



城市风场下高速磁浮列车的气动效应分析

王喜^{1,2}, 毛建锋^{1,2}, 刘义康³, 余志武^{1,2}, 沈明哲^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

2. 高速铁路建造技术国家工程中心, 湖南 长沙 410075;

3. 香港城市大学 建筑与土木工程系, 中国 香港 999077)

摘要: 随着磁悬浮列车在城市化区域应用的不断拓展, 复杂城市建筑群与横风耦合作用下的气动环境已成为制约磁浮列车运行安全与稳定性的关键因素。针对现有研究多基于理想化或简化建筑模拟、难以反映真实城市风场特征的问题, 文章以上海磁浮示范线的典型高架区段为原型, 建立了横风-城市建筑群-车桥体系的三维数值模型, 采用大涡模拟方法研究了建筑群和风向角对城市风场的扰动机制及其对磁悬浮列车气动特性的影响, 分析了列车运行过程中的气动荷载特性、列车表面压力与流场结构特征。结果表明, 建筑间隙与城市道路形成的加速效应显著加剧了列车气动荷载波动; 列车气动荷载随风向角增大呈显著递增趋势, 风向角为90°的气动荷载最大, 分别为风向角45°、60°的1.86倍和1.20倍; 列车不同车厢的气动荷载呈非对称分布特征, 头车荷载响应最剧烈; 位于城市路口段的迎风侧, 列车表面压力峰值为建筑段的1.07倍与1.52倍。列车近场持续的尾涡结构会导致尾车的气动压力相应增加, 建筑群与横风的耦合作用影响城市风场的涡结构演化, 进而影响列车气动荷载。研究结果可为城市磁悬浮列车运行安全保障、风环境风险区段识别与线路选址优化提供参考。

关键词: 磁悬浮列车; 城市建筑群; 横风效应; 气动荷载; 数值模拟

中图分类号: U266.4; U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0155-08

0 引言

随着高速地面交通系统在全球范围内的快速发展, 交通基础设施正逐步向复杂城市空间叠加布局, 其运行环境所面临的空气动力学问题亦日益突出。磁悬浮列车具有无接触驱动、低噪声与高运行速度等优势^[1], 发展磁浮交通已成为缓解城市交通压力与提升区域交通效率的重要技术路径。以上海磁浮示范运营线为代表的工程实践, 展示了磁悬浮系统在特大城市环境中的可行性与先进性。然而, 与传统轮轨式高速列车不同, 磁悬浮列车依靠电磁悬浮系统维持毫米级悬浮间隙^[2], 其悬浮力与导向力对外界气动扰动具有更高敏感性^[3]。横风作用下产生的升力、侧向力及瞬态压力脉动, 不仅会改变车

体气动荷载分布, 而且可能引起悬浮间隙波动、导向间隙偏移以及悬浮控制系统负荷增加, 从而影响列车运行稳定性与安全性。尤其是在高架桥梁的环境中, 列车更易受到复杂横风作用^[4], 使其悬浮稳定性与运行安全面临潜在威胁^[5]。因此, 相较于传统轮轨列车, 磁悬浮列车在复杂风环境下表现出更强的气动敏感特征。

围绕横风环境下磁悬浮列车运行安全性的研究已取得诸多重要成果。文献[6]揭示了不同风向角条件下横风诱导气动力的不对称性, 指出负攻角更易引发车体倾覆, 而正攻角主要影响悬浮稳定性; 文献[7]基于空气动力学建立列车-轨道系统耦合模型, 发现横风会显著影响磁浮导向间隙的动态响应; 文献[8]提出的风-磁浮列车-轨道梁耦合分析框架表明, PIDA控制策略可有效降低横风导致的横向位移幅值; 文献[9]探究了列

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB4302500); 国家自然科学基金项目 (52478321, 52078485); 湖南省科技创新计划 (2025RC3028); 湖南省自然科学基金项目 (2024JJ5427); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2026ZZTS0832)

通信作者: 毛建锋, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事轨道交通车-轨-桥随机动力学方面的研究; E-mail: jfmao1@csu.edu.cn

引用格式: 王喜, 毛建锋, 刘义康, 等. 城市风场下高速磁浮列车的气动效应分析[J]. 机车电传动, 2026(2): 155-162.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.017.

Citation: WANG Xi, MAO Jianfeng, LIU Yikang, et al. Aerodynamic effects analysis for high-speed maglev trains in wind and urban environments[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 155-162.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.017.

车-桥梁-风屏障之间的气动干扰机制；文献[10]则从流场角度解释了横风速度与列车周围涡结构演化之间的正相关关系。与此同时，文献[11]揭示了峡谷地形对来流具有显著的加速效应，来流风速可加速至原始风速的1.6~2.2倍。此外，磁悬浮列车的气动响应并非仅由车辆自身的结构特性与运行状态所决定，其所处外部环境同样在塑造风场结构与气动力作用模式方面发挥着关键作用^[12-13]。这些研究多围绕局部设施对流场的扰动机理，对城市风环境下的整体气动特性关注不足。

值得注意的是，现代城市高架磁浮线路往往穿越由不同建筑高度、不同排列密度及不同空间尺度构成的复杂城市建筑群^[14]。此类建筑群对横风传播路径、流场分布及湍流结构具有重塑效应。近年来的研究表明，建筑群不仅产生传统意义上的“遮蔽效应”，而且可能通过三维形态诱导局部“加速效应”、流场再分布及涡脱落强化^[15-16]，导致列车运行方向上的风场呈现明显的空间非均匀性、非定常性与突变性。现有研究对象多侧重于开放环境、局部设施或简化地形条件下的流场扰动机理，对真实城市建筑群环境中的风场重构效应关注不足。随着城市高架磁浮线路逐渐穿越高密度建筑区域，复杂建筑群可能通过遮蔽效应、通道加速效应及三维涡结构演化改变列车周围风场分布，进而诱发更显著的非定常气动荷载。然而，目前针对城市建筑群-横风-磁浮列车耦合作用机制的研究仍较为缺乏，特别是在复杂城市空间中，建筑诱导风场的重构及其对磁浮列车气动响应的影响方面尚未形成系统认识。

