DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.502

列车通过隧道设备舱通风特性数值仿真研究

周新喜[1]，汤　鑫[2,3,4]，何　榕[2,3,4]，周　伟[2,3,4]，徐翠强[1]，姜　琛[2,3,4]
（1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111；
2.中南大学 交通运输工程学院，湖南 长沙 410075；
3.中南大学轨道交通安全教育部重点实验室，湖南 长沙 410075；
4.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：随着大批规划山区铁路建成，列车在隧道狭小空间内运行及进出隧道激发的压力波对设备舱牵引设备通风特性的影响具有重要研究意义。文章采用基于标准k-ε湍流模型的非定常雷诺时均（URANS）方法及重叠网格技术，建立了某型4车编组带设备舱内部牵引设备的内外流场仿真模型，模拟了列车通过隧道过程中设备舱通风，并通过实车试验验证了数值仿真的准确性。研究结果表明：在隧道内稳定运行时，各车设备舱外气流通过裙板格栅进入设备舱内后高速流向舱内下游区域，被舱内用风设备捕获；同时，从头车到尾车，舱内压力逐渐降低，且各舱内上游压力低于下游；01车（头车）和02车设备舱通过格栅的空气质量流量在列车进出隧道和遭遇反射压力波时波动剧烈；而03车和04车（尾车）进入舱内的质量流量虽波动剧烈，但与隧道压力波的相关性较弱；02车牵引变流器、牵引电机散热风机和03车牵引变压器出风口的质量流量虽呈现波动性，但与隧道内压力波无显著关联。对比不同隧道长度工况，头车和02车舱内通风量的波动幅值相当。由于长隧道内压力波反射到列车的间隔较长，设备舱通风量波动较短隧道更平缓。从时均通风质量流量来看，长隧道对整车、头车、02车和尾车的通风几乎无影响，03车设备舱通风量表现出约5%的差异。研究结果揭示了设备舱内气流组织和通风量与隧道压力波的关系，为优化裙板格栅位置和用风设备布置提供可靠的理论支撑。

关键词：列车；设备舱；通风特性；隧道长度；重叠网格；数值仿真

中图分类号：U270.38^{+}3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2026)04-0102-10

0　引言

随着我国列车的进一步提速和山区线路的陆续开通，列车运行环境日趋复杂化，对列车牵引相关设备（牵引变流器、牵引变压器和牵引电机）的通风散热提出了更高的要求。列车牵引设备体积较大且数量较多，为了避免设备受到轨面杂物击打、提高用风设备进气洁净度并降低气动阻力，通常在吊装牵引设备和其他辅助设备的车下空间加装模块化裙板和端墙来对设备进行封闭，构成设备舱。牵引设备散热风机开启后，气流通过部分裙板格栅进入设备舱内，然后被吸入牵引设备内部风道冷却其换热器，实现高效散热。然而，在山区铁路隧道内长时间运行过程中，相对密闭的隧道空间导致列车设备舱内外流场与明线运行时有显著不同，需对设备舱内通风量与隧道通过压力波的影响规律开展研究。

在对隧道环境下的高速列车运行研究中，国内外

基金项目：国家自然科学基金面上项目（12372204）；湖南省自然科学基金面上项目（2023JJ30643）
通信作者：姜　琛，男，博士，副教授，博士生导师，主要从事轨道列车转向架积雪结冰、计算力学、流固耦合力学方面的研究；E-mail: jiangchen@csu.edu.cn
引用格式：周新喜, 汤鑫, 何榕, 等. 列车通过隧道设备舱通风特性数值仿真研究[J]. 机车电传动, 2026(4): 102-111.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.502.
Citation：ZHOU Xinxi, TANG Xin, HE Rong, et al. Numerical simulation of equipment compartment ventilation in high-speed train passing through tunnels[J]. Electric drive for locomotives,2026(4): 102-111.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.502.

众多学者主要针对压力波和气动性能开展了大量研究[1-4]。文献[5-6]在计算流体动力学（CFD）领域的研究验证了列车空气动力学特性数值模拟的可靠性，为后续研究奠定了基础。文献[7]探讨了隧道长度对列车压力场的影响，提出当隧道长度超过某一临界值时，列车所受初始压缩作用幅度和持续时间与隧道长度无关的结论。文献[8]分别模拟了单列及双线隧道中2列车运行时的压力特征，并分析了其与列车速度、扩大入口长度、隧道长度和机头长度的关系；文献[9]对比了不同运行速度下列车通过隧道时的压力波；在此基础上，文献[10-11]研究了高低温、高海拔隧道对列车运行压力波的影响。文献[12]研究了会车期间设备舱压力的变化，进一步丰富隧道环境下运行的仿真。

