气动阻力、气动升力和俯仰力矩,并采用流场可视化技术展示了列车尾流轨迹、压力分布和湍流强度。试验发现,运动地面条件下列车的气动升力明显小于静止地面,但两种地面条件下列车气动阻力相差很小。在实车试验方面,中国和日本开展了较多工作。日本 1997—2004 年期间在山梨试验线采用 MLX01 磁浮车进行了实车试验,其中包含大量系统的列车空气动力学测试,并据此开展了相关气动性能改善措施研究^[12,20],为磁浮列车悬浮间隙等参数设置提供了参考。中国则主要依托上海高速磁浮线,采用 TR08 磁浮列车进行了系统的空气动力学实车试验,测试内容

包括明线交会压力波、列车风、气动噪声、列车表面压力、列车气密性、车体振动以及车身侧墙形变等参数,为我国后续磁浮列车研究储备了大量实车试验数据^[13,21-22]。

既有研究表明,当高速磁浮列车运行速度达到 600 km/h 时,气动升力与车轨悬浮间隙密切相关,悬浮间隙的变化导致各节车气动升力分布不均,影响高速磁浮系统悬浮控制和行车安全^[23-24]。然而,现有研究仍存在不足:首先,目前数值仿真研究多集中在不同轨道间隙的影响分析上,但整体改变轨道间隙会加大磁浮列车电磁力的控制难度;其次,现有研究主要聚焦于单一的气动参数优化,缺乏对多种气动特性(如气动阻力、气动升力等)的综合优化研究。为在不改变轨道的主要参数条件下,调整车轨间隙内气流结构、优化列车气动升力分布,较为可行的策略是在轨道上开槽。从气动优化的角度来看,开槽能够增加车轨间隙容积,提升质量流量,扩大高速气流分布范围,从而改善车轨之间的压力分布。

因此,本文采用数值模拟方法,并结合风洞试验验证,以流线型长度超过 16 m 的常导高速磁浮列车为对象,基于被动流动控制技术,研究了同一开槽深度下 4 种不同开槽宽度对高速磁浮列车气动特性的影响,以期提升高速磁浮列车运行平稳性和安全性提供参考。

1 数值方法

1.1 列车模型

本文以 3 车编组某型常导高速磁浮列车为研究对象,并根据欧洲标准^[25-26]对模型进行了适当简化,如图 1 所示。将车高 H (4.2 m) 作为特征长度进行无量纲化,车宽为 $0.88H$,头车和尾车车长均为 $6.72H$,其流线型长度超过 16 m,中间车车长为 $5.90H$,整车车长(L)为 $19.34H$,列车最大正投影面积为 12 m^2 。轨道模型如图 2 所示,轨道高度为 $0.3H$,图 2(a)为原始轨道截面示意图,图 2(b)为开槽轨道截面示意图。开槽在轨道上表面中心位置处,横截面呈中心对称矩形,开槽深度固定为 20 mm。根据磁浮列车轨道几何



图 1 高速磁浮列车模型

Fig. 1 High-speed maglev train model

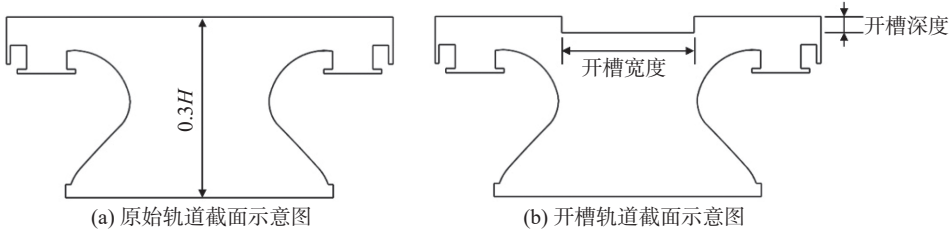


图 2 轨道模型

Fig. 2 Track model

结构，本文共设置 4 种开槽宽度，分别为 320、640、960、1280 mm。

1.2 数值计算方法

本研究采用基于有限体积法的商业软件 STAR-CCM+对高速磁浮列车绕流场进行数值模拟。控制方程采用可压缩形式的三维非定常 Navier-Stokes 方程，以准确反映列车运行速度超过 $Ma = 0.3$ 时需考虑的空气压缩性效应。为精确捕捉列车表面流动分离及远场大尺度涡结构的演化，湍流模型选用 SST $k-\omega$ IDDES 这一混合 RANS/LES 方法：该模型在近壁区作为高效的 RANS 模型运行以确保边界层计算的稳定性，在分离区则转换为 LES 模式，直接解析主导性湍流结构，从而在保证计算精度的同时有效控制计算成本。

在空间与时间离散方面，对流项采用混合格式以兼顾计算域的精度与鲁棒性，压力-速度耦合采用分离流求解器处理，时间推进则采用二阶隐式格式。为确保瞬态计算的准确性并有效解析关键流动结构，时间步长设置为 2.4×10^{-5} s，使最大对流 CFL 数在整个

计算域内小于 1，且每个时间步内进行 15 次迭代，确保所有变量残差均收敛至 1.0×10^{-5} 以下。此外，为满足 SST $k-\omega$ IDDES 模型对近壁面分辨率的严格要求，使壁面无量纲距离 y^+ 值普遍接近于 1，本研究将计算模型按 1:10 缩比处理，以精确控制第一层网格厚度。

1.3 计算域和边界条件

如图 3 所示，本文采用的计算域高度为 $12H$ ，宽度为 $24H$ ，来流入口距车头鼻尖点前方约为 $24H$ 。为使磁浮列车尾流发展充分且不受边界条件的影响，出口截面距尾车鼻尖点后方为 $53H$ 。入口处平面 $ABCD$ 给定自由流边界条件，边界速度为 $Ma = 0.49$ ，温度为 $0 \sim 15^\circ\text{C}$ 。出口处 $A'B'C'D'$ 平面设置为压力出口边界条件，参考压力为 0 Pa 。为消除地面效应的影响，将 $CDD'C'$ 平面和轨道设置为滑移壁面边界条件，滑移速度与磁浮列车速度一致。列车表面设置为固定壁面，其他边界设置为远场无反射边界。为便于分析和比较，坐标原点在 x 和 y 方向位于高速磁浮列车鼻尖，在 z 方向位于高速列车底板位置。

