文章编号:1673-0291(2026)04-0042-13 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20240131

随机风作用下的高速列车气动特性研究

毛 军[1],陈明杲[2a],田 放[1],孙丽霞[2b],王友彪[2b]
(1.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044;2.中国铁道科学研究院集团有限公司
a.节能环保劳卫研究所,b.铁道科学技术研究发展中心,北京 100081)

摘 要:针对高速列车在大风环境下运行安全受环境风脉动性与随机性影响的问题,开展随机风场下高速列车气动特性研究.首先,基于现场实测风速数据,构建更贴近大气紊流特征的随机风模型并验证其有效性;然后,建立高速列车在随机风与平均风两种风场下的数值分析模型,通过设置合理的物理模型、边界条件及求解器,捕捉高速列车绕流流场发展过程与气动荷载特征;最后,开展实例分析,揭示两种风场中列车表面边界层、底部流场与尾流场的演化机理,阐明不同风场对列车气动荷载的影响规律.研究结果表明:基于功率谱拟合修正的Davenport谱,结合谐波合成法生成的风速时程曲线,可有效表征随机风的脉动性与随机性;与平均风作用相比,随机风作用下列车表面边界层、底部流场、尾流及背风侧大尺度涡结构虽存在一定相似性,但流场不稳定性显著增加,流动结构波动性增强,车体周围小尺度流动结构呈现明显的不确定性;列车车身表面压力分布呈周期性变化,各车厢气动荷载出现大幅波动,且各项气动力与气动力矩的波动程度存在差异,气动力均值增幅不超过5%,而气动力最值增幅超过50%.研究成果可为复杂风环境下高速列车的气动外形优化与运行安全控制提供理论支撑,为考虑随机风场下的极端工况的列车安全设计提供参考依据.

关键词:高速列车;随机风;气动特性;流动结构;车身表面压力
中图分类号:U266.2 **文献标志码**:A

Research on aerodynamic characteristics of high-speed trains under random wind

Mao Jun[1], *Chen Minggao*[2a], *Tian Fang*[1], *Sun Lixia*[2b], *Wang Youbiao*[2b]
(1.School of Civil and Architectural Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China; 2a. Energy Conservation and Environmental Protection Laowei Institute, 2b. Railway Science and Technology Research and Development Center, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd. Beijing 100081, China)

Abstract: To address the effects of the fluctuating and stochastic nature of ambient wind on the operational safety of high-speed trains under strong-wind conditions, this study investigates the aerodynamic characteristics of high-speed trains in a random wind field. First, a random wind model that more closely represents atmospheric turbulence is developed from field-measured wind-speed data and validated. Next, numerical models of a high-speed train in random and mean wind fields are estab-

收稿日期:2024-11-07;**修回日期**:2025-04-15
基金项目:国家自然科学基金(52172336);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023T010)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China(52172336); Science and Technology Research and Development Key Program of China State Railway Group Co., Ltd.(N2023T010)
第一作者:毛军(1966—),男,湖北荆州人,教授,博士,博士生导师.研究方向为流体力学.**email**:jmao@bjtu.edu.cn.
通信作者:陈明杲(1994—),男,山东聊城人,博士.**email**:19115002@bjtu.edu.cn.

引用格式:毛军,陈明杲,田放,等.随机风作用下的高速列车气动特性研究[J].北京交通大学学报,2026,50(4):42-54.
Mao Jun, Chen Minggao, Tian Fang, et al. Research on aerodynamic characteristics of high-speed trains under random wind[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(4): 42-54.(in Chinese)

lished. Appropriate physical models, boundary conditions, and solvers are used to capture the development of the flow field around the train and the characteristics of the aerodynamic loads. Finally, case studies are conducted to reveal the evolution of the train-surface boundary layer, underbody flow field, and wake under the two wind conditions and to clarify how the wind-field characteristics affect the aerodynamic loads. The results show that the wind-speed time history generated using harmonic synthesis and a Davenport spectrum corrected through power-spectral fitting effectively represents the fluctuating and stochastic characteristics of random wind. Compared with the mean-wind case, the random-wind case exhibits broadly similar train-surface boundary layers, underbody flow fields, wakes, and large-scale leeward vortices; however, the flow field is substantially less stable, the flow structures fluctuate more strongly, and the small-scale structures around the train exhibit pronounced uncertainty. The surface-pressure distribution varies periodically, and the aerodynamic loads on individual cars fluctuate markedly, with different degrees of fluctuation among the aerodynamic forces and moments. The mean aerodynamic forces increase by less than 5%, whereas their extreme values increase by more than 50%. These findings provide theoretical support for aerodynamic shape optimization and operational safety control of high-speed trains in complex wind environments and can inform train-safety design for extreme conditions in random wind fields.

Keywords: high-speed trains; random wind; aerodynamic characteristics; flow structure; body surface pressure

高速列车在大风条件下运行时,车身压差会使车体承受较大气动力,影响列车运行稳定性,严重时甚至引发列车脱轨或倾覆事故.大风,尤其是复杂风场,对高速列车的安全运营具有显著影响,开展相关研究的前提是明确大风风场的基本特征.大气在地表附近的风场分布通常被认为服从指数分布,目前针对大风作用下高速列车气动特性的研究,主要采用风洞试验、实车试验与数值模拟3类方法[1].

在风洞试验研究方面,文献[1-4]通过缩尺模型试验研究了横风作用下高速列车-桥梁系统的气动响应特性,分析了不同风速条件、桥隧过渡结构及线路环境对列车气动力及运行安全性的影响.文献[5]针对随机风作用下高速列车气动性能开展试验研究,揭示了随机风场中列车气动力的波动特征及变化规律.文献[6]进一步考虑非均匀横风条件,通过风洞试验分析了高速列车周围流场结构及气动力变化特征.风洞试验能够较好地反映复杂风场环境下高速列车的气动响应规律,但受限于模型缩尺效应、试验成本以及风场模拟精度,对实际线路中随机风场的动态特征及瞬态气动响应研究仍存在不足.

在实车试验研究方面,文献[7-9]基于现场测试数据研究了强风环境下高速列车运行过程中的气动力变化规律,分析了不同风速条件下列车气动力响应特征及变化趋势.文献[10]针对高速列车通过隧道口、桥隧连接段等复杂工况开展实测研究,揭示了非定常气动效应对列车运行稳定性的影响.实车试验具有较高的真实性,但由于测试环境复杂、试验周期长且成本较高,难以实现大范围、多工况条件下的系统研究.

在数值模拟研究方面,文献[11-13]采用改进的延迟分离涡模拟(Improved Delayed Detached Eddy Simulation, IDDES)、结合长短期记忆网络和高斯混合模型(Long Short-Term Memory and Gaussian Mixture Model, LSTM-GMM)等方法研究了随机风、脉动风作用下高速列车气动性能及气动力变化规律,分析了非定常风场对列车周围流场结构及气动力波动特性的影响.文献[14-16]进一步考虑典型路基结构、桥梁结构以及线路环境因素,研究了不同风场条件下高速列车气动载荷及运行安全响应.文献[17-20]针对桥梁、隧道入口、声屏障等特殊结构环境开展数值模拟研究,揭示了复杂结构条件下列车气动性能演化机制.

综上所述,国内外学者围绕横风作用下高速列车气动特性开展了大量研究,在不同风速、风向、线路结构以及车辆运行条件下的气动力变化规律方面取得了较为丰富的研究成果.然而,现有研究大多采用恒定风速描述横风作用过程,难以充分反映实际大风环境中随机风速波动以及非定常特征对高速列车气动响应的影响.因此,为进一步揭示随机风作用下高速列车气动响应机制,本文开展随机风作用下高速列车气动特性研究.通过构建随机风场模型,结合数值模拟方法,对比分析随机风场与平均风

场条件下高速列车周围流场演化特征、气动力变化规律及运行安全响应，为复杂风环境下高速铁路安全运营提供理论支撑.

1　随机风模型

本文以福厦线某段高速铁路为研究对象，沿线路布设超声波风速传感器，实时监测风速动态变化.为保障测量精度，将传感器安装于开阔无遮挡区域，规避大型建筑物、构筑物、树木等障碍物干扰；同时远离强电磁设备，降低电磁干扰对测量精度的影响.为全面刻画沿线风速分布特征，采用多测点组网监测模式，结合数据融合技术整合多源数据，提升风场分析的完整性与准确性.结合福厦线线路条件，风速传感器统一布置于距线路中心 4.6 m、高度 4.0 m 处（测点 1），具体安装位置如图 1 所示.