基于上述分析，本研究以上海磁浮示范线典型高架区段为原型，构建横风-城市建筑群-车桥体系的三维多尺度耦合数值模型，以探讨城市建筑与横风耦合作用对磁悬浮列车气动响应的影响机制。通过设置不同横风风向角工况，模拟列车在建筑段、城市路口区域运行过程中的风场结构特征、表面压力分布以及气动荷载时程演化，进一步解析横风在复杂城市空间中的传播路径变化，及其对列车风致风险形成和发展的作用过程。本研究所得成果可为城市磁浮线路的风环境设计、关键工况识别与运行安全评估提供理论依据与方法框架。本文内容安排如下：首先介绍数值计算方法，构建仿真模型；然后分析不同建筑工况下风场与列车气动载荷的演化规律，包括列车气动荷载、列车表面压力与涡结构演化分析及城市风场特征；最后总结研究结论。

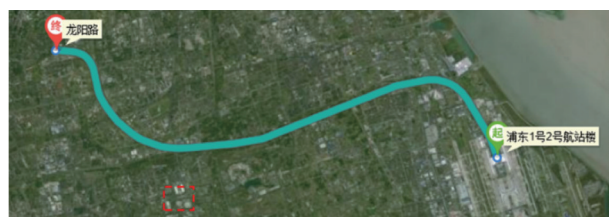
1 数值方法

上海磁浮示范线典型高架区段如图1所示，以该区段为原型构建数值模型并对其进行分析。

1.1 数值模型

为精准解析城市建筑群与横风耦合作用下桥上磁

浮列车的气动特性，建立了包含横风来流、磁浮车桥系统及城市建筑在内的1:10缩尺三维数值仿真模型，如图2所示，以磁浮列车的头车长度 L 、宽度 W 和高度 H 作为特征尺寸，计算域采用长方体模拟，其长、宽、高分别为 $29.63L$ 、 $169.02W$ 与 $31.58H$ 。计算域坐标系定义为 $Oxyz$ ， x 轴为行车方向， y 轴竖直向上，横风来流为 z 轴负方向。如图2(b)所示，桥梁模型采用标准箱梁结构，桥梁最大总宽达 $3.77H$ ，总高为 $1.18H$ ；桥面上方铺设磁浮系统专用双抱轨结构，抱轨截面宽度与轨高分别为 $0.38W$ 和 $0.32H$ 。迎风侧风速测点位于桥梁迎风侧翼板边缘正上方 $1.4H$ 处。如图2(c)所示，列车模型基于上海磁悬浮线头车、中车和尾车的3编组架构，并简化了车门、悬浮架、转向架、车体连接处等结构细节；其头车与尾车的长度、宽度和高度分别为 $L=27.00\text{ m}$ 、 $W=3.55\text{ m}$ 、 $H=3.80\text{ m}$ ，中车长度为 $0.92L$ 。风向角 α 为横风来流方向与列车行驶方向的夹角，风向角 α 分别取 45° 、 60° 和 90° ，来流风速 U_0 恒定为 20 m/s 。磁浮列车的运行速度 V 恒定为 430 km/h 。



(a) 上海磁浮示范线卫星地图



(b) 城市路口俯视图



(c) 磁浮列车

图1 上海磁浮示范线

Fig. 1 Shanghai maglev demonstration line

1.2 网格生成与求解

1.2.1 网格生成方法

采用 Sim center STAR-CCM+ 2306 软件进行建模计算。如图3所示，首先建立1个矩形区域作为重叠网格区域，其长度为 $4L$ 、宽度为 $1.83W$ 、高度为 $1.13H$ ，该区域的最大单元网格尺寸为 $0.0037L$ ，表面网格目标尺寸为 $0.0029L$ ，车体表面设置10层棱柱层网格，棱柱层网格第1层厚度为 $1.48 \times 10^{-5} L$ ，增长因子为1.5， $y^+ \approx 1$ 。该重叠区域具有与列车运行完全相同的速度和位移，在计算过程中相对于背景网格运动。

背景网格包含桥梁、城市建筑及远场空气。在桥梁上部设置高度与宽度分别为 $1.54H$ 与 $1.83W$ 的网格加密1，通过交界面实现重叠网格与加密1的流场数据交换；列车抱轨区域设置网格加密2。桥梁和城市建筑群

