

U 型轨高对超导磁浮列车明线运行的气动性能影响

熊小慧^{1,2,3}, 刘蕊^{1,2,3}, 陈波^{1,2,3}, 陈光^{1,2,3†}

- (1. 中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室, 湖南 长沙 410075;
2. 中南大学 轨道交通安全关键技术国际合作联合实验室, 湖南 长沙 410075;
3. 中南大学 轨道交通列车安全保障技术国家地方联合工程研究中心, 湖南 长沙 410075)

摘 要:为探究 U 型轨高(0、1.5 和 3 m)对超导电动悬浮(EDS)磁浮车辆明线运行空气动力学性能的影响,本文采用 1:25 缩比的两车编组超导磁浮列车模型开展数值模拟.数值计算采用基于 SST $k-\omega$ 框架的改进延迟分离涡模拟(improved delayed detached eddy simulation, IDDES)方法作为湍流模型,分析了列车及轨道结构周围的流场特性,并通过风洞试验验证了数值模拟方法的准确性.结果表明:当 U 型轨高由 0 m 增加至 1.5 m 时,头车和尾车的阻力系数分别显著增加 40% 和 24.6%,且升力特性由头车为负、尾车为正转变为头车为正、尾车为负;当 U 型轨高进一步增加至 3 m 时,头车阻力有所减小,而其升力系数骤降 73.7%.随着 U 型轨高的增加,列车顶部流线型区域的负压值逐渐增大,顶部风挡附近的压力脉动逐渐减小,而车体两侧及底部的压力脉动显著增强.涡核位置在展向和垂向上均逐渐远离列车表面,并逐步脱离车体,同时列车周围流场中的湍动能逐渐减小.此外,随着气流向下游发展,尾流速度逐渐降低,且 U 型轨高为 3 m 时尾流速度最小,表明较高的 U 型侧轨能够抑制低速涡流的形成,从而使尾流速度分布更加均匀.

关键词:磁浮车辆;空气动力学;数值模拟;湍流模型

中图分类号:U271.91

文献标志码:A

Influence of U-shaped rail height on the aerodynamic performance of superconducting maglev train operating in open air

XIONG Xiaohui^{1,2,3}, LIU Rui^{1,2,3}, CHEN Bo^{1,2,3}, CHEN Guang^{1,2,3†}

- (1. Key Laboratory of Traffic Safety on Track of Ministry Education, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Joint International Research Laboratory of Key Technology for Rail Traffic Safety, Central South University, Changsha 410075, China;
3. National and Local Joint Engineering Research Center of Safety Technology for Rail Vehicle, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To investigate the influence of U-shaped rail height (0, 1.5 and 3 m) on the aerodynamic performance of superconducting electrodynamic suspension (EDS) maglev vehicles operating in open air, numerical simulations were conducted using a 1:25 scaled two-car formation model. The improved delayed detached eddy

* 收稿日期:2025-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52402458), National Natural Science Foundation of China(52402458)

作者简介:熊小慧(1978—), 男, 湖北天门人, 中南大学教授, 工学博士

† 通信联系人, E-mail:gszxcg@csu.edu.cn

simulation (IDDES) method was adopted as the turbulence model, which is based on the SST $k-\omega$ framework. The flow field characteristics around both the train and the track structure were analyzed, and the accuracy of the numerical methodology was validated through wind tunnel experiments. The results show that as the U-shaped rail height increases from 0 m to 1.5 m, the drag coefficients of the head and tail cars increase significantly by 40% and 24.6%, respectively, while the lift characteristics change from a negative-positive configuration to a positive-negative configuration. When the U-shaped rail height is further increased to 3 m, the drag of the head car decreases, whereas its lift coefficients decreases sharply by 73.7%. With increasing U-shaped rail height, the negative pressure in the streamlined region of the train roof progressively intensifies, while pressure fluctuations near the roof windshield gradually attenuate. In contrast, pressure pulsations along both sides and the underside of the train body increase markedly. The vortex cores move away from the train surface in both the spanwise and vertical directions and gradually detach from the car body, accompanied by a reduction in turbulent kinetic energy in the flow field around the train. Additionally, as the airflow develops downstream, the wake velocity gradually decreases, with the minimum wake velocity occurring at a U-shaped rail height of 3 m. This indicates that higher U-shaped side rails inhibit the formation of low-speed vortices, resulting in a more uniform wake velocity distribution.

Key words: maglev vehicle; aerodynamics; numerical simulation; turbulence model

我国幅员辽阔、人口众多,中长距离客运市场潜力巨大,人员快速流动的交通需求不能完全依赖高速铁路和航空运输,迫切需要建设与发展 and 高速客运需求相适应的、可持续发展的高速交通,高速磁浮列车正好与此契合^[1-3]. 国务院印发的《交通强国建设纲要》明确提出了合理统筹安排时速 600 km 级高速磁浮系统技术储备研发^[4]. 高速磁浮交通作为一种新型轨道交通,凭借其显著的速度优势和环保特性,不仅能够填补速度断层,增加交通方式的选择多样性,还能进一步完善现代化综合交通运输体系,为乘客提供更加便捷、高效的出行体验^[5-8].

磁浮列车由于没有轮轨接触,其气动阻力在高速行驶时占据了主导地位,特别是列车在以 600 km/h 速度在明线上高速运行时,空气阻力几乎占据了总阻力的 90%^[9-10]. 同时,其引发的横风效应、会车效应和隧道效应等一系列空气动力学问题也愈发显著^[11-13]. 鉴于此,亟须针对高速磁浮列车的空气动力学关键问题展开深入研究. ZHOU 等^[14]采用改进的延迟分离涡模拟(improved delayed detached eddy simulation, IDDES)探讨了高速磁浮列车周围涡旋的演化过程,观察到列车非流线型区域存在反向旋转大涡导致边界层增厚,在裙板、车底与轨道间等狭小空间内产生了高强度涡,同时其尾流中涡旋具有复杂的频域分布特性. 杨鹏等^[15]基于三维非定常可压缩 N-S 方程及 SST $k-\omega$ 湍流模型,探明了不同线间

距下 600 km/h 磁浮列车明线交会时的气动特性,发现线间距增大能显著减小列车交会时的流场速度、压力及压力波幅值,并缓解列车侧向力. ZHU 等^[16]研究了不同侧风速下高速磁浮列车板式制动过程中的非定常气动特性,发现侧风显著影响制动板及头尾车的气动阻力峰值与波动,其中 20 m/s 侧风下,头车气动阻力峰值减小 43%,尾车则增大约 1.1 倍. 孟石等^[17]采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型探讨了轨道间隙对高速磁浮列车气动性能的影响,发现轨道间隙的增大会改变列车与轨道间的气流速度,在无风条件下导致头车升力减小而尾车升力增大,而在横风条件下则会使头尾车升力均减小. 蔺童童等^[18]采用重叠网格方法,探索了不同拱形结构(单拱、双拱、三拱)对时速 600 km 磁浮列车与隧道耦合气动特性的影响,发现拱形结构的增加能显著改善气动特性,减小隧道内初始压缩波及隧道出口微气压波幅值,并均衡头尾车气动升力分配. 周丹等^[19]采用基于 SST $k-\omega$ 双方程的 IDDES 湍流模型进行模拟,研究表明,在高速磁浮列车流线型部位设置仿生球体结构,能有效降低尾流流速和强度,约束尾涡发展,并延缓湍流猝发;其中凹坑形态的球体结构相比凸包形态在削弱尾流强度、增强列车风吸附能力方面表现更佳. HUANG 等^[20]采用 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型,探讨了高速磁浮列车穿越隧道时引起的压力波影响,发现列车及隧道表面压力、初始压缩波梯度

及微压波振幅均与列车速度呈幂律关系.戴志远等^[21]通过数值模拟和风洞试验数据对比,探讨了高速磁浮列车尾车气动升力特性,并加装气动翼以改善其性能,发现安装两个 12.5° 气动翼时尾车气动升力减小4.6%,而整车阻力仅增加1.4%,表现出相对更优的气动性能.李一凡等^[22]提出基于SST $k-\omega$ 湍流模型,研究了板式、短楔形、长楔形三种导流装置对列车气动特性的影响,得出长楔形导流装置减阻降升效果最佳,整车气动阻力减小3.6%,头车气动升力降低40.6%,头车点头力矩减少80.3%.HUANG等^[23]研究了不同编组长度高速磁浮列车在侧风作用下的气动特性,发现编组长度对列车头车和中间车的气动性能影响较小,但对于尾车,8节编组相较于3车编组,侧向力系数和升力系数分别降低了27.77%和18.29%.杨永刚等^[24]研究了高速磁浮列车明线非定常气动性能,分析了列车流场结构及气动力的时域、频域特性,发现气动力呈周期性波动,各节车气动升力的功率谱密度频率主要集中在0~20 Hz范围内.

根据前人的研究,对于时速600 km磁浮列车气动特性的研究大多集中于常导式磁浮列车,而对于超导磁浮列车的相关研究则相对匮乏.与常导式磁悬浮列车不同,超导磁浮列车采用的是U型轨道结

构,导致车体与轨道之间形成了狭窄的气隙流场,因此超导磁浮列车很有可能表现出不同于常导磁浮列车的气动特征.鉴于此,本文研究U型轨道侧轨高度对超导磁浮列车在明线运行条件下气动性能的影响,分析了列车周围的气动载荷分布、压力场特性、速度分布以及流场的演变规律,旨在为U型轨道结构的设计优化提供参考.