（a）整体视图　　（b）局部特写

图 1　风速计安装位置

Fig.1　Installation position of the anemometer

实测风速特性分析结果如图 2 所示.由图 2 可知，湍流度随平均风速增大呈降低趋势，随阵风因子增大呈升高趋势，二者呈现显著的规律性关联.

对实测风速数据开展风功率谱密度分析，并将结果与经典 Davenport 谱、Kaimal 谱对比，对比结果如图 3 所示.由图 3 可知，实测风功率谱与通用规范风谱存在明显偏差，因此需对风谱进行修正以匹配实际大气紊流特性.

本文基于卡门风谱、Davenport 相干函数和谐波合成法构建随机风场数值模拟框架.空间两点脉动风速的 Davenport 相干函数、相干衰减参数及互谱密度分别为

$$\mathrm{Coh}(r,f)=\mathrm{e}^{-F} \tag{1}$$

$$F=\frac{2f\left[C_z^2(z_1-z_2)^2+C_y^2(y_1-y_2)^2\right]^{1/2}}{U(z_1)+U(z_2)} \tag{2}$$

$$S_{(p,q)}(f)=\sqrt{S_{(p,p)}(f)S_{(q,q)}(f)}\,\mathrm{Coh}(r,f) \tag{3}$$

式中：$\mathrm{Coh}(r,f)$为空间两点脉动风速的相干函数；r为空间两点间的距离，m；f为频率，Hz；F为无量纲

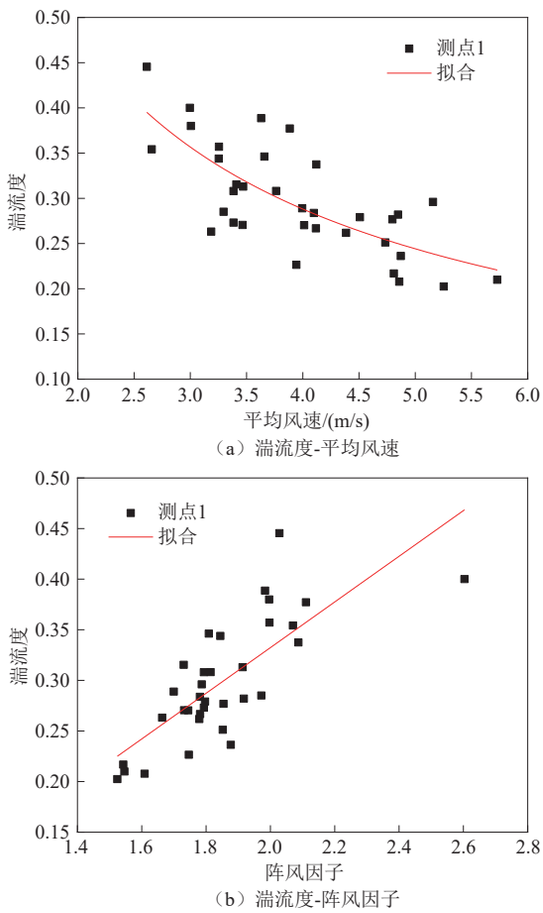


图 2　湍流度-阵风因子-平均速度的关系

Fig.2　Relationship among turbulence intensity, gust factor, and mean wind speed

相干衰减指数；C_z和C_y分别为竖向和横向相干衰减系数；z_1、z_2分别为两点的竖向坐标，m；y_1、y_2分别为两点的横向坐标，m；$U(z_1)$、$U(z_2)$分别为两点处的平均风速，m/s；$S_{(p,q)}(f)$为p、q两点的互谱密度函数，$(\mathrm{m/s})^2/\mathrm{Hz}$；$S_{(p,p)}(f)$和$S_{(q,q)}(f)$分别为$p$、$q$两点的自谱密度函数，$(\mathrm{m/s})^2/\mathrm{Hz}$；$p$、$q$为空间测点序号.

采用谐波合成法生成不同风场下的脉动风速时程.空间脉动风互谱密度矩阵的 Cholesky 分解为

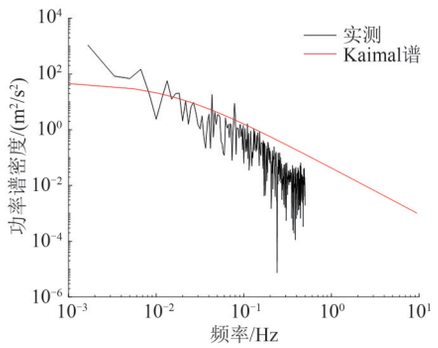
$$\boldsymbol{S}(\Omega)=\boldsymbol{H}(\Omega)\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}*}(\Omega) \tag{4}$$

式中：Ω为角频率，rad/s；$\boldsymbol{S}(\Omega)$为角频率Ω处的空间脉动风互谱密度矩阵；$\boldsymbol{H}(\Omega)$为 Cholesky 分解所得的下三角复矩阵；上标 T*表示共轭转置.

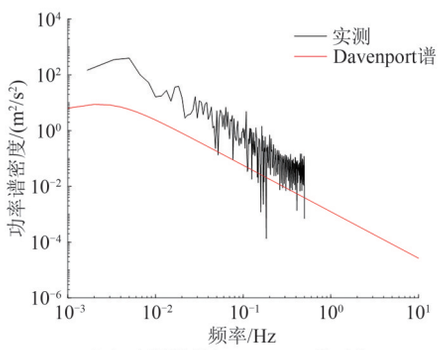
为进行谐波合成，首先选取截断角频率Ω_{u}，并将角频率区间$[0,\omega_{\mathrm{u}}]$进行等距离散.设频率分段总数为N，则角频率间隔$\Delta\Omega$为

$$\Delta\Omega=\frac{\Omega_{\mathrm{u}}}{N} \tag{5}$$

式中：Ω_{u}为截断角频率，rad/s；N为频率分段索引.设$m=1,2,\cdots,n$为矩阵列索引，n为空间测点总数；l



（a）实测数据与Kaimal谱对比



（b）实测数据与Davenport谱对比

图 3　实测数据与现有风谱对比

Fig.3　Comparison of measured data with existing wind spectra

为角频率序号，且 $l=1,2,\cdots,N$. 第 m 组第 l 个离散角频率 $\Omega_{(m,l)}$ 为

$$\Omega_{(m,l)}=(l-1)\Delta\Omega+\frac{m}{n}\Delta\Omega \quad m=1,2,\cdots,n;\ l=1,2,\cdots,N \tag{6}$$

复矩阵元素 $H_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})$ 的相位角 $\theta_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})$ 为

$$\theta_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})=\arctan\frac{\mathrm{Im}\left[H_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})\right]}{\mathrm{Re}\left[H_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})\right]} \tag{7}$$

式中：$\mathrm{Im}[H_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})]$ 和 $\mathrm{Re}[H_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})]$ 分别表示复数的虚部和实部. 在上述频率离散和相位处理基础上，理论上，当 N 趋于无穷大时，第 p 个空间点的随机脉动风速时程 $f_p(t)$ 可表示为

$$f_p(t)=\sqrt{2}\sum_{m=1}^{p}\sum_{l=1}^{N}\left|H_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})\right|\sqrt{\Delta\Omega}\cos\left[\Omega_{(m,l)}t-\theta_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})+\varphi_{(m,l)}\right] \quad p=1,2,\cdots,n \tag{8}$$

式中：t 为时间，s；$H_{(p,m)}(\Omega_{(m,l)})$ 为下三角复矩阵 $\boldsymbol{H}(\Omega_{(m,l)})$ 的第 m 列元素；$\varphi_{(m,l)}$ 为 $[0,2\pi]$ 内相互独立且服从均匀分布的随机相位角，rad.

由角频率间隔 $\Delta\Omega$ 可确定模拟时程的基本周期 T_0 为

$$T_0=n\frac{2\pi}{\Delta\Omega} \tag{9}$$

式中：T_0 为模拟周期，s. 采用上述随机风生成方法对实测数据进行功率谱拟合，修正后的 Davenport 风速谱为

$$\begin{cases} S_{\mathrm{w}}(f)=156.4K_{\mathrm{D}}V_{10}^{2}\dfrac{x^{2}}{f(1+x^{2})^{4/3}} \\ x=\dfrac{1\,200f}{V_{10}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$S_{\mathrm{w}}(f)$ 为风速功率谱密度，$(\mathrm{m/s})^2/\mathrm{Hz}$；$x$ 为无量纲频率；V_{10} 为高度 10 m 处的平均风速，m/s；K_{D} 为 Davenport 谱经验系数，取 0.4. 利用谐波合成法生成修正风谱表征的随机风速时程，并与平均风进行对比，对比结果如图 4 所示. 由图 4 可知，平均风速为 10 m/s，随机风速围绕 10 m/s 波动.