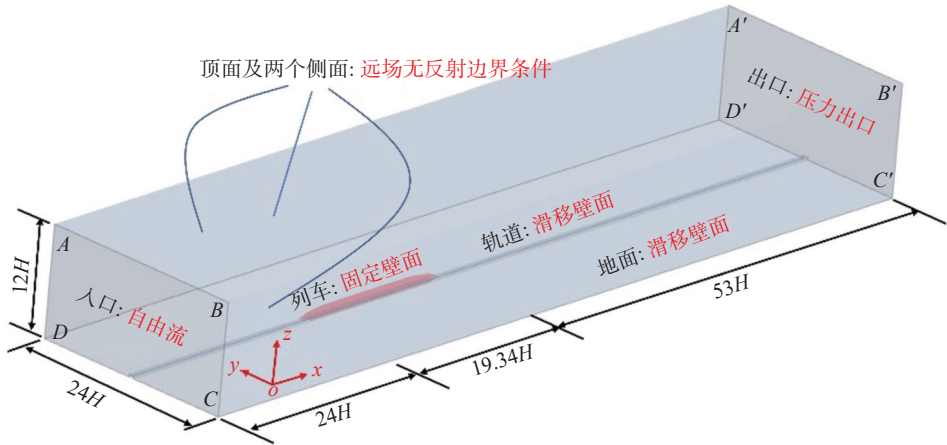


图 3 计算域及边界条件

Fig. 3 Computational domain and boundary conditions

1.4 网格无关性验证

计算网格的合理划分是保证数值仿真准确性的前提。本文采用笛卡尔网格进行划分。为了准确捕捉列车表面的气流流动状态,在近壁区域设置了15层边界层,边界层增长率为1.2,第一层边界层厚

度为 $0.00026H$,以保证在黏性效应影响范围内有足够的节点。考虑到磁浮列车周围流场变化最为剧烈,因此采用由密到疏的过渡方法,沿列车车身表面从里到外依次划分了4个加密区域,对尾流区域同样做了网格加密处理,计算网格分布如图4所示。

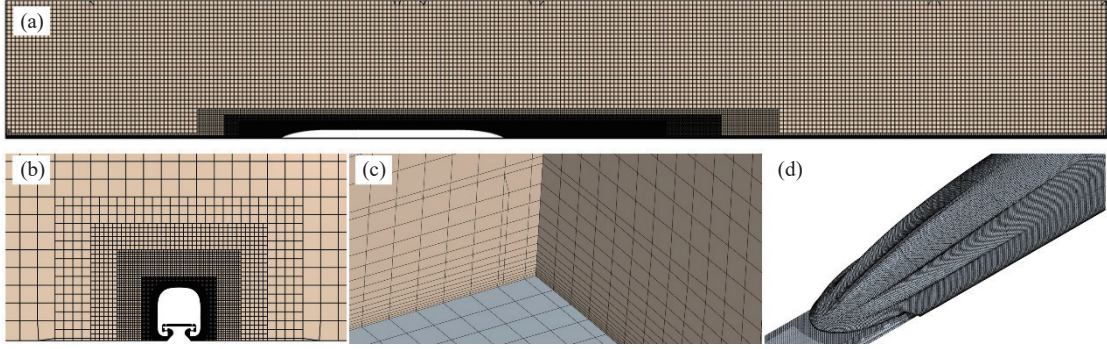


图4 计算网格: (a) 计算域纵切面; (b) 计算域横切面; (c) 车体附面层网格; (d) 列车及轨道表面网格

Fig. 4 Computational grid: (a) longitudinal slice of the computational domain; (b) cross-sectional slice of the computational domain; (c) boundary layer mesh on the train body; (d) surface mesh on the train and track

在本次数值模拟中,未采用壁面函数。这主要是由于选用的 SST $k-\omega$ IDDES 湍流模型旨在高精度地解析近壁区的复杂流动结构,因此采用了近壁面解析(Wall-Resolved)策略。为此,在网格划分阶段进行了严格的控制,确保整个列车表面的无量纲壁面距离

y^+ 值在绝大多数区域小于1,且最大值不超过2,具体分布见图5。这一网格布置能够保证第一层网格节点位于黏性底层内,从而使模型可以直接求解至壁面,无需依赖壁面函数进行近似,显著提升了对边界层内流动分离和列车表面摩擦力预测的精度。

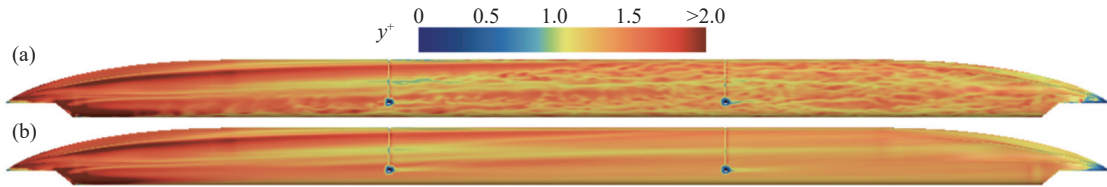


图5 列车表面 y^+ 分布云图: (a) 瞬态分布云图; (b) 时均分布云图

Fig. 5 Contour of y^+ distribution on the train surface: (a) instantaneous contour; (b) time-averaged contour

为了验证网格对数值计算结果的影响程度,进行了网格无关性验证,比较了3种不同密度(粗网格、中网格和细网格)的网格。3种密度网格的车体表面网格尺寸分别为 $0.011H$ 、 $0.009H$ 和 $0.007H$,附面层层数分别为10、15和20,网格数量分别为2891万、6441万、8319万。为了验证网格划分策略对数值计算结果的影响,对3种网格的气动阻力系数和升力系数进行比较,阻力系数 C_D 和升力系数 C_L 计算公式如下:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho_\infty U_\infty^2 S} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho_\infty U_\infty^2 S} \quad (2)$$

式中: F_D 和 F_L 分别代表列车气动阻力和升力,阻力

定义为沿 x 轴方向的气动力分量,升力定义为沿 z 轴方向的气动力分量(方向定义见图3);空气密度 $\rho_\infty = 1.225 \text{ kg/m}^3$; U_∞ 为列车运行速度;列车最大横截面积 $S = 12 \text{ m}^2$ 。

图6给出了各车段和整车的气动力系数对比。结果显示,中网格与细网格的阻力计算结果相对误差为2.0%,升力系数相对误差则为1.8%;而粗网格与细网格之间误差较大,其中头车阻力系数的相对误差达4.5%。整体而言,中网格与细网格的气动力系数相对误差较小,表明当网格密度达到中网格密度后,计算结果对网格进一步加密的敏感性较低。综合考虑计算精度与计算成本,本文后续研究均采用中网格划分策略。

