

强侧风作用下带制动风翼板高速列车周围流场结构分析

谢红太^{*1,2}

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 华设设计集团股份有限公司 铁道规划设计研究院, 江苏 南京 210014)

摘要: 基于三维定常不可压的黏性流场 N-S 及 $k-\epsilon$ 双方程模型, 采用计算流体力学方法对不同风向角强侧风作用下带制动风翼板高速列车及风翼板表面时均压力分布规律、周围时均流动结构及瞬态流动结构等气动效应进行了数值模拟。初步研究结果表明: 强侧风影响下, 列车外围流场结构复杂多变, 随着风向角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内逐渐增大, 头车首排制动风翼板前后形成的高压区和低压区、头车司机室上方形成的低压区、尾车司机室与车身连接处形成的低压区及车顶形成的低压区影响范围呈先扩大后逐渐缩小的变化趋势; 同时随着风向角的逐渐增大, 列车头车和尾车鼻尖处形成的高压区域影响范围逐渐变小、减弱。

关键词: 高速列车; 空气动力学; 气动特性; 制动风翼板; 风阻

中图分类号: U266.2

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202202011

0 引言

半个多世纪以来, 高速列车实现了从 1964 年的时速 220 km 到 2017 年的中国商业列车运营时速达 350 km 的迅速提升, 随着更高等级的列车相继问世, 高速列车空气动力学问题显得愈为重要^[1-3]。列车空气动力学现象与列车运行速度和运行环境有着紧密联系, 具有复杂多变的气动特性, 尤其在空气运行环境较差的地段及应对突发恶劣天气变化的情况下更为突出。如列车高速运行过程中的气动阻力问题及列车在强侧风下的横向、纵向、垂向受力不稳定性问题等^[4-7]。

相关研究表明^[1,8-9] 高速列车风阻制动普遍采用于车顶或车体两侧安装制动风翼板的方式, 在列车大于一定速度运行时启用制动。风阻制动是一种全新的制动方式, 制动时, 用车顶展开的风翼板增加空气阻力来产生制动力, 该制动方式产生的空气动力阻力与速度平方成正比, 速度越高则风阻制动力越大, 在高速运行时制动性能越明显, 同时可做到无电制动安全要求, 且充分利用空气动力这种清洁、自然的能源, 具有节能环保的意义。其缺点是在车体的端部安装风阻制动装置, 需

对车体进行改造, 削弱了车体强度; 制动风翼在展开工作后, 会改变列车周围的流场, 对列车过隧道、小曲率半径线路运行、会车或者横风下运行时都会产生一定的影响。

随着对高速列车风阻制动系统的进一步深入研究, 逐渐在高速列车制动风翼板形状选择、外形尺寸选择、车顶及车侧的安放布置、风翼板迎风角度确定、气动阻力有效性分析、噪声影响、列车行车安全影响、环境影响、铁路限界安全性评价及舒适性评价等方面有了一定可参考数据。本文将重点针对 30 m/s 强侧风作用下带制动风翼板高速列车气动效应进行初步分析研究。

1 计算模型

1.1 控制方程组

列车气动问题可归结为流体运动问题, 而任何一个流场流动问题均可用非稳态的 N-S 方程描述^[10-12]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2021-05-09; 修回日期: 2022-01-05.

基金项目: 兰州交通大学青年科学基金资助项目(2017011, 2019015); 华设设计集团股份有限公司科技项目(KY2021075).

作者简介: 谢红太^{*}(1993-), 男, 硕士, 工程师, E-mail: 1144212853@qq.com.

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \quad (3)$$

在对高速列车进行 CFD 数值模拟分析计算时采用三维定常不可压黏性流场,其中外流场的湍流运动采用 $k-\epsilon$ 湍流方程模型^[13],即湍动能方程和湍动能耗散率方程,如式(4)、(5)所示。

湍动能方程:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (4)$$

湍动能耗散率方程:

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} G_b) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

式(1)~(6)中: ρ 为流体的密度; p 为静压力; τ_{ij} 为应力; ρg_i 是*i*方向的重力分量; $\mu = \mu_t + \mu_l$,为有效黏性系数; $F_i = \rho f_i$,是由阻力和能源引起的其他能源项; h 为焓; T 为温度; k_t 是由紊流传递而引起的传导率; S_h 为定义的任何体积热源; u_i 、 u_j 为流体沿*i*、*j*方向的速度分量; x_i 、 x_j 为横坐标; C_μ 、 $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 、 $C_{\epsilon 3}$ 、 σ_k 、 σ_ϵ 为系数,取值文献^[14]; G_k 是由浮力产生的湍流动能; G_b 是由层流速度梯度产生的湍流动能; k 为湍动能; ϵ 为湍动能耗散率; i 、 j 为哑标。

1.2 带风翼板列车计算模型

结合本研究团队目前研究技术成果及现有高速列车风阻制动方面研究资料^[7,15-17],初步得出:

(1)首排风阻制动板的位置距离头车车身与司机室流线形连接处越往后,风翼板产生的制动力越低,其中在 200~500 mm,制动力大小基本不变;但在风翼板迎风面表面所受压力均匀性、高速运行时制动平稳性及风翼板安装组件使用可靠性等随着距离连接处越往后越好,列车点头运动现象也可得到轻微缓解。同时制动板的开合角度为 75° 时最优。

(2)列车头车车顶最大等间距布置多组制动风翼板时,随着风翼板布置组数的增多,制动风翼板间气动干扰效应逐渐增强,风翼板迎风面受压呈现第 1 组远大于后续各组,同时后续各组压力