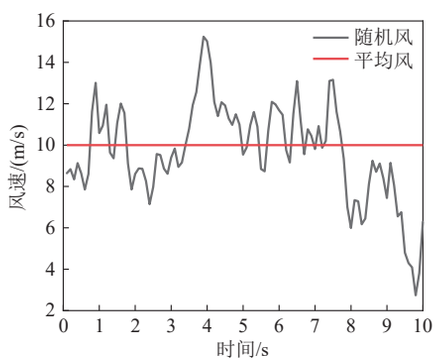


图 4　平均风与随机风对比

Fig.4　Comparison of mean and random wind

2　计算模型

2.1　空气动力学理论

列车空气动力学的数值仿真分析隶属于计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）领域，这一过程涉及运用模拟算法来求解表征流体运动状态的方程组，进而提取流场的相关数据. 相较于实体试验，数值仿真不受限于既定的试验条件，能够灵活地针对各种现象或条件进行独立或组合式的探讨，可有效应对列车空气动力学领域的众多挑战.

2.1.1　控制方程

采用控制容积积分法对控制方程进行离散，可在离散层面保证质量、动量和能量等守恒量的守恒. 质量守恒方程为

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j}=0 \tag{11}$$

i 方向的动量守恒方程为

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_jU_i)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_{\mathrm{u}}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)+S_{\mathrm{U}}^{i} \tag{12}$$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_j h)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_h\frac{\partial h}{\partial x_j}\right)+S_h \quad (13)$$

湍动能输运方程为

$$\frac{\partial(U_i k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{C_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\nu_t\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\varepsilon \quad (14)$$

湍流耗散率输运方程为

$$\frac{\partial(U_i \varepsilon)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{C_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_1C_\mu k\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{C_2\varepsilon^2}{k} \quad (15)$$

式中：ρ为流体密度，kg/m^3；U_i、U_j分别为笛卡尔坐标i、j方向的平均速度分量，m/s；x_i、x_j分别为i、j方向的空间坐标，m；Γ_u为动量方程的有效扩散系数，kg/(m·s)；S_U^i为i方向的动量源项，N/m^3；h为比焓，J/kg；Γ_h为能量方程的有效扩散系数，kg/(m·s)；S_h为能量源项，W/m^3；k为湍动能，m^2/s^2；ε为湍流耗散率，m^2/s^3；ν为分子运动黏度，m^2/s；ν_t为湍流运动黏度，m^2/s；C_k、C_ε、C_1、C_μ和C_2均为无量纲模型常数.

2.1.2 湍流模型

列车周围流动大多属于湍流.湍流数值模拟的主要方法包括雷诺平均Navier-Stokes(Reynolds-averaged Navier-Stokes，RANS)、直接数值模拟(Direct Numerical Simulation，DNS)和大涡模拟(Large Eddy Simulation，LES)方法.在工程计算中，需要根据流动分离特征、网格分辨率和计算成本选择合适的湍流模拟方法.

RANS方法通过对瞬时控制方程进行时均化获得大尺度平均流动，但引入的雷诺应力使方程组不封闭.采用Boussinesq涡黏假设建立雷诺应力与平均速度梯度的关系，雷诺应力张量分量为

$$\tau_{ij}=-\rho\overline{u_iu_j}=\mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_t\frac{\partial U_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \quad (16)$$

式中：τ_{ij}为雷诺应力张量分量，Pa；u_iu_j为i、j方向速度脉动乘积，$\overline{u_iu_j}$表示时均速度脉动乘积，m^2/s^2；μ_t为湍流动力黏度，Pa·s；δ_{ij}为Kronecker符号，当$i=j$时取1，否则取0.

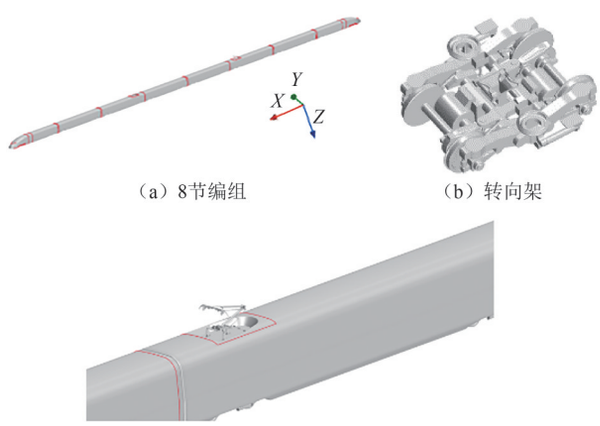
针对高速列车的大分离流动，RANS方法难以充分解析非定常分离涡，因此采用IDDES.该方法在近壁区采用RANS以控制计算成本，在远离壁面的分离流动区域采用LES以解析大尺度涡结构.基于SST k-ω模型的IDDES比耗散率输运方程为

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_j\omega)}{\partial x_j}=\gamma P_\omega-\beta\rho\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]+D_{\omega,\mathrm{DES}} \quad (17)$$

式中：ω为比耗散率，s^{-1}；γ和β为无量纲模型常数；P_ω为比耗散率生成项，kg/(m^3·s^2)；μ为分子动力黏度，Pa·s；σ_ω为ω方程的湍流普朗特数；$D_{\omega,\mathrm{DES}}$为IDDES交叉扩散项，kg/(m^3·s^2).

2.2 几何模型

高速列车具有复杂的几何结构，在大风的作用下车身表面发生流动分离，产生复杂的涡旋结构.为对大风环境下更高速度列车外流场特征进行研究，以某车型为研究对象，建立列车几何模型，如图5所示.图5中：列车为8节车厢，缩尺比为1∶1，包含受电弓和转向架，其中受电弓位于三车和六车，状态分别为降弓和升弓，转向架未作任何删减；模型的长、宽、高分别记为L、W、H；模型列车总长为209 m，宽为3.36 m，高为4.05 m.



(a) 8节编组 (b) 转向架

(c) 受电弓

图5 列车几何模型

Fig.5 Geometric model of the train

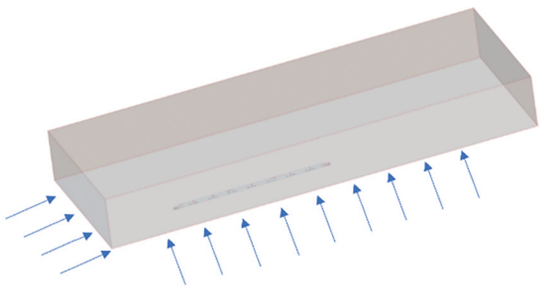
采用相对运动的方式实现列车的运动，列车在计算域中的相对位置如图6所示.图6中，为消除地面效应的影响，地面设置为滑移边界，列车表面设置为壁面，其余各面均为自由流边界.

2.3 网格划分

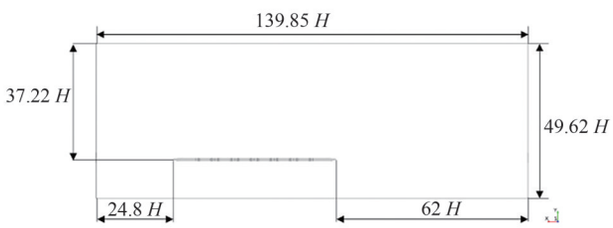
空间网格采用六面体网格进行划分，网格划分情况如表1与图7所示.列车表面设置10层边界层网格，增长比为1.2，对受电弓、车身底部及车身周围进行网格加密，网格数量为2 882万.

