



侧风对货运列车内燃动力包冷却风机风量影响研究

杨波^{1,2,3}, 谢鹏辉^{2,4}

- (1. 长沙民政职业技术学院, 湖南 长沙 410004;
2. 中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室, 湖南 长沙 410075;
3. 湖南交通职业技术学院 汽车工程学院, 湖南 长沙 410132;
4. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为探究动力包列车所携风机在高速行驶时冷却效果恶化的原因, 文章采用不可压缩黏性流体的N-S方程和 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型, 对不同风速和风向侧风环境下动力包风机冷却的进出风量及流场特性展开研究。研究表明, 侧风环境下风机出风不均导致冷却效率下降; 随着环境风速的不断增大, 头尾车动力包背风侧风机进风量不断减小, 迎风侧风机进风量先减小后增大。头尾车动力包迎风侧和背风侧风机风量都随风向角增加先减小后增大, 迎风侧和背风侧风机分别在风向角为 30° 和 60° 时风量最小。

关键词: 内燃动力包; 风机; 风量; 风速风向; 仿真; 高速列车

中图分类号: U262.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)04-0047-07

0 引言

内燃机货运列车是广泛使用的一种铁路运输工具, 是对高速列车运输能力的有效补充, 具有可在非电气化铁路上运行的特点, 近年来出口至菲律宾、突尼斯、孟加拉国等国的内燃动车组将柴油机和其他附属设备通过悬挂系统吊挂在车辆安装框架上的整体结构称为动力包, 安装于列车底部。动力包中的冷却风机是冷却系统的重要组成部分, 其风机风量是影响动力包性能的重要参数。列车实际运行时, 通风进出口压力不相等, 会导致风机的通风量随列车的周围流场不同而发生变化。明线运行的列车遇到侧风时, 受到列车风与环境风的共同作用其周围流场特性及列车表面压力分布与无侧风相比发生显著变化, 列车外部流场结构更为复杂^[1-2], 尤其在列车底部区域, 由于受到轨面复杂边界^[3-4]、列车底部结构^[5-7]和地面效应^[8]的扰动, 其

流场变化更为剧烈, 会造成风机风量减小, 风机冷却效率降低^[9], 导致动力包相关零部件和附件受损, 直接影响列车运行安全。

目前已有学者对列车在运行条件下牵引电机冷却风机、空调风机、设备舱风机的通风性能进行了研究。文献[10]通过在线实车试验、动模型试验等方式对“中华之星”动车组动力车牵引电机冷却风机风量试验, 发现在冷却风机功率一定的情况下, 随着列车运行速度的提高, 风机进风口有可能出现反向流动。文献[11]模拟了CRH3A在明线上以250 km/h的速度行驶时, 设备舱室内外空间内的气流和温度场, 结果显示设备舱内风机风量比额定值分别降低9.1%和5.2%。文献[9]采用风洞试验和数值计算相结合的方法, 研究空调冷凝风量随车速变化的关系, 结果表明冷凝风量随车速增加呈快速下降趋势。当列车高速运行时, 尤其是当列车运行中遭受横风时, 通风设备工作环境更加恶劣, 将严重威胁列车的安全运行。文献[12]研究了侧风对地

基金项目: 湖南省社会科学成果评审委员会项目 (XSP25YBZ085)

通信作者: 杨波, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事列车行车安全及交通规划研究; E-mail: yangbo009@126.com

引用格式: 杨波, 谢鹏辉. 侧风对货运列车内燃动力包冷却风机风量影响研究[J]. 机车电传动, 2025(4): 47-53. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.104.

Citation: YANG Bo, XIE Penghui. Influence of crosswind on air volume of cooling fan for internal combustion powerpack of truck train[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 47-53. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.104.