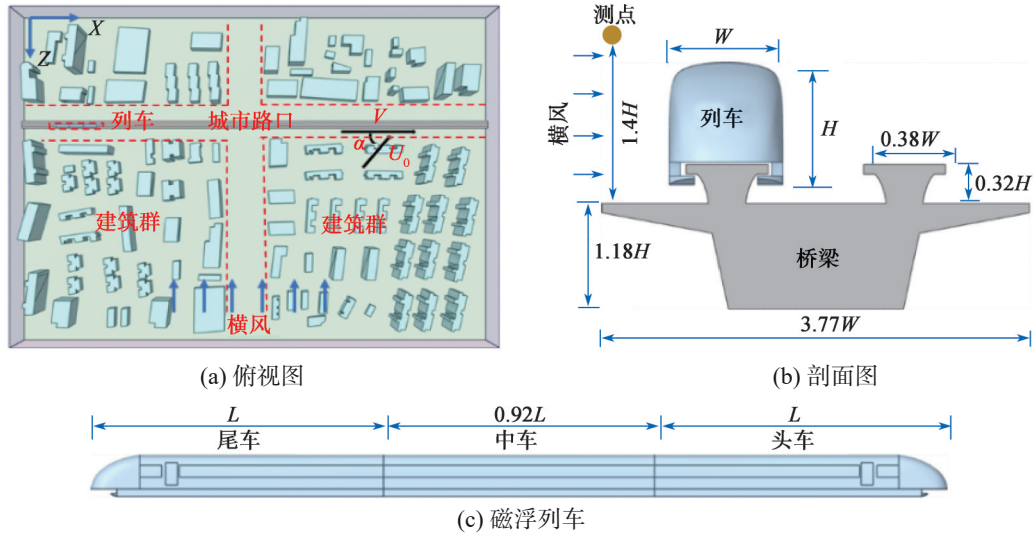


图2 数值模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the numerical model

壁面分别布置6层与4层棱柱层网格;并设置加密3以捕捉桥梁附近的复杂流动,该区域内最大网格尺寸为 $0.0037L$ 。除上述加密区域,其他区域采用网格梯度过渡策略以抑制数值耗散。最终模型的总网格量约5 800万,在保证流动解析精度的同时有效控制计算规模。

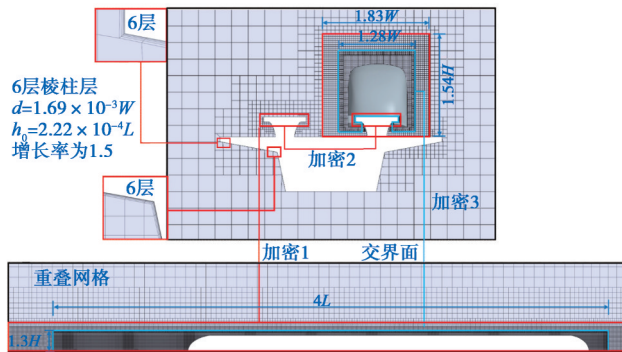


图3 网格生成方法

Fig. 3 Grid generation method

1.2.2 网格求解

研究团队采用大涡模拟方法对三维湍流流动进行高保真度数值模拟。大涡模拟方法的控制方程通过对瞬态 Navier-Stokes 方程进行空间滤波得到,滤波后将流场变量分解为可解析的大尺度分量和需模化的亚网格尺度分量。在理想气体假设下,针对三维湍流及速度场与压力场/密度场强耦合的流动,滤波后的质量守恒方程与动量守恒方程为:

$$\partial \bar{\rho} / \partial t + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (1)$$

$$\partial (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}) / \partial t + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{\text{sgs}} \quad (2)$$

式中: $\bar{\rho}$ 、 $\bar{\mathbf{u}}$ 和 $\bar{p}$ 分别为滤波后的流体气体密度、速度与静压; ∇ 为散度算子; t 为时间; μ 为流体运动黏度; $\boldsymbol{\tau}_{\text{sgs}}$ 为亚格子尺度应力,采用 WALE 模型进行封闭。

采用恒定物理时间步长 $\Delta t = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$, 根据式(3), 通过多次预计算与时间步敏感性分析, 确保 CFL 数

C_{CFL} 小于 1, 以满足大涡模拟对时间推进精度的要求。每个时间步内采用 5 次隐式内部迭代求解, 使残差下降 2~3 个数量级。

$$C_{\text{CFL}} = u' \Delta t / \Delta x \quad (3)$$

式中: u' 为网格移动速度, 取列车移动速度; Δt 为时间步长; Δx 为局部网格尺度, 取列车表面第 1 层网格高度。

1.2.3 参数无量纲化

为使计算结果具有可比性与工程适用性, 对所有物理量进行无量纲化处理。涉及的无量纲处理对象包括气动荷载 (侧向力 F_z 、升力 F_y 及倾覆力矩 M_x)、压力 P 、时间 t 、长度 l 以及风速 U , 详见式(4)~式(10)。

$$C_z = F_z / (0.5 \rho V^2 A) \quad (4)$$

$$C_y = F_y / (0.5 \rho V^2 A) \quad (5)$$

$$C_{\text{mx}} = M_x / (0.5 \rho V^2 A H) \quad (6)$$

$$C_p = P / (0.5 \rho V^2) \quad (7)$$

$$t' = t V / l \quad (8)$$

$$l' = s / l \quad (9)$$

$$U' = U / U_0 \quad (10)$$

式中: C_z 为侧向力系数; C_y 为升力系数; C_{mx} 为倾覆力矩系数; C_p 为压力系数; ρ 为密度; A 为车厢侧面积, 对于头车和中车, A 分别为 0.97 m^2 和 0.95 m^2 ; H 为车厢高度, 令 $H = 0.38 \text{ m}$; V 为车速, 令 $V = 430 \text{ km/h}$; l 为特征长度, 令 l 为车长; s 为列车运行距离; U_0 为来流风速, $U_0 = 20 \text{ m/s}$; t' 为无量纲时间, 表示列车运行的相对时间; l' 为无量纲长度, 表示桥梁的相对位置; U' 为无量纲风速, 表示桥梁迎风侧风速与来流风速的比值。

1.3 模型验证

1.3.1 网格无关性验证

为确保数值模拟结果的可靠性和计算效率, 设计了

3种网格尺寸方案。通过修改列车表面网格尺寸 d 与第1层贴体网格高度 h_0 ，得到3种类型的网格模型，分别为

粗网格、中等网格和细网格模型。网格方案如表1所示，最终选用中等网格方案进行后续的所有仿真分析。

表1 网格无关性分析
Table 1 Grid independence analysis

网格方案	d	h_0	网格数量	升力系数 C_y	变化率
粗网格方案	$1.69\times10^{-3}W$	$2.22\times10^{-5}L$	4 500 万	0.061	12.5%
中等网格方案	$1.13\times10^{-4}W$	$1.48\times10^{-5}L$	5 800 万	0.069	
细网格方案	$8.45\times10^{-5}W$	$1.11\times10^{-5}L$	6 800 万	0.071	2.6%

