



引用格式:王业腾,张超,白夜,等. 双层动车组列车风特性研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4064-4071.

Wang Yeteng, Zhang Chao, Bai Ye, et al. Research on wind characteristics of double-deck electric multiple units trains[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4064-4071.

力学

## 双层动车组列车风特性研究

王业腾<sup>1</sup>, 张超<sup>2,3</sup>, 白夜<sup>2,3</sup>, 孙振旭<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所, 北京 100081; 3. 北京纵横机电科技有限公司, 北京 100094)

**摘要** 列车行驶过程中会诱导周围空气流动形成列车风,较大强度列车风会危及行人和轨道旁工作人员的安全,甚至会卷起附近的货物和杂物。通过数值模拟的方法研究不同行驶速度的五编组双层车厢动车组周围的流场结构和列车风。结果表明:列车风主要由尾流区域涡脱落诱导产生,头车流线型区域、转向架等附属结构和地面效应对诱导列车风也有重要作用。列车周围靠近地面的区域受到附属结构和地面效应直接影响,列车风强度大于远离地面的区域。依据 TSI 130—2014,行驶速度在 200 km/h 及以下速度级的双层车厢动车组符合列车风风速的安全标准,行驶速度 250 km/h 及以下速度级的双层车厢动车组符合车头压力脉冲要求。

**关键词** 双层动车组; 空气动力学; 列车风; 流场结构

**中图法分类号** O355; **文献标志码** A

## Research on Wind Characteristics of Double-deck Electric Multiple Units Trains

WANG Ye-teng<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>2,3</sup>, BAI Ye<sup>2,3</sup>, SUN Zhen-xu<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 3. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**[Abstract]** During the running of the train, the surrounding air is induced to form a train wind, which could endanger the safety of staff and pedestrians beside the track, and even roll up nearby goods and debris. Numerical simulation was used to study the flow field structure and train wind around double-deck EMU (electric multiple units) with different running speeds. The results show that the train wind is mainly induced by the vortex shedding in the wake area. Moreover, the streamlined area of the leading car, the bogie, and the ground effect also play an essential role in the train wind. The area close to the ground is directly affected by auxiliary structures and ground effects, and the train wind intensity is greater than the area far from the ground. According to TSI 1302—2014, the double-deck EMU meets the safety standard of the train wind when the speed is not more than 200 km/h, and meets the pressure pulsation requirements when the speed is not more than 250 km/h.

**[Keywords]** double-decker EMU (electric multiple units); aerodynamics; train wind; flow field structure

随着列车运行速度不断提高,其面对的空气动力学效应日渐突出,列车运行对周围环境的影响如噪声和列车风受到人们的关注。列车高速运行时,受黏性作用的影响列车周围的空气会被带动并随着列车一起运动,形成列车风。这种压力和风速的剧烈变化会危害轨道旁的工人和乘客的安全,甚至可能卷起铁路旁的货物和杂物,对铁路安全造成隐

患<sup>[1]</sup>。此外,丁云飞等<sup>[2]</sup>通过实测与数值分析表明列车风对于隧道冻害的影响不可忽略。双层车厢动车组可以在现有高速铁路线路基础上大幅提高载客能力,但是车厢横截面的增大可能会带来更多列车空气动力学问题。为了保证列车运行时的安全性,有必要研究不同行驶速度下双层车厢动车组周围的流场结构与列车风的变化规律。

收稿日期: 2022-07-12; 修订日期: 2023-01-23

基金项目: 国铁集团系统性重大课题(P2021J003); 中国铁道科学院集团有限公司院基金重点课题(2020YJ198)

第一作者: 王业腾(1998—),男,汉族,山东滨州人,硕士研究生。研究方向:列车空气动力学、气动优化设计。E-mail: wangyeteng20@mails.ucas.ac.cn。

\* 通信作者: 孙振旭(1983—),男,汉族,山东高密人,博士,副研究员。研究方向:列车空气动力学、气动外形优化、气动噪声。E-mail: sunzhenxu@imech.ac.cn。

早期,针对列车风的研究大多使用现场实测的方法<sup>[3-5]</sup>,实测的结果为各国制定列车铁路安全标准提供参考。现场实测的方法虽然可靠度高,但有着试验成本高、周期长的缺点,且无法有效评估处于设计阶段的列车的气动性能。随着计算流体力学方法的发展和计算资源的丰富,数值模拟成为探究列车风的高效手段。李人宪等<sup>[6]</sup>通过动网格方法研究3种车头形状下高速列车风对附近人体作用。Guo等<sup>[7]</sup>通过改进的延迟分离涡方法(improved delayed detached eddy simulation, IDDES)研究列车附属结构和列车长度对列车风的影响。Xia等<sup>[8]</sup>研究了地面效应对列车风和尾迹的影响,发现静止地面条件下大尺度纵向涡震荡更剧烈。郭婷等<sup>[9]</sup>对安装3种不同转向架的列车进行非定常数值模拟,研究转向架对列车风和尾迹的影响。韩运动等<sup>[10]</sup>采用数值模拟的研究方法得到列车风随环境风场变化的特征。