2.4 湍流模型

湍流模型选用基于SST k-ω湍流模型改进的延迟分离涡模拟模型，由于车速对应的马赫数大于



（a）边界设置



（b）几何尺寸

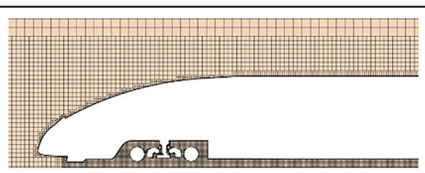
图 6　计算域设置

Fig.6　Computational-domain configuration

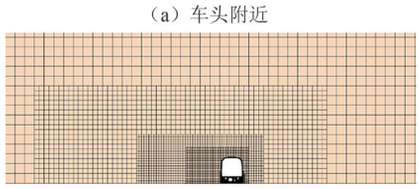
表 1　网格尺寸设置

Table 1　Grid-size settings　　m

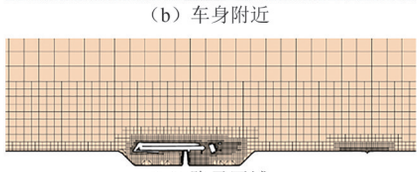
尺寸类别	计算域	转向架	受电弓	头车与尾车	底部加密	风挡
目标表面尺寸	3.20	0.050	0.025	0.10	0.05	0.025
最小表面尺寸	0.05	0.025	0.010	0.05	0.05	0.025



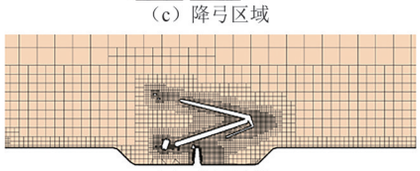
（a）车头附近



（b）车身附近



（c）降弓区域



（d）升弓区域

图 7　网格划分

Fig.7　Grid computational mesh

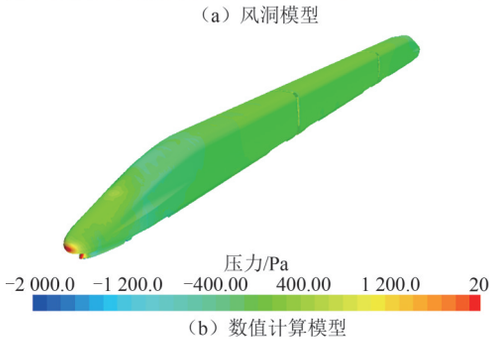
0.3 Ma,需要考虑可压缩性,因此,气体选用可压缩气体.采用有限体积法离散控制方程,用SIMPLE法耦合压力-速度场,时间离散为一阶隐式,计算时间步长为0.001 s,此时计算出来的库朗数符合数值模拟计算的范围,既可以保证计算精度,又可节约计算成本.

2.5　模型验证

为验证本文数值计算方法的准确性,采用与中国空气动力学研究开发中心风洞试验相同的1/8缩尺列车模型,如图8所示.速度入口风速为60 m/s,通过计算气动阻力系数并与试验结果对比,对数值模拟方法进行校验.



（a）风洞模型



（b）数值计算模型

图 8　风洞模型与数值计算模型

Fig.8　Wind-tunnel and numerical calculation models

本文采用数值模拟方法计算3节车厢的气动阻力系数,并与风洞试验结果进行对比,对比结果如表2所示.由表2可知,数值模拟结果与试验数据最大相对误差不超过10%,吻合良好,即可验证本文所采用的湍流模型和网格划分方法具有可靠性.

表 2　气动阻力对比

Table 2　Comparison of aerodynamic drag

车厢	试验/kN	数值模拟/kN	误差/%
头车	46.26	44.00	4.80
中车	30.36	30.00	1.18
尾车	44.26	40.00	9.60
整车	120.88	114.00	5.69

3　结果分析

3.1　流动结构分析

在列车车速为350 km/h的情况下,当高度Z分别取0.5 m、1 m、1.5 m、2 m时,随机风条件下列车车身速度分布如图9所示.定义以车头鼻尖为原点,X轴沿列车运行方向指向车尾为正方向,Z轴竖直向上为正方向,Y轴根据右手坐标系确定.由图9可知:

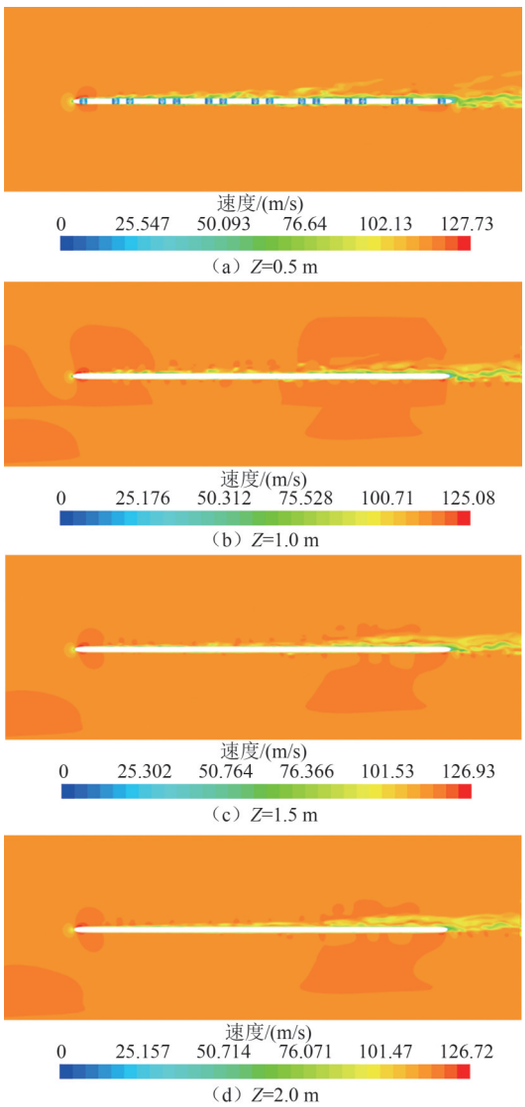


图 9 车体表面不同高度处速度云图

Fig.9 Velocity contours at different heights around the train body

列车背风侧出现了较大的速度波动，这与大风流经列车后流动分离产生的大尺度流动结构密切相关；随着高度的增加，靠近车头位置处的速度波动逐渐减小，车尾背风侧速度波动逐渐增大并向外扩展；列车的尾流交替出现涡旋，并在风场的作用下向背风侧发生偏移.

为准确识别和分析流场中的涡旋结构，建立 $Q=60/s^2$ 的等值面，如图 10 所示. 由图 10 可知：车身大尺度流动结构出现的位置与速度场产生速度波动的位置密切相关；车头附近大尺度流动结构主要出现在列车底部区域，且速度较小；车身上部区域流动分离产生的涡旋结构较底部流动结构尺度要小，但随着车身不断向后发展，并逐渐远离；列车尾部仍会出现一对交替出现的反向旋转的涡旋结构，但靠近背风侧涡旋的强度明显降低.

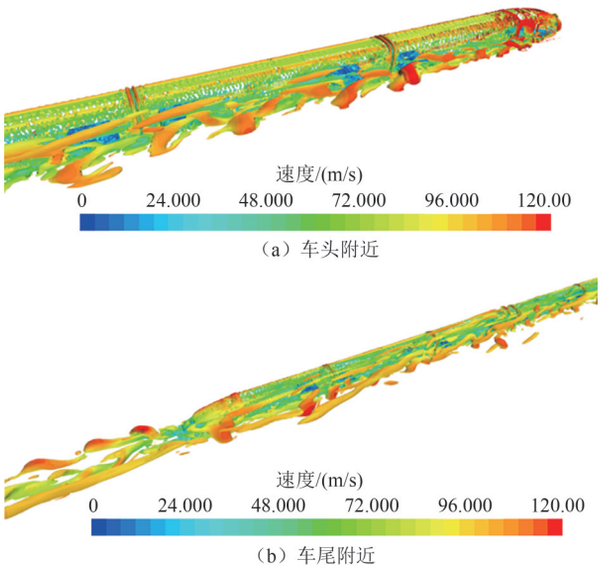


图 10 车身流动结构云图

Fig 10 Flow cloud structures around the train body

令距离列车车头的长度为 X_T，在 X_T 为 10 m、50 m、90 m、130 m、170 m、210 m 处设置监测面，得到沿车身长度方向不同截面流线图，如图 11 所示. 由图 11 可知：气流流经车身迎风侧后，沿车身表面向上向下运动，在背风侧形成逆时针旋转涡旋结构；由于采用相对运动的方式实现列车运动，合成风速与列车具有偏航角，因此随着距离车头位置的增加，涡旋结构尺度不断增大.

车体处于 X 轴不同位置 X_H 处横截面的速度云图如图 12 所示. 由图 12 可知：距离车头越远，车身边界层厚度逐渐增大，上部涡旋结构尺度越来越大；距离车头 10 m 处，列车底部区域产生大尺度涡旋结构；在距离车头 50 m 处，背风侧车身上部流动分离产生涡旋；距离车头 90 m 和 130 m 处，背风侧出现两个涡旋结构，且不断远离车身.

