文章编号:1673-0291(2026)02-0103-13 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20240109

活塞风作用下地铁隧道射流风机内流场时变特性分析

刘 强[1],周子凯[2],毛 军[2],赵明珠[1],张 健[1],宋霄楠[1],赵明宇[1]
(1.北京市地铁运营有限公司 机电分公司,北京 100043;2.北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘 要:针对地铁运营过程中列车运行产生的活塞风会显著影响射流风机内流场分布,导致风机出风效率波动、运行稳定性下降的问题,提出耦合列车直线运动与风机叶片旋转运动的一体化数值模型并结合现场实验的研究方法,分析获得活塞风作用下射流风机内流场流动机理及性能参数的动态变化规律,明确了活塞风形态、列车车速等因素对风机工作性能的影响机制.研究结果表明:射流风机内流场各特性分布变化规律与3种不同的活塞风形态密切相关,速度场与风量场的叠加效果显著,二者存在明显的瞬时对应变化特征;随着列车车速的加快,活塞风对风机出入口静压差以及出风量的抑制效果逐渐增强,静压差降低幅值与车速呈正线性关系,出风量抑制幅值与车速的平方呈正线性关系;在阻塞比为0.3的马蹄形断面隧道内,速度75 km/h可作为临界车速,该车速下既能保证射流风机平稳运行,又能将风机出风效率的降低幅度控制在最小范围.研究结果可以为地铁隧道射流风机的工作效率改善、运行参数优化及性能评估提供参考.

关键词:隧道工程;空气动力学;数值模拟;现场实验;射流风机;活塞风;多流场叠加
中图分类号:U457.4 **文献标志码**:A

Analysis of time-varying characteristics for internal flow field in subway tunnel jet fans subjected to piston wind

LIU Qiang[1], *ZHOU Zikai*[2], *MAO Jun*[2], *ZHAO Mingzhu*[1], *ZHANG Jian*[1], *SONG Xiaonan*[1], *ZHAO Mingyu*[1]
(1.Electromechanical branch of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing 100043, China;
2.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To address the issue where piston wind generated by train movement during subway operations significantly alters the flow field distribution inside jet fans, thereby causing fluctuations in ventilation efficiency and reduced operational stability, an integrated numerical model coupling the linear motion of the train with the rotational motion of the fan blades is proposed and validated through field experiments. This study determines the dynamic variation laws of the flow mechanisms and performance parameters within the jet fan under the influence of piston wind, elucidating the impact mechanisms of factors such as piston wind morphology and train speed on fan performance. The results indicate that the variation patterns of the flow field characteristics inside the jet fan are closely related to three distinct

收稿日期:2024-08-29;**修回日期**:2025-05-19
基金项目:国家自然科学基金(52172336);北京地铁重点科技计划(2023000506005003)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (52172336); Beijing Subway Key Technology Program (2023000506005003)
第一作者:刘强(1975—),男,北京市人,工程师.研究方向为地铁设备管理.**email**:liuqiang5167@bjsubway.com.
通信作者:周子凯(2000—),男,甘肃兰州人,助理工程师,硕士.**email**:993586402@qq.com.

引用格式:刘强,周子凯,毛军,等.活塞风作用下地铁隧道射流风机内流场时变特性分析[J].北京交通大学学报,2026,50(2):103-115.
LIU Qiang, ZHOU Zikai, MAO Jun, et al. Analysis of time-varying characteristics for internal flow field in subway tunnel jet fans subjected to piston wind[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(2): 103-115. (in Chinese)

forms of piston wind. The superposition effect of the velocity field and the airflow field is significant, demonstrating clear instantaneous and corresponding variation characteristics. As train speed increases, the suppressive effect of the piston wind on both the static pressure difference between the fan inlet and outlet and the exhaust air volume gradually intensifies. The reduction amplitude of the static pressure difference exhibits a positive linear relationship with the train speed, whereas the suppression amplitude of the exhaust air volume shows a positive linear relation-ship with the square of the train speed. In a horseshoe-shaped tunnel with a blockage ratio of 0.3, a train speed of 75 km/h serves as the critical threshold. At this speed, the stable operation of the jet fan is maintained, and the reduction in ventilation efficiency is minimized. These findings provide a theoretical reference for improving the working efficiency, optimizing operational parameters, and evaluating the performance of jet fans in subway tunnels.

Keywords: tunnel engineering; aerodynamics; numerical simulation; field experiments; jet fan; piston wind; multi-flow field superposition

地铁具有速度快、运量大、覆盖广、低能耗、省土地等特点,已经逐步成为城市轨道交通最主要的运营方式[1].随着地铁里程数的持续增长与交通网络的不断扩展,国家对地铁发展提出了更高的要求,有关隧道内附属设备设施运营效率与安全的重视程度也与日俱增[2-3].

目前我国地铁列车运行速度持续提高,发车间隔逐渐缩短,列车运动产生的空气动力学效应更加显著,轨行区机电设备设施的气动安全问题也日益突出[4].吴磊[5]针对高速地铁活塞风对隧道内附属设备结构安全性和疲劳耐久性的影响开展系统研究.袁誉钊等[6]基于Fluent模拟得到双车运行下屏蔽门表面的压力与速度时变规律.赵刚[7]基于三维数值计算方法,分析高速地铁过站越行时多种因素对轨行区压力波及屏蔽门气动荷载的影响.尹静等[8]基于OpenFOAM与动网格方法,研究地铁隧道防火门在活塞风作用下的时变特性.于永波等[9]基于数值模拟方法,分析列车活塞风作用下隧道内配电箱表面压力分布及气动荷载变化规律.祝福等[10]基于Fluent三维数值模拟手段,研究列车运行速度对地铁隧道内广告牌静压分布的影响.马江燕等[11]基于一维特征数值模型,分析多种因素对地铁车站出入口卷帘门压力变化的影响.上述研究均未考虑活塞风对隧道内射流风机的作用.刘楠[12]基于CFD数值模拟方法,分析射流风机不同安装位置对隧道通风效果及复杂配线区域气流组织的影响,但仅考虑风机单独工作工况,未考虑活塞风的耦合作用.

综上,目前国内外对隧道内附属设施的研究对象多是屏蔽门、防火门与配电箱等设施,但是射流风机作为地铁通风系统的重要组成部分,目前却缺少风机叶轮旋转与列车活塞风效应耦合作用特性的研究.考虑到其内流场会与交变活塞风场叠加并互相影响,进而会直接影响风机负载、进排气条件与通风效率,本文采用隧道活塞风直线型流场与射流风机内旋转流场的耦合计算方法,研究不同车速条件下,活塞风对隧道射流风机的内流场特性及工作压力的影响,以期为改进风机运行效率、控制通风路径提供一定参考.

1 数值模拟方法

1.1 基本控制方程

流体力学基本控制方程是描述流体运动和数值模拟的基础.列车活塞风直线型流场与射流风机内部旋转型流场都为三维不可压缩、不等熵、非定常流场,基本控制方程有连续性方程、动量方程、状态方程及涡量输运方程.

1)质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot\rho\boldsymbol{u}=0 \tag{1}$$

式中:ρ为气体密度;$\boldsymbol{u}$为气体速度;t为时间.

2)动量守恒方程

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=-\frac{1}{\rho}\nabla p+\nu\nabla^2\boldsymbol{u}+S_u \tag{2}$$

式中:p为气体压力;ν为运动黏度;S_u为动量方程的广义源项.

3)理想气体状态方程

$$p=\rho RT \tag{3}$$

式中:R为普适气体常数;T为温度.

4)涡量输运方程

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}}{\mathrm{d}t}=(\boldsymbol{\omega}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}-\boldsymbol{\omega}(\nabla\cdot\boldsymbol{u})+\nabla\times F_\mathrm{b}+\frac{1}{\rho^2}+\nu\nabla^2\boldsymbol{\omega} \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{\omega}$为涡量矢量;F_b为单位质量的体积力.

1.2　湍流模型

本文采用 Realizable k-ε 模型,该模型相较于 Standard k-ε 模型,在处理包含强烈流线曲率、涡旋和旋转的流动特征时表现更加优异,可以有效地模拟出旋转均匀剪切流、射流等流动[13].

1.3　滑移网格方法

本文采用STAR CCM+中提供的滑移网格法实现风扇以及列车的运动,滑移网格之间数据的传递与交换原理见图1.