在列车通过隧道时，针对设备舱内流场、温度场和通风性能等方面的研究仍相对较少。文献[13]通过CFD仿真计算分析了地铁列车设备舱温度场和压力场，但其计算模型仅考虑单车，且仍采用吹风法模拟地铁隧道工况。文献[14]比较了明线无横风、明线有横风以及通过隧道等不同工况下设备舱的散热性能，但研究中欠缺舱内用风设备内部风机性能曲线等真实参数。文献[15-17]采用数值模拟方法对设备舱内部的流场及温度场进行了研究，分析了设备舱内部流场速度及温度的分布规律，但受计算量限制，仅模拟了部分变压器设备舱和变流器设备舱。文献[18]通过研究飞机设备舱温度场，为机舱冷却方案提供了参考数据，也为高速列车设备舱通风散热提供了思路。文献[19]则仅对不同运行速度下高速动车组设备舱在明线运行下的通风散热进行了仿真研究。

既有研究在隧道环境下高速列车设备舱通风性能分析中，多采用简化舱内用风设备模型，且仅考虑单节车设备舱，裙板格栅采用各向同性多孔介质模型进行简化。因此，本文基于某型列车4车编组模型，运用重叠网格技术模拟列车通过隧道，直接精细化建模裙板格栅，并为各主要用风设备设置真实风机曲线，开展不同隧道长度下列车设备舱的通风特性研究。

1　流动控制方程

列车在通过隧道时从外部开阔空间进入隧道狭窄空间，列车与隧道壁面存在相对运动，其流场需采用可压缩流动控制方程进行描述。针对设备舱内外流动，本文采用基于标准k–ε湍流模型的URANS方法对隧道中高速列车设备舱内主要用风设备通风特性进行数值模拟，控制方程如式(1)~式(3)。

质量守恒方程如式(1)。

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

式中：p为压力；t为时间；x_i为笛卡儿坐标系的坐标分量，i代表x、y、z 3个方向；u_i为流场速度分量；ρ为流体密度；并且公式遵循爱因斯坦求和约定。

动量守恒方程如式(2)。

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\rho u_j)u_i\right]-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}+\frac{\partial p}{\partial x_j}-\rho g_j=0 \tag{2}$$

式中：τ_{ij}为黏性应力张量；g_j为重力加速度分量。

能量守恒方程如式(3)。

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H)-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\tau_{ij}u_j\right)-\rho g_i u_i-q_{\mathrm{H}}=0 \tag{3}$$

式中：E为总能；T为气体热力学温度；H为总焓；k为热传导系数。

气体状态方程式(4)。

$$\rho=\frac{p}{RT} \tag{4}$$

式中：R为理想气体常数。

在标准k-ε模型中，k和ε是2个基本未知量，k表示单位质量流体的湍流动能，ε表示湍流动能的耗散率，与之相对应的输运方程如式(5)和式(6)[20]。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_h-\rho\varepsilon-Y_{\mathrm{M}}+S_k \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{3\varepsilon}G_b\right)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{6}$$

式中：G_k为平均速度梯度引起的湍动能k的产生项；G_h为由浮力引起的湍动能k的产生项；Y_{M}为可压湍流中脉动扩张的贡献；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$、$C_{3\varepsilon}$、G_b、σ_k为模型系数；σ_k为湍动能k的普朗特数，用于控制扩散项；σ_ε为耗散率ε的普朗特数；S_k和S_ε为用户定义的源项。

湍流黏度μ_i表示为k和ε的函数，具体如式(7)。

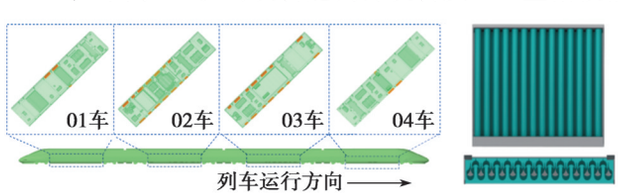
$$\mu_i=\rho C_\mu k^2/\varepsilon \tag{7}$$