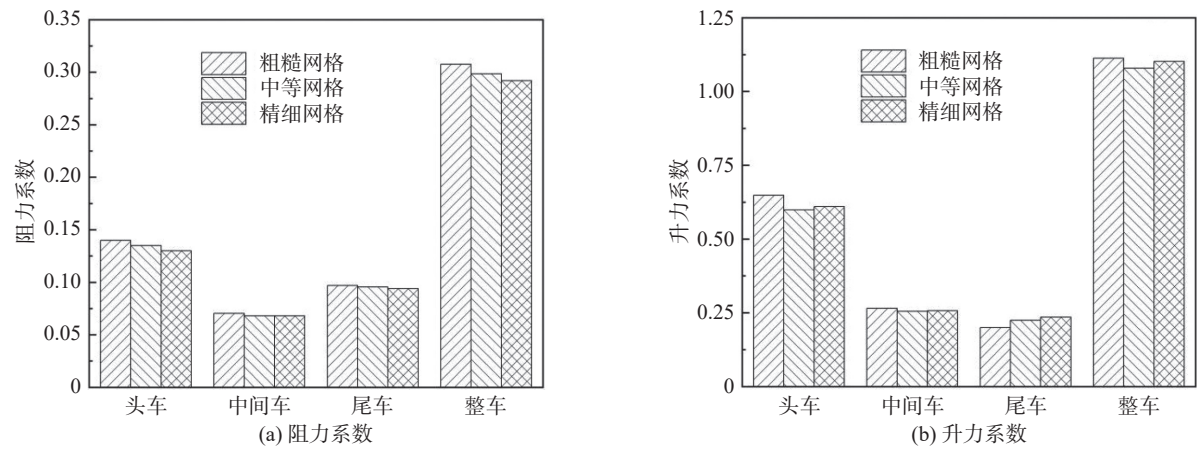


图 6 不同网格密度气动系数比较

Fig. 6 Comparison of aerodynamic coefficients for different grids

1.5 风洞试验验证

为了验证数值仿真方法的准确性,在中南大学风洞进行了试验。该风洞试验段长 15 m、宽 3 m、高 3 m。来流速度为 70 m/s, 雷诺数约为 2.0×10^6 。根据 EN14607-4 标准^[25], 列车进入自模拟区的临界雷诺数为 2.5×10^5 , 因此高速磁浮列车风洞试验采用的来流速度具备可行性。

风洞试验模型如图 7(a)所示, 采用 1:8 缩比 3 车编组模型, 列车模型与图 1 一致, 几何构型保持不变, 但抬高了轨道位置以增大离轨高度, 以此减弱风洞地板对高速磁浮列车气动特性的干扰。在图 7(b)中建立了与风洞试验尺寸及边界条件一致的数值计算域模型, 用于验证数值方法和网格划分策略的准确性。

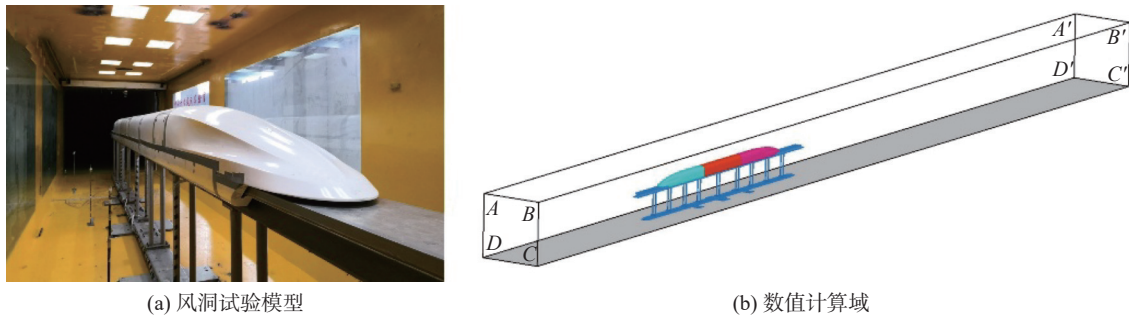


图 7 风洞试验验证模型

Fig. 7 Wind tunnel test validation model

采用中等网格的离散策略和相应求解参数设置, 计算得到的整车气动阻力系数为 0.2997, 风洞试验结果为 0.3022, 二者相对误差为 0.81%。图 8 显示的磁浮列车顶部中心轮廓线上各测点的表面压力系数与风洞试验结果吻合较好, 验证了本文采用的数值仿真方法和网格划分策略的有效性。

2 结果与分析

2.1 车轨间隙流场分析

为探明磁浮列车车底流场的演化机制, 本研究重点分析了不同轨道开槽宽度对间隙流场的影响。在悬浮间隙内沿流向设立了多个观测平面, 其具体位置如图 9(a)所示, 以揭示开槽宽度对间隙流场的影响

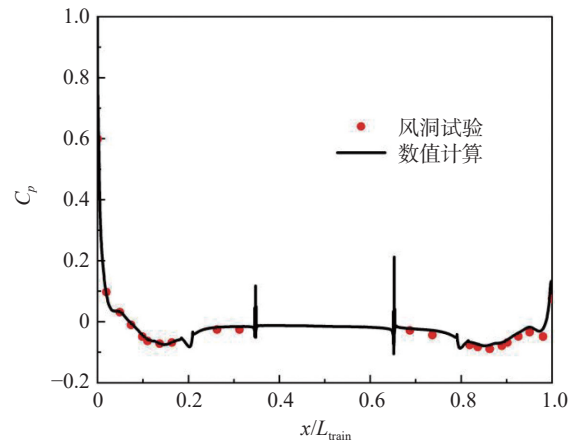


图 8 列车顶部中心线表面压力系数计算与风洞试验结果对比

Fig. 8 Comparison of pressure coefficient between simulation and experiment along the train roof centerline

规律。图9(b、c)为有/无开槽条件下,车底部距鼻尖不同流向位置处的无量纲流向速度分布云图;图10为尾车相应位置的无量纲流向速度云图;图11为距头车鼻尖不同位置监测平面上的无量纲时均流向速

度与质量流量分布曲线。综合分析可知:车底与轨道构成的车/轨间隙流速度低于来流速度,且沿着列车长度方向由车头至车尾逐渐降低,但降幅逐渐趋于平缓;由于速度的降低,在流通面积不变的情况下,间