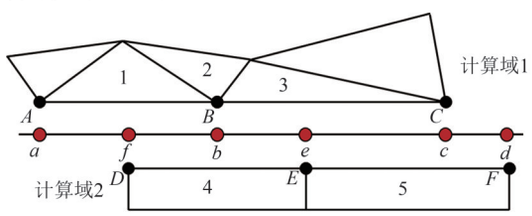


图1　滑移网格数据交换原理示意图

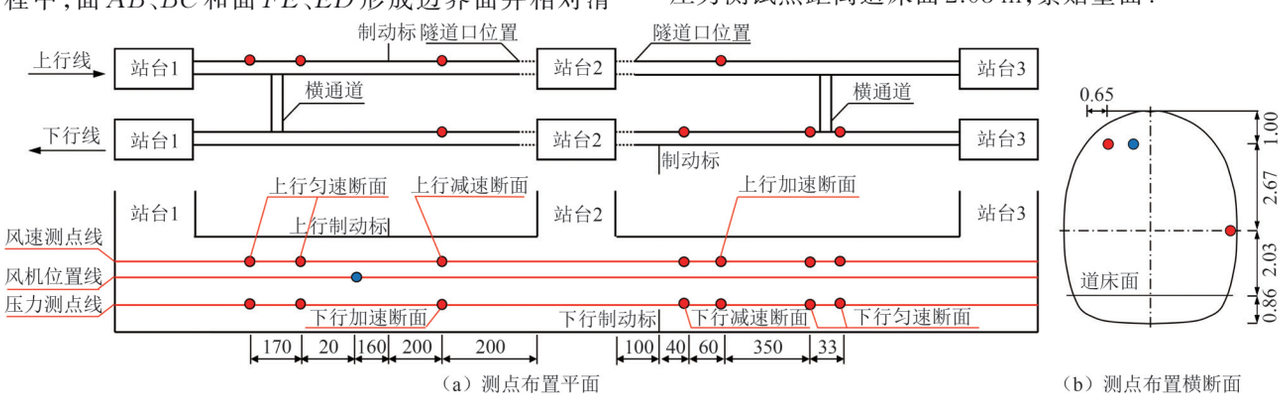
Fig.1　Schematic diagram of data exchange principle for the sliding mesh

整个网格区域划分成不同子区域形成子区域边界,物理变量在网格交界面上是连续的.如图1所示,单元1、2、3和单元4、5为两个不同的子区域,ABC和DEF为两个子区域与滑移面重合的边界面,且边界上网格节点的位置不完全重合.计算过程中,面AB、BC和面FE、ED形成边界面并相对滑动而形成交换面,面ABC和面DEF互相切割形成公共面$fbec$,同时流场数据会从单元4经面fbe传递到单元1和单元3.

2　数值模拟方法验证

2.1　现场实验

为避免多台联组射流风机对流场的影响,选择北京地铁某号线,设置单台射流风机的隧道区段进行列车活塞风效应的状态参数实时监测,监测系统内主要包括三杯式风速传感器、风压差变送器等感知层组件,地铁隧道活塞风测试断面布置示意见图2.在该区段的上、下行线,分别设置匀速、加速、减速测试断面,其中射流风机位于上行线距隧道口560 m位置;对于上行线,制动标距离隧道口400 m,减速和匀速断面设置在站台1至站台2区间,减速断面距隧道口200 m;横通道前后匀速断面分别距离隧道口750、580 m;加速断面设置在站台2至站台3区间,距隧道口200 m.对于下行线,制动标距离隧道口100 m,减速和匀速断面设置在站台2至站台3区间,减速断面距隧道口140 m,匀速断面距离隧道口550 m;加速断面设置在站台2至站台3区间,距隧道口200 m.其中风速测试点距离道床面4.8 m,由壁面外伸0.65 m;压力测试点距离道床面2.03 m,紧贴壁面.



（a）测点布置平面　　（b）测点布置横断面

图2　地铁隧道活塞风测试断面布置示意图(单位:m)

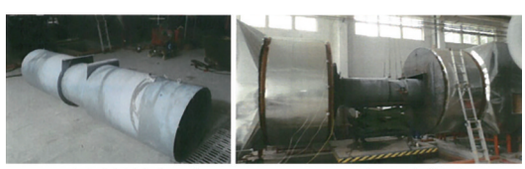
Fig.2　Schematic diagram of cross-sectional layout for piston wind testing in subway tunnel(units: m)

基于监测系统所得该区段地铁隧道内列车活塞风风速与隧道近壁面压力数据,可对数值模拟可靠性进行验证.

2.2　数值模拟方法验证

2.2.1　射流风机模型验证

根据国家灭火系统和耐火构件质量监督检验中心对本文所研究的隧道射流风机而出具的技术规格检测报告,得出其在理想实验室环境下的出风口风量、推力等性能参数,并基于该数据进行风机数值模拟方法的可靠性验证,现场测试见图3.



（a）测试用射流风机　　（b）现场测试装置

图3　射流风机性能参数测试现场

Fig.3　Field testing of the jet fan performance parameters

在STAR CCM+中建立与现场测试对应的风机内流场数值模型见图4.

1)数值计算模型.射流风机选用SDS(R)-7.1型式风机,风机旋转半径355 mm,风筒外径720 mm,

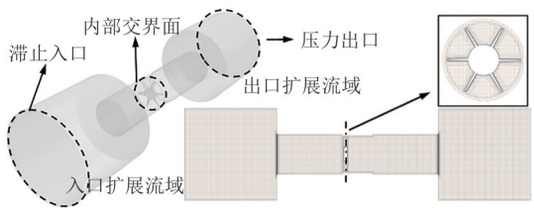


图4　射流风机验证数值模型

Fig.4　Numerical model for jet fan validation

消音器外径860 mm，风道长度3 490 mm；在风机出入口向外各延伸扩展直径为2 000 mm的圆柱形计算流体域来模拟测试环境.

2）边界条件.入风口设置为滞止入口边界，出风口设置为压力出口边界，压力初值皆赋予大气压强0 Pa，不考虑初始环境的空气流速.

3）网格划分.旋转域最小网格尺寸2.5 mm，目标网格尺寸10 mm，最大网格尺寸20 mm.背景域网格最小尺寸5 mm，目标网格尺寸10 mm，最大网格尺寸20 mm.对内部交界面进行10 mm的面控制.此外，对风机叶轮部分进行边界层划分，这里$y^+=30$，y^+为壁面雷诺数，第一层网格厚度0.35 mm，总厚度3.3 mm，增长率为1.1.最终得到旋转域网格244万个，背景域网格202万个，共计网格446万个.

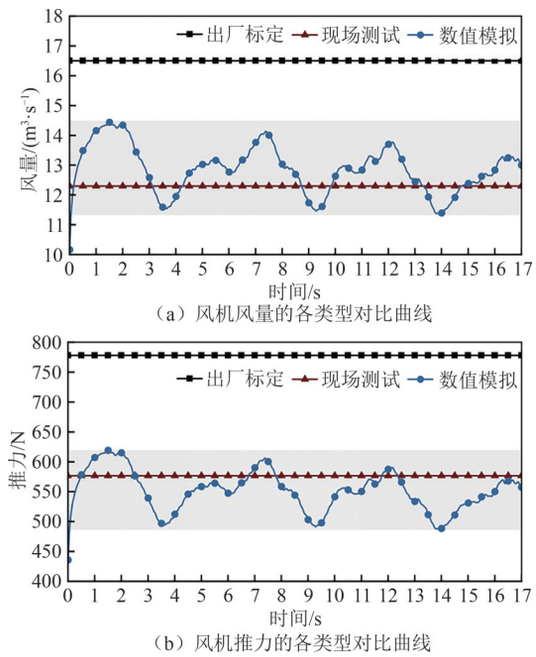
4）数值模拟与实验结果对比分析.

射流风机中各类型数据对比曲线见图5.由图5可见，在17 s的时间段内，数值模拟的风量及推力与出厂标定量有较大出入，这是由于厂家标定值是在理想情况下的理论值，实际风机效率应远小于该数据[14]；数值模拟与现场测试数据的吻合程度较好，模拟值始终围绕测试值来回波动.

测试用射流风机各类型对比数据见表1.由表1可见，模拟风量最大值为14.5 m^3/s，平均值为13.3 m^3/s，平均值与现场测试值之间误差为8.1%；模拟推力最大值为619 N，平均值为525 N，平均值与现场测试值之间误差为8.8%.通过数值模拟得到的结果和现场测试的结果误差较小，因此通过数值模拟进行射流风机分析是可行的.

2.2.2　列车动网格模型验证

首先建立与现场环境吻合的数值模拟动网格模型，并监测上下行线横通道前后的测点压力变化情况，随后结合现场实验数据对模型有效性进行验证.