目前鲜见针对双层车厢动车组列车风特性的研究,现通过数值方法,模拟全尺寸双层车厢动车组以160、200、250、300、350 km/h 5种速度行驶的过程。通过分析风速和风压的空间分布规律,研究双层车厢动车组列车风分布特性,总结运行速度对列车风分布的影响规律。为双层车厢动车组的安全运行提供参考。

## 1 计算模型

### 1.1 动车组模型

研究对象是全尺寸1:1的五编组双层车厢动车组模型,如图1所示。动车组包括头车、尾车和第三节中间车厢,其中头车和尾车长26 m,中间车厢长22 m,全车长118 m。相比于单层高列车,双层列车明显

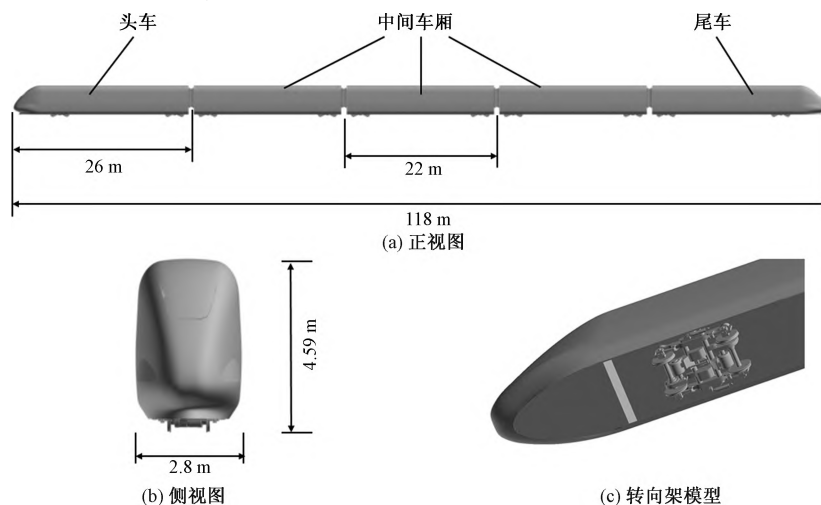


图1 双层车厢动车组几何模型

Fig. 1 Geometric model of double-deck EMU

更高,高度为4.59 m,车体宽度2.8 m。该列车模型头(尾)车形状比较“钝”,流线型段长度仅为4 m。此外,计算模型具有真实列车大部分几何特征包括10个转向架和车厢连接的风挡。为了提高计算效率,模型忽略了对列车风影响很小的受电弓组件。

### 1.2 计算域与网格设置

通过固定动车组模型,给定来流空气速度和地面速度模拟列车运行。计算域示意图如图2所示。为使流场发展充分,减少边界对列车周围流动的影响,头车前端气流入口边界的长度大约是160 m,尾车后端到气流出口边界的长度大约是260 m。计算域的宽度300 m、高度50 m。列车前方为速度入口边界,给定与列车运行速度方向相反的来流风速。列车后方采用压力出口条件。同时考虑列车运行的地面效应,设置地面为滑移壁面,滑移速度与来流速度相同,模拟车辆和地面间的相对运动。考虑到阻塞比不足0.1%,其余边界设置为光滑壁面条件。

计算网格通过商业软件STAR-CCM+构建,该软件集成了前处理器、计算流体力学求解器和后处

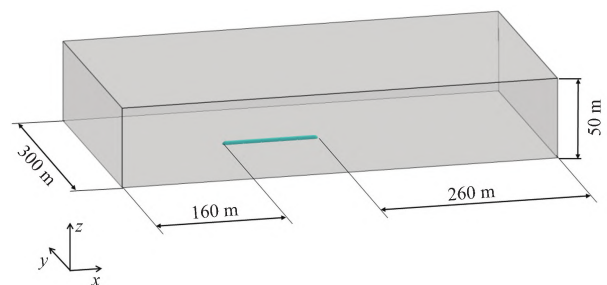


图2 计算域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation domain

理器,可以生成高质量的复杂网格。如图3所示,本文将计算域划分成3个不同网格密度的长方体区域,3个区域的网格尺寸分别是0.08、0.16、0.64 m。在转向架和风挡等附属部件区域进一步加密局部网格,使其有足够精细的网格捕捉复杂流动。为了有效表征边界层效应,在列车表面和地面构造了10边界层网格,网格增长率1.1。边界层网格总厚度0.02 m,首层无量纲网格高度 $30 < y^+ < 150$ 。本文利用STAR-CCM+中的高 $y^+$ 壁面处理模型使壁面网格满足湍流模型求解要求,该模型要求壁面网格落在边界层的对数区。网格总规模5500万。

