



自然风作用下高速磁浮列车气动特性 数值模拟与优化研究

杨家琛^{1,2,3}, 徐俊起^{2,3}, 孙友刚^{1,2,3}, 窦庆山⁴, 苏芷玄⁴

(1. 同济大学 高速磁浮运载技术全国重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 交通学院, 上海 201804;

3. 同济大学 磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804;

4. 湖南轨道技术应用研究中心有限公司, 湖南 长沙 410027)

摘要: 为探究自然风对超高速磁浮列车运行稳定性的影响机制, 并探索可行的气动优化方向, 文章基于计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法开展数值模拟, 建立了时速 600 km 高速磁浮列车三维简化模型, 模拟了从无风到强侧风 (0~35 m/s) 共 6 种工况下的流场。结果表明, 侧向风会显著恶化列车的气动环境: 在 35 m/s 强侧风下, 列车所受气动阻力与升力较无风工况分别增大约 41 kN 与 161 kN, 由流场压力非对称性导致的侧向力与侧滚力矩也急剧增大, 严重威胁列车横向稳定性与抗倾覆安全。为进一步研究优化方案, 文章提出在列车表面布置仿生微沟槽结构的优化思路, 并通过简化模型的对比仿真进行了概念验证。验证结果显示, 在相同风环境下, 带有微沟槽结构的模型, 其气动阻力与升力均略低于光滑基准模型。研究表明, 自然风 (特别是侧风) 是高速磁浮列车气动安全设计的关键考量因素, 而基于表面微结构的被动流动控制技术是潜在的有效优化方向。本研究为相关设计提供了理论参考。

关键词: 高速磁浮列车; 气动特性; 自然风; 计算流体力学; 数值模拟; 外形优化

中图分类号: U266.4; U237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2026)02-0145-10

0 引言

高速磁浮交通系统凭借其无接触运行、低噪声、强爬坡能力及更高运营速度的潜力, 成为未来超高速地面交通的重要发展方向^[1-2]。随着运行速度向 600 km/h 及以上提升, 列车气动性能, 尤其是在自然风环境下的稳定性, 成为关乎安全与效能的核心挑战^[3-4]。强侧风可显著改变列车周围流场, 导致气动力载荷剧增, 严重威胁运行安全^[5-6]。因此, 深入研究自然风对超高速磁浮列车气动特性的影响机理, 并寻求有效的优化策略, 具有明确的理论与工程价值。

在横风效应研究方面, 计算流体力学模拟、风洞试验等方法已被广泛应用于高速列车及磁浮列车的气动分析。行业学者通过模拟不同风速与不同风向角下的运行工况, 系统研究了列车气动力系数、表面压力分布及绕流结构的演变规律^[7-8]。针对磁浮列车, 研究进一步揭示了其独特外形在侧风条件下所呈现的非定常涡旋特征^[9-10]。在气动优化领域, 受仿生学启发的表面微结构 (如沟槽、凹坑等) 作为一种被动流动控制手段, 因其在改善边界层流动、降低阻力方面的潜力, 在高速列车减阻研究中受到关注^[11-12]。

现有研究多数只针对当前高速轮轨列车, 或中低速磁浮列车的运行速度进行研究, 对未来更高运行速

基金项目: 湖南省科技创新计划项目 (2024QY2002); 国家自然科学基金项目 (52232013, 52502449); 快速磁浮 (低运量) 交通系统成套技术攻关-梁轨一体化新型悬浮系统合作开发协议 (KSCF2025-X03)

通信作者: 徐俊起, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事磁浮列车悬浮控制的研究; E-mail: xujunqi@tongji.edu.cn

引用格式: 杨家琛, 徐俊起, 孙友刚, 等. 自然风作用下高速磁浮列车气动特性数值模拟与优化研究[J]. 机车电传动, 2026(2): 145-154. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.016.

Citation: YANG Jiachen, XU Junqi, SUN Yougang, et al. Numerical simulation and optimization study on aerodynamic characteristics of high-speed maglev trains under natural wind conditions[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 145-154. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.016.

度（如600 km/h级别）下磁浮列车的气动响应特性及其相应的气动外形微观优化方案，研究尚不够充分。明确高速磁浮列车在侧风下的气动载荷变化规律，并探索高效实用的气动优化方案，是工程实践中亟待解决的课题。

基于上述分析，本文旨在通过数值模拟方法，系统分析自然风（以侧向风为重点）对高速磁浮列车气动特性的影响规律，并初步探索一种基于表面微结构的气动外形优化方案的有效性。本文首先建立时速600 km的高速磁浮列车三维CFD模型，通过模拟6种风速工况，定量分析气动阻力、升力等关键参数的变化，并通过流场可视化阐释其内在机理。在此基础上，提出在列车表面关键区域布置仿生微沟槽的优化思路，并通过对比仿真初步验证其减阻稳流效果。

1 数值模拟理论与方法

为研究自然风对高速磁浮列车气动特性的影响，本文采用基于雷诺平均纳维-斯托克斯（Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS）方程的计算流体力学方法进行数值模拟。

1.1 控制方程与湍流模型

本研究针对高速列车外流场开展数值模拟，将外流场中的空气视为不可压缩流体，对连续性方程进行合理简化。流体运动遵循质量守恒、动量守恒与能量守恒基本定律。针对本研究设定的不可压缩流体场景，其控制方程为：

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{V}$ 为速度矢量； p 为压力； ρ 为流体密度； ν 为运动黏度。

高速列车外流场绕流为高雷诺数湍流，直接数值模拟计算成本极高，工程中常采用RANS方法引入湍流模型封闭方程。本文选用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型^[13]，通过求解湍动能 k 及其耗散率 ε 的输运方程来确定湍流黏度 μ_t 。本文的输运方程为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： k 为湍动能； ε 为湍动能耗散率； G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能生成项； μ_t 为湍流黏度，由 k 与 ε 计算得到； μ 为流体动力黏度； u_i 为速度分量； σ_k 、 σ_ε 分别为 k 方程与 ε 方程的湍流普朗特数， $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 分别

为 ε 方程生成项系数与耗散项系数， σ_k 、 σ_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 均采用文献[14]的标准值。