式中：C_μ为经验常数。

2　数值计算模型

2.1　几何模型

采用4车编组1∶1列车模型进行数值计算，模型如图1所示，图中橙色高亮位置为裙板格栅，车长106 m，车高4 m。对设备舱内部设备及G-L型裙板格

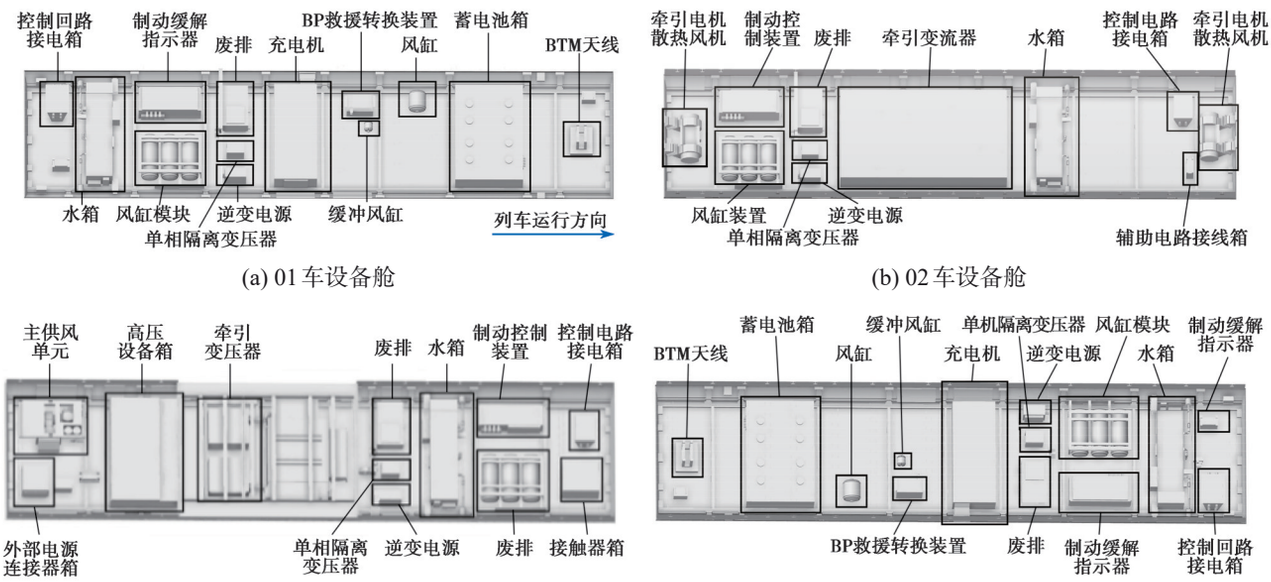


(a) 设备舱格栅位置　　(b) G-L型格栅

图1　4车编组列车几何模型

Fig. 1　Geometric model of the four-car train

栅进行精细化建模，同时简化转向架结构，忽略受电弓、轨道、牵引用风设备本身的滤网等细节。为准确模拟舱外流动透过裙板格栅进入舱内的流动，对格栅按真实几何完全建模：头车和尾车（01 车、04 车）单侧裙板有 2 个格栅，02 车和 03 车左右两侧各有 7 个格栅。各设备舱内布局如图 2 所示，其中用风设备（包括 01 车和 04 车的充电机、02 车的牵引变流器和 2 个牵引电机散热风机、03 车牵引变压器等）的内部通风风扇采用风机交界面模拟，并建立以上设备内部的简易风道。以 03 车为例，其牵引变压器的风机交界面设置如图 3 所示，与其他用风设备的内部简易风道类似。在裙板格栅后通常布置有滤网用于过滤进入设备舱内的空气，本模型中在相应位置设置交界面以体现其影响。



(a) 01 车设备舱　(b) 02 车设备舱

(c) 03 车设备舱　(d) 04 车设备舱

图 2　各设备舱内部设备布置图

Fig. 2　Layout of equipment within the equipment compartments

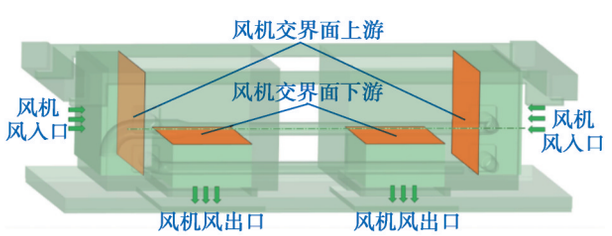


图 3　牵引变压器风机交界面设置

Fig. 3　Interface settings for the traction transformer cooling fans

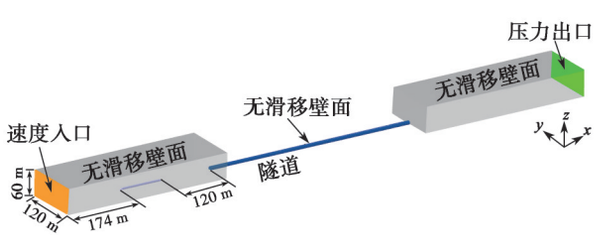


图 4　计算域尺寸及边界条件

Fig. 4　Dimensions and boundary conditions of the computational domain

2.2　计算域及边界条件

计算域尺寸及边界条件如图 4 所示。本研究中计算域由 3 部分组成，中间半圆柱体结构为单洞单线隧道，横截面积大小为 52 m^2，隧道长度取 500 m、1 000 m、2 000 m，分别对应工况 1、工况 2、工况 3。高速列车处于起始点位置时，鼻尖距隧道入口的距离均为 120 m，车速均为 200 km/h。因隧道长度不同，列车进出隧道时间有所不同。计算域左右两侧为列车进出隧道前后的明线环境，尺寸为 400 m×120 m×60 m。以列车运行方向为 x 轴正方向。计算中不考虑横风等其他因素影响，仅针对理想情况下列车运行，隧道表面为无滑移壁面条件，左右两侧明线环境中采用对称平面条件，两端面分别设为停滞进口和压力出口。