### 1.3 求解计算

采用STAR-CCM+ 9.06.011商业软件进行流场求解计算。本文研究中列车行驶速度最高为350 km/h,马赫数小于0.3。因此,本文研究中涉及的列车运行工况均可忽略气体可压缩性的影响,控制方程为三维定常不可压缩N-S方程。湍流模型采用SST  $k-\omega$  双方程模型,该模型常用于模拟高速列车气动效应<sup>[11-12]</sup>。

## 2 计算验证

为了验证数值方法和网格策略的准确性,本文研究利用中国科学院力学研究所的高速列车双向动模型实验平台,对中国标准动车组CR400AF的简化模型进行动模型实验,并与数值计算结果比较。中国科学院力学研究所的高速列车双向动模型实验平台采用了压缩空气间接驱动模型加速和磁涡流作用减速模型的关键技术,可以实现模型缩比1:8,最高实验速度500 km/h的动模型实验。动模型实验能够完全模拟实车的运行状态,实现列车与地面的相对运动。本次实验研究对象为1:8缩比的中国标准动车组CR400AF的三编组简化模型,如图4(a)和图4(b)所示。高速列车模型车体表面压力测点采用针孔式预埋件将压力传感器固定于列车模型的车体壁面内侧,在车体外侧只有不易察觉的微小测孔。车载压力传感器选用的是Endevco 8530C型压阻式压力传感器,如图4(c)所示。

在300 km/h明线运行的工况下对比实验与数

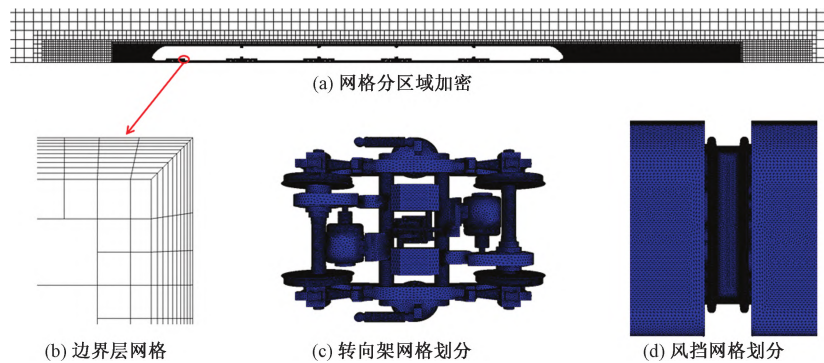


图3 计算网格

Fig. 3 Computational grid

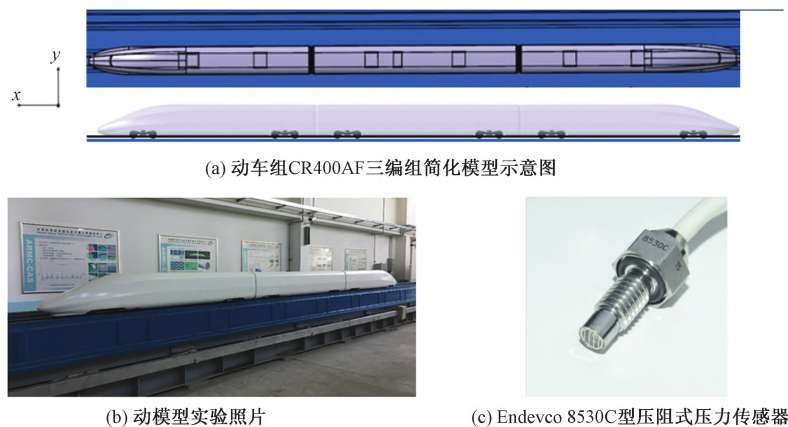


图4 动模型实验

Fig. 4 Moving model test

值模拟结果。数值模拟的网格策略与计算域设置与1.2节相同,并采用SST  $k-\omega$  湍流模型求解。动模型实验中,在头车车体表面纵向对称面轮廓线上设置压力采集孔。数值模拟中在相同位置布置测点如图5所示。数值模拟和实验的测点压力对比如图6所示。从图6中可以看出;数值模拟与动模型实验结果吻合得很好,验证了采用的数值模拟方法的准确性。

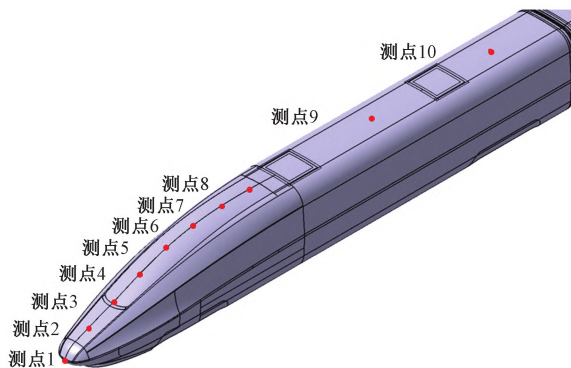


图5 压力测点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of pressure measuring point