峰值基本保持一致,略有波动的现象。

(3)当以最大间距布置风翼板组数大于 2 时,随着组数的增多所产生的空气制动力缓慢增加,阻力系数大于 0.29,所产生的垂向升力基本维持稳定,升力系数约为 2.1×10^{-3} 。

1.2.1 高速列车及风翼板计算模型建立

(1)风翼板形状尺寸参数设置

针对现有对高速列车前排制动风翼板位置、迎风角度及纵向布置排数选择等方面的研究技术成果,本文模型计算风翼板采用宽×高($l_0 \times h'$)的长方形结构^[12],其中制动风翼板纵向投影面积 $S_0 = l_0 \times h = 0.956 \text{ m}^2$,厚度为 40 mm,于车顶面呈迎风角 $\gamma = 75^\circ$,横向对称布置,如图 1 所示。

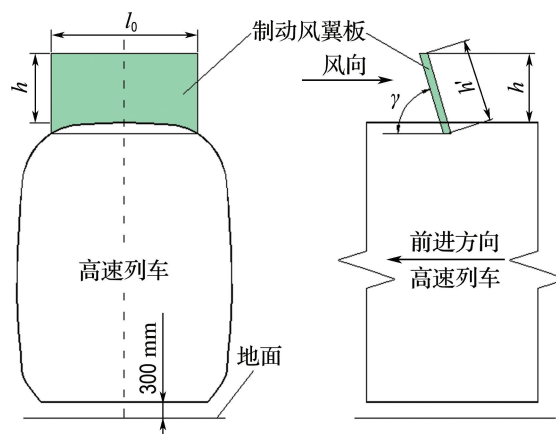


图1 高速列车制动风翼板结构参数

Fig.1 Structural parameters of brake wind wing panels for high-speed train

(2)风翼板纵向位置设置

结合现有研究技术成果,为保证高速列车头车流线形设计以及考虑制动风翼板的安放空间需求,本文选取距离头车车身与司机室流线形连接处 D_0 点往后 500 mm,单排设置。

(3)流体计算三维模型创建

利用 CATIA 软件依次完成国内某型高速列车头车司机室、车身及风翼板三维结构,为了能够较为准确直观地模拟高速列车在空气中的运行情况,本文在气动阻力分析时,整车计算几何模型采用 3 辆编组 1:1 实车模型,即头车、中间车及尾车连挂,模拟计算时简化车底、车侧门窗、车顶受电设备、车端连接处等结构,采用实体相接。

1.2.2 计算区域及网格划分 高速列车在侧风情况下速度矢量关系如图 2 所示,其中 v_t 为列车速度, v_w 为风速, v 为合成速度, β 为风向角, θ 为

偏航角. 满足如下关系式:

$$v = \frac{1}{\cos \theta} (v_t + v_w \cos \beta) \quad (7)$$

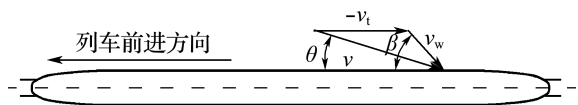


图 2 高速列车有效侧风

Fig. 2 High-speed train effective crosswind

分别根据研究方案计算调整不同风向角 β 对应的偏航角 θ 及合成速度 v , 建立计算流体动力学模型, 其中计算外流场模型详见文献[18-20], 如图 3 所示, 取高速列车全长为 L , 长方体外流场模型长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $= 4L \times 2L \times L$, 高速列车计算模型位于外流场模型中部, 以列车模型中心点为参考点, 其中中心点距离流场入口面 $1.5L$, 距离出口面 $2.5L$, 列车底部距流场下壁面设 $0.3m$.

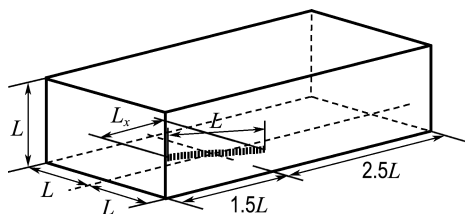


图 3 带制动风翼板高速列车模型计算网格划分

Fig. 3 Calculation grid division of high-speed train model with brake wind wing panel

网格划分采用全局网格与局部网格相配合叠加的处理模式, 全局初始网格级别设为 4, 列车及周围 $10m$ 、制动风翼板范围内采用局部网格划分, 网格级别分别设为 5 和 7 逐级加密的方式, 并采用自动高级局部细化相结合.

1.2.3 边界条件及目标参数设定 计算外流场给定垂直于入口截面的来流速度, 充分发展流动, 热动力参数: $p = 101\,325\text{ Pa}$, $T = 293.2\text{ K}$. 出口边界条件设为压力出口, 车体表面及制动风翼板为无滑移壁面边界条件, 外流场上表面和侧面设为无滑移光滑壁面边界条件. 采用式(1)~(6)所述三维定常不可压黏性流场 N-S 及 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型进行数值求解.

2 侧风作用下简化列车模型周围的流动

列车在强侧风中运行时, 尾迹流动中的回流

导致在迎风侧形成高压滞止区, 在背风侧形成低压区, 且流体高速流过列车顶部时, 在列车上侧形成低压区, 这些高压区和低压区形成的压差是列车承受气动力和气动力矩的主要原因. 同时列车头部、制动风翼板区域、转向架区域复杂流动、车身的湍流边界层和车尾的旋涡是产生气动噪声的重要来源. 因此清晰明确带制动风翼板高速列车在侧风作用下周围的流场结构是非常有必要的.