1.3.2 计算模型验证

研究团队采用室内动模型试验来验证数值模拟计算方法的准确性。如图4所示，该试验的缩尺比例为1:25，模型几何尺寸为总长度2.16 m、宽度0.142 m、高度0.152 m。试验过程中，列车以350 km/h的速度通过直立屏障区域，同时对位于屏障中央壁面、轨道表面上方的验证点 P_1 的气动压力进行监测。CFD数值模拟的压力系数峰值 C_{p-max} 与 C_{p-min} ，与动模型试验的结果相比，偏差分别为5.3%与7.5%。对比验证结果表明，数值模拟计算结果具备良好的可靠性。

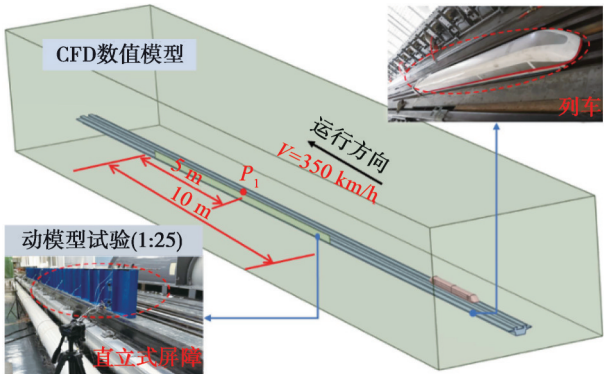


图4 计算模型验证
Fig. 4 Verification of the computational model

2 结果与讨论

2.1 列车气动荷载

为分析横风与建筑群耦合作用对磁浮列车气动响应的时程演化规律，研究团队对头车在风向角 α 为45°、60°、90°时的气动荷载系数进行对比分析，包括侧向力系数 C_z 、升力系数 C_y 及倾覆力矩系数 C_{mx} ，如图5所示。将列车车头鼻尖驶入与驶出城市道路的时刻分别标记为EN与EX。此外，为形成参照基准，图5还给出了列车在开放环境下风向角为90°的气动荷载变化曲线。建筑间隙对横风荷载具有加速效应。城市建筑群由不同尺度的单体建筑组合而成，其间隙分布具有较强的随机性，这使得列车气动荷载在建筑段内沿桥梁纵向呈现非均匀增强的变化特征。城市道路形成的风廊使得气动荷载显著增大，列车驶入和驶出城市道路过程中呈现显著的突变特征，其中以升力系数 C_y 的增幅最为突出，在风向角度为90°条件下 C_y 显著高于开放

环境下的水平。

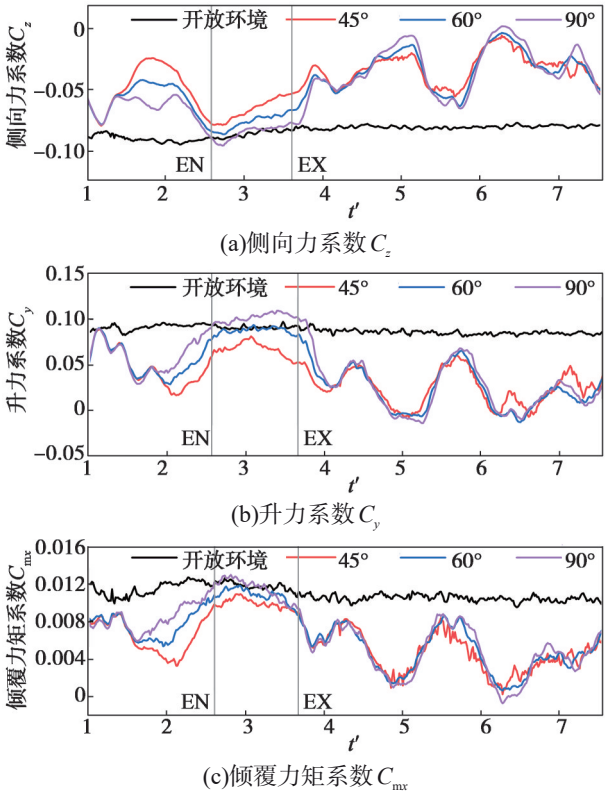


图5 头车气动荷载系数时程曲线
Fig. 5 Time history curve of aerodynamic load coefficient of head car

为定量分析列车不同车厢气动荷载均值的差异化特征，研究团队对比分析了头车、中车及尾车的平均气动荷载差值，如图6所示。其中，荷载差值定义为城市道路段气动荷载均值与建筑段均值的差值。头车的气动荷载差值显著高于中车与尾车，头车受到的气动荷载波动最大。风向角45°条件下，头车的 C_y 差值分别为中车和尾车的1.94倍、2.39倍， C_z 差值分别为中车和尾车的4.87倍、3.97倍， C_{mx} 差值为中车的4.34倍，且尾车的 C_{mx} 差值接近于0；风向角60°条件下，头车的 C_y 差值分别为中车和尾车的2.16倍、2.45倍， C_z 与 C_{mx} 差值则分别达中车和尾车的3.69倍、4.16倍和5.80倍、4.39倍。风向角90°条件下，头车的 C_y 差值分别为中车和尾车的1.83倍、2.20倍， C_z 与 C_{mx} 差值则分别达中车和尾车的3.62倍、23.6倍和9.82倍、4.65倍。随着风向角的增加，城市路口段的建筑间隙加速效应被强化，加剧列车的气动荷载波动。以头车为例，90°风向角的 C_y 、