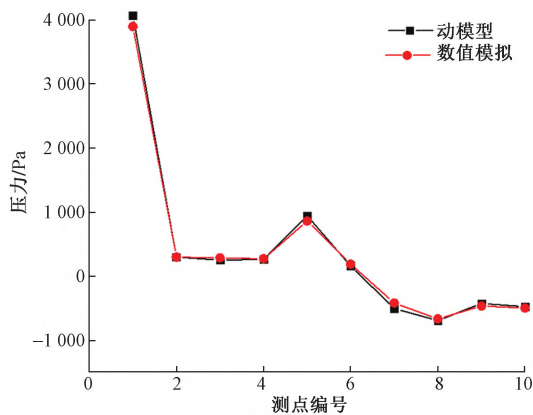


图6 动模型实验与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of dynamic model experiment and numerical simulation

### 3 结果与分析

计算结果分两个部分给出,第一部分分析双层车厢动车组模型周围的流场特性;第二部分对比不同运行速度下的列车风变化规律。为了方便分析计算结果,首先声明本文选定的参考系如下:速度入口的空气流动方向是  $X$  轴正方向,即列车运行的反方向;列车的右侧是  $Y$  轴正方向; $Z$  轴正方向竖直向上,由右手定则得出。 $X=0$  平面是列车长度方向的对称面, $Y=0$  平面是列车宽度方向的对称面,列车的最低点定义为  $Z$  轴的坐标原点。在数值仿真中,通过列车静止给定来流速度的方式模拟列车运

行,因此得到的流场速度以列车为参考系,而工程上关心以地面为参考的列车风。定义列车风速度的模为

$$V_M = \sqrt{(U - U_{\text{train}})^2 + V^2 + W^2} \quad (1)$$

式(1)中: $U$ 为列车参考系下流场的  $X$  方向速度; $V$ 为流场  $Y$  方向速度; $W$ 为流场  $Z$  方向速度; $U_{\text{train}}$ 为指定的列车运行速度,也是速度进口的来流速度。

#### 3.1 双层列车动车组流场特性

以200 km/h运行的动车组为例分析车周围流场特性和列车风的成因。图7是从地表到车顶各个高度水平截面的速度云图。从云图中可以观察到空气与列车的相互作用主要发生在4个区域:头车流线型区域、车体表面、转向架等附属结构和尾流区域。在头车流线型区域,列车前进过程中将前方的空气向前方和两侧推开,在鼻锥处形成压缩波,进而形成列车风。在车厢车体表面,空气由于黏性作用形成边界层,列车周围气体由剪切力作用形成列车风。在转向架和风挡等附属结构,这些结构会裹挟空气向前运动,同时扰动局部流场,导致边界层增厚或流动分离。第四部分在列车的尾流区,气流在尾车鼻锥附近分离形成旋涡,纵向涡的脱落诱导了强烈的列车风。通过定性对比不同高度列车风速度云图,发现随着高度的增加列车风逐渐减弱。这是因为在靠近地面的高度,地面效应和转向架等附属结构对流场的扰动作用大。在高度为  $Z=0.2, 0.6, 1.0$  m 的速度云图中可以看到明显的由转向架和风挡带来的边界层的扰动。此外尾流区域也明显更大,这是钝体绕流涡脱落和地面效应共同作用的结果。

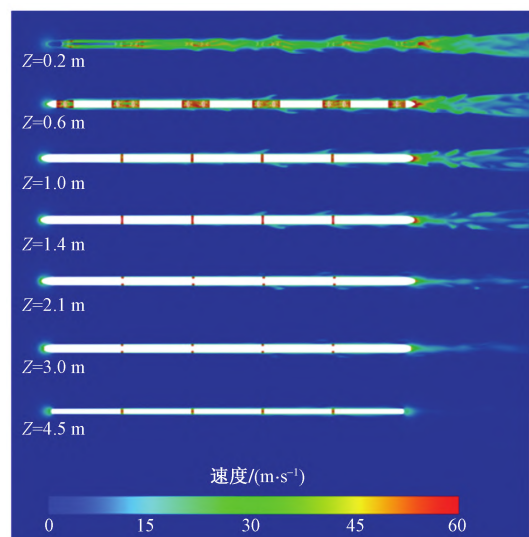


图7 不同高度水平截面速度云图

Fig. 7 Velocity contours of horizontal section at different heights

为了更加直观地描述列车周围流场结构,分析列车风产生的机理,图8展示了动车组周围流场的 $Q = 50$ 的等值面,图8中等值面的着色标量是列车风的风速。 $Q$ 准则表示为速度梯度的二阶不变量,常用于揭示流场旋涡结构。在图8中可以发现,列车风挡、转向架和尾流区域有明显的涡流结构,旋涡脱落大部分沿着列车长度方向分布。在尾流区域发生流动分离,有以一对贴近地面的对称流向涡为主导的高强度复杂涡流结构。