2.3　求解参数设置

研究团队采用 Siemens 公司的 STAR-CCM+（计算连续介质力学仿真软件）对隧道中高速列车设备舱主要用风设备的通风性能进行数值模拟。数值仿真基于隐式非稳态分离求解器，对前述可压缩非稳态三维雷诺时均方程进行求解，采用二阶迎风格式对对流项进行离散，使用 SIMPLE 算法实现速度与压力的耦合。为满足库朗数要求，将时间步长设置为 0.0005 s，保证计算域内 99% 网格的库朗数小于 1。为确保初始阶段的计算稳定性并节省计算时间，研究团队采用阶梯式减少迭代步数的方法：当运行时间 $t < 0.01$ s 时，每个时间步进行 40 次内迭代；当 0.01 s$\leqslant t < 0.05$ s 时，每个时间步进行 30 次内迭代；当运行时间 $t \geqslant 0.05$ s 时，每个时间

步进行20次内迭代。

此外，对主要用风设备（02车牵引变流器、02车电机冷却风机、03车牵引变压器等）施加真实风机的*P-Q*曲线（由于保密要求暂不公开）；将各车空调废排单元设为向舱内排风的质量流量入口边界条件（风量为2 800 m^3/h）；01车和04车舱内用风设备中仅有蓄电池充电机，也设为质量流量入口边界条件。

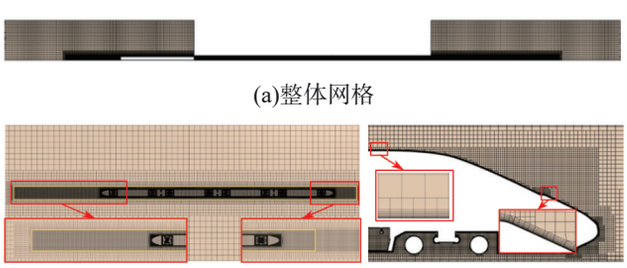
裙板格栅后的滤网采用多孔介质界面进行模拟，通过在风洞中对滤网前后进行多组风速和压差的测量，拟合得到多孔介质压降计算公式如下：

$$\Delta p=\alpha\rho|v_n|^2+\beta\rho|v_n| \tag{8}$$

式中：Δp为滤网前后压降，Pa；v_n为滤网来流法向速度，m/s；α为多孔惯性阻力系数；β为多孔黏性阻力系数；通过滤网压降风洞试验，拟合得到α=1.938，β=0.02 m/s。

2.4　网格划分及无关性验证

本研究几何模型精细化程度高，且需准确计算列车通过隧道的压力突变，并保证设备舱内外流场计算精度，研究团队综合考虑采用重叠网格技术。经初步验证，采用该方法可有效模拟出高速列车在隧道内的运行情况。采用STAR-CCM+中的自动网格功能划分切割体网格。为实现背景区域与加密区域之间流场数据的平滑传递，保证计算域内流场的连续性，将车体外的明线与隧道区域定义为背景区域，并在动车组外部建立尺寸为156.0 m×5.5 m×6.0 m的重叠加密区域，二者之间构建重叠网格交界面，如图5所示。背景区域网格尺寸为2 560 mm，重叠区域网格尺寸为320 mm。为更明确捕捉到车体表面边界层流动，研究团队在车体表面设置12层棱柱层网格。同时，在格栅、主要用风设备等重点关注区域进行网格加密处理，保证格栅缝隙最小处具有2层网格，如图6所示。格栅表面网格尺寸设置为10 mm，车体外表面网格尺寸为80 mm。