3.2 车体表面压力分析

为探究风场条件下车体表面压力分布特征，对典型工况下列车表面压力云图进行分析，结果如图 13 所示. 图 13 中，从上至下依次为列车背风侧、顶面与迎风侧的表面压力分布. 由图 13 可知：头车与尾车的压力梯度远大于车体中部；车体表面压力具有明显的非对称性；迎风侧与背风侧的压力分布差异显著，背风侧的负压区强度与范围均大于迎风侧；车体中部表面压力整体平稳，风挡等连接部件位置仅出现小幅压力波动，说明车体中部流场相对稳定，受风场与部件的影响较小.

车头与车尾的表面压力分布及流动结构对比如图 14 所示. 由图 14 可知：车头存在明显的滞止高压区，车尾处于尾涡分离区，整体为负压；车头表面流

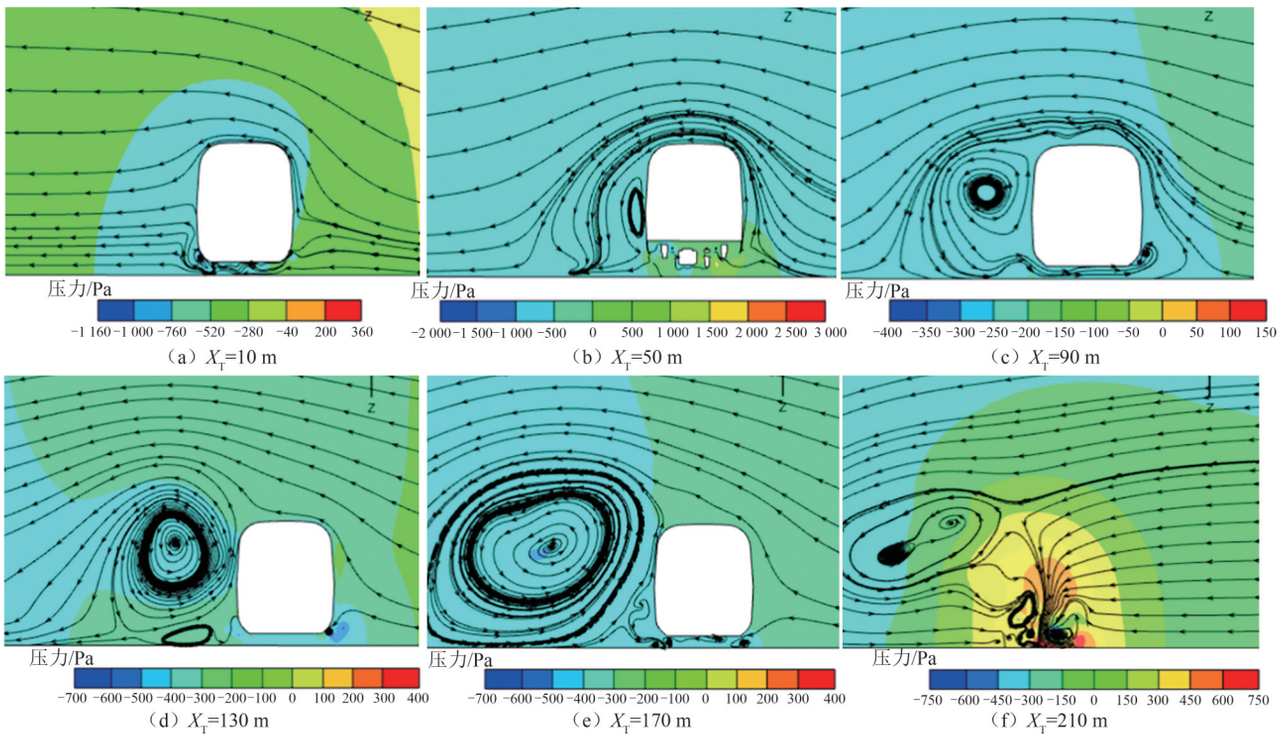


图 11　沿车身长度方向截面流线图

Fig.11　Cross-sectional streamlines at different longitudinal positions along the train

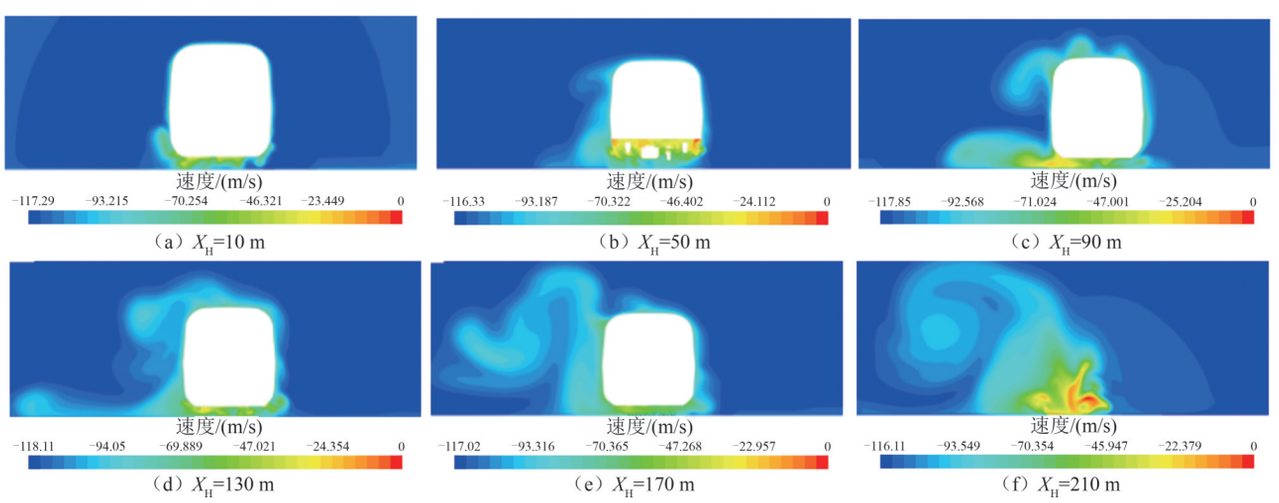


图 12　车身截面速度云图

Fig.12　Velocity contours on cross sections of the train body



图 13　不同风场条件下车身压力云图

Fig.13　Surface-pressure contours of the train body under different wind fields

线呈对称分流形态,气流沿车体向两侧与上方分离;车尾表面流线呈现向中心汇聚的特征,且分布紊乱;车头受电弓区域的压力扰动并发生流线偏移,说明受电弓会产生额外的气动荷载与流动损失.

为对比流场差异,提取列车不同位置X_L的横截面压力云图进行分析,结果如图 15 所示.由图 15 可知:车头迎风侧存在明显高压区,背风侧形成负压区;中车段背风侧逐渐发展出稳定的涡核负压区;车尾受尾涡影响,底部与背风侧压力分布趋于复杂;底部转向架附近高压与负压交替分布;背风侧涡核随车身发展.

为对比列车纵向流场特性,提取列车纵向中截面的速度、涡量与压力云图进行分析,结果如图 16 所示.由图 16 可知:头车前方气流减速、车体底部与

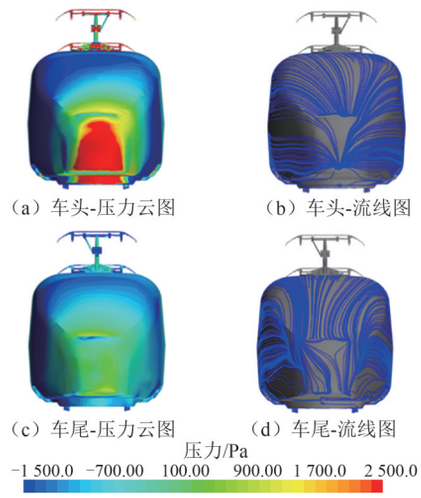


图 14 车头车尾流线图

Fig.14 Streamlines around the head and tail cars

背风侧气流加速的分布规律一致；涡量集中分布在转向架、受电弓及头尾车附近；头车鼻尖为高压区、尾车后方为低压区，车体中部压力均匀.

3.3 不同风场条件下流场对比

为对比不同风场下列车周围的涡结构特征，提取平均风与随机风场下的三维涡结构等值面进行分析，结果如图 17 所示. 由图 17 可知：两种风场下，列车背风侧与底部的大尺度涡结构的整体分布规律相似，涡的主要生成位置与发展趋势未发生改变，说明风场类型不改变涡的基本形成机制；随机风场下，涡结构的形态更不规则，中小尺度涡数量明显增多，大尺度涡的完整性被破坏，脱落过程也更紊乱，这是因为随机风的脉动特性会持续扰动流场，促进大涡破碎，加剧了流场的非定常性.