1 数值模拟方法

1.1 几何模型

本研究以1:25缩比的超导电动磁浮列车作为计算模型,由头车和尾车2节编组列车组成.同时,将2节车的流线型区域进行独立界定,以明确区分流线型区域与等截面车身区域周围流场的差异.在保证计算结果可靠的前提下,忽略了部分车体外部细微结构.如图1所示,在全尺寸比例下,列车车高 $H=3.33$ m,列车车长 $L=59.33$ m(每节车均为29.67 m),列车宽度 $W=3.16$ m,横断面面积为 9.5 m².本文研究的3种U型轨道的侧轨厚度均为0.25 m,内侧宽度均为3.3 m,列车底部与轨道的间隙均为0.1 m,3种工况下的侧轨高度分别为0、1.5、3 m,将这3种工况分别定义为case1、case2、case3.

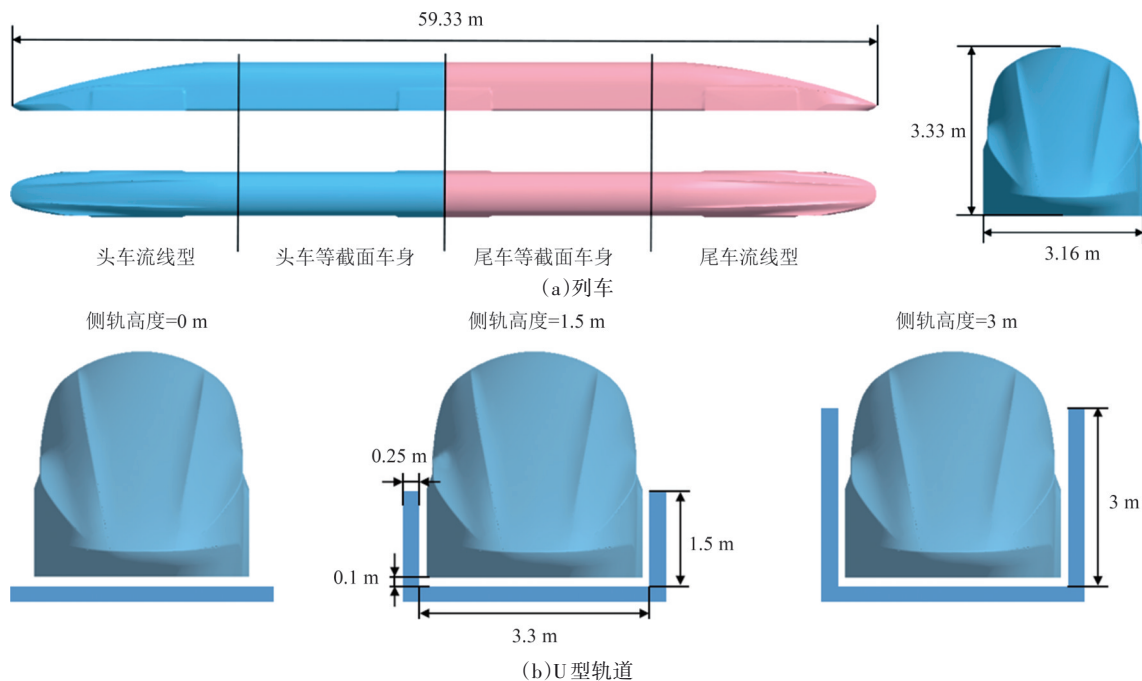


图1 列车和U型轨道的几何模型

Fig.1 Geometric modeling of trains and U-tracks

1.2 计算域和边界条件

为确保磁浮列车周围流场能够充分发展且不受

计算边界的干扰,设定了如图2所示的数值模拟计算域及边界条件.计算域的长度为203 m、宽度为

120 m、高度为 60 m。列车前方来流边界到头车鼻尖点的距离为 40 m，列车的展向边界到列车中心的距离为 60 m，车尾后方边界到尾车鼻尖点的距离为 103.67 m。将列车前方边界、两侧展向边界、顶部边界、车尾后方边界均设定为自由流边界，马赫数为 0.48，静态温度为 293.15 K，自由流边界的压力为 0 Pa，即自由流来流速度约为 $U_\infty=600$ km/h。

1.3 网格策略和独立性验证

本文采用切割体网格对计算区域进行网格离散。图 3 显示了计算域中的网格分布。为了能够在精确捕捉流场变化的同时，降低计算成本，设置了 5 个加密区，将其分别命名为 Fine1、Fine2、Fine3、Fine4、Fine5，网格大小分别为 0.002、0.004、0.016、

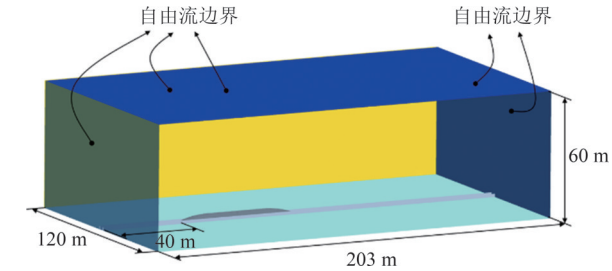


图 2 计算域与边界条件

Fig.2 Computational domain and boundary conditions

0.032、0.064 m。为使近壁面的流动模拟得更准确，在列车车身和 U 型轨道表面设置了棱柱层，车身表面棱柱层数为 25 层，U 型轨道表面棱柱层数为 6 层，棱柱层网格增长率为 1.1，总厚度均为 0.002 4 m。图 4 为列车表面 Y^+ 分布。

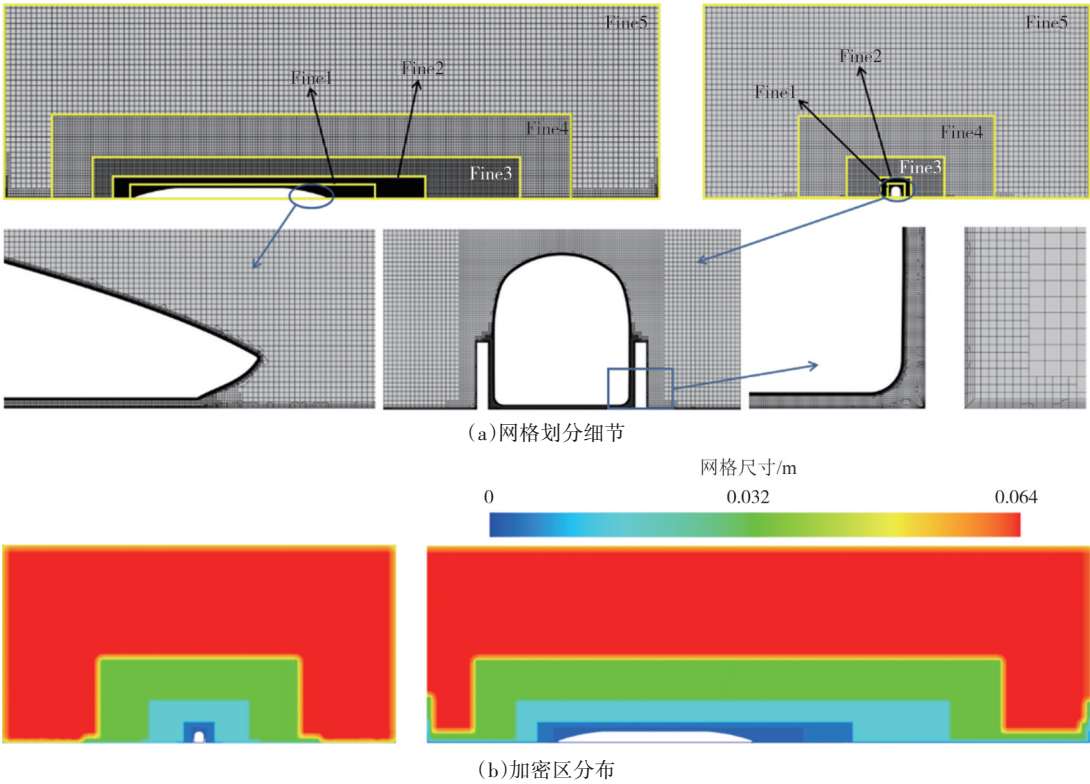


图 3 计算模型网格

Fig.3 Computational model grid

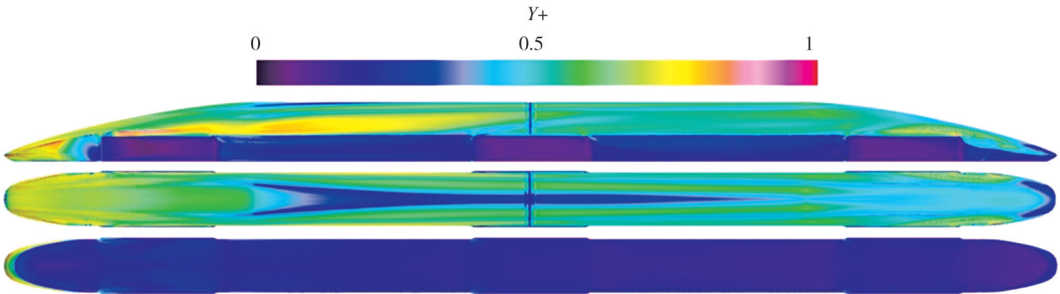


图 4 列车表面 Y^+ 分布

Fig.4 Distribution of mean Y^+ on body surface

为了便于分析,定义各气动力系数如下:

$$C_d = \frac{F_x}{0.5\rho U_\infty^2 S} \tag{1}$$

$$C_s = \frac{F_y}{0.5\rho U_\infty^2 S} \tag{2}$$

$$C_l = \frac{F_z}{0.5\rho U_\infty^2 S} \tag{3}$$

$$C_p = \frac{\Delta p}{0.5\rho U_\infty^2} \tag{4}$$

$$C_p' = \frac{p - \bar{p}}{0.5\rho U_\infty^2} \tag{5}$$

式中: ρ 为空气密度,取 1.225 kg/m^3 ; U_∞ 为来流速度; S 为列车参考面积,取 9.5 m^2 ; F_x 为阻力,单位为N; F_y 为侧向力,单位为N; F_z 为升力,单位为N; Δp 为流场该处压力与无穷远处压力之差,单位Pa; p 为瞬时压力,单位Pa; $\bar{p}$ 为平均压力,单位Pa; C_d 为阻力系数; C_s 为侧向力系数; C_l 为升力系数; C_p 为压力系数; C_p' 为压力脉动系数.