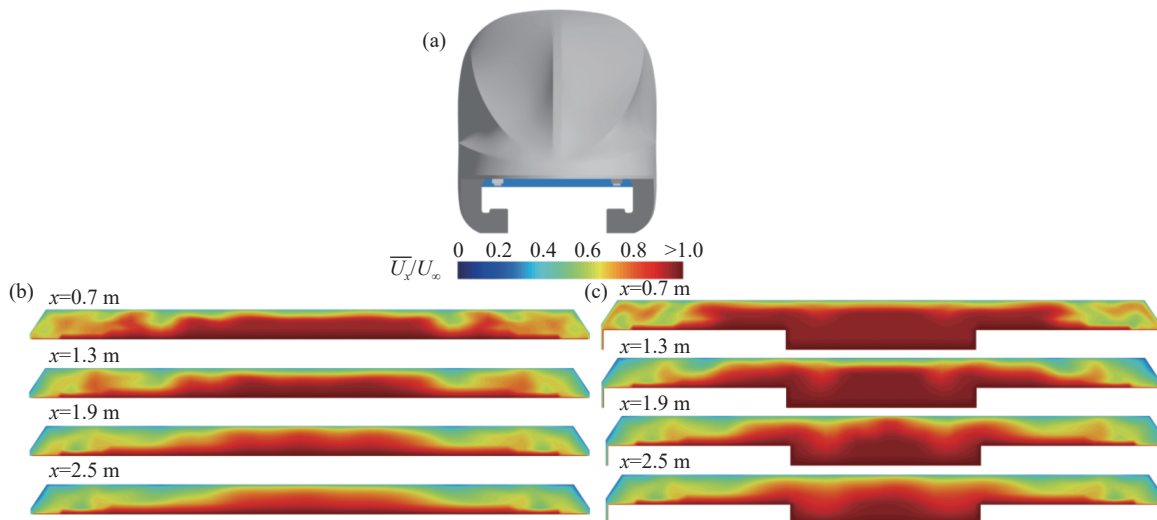


图9 头车底部距离鼻尖不同流向位置的无量纲流向速度分布云图:(a)监测平面位置,(b)轨道不开槽,(c)轨道开槽(宽度960 mm)

Fig. 9 Contours of non-dimensional streamwise velocity at various streamwise locations from the leading car underbody to the nose tip: (a) measurement plane location, (b) without track slot, (c) with 960 mm wide track slot

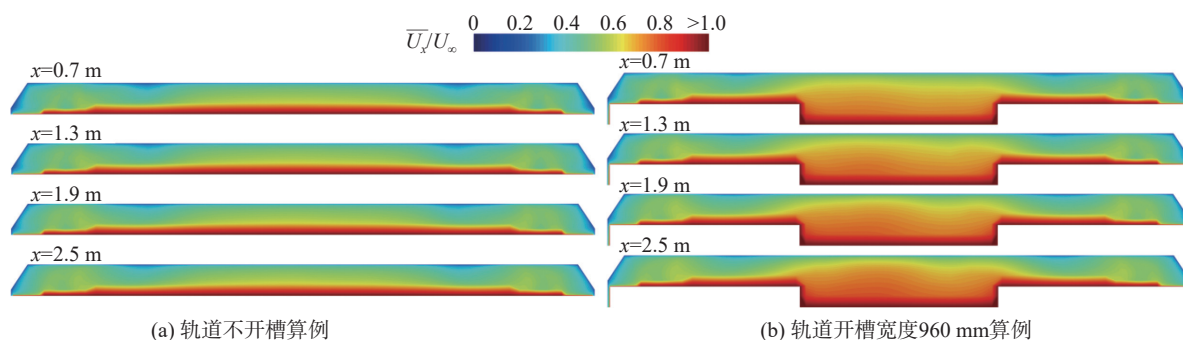


图10 尾车底部至鼻尖不同流向位置的无量纲流向速度分布:(a)轨道不开槽,(b)960 mm 轨槽

Fig. 10 Non-dimensional streamwise velocity distribution at various axial positions from the tail car underbody to the nose tip: (a) without track slot, (b) with 960 mm track slot

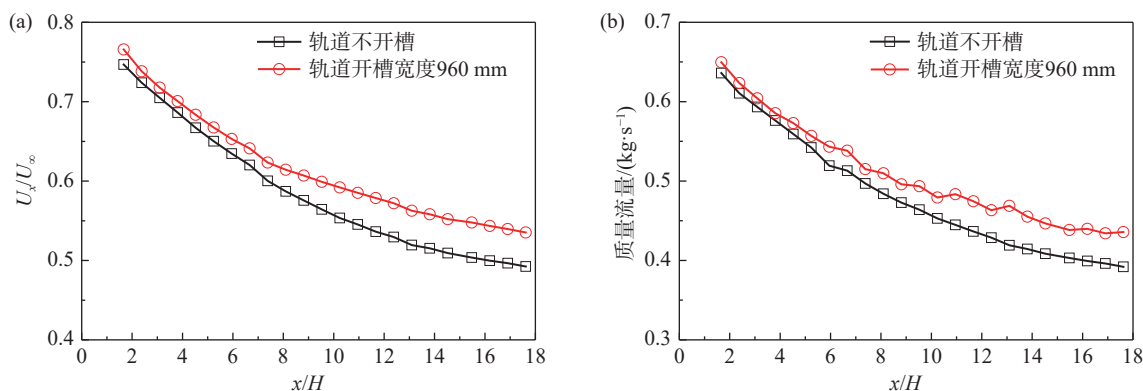


图11 距离头车鼻尖不同流向位置处监测平面的无量纲时均流向速度(a)和质量流量(b)分布曲线

Fig. 11 Distribution curves of non-dimensional time-averaged streamwise velocity (a) and mass flow rate (b) on the monitoring planes at different streamwise locations relative to the leading car nose tip

隙流质量流量也逐渐降低。采用轨道开槽后, 时均速度和质量流量均明显增加。

2.2 车身表面压力分布

磁浮列车轨道开槽宽度会显著影响车底流场结构, 进而影响列车表面尤其是底面的压力分布特性。车底压力分布直接影响各节车厢的气动阻力和升力,

且轨道开槽宽度会对间隙内气流压力分布具有显著调控作用。为了评估轨道开槽宽度对压力分布的影响, 图 12 显示了不同开槽宽度下悬浮间隙内头车底部压力分布云图, 图 13 则为磁浮列车头车底部中心轮廓线上时均表面压力系数沿车长方向的分布曲线。