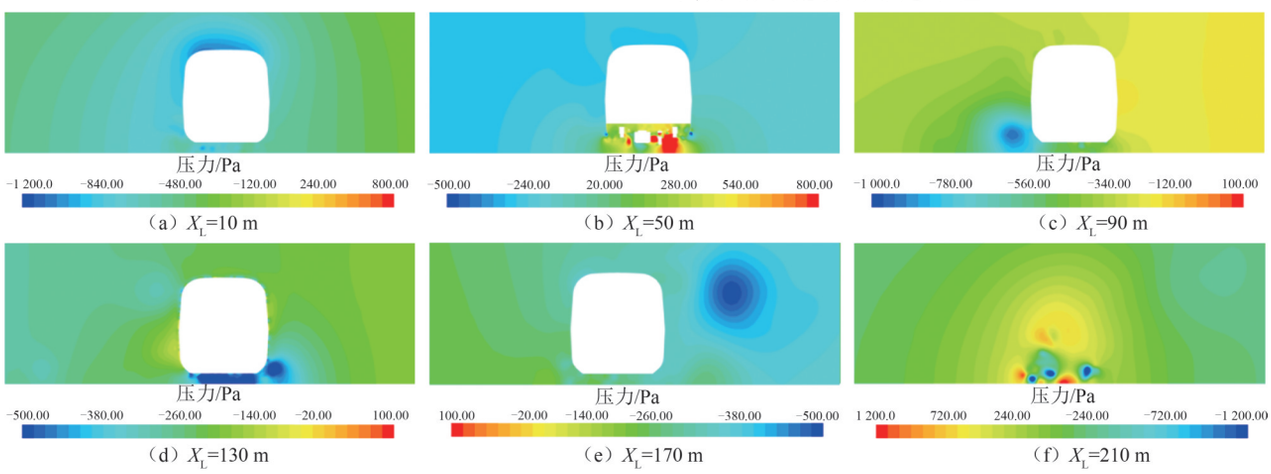


图 15 车身截面压力云图

Fig.15 Pressure contours on cross sections of the train body

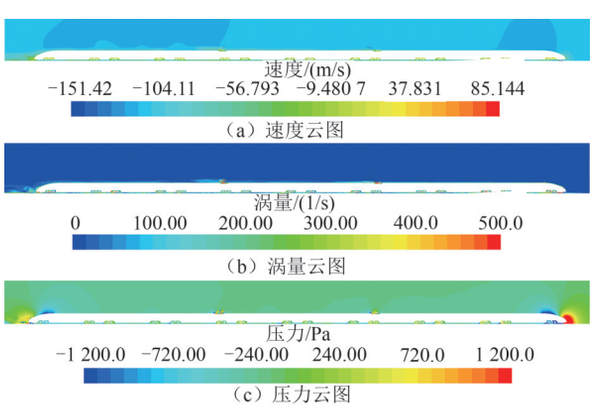


图 16 车身纵向流场云图

Fig.16 Longitudinal flow field around the train body

为对比不同工况下列车横截面的流场结构与压力分布，提取典型截面的流线与压力云图进行分析，结果如图 18 所示. 由图 18 可知：两种风场下，列车周围流场的基本形态、压力分布的整体趋势以及沿车身纵向的流场演变规律保持一致，由列车外形与来流绕流机制决定，未因风场类型发

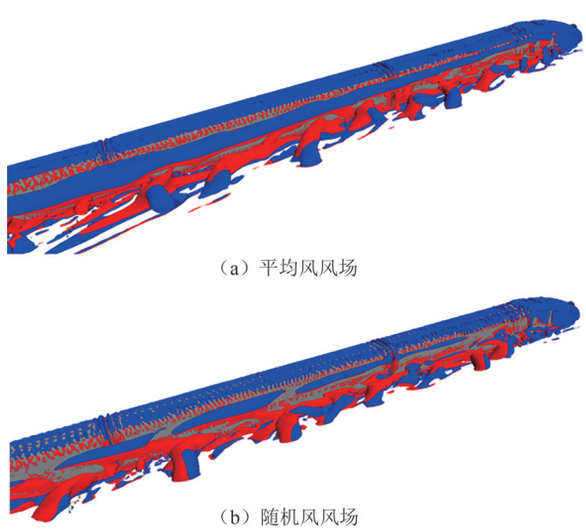


图 17 不同风场下车头附近流动结构对比

Fig.17 Flow structures near the train nose under different wind fields

生改变；平均风场中涡结构形态规则、流动分离稳定，车体表面压力分布及气动荷载的波动幅度较

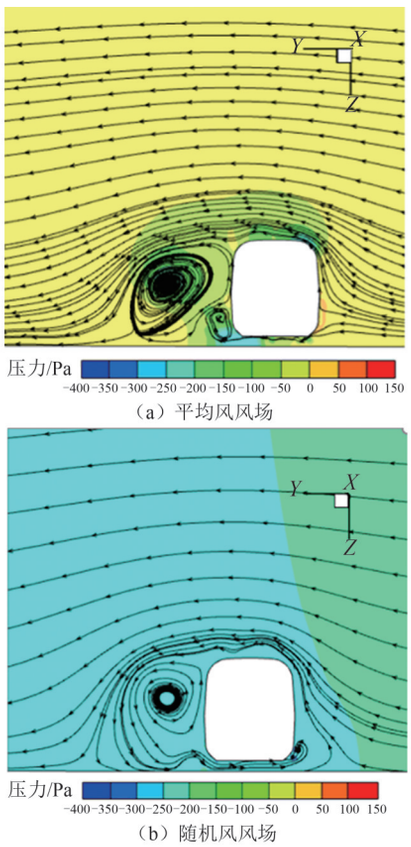


图 18　不同风场下横截面流线图对比

Fig.18　Cross-sectional streamlines under different wind fields

小;随机风场中,涡结构更紊乱、中小尺度涡增多,流动分离位置提前、强度增强,背风侧与车尾低压区的强度更高.

3.4　不同风场条件下气动力对比

为探究风场类型对列车气动荷载动态特性的影响,对比分析平均风与随机风场下列车气动力及力矩时程响应,结果如图 19 所示.图 19 中,每组曲线包含平均风与随机风两种工况.由图 19 可知:两种风场下,阻力与点头力矩的差异均较小,侧力与翻滚力矩的差异较大;在随机风场下,各曲线呈现出更剧烈、无规律的起伏变化,说明随机风的脉动特性会显著放大气动荷载的动态变化,加剧列车运行过程中的受力不稳定性.

为对比不同风场条件下列车气动荷载的平均受力特性,分析平均风与随机风场下气动力均值的差异,结果如图 20 所示.由图 20 可知:两种风场下,各气动荷载均值的整体变化趋势一致,说明风场类型未改变列车气动荷载的平均分布规律,荷载均值由列车流场的绕流特性决定.

为探究风场类型对列车气动荷载最值特性的影响,对比分析平均风与随机风场下的气动力及力矩最值变化规律,结果如图 21 所示.由图 21 可知:两种风场下,各气动荷载的最值空间分布趋势整体一致,头车与尾车最值大、中车受力最值小;阻力、点头力矩的最值在两种风场下差异较小,其余气动荷载的最值差异显著;随机风场下的载荷最大值更高、最小值更低,波动范围显著扩大,这表明风场的脉动特征