2.1 列车及风翼板表面时均压力分布

列车表面压力分布一般采用压力系数 C_p 表示:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (8)$$

式中: p 为测试点压力, Pa; ρ 为标准大气压下空气密度, kg/m^3 ; p_∞ 为计算系统环境气压, 该计算模拟系统为标准大气压, Pa; v 为合成速度, m/s.

列车速度 $v_t = 350\text{ km/h}$, 风速 $v_w = 30\text{ m/s}$, 风向角 $\beta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 时带首排制动风翼板高速列车头车和尾车纵向对称面上流场压力分布如图 4 所示.

从图 4 可知, 350 km/h 高速列车在不同风向角的强侧风影响下, 列车外围流场结构复杂多变, 随着风向角 β 在 $30^\circ \sim 150^\circ$ 内逐渐增大, 头车首排制动风翼板前后形成的高压区和低压区、头车司机室上方形成的低压区、尾车司机室与车身连接处形成的低压区及车顶形成的低压区影响范围呈先扩大后逐渐缩小的变化趋势. 同时随着风向角 β 的逐渐增大, 列车头车和尾车鼻尖处形成的高压区域影响范围逐渐减弱.

分别提取如图 5 所示带制动风翼板列车纵向对称面上部外流场与列车截面接触线, 以头车排障板下底部点为长度位置计算原点, 尾车排障板下底部点为长度位置终点. 其中首排制动风翼板在列车纵向对称面上安装设计中心位置为 $x = 11.146\text{ m}$ 处, 前后与车顶表面接触点位置分别为 $x = 10.536\text{ m}$ 及 $x = 11.833\text{ m}$ 处.

分别计算列车速度 $v_t = 350\text{ km/h}$, 风速 $v_w = 30\text{ m/s}$, 风向角 $\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 170^\circ, 180^\circ$ 时带首排制动风翼板高速列车纵向对称面接触线上车身表面压力分布如图 6 所示. 随着风向角 β 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内逐渐增大, 列车头车鼻尖滞止点、风翼板前后侧及尾车司机室处压力峰值逐渐减小. 同时随着风向角增大列车车顶部负压逐渐加强, 约 $\beta = 110^\circ$ 时达到最大负压状态, 随后回落减弱.

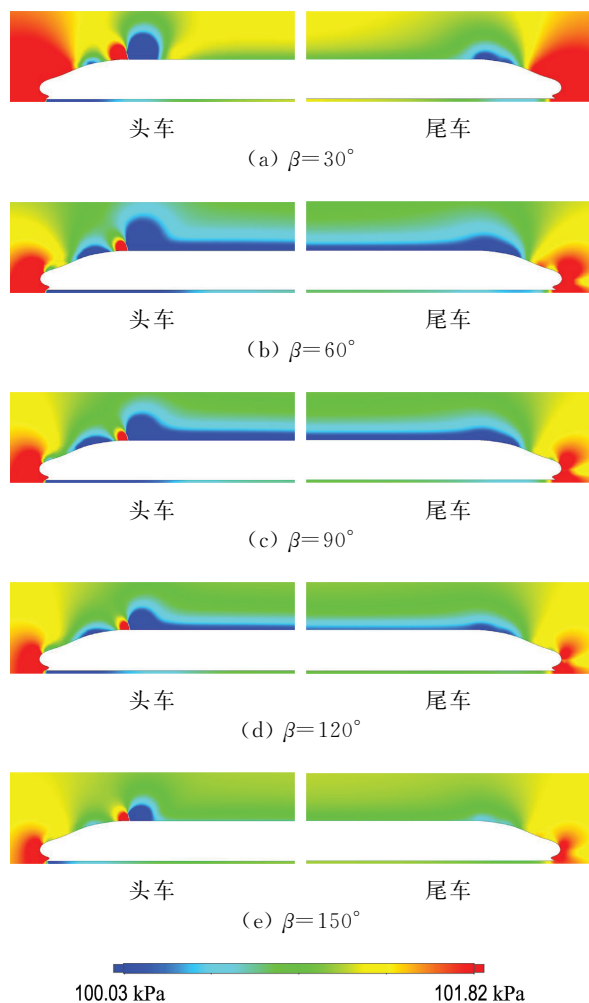


图4 列车纵向对称面上流场压力分布

Fig. 4 Flow field pressure distribution on the longitudinal symmetry plane of the train

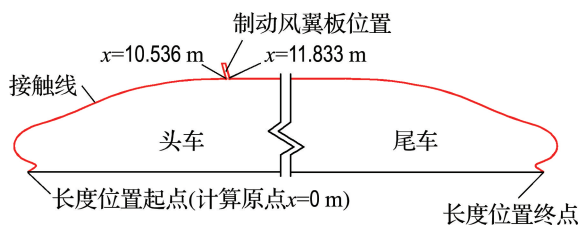


图5 列车纵向对称面轮廓线提取示意图

Fig. 5 Schematic diagram of extracting the contour line of the longitudinal symmetry plane of the train

为了更直观清晰地分析带制动风翼板高速列车沿长度方向每一个横截面上压力分布情况,分别提取如图7所示的测试断面.列车头车司机室与车身过渡连接处、车身与对应车尾过渡连接处分别记为 D_0 、 D_1 ,纵向距离为 l ,测试截面距离 D_0 点的距离记为 x ,沿列车长度方向从前至后依次提取 $x/l=0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0, 1.1, 1.2$ 及 $x/l=$