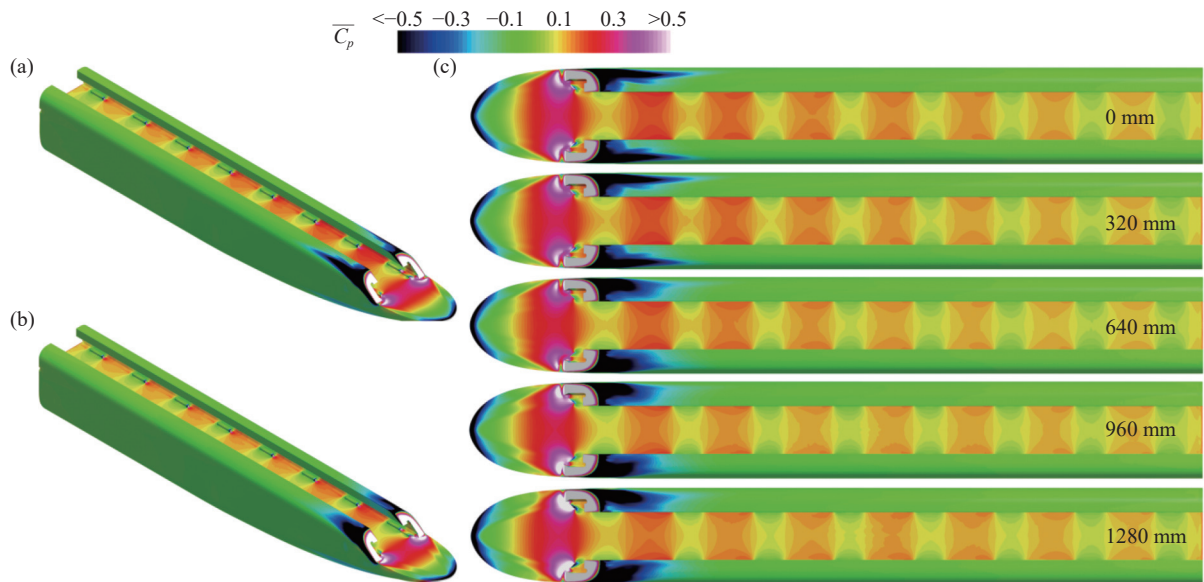


图 12 不同开槽宽度下的头车压力分布: (a) 轨道不开槽时的车底压力分布; (b) 开槽宽度为 960 mm 时的车底压力分布; (c) 不同开槽宽度下的车体压力云图

Fig. 12 Pressure distribution on the leading car under different slot widths: (a) underbody pressure without track slot; (b) underbody pressure with 960 mm track slot; (c) pressure contours on car body for varying slot widths

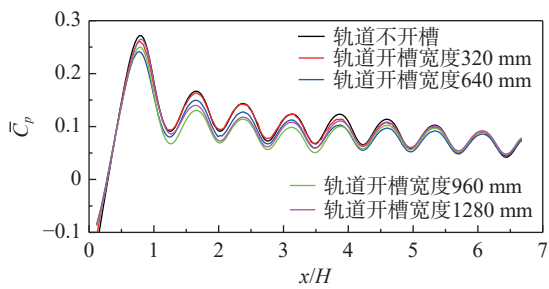


图 13 磁浮列车头车底部中心轮廓线上时均表面压力系数沿车长分布

Fig. 13 Time-averaged surface pressure coefficient along the centerline of the leading car underbody

综合分析图 12 和图 13 可知: 随着轨道开槽宽度的增加, 悬浮架托臂裙板前的压力滞止区正压范围明显减小, 这是因为轨道开槽宽度增加使更多气流进入轨道间隙。在头车非流线型车身位置, 凸起滑橇使气流撞击在滑橇的迎风侧, 形成流动滞止区, 进而形成如图 12 所示的高压分布区域。随着轨道开槽宽度从 0 逐渐增加至 960 mm, 滑橇间的正压区压力逐渐降低, 其原因为轨道开槽增大了车底与轨道之间的容积, 减弱了对气流的阻滞作用, 提高了间隙流速, 从

而降低了车底正压, 导致头车升力下降, 这也对应了图 13 中升力变化的趋势。当轨道开槽宽度进一步增大到 1280 mm 时, 左右两侧滑橇间流道容积进一步增大, 对来流的阻滞作用进一步减弱, 使流道压力降低, 但左右两侧滑橇迎风侧滞止高压区的辐射范围和强度有所加强, 最终导致头车车底压力相比 960 mm 工况反而有所上升, 相应地引起头车升力升高, 图 13 的时均压力分布曲线也反映了这一分布特征。

轨道开槽宽度的增大不仅显著影响头车底部压力分布, 对尾车底部压力分布亦具有重要影响。为定量分析轨道开槽宽度对尾车底部压力场的作用, 图 14 给出了不同开槽宽度下尾车底部的瞬时压力分布云图, 图 15 则给出了尾车底部中心轮廓线上时均表面压力系数沿车长方向的分布曲线。由图 14 和图 15 可知, 随着轨道开槽宽度增大, 尾车悬浮架托臂裙板前的负压范围明显缩小, 当开槽宽度增大至 1280 mm 时, 该负压区强度持续减弱并在区域 A 处出现中断, 形成不连续分布, 见图 14 中区域 A 所示。对于尾车车身区域的压力分布, 开槽宽度增大提高了尾车车底

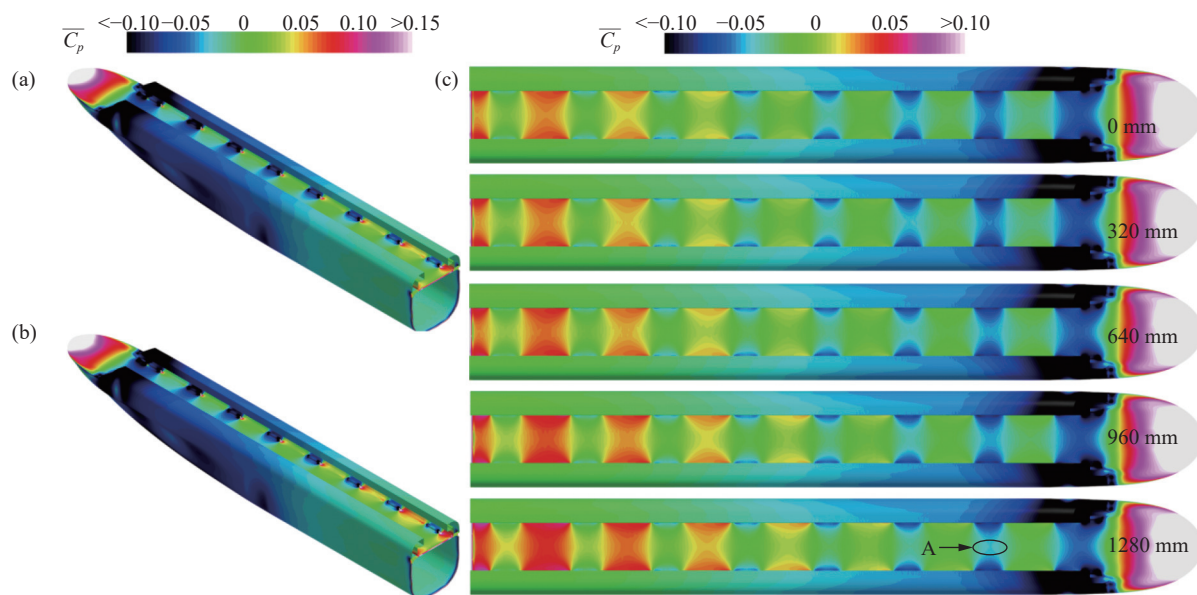


图 14 不同轨道开槽宽度下的尾车压力分布: (a) 轨道不开槽时的车底压力分布; (b) 开槽宽度为 960 mm 时的车底压力分布; (c) 不同开槽宽度下的车体压力云图