1.2 几何建模与计算域设置

基于高速磁浮列车主体气动特性分析需求，采用三维建模软件构建列车简化模型，建模时，合理简化受电弓、空调机组等对整体绕流影响较小的附属部件。列车模型长度 L 约为车头长度的10倍，以包含完整的头尾涡系发展区域。轨道及简易高架桥面模型一并建立，以考虑地面效应。列车静止于轨道上，来流风以一定角度吹向列车，以模拟列车高速行驶时的空气动力学影响。

流体计算域设置为一个矩形区域，尺寸需足够大以消除边界对近车体流场的干扰，如图1所示。入口边界距车头鼻尖 $3L$ ，出口边界距车尾 $5L$ ，顶部与侧壁边界距车体中心线均为 $3L$ 。入口设为速度入口，给定来流风速与方向；出口设为压力出口；地面、轨道及列车表面设为无滑移壁面；计算域顶面与侧面设为对称边界或滑移壁面，以模拟远场条件。由于本文主要研究的是侧向风的影响，故不考虑纵向风速。

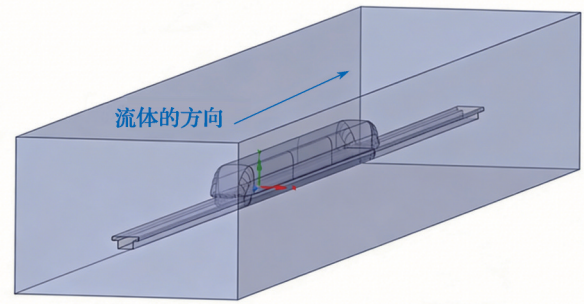


图1 流体计算域

Fig. 1 Computational fluid domain

1.3 网格划分与独立性验证

计算域网格生成采用分块结构化划分策略。针对高速磁浮列车表面边界层、近地面区域等流动变量梯度显著的位置实施局部网格加密。首层网格厚度经估算，确保壁面 y^+ 值在30~300，以满足壁面函数处理的要求。远离车体的区域采用较稀疏的网格以控制总网格量。

网格划分完成后，对全计算域网格的正交质量进行统计校核。正交质量定义为网格单元面法向量与相邻单元中心连线夹角的余弦值，值域为[0, 1]，数值越接近1表示网格正交性越好，数值越低则表示网格扭曲度越高。网格正交质量统计结果如表1所示。为验证网格无关性，生成多套不同密度的网格，在列车速度600 km/h、侧风21 m/s典型工况下进行模拟，对比监测列车整体气动阻力系数。当网格数量从中等密度增加到高密度时，阻力系数变化小于1%，认为中等密度网格

的计算结果已具备网格无关性。后续所有仿真均基于该密度网格模型进行, 计算域的网格划分如图2所示。

表1 计算域网格划分质量统计

Table 1 Statistics of mesh quality for computational domain

统计指标	符号	数值
最小正交质量	$Q_{\min}$	0.126 99
最大正交质量	$Q_{\max}$	0.999 99
平均正交质量	$\bar{Q}$	0.861 29

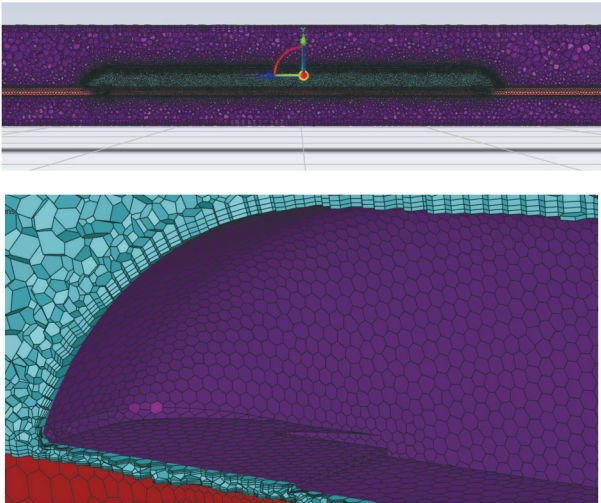


图2 计算域的网格划分

Fig. 2 Mesh generation of the computational domain

1.4 仿真工况设置

仿真时, 保持列车运行速度恒定, 即 $V_{\text{train}}=166.7$ m/s(600 km/h); 为研究自然风(侧风)的影响, 定义侧向风速 U_{wind} 为0、7、14、21、28、35 m/s, 共6种工况。

入口边界总风速定义为列车前进速度与侧向风速的矢量合成量。设列车沿 x 轴正向行驶, 前进速度恒定为 V_{train} ; 侧向风沿 y 轴方向作用于列车侧面, 风速为 U_{wind} 。则入口合成速度矢量可分解为 x 方向分量 V_{train} 与 y 方向分量 U_{wind} 。在求解器中, 通过“Magnitude and Direction”选项直接输入合成速度大小及方向角, 在保持列车前进速度恒定条件下, 通过调整侧向风速的大

小模拟不同风况, 通过改变方向角模拟侧向风与列车运行方向的夹角变化。

基于以上分析, 合成风速大小 $V=\sqrt{V_{\text{train}}^2+U_{\text{wind}}^2}$, 风向与列车纵轴线的夹角(偏航角) $\beta=\arctan\left(\frac{U_{\text{wind}}}{V_{\text{train}}}\right)$ 。研究团队进行计算时, 取空气密度 $\rho=1.225$ kg/m³, 动力黏度 $\mu=1.789\ 4\times10^{-5}$ Pa·s。

本研究采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值模拟, 湍流入口边界条件采用湍流强度和湍流黏度比规范方法进行设定。根据列车高速运行时的湍流特性, 将湍流强度设置为5%、湍流黏度比设置为10。

模型常数依据常用设定: $k-\varepsilon$ 模型湍流普朗特数取0.9, 耗散率普朗特数取1.3。采用压力基求解器耦合速度-压力场, 压力-速度耦合采用SIMPLE算法, 对流项的离散采用二阶迎风格式。在瞬态求解过程中, 采用自动时间步法动态调整流体时间尺度, 引入保守长度尺度方法确保网格适应性。伪时间步长通过收敛监测自动优化, 求解器每50次迭代输出一次报告, 取其中列车所受气动阻力与升力趋于稳定时的受力情况为结果。