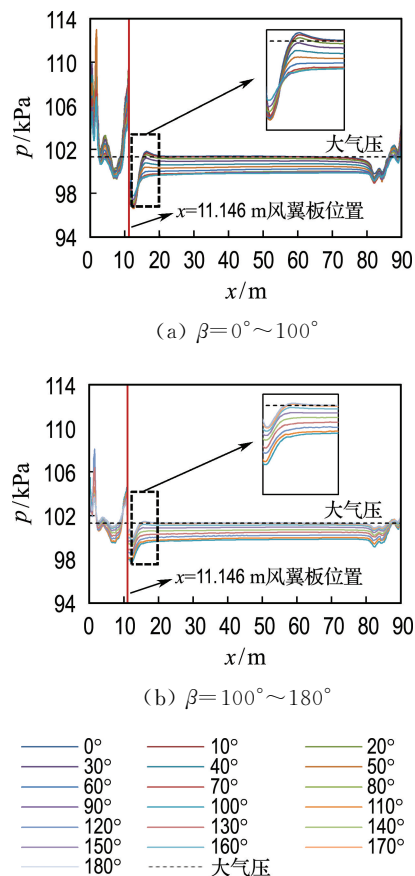


图6 列车纵向对称面上部轮廓线压力曲线

Fig. 6 Pressure curve on the upper contour line of the longitudinal symmetry plane of the train

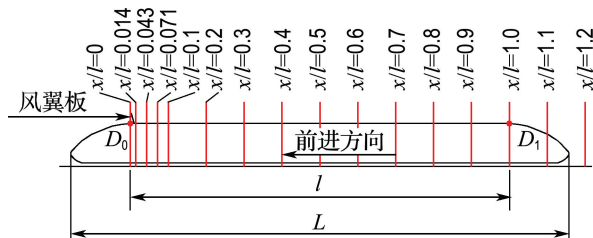


图7 列车纵向位置断面提取示意图

Fig. 7 Schematic diagram of extracting longitudinal section of train

0.014, 0.043, 0.071 处横截面.其中制动风处于距离 D_0 点500 mm处, $x/l=0.007$.

在提取的每一个横截面上如图8所示以车底中心点为原点逆时针方向建立车体外轮廓线长度位置点处列车表面压力变化曲线.

分别计算列车速度 $v_t=350$ km/h,风速 $v_w=30$ m/s,风向角 $\beta=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 时带首排制动风翼板高速列车横向各测试截面轮廓线上车身表面压力分布情况如图9所示.

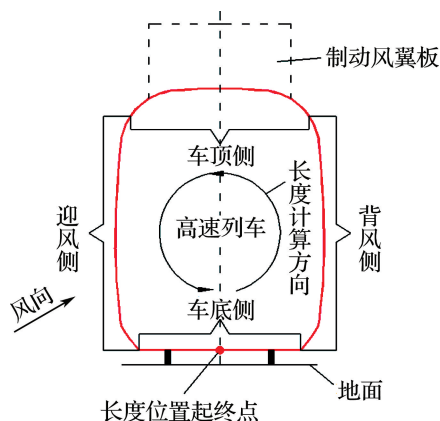


图 8 列车横断面轮廓线提取示意图

Fig. 8 Schematic diagram of train cross-sectional contour line extraction

如图 9 所示,列车在侧风影响下横向截面外轮廓线主要呈现出车顶侧不稳定低压区、车底侧稳定低压区、背风侧波动低压区及迎风侧稳定高压区 4 个压力分布区间. 在列车长度方向上列车制动风翼板前后分别形成较大正压区和负压区,波动变化明显.

分别计算列车速度 $v_t = 350 \text{ km/h}$, 风速 $v_w = 30 \text{ m/s}$, 风向角 $\beta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 时首排制动风翼板迎风面表面压力分布情况, 如图 10 所示. 随着风向角的增大风翼板表面最大高压区从风翼板中心位置逐渐向车体迎风侧偏移并减弱, 表面整体受压由高压差逐渐趋于均衡.