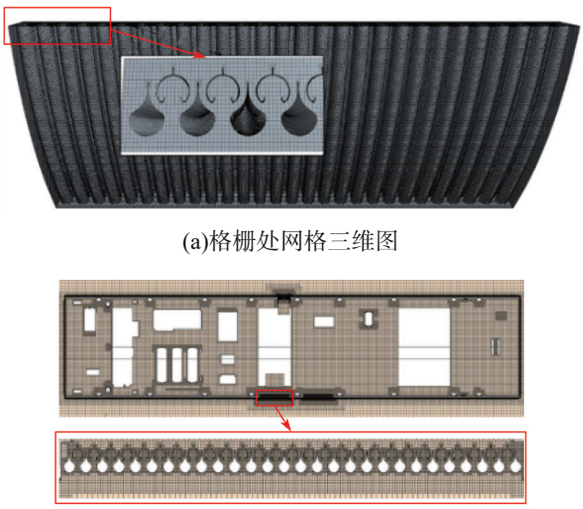
(a)整体网格

(b)车体周围重叠网格加密区　　(c)车体边界层网格

图5　计算域网格划分

Fig. 5　Mesh generation of the computational domain

为在节省计算资源的条件下获得最佳网格求解效果，并使求解误差最小化，本文生成了粗糙、中等和精细3种分辨率不同的计算网格。3套网格的加密区域设置与附面层尺度均一致，区别仅在于空间的离散分辨率：精细、中等和粗糙网格在设备舱最小网格尺度、列车表面网格尺度以及加密区体网格最小网格尺度依次放大1倍，由此离散得到的3套网格单元总数分别约为9 400万、5 800万和2 800万个，用于开展网格无关性验证。



(a)格栅处网格三维图

(b) y=0方向头车设备舱及格栅剖视图

图6　格栅处网格划分

Fig. 6　Mesh generation at the grille

由于02车内用风设备较多，舱内流场复杂度高，因此研究团队选取02车格栅流量展开网格无关性验证，并以精细网格为对比基准。结果表明，中等网格与精细网格的格栅流量差异较小，相对误差为1.57%；粗糙网格与精细网格的格栅流量差异较大，相对误差达到3.50%，详细格栅流量数值如表1所示。综合考虑计算精度与计算成本，研究团队最终采用约5 800万个网格单元的中等网格方案。隧道长度增加使得网格数量相应增加，采用网格无关性验证中的中等网格划分参数，网格数量在隧道长度500 m时约5 840万个，隧道长度1 km时约为6 066万个，隧道长度2 km时约为7 745万个。

表1　不同网格密度下02车格栅流量对比

Table 1　Comparison of mass flow rates through car 2 grilles for different mesh sizes

参数	精细网格	中等网格	粗糙网格
设备舱最小网格尺度/mm	1.25	2.50	5.00
列车表面网格尺度/m	0.16	0.32	0.64
加密区体网格最小尺度/m	0.04	0.08	0.16
网格数量	9.40×10^7	5.80×10^7	2.80×10^7
02车格栅流量/(kg·s^{-1})	10.85	10.68	11.23
相对误差/%		1.57	3.50

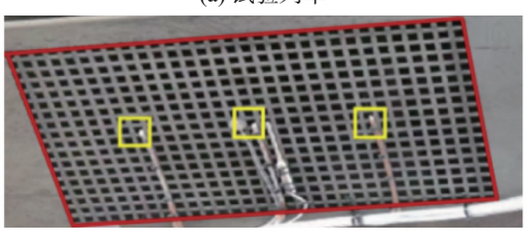
2.5　实车试验对比验证

在山区铁路线上，研究团队对同型号列车开展设备舱通风性能的实车试验。列车以200 km/h的速度运行，试验线路主要为隧道。试验以02车牵引变流器出风口流量为测量对象，在出风口处矩阵式布置风速测

量点，如图7所示（黄框中为靠背管式风速测量仪）。



(a) 试验列车



(b) 02车牵引变流器出风口风速传感器分布

图7　实车试验中牵引变流器出风口风速测点

Fig. 7　Air flow rate measurement points at converter outlet in full-scale train experiments

在数值计算模型中，于牵引变流器出风口相同位置设置速度探针，用于测量排风风速。数值仿真与实车试验的时均风速结果如表2所示，其相对误差为4.78%，二者基本一致。这表明本文所建立的设备舱通风散热数值仿真模型能够有效复现舱内空气流动和用风设备的进排风特性。

表2　数值仿真与实车试验时均风速结果对比

Table 2　Comparison of time-averaged outlet air flow rates between numerical simulations and full-scale train experiments