铁列车冷凝风机性能的影响,指出侧风流速增大会降低风机的出流速度。动力包风机裸露于车底,受地面效应及轨面复杂边界干扰影响,风口周围流场结构更为复杂,并且不同风环境下列车底部流场结构差异显著^[13]。

综上,不同风速风向条件下列车动力包冷却风机风量指标劣化规律亟待解决。本文将采用数值仿真方法来研究不同侧风风速和不同风向角下运行时的列车周围流场,得到列车底部动力包风机处压力场和速度场,从而定量地分析侧风风速和风向角对动力包冷却风机风量的影响,为动力包设备的布置提供参考依据。

1 数值计算模型

1.1 计算模型及参数

数值计算采用如图1所示3车编组内燃动车组模

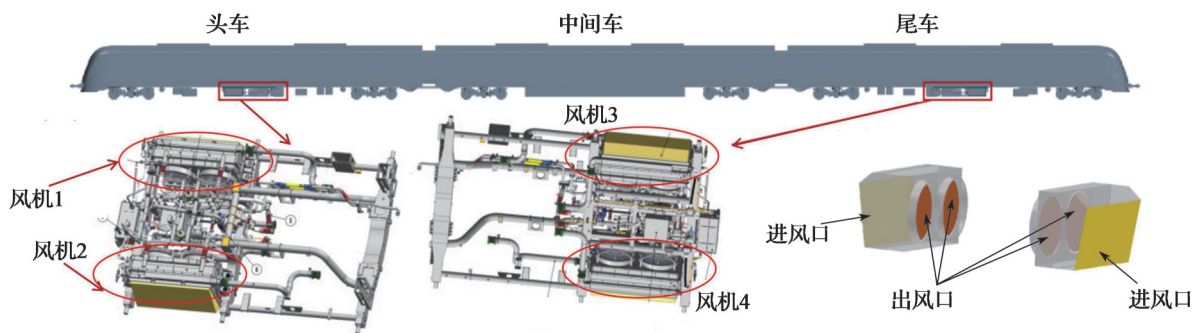


图1 列车及动力包模型图

Fig. 1 Model of train and powerpack

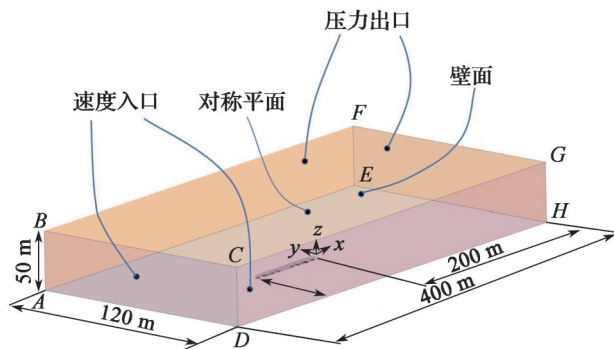


图2 计算区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of computational domain

1.2 控制方程

由于列车运行速度为80~200 km/h,空气密度的变化对流动的影响可以略去不计,此时,可以采用不可压流动假设,即认为密度为常数。

连续方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

3个方向的运动方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

型,车高4.04 m,车长78.60 m,车宽3.16 m,由两台动力包提供牵引动力,动力包分别位于头车、尾车底部,中心位置距离列车鼻尖点13.15 m,每台动力包装有对称布置的两套冷却装置,每套冷却装置内包含两台风机,风机吸入的冷却风由图1所示进风口进入冷却装置后,通过两台风机对应出风口排出。其中头车动力包背风侧冷却风机称为风机1,迎风侧冷却风机为风机2;尾车动力包背风侧冷却风机为风机3,迎风侧冷却风机为风机4。

数值计算区域见图2,ABCD面和CDHG面设置为速度入口,按照合成风速给定速度大小,EFGH面设为压力出口,出口压力为0 Pa(相对环境大气压而言),列车表面设定为无滑移边界条件,地面ADHE设置为滑移壁面边界,滑移速度与列车运行速度大小相等、方向相反。

式中: ρ 为空气密度; μ 为空气黏度系数。

式(2)为直角坐标下的不可压缩流的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程,适合于不可压缩黏性流体的运动。