依据TSI列车风标准,列车风的速度测点位于距离轨道中心线3.0 m的地表以上区域,本文研究选取距离地面0.2 m和1.4 m高度的空间点作为速度测点,分析列车风速度的空间分布特性,结果如图9所示。对比两个高度的区域显著增加,这是由列车横截面形状变化造成的;在车厢平直段列车风风速降低,保持较低的数值;在3、4列车风空间分布,无论是峰值还是整体特性,较高测点的列车风风速小于较低测点。两个高度的列车风空间分布有相似的变化趋势,风速首先在头车流线型节车厢之间和4、5节车厢之间,由于转向架、风挡的扰流作用和车底与地面作用,诱导了较大强度列车风;风速的最大值出现在了尾流区域,该区域涡流强度最大。图10展示了距离车轨中心3 m,距离地面高度为1.4 m列车风风向的空间分布。分析图10可知,列车风速度方向以流向为主,与流向的最大偏转角不超过 $6^\circ$ 。风向偏转主要发生在头车和尾流区,在头车流线型附近列车风偏向外侧;在尾流区列车风偏向内侧,即轨道方向。

### 3.2 不同行驶速度列车风速度和压力特性

为了分析不同车速、高度和人车距离条件下双层动车组附近列车风的作用,本文研究设计了160、200、250、300、350 km/h 5种列车运行速度。并在距离轨道中心2.5、2.75、3.0 m;距离地面高度0.2、0.6、1.0、1.4、2.1、3.0 m的位置布置速度测点,如图11所示。

距离轨道中心3 m、高度0.2 m的测点在5个行驶速度下的列车风风速分布如图12所示。可以发现,不同行驶速度下列车风的空间分布规律是相似的。风速的最大峰值均出现在尾流区;在中间车

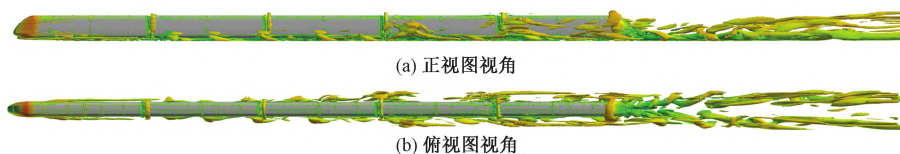


图8 流场 $Q = 50$ 等值面图  
Fig. 8 Flow field  $Q = 50$  iso-surface

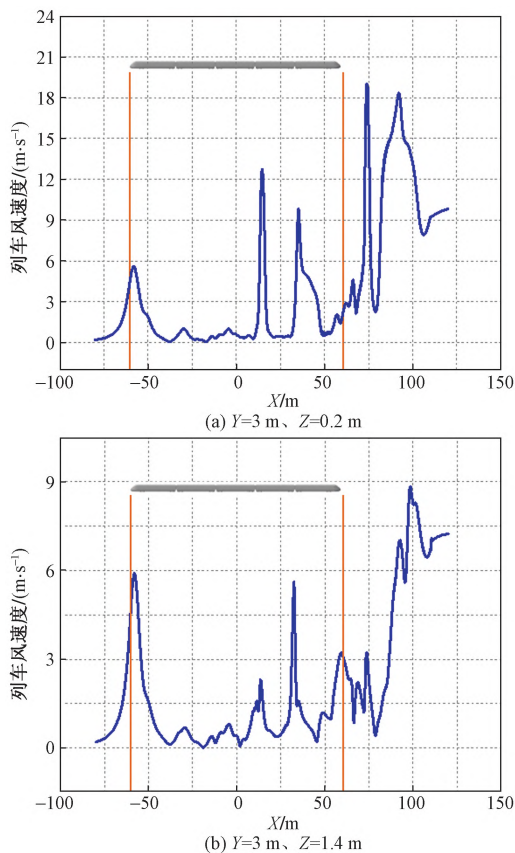


图9 测点列车风速度沿X方向变化曲线  
Fig. 9 The variation curve of train wind velocity at measuring point along X direction