数据类别	出口风速/(m·s^{-1})	相对误差/%
实车试验	15.07	
数值仿真	14.35	4.78

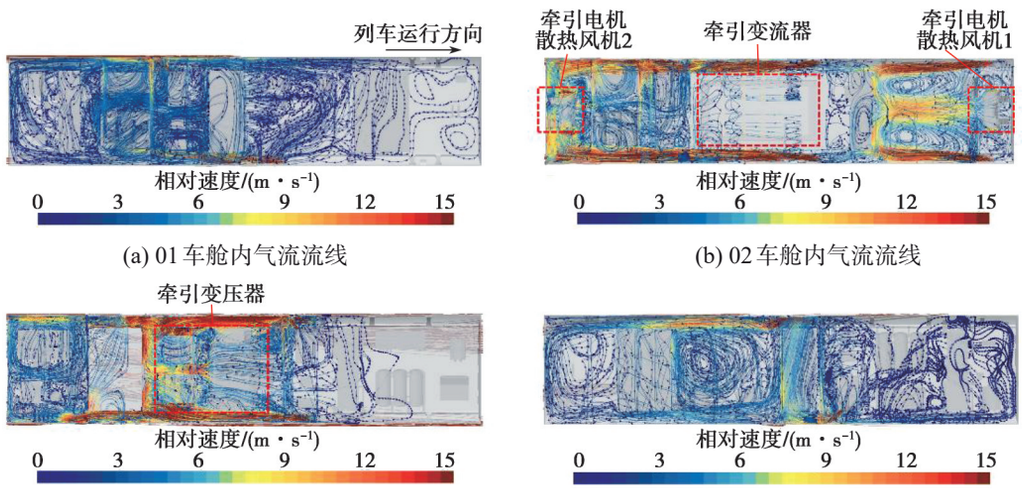
3　仿真结果及分析

研究团队基于上述经验证的数值仿真模型，在不同隧道长度下（分别为500 m、1 000 m、2 000 m）对高速列车设备舱格栅质量流量的演化开展仿真研究。本节主要分析动车组以200 km/h的车速，从距隧道入口120 m处出发，沿x轴正方向行驶，至车尾离开隧道时结束仿真过程。

3.1　隧道内运行时设备舱流场特性

列车通过隧道时，经历进入隧道、隧道内运行和驶出隧道3个阶段。由于进入和驶出隧道为短时现象且伴随压力剧烈变化，研究团队首先对隧道内稳定运行阶段的设备舱内流场特征进行分析。选取第6 s时刻（此时列车完全进入隧道并稳定运行），以剔除列车车速后的相对速度绘制设备舱内流线图，如图8所示。整体来看，各车设备舱内，车外气流经过裙板格栅吸入设备舱后流速较高，并首先流向舱内下游区域，在遭遇舱内设备阻碍后形成涡流，部分气流向列车运行反方向回流。此外，各车设备舱内废排单元的排出气流流速较高。研究团队对各车设备舱内流场分别进行分析：由于01车和03车设备舱内列车运行方向右半部分无裙板格栅，该区域流线分布较少且流速较低；02车设备舱内裙板格栅数量多且用风设备多，因此流场复杂，可观察到2个牵引电机散热风机的通风量存在差异。由于列车运行速度和用风设备吸风的叠加作用，通过02车裙板格栅的气流向下游左半部分设备舱内空间聚集，有利于牵引电机散热风机02的吸风；而上游右半部分设备舱内空间仅有1对裙板格栅，且对应的牵引电机散热风机1处于近似平行位置，气流进入后撞击水箱侧壁后形成回流，不利于吸风。

进一步地，选取第6 s时刻设备舱内z方向截面压力分布，如图9所示。整体来看，从01车到04车，靠近车头的设备舱内空气平均压力大于靠近车尾的设备舱平均压力。研究团队单独分析各车设备舱，可得由



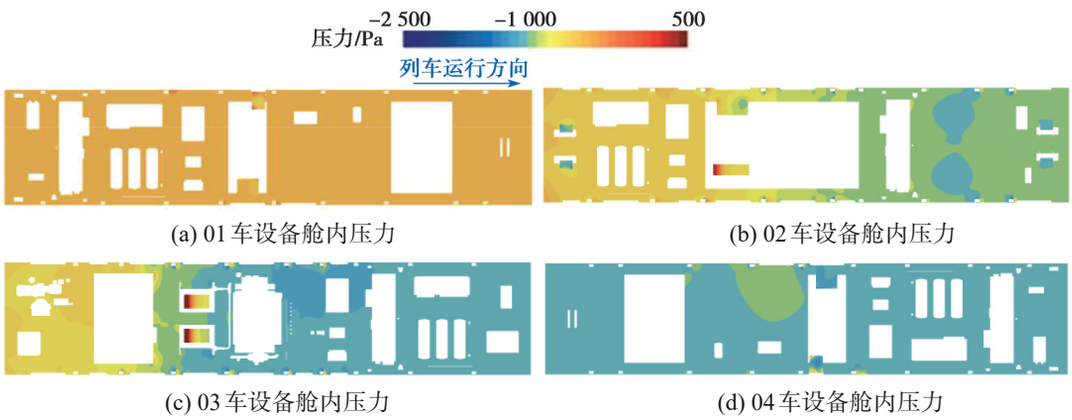
(a) 01车舱内气流流线　(b) 02车舱内气流流线

(c) 03车舱内气流流线　(d) 04车舱内气流流线

图8　6 s时刻下各车设备舱内气流流线图

Fig. 8　Streamlines inside the equipment compartments at 6 s

于01车和04车设备舱内部件和裙板格栅数量一致且用风量较少，舱内压力分布较为平均，但01车作为头车，舱内压力较高。02车和03车舱内压力分布表现出明显的上下游区域不一致，均为列车运行方向上游区域压力小于下游区域。该压力分布与图8中的流线特征相对应：进入02车和03车舱内的气流，在叠加列车运行速度后具有较高的流速，气流快速冲击设备舱下游区域，从而导致舱内压力分布不均。