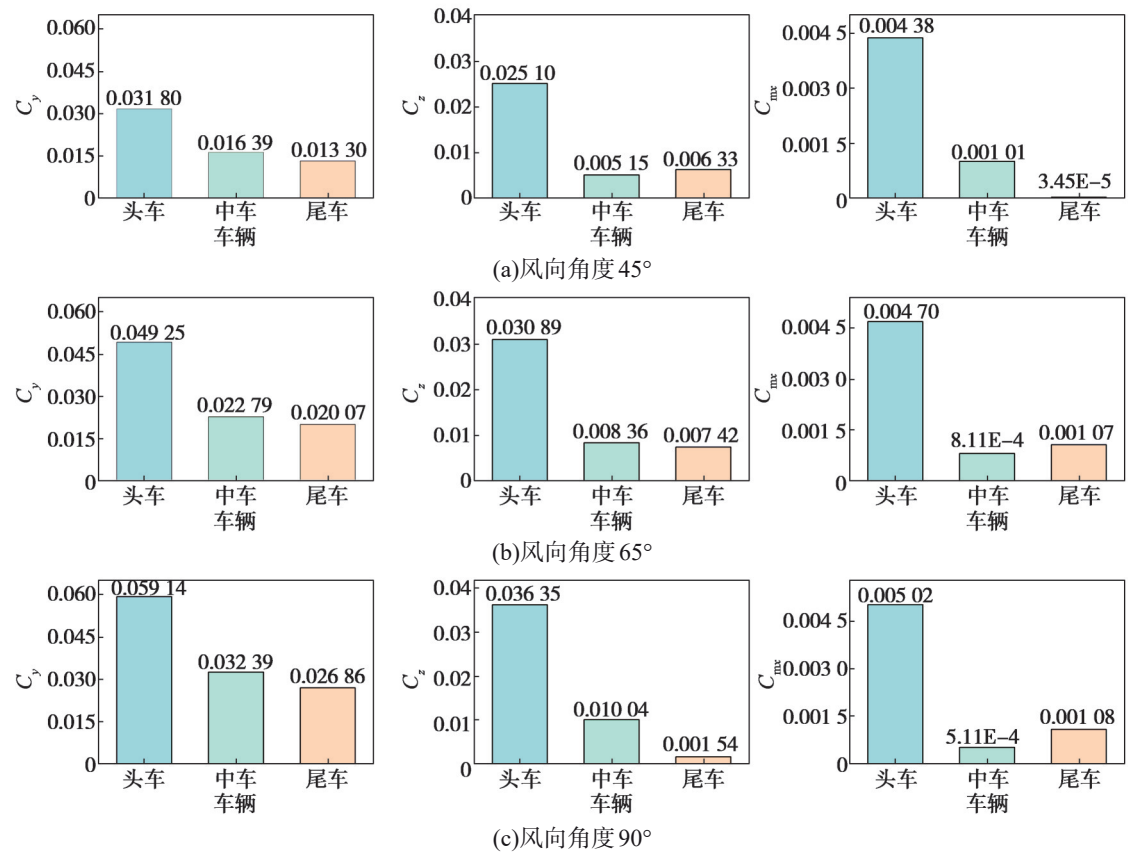


图6 不同车厢的气动荷载系数对比
Fig. 6 Comparison of aerodynamic load coefficients across cars

C_z 与 C_{mx} 分别为45°和60°的1.86倍、1.45倍、1.15倍和 相对位置。
1.20倍、1.18倍、1.07倍。

2.2 列车表面压力与车身瞬态涡结构
2.2.1 列车表面压力

为揭示列车表面气动载荷的分布特征，研究团队给出了 $\alpha=90^\circ$ 的 $t'_1\sim t'_3$ 共3个特征时刻，列车迎风侧与背风侧表面的压力云图，以及沿车体纵向的压力系数 C_p 分布曲线，并对列车头车、中车与尾车进行分区域标识，具体如图7和图8所示。压力系数 C_p 的取值为列车高度1/2处外表面轮廓线对应的数值，横坐标采用列车纵向位置 d 与头车长度 L 的无量纲比值 d/L 表示车体的

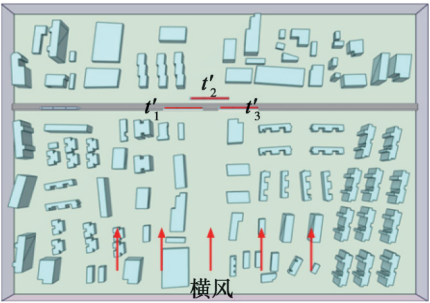


图7 列车运行特征时刻
Fig. 7 Characteristic moments of train moving

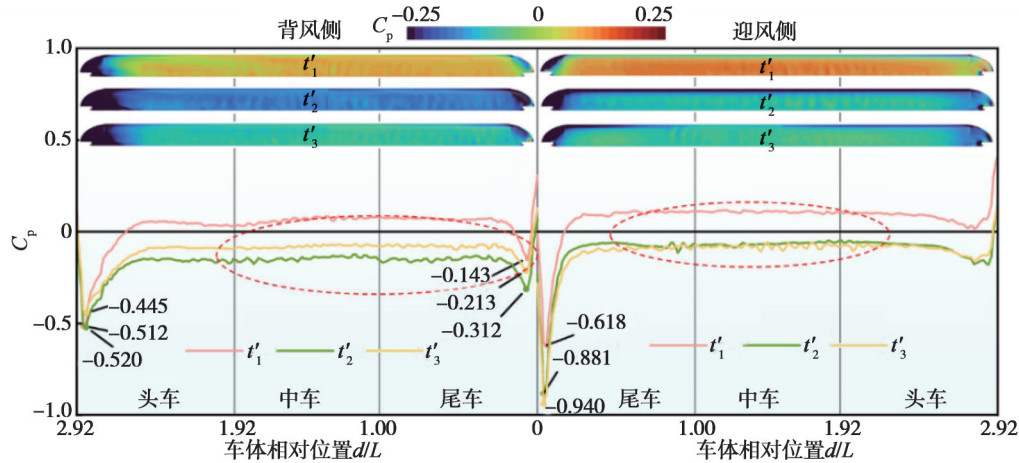


图8 列车表面压力演化
Fig. 8 Evolution of surface pressure on the train

当列车行驶至建筑间隙或城市路口区域时, 车体迎风侧与背风侧的表面压力分布均发生显著突变, 进而导致气动载荷呈现更高的脉动频率与更高的峰值。例如, 位于城市路口的 t'_2 时刻的车体表面压力为 t'_1 和 t'_3 时刻的 1.07 倍与 1.52 倍。此外, 列车表面出现明显的压力荷载波动, 加剧了列车运行的不稳定性。