湍流中耗散率 ε 与 κ 关系为

$$\eta_i = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

1.3 风机模拟方法

采用CFD软件Star-ccm中提供的风扇界面模型可以较好地模拟真实风机运转情况,并大幅度减少网格数量。用零厚度界面表示风扇,并施加跨过界面的压力跃变,整个界面中的压力跃变从如图3所示实车测试风扇曲线中获取,该曲线将压力跃变解释为局部流率或速度的函数,可以用式(4)解释压力跃变 ΔP 。

$$\Delta P = P_{s, \text{down}} - P_{t, \text{up}} \quad (4)$$

式中: $P_{s, \text{down}}$ 为风扇下游静压; $P_{t, \text{up}}$ 为风扇上游总压力。

1.4 网格无关性和压力验证

为了精确模拟列车表面附面层,在列车表面布置6层棱柱层网格,在动力包周围和尾流区域设置多级加

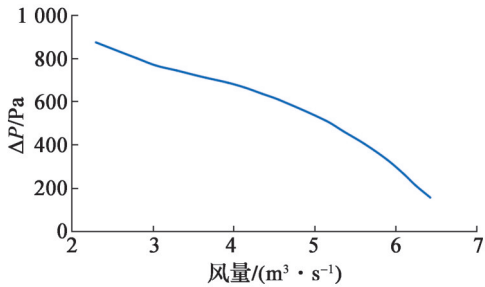


图3 风机性能曲线
Fig. 3 Performance curve of fan

密区。采用粗、中、细3种网格研究网格密度对计算结果的影响,排除因网格尺寸不同或密度不同带来的误差,因此分别取3种方案下风机1和风机2进风口流量数据,并与细网格数据对比得到相对误差,计算结果如表1所示。从表1可以看出,采用中网格计算结果与细网格相比误差在3.8%以内,采用粗网格相对误差较采用中网格大。采用中网格具有与采用细网格相似的计算精度,而计算资源消耗远小于细网格,因此,本文计算分析均基于采用中网格开展。

表1 网格无关性方案对比

Table 1 Comparison of grid independence schemes

网格方案	网格数量	风机1风量/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%	风机2风量/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%
粗网格	1 000 万	-0.32	18.5%	13.60	2.3%
中网格	2 500 万	-0.27	3.8%	13.29	1.5%
细网格	4 900 万	-0.26		13.10	

在无侧风环境下,提取车头表面主型线上的压力系数,图4是仿真结果与文献[14]的试验测试结果对比图。两者在主型线上压力系数吻合较好,在机车长度方向上略有错位,最大误差不超过7%,产生误差原因

为采用动力包的机车车头尺寸比市域动车组短。

压力系数计算公式如下:

$$C_p = \frac{P - P_0}{q_\infty} \tag{5}$$

式中: q_∞ 是动压,来流气相密度取 1.225 kg/m^3 ; P_0 为大气压; P 是绝对压强。

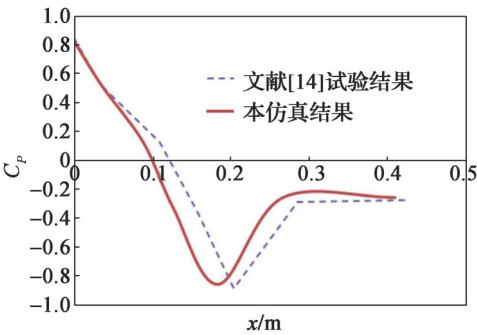
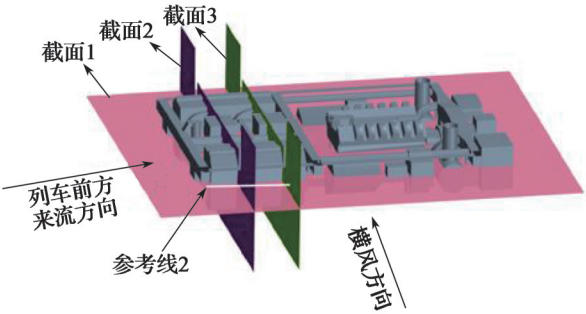


图4 车头主型线上压力系数对比
Fig. 4 Comparison of pressure coefficients on major profile line of head car