（a）风机风量的各类型对比曲线

（b）风机推力的各类型对比曲线

图5　射流风机各类型数据对比图

Fig.5　Comparison of various data types for jet fans

1）初始条件.数值模拟参考地铁隧道环境，初始时刻$t=0$；隧道内各处初始压力为大气压$p=p_0$；3个方向的初始速度$u_x=0$，$u_y=0$，$u_z=0$；考虑重力对流场的影响；列车速度为75 km/h.

2）边界条件.建立1 000 m的隧道计算流体域，隧道进口设置为速度入口边界，横通道出口与隧道出口设置为压力出口边界，相对大气压强为0 Pa.

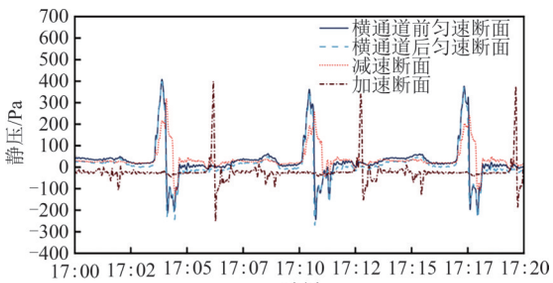
3）数值模拟与实验结果对比分析.

上行线活塞风监测系统在某日下午17:00～17:20监测得到的共2 000 s的风压时程曲线见图6(a).由图6(a)可见，任一特征周期T内，每处测点的正、负压力峰值以及变化趋势高度类似，说明实验具有可重复性，其平均正、负峰值分别为400、−210 Pa.仿真模拟值与实验数据对比曲线见图6(b).由图6(b)可见，二者的正压波动峰值分别为392.71、376.73 Pa，与实验值的相对误差分别为1.96%、5.81%；负压波动峰值分别为−190.19、−168.64 Pa，与实验值的相对误差分别为9.43%、19.70%.由分析可知，本文所采用的数值模拟方法能较好地模拟出隧道内活塞风风场，可以作为研究隧道活塞风特性的有效手段.

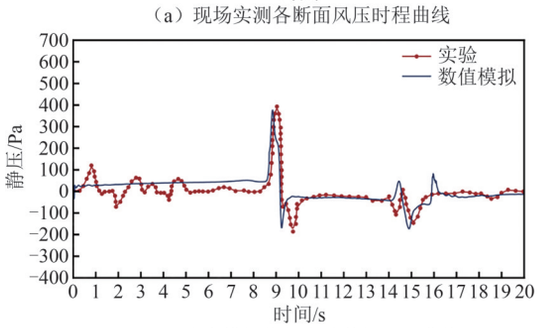
表1　射流风机各类型数据对比

Tab.1　Comparison of various data types for jet fans

类型	最大风量/($m^3\cdot s^{-1}$)	平均风量/($m^3\cdot s^{-1}$)	相对误差/%	最大推力/N	平均推力/N	相对误差/%
出厂标定	16.5	16.5	25.5	778	778	25.9
现场测试	12.3	12.3	8.1	576	576	8.8
数值模拟	14.5	13.3	0	619	525	0



（a）现场实测各断面风压时程曲线



（b）仿真模拟值与实验数据对比曲线

图 6　数值模拟可靠性对比验证曲线

Fig.6　Comparison curves for validating the reliability of the numerical simulation

3　数值模拟计算分析

3.1　几何模型

隧道计算域几何数值模型见图 7(a),全长 L_{tu}=1 000 m,其中风机叶轮几何中心距离隧道出口 L_c=600 m,距离车头距离 L_t=200 m;隧道断面为五心圆构成的马蹄形断面,建筑限界轮廓面积 35.44 m^2,轨上净空面积 30.15 m^2.

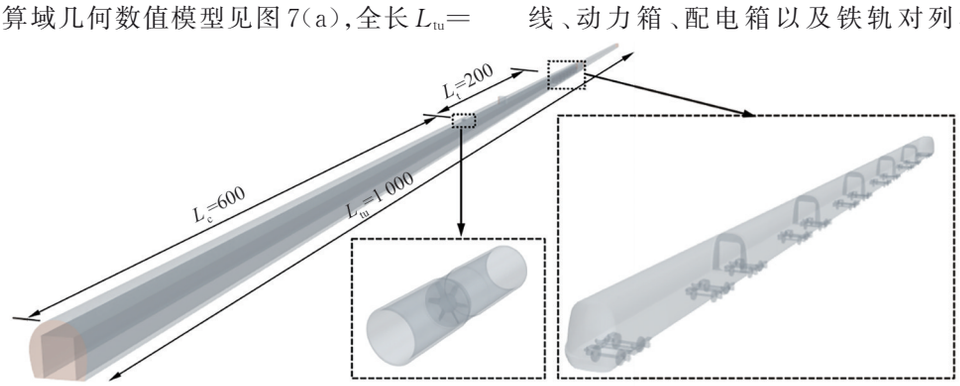
DZK13-B 型地铁列车几何模型见图 7(b).该车采用四动两拖编组,头车长度 L_{Tc}=19.5 m,动车长度 L_M=19 m,全车长 118 m;车高 H=3.8 m,车宽 B=2.8 m,轮距 L_L=1.35 m,横截面积 8.97 m^2.

风机模型采用与前文实验时同样的 SDS(R)-7.1 射流风机,风机几何模型见图 7(c).前后消声筒区域长度各为 1.42 m,中部风机长度为 0.65 m,风机全长 3.49 m;叶轮半径 R=0.355 m,叶尖宽度 C_{tip}=0.068 m,叶根宽度 C_{root}=0.11 m,叶片形状为 Clark-Y 机翼形,最大转速 ω=2 900 rpm.

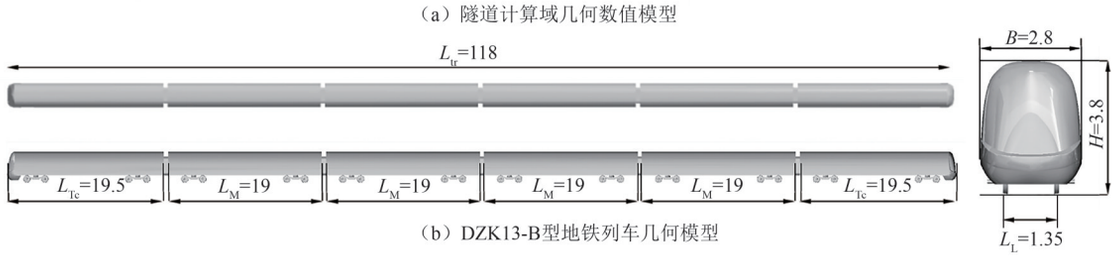
由于模拟条件的限制,在实际模拟中做出如下假设:

1)对列车周身的转向架、牵引架、车钩及缓冲装置等进行简化,并对表面进行光滑包面处理.另对风机电机以及风筒使用简单几何形状建模,不关注吊装件,螺栓等部件,并简化倒角等细节.

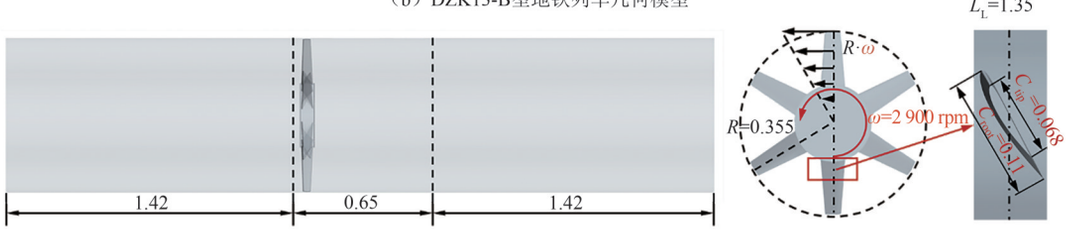
2)不考虑隧道内侧电缆及电缆支架、水力管线、动力箱、配电箱以及铁轨对列车周围气动的



（a）隧道计算域几何数值模型



（b）DZK13-B型地铁列车几何模型



（c）风机几何模型

图 7　数值几何模型(单位:m)

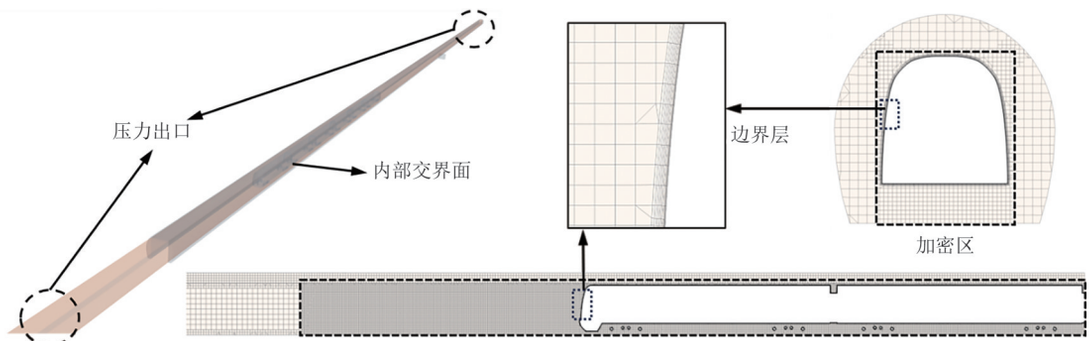
Fig.7　Numerical geometry model(units: m)

影响.