为检验网格参数设置的合理性,以侧轨高度为 1.5 m 的超导磁浮列车模型进行数值仿真计算,采用了细网格、中网格和粗网格3种网格尺度进行验证.表1展示了网格参数设置,图5展示了3种网格尺度下 $y=0$ 截面列车上表面的压力分布.3种网格尺度设置的仿真结果表现出较好的一致性,但为使求解结果更为准确,本文采用细网格进行后续の数値仿真分析.

表1 网格参数设置
Tab.1 Mesh parameters

网络类型	棱柱层层数	棱柱层延伸	网格数量
粗网格	9	1.2	6×10^7
中网格	16	1.2	9×10^7
细网格	25	1.15	1.58×10^8

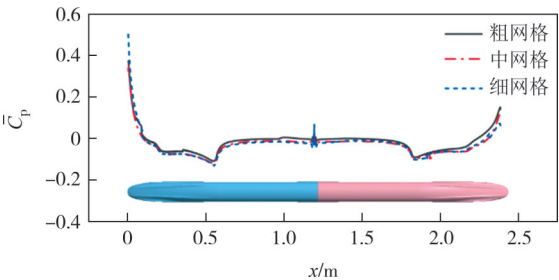


图5 3种网格下 $y=0$ 截面上表面的压力

Fig.5 Surface pressure on $y=0$ cross-section for three grids

1.4 求解设置和数值验证

本研究采用商业软件STAR-CCM+18.06进行数值模拟.为了阻止模型应力损耗及网格畸变导致的

分离,本文采用了基于SST $k-\omega$ 湍流模型改进的延迟分离涡模拟(IDDES)方法,对列车绕流流场进行了数值模拟. 600 km/h 磁浮列车运行马赫数大于 0.3 ,因此,认为空气流动是可压缩的^[25].时间离散采用较高精度的二阶隐式非定常格式,时间步长设为 $5\times 10^{-6}\text{ s}$,每个时间步长设置5次内迭代,保证数值计算的残差和收敛性要求.采用耦合式求解器,将动量方程和连续性方程耦合在一起,使用代数多重网格(AMG)线性求解器进行求解,AMG通过在不同网格层次上迭代求解,能够快速消除误差的高频和低频分量,显著加速收敛.在求解过程中,设置最大循环次数为30次,以确保求解器在合理的时间范围内达到收敛;同时,采用高斯-赛德尔(Gauss-Seidel)松弛方案以平衡收敛速度和稳定性.壁面处理采用全 $Y+$ 处理方法,以确保壁面附近流动模拟的准确性.

试验是保证数值精度的有效方法之一,本文采用 $1:8$ 缩比的超导电动磁浮列车模型进行风洞试验验证.如图6所示,列车模型两侧磁极表面与轨道梁两侧立墙的内侧面间隙为 8 mm ,列车模型底部与轨道梁上表面的悬浮间隙为 12.5 mm ,风洞试验速度为 70 m/s .表2给出了风洞试验和数值仿真计算的阻力系数及其误差.对比可知,风洞试验和数值计算所得结果十分接近,最大偏差为 4.4% ,对于IDDES数值计算方法,最大偏差小于 5% 是合理的,因此认为本文所采用的IDDES数值模拟方法的精度能够满足数值计算要求^[26-27].

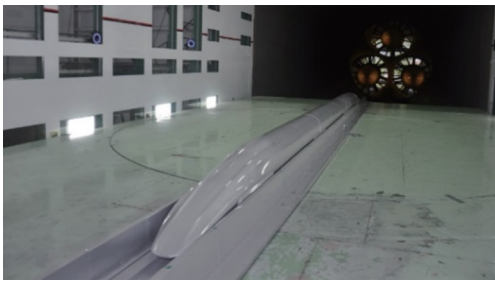


图6 风洞试验模型

Fig.6 Wind tunnel test model

表2 试验与仿真气动阻力系数对比

Tab.2 Comparison of test and simulation aerodynamic drag coefficients

车型	C_d		
	试验	仿真	偏差/%
头车	0.107 1	0.111 8	4.4
中间车	0.061 4	0.058 8	-4.2
尾车	0.098 7	0.099 0	0.3

2 结果讨论

2.1 气动力和表面压力

2.1.1 气动力系数

图 7 为 3 种 U 型轨道高度下头尾车的阻力系数 (C_d)、升力系数(C_l)和侧向力系数(C_s)的时程曲线,可以看出,流场发展到 0.02 s 时,气动阻力系数在时均值附近上下波动,说明此时达到稳定. 因此,本文仅取 0.02 s 以后的数据进行分析.

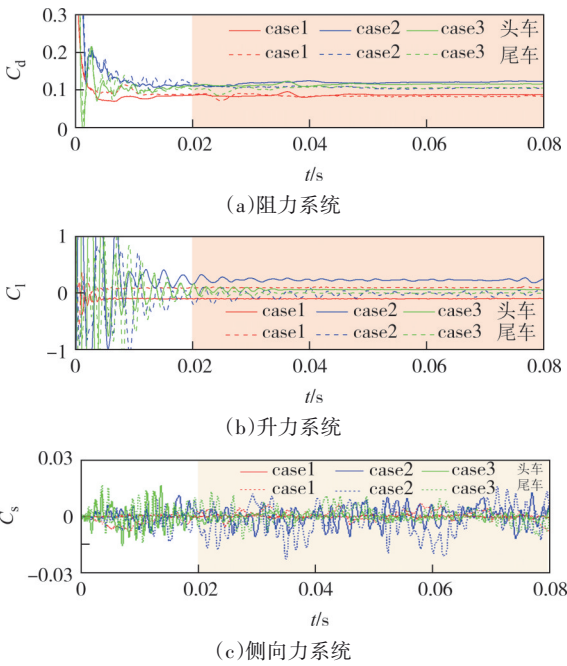


图 7 气动力系数时程曲线

Fig.7 Aerodynamic coefficient time course curves

由表 3 和图 8 可知,列车受到正 x 方向的阻力,即阻碍列车运行;当侧轨高度从 0 m 变化到 1.5 m 时,头尾车的阻力系数均有较大增长,头车增加了 40%,尾车增加了 24.6%;当侧轨高度从 1.5 m 变化到 3 m 时,头车阻力系数减小约 5.8%,尾车阻力有略微增大. 对于头车和尾车,列车的气动升力方向完全相反;当侧轨高度从 0 m 变化到 1.5 m 时,头尾车的升力系数均有较大的反转,头车升力系数由负值变为正值,尾车升力系数由正值变为负值,尤其是头车的升力系数显著增大;当侧轨高度从 1.5 m 变化到 3 m 时,头车升力系数明显减小,减小了 73.7%,尾车升力系数由-0.016 0 变化至-0.001 4;气动升力的剧烈变化会与磁浮系统的电磁力产生强耦合干扰,这将对悬浮控制产生一定影响.当列车在明线运行时,头车和尾车的侧向力系数变化不大,且其侧向力系数

表 3 气动力系数

Tab.3 Aerodynamic coefficient

工况	参数	case1	case2	case3
头车	C_d	0.087 0	0.121 8	0.114 7
	C_l	-0.100 8	0.228 6	0.060 2
	C_s	0.000 02	-0.000 5	-0.000 1
尾车	C_d	0.083 5	0.104 0	0.105 0
	C_l	0.095 7	-0.016 0	-0.001 4
	C_s	0.000 1	-0.001 5	0.000 4