2.2.2 车身瞬态涡结构

在风向角 $\alpha = 90^\circ$ 条件下, $t'_1 \sim t'_3$ 时刻列车经历 EN 与 EX 过程时的三维瞬态涡流结构分布如图 9 所示。涡结构等值面基于 Q 准则生成 ($Q=10\ 000$), 使用压力系数 C_p 进行染色。列车近场的涡结构可划分为 3 类典型形态: 迎风侧附着涡、背风侧脱离涡和尾涡。 t'_1 时刻列车驶入城市道路区域, 此时附着涡几乎覆盖整个列车外表面, 使得车身表面的压力产生波动。背风侧涡结构决定气动荷载的整体水平, 位于城市路口的 t'_2 时刻背风侧涡结构的尺寸均显著大于其他时刻, 因而气动荷载更大。各特征时刻下的尾流涡均表现为大尺度纵向涡结构, 该涡结构沿车体表面延伸发展, 其 x 方向尺寸与尾车长度相当, 并向背风侧偏转, 会显著增强尾车的气动荷载及其脉动效应。

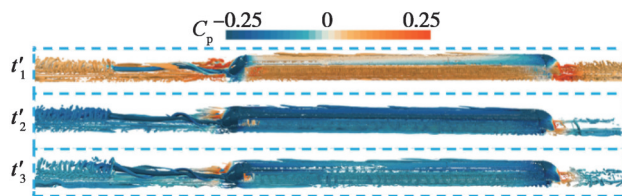


图 9 瞬态演化涡结构

Fig. 9 Instantaneous evolution of vortex structure

2.3 城市风场

为分析城市建筑与横风耦合作用下的城市风场特征, 图 10 的第 1~第 3 列依次给出了风向角 α 为 45° 、 60° 和 90° 条件下的三维风速云图、桥梁迎风侧风速轮廓曲线以及涡量等值面图, 并采用无量纲风速 U' 对风速云图进行染色。其中, 涡量等值面基于 Q 准则生成 ($Q=400$), U' 为迎风侧风速与来流风速 20 m/s 的比值 [见式(10)]。

城市建筑群的随机间隙和城市道路形成的风廊对横风来流具有显著的加速效应, 会对列车形成强度高于来流风速的气动冲击作用。建筑间隙加速效应与建筑物遮蔽效应耦合作用, 使来流呈现显著的非定常波动特征, 进而威胁列车运行稳定性。横风穿越高层建