(a) 01车设备舱内压力　　(b) 02车设备舱内压力

(c) 03车设备舱内压力　　(d) 04车设备舱内压力

图9　6 s时刻下各车设备舱内压力分布图

Fig. 9　Pressure distributions inside the equipment compartments at 6 s

综合各车设备舱内流线和压力分布情况可知，在隧道内稳定运行时，设备舱内气流主要呈现向左半部（列车运行反方向）聚集的特征。因此，即便在用风设备进风口附近设置裙板格栅，也难以使进入舱内的气流直接转向并被设备吸入。

3.2　隧道内压力波对设备舱通风性能的影响

列车高速通过隧道时，会在进入瞬间在隧道内产生压缩波，该波运动至隧道出口反射形成压力波系。因此，研究压力波作用于列车裙板格栅对设备舱通风性能（即质量流量）的影响有重要意义。本小节选取列车以200 km/h的速度通过1 km长、横截面积为52 m^2单线隧道，分析压力波对通过裙板格栅空气质量流量和主要牵引设备出风口质量流量的影响规律。由于列车初始运行处于提速起步阶段，裙板格栅处质量流量存在较大幅度波动，为更精确地展示各节车下设备舱的质量流量变化情况，下文分析中仅展示1 s之后的质量流量与压力变化数据曲线。

01车所有裙板格栅表面压力均值与格栅进入设备舱的总质量流量随时间的变化曲线如图10所示。压力曲线的波动表明仿真准确捕捉到了列车进出隧道时的表面压力变化，并在运行中间时刻识别出反射压力波对裙板格栅的作用。需要说明的是，裙板格栅的质量流量以外法向为正方向，即负值表示车外空气流入设备舱内。通过对比可知，裙板格栅表面压力波动对瞬时质量流量具有显著影响，总体表现为：①列车进入隧道时抑制气流进入舱内；②列车隧道内运行时，反射压力波到达裙板格栅会先抑制、后促进空气进入；③列车驶出隧道对通过格栅的质量流量有强烈促进作用。初步观察发现，压力变化越快（梯度越大），对质量流量幅值的影响越大。值得注意的是，01车和04车的充电机进出风口均位于设备舱内，叠加废排单元向舱内排放客室空调废气，使得01车设备舱整体平均流量为正，即向外排风大于向内吸风。

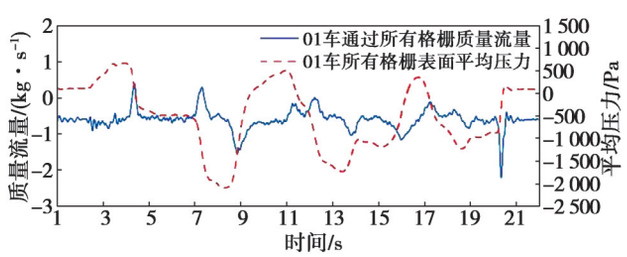


图10　01车裙板格栅进入设备舱内总质量流量与表面压力历程

Fig. 10　Time-history plot of total mass flow rate of intake through grilles for car 1 equipment compartment and surface pressure

02车设备舱在当前工况下所有裙板格栅表面压力平均值与格栅进入设备舱内总质量流量如图11所示。与01车设备舱的情况不同，02车设备舱内有牵引变流器和2个牵引电机冷却风机，用风量远大于01车设备舱，且通过格栅的质量流量波动幅度更大。但总体而言，通过格栅的质量流量及其表面压力变化规律与01车设备舱一致，即进入隧道时进入舱内的通风量受到抑制，在隧道内遭遇压力波反射时进入舱内的通风量先抑制后得到促进，驶出隧道时促进车外气流进入设备舱。此外，还可以明显观察到，在进入隧道前和隧道内稳定运行时（对比1.0~3.0 s时间段和5~7 s时间段），进入02车设备舱的空气质量流量均值大致相当。

研究团队进一步分析02车设备舱内牵引变流器和2个牵引电机冷却风机出风口质量流量随压力波动的变化关系，分别如图12和图13所示。由于牵引变流器从设备舱内吸风，虽然隧道压力波对进入舱内通风量有影响，但设备舱内空间类似一个大容量容器，能够缓