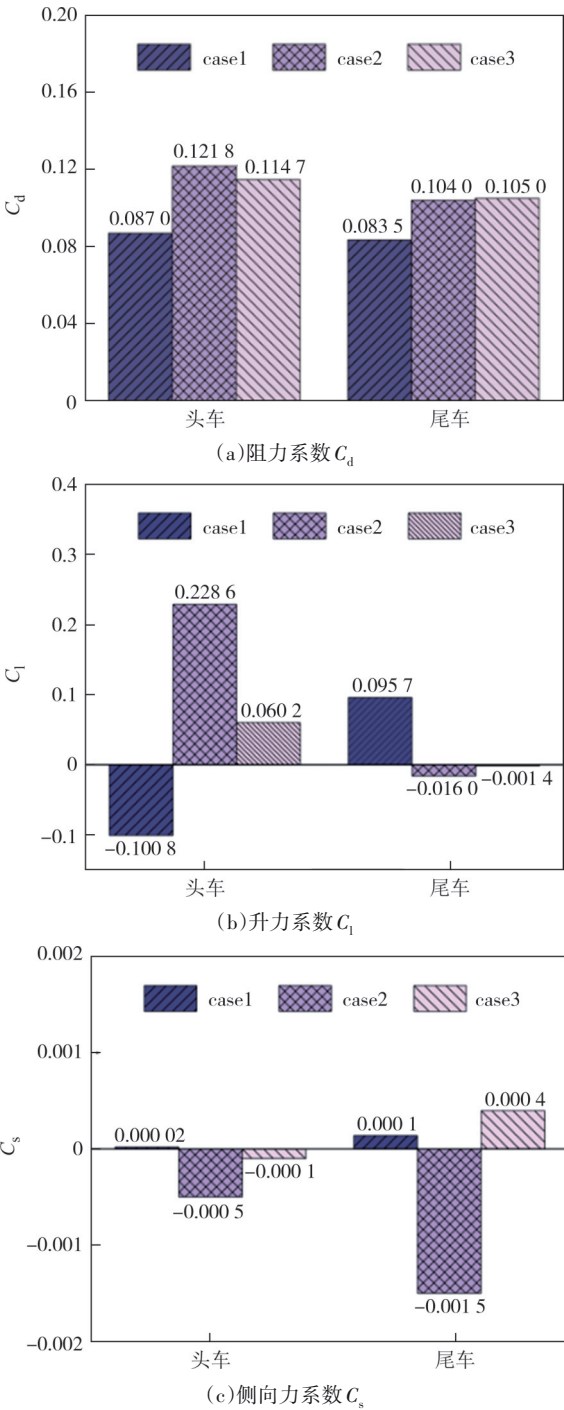


图 8 气动力系数

Fig.8 Aerodynamic coefficient

值均较小.由表4可以看出,总体而言,尾车气动力系数的标准差大于头车,表明尾车气动力波动整体较为显著,这可能与尾车区域复杂的尾涡脱落有关.当侧轨高度由0 m增加至1.5 m时,除尾车阻力系数标准差基本保持不变外,头、尾车其余气动力系数的标准差均明显增大.当侧轨高度从1.5 m变化到3 m时,头车阻力系数的标准差有所减小,升力系数标准差增大,尾车的变化与头车相反,对于侧向力系数的标准差,头尾车均显著减小.

将气动力进行快速傅里叶变换(FFT),得到 C_d 、 C_l 、 C_s 的功率谱密度(PSD),如图9所示.频率(f)归一化为Strouhal数(St),其定义如下:

表4 气动力系数标准差

Tab.4 Standard deviation of aerodynamic coefficient

车型	参数	case1	case2	case3
头车	$\sigma(C_d)$	0.002 0	0.002 9	0.002 4
	$\sigma(C_l)$	0.002 9	0.016 2	0.018 2
	$\sigma(C_s)$	0.000 5	0.004 7	0.001 6
尾车	$\sigma(C_d)$	0.002 5	0.002 5	0.004 2
	$\sigma(C_l)$	0.004 9	0.041 8	0.018 3
	$\sigma(C_s)$	0.002 8	0.007 5	0.004 3

$$St = \frac{fH}{U_\infty}$$

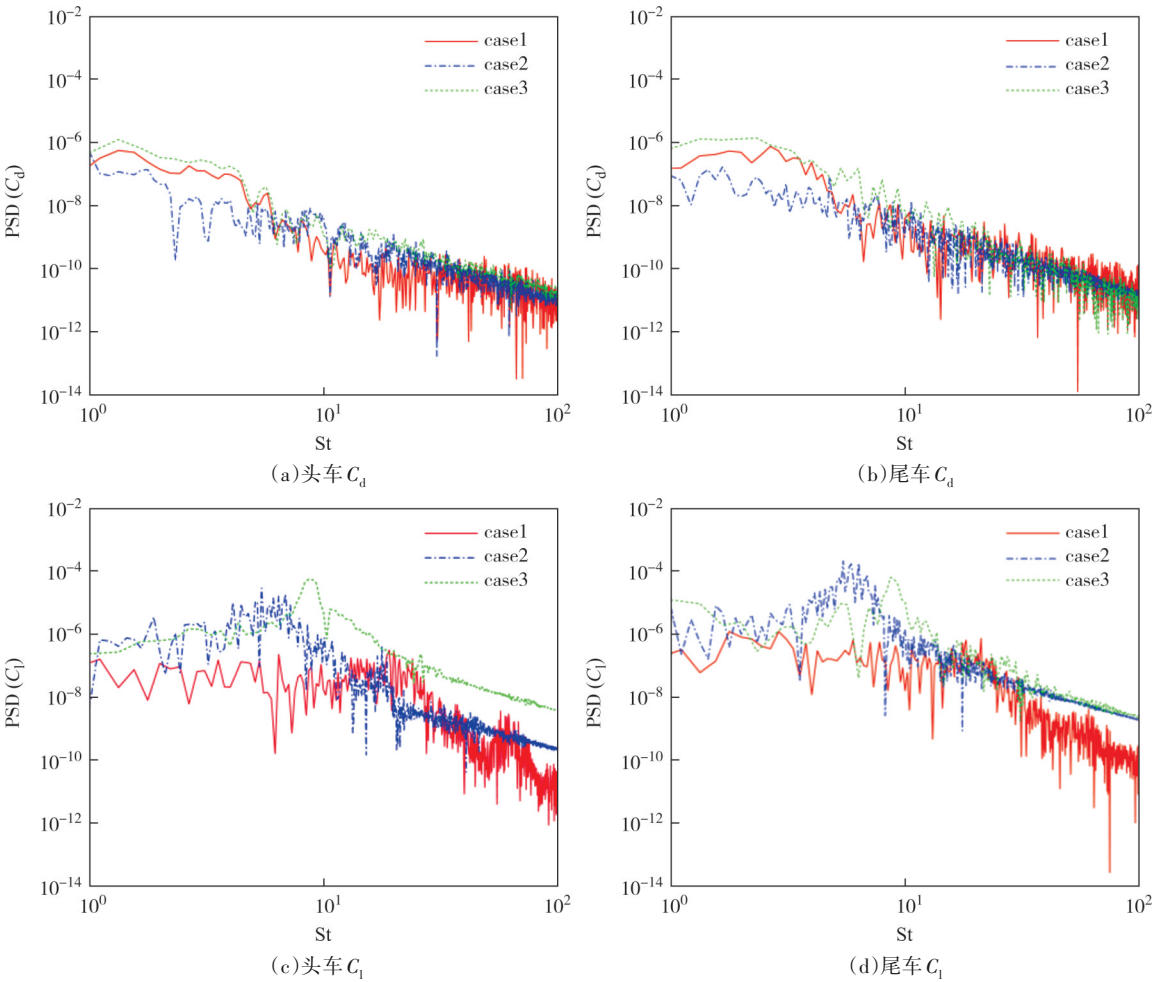
(6)

式中: f 是频率.

功率谱密度分布会随着 St 的增加而减小,这是因为在高频时涡的波长更短,因此能量损失速率更快^[28].随着U型侧轨高度的增加,PSD总体逐渐变大;在低频区域,3种工况的PSD差异较大,在高频区域,3种工况的PSD差异逐渐减小;3种工况差异在于头车区域的PSD大于尾车区域.

2.1.2 表面压力

图10展示了3种工况下列车表面压力分布情况, $\bar{C}_p$ 为压力系数的时间平均.可明显观察到,头车鼻尖处出现流动驻点,空气流速急剧降低,静压显著增大,鼻尖附近出现较大的正压力;尾车鼻尖附近也呈现正压力,但较头车减小了较多.自鼻尖向后发展,气流加速,正压剧烈降低,在头尾车的流线型区域均呈现为负压,到等截面车身区域恢复为常压.在悬浮架前后,由于流动截面变化较大,在悬浮架靠近来流方向的一侧呈现较大的正压,在悬浮架远离来流方向的一侧呈现较大的负压.