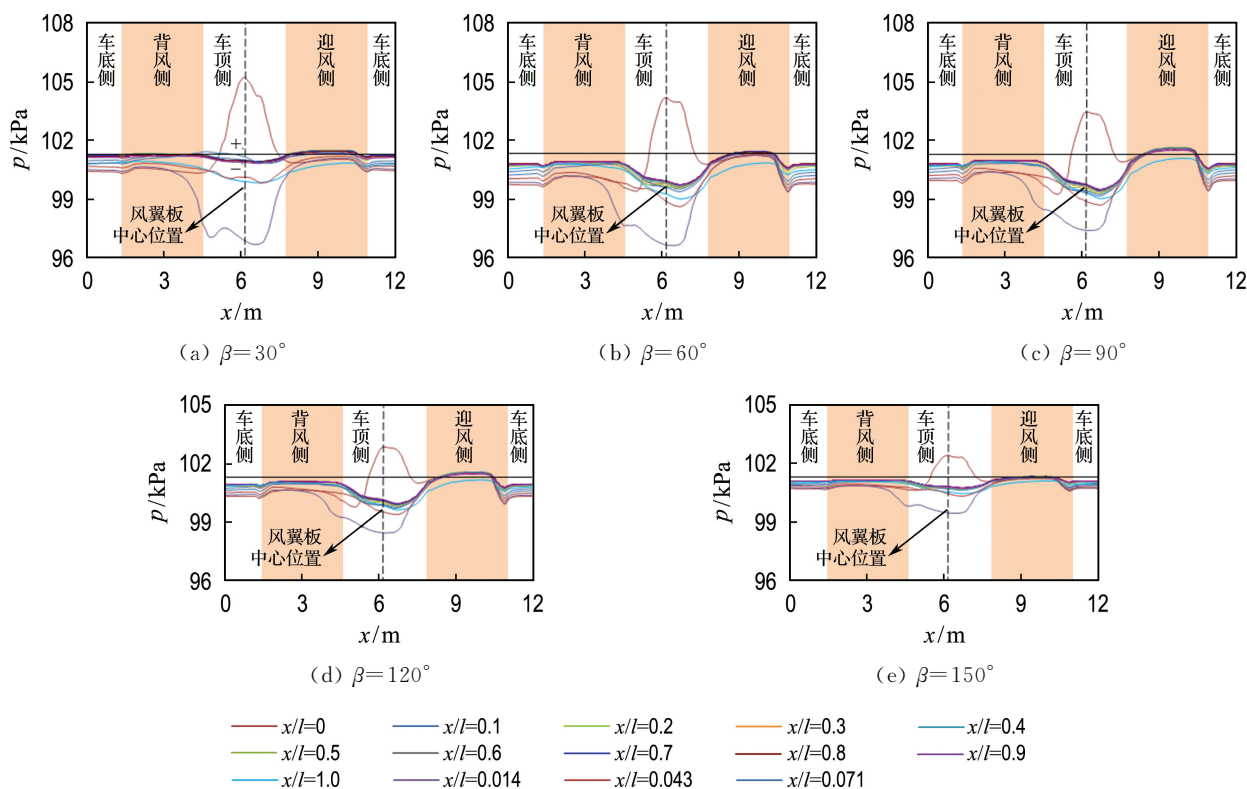


图 9 不同风向角列车横断面轮廓线压力分布

Fig. 9 Pressure distribution on the train cross-sectional contour line at different wind direction angles

风翼板迎风面所受最大压力 $p_{\max}$ 、最小压力 $p_{\min}$ 及平均压力 p_{ave} 随风向角变化情况如图 11 所示, 其中最大压力随风向角增大而逐渐减小, 相反, 最小压力随风向角增大而逐渐增大, 局部出现部分波动变化. 所受平均压力随着风向角的增大而逐渐平稳减小, 其中 $\beta = 30^\circ \sim 110^\circ$ 时减小趋势较为明显, $\beta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 及 $\beta = 110^\circ \sim 180^\circ$ 时减小趋

势明显趋缓.

2.2 列车及风翼板周围流动结构

分别计算列车速度 $v_t = 350 \text{ km/h}$, 风速 $v_w = 30 \text{ m/s}$, 风向角 $\beta = 90^\circ$ 时列车 $x/l = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0, 1.1, 1.2$ 处横截面上流线, 如图 12 所示. 根据不同截面流线图可知在侧风影响下列车背风侧形成 2 个比较明显的涡系, 其中靠近地面的涡

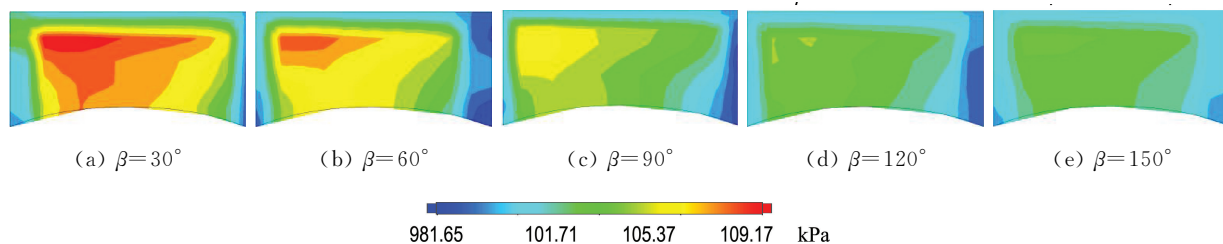


图10 不同风向角制动风翼板表面压力分布

Fig. 10 Pressure distribution on the surface of the brake wind wing panel corresponding to different wind direction angles

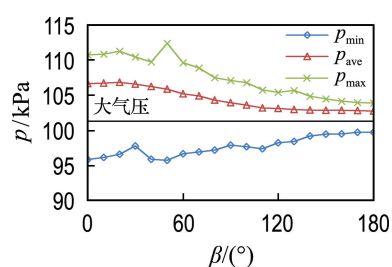


图11 不同风向角制动风翼板表面压力曲线

Fig. 11 Pressure curves on the surface of brake wind wing panel corresponding to different wind direction angles

系位置比较稳定,始终局限在背风侧下部拐角位置,而远离地面的涡系,越向下游发展强度越大,影响范围也越广.最先起始于列车头部的旋涡

V_{c1} 附着在列车背风侧上表面且旋涡尺寸逐渐增大,约 $x/l=0.4$ 处逐渐脱落.旋涡 V_{c2} 在列车头部背风侧下侧生成,并迅速于 $x/l=0.6$ 处开始脱离车身表面,同时在列车背风侧下游逐渐分离形成旋涡 V_{c3} ,快速向下游尾迹传输,于约 $x/l=1.0$ 处迅速衰减脱落.约 $x/l=0.7$ 处列车背风侧下部分离形成1个强旋涡 V_{c4} ,在列车长度方向上尺寸逐渐增大,于约 $x/l=1.1$ 处逐渐衰减脱落,同时在列车尾部鼻尖区域由于流体脱落形成脱离旋涡 V_{c5} .