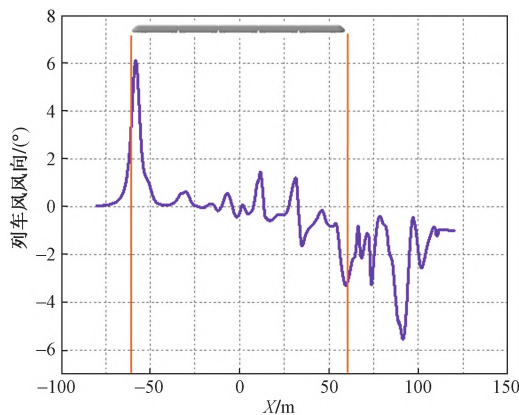


图10 测点 $Y = 3 \text{ m}, Z = 1.4 \text{ m}$ 列车风速度方向沿X方向变化  
Fig. 10 Change of train wind speed along X direction with measuring point  $Y = 3 \text{ m}, Z = 1.4 \text{ m}$

箱整体上列车风平缓,局部因转向架的扰流作用有较大强度列车风;在车头区域由于横截面变化很大,诱导了较大强度列车风。列车风的峰值随着行驶速度的增加而增加,最大风速从 15.1 m/s 增加到 45.7 m/s,列车风效应愈发明显。

因为不同行驶速度下,动车组车附近列车风的分布规律是相似的,故以 200 km/h 速度行驶的列车为例分析不同高度测点的列车风速度分布。图 13(a)是在 200 km/h 行驶速度下,距离轨道中心 3 m 不同高度测点的风速分布。可以观察到,不同高度的列车风最大值均出现在尾流区,而靠近地面的最大风速远高于距离地面较远的测点。 $Z = 0.2$  m 和  $Z = 0.6$  m 高度的风速分布很接近,因为两个测点高度都在转向架舱以下,受到转向架、风挡扰流作用和地面效应的直接影响。依据 TSI 1302—2014 标准,轨旁距离地面 0.2 m 高度处最大风速不

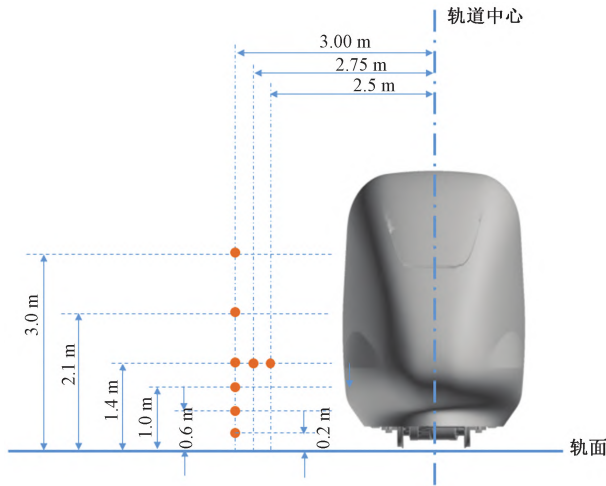


图 11 列车风风速测点示意图

Fig. 11 Schematic diagram of train wind speed measuring points

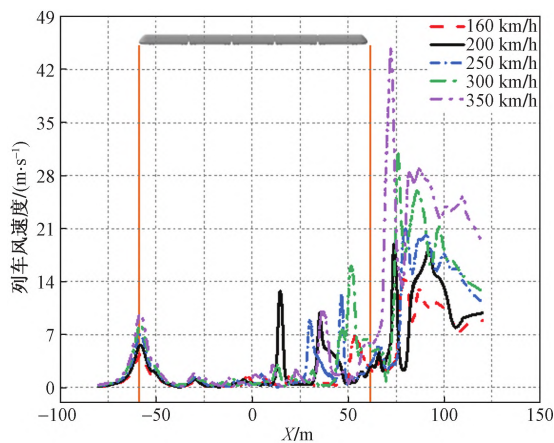


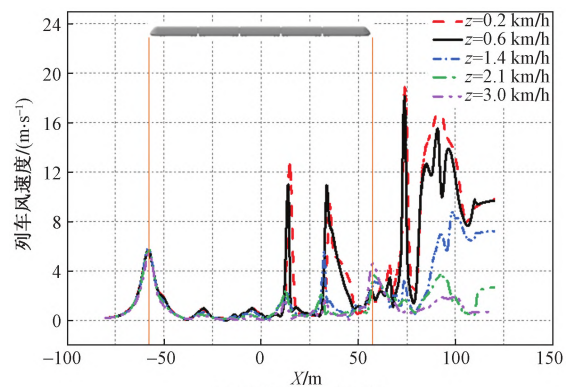
图 12 不同行驶速度条件下  $Y = 3$  m、 $Z = 0.2$  m 测点列车风速度分布

Fig. 12 Distribution of train wind speed at  $Y = 3$  m,  $Z = 0.2$  m measuring point under different driving speeds