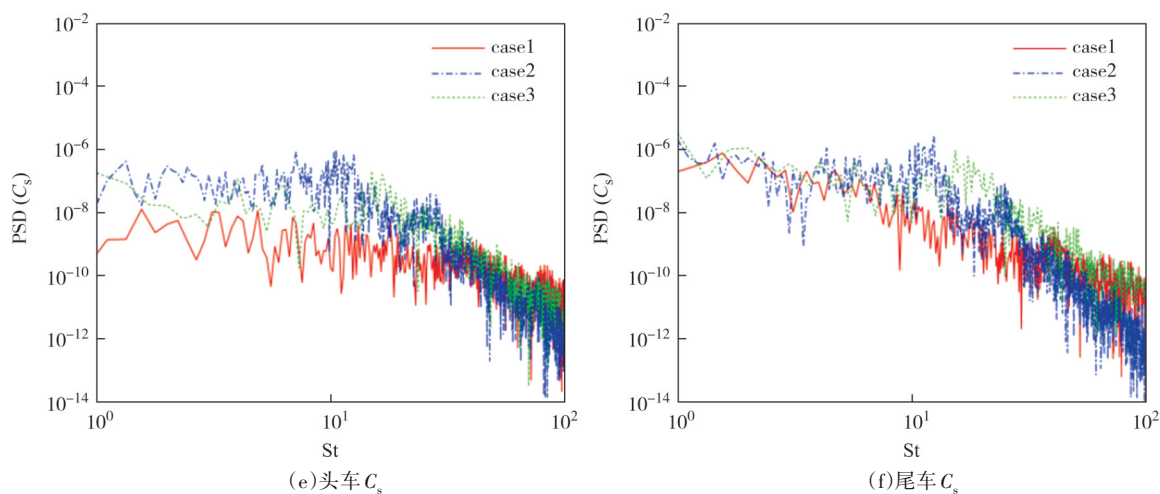


图9 功率谱密度

Fig.9 Power spectral density

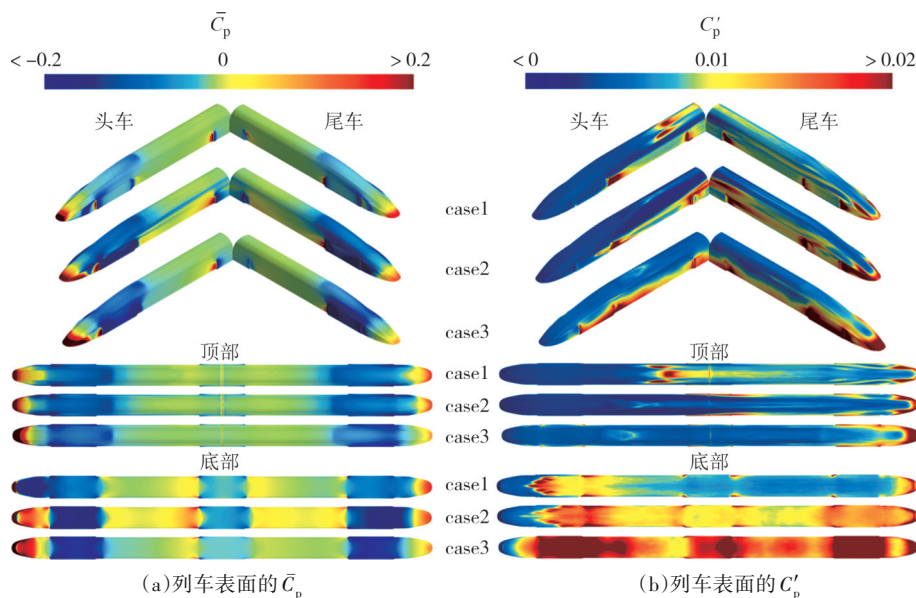


图 10 列车表面时均压力与压力脉动分布

Fig.10 Time-averaged pressure and pulsation pressure distribution on train surface

图 10(b)为列车表面的压力脉动分布,压力脉动反映了列车周围的湍流特性.由图可以看出,悬浮架周围产生了较大的压力脉动;随着U型侧轨高度的增加,列车顶部风挡周围的 $\bar{C}'_p$ 逐渐减小,列车两侧及底部的 $\bar{C}'_p$ 逐渐增大.

图 11(a)和图 11(c)展示了3种工况下 $y=0$ 截面列车上、下表面的压力分布,由图可知,在车体顶部,头尾车流线型区域的压力变化比较剧烈,其值从较大正压急剧减小至负压;过渡到等截面车身区域时,压力迅速恢复至常压,在风挡区域,由于风挡中间的凹陷结构,压力产生了突变.在车头鼻尖底部,压力变化剧烈,由正压极值迅速减小到负压极值,而后恢复至接近常压;在尾车鼻尖底部,压力出现正压极值

点;在流线型区域和风挡区域,压力波动较大.对比3种工况的列车纵剖面压力,发现U型轨道侧轨高度主要对列车流线型区域的压力产生较明显影响.对于列车上表面,在头车流线型区域,case1沿着正 x 方向的负压一直呈增大趋势,case2和case3的负压则是先增大,而后有所减小,最后再增大;在尾车流线型区域,沿着负 x 方向亦是这样的变化规律.随着侧轨高度的增加,头车流线型区域的负压值逐渐增大;在尾车流线型区域,case1和case2的压力值相差较小,case3的负压值有较大的增长.对于列车下表面,case2和case3列车底部压力变化趋势基本一致,在流线型区域有较大的正负压波动,case1列车底部压力基本均为负值.图 11(b)和图 11(d)展示了3种工况

下在 $y=0$ 截面列车上、下表面的压力脉动分布. 可以观察到, 在列车上表面, 头尾车流线型区域 case3 的 $\bar{C}_p'$ 最大, 等截面车身区域 case1 的 $\bar{C}_p'$ 最大; 风挡处 3 种工

况的 $\bar{C}_p'$ 产生了突变, 并在靠近尾车鼻尖区域产生激增. 在列车下表面, 随着侧轨高度的增加, 其 $\bar{C}_p'$ 值逐渐增大, 并在悬浮架附近产生了较大的压力脉动.

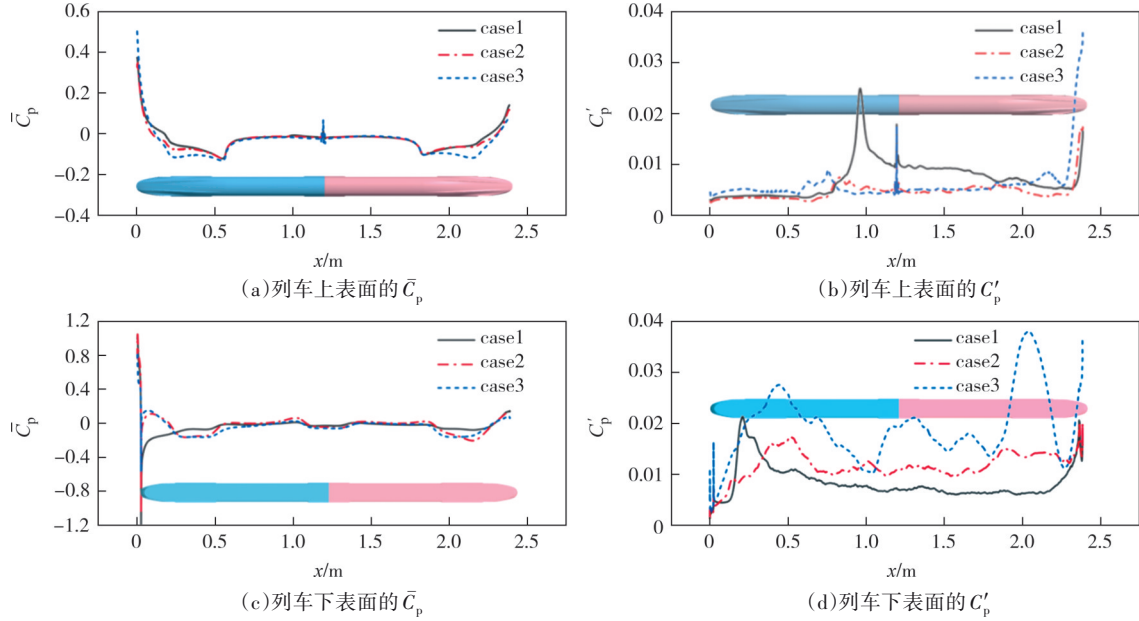


图 11 列车表面时均压力与压力脉动系数($y=0$ 截面)

Fig.11 Time-averaged and pulsating pressure coefficients on the train surface ($y=0$ section)

2.2 列车周围流场结构

列车高速运行时, 由于 U 型轨道结构的限制和导流作用, 该区域形成更为复杂的流场结构. Q 准则用于涡识别的重要方法, 其核心基于速度梯度张量的分解, 通过量化涡量与应变速率的相对强度来定位涡结构, 其定义如下:

$$Q = \frac{1}{2} (\|\boldsymbol{\Omega}\|^2 - \|\mathbf{S}\|^2) \quad (7)$$

式中: $\boldsymbol{\Omega}$ 是自旋张量; $\mathbf{S}$ 是应变率张量.

图 12 采用 $Q=10\,000/s^2$ 等值面来显示列车周围涡结构, 并用流向涡量着色, 正负值表示不同旋向. 可以看出, 随着 U 型轨高增加, 涡核在展向上向远离车体中心线的方向移动, 在垂向上则向上发展, 并逐渐脱离列车表面. 对于 case1, 车头前端形成一对大涡, 因无侧壁约束, 流体在两侧迅速逸散, 尾流区湍流发展充分, 尾涡呈现明显的脱落结构; 对于 case2 和 case3, 侧轨的几何约束使大涡分裂为两对反向旋转的涡对, 尾流区域仍有涡旋脱落, 但其脱落频率降低. 涡量分布的演变趋势表明, 在侧轨高度增大时, 气流在受到侧轨几何限制后发生延迟分离, 从而提高了流场的有序性.

湍动能(turbulent kinetic energy, TKE)表示流体

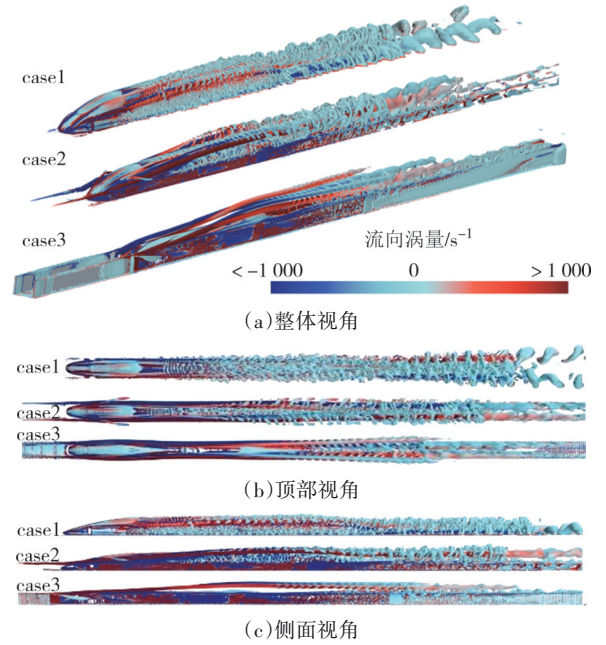


图 12 流场结构

Fig.12 Flow field structure

中由于湍流引起的速度波动所携带的动能, TKE 量化了湍流脉动的动能. 其定义如下:

$$TKE = \frac{1}{2} [\overline{(u'^2)} + \overline{(v'^2)} + \overline{(w'^2)}] \quad (8)$$

式中: $\overline{(u'^2)}$ 、 $\overline{(v'^2)}$ 、 $\overline{(w'^2)}$ 分别表示流体在流向 x 、展向 y 和垂直方向 z 的平均雷诺应力分量.