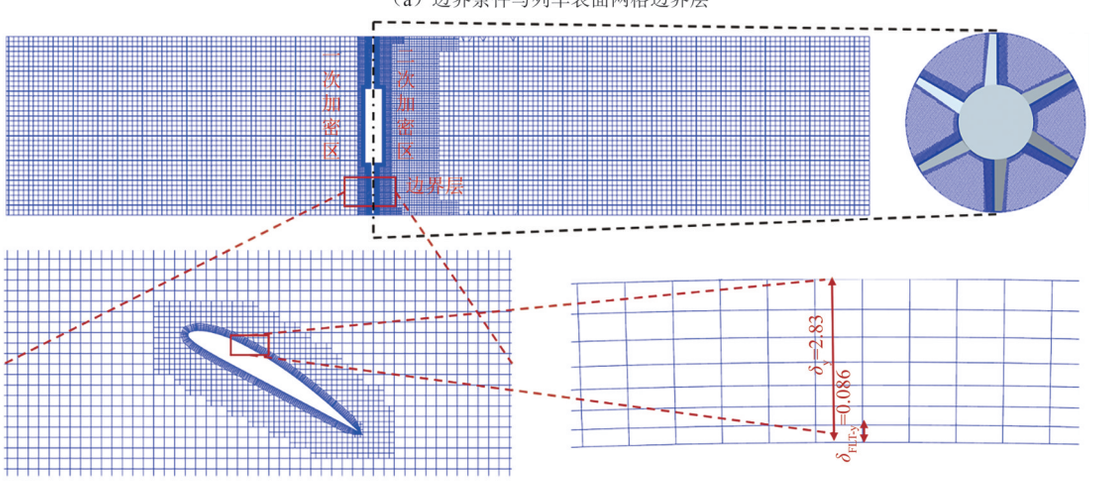
3)由于加设射流风机的区段相比一般运行区段较长,而且存在弯曲区段.故选择平均区间长度1 000 m的直隧道区间作为整个流体域,两侧不再设置静压箱.

3.2 条件设定

各结构表面网格划分示意见图8.隧道出入口皆设置为压力出口,隧道、列车与风机表面设置为壁面条件,背景域与滑移区之间的交界面设置为内部界面边界.



(a) 边界条件与列车表面网格边界层



(b) 射流风机叶片边界层(单位: mm)

图8 各结构表面网格划分示意图

Fig.8 Schematic diagram of mesh division for each structural surface

采用切割体网格进行划分;叶片表面边界层设置为7层,y^+=30,拉伸因子r=1.5,计算可得第一层边界层厚度$\delta_{FLT\text{-}y}$=0.086 mm,总厚度δ_y=2.83 mm,车体表面边界层设置为5层,y^+=30,拉伸因子r=1.2,首层厚度$\delta_{FLT\text{-}c}$=12mm,δ_c=66.4 mm.射流风机旋转域各尺寸统一设置为5 mm,背景域与列车运动域最小网格尺寸50 mm,目标网格尺寸200 mm;网格量为2 888万个.

3.3 模拟工况

对活塞风影响下射流风机内流场流动机理以及特性参数变化规律进行研究,围绕风机工作状态与列车运行速度两个主要影响因素设置计算工况.

1)不同风机工作状态.

由于射流风机一般安装在隧道区间中段,地铁列车在该段轨行区以匀速运动为主,通过实测得知该区段列车行驶的平均速度为75 km/h,故以该速度为典型条件,保持阻塞比为0.3,隧道断面形式为马蹄形,考虑射流风机在日常运行中出现的3种不同工作状态来研究风机内流场流动机理与特性变化.工况设置见表2.

表2 工作状态模拟工况

Tab.2 Working condition setting

编号	工况描述	列车速度/(km·h^{-1})
1	射流风机单独旋转	75
2	列车经过时射流风机不工作	75
3	列车经过时射流风机工作	75

2)不同列车车速.

列车运行速度是最显著影响活塞风特性参数变化的因素,因此设置不同车速条件下射流风机性能特性参数变化的工况,具体工况设置见表3.

3.4 射流风机内流场特性变化规律

3.4.1 射流风机内流场特性变化分析

射流风机不论是空转工作还是受活塞风交变作用的影响,其内流场各特性变化都是复杂且迅速的,

表 3　车速工况设置

Tab.3　Vehicle speed condition setting

编号	工况描述	列车速度 v/(km·h^{-1})
4	列车经过时射流风机工作	65
5	列车经过时射流风机工作	70
6	列车经过时射流风机工作	75
7	列车经过时射流风机工作	80
8	列车经过时射流风机工作	85

为了更加直观和清晰地了解射流风机内流场在活塞风效应影响下的变化,以速度、涡量、压力云图和流线来对风机内空气流体的运动规律进行分析.

1)工况 1.

工况 1 中内流场特性变化云图见图 9.由图 9(a)可见,在风筒的近壁面有一约 0.1 m 的速度黏滞层,前侧风筒的黏滞层厚度要大于后侧风筒,说明风机卷吸空气时并不会达到全断面进风的效果,进风效率会下降;同时叶轮吸力面后侧也有一最大直径 0.3 m 的束状速度真空区,说明经过加速的气流主要是在外侧环状空间出射,出风效率也无法达到理想状态.由图 9(b)、9(c)可见,前侧风筒内的流线成涡旋状,但是并没有出现涡量,该处卷吸空气是无旋流,而涡量主要集中于旋转叶轮附近、前后风筒的小尺度近壁区域以及突缩段转角处,这些涡往往伴随着能量的逸散,造成效率的降低;同时由流线可以看到在后侧风筒中的束状速度真空区的低速气流会回流到前侧风筒重新加速,这会增加运行功耗,进一步降低效率.由图 9(d)可见,内流场的压力全部为负压,但是前侧风筒内流场负压绝对值较小,为一相对高压,气流会流向叶轮附近的低压区并持续向下游流去,但此时可以看到后侧风筒的负压绝对值并不大,说明压力梯度较小,出流速度并不快.可见,风机单独工作的情况下,速度、涡量、压力云图都呈现高度对称性,说明此时流场处于一个相对稳定的状态.

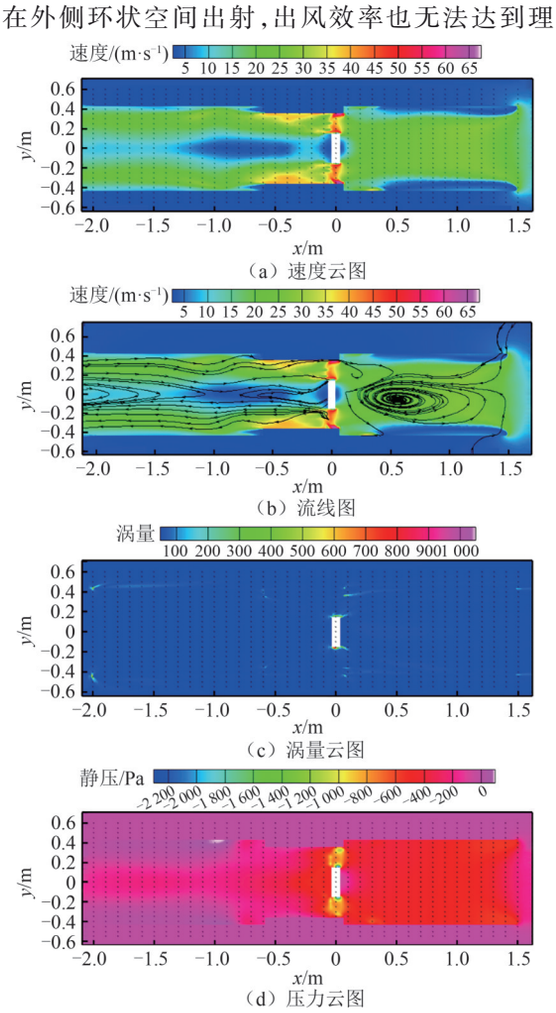


图 9　工况 1 中内流场特性变化云图

Fig.9　Cloud map of changes in internal flow field characteristics under operating condition 1

2)工况 2.