Fig. 14 Pressure distribution on the trailing car under different track slot widths: (a) underbody pressure without track slot; (b) underbody pressure with 960 mm track slot; (c) pressure contours on car body for varying slot widths

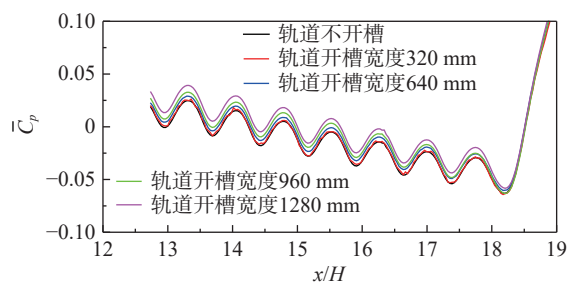


图 15 磁浮列车尾车底部中心轮廓线上时均表面压力系数沿车长方向分布曲线

Fig. 15 Time averaged surface pressure coefficient distribution curve along the length direction of the maglev train tail car center contour line

的流速,同时增强了滑橇迎风侧滞止区高压分布的辐射范围和强度,从而使尾车底面压力沿车长方向总体呈近似线性增加趋势。

需要指出的是,尽管随着开槽宽度增大,头车与尾车悬浮架托臂裙板前压力区的变化趋势相反,但其内在机理具有一致性。由图 12~图 15 可见,轨道开槽整体上提高了车轨间隙内的流速和质量流量,扩大了高速气流的分布范围,但头车与尾车处的局部流道结构及来流条件存在显著差异。对于头车,裙板前原本由迎风滑橇与有限间隙共同形成一定范围的滞止区,开槽后间隙流动更加通畅,局部堰塞作用减弱,导致滞止区被压缩和削弱,表现为裙板前正压范围缩小,头车升力降低。相比之下,尾车裙板前原先由车底与轨道构成局部收缩流道,间隙内高速气流在此形

成一定程度的负压分布。开槽增大了该区域的等效流通面积,削弱了局部收缩与加速效应,使表面压力系数整体抬升(负压程度减弱、负压区范围缩小),同时尾车车底正压作用略有增强,尾车升力随之增加。综上,轨道开槽主要通过重构车轨间隙内的局部流动结构,在头车处削弱滞止型高压效应,在尾车处削弱由局部收缩诱导的低压效应,从而形成头车正压缩小与尾车负压减弱这一对看似相反但机理一致的压力演化特征。

2.3 气动载荷特性分析

为了明确磁浮列车原始状态下的升力分布情况,图 16(a)给出了升力沿列车运行方向的分布曲线,其计算方法为:将列车表面沿运行方向分成若干个环形区域,然后将每个环形区域的升力值按照运行方向依次绘制于二维坐标轴中;图 16(b)显示了轨道不开槽情况下各节车厢的升力系数值。由图可见,列车升力呈现出显著的不均匀性。首先,升力沿车长方向分布不均:受悬浮架托臂裙板影响,磁浮列车头车升力显著波动,气动升力系数波动幅度达 0.031,对应气动升力波动差异为 6.11 kN;中车升力受滑橇影响,沿车长方向也存在不小的波动;尾车升力同样受到滑橇及悬浮架托臂裙板的影响,升力波动增大,但相较头车波动显著减小。其次,各节车厢间的升力不均匀,头车升力系数为 0.619,尾车升力系数为 0.219,对应气动升力差异为 83.71 kN。以上现象表明,磁浮列车不仅头车不同位置的升力波动显著,而且各节车厢之间的

升力差异显著。这种车厢之间和车厢内部显著的升力差异严重影响磁浮列车运行平稳性,严重时甚至可能导致触轨事故。因此通过改变流场分布来控制磁浮列车头车和尾车升力尤为重要。

气动力是列车表面压力分布和流场演化的集中反映。为明确轨道开槽宽度对列车气动力的影响,

图 17(a)给出了磁浮列车头车、尾车的阻力和升力。磁浮列车整车阻力先减小后增大,在轨道开槽宽度为 960 mm 时最小,表明该开槽宽度下车轨间隙内的气流状态使磁浮列车运行方向压力分布最优。头车升力在轨道开槽宽度为 960 mm 时最小,相较轨道不开槽情况减小 10.9%,升力减小量达 22.26 kN。尾车