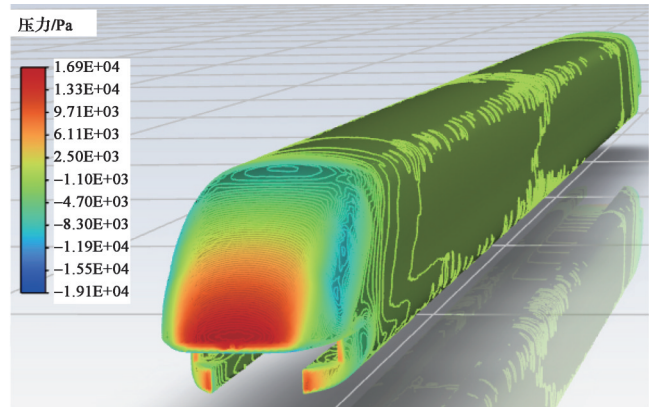
2 自然风对气动特性的影响分析

2.1 流场结构与压力分布

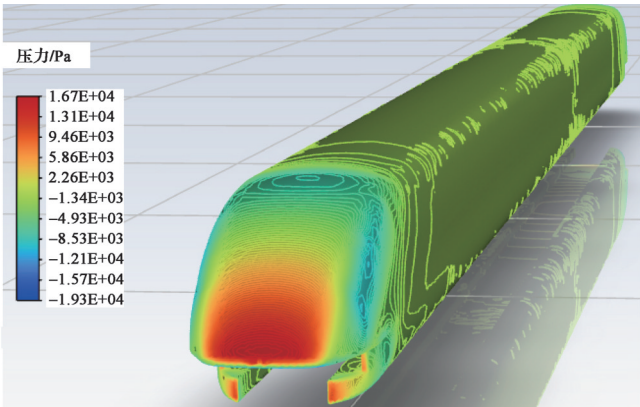
为直观展示侧风对高速磁浮列车周围流场的影响, 本研究通过CFD数值模拟, 得到不同侧风强度下, 列车表面的静压分布云图如图3所示(压力为相对环境大气压而言)。

由图3(a)可知, 在无侧风($\tan\beta=0$)的纯轴向来流工况下, 车头鼻尖处呈现明显的正压区, 压力沿车体表面流向逐渐降低, 在车头与车身过渡区域及车尾形成低压区, 整体压力分布基本对称。

随着侧风强度的增大, 压力分布的非对称性急剧增强。在迎风侧, 尤其是车头迎风面及车身上部, 形成了大范围的高压区, 且压力值随风速的增加而显著升高。与之相反, 在背风侧, 低压区域的范围和强度