当列车行驶到不同位置时产生的活塞风形态是不同的,故分为 3 个阶段分别研究活塞风场对射流风机内流场的影响:车头经过风机、车身经过风机、车尾离开风机.本工况下射流风机不工作,故只需要对列车经过后,活塞风进入射流风机内经阻挡或黏滞而产生异变的内流场进行分析.

车头经过风机时刻的射流风机内流场特性云图见图 10.由图 10(a)可见,活塞风在进入前侧风筒时,流场中心部分有“漏斗形”低速区,而高速气流则是由漏斗外的近壁区域流向后侧,而在叶轮的阻碍作用下,大约 12 m/s 的入射流在 0.1 m 的范围内会迅速衰减,并演化为 0.5 m 的 6 m/s 速度区,之后该部分气流经历突扩段至后侧风筒,速度降到 4 m/s.由图 10(b)可见,入流在冲击压力面之后会在“漏斗形”流域内呈旋转流动,并最终沿着入风口上侧回流至隧道内.由图 10(c)可见,在叶轮吸力面附近的流场流线非常混乱,涡量很小且只分布在各固体壁面的拐角区,对流场本身影响不大.故造成这部分流线混乱的原因在于压力场的分布.由图 10(d)可见,相较外界隧道流场,射流风机在前侧风筒叶轮附近有一相对低压区,会使得空气沿着压降方向从两侧向中间流动,在后侧风筒区域出现一交锋面.

列车车身经过风机时刻的射流风机内流场特性云图见图 11.由图 11(a)可见,活塞风由出风口流入时,出风口上侧速度场稍大于下侧,结合图 11(b)中描述的空气流动路径和图 11(d)中压力场的分布,可以看到前侧风筒靠近叶轮部分仍存在大约 0.2 m 的低压区,还会持续吸入外界空气,来自于入风口的

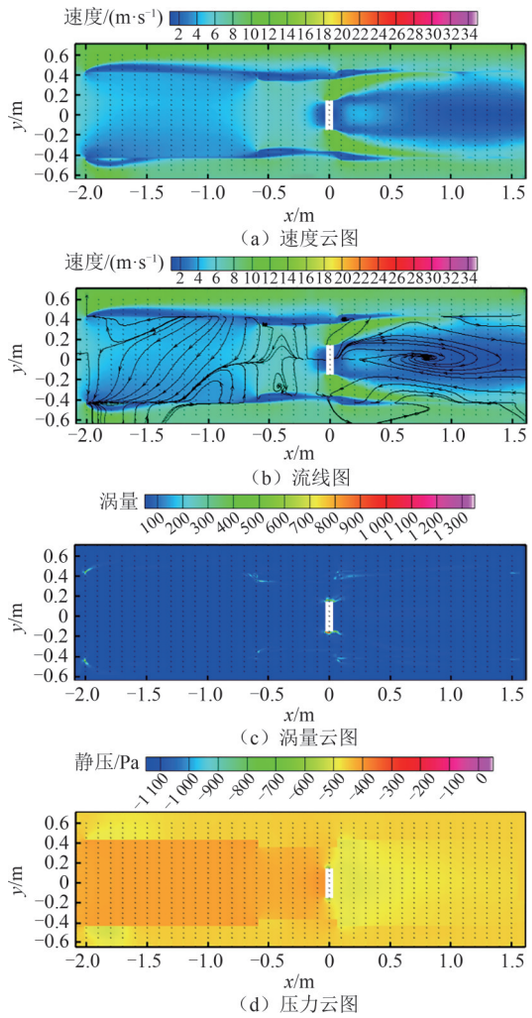


图 10　工况 2 中车头经过风机时的内流场特性云图

Fig.10　Cloud map of internal flow field characteristics when the locomotive passes through the fan in operating condition 2

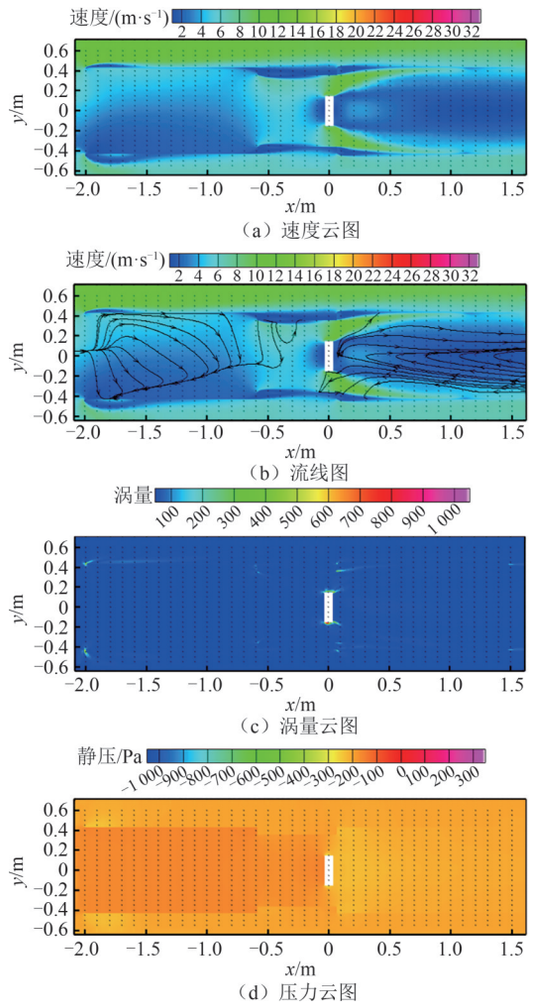


图 11　工况 2 中车身经过风机时的内流场特性云图

Fig.11　Cloud map of internal flow field characteristics of the vehicle body passing through the fan in operating condition 2

部分入射气流在冲击叶轮压力面之后会改变方向经由上侧空间出流，另一部分紧贴壁面流入后侧，与出口风流入活塞风形成稳定峰面，使其以大约 18°的入射角冲击后侧风筒下侧．由图 11(c)可见，在相对稳定的环状空间活塞风场中，涡量数值很小且出现范围不大．可见，影响风机内流场稳定性的主要因素是从环状空间流向车尾的活塞风．

列车车尾离开风机时刻的射流风机内流场特性云图见图 12．由图 12(a)可见，活塞风由出风口流入时，速度高值集中于上侧 0.2 m×0.6 m 三角区；图 12(d)显示在后侧风筒处有一相对高压区，这也解释了图 12(b)中空气进入后侧风筒内流场后迅速改变方向流回隧道空间的原因；由图 12(c)可见，涡量的数值减小但是出现范围增大，这是由于不同方向来流的综合扰动．因此，此时影响风机内流场稳定性的因素包括两部分：一是环状空间流向车尾的活塞风，二是车后空间补充的活塞风．

3)工况 3.

同样考虑列车行驶全过程对射流风机内流场的影响，但是该工况下存在射流风机旋转流场与活塞风直线型流场叠加，风机内流场特性参数的变化情况更加复杂．

车头经过风机时刻的射流风机内流场特性云图见图 13．由图 13(a)可见，速度场在基本保持轴对称分布的同时受到车前活塞风的影响，使得入风口处产生一处“帽状”冲击流，导致前侧风筒内流场的速度陡增，纵向影响范围大概为 1.3 m，同时前侧风筒近壁区域有 0.1 m 厚的黏滞层，导致该处流场的横向速度梯度很大，变化更加剧烈；经过风机加速后的出射流在此刻活塞风影响下的速度最快可以达到 50 m/s，并且高速区范围更大，说明活塞风会改善射流风机的出风效率．由图 13(b)可见，前侧风筒内，入射流在接近叶轮压力面时会在轴线处分割形成对旋的 2 种流动，并且下侧旋转的纵向尺度有 0.6 m，