图13定义了列车表面的5个截面($X_1 \sim X_5$).图14展示了这些截面的时均TKE,并将其归一化,可以看到TKE主要聚集在列车顶部和U型轨道周围.随着气流向正 x 方向发展,TKE整体呈现先增强后减弱的趋势.在头车区域,气流遇车头分离形成马蹄涡,TKE升高;随气流后移,涡结构逐渐破碎耗散,TKE减弱.列车顶部的TKE向上衰减并出现涡旋状,这与车顶流动分离和涡旋抬升有关,涡旋向上抬升由于黏性耗散导致TKE减弱.在U型轨道周围,悬浮架引起轨道间隙发生突变,由于高速流动和剪切作用

导致TKE在局部位置增强.随着U型轨高增加,列车周围的TKE逐渐减小,当U型侧轨高度为3 m时,在轨道的外侧,形成向下穿透的高能湍流带,并在轨道底部形成反向旋转涡对,随着气流沿正 x 方向发展,case3轨道外侧的TKE逐渐增大.

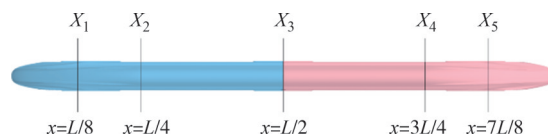


图13 定义5个横截面: X_1, X_2, X_3, X_4, X_5

Fig.13 Define 5 cross sections: X_1, X_2, X_3, X_4, X_5

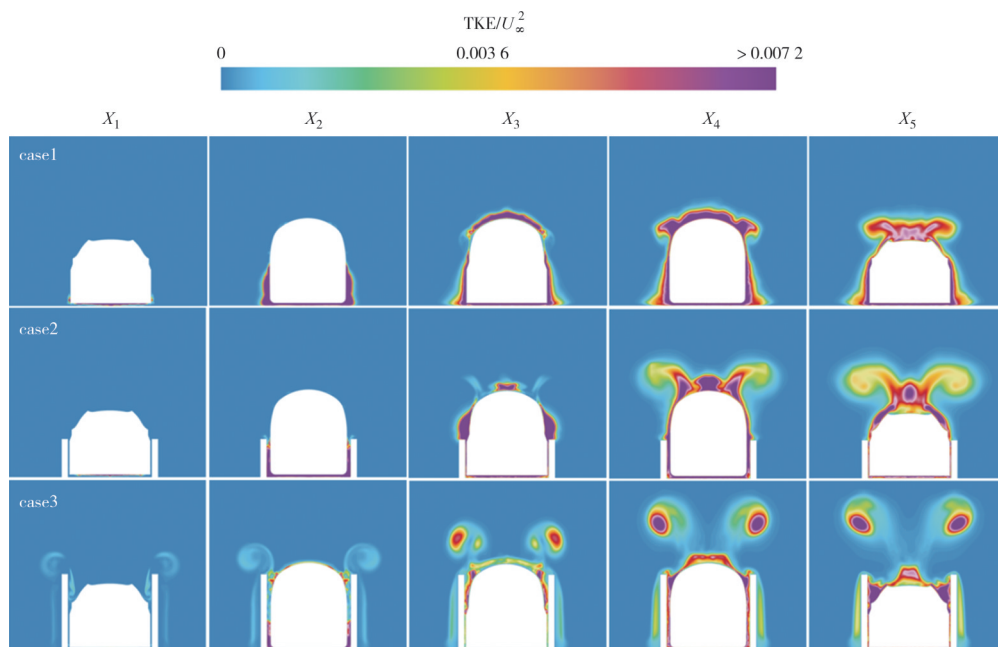


图14 X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 横截面的TKE分布

Fig.14 TKE distribution of X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 cross sections

2.3 边界层

边界层是空气与列车表面之间形成的一层薄层,选择 $\bar{u}/U_\infty=0.99$ 作为边界,从壁面到该边界的距离为边界层名义厚度.图15展示了3种工况下 $y=0$ 截面和 $z=1.4$ m截面列车周围的边界层厚度分布.由图15(a)可以看出,在垂直方向上,3种工况头部的边界层分布情况较为相似,均被类球状分布的边界层包裹;但在尾流区域,case2的边界层厚度远大于case3工况,case1居中.由图15(b)可以看出,在展向方向上,3种工况的边界层分布有较大的差异.在头尾部区域,case1和case2两种工况均为类球状,由U型轨道的约束,case2头部边界层分布范围更小,对于case3,U型轨道的束缚加重,导致边界层约束在轨道内.在列车车身附近,当U型侧轨高度为0时,没有侧轨约束,气流在车体两侧和底部产生更多的

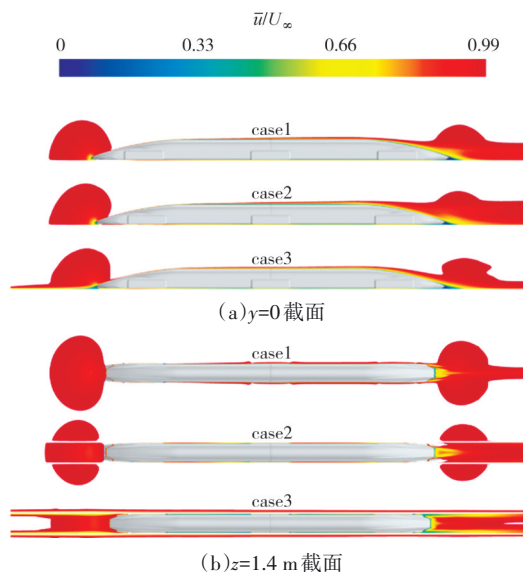


图15 边界层流动

Fig.15 Boundary layer flow

横向流动与分离区,并且由于地面效应的影响,地面附近的低速区与车体底部的流动相互作用,产生复杂的涡结构,从而增加边界层厚度;而随着侧轨高度的增加,气流被限制在U型轨道内,流动更加贴附,减少横向扩散,边界层更薄。

2.4 列车风速度

列车高速行驶时,车身表面的黏性作用会引发强烈的列车风,对周围环境及轨道旁设施安全构成显著影响.同时,列车风特性与边界层分布以及尾流等流动结构密切相关.基于图16所示的监测线布置,图17展示了3种工况下,在距离轨道中心2、2.5、3 m的 $z=0.2$ m和 $z=1.4$ m高度处沿车长方向的时均列车风速度($\bar{U}_{\text{slipstream}}$),图中FDR和WPR分别表示流动发展区和尾迹传播区.列车风速度呈双峰分布:头车前速度迅速增大形成第一峰值,随后急剧下降;

随着边界层沿车长发展,速度逐渐增加,在近尾流处出现第二峰值.在距轨道中心相同距离处,对比 $z=0.2$ m高度和 $z=1.4$ m高度的列车风速度,U型轨高对 $z=0.2$ m高度处列车风速度的影响比对 $z=1.4$ m高度处的大;随着与轨道中心距离的增加,列车风速总体逐渐降低,这是由于边界层的发展,越靠近车身附近,列车风速度越大。