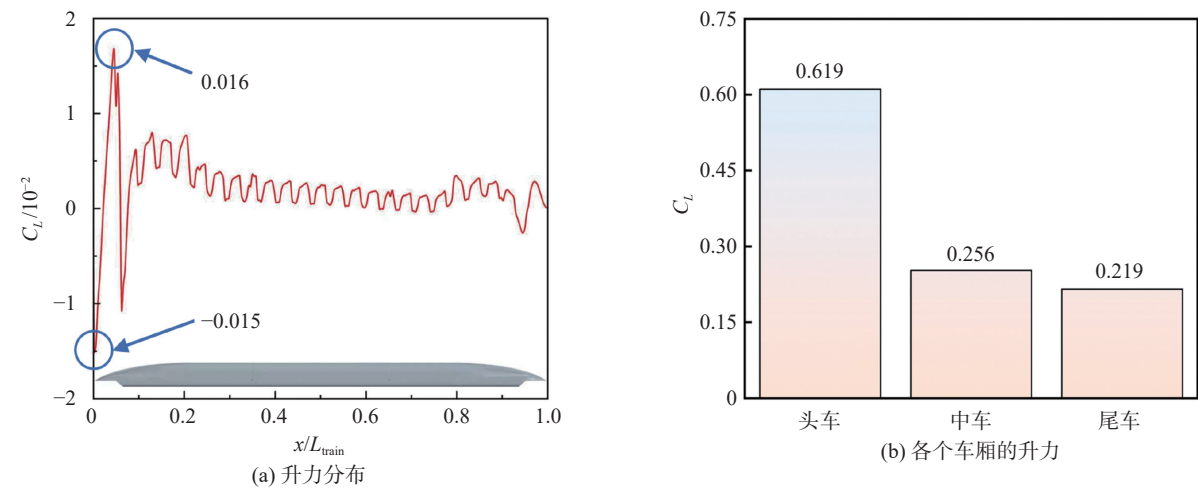


图 16 轨道不开槽情况下磁浮列车升力分布

Fig. 16 Lift force distribution of the maglev train without track slot

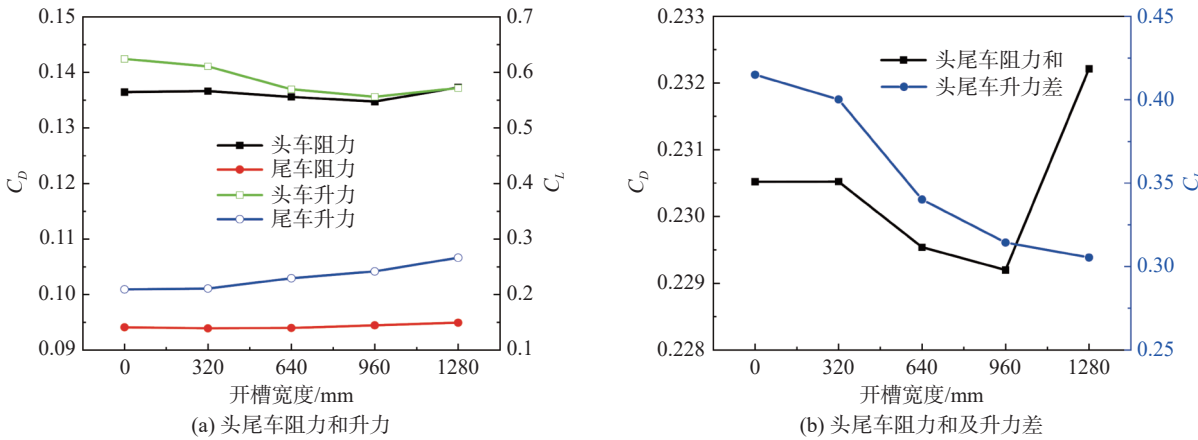


图 17 轨道开槽宽度对磁浮列车头车和尾车的气动力影响

Fig. 17 Effects of track slot widths on aerodynamic force distribution on the leading and trailing cars of the maglev train

升力随着轨道开槽宽度增大持续增大, 相较轨道不开槽情况和开槽宽度为 960 mm 时尾车升力增大 15.8%, 升力增大量达 32.26 kN。图 17(b) 给出了磁浮列车头车和尾车之间的阻力和升力差异。就头车和尾车升力差异而言, 轨道开槽宽度为 1280 mm 时最小, 但此情况下整车阻力显著提升, 且轨道开槽宽度 960 mm 和 1280 mm 之间的升力差改善程度较小。综合阻力与升力差, 可以认为轨道开槽宽度为 960 mm 时, 整车阻力最小, 同时头车和尾车升力差改善幅度较大, 达 24.25%。为明确轨道开槽对高速磁浮列车气动升力的影响原因, 图 17(c) 给出了不开槽及开槽宽度为 960 mm 时升力沿车长方向的分布情况。开槽后, 头车升力沿车长方向整体明显降低, 特别是升力极值所在的局部区域(如距鼻尖点长度为 4.5 m 处以及 9 m 至 16 m 附近区域), 这些局部升力的降低是头车总升力下降的主要原因。尾车升力的变化原因也类似: 开槽后, 尾车升力沿车长方向整体明显增大, 从而使得尾车总升力在开槽后出现提升。

3 结 论

本文通过数值模拟方法, 系统研究了不同轨道开槽宽度对 600 km/h 高速磁浮列车气动特性的影响, 得到以下主要结论:

1) 轨道开槽宽度对车轨间隙内的气流结构具有显著调控作用。随着开槽宽度增大, 间隙流通能力增强, 气流速度整体上升, 高速区沿车长扩展, 质量流量保持较高水平。合适的开槽可重构间隙流场, 为改善压力与载荷分布创造条件。

2) 轨道开槽宽度的变化对列车底面, 特别是头车与尾车悬浮架托臂裙板附近的压力分布影响显著。宽度增大使头车高压区缩小、正压水平降低, 升力减小; 尾车负压区减弱、正压区扩展, 升力增加。开槽通过提升间隙流速、改变局部流道, 实现了对头尾车升力的协同调控。

3) 轨道开槽宽度对高速磁浮列车整体气动力水平及头尾车升力匹配具有重要影响。随着开槽宽度增大, 整车气动阻力先减小后增大, 在开槽宽度为 960 mm 时阻力系数达到最小值; 此时, 相较不开槽轨道, 头车升力降低约 10.9%(减少 22.26 kN), 尾车升力提高约 15.8%(增加 32.26 kN), 头尾车升力差显著减小, 整车气动平衡性得到明显改善。表明 960 mm 左右的轨道开槽宽度在减阻与平衡升力方面表现较优, 具备工程参考价值。

本文目前主要聚焦于开槽宽度单一变量, 优化设

计维度尚有不足。后续将开展多参数协同优化设计, 在开槽宽度研究的基础上, 系统分析开槽深度、形状及布局模式等多参数组合对高速磁浮列车气动特性的影响, 寻求在综合气动性能(低阻、升力平衡)和结构安全之间的最优设计方案。

参 考 文 献:

- [1] 丁叁叁. 时速 600 公里高速磁浮交通系统[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2022.
Ding Sansan. 600 km/h high-speed maglev transportation system[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2022 (in Chinese).
- [2] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455–474, 530.
Deng Zigang, Liu Zongxin, Li Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 455–474, 530 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.0258-2724.20220001
- [3] 王滢, 张昆仑, 张慧娟, 等. 高速磁浮交通系统制式特征与适应性[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 19–30.
Wang Ying, Zhang Kunlun, Zhang Huixian, et al. Characteristics and adaptability of different types of high-speed maglev transportation systems[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(4): 19–30 (in Chinese).
doi: 10.3981/j.issn.2097-0781.2023.04.002
- [4] 郑清华, 倪菲. 高速磁浮交通: 从德国到中国[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 31–39.
Zheng Qinghua, Ni Fei. High-speed maglev transportation: from Germany to China[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(4): 31–39 (in Chinese).
doi: 10.3981/j.issn.2097-0781.2023.04.003
- [5] 梁建英. 中国高速磁浮交通系统发展现状与展望[J]. 科学(上海), 2022, 74(5): 31–36.
Liang Jianying. Development status and future prospects of the high-speed maglev transportation system in China[J]. Science, 2022, 74(5): 31–36 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.0368-6396.2022.05.009
- [6] 丁叁叁, 付善强, 梁鑫. 中国高速磁浮交通工程实践与展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 40–48.
Ding Sansan, Fu Shanqiang, Liang Xin. Engineering practice and prospect of high-speed maglev transportation in China[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(4): 40–48 (in Chinese).
doi: 10.3981/j.issn.2097-0781.2023.04.004
- [7] 蒯童童, 杨明智, 张雷, 等. 高速磁浮列车流线型头部拱形结构对列车与隧道耦合气动特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2515–2523.
Lin Tongtong, Yang Mingzhi, Zhang Lei, et al. Influence of streamlined head arch structure of high-speed maglev train on aerodynamic characteristics of train and tunnel coupling[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9): 2515–2523 (in Chinese).
doi: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.20211132
- [8] 程亚军, 黄莎, 杨明智, 等. 环境温度对高速磁浮列车明线气动特性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2407–2418.
Cheng Yajun, Huang Sha, Yang Mingzhi, et al. Effect of environmental temperature on aerodynamic performance of high-speed maglev trains running in open air[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(7): 2407–2418 (in Chinese).