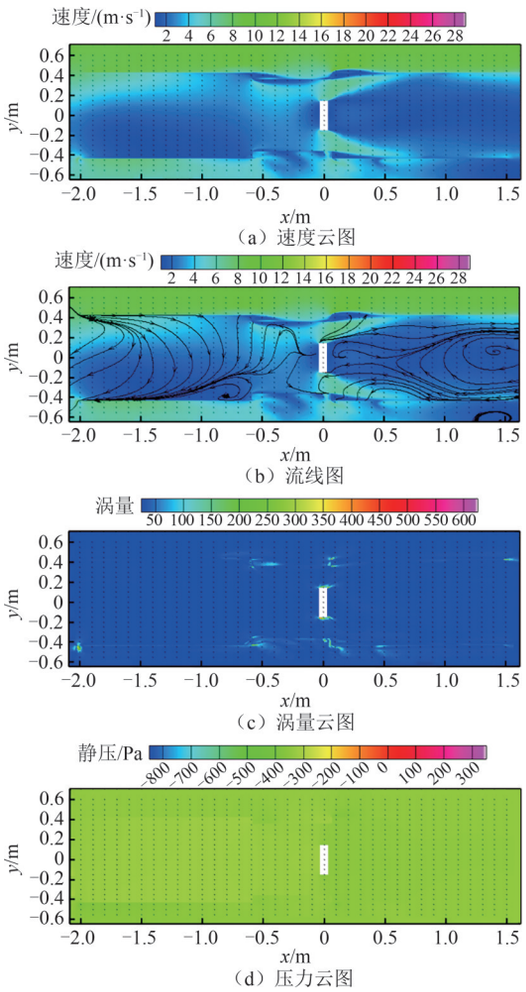


图 12　工况 2 中车尾离开风机时的内流场特性云图

Fig.12　Cloud map of internal flow field characteristics when the rear of the vehicle leaves the fan in operating condition 2

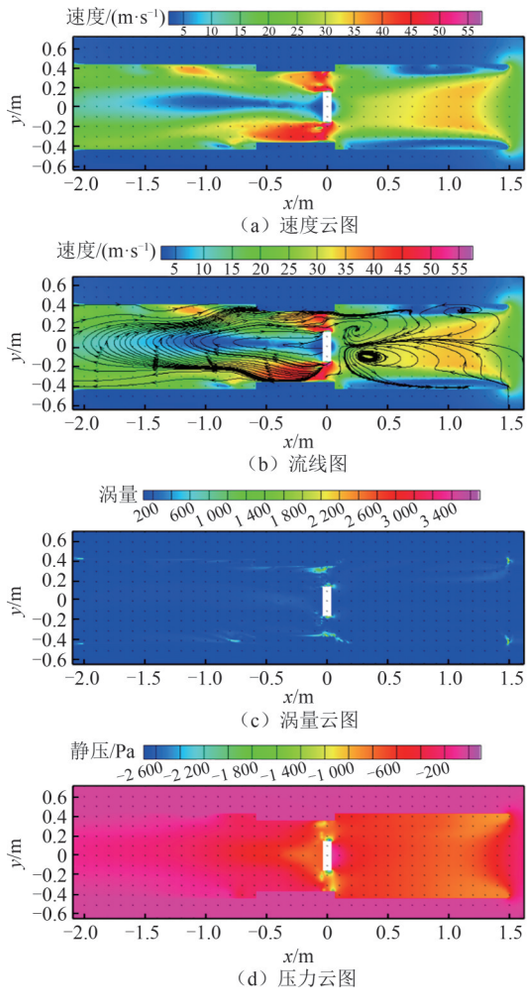


图 13　工况 3 中车头经过风机时的内流场特性云图

Fig.13　Cloud map of internal flow field characteristics when the locomotive passes through the fan in operating condition 3

上侧空气在旋转后部分被吸入后侧风筒,故纵向尺度仅有 0.3 m.后侧风筒内,会产生规律性的大范围回流,结合图 13(d),隧道外侧流场此刻为相对高压区,而风机内流场为相对低压区,在外力不足的情况下,空气很难逆压力梯度出射进入隧道.由图 13(c)可见,涡量数值最大可到 3 600,相比于空转的涡量更高,但是分布范围几乎一致,说明叶轮旋转才是产生涡量主要诱因.

车身经过风机时刻的射流风机内流场特性云图见图 14.由图 14(a)可见,速度场不再严格沿轴线对称分布,在前侧风筒上侧速度黏滞层退化,下侧速度黏滞层发育到近 0.2 m;同时在后侧风筒下侧的流速更快,结合图 14(b)的流线可知前侧风筒的流体旋转域缩小至 0.1 m 并向上侧移动,同时后侧风筒流线更加平缓,这是由于车周流体几乎平行于隧道轴线,会纠偏旋转内流场流线.同时图 14(c)说明了涡量大小有 200 的减幅,但是分布集中于旋转域附近的壁面上,涡能会在流出前迅速耗散,降低出风速度.由图 14(d)可见,前侧风筒存在明显强负压区,会在入风口加速卷吸空气.

车尾离开风机时刻的射流风机内流场特性云图见图 15.由图 15(a)、15(b)可见,前侧风筒上部变化出现 1.0 m×0.2 m 三角形低速区,其他部分的速度非常均匀,由流线可以推断出车后方空间的补充活塞风会沿着风筒上侧流入但是会在三角区内脱落,因此没有足够的初速度冲击压力面,而是直接被卷吸进后侧风筒.但是在后侧风筒中显示上、下侧的出射流速度和范围都在减小,说明此刻活塞风会抑制出风量.由图 15(c)可见,相比车头经过时,涡量增加,但是范围减小,符合该时刻复杂流场带来的影响.由图 15(d)可见,该压力场随着时间发展,吸力面后侧的负压持续增大而前侧风筒的负压持续减小,也说明了进风效率的降低与回流的增加.

3.4.2　射流风机内流场特性计算分析

1)车速对射流风机风量的影响.

不同车速条件下射流风机风量变化见图 16.由

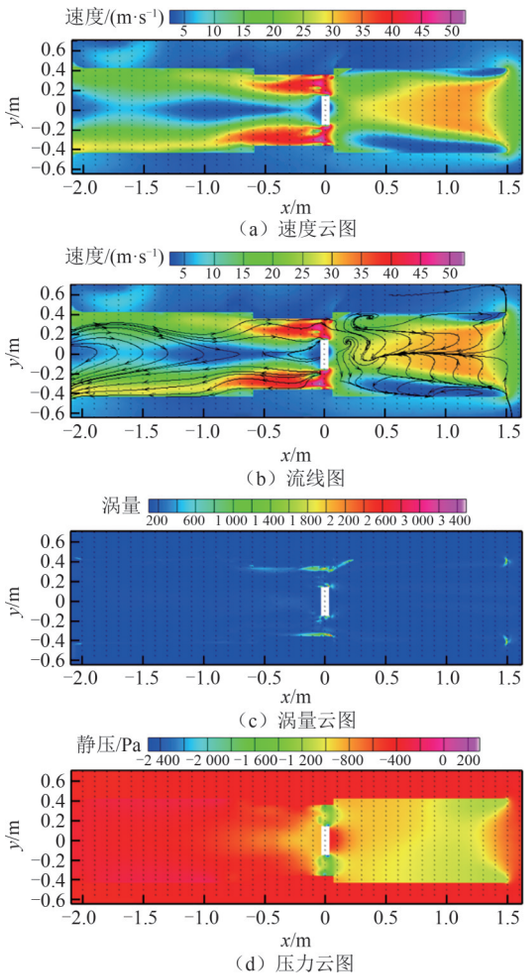


图 14　工况 3 中车身经过风机时的内流场特性云图

Fig.14　Cloud map of internal flow field characteristics of the vehicle body passing through the fan in operating condition 3

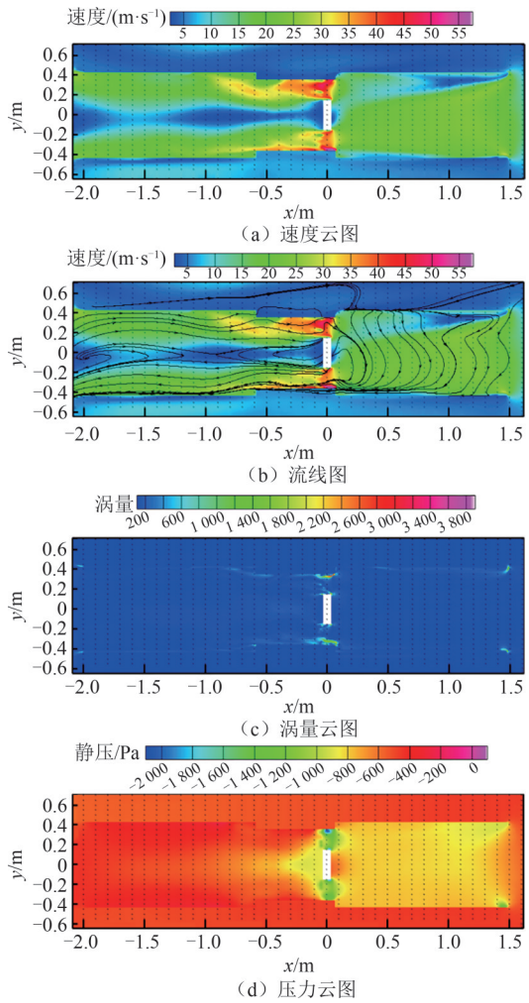


图 15　工况 3 中车尾离开风机时的内流场特性云图

Fig.15　Cloud map of internal flow field characteristics when the rear of the vehicle leaves the fan in operating condition 3