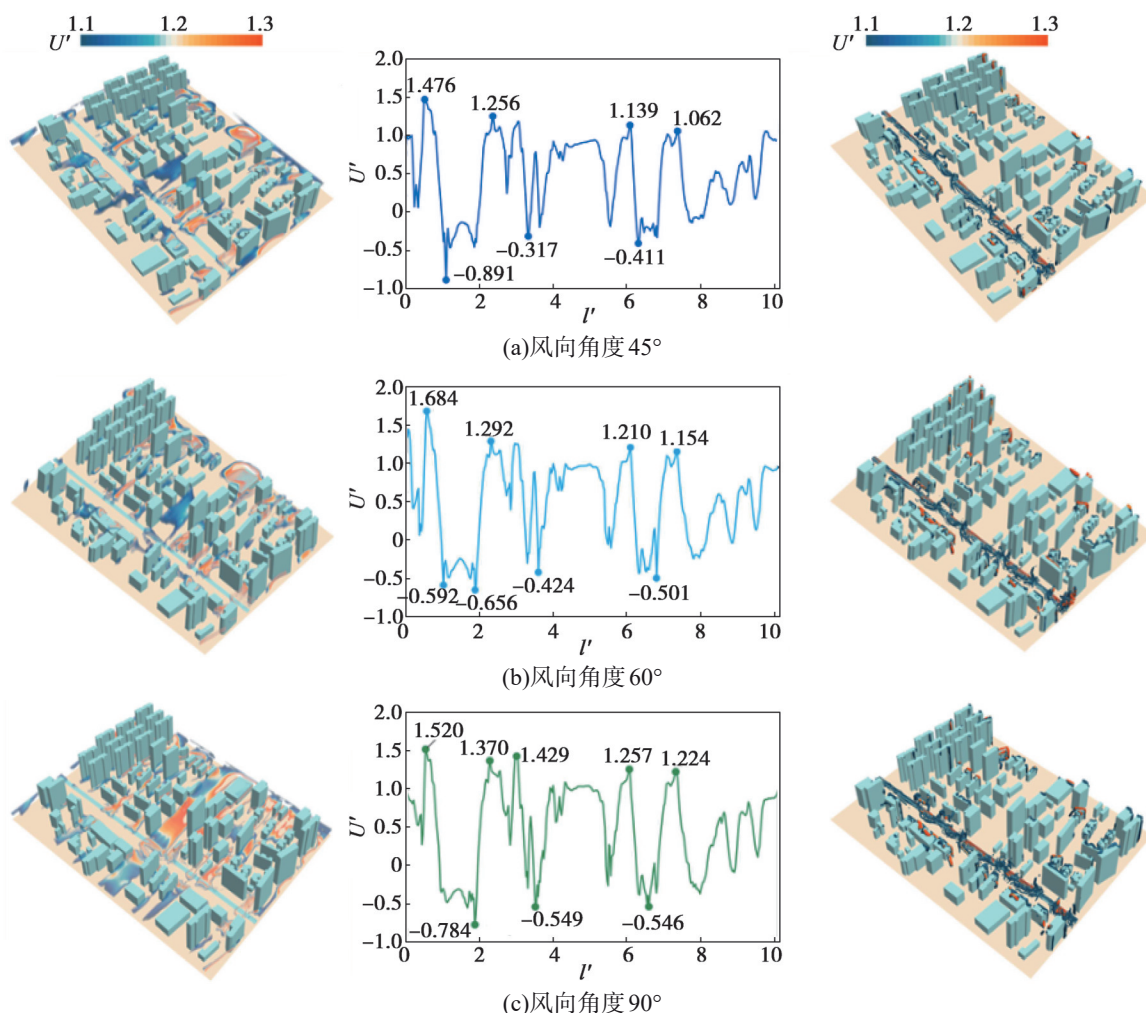


图 10 三维风速云图、迎风侧风速轮廓及涡量等值面图

Fig. 10 3D wind-speed contour plots, wind-speed profiles on windward side, and vorticity isosurface plots

筑间的狭窄通道时, 受流通面积骤减的约束作用, 气流被强制加速, 静压同步降低, 最终在建筑群尾部及间隙区域形成局部高幅值横风加速区。桥梁迎风侧风速在建筑间隙对应位置出现尖锐峰值。此外, 绕流产生复杂涡结构, 加剧列车气动荷载的波动。如图10所示, 气流在建筑物与桥梁的作用下发生复杂流动分离与绕流, 使得在桥梁周边形成大量连续性大尺度涡结构, 增强了列车气动荷载的脉动频率与幅值。

3 结论

基于大涡模拟方法, 研究团队以上海磁浮示范线典型高架区段为原型, 建立了横风-城市建筑-车桥体系数值模型, 研究了横风与城市建筑耦合作用下磁悬浮列车的气动特性与风场结构特征, 重点分析了来流风向角对列车气动荷载演化规律、列车表面压力及城市风场扰动机制。主要结论如下:

①城市道路与建筑间隙形成的加速效应, 是诱发列车气动荷载非定常波动的主要因素。建筑间隙的加速效应与城市道路的风廊效应共同驱动气流加速, 使来流风速沿车体纵向呈非均匀分布, 进而引发车体表面压力突变, 显著加剧气动荷载的非定常波动。

②风向角增大显著增加列车气动荷载及时变特性。随风向角 α 由 45° 增至 90° , 城市道路的加速效应被强化, 列车气动荷载呈显著递增趋势, 90° 风向角条件下头车的气动荷载差值 C_y 、 C_z 与 C_{mx} 分别为 45° 、 60° 的1.86倍、1.45倍、1.15倍和1.20倍、1.18倍、1.07倍。

③横风与建筑耦合绕流形成的复杂涡结构, 是加剧列车气动荷载非定常波动的关键因素。列车近场涡结构分为车体表面附着涡与尾流涡两类, 建筑间隙与城市道路的加速效应, 会与列车尾部大尺度纵向尾流涡叠加, 进一步放大尾车表面压力, 尾流涡在各时刻均为大尺度纵向涡结构。

此外, 本文建立的城市建筑群模型主要关注典型建筑布局与横风耦合作用对磁悬浮列车气动特性的影响, 尚未进一步考虑树木、临时构筑物、道路附属设施以及地面粗糙度等城市微环境要素对局部风场结构的扰动作用。上述因素可能导致近地层湍流结构、局部风速分布及瞬态涡结构进一步复杂化, 从而对列车非定常气动荷载产生一定影响。因此, 后续研究将进一步结合更加真实的城市风环境特征, 开展复杂城市风场条件下磁悬浮列车气动性能与车桥耦合振动特性的研究(如车体振动位移、加速度及悬浮间隙动态响应等), 以提升研究对实际运营环境的适用性。

参考文献:

[1] 龙志强, 窦峰山, 王志强, 等. 高速磁浮悬浮导向控制技术现状 & 展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 78-88.
LONG Zhiqiang, DOU Fengshan, WANG Zhiqiang, et al.

Current status and prospects of high-speed maglev suspension and guidance control technology[J]. Science and technology foresight, 2023, 2(4): 78-88.