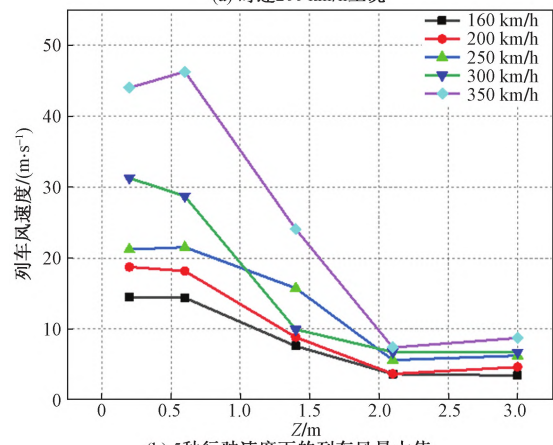
得超过 20 m/s,距离地面 1.4 m 高度处最大风速不得超过 15.5 m/s。图 13(b)是 5 种行驶速度下,距离轨道中心 3 m 不同高度测点的列车风速度最大值。由图 13 可知,行驶速度不高于 200 km/h 时列车风的速度满足安全标准。

图 14(a)是在 200 km/h 行驶速度下,距离地面高度 1.4 m,到轨道中心距离分别为 2.5、2.75、3.0 m 测点的风速分布。可以观察到距离轨道越近列车风风速的波动越大,受列车车体附属部件的影响越大。图 14(b)是 5 种行驶速度下,距离轨道中心不同远近测点的风速最大值。列车风随着距离轨道中心距离的增加而大幅衰减。

依据 TSI 车头压力脉冲标准,动车组以给定的速度低于 250 km/h 在户外运行,峰峰压力 ( $\Delta P$ ) 不应超过 800 Pa。本文考察列车压力的测点距离轨道中心线 2.5 m,距离地面高度 1.4 m 处,5 种行驶速度的测点压力分布如图 15 所示。不同行驶速度的列车周围的压力分布规律是相似的。在头车和尾车的流线型区域压力脉动大,车头附近为先正后负的压力脉动,而尾车附近则相反,压力脉动为先负后正。压力在中间车厢变化幅度较小。由图 15 可



(a) 时速 200 km/h 工况



(b) 5 种行驶速度下的列车风最大值

图 13  $Y = 3$  m 不同高度测点列车风速度分布

Fig. 13 The distribution of train wind speed at different heights of  $Y = 3$  m

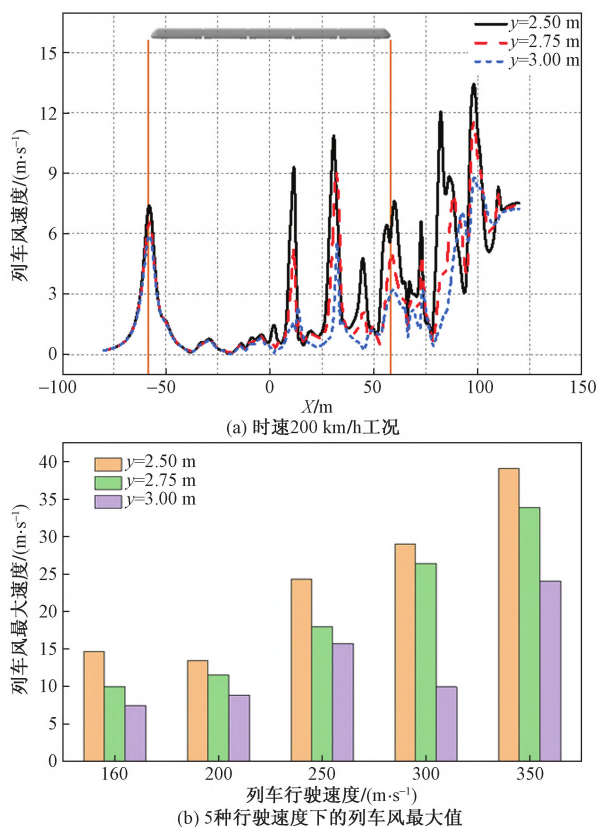


图 14  $Z = 1.4\text{ m}$  不同距轨道中心长度测点列车风速度分布  
Fig. 14 Distribution of train wind velocity at different measuring points of track center length at  $Z = 1.4\text{ m}$

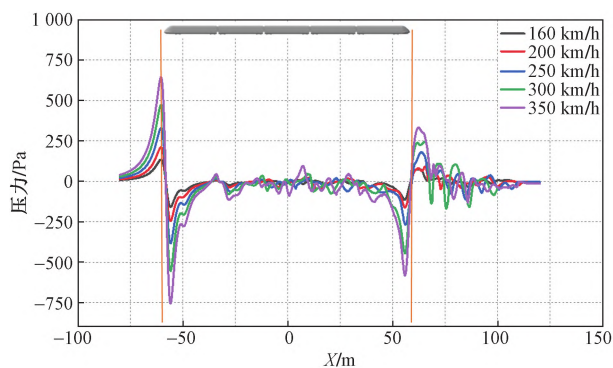


图 15 不同行驶速度条件下  $Y = 2.5\text{ m}$ 、 $Z = 1.4\text{ m}$  测点列车压力分布

Fig. 15 Train pressure distribution at  $Y = 2.5\text{ m}$ 、 $Z = 1.4\text{ m}$  measuring points under different driving speeds