图 16 可见，无论是何种车速工况下，射流风机初始出风量都基本在 11.3～13.5 m^3/s 波动．而随着列车运动，车前活塞风首先影响射流风机出风量，该部分活塞风会伴随着强烈的挤压气动效应推动空气向前运动，这也正是射流风机的出流方向，因此会导致射流风机出风量快速升高．而当车身刚经过风机时，环隙空间内活塞风会立刻带动部分空气向车尾方向流动，导致出入风口之间的压差迅速减小，风量也随之骤降；而随着车身逐渐经过风机，风机至车尾间距离减小，对应的压力梯度也逐渐降低，因此逆出风方向的气流强度减弱，出风量开始回升．当车尾离开风机时，风机所在空间会出现瞬时真空而产生强负压区域，并且该区域会覆盖整个射流风机所在流场，导致风机入风口开始出现逆流，出入口压力梯度迅速降低，风量受到进一步抑制；而最后在车尾活塞风的持续补充下，流场逐渐恢复稳定状态，风量也逐渐恢复到初始水平．

车速越快，车前活塞风对射流风机出风量的提升幅度反而越小，这是因为在同一位置出发的列车，车速快者会率先通过风机，其正压推动流发展得不够充分，增风量有限．同时，车速越快，环隙空间内活塞风与车尾活塞风对射流风机出风量的抑制作用也越显著．以初始风量区间的平均值 12.4 m^3/s 为参考出风量，可得不同车速条件下活塞风对射流风机出风量的增长率与抑制率，见表 4.

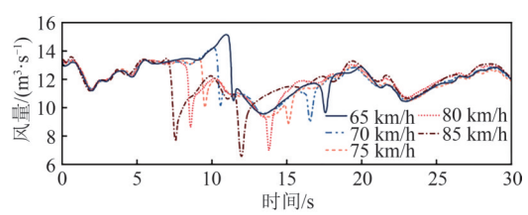


图 16　不同车速条件下射流风机风量变化

Fig.16　Changes in air volume of jet fan under different train speed conditions

不同车速条件下，对射流风机最大、最小出风量以及变化幅值进行分析，得出拟合曲线见图 17.

表 4　不同车速下活塞风对射流风机出风量的增长率与抑制率

Tab.4　Increase and suppression rates of the jet fan airflow under piston wind at various train speeds

工况	车速/(km·h^{-1})	最大风量/(m^3·s^{-1})	最小风量/(m^3·s^{-1})	增长率/%	抑制率/%
4	65	15.16	9.74	18.21	21.45
5	70	14.48	9.17	14.36	26.05
6	75	13.48	8.86	8.01	28.55
7	80	13.21	6.85	6.13	44.76
8	85	13.43	6.49	7.67	47.66

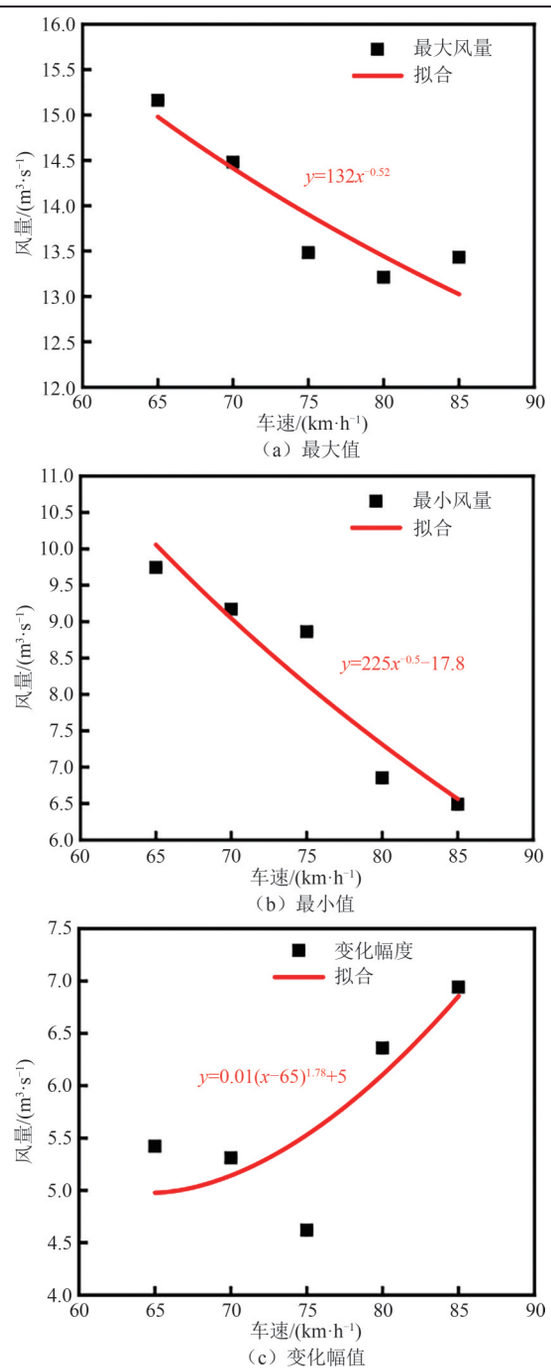


图 17　不同车速条件下射流风机风量极值变化规律

Fig.17　Variation of extreme airflow values of the jet fan under different train speeds

由图 17 可见,随着车速增大,最大风量与最小风量都随之降低,射流风机出风量极值与车速的 −0.5 次方呈线性关系;但是变化幅度随着车速增加而增加,其幅值近似与车速的平方呈正线性关系.相比于低速情况,车速 75 km/h 及以上活塞风对射流风机出风量的抑制效果显著提升,且变化幅值也大幅增加,对风机风量产生较大影响.

2)车速对射流风机出入口静压差的影响.

在风机性能参数中,出入口静压差表明风机突破环境阻力的能力,往往用来表明风机送风性能,该值越大,表明风机性能越好,推力越强,而且该值一般为正值,表明射流风机内流场是压升驱使的流动.不同车速条件下射流风机出入口静压差变化见图 18.由图 18 可见,在活塞风影响下,进出风口的静压差波动明显且峰谷值变化剧烈,这是因为车前活塞风产生推进性质的正压气流,在流经射流风机内流场时,会与风扇旋转产生的周期性变化内压力场叠加或冲抵.在车身经过风机时,其静压差总量走低,这是因为列车头尾间正压力梯度会抵消风机入口至出口方向的压差,但是总体上,风机还能在正常出风条件下运行,但是在该处活塞风场的持续影响下,静压差在短时间内出现负值,表明出风口出现逆流,该时程抑制区约 1 s.在列车车尾离开风机后,静压差出现小幅下降,随后逐渐恢复,但是整体静压差水平要低于初始运行状态.

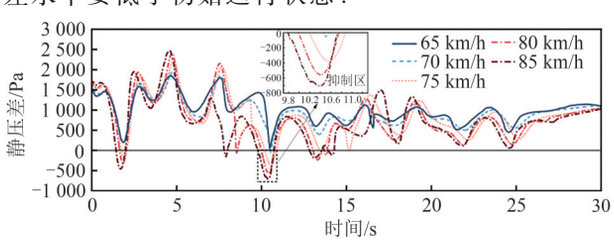


图 18　不同车速条件下射流风机出入口静压差变化

Fig. 18　Changes in static pressure difference at the inlet and outlet of jet fans under different train speed conditions

由图 18 还可看出,车速越快,进出口压力差波动越剧烈,峰值与变化幅值也越大,压差均值越低.且能看到在车速 75 km/h 及以上的静压差都有处于负压区的情况,但是 75 km/h 车速活塞风影响下静压差仅在变化最剧烈的位置出现逆压现象,表明 75 km/h 车速是在保证射流风机静压差性能可靠性

时能够接受的运行车速.

为进一步分析各车速下静压变化剧烈程度,将压差时程曲线分割成12个波段,对每一波段的峰值与谷值的差值进行计算,得到不同车速条件下各波段压力幅值峰值见图19.由图19可见,随着车速增加,射流风机出入风口的静压差在每一控制波段内的压力波动幅值曲线波动更加剧烈,说明其静压差性能受到影响的可能性更大,且列车通过前的波动幅值相较通过后要更高.