- doi: [10.19713/j.cnki.43-1423/u.120221326](https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.120221326)
- [9] Gao D G, Ni F, Lin G B, et al. Aerodynamic analysis of pressure wave of high-speed maglev vehicle crossing: modeling and calculation[J]. Energies, 2019, 12: 1–18.
doi: [10.3390/en12193770](https://doi.org/10.3390/en12193770)
- [10] Lin T T, Yang M Z, Zhang L, et al. Influence of the suspension gap on the wake characteristics of a 600 km/h superconducting maglev train[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(2): 026121.
doi: [10.1063/5.0190742](https://doi.org/10.1063/5.0190742)
- [11] Lin T T, Yang M Z, Zhang L, et al. Effect of typical arch structure on slipstream and wake flow of 600 km/h maglev train[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2024, 34(7): 2748–2765.
doi: [10.1108/HFF-10-2023-0632](https://doi.org/10.1108/HFF-10-2023-0632)
- [12] Takizawa Hideyuki, 任大庆, 周贤全. 磁悬浮列车交会通过时的车辆动力学特性[J]. 国外铁道车辆, 2004, 41(1): 30–33.
Takizawa Hideyuki, Ren Daqing, Zhou Xianquan. The vehicle dynamics characteristics of a magnetic levitation train passing another train running in opposite direction[J]. Foreign Rolling Stock, 2004, 41(1): 30–33 (in Chinese).
- [13] 李明水, 雷波, 林国斌, 等. 磁浮高速会车压力波和列车风的实测研究[J]. 空气动力学学报, 2006, 24(2): 209–212.
Li Mingshui, Lei Bo, Lin Guobin, et al. Field measurement of passing pressure and train induced airflow speed on high speed maglev vehicles[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2006, 24(2): 209–212 (in Chinese).
doi: [10.3969/j.issn.0258-1825.2006.02.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-1825.2006.02.013)
- [14] Zhou P, Li T, Zhao C F, et al. Numerical study on the flow field characteristics of the new high-speed maglev train in open air[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2020, 21(5): 366–381.
doi: [10.1631/jzus.A1900412](https://doi.org/10.1631/jzus.A1900412)
- [15] 王峰, 张雷, 杨明智, 等. 线间距对时速 600 公里级高速磁浮列车明线交会气动性能的影响[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(4): 31–40.
Wang Feng, Zhang Lei, Yang Mingzhi, et al. Effect of line space on aerodynamic performance of two high-speed maglev trains passing by each other at the speed of 600 km/h in open air[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2023, 41(4): 31–40 (in Chinese).
doi: [10.7638/kqdlxb-2021.0122](https://doi.org/10.7638/kqdlxb-2021.0122)
- [16] 孟石, 周丹, 孟爽. 轨道间隙对磁浮列车气动性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(12): 3537–3545.
Meng Shi, Zhou Dan, Meng Shuang. Effect of rail gap on aerodynamic performance of maglev train[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(12): 3537–3545 (in Chinese).
doi: [10.11817/j.issn.1672-7207.2020.12.027](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2020.12.027)
- [17] Wong J Y, Howell J P, Rhodes R G, et al. Performance and stability characteristics of an electro-dynamically levitated vehicle over a split guideway[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1976, 98(3): 277–285.
doi: [10.1115/1.3427035](https://doi.org/10.1115/1.3427035)
- [18] Pulliam W, Marshakov A, Tyll J, et al. Aerodynamics of the AMT maglev train design[C]// 14th Applied Aerodynamics Conference, New Orleans, LA, USA. AIAA, 1996: AIAA 1996-2476.
doi: [10.2514/6.1996-2476](https://doi.org/10.2514/6.1996-2476)
- [19] Tyll J, Liu D, Schetz J, et al. Experimental studies of maglev aerodynamics[C]// 13th Applied Aerodynamics Conference, San Diego, CA, USA. AIAA, 1995: AIAA 1995-1917.
doi: [10.2514/6.1995-1917](https://doi.org/10.2514/6.1995-1917)
- [20] Masahiro S, Shiro H, Takamasa I, et al. Summary of running test results of new vehicles for yamanashi maglev test line[C]//Kawasaki: The Japan Society of Mechanical Engineers. 2003: 1-5.
- [21] 赵跃英, 盛胜我, 刘海生, 等. 磁悬浮列车行驶噪声及其对两侧环境的影响[C]//第九届全国建筑物理学术会议论文集. 南京, 2004: 348-351.
- [22] 付善强, 杜俊涛, 丁叁叁. 高速磁浮列车表面微结构气动减阻研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2023, 5(1): 1–8.
Fu Shanshan, Du Juntao, Ding Sansan. Research on aerodynamic drag reduction of surface microstructure of high-speed maglev train[J]. Railway Technical Standard (Chinese & English), 2023, 5(1): 1–8 (in Chinese).
- [23] 田红旗, 张雷, 王田天, 等. 面向行车平稳性的高速磁浮列车气动设计[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 70–77.
Tian Hongqi, Zhang Lei, Wang Tiantian, et al. Aerodynamic design of high-speed maglev trains for running stability[J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(4): 70–77 (in Chinese).
doi: [10.3981/j.issn.2097-0781.2023.04.007](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2023.04.007)
- [24] 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.
Ding Sansan, Liu Jiali, Chen Dawei. Aerodynamic design of the 600 km/h high-speed maglev transportation system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(1): 1–8 (in Chinese).
doi: [10.11729/sytlx20220131](https://doi.org/10.11729/sytlx20220131)
- [25] European Standard. Railway applications - Aerodynamics - Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment: DIN EN 14067-6: 2018[S]. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2018.
- [26] European Standard. Railway applications - Aerodynamics - Part 4: Requirements and test procedures for aerodynamics on open track: DIN EN 14067-4: 2019[S]. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2019.

(本文责编:徐燕)