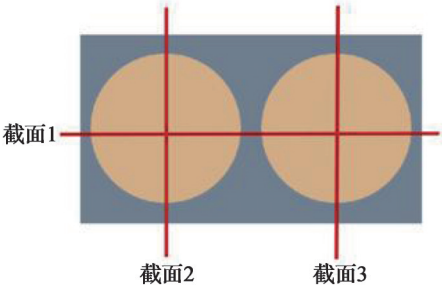
2 计算结果分析

2.1 侧风条件下动力包风机周围流场分析

为便于分析动力包风机区域压力和速度等流场特征,分别定义3个参考截面如图5所示,截面1为冷却装置风机出风口水平中心截面,截面2和截面3分别为2个风机出风口横向中心截面,另外还在每组风机进风口取一条水平参考线,参考线1~4分别是截面1和风机1~4进风口的相交线,由于位置对称,故仅在图5中标记了参考线2的位置。



(a) 三维视图



(b) 风机1视图

图5 参考截面位置示意图

Fig. 5 Location diagram of reference section

风机进出风口压力分布情况直接影响到风量的大小,以车速为 160 km/h 、横风风速为 25 m/s 工况为例对动力包风机周围流场及表面压力分布进行分析。图6为参考线1~4沿列车前方来流方向上压力分布情况,在图6中的长度采用进风口尺寸 L 进行无量纲化。由图6可以看出,车体背风侧发生一系列漩涡的发展脱落,导致动力包背风侧风机进风口参考线1和参考线3主要表现为负压,而动力包迎风侧风机进风口沿着列车前方来流方向呈现较大压力梯度,参考线2和参考线4上负压逐渐上升为正压,这是因为在迎风侧风机进风口处冷却气流以略大于侧滑角的角度被风机吸入,进风口后部承受较大气流冲击导致后部为较大正压。总体来看,头尾车动力包风机风口压力分布规律基本一致,仅在数值上略有差别,故在流场分析中主要介绍头车动力包风机周围的流场分布规律。

以车速 160 km/h 、侧风风速 25 m/s 工况为例对动力包风机周围流场及表面压力分布进行分析。图7为头

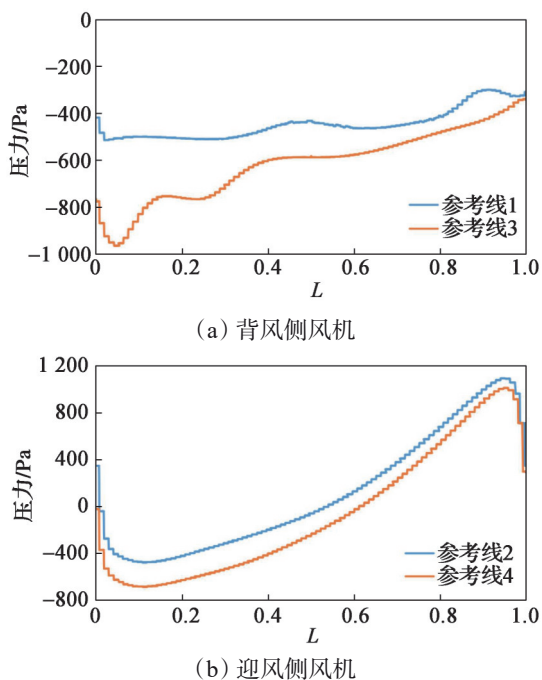


图6 参考线上压力分布

Fig. 6 Pressure distribution on reference line

车动力包风机区域不同截面速度云图,侧风风向为+y方向,列车前方来流方向为+x方向。由图7可知,沿着列车来流方向,风机2前端出口气流速度显著小于后端出风口的速度,这说明冷却风进入冷却系统后主要由后端出风口出风,在风机压头不变的情况下进风口为负压不利于吸入新风,因此应重点考虑提高冷却装置中位置靠前的风机功率。

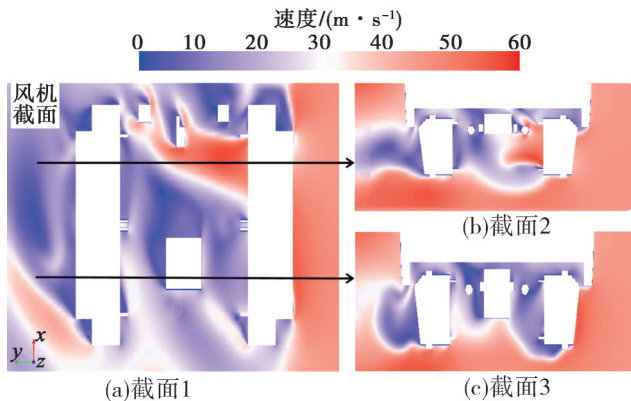


图7 头车动力包风机各截面速度云图

Fig. 7 Nephogram of speed at each section of fan for head car powerpack

2.2 风速对风机风量的影响

为研究风速对头车、尾车动力包风机风量的影响,对列车速度为160 km/h,侧风风速分别为0 m/s、5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s等工况展开分析,研究结果见图8。由图8可知:

①头尾车动力包背风侧风机进风量随风速的增加而减小,风速为25 m/s时风机1进风口变为逆向出风,风机3风量下降了36.2%,风机1和风机3风量随风速

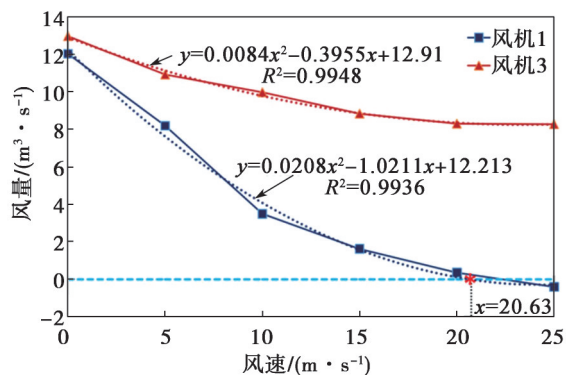
变化关系可分别用二次多项式 $y=0.0208x^2-1.0211x+12.213$ 和 $y=0.0084x^2-0.3955x+12.91$ 拟合,可以看出当风速约大于20 m/s时,风机1逆向出风,风机无法再起到冷却作用,因此在风机功率设计中应该考虑在恶劣环境下头车动力包背风侧风机冷却失效的问题。

②头尾车动力包迎风侧风机进风量随风速增加先减小后增大,当风速大于5 m/s时,风机2和风机4进风量随风速呈近似线性关系增加,进风量与风速关系可分别表征为 $y=0.2416x^2+7.0734$ 和 $y=0.2404x^2+7.7757$ 。

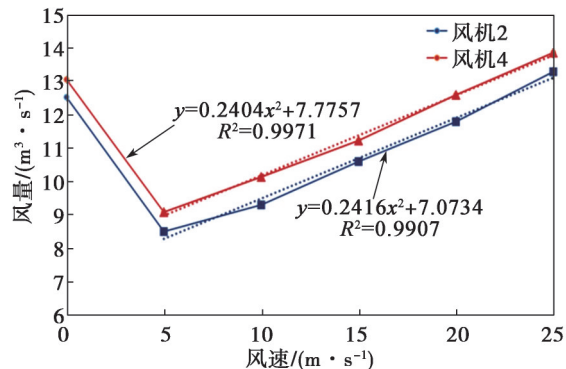
风机的风进出口压差是评价风机风量的一个重要指标,表2给出了不同风速下进风口与两个出风口压力差的平均值,压差为负将抑制通风,压差为正则促进通风。不同风速下头车动力包截面3气流流线图见图9。综合表2及图9可知:

①背风侧风机风口压差负压随风速的增加而增大,当风速为5 m/s时,车体背风侧形成的涡流气流沿着车体向底部运动,与风机1进风方向一致;当其压差风速为25 m/s时,在风机1进风口形成局部小漩涡,造成进风口负压变大,从而风口压差负压变大,当其压差超过风机能提供的压头时,风机进出风向改变,风机冷却失效。

②迎风侧风机风口压差负压随风速的增加先增大后减小,当风速超过5 m/s时,风机2进风口承受横向来流直接冲击,进风口正压上升,进出风口压差负压减小,风量增加。



(a) 背风侧风机



(b) 迎风侧风机

图8 头车和尾车动力包风机进风量随风速变化关系

Fig. 8 Variation of inlet air flow of fans for head and tail car powerpacks with wind speed

表2 不同风速下动力包风机进风口压差

Table 2 Pressure difference between inlet and outlet of fan for powerpack under different wind speeds Pa