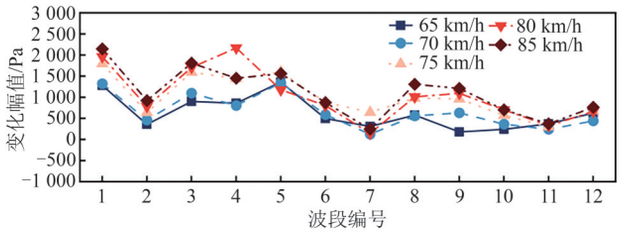


图19 不同车速条件下各波段压力幅值峰值

Fig.19 Peak pressure amplitude of each band under different train speed conditions

不同车速条件下,射流风机出入口最大与最小静压差及静压差变化幅值的变化规律见图20.由图20可见,射流风机的出入口静压差最大峰值与最小峰值以及变化幅度峰峰值都与车速表现出线性关系,车速越快,最大静压差越大,最小静压差越小,变化幅度峰峰值越大.

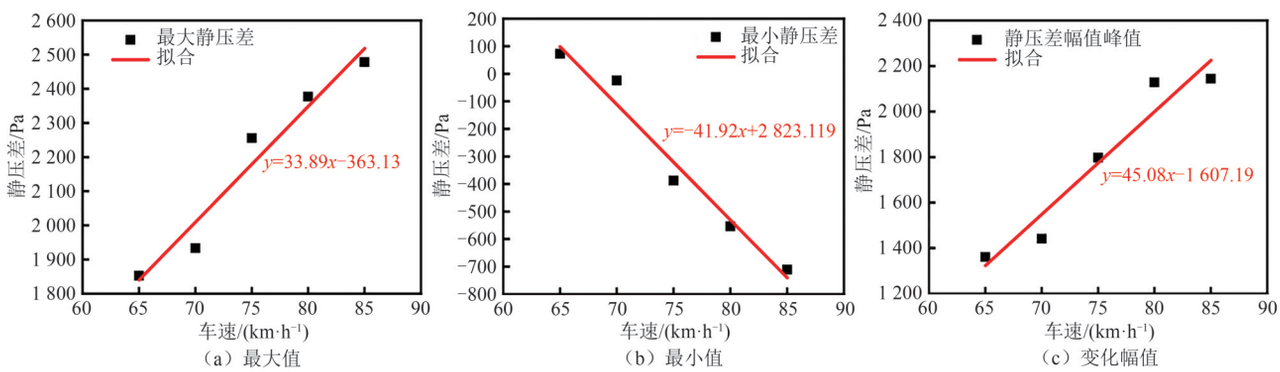


图20 不同车速条件下静压差极值变化规律

Fig.20 Variation of extreme static pressure differences under different train speeds

4 结论

本文基于现场实验、理论分析和数值模拟研究了地铁列车在隧道运行过程中的产生活塞风与射流风机旋转流场的叠加流动机理及其对射流风机出风量的影响,主要研究结论如下:

1)射流风机内流场各特性分布变化规律与活塞风形态相关.列车行驶过程中,顶部吊挂射流风机会受到活塞风的3种不同作用,分别是车头前侧挤压活塞风、车周环状空间补充活塞风以及车尾后侧补充活塞风,不同的活塞风形态通过扰动风机内部的空气流动来影响速度场、压力场等特性场.

2)车速越快,活塞风对射流风机出风量的抑制效果越明显,发生逆压回流的可能性越大,出风量极值与车速的−0.5次方呈线性关系,其降低幅值近似与车速的平方呈正线性关系.

3)车速越快,活塞风对射流风机出入口静压差的影响越大,对其工作稳定性的影响越显著,且射流风机的出入口静压差最大峰值与最小峰值以及变化幅度峰峰值都与车速表现出线性关系.

4)在阻塞比为0.3的马蹄形隧道断面中,车速75 km/h可以作为临界车速运行,既能保证风机出风口静压差尽量保持为正值,保持出风的稳定性,又能最小程度降低风机的出风效率.

本文在研究活塞风场与射流风机内流场过程中,从活塞风效应角度,仅考虑车速这一最主要因素对其性能的影响,在后续研究中,可以补充阻塞比、隧道型式、车型等工况;从射流风机角度,也仅仅考虑工作状态这一显性条件,但是对射流风机的布置位置、数量、启动方式等因素没有考虑,未来可对其做进一步研究.

参考文献(References):

[1] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通2023年度统计和分析报告解读[J].城市轨道交通,2024(4):15−17.
China Association of Metros. Interpretation of statistics and analysis report of urban rail transit in 2023[J]. China Metros,2024(4):15−17.(in Chinese)

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房城乡建设部印发《关于全面推进城市综合交通体系建设的指导意见》全面推进城市综合交通体系建设[J].工程建设标准化,2024(3):33.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *The guiding opinions on comprehensively advancing the construction of urban*

transportation network unveiled by the Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China[J]. Standardization of Engineering Construction,2024(3):33.(in Chinese)

[3] 北京市地铁运营有限公司.首都智慧地铁发展白皮书[EB/OL].(2020-11-12)[2025-05-09]. https://www.docin.com/p-4503608833.html.
Beijing Subway Operation Co., Ltd.. White paper on the development of smart subway in the Capital[EB/OL].(2020-11-12)[2025-05-09]. https://www.docin.com/p-4503608833.html.(in Chinese)

[4] 赵浩宇.活塞风作用下地铁隧道典型附属设施气动安全研究[D].北京:北京交通大学,2024.
ZHAO Haoyu. Study on the aerodynamic safety of typical auxiliary facilities in subway tunnels under piston wind effect[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2024.(in Chinese)

[5] 吴磊.活塞风作用下隧道设备风振及疲劳研究[D].成都:西南交通大学,2020.
WU Lei. Research on wind vibration and fatigue of tunnel equipment under piston wind[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2020.(in Chinese)

[6] 袁誉钊,贺德强,陈彦君,等.基于两车模型的地铁隧道活塞风对屏蔽门影响研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):227－234.
YUAN Yuzhao, HE Deqiang, CHEN Yanjun, et al. Study on the influence of piston wind on platform screen door in subway tunnel based on two-train model[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(1):227－234.(in Chinese)

[7] 赵刚.高速地铁气动荷载对屏蔽门的影响分析[J].铁道工程学报,2024,41(6):76－84.
ZHAO Gang. Analysis of the impact of high-speed subway pneumatic load on platform screen doors[J]. Journal of Railway Engineering Society,2024,41(6):76－84.(in Chinese)

[8] 尹静,刘剑春.基于OpenFOAM地铁隧道防火门的活塞风作用时变特性研究[J].结构工程师,2024,40(5):79－87.
YIN Jing,LIU Jianchun. Study on time variant characteristics of piston wind action on fireproof doors of connecting passages in subway tunnel based on OpenFOAM[J]. Structural Engineers,2024,40(5):79－87.(in Chinese)

[9] 于永波,谭虓,赵浩宇,等.地铁隧道壁挂式配电箱的活塞风作用时变特性[J].北京交通大学学报,2023,47(4):93－102.
YU Yongbo, TAN Xiao, ZHAO Haoyu, et al. Time-varying characteristics of piston wind acting on wall-mounted distribution box in subway tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(4):93－102.(in Chinese)

[10] 祝福,余志祥,曹瑞洲,等.地铁隧道附属广告设施的活塞风作用时变特性[J].西南交通大学学报,2018,53(5):1048－1057.
ZHU Fu,YU Zhixiang,CAO Ruizhou,et al. Time variant characteristics of piston wind for billboards affiliated with subway tunnels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2018,53(5):1048－1057.(in Chinese)

[11] 马江燕,邓保顺,廖凯,等.过站运行条件下地铁车站出入口卷帘门压力分析[J].暖通空调,2021,51(9):1－5.
MA Jiangyan,DENG Baoshun,LIAO Kai,et al. Pressure analysis of rolling shutter doors at underground railway station entrance and exit under passing station operation conditions[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2021,51(9):1－5.(in Chinese)

[12] 刘楠.地铁隧道射流风机通风效果模拟研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2019.
LIU Nan. The simulation study on ventilation effect of jet fan in subway tunnel[D]. Shenyang:Shenyang Jianzhu University,2019.(in Chinese)

[13] SHIH T H,LIOU W W,SHABBIR A,et al. A New k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids,1995,24(3):227－238.

[14] 浙江金盾风机股份有限公司.通风装备-风机-射流风机[EB/OL].(2025-03-01)[2025-05-09]. https://www.jind-unfan.com/Products_jz.html#c_static_001-1736222466176.
Zhejiang Jindun Fan Co., Ltd. Ventilation Equipme-nt-Fans-Jet Fans[EB/OL].(2025-03-01)[2025-05-09]. https://www.jind-unfan.com/Products_jz.html#c_static_001-1736222466176.(in Chinese)