结合图4列车纵向对称面上流场压力分布,高速运行时列车头车首排制动风翼板前后形成了巨大高压区和低压区,前部高压区促使列车前部司机室上方的负压区前移,且随着侧风风向角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 增大而逐渐减弱.图13反映出在风翼板

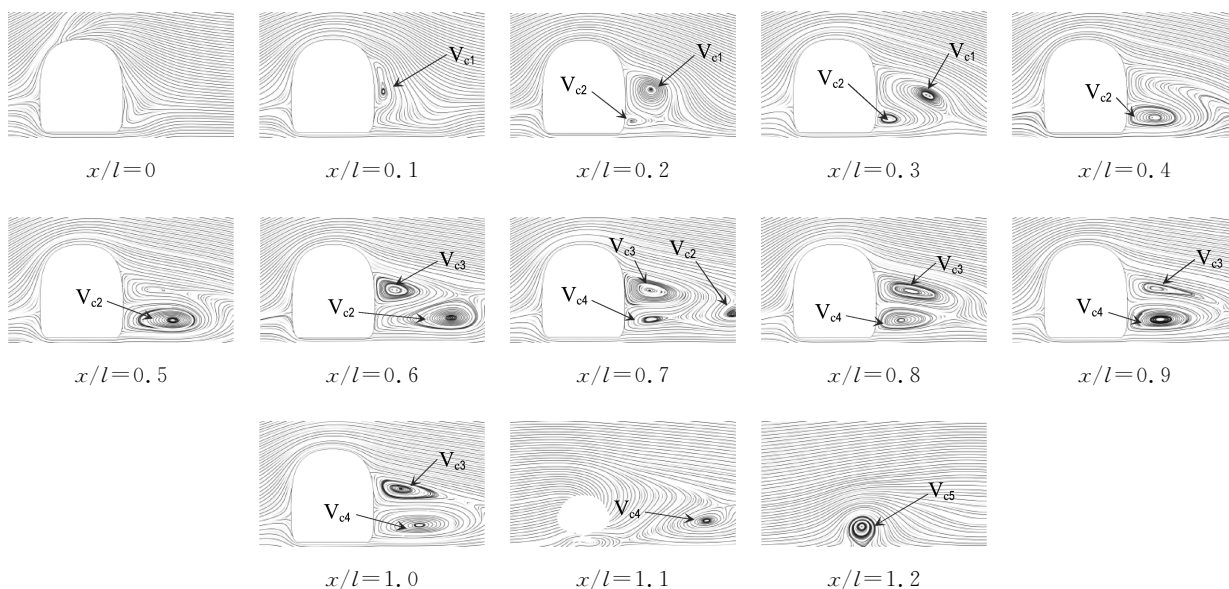


图12 带制动风翼板列车外围横截面流线图

Fig. 12 Streamline diagram of the outer cross-section of the train with brake wind wing panel