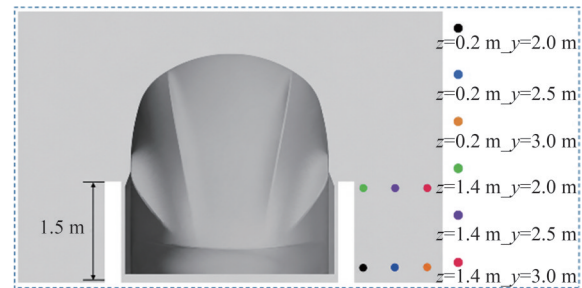


图16 监测线与车轨的位置关系

Fig.16 Relative position of monitoring line and track

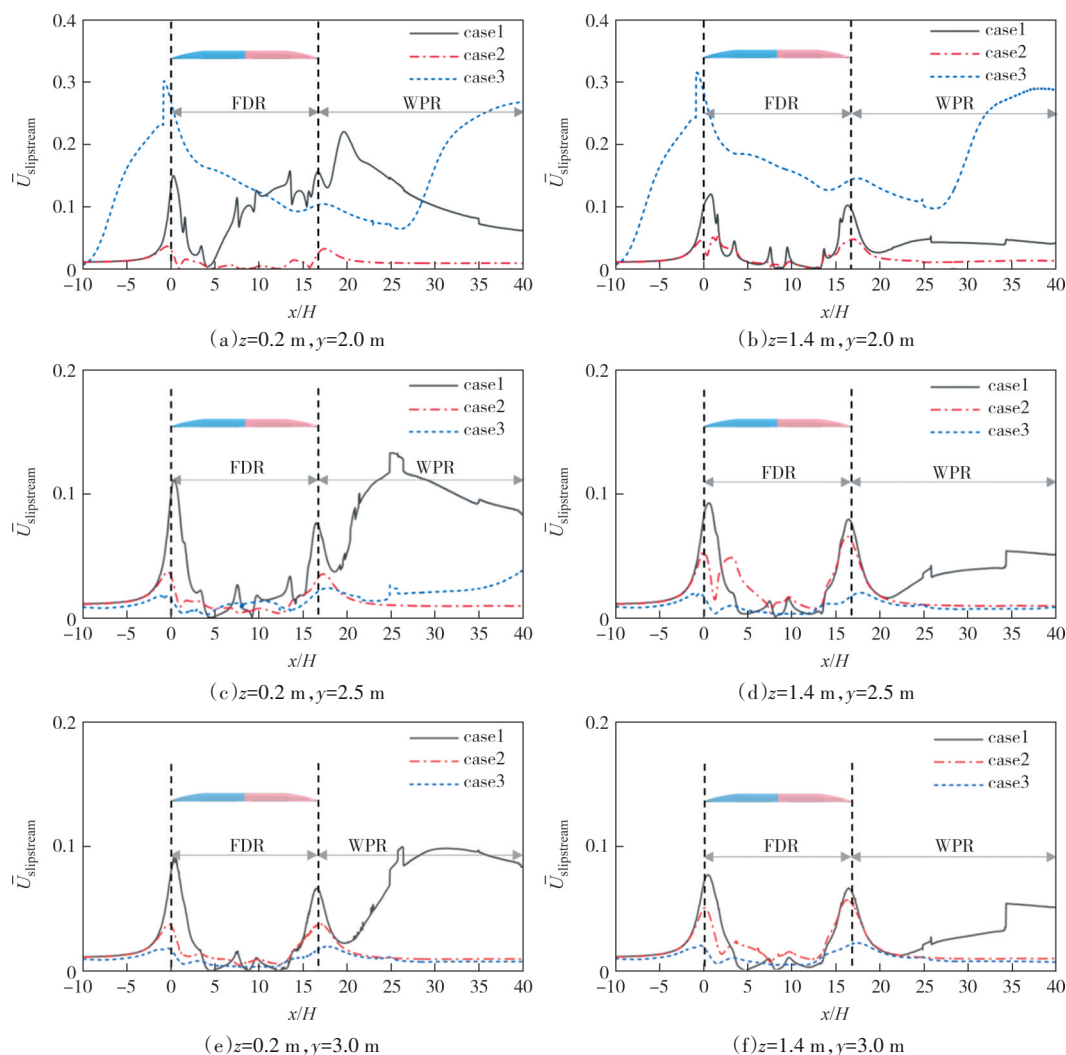


图17 不同位置处的时均列车风速度分布

Fig.17 Time-averaged train wind speed distribution at different locations

在 $z=0.2\text{ m}$ 高度,当距离轨道中心 2.5 m 和 3 m 时,case1工况的列车风速度远大于case2和case3,尤其在两个峰值及尾流区,这是由于侧轨高度为 0 m 时列车横向无遮挡,气流绕车体自由扩散,来流截面大,车头处形成强烈加速并迅速分离,在车尾处产生大范围回流和尾涡导致的.当距离轨道中心 2 m 时,case3的列车风速度显著增大,这是由于侧轨的增高,来流加速通过侧隙时在侧轨顶部形成分离涡,上方气流侧溢,增强了近轨侧局部能量耗散,部分来流绕过轨顶而未完全进入侧隙,因此在近轨处的列车风速度显著增大.在 $z=1.4\text{ m}$ 高度,3种工况的列车风速度变化规律与 $z=0.2\text{ m}$ 时基本一致,但侧轨高度对流场的影响减弱,3种工况的峰值相较于 $z=$

0.2 m 时更为接近.

2.5 尾流速度

考虑到高速列车尾流区域的涡旋结构会影响列车风的发展,图18展示了近尾迹区距车尾鼻部不同距离截面处($x=W$ 、 $x=2W$ 、 $x=3W$ 、 $x=4W$)列车风速度的分布特征.可见,距离列车尾部越远,列车风速度逐渐衰减,符合经典卡门涡街耗散规律.受U型轨道束缚,展向上列车风速度较大的区域主要集中在轨道内部,而对于case1,较大的列车风速度分布范围较宽;垂向上,随着U型轨道的升高,列车风速度的分布范围逐渐升高.对于case2和case3,在U型轨道顶部的内侧和列车车顶区域,出现了较高的列车风速度,这与涡结构的分布一致;特别地,当侧轨高度为 3 m 时,U型轨道的外侧也有较大列车风.

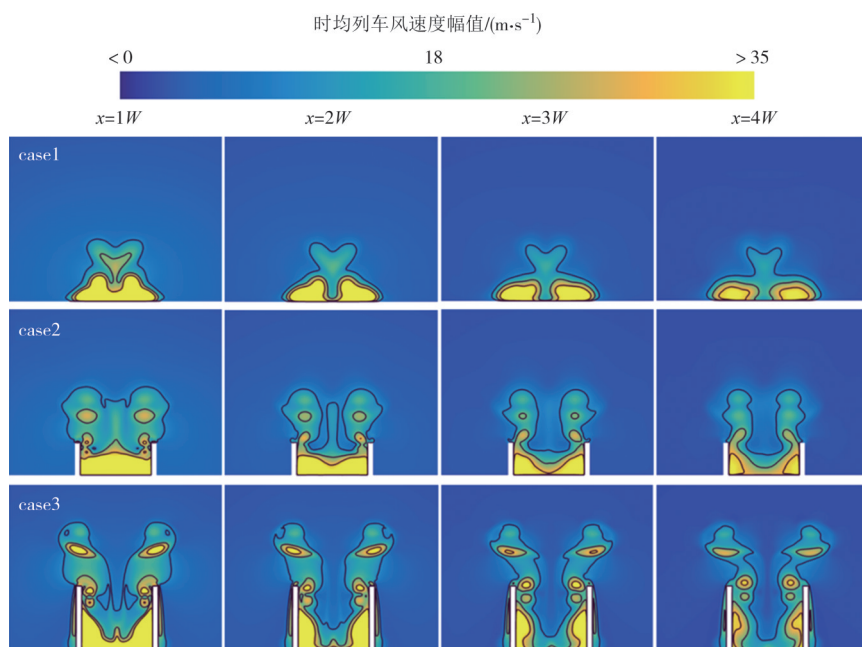


图18 截面的列车风速度

Fig.18 Slipstream for cross section

为定量比较U型轨高对尾流区空气流速的影响,在 $y=0$ 截面的尾迹区域设置了5条速度监测线,如图19所示.图20展示了监测线上的时均流向速度($\bar{u}$)分布,随着距列车尾部距离的增大,流向速度总体呈减小趋势.在鼻尖点高度附近,3种工况都出现速度损失,且在L1上速度损失值的大小几乎一致,随着气流向后发展,速度亏损逐渐减小,这是尾流区涡旋耗散的结果.在L1处,3种工况的尾流速度分布趋势相似,随高度的降低,速度先缓慢增加,在接近鼻尖位置时,速度迅速增至最高点,在鼻尖以下区域速度又迅速减小.这表明在L1处,尾流速度主要受列车尾部形状和局部流场结构主导,U型侧轨高度的影响相对较

小.而在L2~L5处,随着与车尾距离的增加,不同U型轨高对应的尾流速度分布差异逐渐显现.case1尾流速度在较低高度范围内($z=0.5H$ 以下)有一定的衰减;case2和case3的尾流速度变化趋势基本一致,且变化较为平缓,case3的尾流速度相较于case2的更小,表明较高的U型侧轨一定程度上抑制了尾流区低速涡流的发展,使尾流速度分布更加均匀.

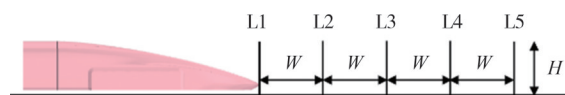


图19 列车尾流区域数据监测线位置

Fig.19 Train tail area data monitoring linear position

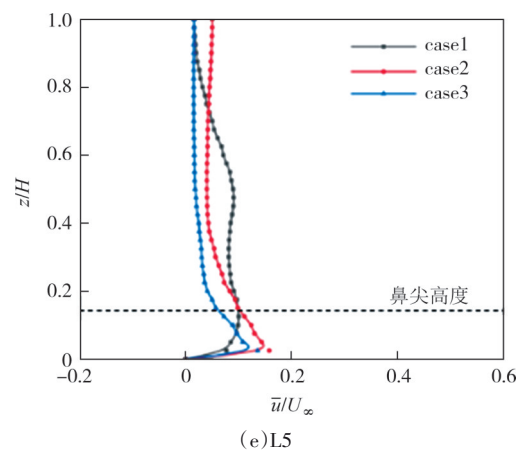
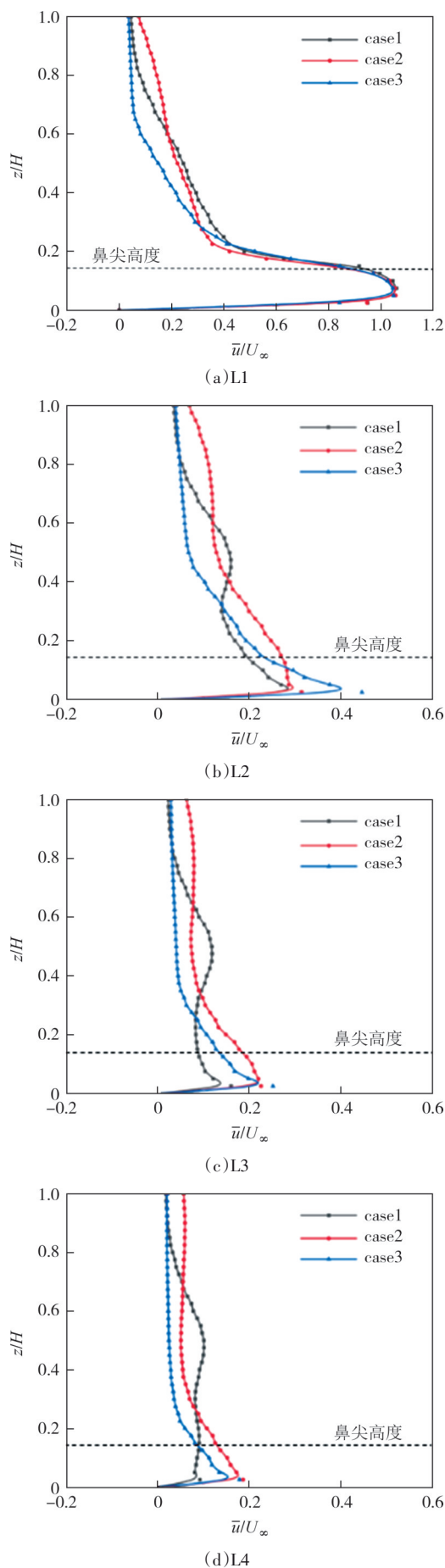