知,当行驶速度小于等于  $250\text{ km/h}$ ,可以满足压力脉动要求。

## 4 结论

采用 SST  $k-\omega$  湍流模式数值模拟研究了以  $160$ 、 $200$ 、 $250$ 、 $300$ 、 $350\text{ km/h}$  速度行驶的双层车厢动车组周围的流场特性和列车风变化规律,得到如下结论。

(1) 行驶过程中主要由车头区域的气体压缩,车体表面的边界层增厚,附属结构对流场的扰动,地面效应和尾流区域的涡脱落 5 个作用诱导生成列车风,其中尾流区域的涡流结构诱导的列车风风速最大。

(2) 靠近地面的区域受到转向架等附属结构扰流作用和地面效应的直接影响,列车风强度大于远离地面的区域。

(3) 距离轨道中心  $3\text{ m}$  的列车风风速测点表明,行驶速度为  $160$ 、 $200\text{ km/h}$  的双层车厢动车组诱导的列车风风速符合《欧盟铁路系统机车车辆子系统互联互通技术规范》要求。

(4) 距离轨道中心  $3\text{ m}$ ,高度为  $1.4\text{ m}$  的列车风压力测点表明,行驶速度不高于  $250\text{ km/h}$  时,双层车厢动车组诱导的压力脉动满足要求。

## 参 考 文 献

- [1] Gilbert T, Baker C J, Quinn A. Gusts caused by high-speed trains in confined spaces and tunnels[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2013, 121: 39-48.
- [2] 丁云飞, 高焱, 包旭, 等. 草木沟隧道温度场实测与分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 5051-5059.  
Ding Yunfei, Gao Yan, Bao Xu, et al. Measurement and analysis of temperature field in Caomugou tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 5051-5059.
- [3] Liao S, Mosier P, Kennedy W, et al. Aerodynamic effects of high-speed trains on people and property at stations in the northeast corridor. safety of high-speed ground transportation systems[M]. Washington: Federal Railroad Administration, Office of Research and Development, 1999.
- [4] 徐鹤寿, 何德昭, 王厚雄. 准高速列车侧向人员安全距离的研究[J]. 中国铁道科学, 1996, 96(1): 21-31.  
Xu Heshou, He Dezhaoh, Wang Houxiang. Study on the safety distance of lateral personnel of quasi high-speed train[J]. China Railway Science, 1996, 96(1): 21-31.
- [5] Baker C, Dalley S, Johnson T, et al. The slipstream and wake of a high-speed train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215(2): 83-99.
- [6] 李人宪, 赵晶, 张曙, 等. 高速列车风对附近人体的气动作用影响[J]. 中国铁道科学, 2007(5): 98-104.  
Li Renxian, Zhao Jing, Zhang Shu, et al. Aerodynamic effect of high-speed train wind on nearby human body[J]. China Railway Science, 2007(5): 98-104.
- [7] Guo D L, Shang K M, Zhang Y, et al. Influences of affiliated components and train length on the train wind[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(2): 191-205.
- [8] Xia C, Wang H, Shan X, et al. Effects of ground configurations on the slipstream and near wake of a high-speed train[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2017, 168: 177-189.
- [9] 郭婷, 夏超, 储世俊, 等. 不同转向架构型对高速列车列车风

- 及非定常尾迹的影响[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(2): 94-104.
- Guo Ting, Xia Chao, Chu Shijun, et al. Effects of different bogie configurations on wind and unsteady wake of high-speed trains[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(2): 94-104.
- [10] 韩运动, 陈大伟, 刘韶庆, 等. 不同风速风向条件下的列车风特性[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(6): 104-111.
- Han Yundong, Chen Dawei, Liu Shaoqing, et al. Train wind characteristics under different wind speeds and directions [J]. China Railway Science, 2018, 39(6): 104-111.
- [11] 赵萌, 刘晓禹, 贾彦, 等. 高速列车受电弓不同姿态下气动特性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5468-5475.
- Zhao Meng, Liu Xiaoyu, Jia Yan, et al. Aerodynamic characteristics of high-speed train pantograph in different operation[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5468-5475.
- [12] 刘玉标, 张营营, 邢云林, 等. 定常横风作用下高速列车的安全性分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(8): 75-82.
- Liu Yubiao, Zhang Yingying, Xing Yunlin, et al. Safety analysis of high speed train under steady crosswind[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(8): 75-82.