(a) $\tan\beta=0$



(b) $\tan\beta=0.042$

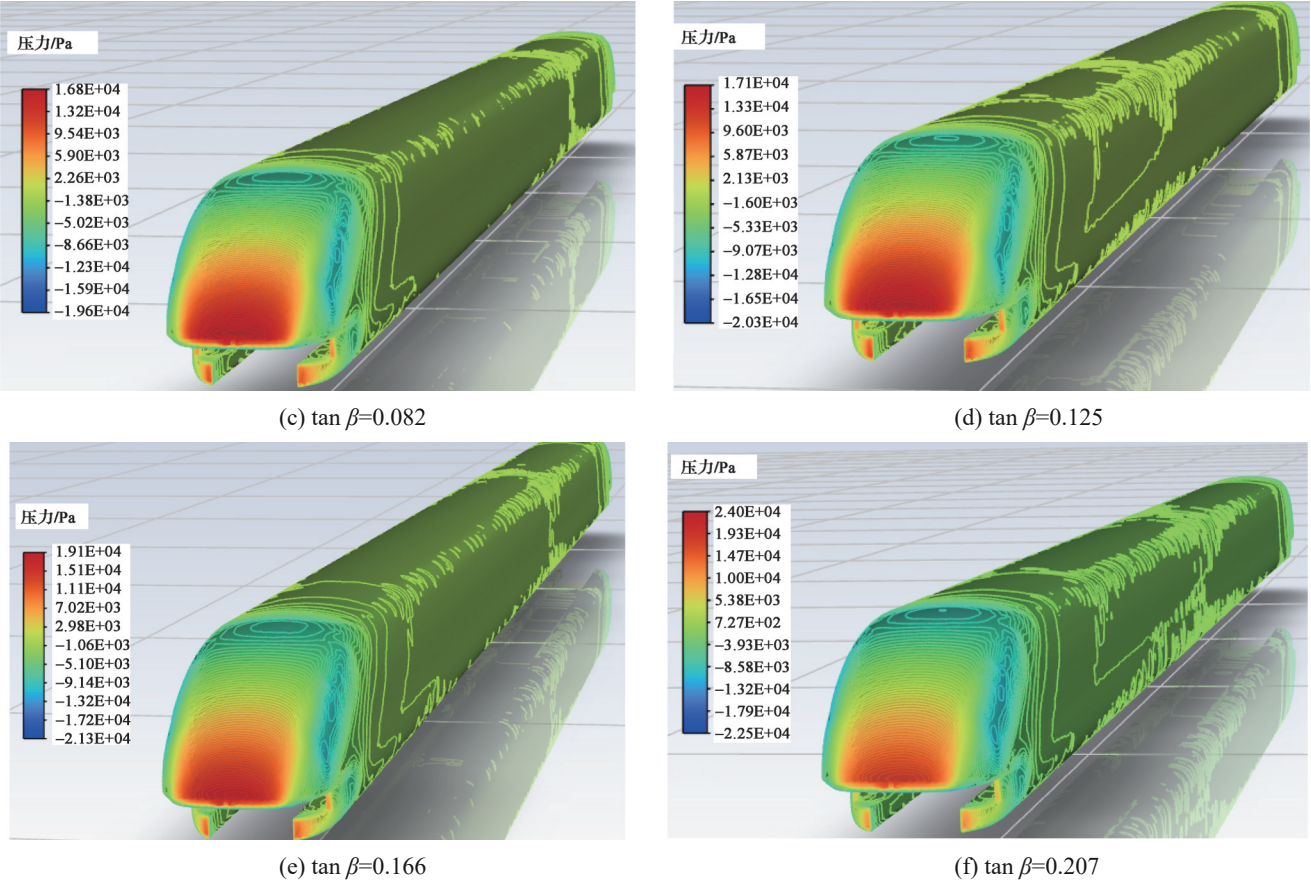


图3 不同侧风条件下磁浮列车表面静压分布云图

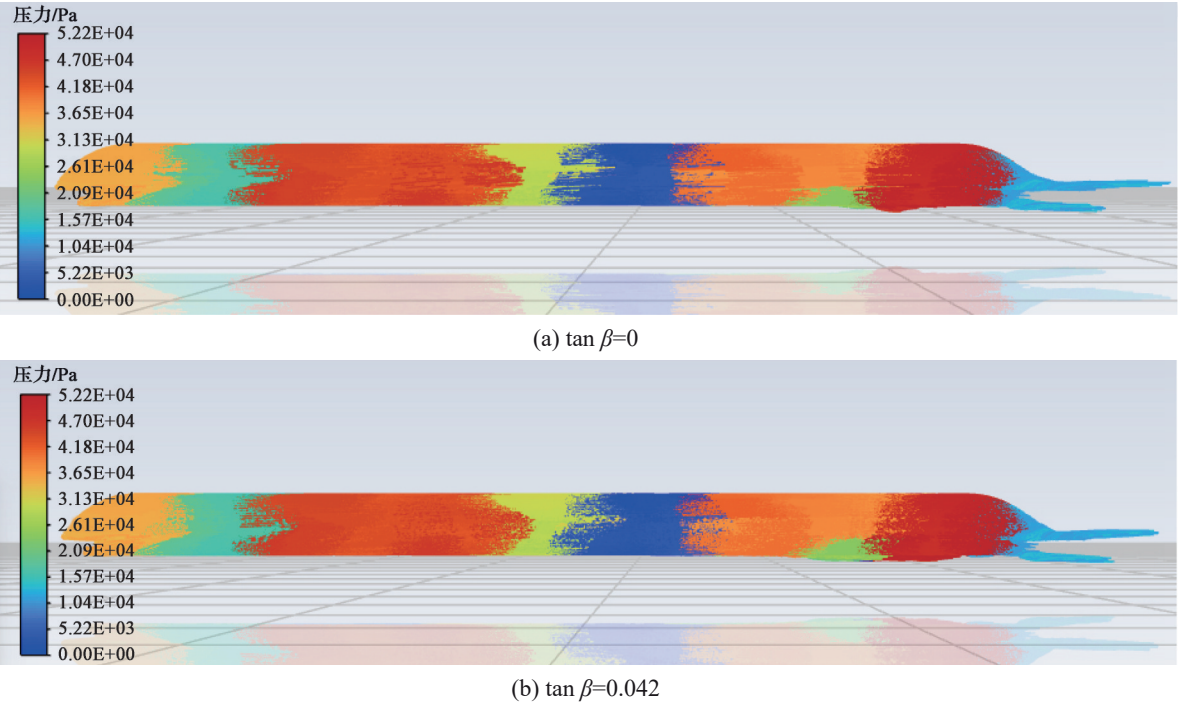
Fig. 3 Contour plots of static pressure distribution on the maglev train surface under different crosswind conditions

明显扩大，尤其在车顶与车身侧面拐角处以及车尾背风区。这种由侧风诱导产生的横向压力差，是导致列车受到显著侧向力和侧滚力矩的直接原因。

为了进一步揭示流场结构，本文给出了不同侧风工况下，列车周围的流体迹线图，如图4所示。

由图4可知，在强侧风作用下，来流在车头迎风面

发生分离。部分气流绕过车头后沿车身侧面流动，在背风侧发生了旋涡脱落现象。此外，在悬浮架底部及尾部也观察到流动分离和涡旋的产生。这些复杂的涡旋结构不仅加剧了背风侧的低压，而且导致了整列磁浮列车气动力，特别是气动升力和阻力的波动与增大。侧风强度越大，这种流动分离和涡旋现象越剧烈。