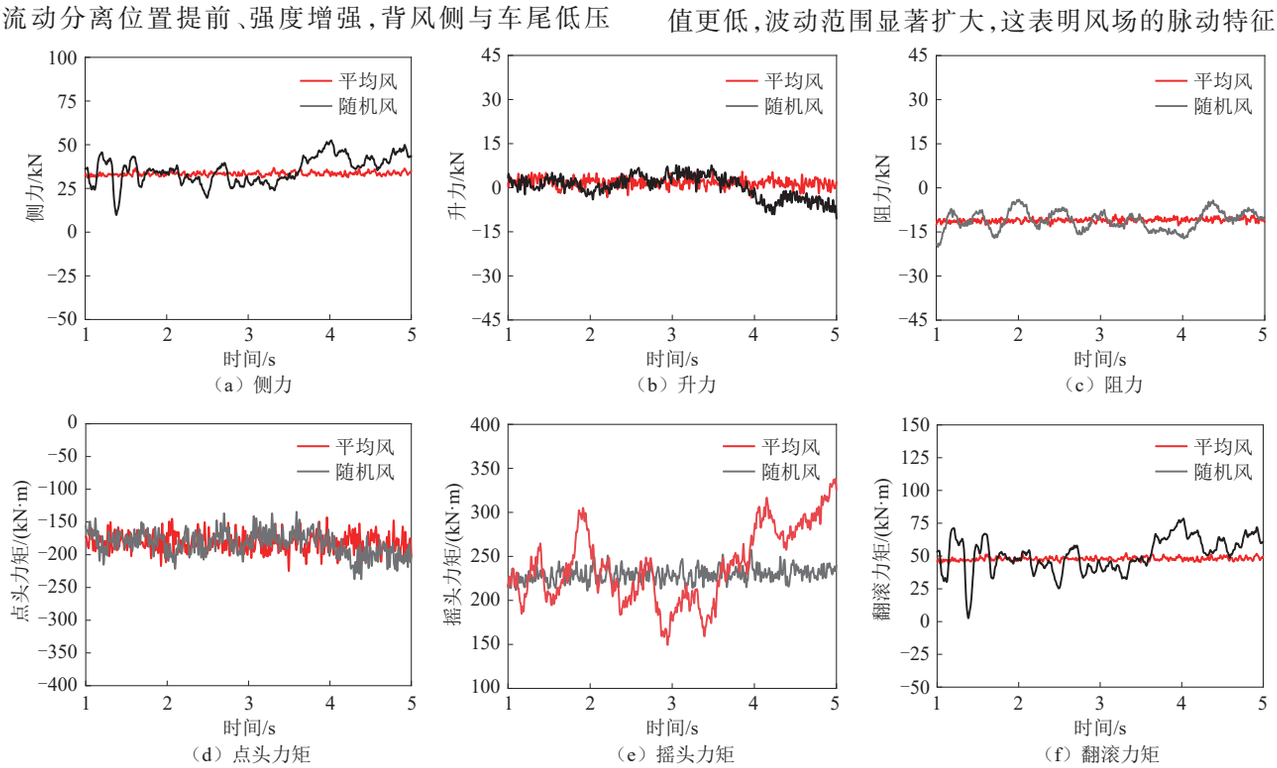


图 19　不同风场条件下气动力时程对比

Fig.19　Time histories of aerodynamic loads under different wind fields

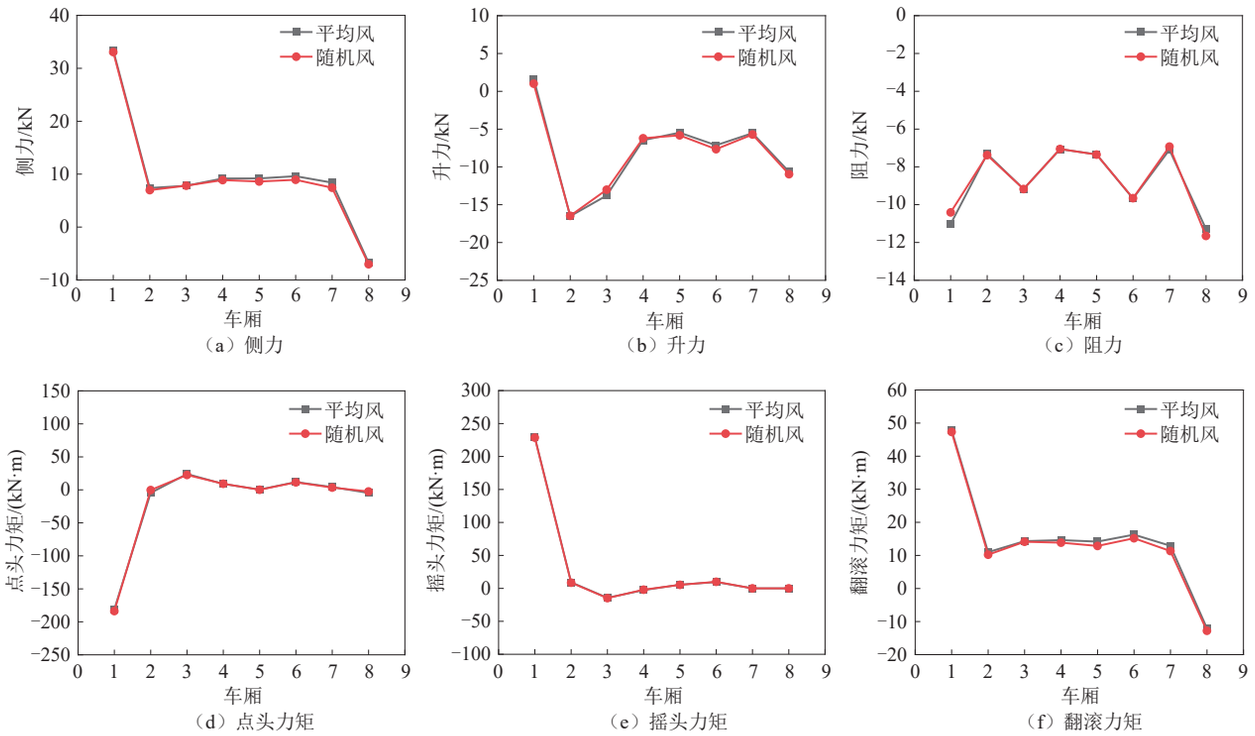


图 20　不同风场条件下气动力均值对比

Fig.20　Mean aerodynamic loads under different wind fields

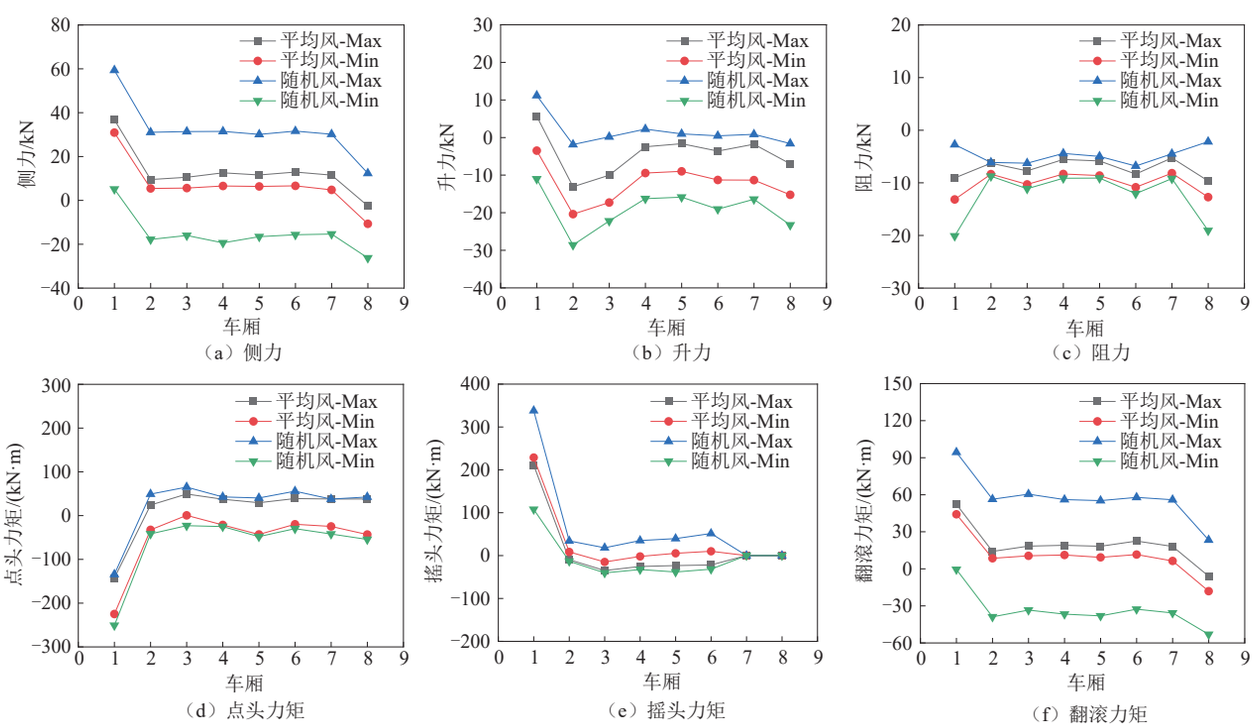


图 21　不同风场条件下气动力最值对比

Fig.21　Extreme aerodynamic loads under different wind fields

会显著放大气动荷载的最值水平，增大列车运行过程中的受力波动幅度.