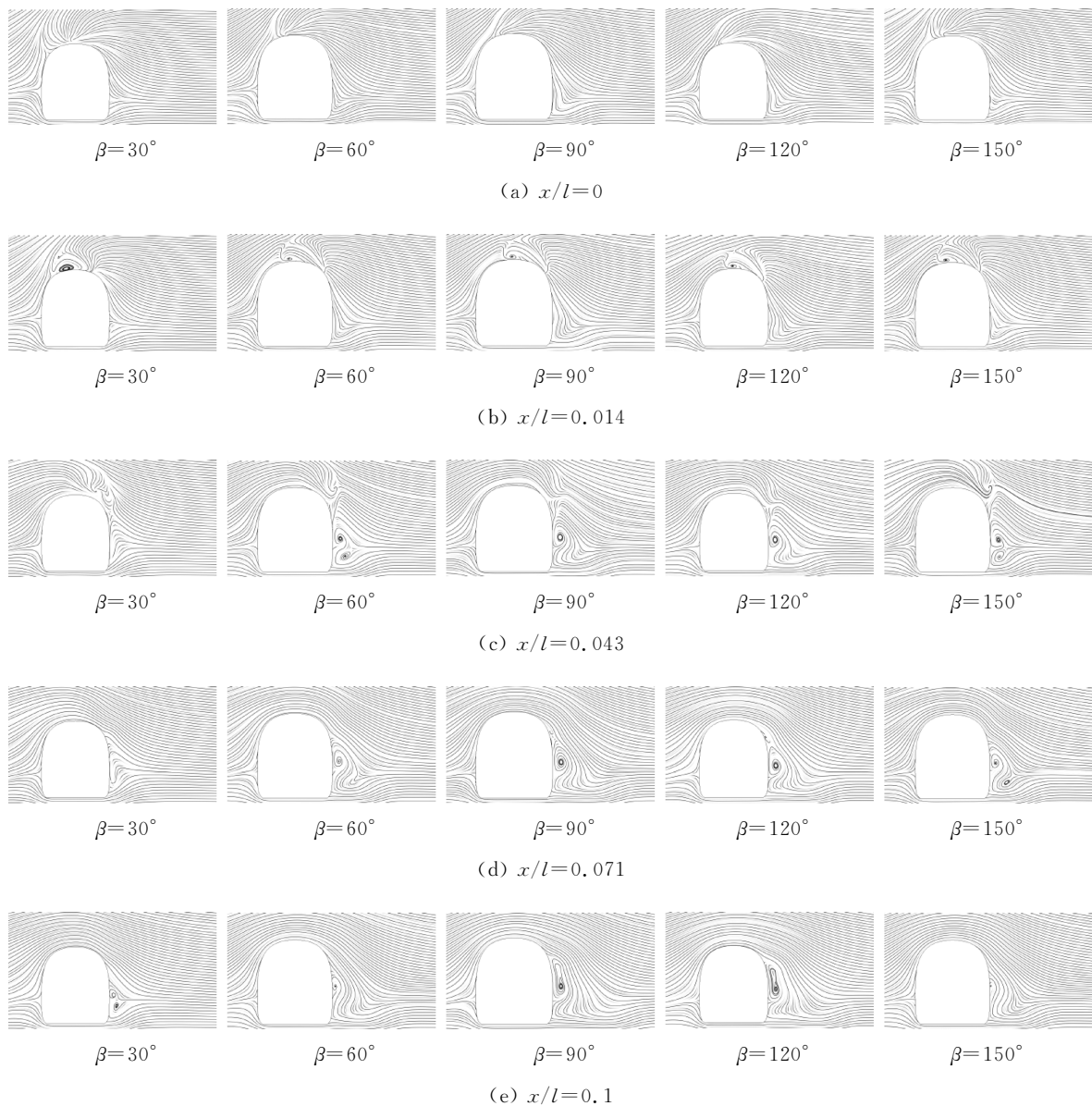


图 13 制动风翼板前后列车横截面流线图

Fig. 13 Streamline diagram of the train cross-section at the front and rear sides of the brake wind wing panel

前侧 $x/l=0$ 处横向截面上,随着风向的变化,流线基本保持从迎风侧向背风侧平缓过渡,无明显较大旋涡产生.在风翼板后侧 $x/l=0.014$ 处横向截面上,由于流体分离产生 1 个较小旋涡,且随着风向角逐渐增大从迎风侧向背风侧逐渐移动,影响范围逐渐减小.在风翼板后侧 $x/l>0.1$ 后风翼板对整个列车外围流场结构影响逐渐减弱.

综上流场结构对比分析,带制动风翼板高速列车在侧风影响下周围时均流动结构如图 14 所示.

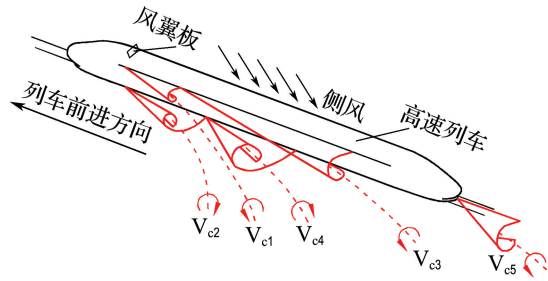


图 14 高速列车周围时均流动结构示意图

Fig. 14 Time-averaged flow structure diagram around high-speed train

3 结 论

(1)强侧风影响下,列车外围流场结构复杂多变,随着风向角在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 内逐渐增大,头车首排制动风翼板前后形成的高压区和低压区、头车司机室上方形成的低压区、尾车司机室与车身连接处形成的低压区及车顶形成的低压区影响范围呈先扩大后逐渐缩小的变化趋势;同时随着风向角的逐渐增大,列车头车和尾车鼻尖处形成的高压区域影响范围逐渐变小、减弱。

(2)强侧风影响下,风翼板迎风面所受最大压力随风向角增大而逐渐减小;相反,最小压力随风向角增大而逐渐增大,局部出现部分波动变化,所受平均压力随着风向角的增大而逐渐平稳减小。

(3)强侧风影响下,风翼板迎风面声学能量等级随着风向角逐渐增大,最大、最小及平均值均逐渐减小,其中最大声学能量等级局部波动变化较为明显。

参考文献:

- [1] 田红旗. 列车空气动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 171-185.
TIAN Hongqi. *Train Aerodynamics* [M]. Beijing: China Railway Press, 2007: 171-185. (in Chinese)
- [2] BAKER C. The flow around high speed trains [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, **98**(6/7): 266-298.
- [3] 杨国伟, 魏宇杰, 赵桂林, 等. 高速列车的关键力学问题 [J]. 力学进展, 2015, **45**(1): 217-460.
YANG Guowei, WEI Yujie, ZHAO Guilin, *et al.* Research progress on the mechanics of high speed rails [J]. *Advances in Mechanics*, 2015, **45**(1): 217-460. (in Chinese)
- [4] 梅元贵, 周朝晖, 许建林. 高速铁路隧道空气动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
MEI Yuangui, ZHOU Zhaohui, XU Jianlin. *Aerodynamics of High Speed Railway Tunnels* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [5] LEE M K, BHANDARI B. The application of aerodynamic brake for high-speed trains [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, **32**(12): 5749-5754.
- [6] 孙文静, 田 春, 周劲松, 等. 高速列车空气动力学制动会车动力学性能 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, **42**(9): 1401-1407.
SUN Wenjing, TIAN Chun, ZHOU Jinsong, *et al.* Dynamics performance of high-speed train with aerodynamic brake under crossing [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, **42**(9): 1401-1407. (in Chinese)
- [7] 高立强, 奚 鹰, 王国华, 等. 基于 CFD 的高速列车空气动力制动风翼板型研究 [J]. 中国工程机械学报, 2015, **13**(3): 236-241.
GAO Liqiang, XI Ying, WANG Guohua, *et al.* CFD-based study on aerodynamic brake wind-panel forms for high-speed train [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2015, **13**(3): 236-241. (in Chinese)
- [8] 田 春, 吴萌岭, 任利惠, 等. 空气动力制动研究初探 [J]. 铁道车辆, 2009, **47**(3): 10-12.
TIAN Chun, WU Mengling, REN Lihui, *et al.* Initial discussion of research in aerodynamic brake [J]. *Rolling Stock*, 2009, **47**(3): 10-12. (in Chinese)
- [9] TIAN Hongqi. Formation mechanism of aerodynamic drag of high-speed train and some reduction measures [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, **16**(1): 166-171.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 24-50.
WANG Fujun. *Computational Fluid Dynamics Analysis-CFD Software Principle and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 24-50. (in Chinese)
- [11] 李 田, 张继业, 张卫华. 横风下高速列车通过挡风墙动力学性能 [J]. 铁道学报, 2012, **34**(7): 30-35.
LI Tian, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Dynamic performance of high-speed train passing windbreak in crosswind [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, **34**(7): 30-35. (in Chinese)
- [12] 李 田, 张继业, 张卫华. 高速列车流固耦合的平衡状态方法 [J]. 机械工程学报, 2013, **49**(2): 95-101.
LI Tian, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Co-simulation of high-speed train fluid-structure interaction based on the equilibrium state [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, **49**(2): 95-101. (in Chinese)
- [13] 祝志文, 陈伟芳, 陈政清. 横风中双层客车车辆的风荷载研究 [J]. 国防科技大学学报, 2001, **23**(5): 117-121.
ZHU Zhiwen, CHEN Weifang, CHEN Zhengqing. A survey on wind loads for double-deck vehicle in cross wind [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2001, **23**(5): 117-121. (in Chinese)
- [14] KHIER W, BREUER M, DURST F. Flow structure around trains under side wind conditions:

- Numerical study [J]. **Computers and Fluids**, 2000, **29**(2): 179-195.
- [15] GAO Liqiang, XI Ying, WANG Guohua. Opening angle rules of the aerodynamic brake panel [J]. **Journal of Donghua University (English Edition)**, 2016, **33**(1): 20-24.
- [16] LIU Guowei. Feature description for streamlined structure [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2010, **34-35**: 1284-1288.
- [17] 王 伟, 谢红太, 王云飞, 等. 高速列车风阻制动风翼板气动性能影响研究 [J]. **机车电传动**, 2021(6): 25-41.
WANG Wei, XIE Hongtai, WANG Yunfei, *et al.* Research on the influence of the aerodynamic performance of high-speed train air brake blades [J]. **Electric Drive for Locomotives**, 2021(6): 25-41. (in Chinese)
- [18] 谢红太. 强侧风对时速 350 km 高速列车气动性能影响分析 [J]. **华东交通大学学报**, 2019, **36**(3): 7-15.
XIE Hongtai. Influence of strong crosswind on aerodynamic performance of high speed train at the speed of 350 km/h [J]. **Journal of East China Jiaotong University**, 2019, **36**(3): 7-15. (in Chinese)
- [19] 谢红太. 350 km/h 高速列车过特长双线隧道时表面压力分布数值模拟分析 [J]. **华东交通大学学报**, 2019, **36**(4): 24-31.
XIE Hongtai. Numerical simulation analysis of surface pressure distribution of 350 km/h high speed train passing through extra long double tunnel [J]. **Journal of East China Jiaotong University**, 2019, **36**(4): 24-31. (in Chinese)
- [20] 谢红太. 高速列车过特长双线隧道时列车及隧道表面所受静压的数值模拟分析方法: CN 201810572539.2 [P]. 2018-11-06.
XIE Hongtai. Numerical simulation analysis method of static pressure on the surface of the train and the tunnel when a high-speed train passes through an extra-long double-track tunnel: CN 201810572539.2 [P]. 2018-11-06. (in Chinese)

Analysis of flow field structure around high-speed train with brake wind wing panel under strong crosswind

XIE Hongtai^{*1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Railway Planning and Design Institute, China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on the three-dimensional steady and incompressible viscous flow field N-S and $k-\epsilon$ double equation model, computational fluid dynamics method is adopted to deal with high-speed trains with brake wind wing panel and the surface of brake wind wing panel under strong crosswinds with different wind direction angles. The aerodynamic effects such as the time-average pressure distribution law, the surrounding time-average flow structure and the transient flow structure are numerically simulated. Preliminary research results show that under the influence of strong crosswinds, the structure of the flow field around the train is complex and changeable. As the wind direction angle gradually increases within 0° - 180° , the high pressure area and the low pressure area formed before and after the first row of the brake wind wing panel of the leading vehicle, the low pressure area formed above the driver's cab of the leading vehicle, the low pressure area formed by the connection between the driver's cab of the trailing vehicle and the vehicle body, and the low pressure area formed by the roof of the vehicle show a trend of first expanding and then gradually shrinking; at the same time, with the gradually increasing of wind direction angle, the influence range of the high-pressure area formed at the nose tip of the leading and trailing vehicles gradually becomes smaller and weaker.

Key words: high-speed trains; aerodynamics; aerodynamic characteristics; brake wind wing panel; air resistance