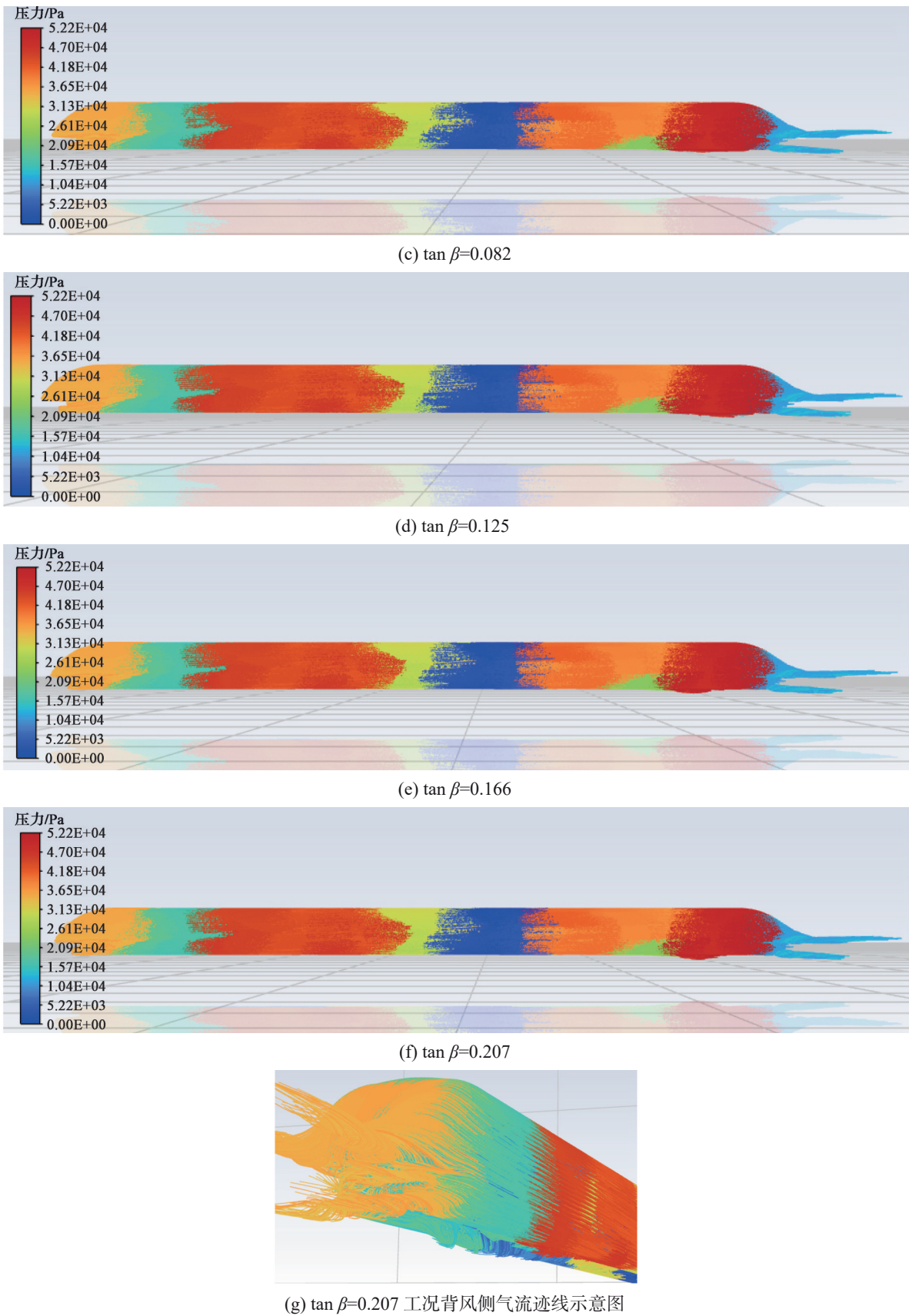


图 4 不同侧风条件下磁浮列车周围流线图

Fig. 4 Streamlines around maglev train under different crosswind conditions

2.2 气动力定量变化规律

为定量评估侧风影响,提取了各工况下作用于列车整车的时均气动阻力 F_D 与升力 F_L , 结果如表 2

所示。
根据表 2 数据,绘制了气动力随侧向风速变化的曲线,如图 5 所示。
对模型三维力矩系数进行测定和记录,并将其与

表2 不同侧风条件下磁浮列车所受气动力

Table 2 Aerodynamic forces on maglev train under different crosswind conditions

侧向风速度/(m·s ⁻¹)	气动升力 F_L /N	气动阻力 F_D /N	侧向力/N	力矩/(N·m)	$\tan \beta$
0	147 437	41 837	0	0	0
7	181 892	50 559	1 504.762 40	1 587.805 0	0.042
14	229 478	61 864	2 970.743 48	4 253.528 0	0.082
21	260 528	71 411	4 917.880 90	7 559.786 0	0.125
28	297 369	80 166	7 195.917 10	11 351.003 5	0.166
35	308 064	83 211	9 627.410 00	15 393.240 0	0.207

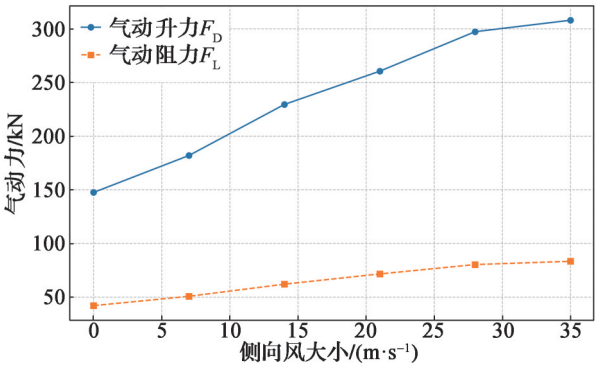
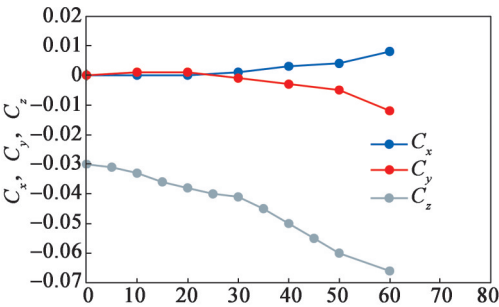
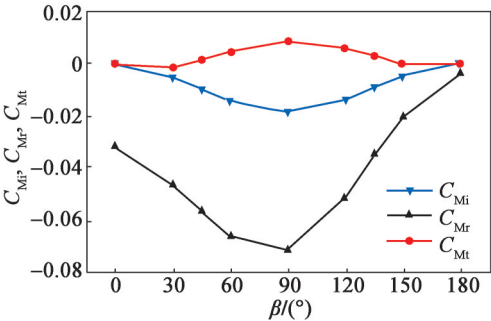


图5 磁浮列车所受气动力随侧向风速变化曲线
Fig. 5 Variation curve of aerodynamic forces on maglev train with crosswind speed

文献[15]中所展示的列车力矩系数图进行对比,如图6所示。由图6可知,虽然所用的列车模型数据有些许不同,但列车所受力矩系数的图形变化规律大致吻合,因此可以证明本文数值模拟的方案是可行的。



(a) 本文研究



(b) 参考文献研究^[20]

图6 本研究与文献仿真力矩系数的图表对比

Fig. 6 Comparison of simulated torque coefficients between this study and literature references

对CFD仿真数据的定量分析表明,侧向风对高速磁浮列车的空气动力载荷影响显著。气动阻力随侧向风速的增加呈单调上升趋势。在35 m/s的极限侧风工况下,气动阻力达到约83.2 kN,较无风工况的41.8 kN增幅接近一倍。阻力的显著增加意味着在相同运行速度下,列车需要消耗更多的牵引功率。

气动升力对侧风强度变化的响应更为敏感。无风条件下,列车所受气动升力约为147.4 kN;当侧风增至35 m/s时,升力急剧增大至约308.1 kN。该变化对列车的主动悬浮控制系统提出了严苛要求。系统必须能够快速、精确地补偿气动升力的剧烈波动,以维持恒定的悬浮间隙,确保列车高速运行时的垂向平稳性与安全性。