4　结论

通过对实测风速数据进行分析，修正了原有风谱，提出了更接近大气紊流的随机风模型，并利用谐波合成法生成随机风数据作为边界条件进行了列车气动特性数值模拟，从流动结构、表面压力、气动荷载等方面分析了随机风和平均风条件下的差异.结论如下：

1）湍流强度随着平均风速的增大而降低,随着阵风因子的增大而增大.通过功率谱拟合得到修正的Davenport谱并使用谐波合成法生成随机风曲线可以更好地表征自然风.

2）随机风与平均风作用下的大尺度流动结构保持一致,车身周围小尺度流动结构有显著差异.说明在宏观层面上,两种风场对流动结构的影响是相似的,因此在设计阶段,可以采用平均风场的结果来优化列车的气动外形.但在微观层面,车体的局部结构对风场的扰动是不容忽视的.

3）随机风条件下,风速不变时,随着车速的提高,车身截面速度增加,增幅在15%左右,背风侧涡旋沿横向发展受到一定抑制,尾部背风侧负压增大,车头车尾正压区增大.横风风速影响车身背风侧涡旋结构分布,风速增大迎风侧压力增大,列车背风侧负压出现位置与大尺度流动结构密切相关.

4）随机风与平均风作用下,各节车厢侧力、升力、点头力矩、摇头力矩、翻滚力矩的时程曲线有显著差异,这是由随机风的波动性和不确定性导致的,但阻力的时程曲线在两种风场下几乎重合.

5）随机风和平均风风场作用下,列车各节车厢气动力均值差异较小,变化幅度在5%以内,气动力最值存在较大差异,变化幅度超过50%,并且不论车厢位置,随机风作用下的气动力最值均大于平均风作用下的最值.

本文基于实测风速数据建立了修正的随机风模型,并分析了随机风与平均风作用下列车流场结构及气动力响应差异.然而,实际运行环境中的风场具有更强的复杂性和非平稳性,后续研究仍需进一步深入.一方面,可结合更多线路实测风速数据,考虑不同地形、季节及气候条件对风场特性的影响,进一步完善随机风谱模型,提高随机风场模拟的准确性和适用范围;另一方面,可进一步考虑列车运行过程中风场与车辆运动的耦合作用,开展随机风环境下高速列车气动性能与车辆动力响应的联合分析,揭示随机气动力波动对运行稳定性的影响机制.此外,还需结合线路条件、车辆结构参数以及安全评价指标,建立基于随机风气动力特征的高速列车运行风险评估方法,为大风环境下高速铁路限速标准优化和安全运营保障提供理论依据.

参考文献(References):

[1] 郭文华,洪新民,陈春霞.侧风下高铁列车交会运行时车-桥耦合振动[J].中国铁道科学,2020,41(4):48－56.
Guo Wenhua, Hong Xinmin, Chen Chunxia. Coupled vibration of train and bridge under high-speed trains passing each other in crosswind[J]. China Railway Science, 2020, 41(4): 48－56.(in Chinese)

[2] Xue R D, Chen G, Xiong X H. Aerodynamic characteristics of the train under real wind gust[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(9): 095112.

[3] Ouyang D, Yang W, Deng E, et al. Comparison of aerodynamic performance of moving train model at bridge-tunnel section in wind tunnel with or without tunnel portal[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 135: 105030.

[4] Tang L, He X, Yan L, et al. Experimental study of aerodynamic characteristics of high-speed train on bridge-tunnel junctions under crosswinds[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(2): 613－624.

[5] Liu R, Yin Z Q, Chen G. High-speed train running safety under random wind effect[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2021, 14(4): 32－39.

[6] Yu K, He X, Cai C, et al. Aerodynamic characteristics of trains on a viaduct with non-uniform cross-section under crosswinds by wind tunnel tests[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(9): 1769－1781.

[7] 刘金明,高鸿瑞,刘堂红.大风环境下列车气动载荷变化规律实车试验研究[J].中国铁道科学,2022,43(6):131－139.
Liu Jinming, Gao Hongrui, Liu Tanghong. Full-scale test on variation laws of train aerodynamic load under strong winds[J]. China Railway Science, 2022, 43(6): 131－139.(in Chinese)

[8] 李玉学,陈玄烨.列车运行致高速铁路全封闭声屏障气动荷载研究[J].铁道建筑,2023,63(6):81－88.
Li Yuxue, Chen Xuanye. Study on aerodynamic load of fully-enclosed sound barrier of high speed railway caused by train running[J]. Railway Engineering, 2023, 63(6): 81－88.(in Chinese)

[9] 王磊,谭忠盛,张传凯,等.横风下高速列车在隧道洞口交会非定常气动效应[J].北京交通大学学报,2023,47(6):110－119.
Wang Lei, Tan Zhongsheng, Zhang Chuankai, et al. Unsteady aerodynamic effects of high-speed trains intersection at tunnel entrance under crosswind[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(6): 110－119.(in Chinese)

[10] Cardona J L, Dabiri J O. Wind speed inference from environmental flow-structure interactions. Part 2. Leveraging unsteady kinematics[J]. Flow, 2022, 2: E1.

[11] 赵伦,邓锷,杨伟超,等.路堑过渡段对高速列车气动荷载的影响:基于IDDES方法[J].Journal of Central South University, 2024, 31(3): 989－1002.

Zhao Lun, Deng E, Yang Weichao, et al. Unraveling the impact of cutting transition section on the aerodynamic loads of high-speed trains: Utilizing the IDDES approach[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(3): 989－1002. (in Chinese)

[12] 毛军, 郗艳红, 杨国伟. 侧风风场特征对高速列车气动性能作用的研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 22－30.
Mao Jun, Xi Yanhong, Yang Guowei. Research on influence of characteristics of cross wind field on aerodynamic performance of a high-speed train[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 22－30. (in Chinese)

[13] 敬海泉, 钟仁东, 何旭辉, 等. 基于LSTM-GMM模型的大风多级预警方法[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(3): 221－228.
Jing Haiquan, Zhong Rendong, He Xuhui, et al. Multi-level early warning method for gale based on LSTM-GMM model[J]. China Railway Science, 2023, 44(3): 221－228. (in Chinese)

[14] 张业,孙振旭,姚永芳,等.典型路基结构对高速列车横风气动特性影响分析[J].机械工程学报,2018,54(4): 186－195.
Zhang Ye, Sun Zhenxu, Yao Yongfang, et al. Influence of typical subgrade structures on aerodynamic characteristics of high speed trains in cross wind conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4):186－195. (in Chinese)

[15] 邓锷, 杨伟超, 张平平. 横风下高速列车突入隧道时气动荷载冲击效应[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(10): 130－138.
Deng E, Yang Weichao, Zhang Pingping. Impact effect of aerodynamic loads on high-speed trains when entering into tunnel under crosswinds[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(10): 130－138. (in Chinese)

[16] 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. (in Chinese)

[17] 张洁, 余越, 张亮, 等. 脉动风场下二维高速列车/桥梁气动特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(8): 3026－3037.
Zhang Jie, Yu Yue, Zhang Liang, et al. Study on aerodynamic characteristics of a two-dimensional high-speed train/bridge model under a turbulent wind profile[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(8): 3026－3037. (in Chinese)

[18] 杜礼明, 章芝霖, 张文岚, 等. 随机侧风下桥塔区域中高速列车气动特性分析[J]. 大连交通大学学报, 2023, 44(2): 28－34.
Du Liming, Zhang Zhilin, Zhang Wenlan, et al. Aerodynamic characteristics of high speed train in bridge tower under random crosswind[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2023, 44(2): 28－34. (in Chinese)

[19] 陈宁,游星呈,汪维安,等. 突变阵风对列车动力响应及行车安全性的影响[J]. 工程力学,2023,40(8):224－234.
Chen Ning, You Xingcheng, Wang Wei'an, et al. Effect of sudden gust on train dynamic response and safety [J]. Engineering Mechanics,2023,40(8):224－234. (in Chinese)

[20] 梁庆庆,左海平,易斌. 利用非定常风的桥上列车风致平稳性分析[J]. 机械设计与制造,2025(1):380－384.
Liang Qingqing, Zuo Haiping, Yi Bin. Wind stability analysis of train on bridge using unsteady wind [J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(1): 380－384. (in Chinese)