- [2] 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.
- [3] 周旭, 夏文韬, 窦峰山, 等. 基于气动力干扰补偿的磁悬挂天平位姿控制研究[J]. 空气动力学学报, 2025, 43(12): 144-152.
ZHOU Xu, XIA Wentao, DOU Fengshan, et al. Research on position and attitude control of magnetic suspension and balance system based on aerodynamic disturbance compensation[J]. Acta aerodynamica sinica, 2025, 43(12): 144-152.
- [4] 毛建锋, 张广文, 李铮, 等. 基于AFSA-LSTM代理模型的风-车-桥系统气动力预测方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(6): 2550-2561.
MAO Jianfeng, ZHANG Guangwen, LI Zheng, et al. Aerodynamic prediction method for wind-train-bridge system based on AFSA-LSTM surrogate model[J]. Journal of central south university(science and technology), 2025, 56(6): 2550-2561.
- [5] 凌亮, 赵靖宇, 谈春波, 等. 强横风环境下高速列车运行安全自适应约束跟随控制[J]. 振动工程学报, 2025, 38(11): 2464-2473.
LING Liang, ZHAO Jingyu, TAN Chunbo, et al. Adaptive constraint following control for high-speed train operation safety under strong crosswind[J]. Journal of vibration engineering, 2025, 38(11): 2464-2473.
- [6] XU G, GUO Y H, LI X K, et al. Aerodynamic behavior of a 600 km/h high-speed maglev train under crosswinds with different wind attack angles[J]. Physics of fluids, 2025, 37 (8): 085243.
- [7] HUANG Z D, KONG W K, WANG S M, et al. Dynamic and stability analysis of high-speed maglev train-guideway coupled system under crosswind[J]. Journal of sound and vibration, 2025, 609: 119092.
- [8] TIAN X F, XIANG H Y, CHEN X L, et al. Dynamic response analysis of high-speed maglev train-guideway system under crosswinds[J]. Journal of central south university, 2023, 30(8): 2757-2771.
- [9] 赵健业, 邹思敏, 魏晓军. 考虑车辆、桥梁与风屏障相互气动干扰的车-桥系统气动特性研究[J]. 铁道学报, 2025, 47 (6): 188-195.
ZHAO Jianye, ZOU Simin, WEI Xiaojun. Study on aerodynamic characteristics of vehicle-bridge system considering mutual aerodynamic interference between vehicles, bridges and wind barriers[J]. Journal of the China railway society, 2025, 47(6): 188-195.
- [10] ZHANG L, GAO Y, LIN T T, et al. Comparative analysis of crosswind influence on aerodynamic characteristics of superconducting and normal-conducting high-speed maglev

- trains[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2025, 265: 106182.
- [11]周丹, 陈恺岚, 冯吉琦, 等. 弧形峡谷加速效应对桥上高速列车大风运行安全的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(12): 5338-5352.
- ZHOU Dan, CHEN Kailan, FENG Jiqi, et al. Impact of arc-shaped canyon wind acceleration effects on operational safety of high-speed trains on bridges[J]. Journal of central south university(science and technology), 2025, 56(12): 5338-5352.
- [12]王红, 王家琪, 谢红太, 等. 横风环境下高速列车过路堤风阻制动气动特性研究[J]. 振动与冲击, 2026, 45(1): 225-236.
- WANG Hong, WANG Jiaqi, XIE Hongtai, et al. Aerodynamic characteristics of aerodynamic braking for high-speed trains passing on embankments in crosswind environment [J]. Journal of vibration and shock, 2026, 45(1): 225-236.
- [13]潘逸鸣, 李宗澎, 王潇飞, 等. 侧轨高度对横风条件下高温超导高速磁悬浮列车气动特性的影响(英文) [J]. Journal of Zhejiang university-science A, 2025, 26(10): 983-997.
- PAN Yiming, LI Zongpeng, WANG Xiaofei, et al. Influence of side rail height on aerodynamic characteristics of high-temperature superconducting high-speed maglev trains under crosswind conditions(English) [J]. Journal of Zhejiang university-science A, 2025, 26(10): 983-997.
- [14]BIAO L, CUNYAN J, LU W, et al. A parametric study of the effect of building layout on wind flow over an urban area [J]. Building and environment, 2019, 160: 106160.
- [15]杨伟超, 周上淇, 王剑, 等. 考虑双峰地形狭管风效应的高速列车气动性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(7): 3050-3063.
- YANG Weichao, ZHOU Shangqi, WANG Jian, et al. Study on aerodynamic performance of high-speed trains considering the venturi wind effect in bimodal terrain[J]. Journal of central south university(science and technology), 2025, 56(7): 3050-3063.
- [16]高书萌, 苏杰, 尹海伟, 等. 基于计算流体力学和电路理论的城市通风廊道构建: 以南京市中心城区为例[J]. 应用生态学报, 2026, 37(3): 707-717.
- GAO Shumeng, SU Jie, YIN Haiwei, et al. Construction of urban ventilation corridor based on computational fluid dynamics and circuit theory: a case study of Nanjing central urban area[J]. Chinese journal of applied ecology, 2026, 37(3): 707-717.

Aerodynamic effects analysis for high-speed maglev trains in wind and urban environments

WANG Xi^{1,2}, MAO Jianfeng^{1,2}, LIU Yikang³, YU Zhiwu^{1,2}, SHEN Mingzhe^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Changsha, Hunan 410075, China;

3. Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: With the expanding application of maglev trains in urban areas, aerodynamic environments under the coupled effects of complex building clusters and crosswinds have become a key factor restricting their operational safety and stability. However, previous studies were largely based on idealized or simplified building simulations, which fail to reflect real urban wind-field characteristics. In this study, a three-dimensional numerical model was developed to simulate the crosswind-urban building cluster-vehicle/bridge system, based on a typical elevated section of the Shanghai maglev demonstration line. Using large eddy simulations, the study explored how building clusters and wind direction angles alter urban wind fields, and in turn affect the aerodynamic characteristics of maglev trains; subsequently analyzed aerodynamic load characteristics, surface pressure and flow-field structural features on operating trains. Results are as follows. The acceleration effect caused by building gaps and urban roads significantly intensifies fluctuations in aerodynamic loads on the trains. Aerodynamic loads increase markedly with wind direction angle, peaking at 90°, where loads are 1.86 and 1.20 times those at 45° and 60°, respectively. Aerodynamic loads are asymmetrically distributed among cars, with the head car exhibiting the most intense load response. In urban intersection sections, peak surface pressure on the windward side is 1.07 and 1.52 times that in building sections. Persistent near-field wake vortex structures lead to increased aerodynamic pressure on the tail car. The coupling of building clusters and crosswinds alters the evolution of vortex structures in urban wind fields and thus affects train aerodynamic loads. These research results provide references for ensuring the operational safety of urban maglev trains, identifying sections with hazardous wind environments, and optimizing route selection.

Keywords: maglev train; urban building cluster; crosswind effect; aerodynamic load; numerical simulation