综合可视化流场与气动力数据进行分析可知,侧风破坏了绕列车流场的对称性,从而诱导产生显著的横向压力梯度,而该压力梯度是侧向力与侧滚力矩的主要来源。侧向力将导致列车产生横向偏移的趋势,而侧滚力矩则可能引发车体绕纵轴的旋转。两者共同作用,从根本上恶化了高速运行状态下列车的横向动态稳定性与抗倾覆性能。

分析表明,自然风(尤其是侧向风)是影响高速磁浮列车气动环境的关键因素。随着风速的增大,气动阻力、升力及侧向载荷均大幅提升,这不仅增加了运行能耗,而且对悬浮系统的稳定控制和车体的横向动力学安全带来重大挑战。在超高速磁浮列车的整车气动外形设计、控制系统策略制定以及运营安全边界确定方面,侧风效应应作为典型工况予以充分评估。

3 气动外形优化设计与验证

3.1 优化策略与理论依据

为改善列车表面绕流、降低气动阻力并增强流动稳定性,借鉴航空与船舶领域采用表面微结构进行被动流动控制的成熟经验,是一种有效手段。其核心机理在于通过微观几何形貌干预近壁面边界层的发展:

① 抑制流动分离。合理布置的微结构可以阻碍横向二次流,延迟或抑制边界层从壁面分离,从而减小压差阻力与由分离涡诱导的脉动力。

② 促进湍流结构细化。微结构可以将大尺度、高

能涡旋打散为一系列小尺度涡旋, 加速湍流动能在更小尺度上的耗散, 从而降低摩擦阻力并稳定流场。

常见的仿生微结构包括肋条 (Riblets)、凹坑 (Dimples) 和凸包 (Protuberances) 等。研究表明, 在高速列车表面应用此类结构可有效改善其气动性能, 例如, V 型沟槽结构能通过抑制近壁面湍流猝发而实现减阻, 当沟槽顶角为 40°、深度为 100 μm 时, 可获得较佳的减阻效果^[16-20]。本文选取微沟槽结构进行仿真验证。

3.2 优化模型建立与仿真设置

为验证微沟槽结构本身的气动改善效果, 并克服全尺寸复杂模型精细化仿真对计算资源的极高要求, 本研究采用具有流线型特征的简化椭球体模型作为基础验证对象, 分别建立光滑基准模型与带微沟槽的优化模型进行对比。沟槽结构沿模型纵向布置, 其几何参数参考前述研究进行设定, 如图 7。

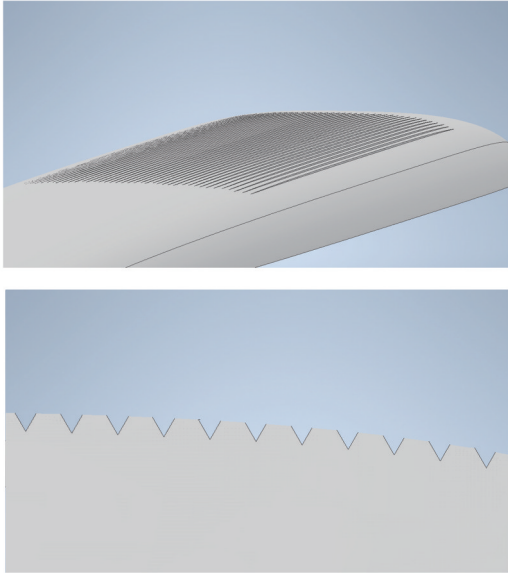


图7 用于气动优化验证的简化模型示意图
Fig. 7 Schematic of the simplified models for aerodynamic optimization verification

本文采用多尺度网格耦合技术, 在微沟槽区域实现网格尺寸满足湍流结构捕捉的需求, 同时通过自适应网格加密使全局网格数量控制在 2 000 万个以内, 较全尺寸模型计算量降低 2 个数量级。

仿真计算域、边界条件设置及网格划分策略与第 1 章所述方法保持一致, 以确保结果可比性。采用与第 2 章分析侧风影响时相同的系列工况, 即列车速度 166.7 m/s, 侧向风速 0 ~ 35 m/s 进行仿真, 分别计算 2 个模型在各工况下的稳态气动阻力与升力。

3.3 优化结果分析与验证

表 3 和表 4 分别列出了光滑基准模型与带微沟槽优化模型在不同侧风工况下所受的气动阻力 F_D 与升力 F_L

的仿真结果。

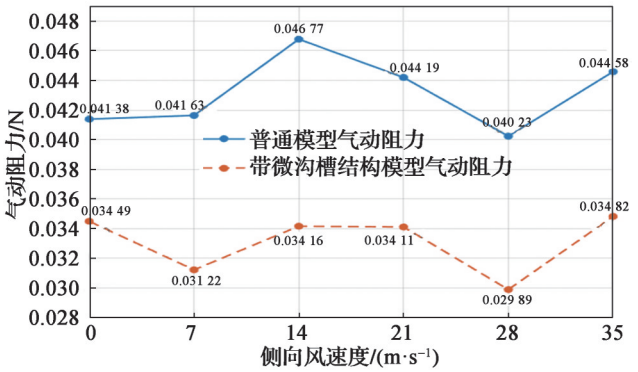
表3 光滑基准模型气动力仿真结果
Table 3 Aerodynamic simulation results of the smooth-surface baseline model

侧向风速/(m·s ⁻¹)	气动升力 F_L /N	气动阻力 F_D /N	侧向力/N
0	0.234 150	0.041 38	0
7	0.195 608	0.041 63	0.042
14	0.222 360	0.046 77	0.082
21	0.249 200	0.044 19	0.125
28	0.267 110	0.040 23	0.166
35	0.213 520	0.044 58	0.207

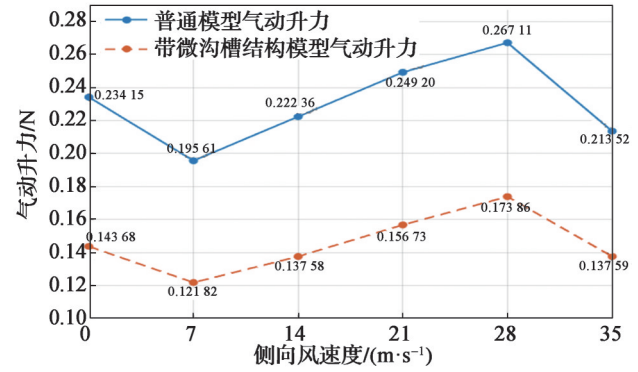
表4 带微沟槽优化模型气动力仿真结果
Table 4 Aerodynamic simulation results of the micro-groove model