风速/ (m·s ⁻¹)	背风侧风机		迎风侧风机	
	风机1	风机3	风机2	风机4
0	-278.5	-195.0	-232.8	-195.1
5	-412.9	-216.8	-369.2	-309.6
10	-760.2	-329.8	-320.0	-192.1
15	-834.6	-415.0	-237.8	-133.8
20	-871.7	-459.6	-118.8	-49.3
25	-872.2	-486.6	-58.0	27.3

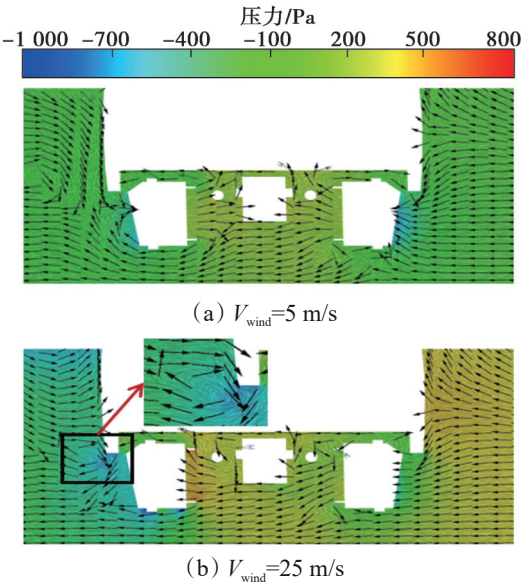


图9 不同风速下头车动力包截面3气流流线图
Fig. 9 Section 3 streamline plot of head car powerpack at different wind speeds

2.3 风向角对风机风量的影响

风速 25 m/s, 风向角分别为 0°、30°、60°、90° 时头车和尾车动力包风机风量随风向角的变化关系见图 10, 动力包背风侧风机风量随风向角增加先减小后增大, 当风向角为 60° 时风机 1 和风机 3 风量达到最小值, 风向角从 15° 增大, 风机 1 风量迅速变为负值, 风机逆向进风。动力包迎风侧风机风量亦随风向角增加先减小后增大, 30° 风向角时风机 2 和风机 4 风量最小。

不同风向角下各风机进风口压差值有显著差异,

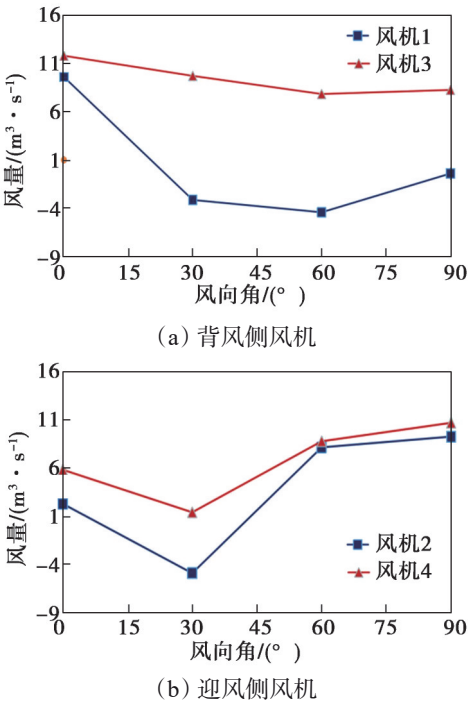


图10 头车和尾车动力包风机风量随风向角变化关系
Fig. 10 Variation of air flow of fans for head and tail car powerpack with wind direction angle

具体见表3。结合风机内部流线图(图11)分析发现:

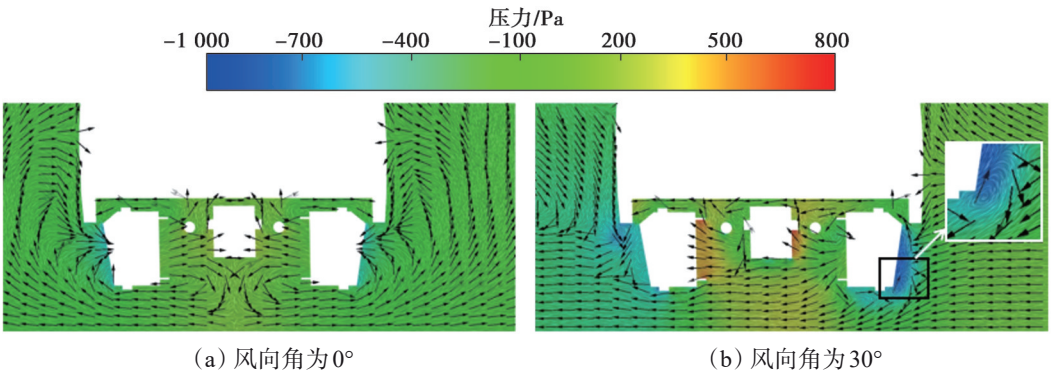
① 对于背风侧风机而言, 当风向角为 60° 时风口压差负压最大, 对进风抑制作用最强, 背风侧风机出风口受迎风侧风机出风气流以及自然风的共同冲击作用, 导致出风口正压较风向角为 0° 和 30° 时有所上升, 同时风向角为 60° 时背风侧风机进风口负压达到最大, 这两个因素叠加导致风向角为 60° 时风口压差负压最大。

表3 不同风向角下动力包风机进风口压差

Table 3 Pressure difference between inlet and outlet of fan for powerpack under different wind direction angles Pa

风向角/(°)	背风侧风机		迎风侧风机	
	风机1	风机3	风机2	风机4
0	-416.1	-260.6	-338.4	-257.5
30	-883.7	-440.6	-406.4	-300.4
60	-974.6	-592.2	-70.5	-40.1
90	-872.2	-486.6	-58.0	27.3

②对于迎风侧风机而言, 当风向角为 30° 时风口压



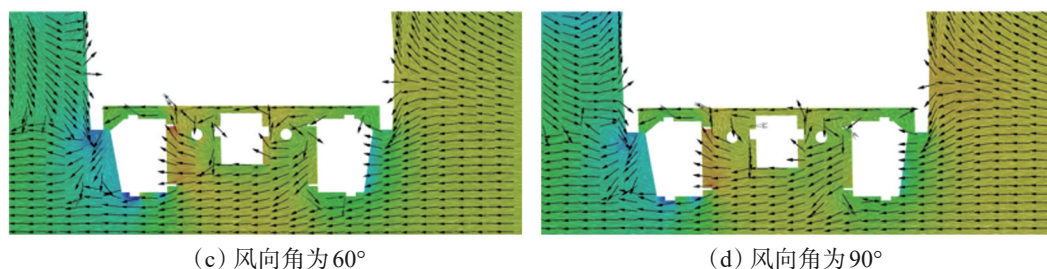


图 11 不同风向角下头车动力包截面3气流流线图

Fig. 11 Section 3 streamline plot of head car powerpack at different wind direction angles

差负压最大,迎风侧风机的出风气流与自然风在进风口区域汇合后产生漩涡,导致进风口区域负压最低,抑制风机进风;随着风向角增大,侧风横向分量变大,进风口气流初始动能增大,进风口正压上升,从而进风口压差负压减小导致进风量增大。

3 结论

本文采用不可压缩黏性流体的N-S方程和 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型,对不同侧风风速和风向角下内燃动力包风机冷却风量及流场特性展开研究,主要研究结论如下:

①侧风条件下,动力包迎风侧风机进风口沿着列车前方来流方向呈现较大压力梯度,负压逐渐上升为正压,导致冷却风进入冷却系统后并非平均分配到两个出风口,出风集中在风机后端出风口,风机出风不均将导致冷却效率下降。

②动力包背风侧风机进风量随侧风风速增加而减小,迎风侧风机进风量则相反。风速为25 m/s时风机1逆向进风,风机3风量下降了36.2%,因此应重点考虑在恶劣风环境下头车动力包背风侧风机冷却失效问题。

③当风向角在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内变化时,动力包迎风侧和背风侧风机风量都先减小后增大,风向角为 30° 时迎风侧风机风量最小,风向角为 60° 时背风侧风机风量最小。

参考文献:

- [1] BAKER C. The flow around high speed trains[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2010, 98(6/7): 277-298.
- [2] FLYNN D, HEMIDA H, BAKER C. On the effect of crosswinds on the slipstream of a freight train and associated effects[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2016, 156: 14-28.
- [3] DONG Tianyun, MINELLI G, WANG Jiabin, et al. The effect of reducing the underbody clearance on the aerodynamics of a high-speed train[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2020, 204: 104249.
- [4] PREMOLI A, ROCCHI D, SCHITO P, et al. Ballast flight under high-speed trains: wind tunnel full-scale experimental tests[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2015, 145: 351-361.
- [5] DONG Tianyun, LIANG Xifeng, KRAJNOVIĆ S, et al. Effects of simplifying train bogies on surrounding flow and aerodynamic forces[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2019, 191: 170-182.
- [6] WANG Shibo, BURTON D, HERBST A, et al. The effect of bogies on high-speed train slipstream and wake[J]. Journal of fluids and structures, 2018, 83: 471-489.
- [7] 张胜, 戴志远, 李田. 明线运行列车气动地面效应数值模拟[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(1): 120-125.
ZHANG Sheng, DAI Zhiyuan, LI Tian. Numerical simulation of aerodynamic ground effect of a train running in the open air[J]. Journal of transportation engineering and information, 2020, 18(1): 120-125.
- [8] XIA Chao, WANG Hanfeng, SHAN Xizhuang, et al. Effects of ground configurations on the slipstream and near wake of a high-speed train[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2017, 168: 177-189.
- [9] LI Xueliang, WU Fan, TAO Yu, et al. Numerical study of the air flow through an air-conditioning unit on high-speed trains[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2019, 187: 26-35.
- [10] 田红旗, 梁习锋. “中华之星”高速列车综合空气动力性能研究[J]. 机车电传动, 2003(5): 40-45.
TIAN Hongqi, LIANG Xifeng. Study of comprehensive aerodynamic performance for "China star" high speed EMU [J]. Electric drive for locomotives, 2003(5): 40-45.
- [11] JIA Qiong, ZANG Jianbin, PAN Deng, et al. Analysis of high speed train equipment cabin temperature field based on numerical simulation[J]. Procedia engineering, 2015, 121: 1954-1961.
- [12] ABADI R, DEYMI M, REZAZADEH N. Improving the performance of the condenser fan in a subway train against the effects of crosswind flow by placing barriers[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2019, 234(2): 214-225.
- [13] 李玉坤, 周丹. 强侧风下城际动车组非定常气动特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2721-2729.
LI Yukun, ZHOU Dan. Study on the unsteady aerodynamic characteristics of a intercity EMU under strong crosswind

[J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15
(11): 2721-2729.

[14] YANG Bo, XIONG Xiaohui, HE Zhao, et al. Feasibility of
replacing the 3-coach with a 1.5-coach grouping train model
in wind tunnel experiment at different yaw angles[J]. Jour-
nal of central south university, 2022, 29(6): 2062-2073.

Influence of crosswind on air volume of cooling fan for internal combustion
powerpack of truck train

YANG Bo^{1,2,3}, XIE Penghui^{2,4}

- (1. Changsha Social Work College, Changsha, Hunan 410004, China;
2. Key Laboratory of Traffic Safety on Track Ministry of Education, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
3. Institute of Automotive Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha, Hunan 410132, China;
4. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: To investigate the reasons for the cooling fan’s significant deterioration of cooling effect for the powerpack during fast train running, this study employs the N-S equation of incompressible viscous fluid and the $k-\varepsilon$ two-equation turbulence model to investigate the inlet/outlet air volume and flow field characteristics of the cooling fan for the powerpack under different crosswind speeds and wind directions. The results indicate that uneven outlet air from the fan results in a decrease in cooling efficiency. With the increase of the crosswind speed, the inlet air flow of the leeward side fan for the head and tail vehicle powerpack decreases continuously, while the inlet air flow of the windward side fan decreases first and then increases. Additionally, the air flow of the windward and leeward side fans for the head and tail vehicle powerpacks decreases first and then increases as the wind direction angle increases, reaching its minimum when the wind direction angle is 30 ° and 60 °, respectively.

Keywords: internal combustion powerpack; fan; air flow; wind speed and direction; simulation; high-speed train