图20 尾流区域监测线上气流速度

Fig.20 Airflow velocity on the monitoring line at wake region

3 结论

本文通过IDDES数值模拟方法比较了U型侧轨高度(0、1.5、3 m)对超导电动磁浮列车明线运行的气动性能影响.分析列车气动力、表面压力、周围流场结构、列车风速度和尾流速度,主要得出以下结论:

1) 当侧轨高度由0 m升至1.5 m时,头车和尾车阻力分别显著增加40%和24.6%,升力由头负尾正变为头正尾负;侧轨高度增至3 m时,头车阻力减小,头车升力骤降73.7%.对于气动力的标准差,尾车大于头车.对于表面压力,头尾车鼻尖点处呈现较大正压,自鼻尖向后发展,正压剧烈降低,在头尾车的流线型区域均呈现为负压,等截面车身区域恢复为常压.同时,悬浮架周围存在显著的压力脉动,随U型侧轨高度增加,列车顶部风挡附近的脉动逐渐减小,而列车两侧及底部的脉动增大.

2) 随着U型轨高度的增加,在展向方向上,涡核位置向远离车体中心线的方向发展,在垂直方向上,涡核位置向上发展,并逐渐脱离列车表面;列车周围的湍动能逐渐减小.

3) U型轨高度显著影响边界层分布和列车风速度.随着侧轨高度的增加,气流被限制在U型轨道内,流动更加贴附,横向扩散受到抑制,导致边界层更薄.越靠近车身附近,列车风速度越大,且U型轨高对 $z=0.2$ m高度处列车风速度的影响比对 $z=1.4$ m高度处的大.

4) 随着距列车尾部距离的增大,尾流流向速度总体均呈现逐渐减小的趋势,在鼻尖点高度附近有速度损失,随着气流向后发展,速度亏损逐渐减小.

侧轨高度为3 m时的尾流速度最小,表明较高的U型侧轨在一定程度上抑制了尾流区低速涡流的发展,使尾流速度分布更加均匀。

参考文献

- [1] GIVONI M. Development and impact of the modern high-speed train:a review[J]. *Transport Reviews*, 2006, 26(5):593-611.
- [2] YANG M Z, ZHONG S, ZHANG L, et al. 600 km/h moving model rig for high-speed train aerodynamics[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 227: 105063.
- [3] WANG K W, CHEN G, WEN C Y, et al. Mitigation mechanism of porous media hood for the sonic boom emitted from maglev tunnel portals[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(10): 106134.
- [4] 余浩伟, 寇峻瑜, 李艳. 600 km/h 高速磁浮在国内的适应性及工程化发展[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(12): 16-20.
- YU H W, KOU J Y, LI Y. Adaptability and engineering development of 600 km/h high-speed maglev in China[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(12): 16-20. (in Chinese)
- [5] 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 Z G, LIU Z X, LI H T, et al. Development status and prospect of maglev train [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 57(3): 455-474, 530. (in Chinese)
- [6] 邓自刚, 张勇, 王博, 等. 真空管道运输系统发展现状与展望[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(5): 1063-1072.
- DENG Z G, ZHANG Y, WANG B, et al. Present situation and prospect of evacuated tube transportation system [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(5): 1063-1072. (in Chinese)
- [7] 王家素, 王素玉. 高温超导磁悬浮列车研究综述[J]. *电气工程学报*, 2015, 10(11): 1-10.
- WANG J S, WANG S Y. High temperature superconducting maglev train [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2015, 10(11): 1-10. (in Chinese)
- [8] WANG D X, WANG C G, JI K T, et al. The aerodynamic performance of moving high-speed maglev train-guideway system under crosswind[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(6): 065153.
- [9] 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 H Q, ZHANG L, WANG T T, et al. Aerodynamic design of high-speed maglev trains for running stability[J]. *Science and Technology Foresight*, 2023, 2(4):70-77. (in Chinese)
- [10] 姜琛, 龙金兰, 高广军, 等. 高速列车底部导流板的气动减阻特性研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(10): 151-163.
- JIANG C, LONG J L, GAO G J, et al. Study on aerodynamic drag reduction characteristics of deflector mounted on high-speed train bottom [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(10): 151-163. (in Chinese)
- [11] 邓铿, 杨伟超, 何旭辉, 等. 高速列车通过隧道-桥梁-隧道时车体的气动效应[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(5): 93-102.
- DENG E, YANG W C, HE X H, et al. Aerodynamic effects of high-speed trains when passing through tunnel-bridge-tunnel[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(5): 93-102. (in Chinese)
- [12] 邓铿, 杨伟超, 尹荣申, 等. 横风下高速列车驶入隧道时瞬态气动性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(9): 69-78.
- DENG E, YANG W C, YIN R S, et al. Study on transient aerodynamic performance of high-speed trains when entering into tunnel under crosswinds[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(9):69-78. (in Chinese)
- [13] 谷正气, 杨滨徽, 龚旭, 等. 会车瞬态气动特性分析与研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(6): 27-31.
- GU Z Q, YANG B H, GONG X, et al. Analysis for transient aerodynamic characteristics of two automobiles passing each other [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2010, 37(6): 27-31. (in Chinese)
- [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.
- [15] 杨鹏, 杨明智, 张雷, 等. 线间距对600 km/h 高速磁浮列车明线交会气动性能的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(7): 2952-2963.
- YANG P, YANG M Z, ZHANG L, et al. Effect of line spacing on aerodynamic performance of open line rendezvous of 600 km/h maglev train[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(7): 2952-2963. (in Chinese)
- [16] ZHU F T, XIE J W, LÜ D Z, et al. Transient aerodynamic behavior of a high-speed Maglev train in plate braking under crosswind[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(3): 035133.
- [17] 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 S, ZHOU D, MENG S. 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)
- [18] 蔺童童, 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 T T, YANG M Z, ZHANG L, 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)
- [19] 周丹, 陈怀博, 孟石, 等. 仿生球体形态对高速磁浮列车减阻的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(4): 1592–1602.
- ZHOU D, CHEN H B, MENG S, et al. Effect of bionic sphere form on drag reduction of high-speed maglev train [J]. 2023, 54(4): 1592–1602. (in Chinese)
- [20] HUANG S, LI Z W, YANG M Z. Aerodynamics of high-speed maglev trains passing each other in open air[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 188: 151–160.
- [21] 戴志远, 李田, 张卫华, 等. 气动翼对高速磁悬浮列车升力特性的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2022, 57(3): 498–505.
- DAI Z Y, LI T, ZHANG W H, et al. Effect of aerodynamic wings on lift force characteristics of high-speed maglev train[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 57 (3) : 498–505. (in Chinese)
- [22] 李一凡, 李田, 张继业, 等. 导流装置对高速磁浮列车气动特性的影响[J]. *实验流体力学*, 2023, 37(1): 91–99.
- LI Y F, LI T, ZHANG J Y, et al. Effect of deflector devices on the aerodynamic characteristics of high-speed maglev trains [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2023, 37 (1) : 91–99. (in Chinese)
- [23] HUANG Z D, ZHOU Z B, CHANG N, et al. Aerodynamic features of high-speed maglev trains with different marshaling lengths running on a viaduct under crosswinds [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2024, 140(1): 975–996.
- [24] 杨永刚, 梅元贵. 时速 600 km 高速磁浮列车明线非定常气动性能数值模拟研究[J]. *中国铁道科学*, 2022, 43(6): 106–118.
- YANG Y G, MEI Y G. Numerical simulation of unsteady aerodynamic performance of 600 km·h⁻¹ high-speed maglev train running on open line[J]. *China Railway Science*, 2022, 43(6): 106–118. (in Chinese)
- [25] LI T, DAI Z Y, YU M G, et al. Numerical investigation on the aerodynamic resistances of double-unit trains with different gap lengths [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2021, 15(1): 549–560.
- [26] CHEN G, LI X B, LIU Z, et al. Dynamic analysis of the effect of nose length on train aerodynamic performance[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 184: 198–208.
- [27] 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.
- [28] WANG K W, XIONG X H, WEN C, et al. Impact of the train heights on the aerodynamic behaviour of a high-speed train [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2023, 17(1): 2233614.