侧向风速/(m·s ⁻¹)	气动升力 F_L /N	气动阻力 F_D /N	侧向力/N
0	0.143 68	0.034 49	0
7	0.121 82	0.031 22	0.042
14	0.137 58	0.034 16	0.082
21	0.156 73	0.034 11	0.125
28	0.173 86	0.029 89	0.166
35	0.137 59	0.034 82	0.207

为直观对比, 将 2 组数据绘制成曲线, 如图 8 所示。



(a) 微沟槽结构对气动阻力的影响



(b) 微沟槽结构对气动升力的影响

图8 光滑模型与微沟槽优化模型气动阻力与气动升力对比
Fig. 8 Comparison of aerodynamic drag and lift between smooth-surface baseline model and micro-groove model

根据阻力系数计算公式,可计算该模型阻力系数,计算公式如下:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (5)$$

式中: C_D 为阻力系数; F_D 为气动阻力; S 为参考面积,取全车迎风投影面积。

由于简化模型与实际列车模型有较大尺寸差距,因此估算实际列车的阻力系数时 S 需改为实际列车迎风面积。

对比分析表3、表4数据及图8曲线可以得出结论:在相同的运行速度与侧风条件下,布置有微沟槽结构的优化模型,其气动阻力与升力均低于光滑基准模型。这一结果验证了微沟槽结构在改善模型气动性能方面的有效性。其作用机理与理论预期相符,即沟槽结构通过调制近壁面湍流边界层,实现了减阻与稳流的效果。经计算,使用微沟槽结构后,该结构可使阻力减少约16.65%,根据阻力系数公式计算可得,实际列车使用微沟槽结构后阻力系数可减小约0.167%。

该仿真试验初步验证了基于表面微结构进行气动外形优化的可行性。结果表明,该策略能够在一定程度上降低气动载荷,这为提升高速磁浮列车抗侧风能力和运行经济性提供了理论参考与设计方向。后续,需进一步针对真实列车外形,对微结构的布局、几何参数进行精细化设计与全尺寸仿真验证。

4 结束语

本研究通过计算流体力学数值模拟,系统分析了自然风(侧风)对高速磁浮列车气动特性的影响,并基于仿生学原理初步探索了气动外形优化方案的可行性。主要得到以下结论:

①侧风严重恶化高速磁浮列车的气动载荷与运行安全。本文研究定量揭示了气动载荷随风速的变化规律:随着侧风强度的增大,列车所受气动阻力与升力均大幅单调递增;在35 m/s强侧风下,阻力与升力较无风工况的增量分别达到41 kN和161 kN;流场分析表明,侧风破坏了绕流对称性,在车体两侧诱导产生横向压力差,这是导致侧向力与侧滚力矩剧增的根本原因,从而严重威胁列车横向稳定性和抗倾覆安全性。

②表面微结构具有气动优化潜力。基于被动流动控制原理,本文采用了仿生微沟槽结构优化策略,并通过简化模型的对比仿真(包括流场相似性验证、尺度效应修正和参数敏感性分析)最终证实了在相同风环境下,微沟槽结构能够降低模型的气动阻力与升力。该结果初步验证了此类微观形貌通过调制近壁面边界层流动以实现减阻、稳流的作用机理,为提升高速磁浮列车的气动性能提供了新的技术思路。

尽管本文完成了微沟槽结构减阻稳流潜力的初步

验证,但仍存在局限性:首先,受计算资源限制性,研究采用了稳态风场假设,且优化验证基于简化几何模型,因此后续工作可引入非定常湍流风场,并开展全尺寸列车模型的精细化仿真,以更真实地反映实际运行环境;其次,本研究未对侧向力与侧滚力矩进行定量提取,未来需补充对这部分关键载荷的完整分析;此外,优化研究仅针对单一微沟槽方案进行了概念验证,后续还可针对多种微观形貌(如肋条、凹坑)的布局与参数进行系统对比与优化设计;最后,结合风洞试验或实车测试数据对数值模型及优化方案进行验证,进一步为工程应用提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 马卫华, 胡俊雄, 李铁, 等. EMS型中低速磁浮列车悬浮架技术研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 720-733.
MA Weihua, HU Junxiong, LI Tie, et al. Technologies research review of electro-magnetic suspension medium-low-speed maglev train levitation frame[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2023, 58(4): 720-733.
- [2] 国家铁路局. “十四五”铁路标准化发展规划[EB/OL]. (2021-12-27) [2025-10-18]. http://www.nra.gov.cn/jglz/kjgl/zywj/202112/t20211227_272220.shtml.
National Railway Administration of the People's Republic of China. The 14th five-year plan for railway standardization development[EB/OL]. (2021-12-27) [2025-10-18]. http://www.nra.gov.cn/jglz/kjgl/zywj/202112/t20211227_272220.shtml.
- [3] 周清和. 多制式城市轨道交通系统解决方案研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(4): 1-7.
ZHOU Qinghe. Study on multi-standard system solution of urban rail transit[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2018, 41(4): 1-7.
- [4] 黄尊地, 周镇斌, 陈争卫, 等. 不同风向角对高架运行磁浮列车气动特性影响分析[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2023, 37(2): 27-34.
HUANG Zundi, ZHOU Zhenbin, CHEN Zhengwei, et al. An analysis of aerodynamic characteristics of maglev trains running on viaducts in cross-wind environments[J]. Journal of Wuyi university(natural science edition), 2023, 37(2): 27-34.
- [5] 周丹, 田红旗, 鲁寨军. 国产磁浮列车气动外形的优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(3): 613-617.
ZHOU Dan, TIAN Hongqi, LU Zhaijun. Optimization of aerodynamic shape for domestic maglev vehicle[J]. Journal of central south university (science and technology), 2006, 37(3): 613-617.
- [6] 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 de-

- sign of the 600 km/h high-speed maglev transportation system[J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2023, 37(1): 1-8.
- [7] 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.
- [8] 金宇. 气动升力对高速磁浮列车速度的影响分析[J]. 现代城市轨道交通, 2023(2): 27-30.
JIN Yu. Influence of aerodynamic lift on the high-speed maglev train speed[J]. Modern urban transit, 2023(2): 27-30.
- [9] 南凯威, 刘梦娟, 郝占宙, 等. 典型气动荷载作用下磁浮列车动力学特性研究[J]. 实验流体力学, 2023, 37(3): 69-83.
NAN Kaiwei, LIU Mengjuan, HAO Zhanzhou, et al. Research of dynamic characteristics of maglev train under typical aerodynamic loads[J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2023, 37(3): 69-83.
- [10] 苗秀娟, 黄瑞鹏, 何侃, 等. 横风下路堤高度对高速列车气动特性影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1081-1089.
MIAO Xiujuan, HUANG Ruipeng, HE Kan, et al. Influence of embankment height on aerodynamic performance of high-speed trains under crosswind[J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(5): 1081-1089.
- [11] 杨永刚. 高速磁浮列车明线气动特性及头型局部优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
YANG Yonggang. The aerodynamic performances of the high-speed maglev train in the open air and the local optimization of the train head[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [12] 杨永刚, 杜云超, 梅元贵. 单列高速列车通过隧道空气阻力特性数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2755-2763.
YANG Yonggang, DU Yunchao, MEI Yuangui. Numerical simulation of aerodynamic drag of single high-speed train passing through a tunnel[J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(11): 2755-2763.
- [13] 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.
- [14] 罗宇豪, 池茂儒, 吴兴文, 等. 新型中低速磁浮车辆振动传递特性研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(20): 8848-8855.
LUO Yuhao, CHI Maoru, WU Xingwen, et al. Vibration transmission characteristics of new medium-low speed magnetic levitation vehicle[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(20): 8848-8855.
- [15] 毕海权, 雷波, 张卫华. 自然风对高速磁浮列车气动特性的影响[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 65-70.
BI Haiquan, LEI Bo, ZHANG Weihua. Effects of natural wind on aerodynamic characteristics of high-speed maglev train[J]. China railway science, 2007, 28(2): 65-70.
- [16] 王业腾, 孙振旭, 鞠胜军, 等. 沟槽微结构尺寸对高速列车横风特性影响研究[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(5): 132-141.
WANG Yeteng, SUN Zhenxu, JU Shengjun, et al. Influence of groove microstructures on the aerodynamic performance of high speed trains under crosswind[J]. Acta aerodynamica sinica, 2021, 39(5): 132-141.
- [17] 杜健, 龚明, 田爱琴, 等. 基于仿生非光滑沟槽的高速列车减阻研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(5): 70-76.
DU Jian, GONG Ming, TIAN Aiqin, et al. Study on the drag reduction of the high-speed train based on the bionic non-smooth riblets[J]. Journal of railway science and engineering, 2014, 11(5): 70-76.
- [18] 张渊, 张继业, 李田. 基于非光滑表面的高速列车转向架区域气动减阻性能[J]. 机械, 2016, 43(9): 12-15.
ZHANG Yuan, ZHANG Jiye, LI Tian. Research on the drag reduction characteristics of high-speed train with non-smooth surface[J]. Machinery, 2016, 43(9): 12-15.
- [19] 宋娟娟, 徐宇, 黄宸武, 等. 非光滑表面湍流减阻的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 771-774.
SONG Juanjuan, XU Yu, HUANG Chenwu, et al. Numerical simulation of drag reduction by non-smooth surfaces in turbulent flow[J]. Journal of engineering thermophysics, 2011, 32(5): 771-774.
- [20] 唐焜, 马术文, 梁红琴, 等. 高速列车微结构表面减阻仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2020(9): 213-216.
TANG Kun, MA Shuwen, LIANG Hongqin, et al. Simulation research of the drag reduction of high-speed train microstructured surfaces[J]. Machinery design & manufacture, 2020(9): 213-216.

Numerical simulation and optimization study on aerodynamic characteristics of high-speed maglev trains under natural wind conditions

YANG Jiachen^{1,2,3}, XU Junqi^{2,3}, SUN Yougang^{1,2,3}, DOU Qingshan⁴, SU Zhixuan⁴

(1. State Key Laboratory of High-speed Maglev Transportation Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. National Maglev Transportation Engineering R&D Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;

4. Hunan Rail Transit Technology Application Research Center Co., Ltd., Changsha, Hunan 410027, China)

Abstract: To investigate the influence mechanism of natural wind on the operational stability of ultra-high-speed maglev trains and explore potential directions for aerodynamic optimization, this study conducted numerical simulations based on computational fluid dynamics (CFD) methods. A three-dimensional simplified model was established to simulate high-speed maglev trains operating at 600 km/h in flow fields under six conditions ranging from calm to strong crosswind (0-35 m/s). Results indicate that crosswinds significantly deteriorate aerodynamic environments of train operation. Under a strong crosswind at 35 m/s, aerodynamic drag and lift on the train increase by approximately 41 kN and 161 kN, respectively, compared to the calm condition. Lateral forces and rolling moments, induced by pressure asymmetry in the flow field, also increase sharply, posing a severe threat to the train's lateral stability and safety against overturning. To further explore optimization approaches, a concept that involves bionic micro-groove structures on the train surface was proposed and conceptually verified through comparative simulations using simplified models. Verification results show that, under identical wind conditions, the model with micro-groove structures exhibits systematically lower aerodynamic drag and lift compared to the base-line model with smooth surface. The study findings demonstrate that natural wind (particularly crosswind) is a critical factor in the aerodynamic safety design for high-speed maglev trains, and that passive flow control based on surface micro-structures represents a potential and effective optimization direction, providing theoretical references for future design efforts.

Keywords: high-speed maglev train; aerodynamic characteristics; natural wind; computational fluid dynamics; numerical simulation; shape optimization

收稿日期: 2026-01-08; 修回日期: 2026-02-28

责任编辑: 白 云