解舱内通风量的波动，因此牵引变流器的通风量受车外压力波动的影响较小。

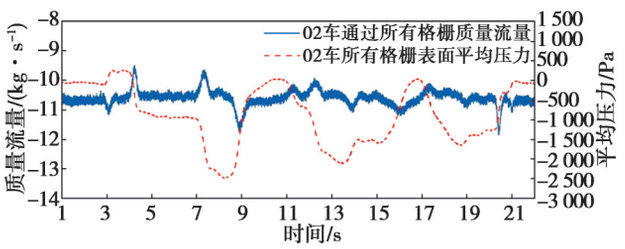


图 11　02 车裙板格栅进入设备舱内总质量流量与表面压力变化历程

Fig. 11　Time-history plot of total mass flow rate of intake through grilles for car 2 equipment compartment and surface pressure

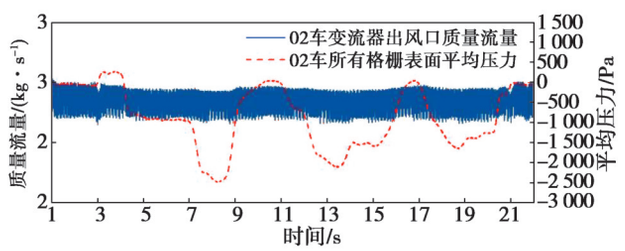
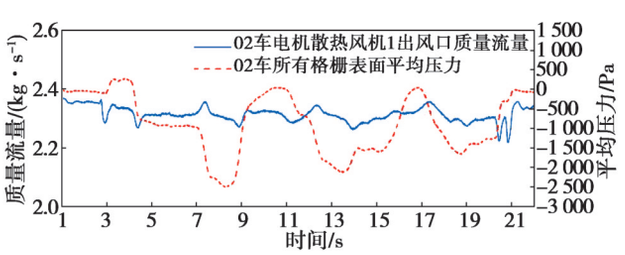


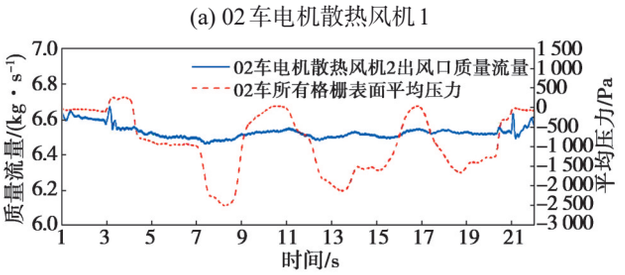
图 12　02 车变流器表面气压波与格栅进入设备舱内总质量流量

Fig. 12　Time-history plot of converter surface pressure and total mass flow rate of intake through grilles for car 2 equipment compartment

从图 13 来看，2 个牵引电机冷却风机出风口质量流量随压力波动的变化不大，质量流量变化幅度仅为 0.2 kg/s。但正如上一节所分析，02 车电机散热风机 2 处于下游区域，附近气流流速较高，流场结构较好，其进风量优于 02 车电机散热风机 1。



(a) 02 车电机散热风机 1



(b) 02 车电机散热风机 2

图 13　02 车电机散热风机质量流量与格栅表面压力变化图

Fig. 13　Time-history plot of mass flow rates through the motor cooling fans and grille surface pressure for car 2

03 车通过裙板格栅的质量流量与压力波动随时间的变化如图 14 所示。与 01 车、02 车不同，通过 03 车裙板格栅的质量流量与其表面压力波动的关系并不明显，且格栅表面压力变化趋势虽仍与 01 车和 02 车类似，但其压力脉动更为明显。研究团队分析认为，03 车位置偏后且靠近车尾，表面附面层进一步发展，涡脱加剧，导致其质量流量波动幅度更大且表面压力波动影响较小。03 车设备舱内布置有重要用风设备牵引变压器，其出风口质量流量随裙板格栅表面平均压力的关系如图 15 所示，与牵引变流器通风情况类似，牵引变压器的通风量受列车进出隧道压力波动的影响较小。

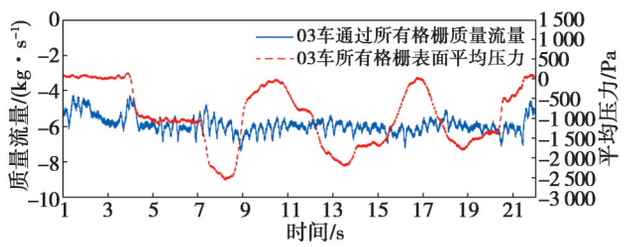


图 14　03 车裙板格栅进入设备舱内总质量流量与表面气压波

Fig. 14　Time-history plot of total mass flow rate of intake through grilles for car 3 equipment compartment and surface pressure

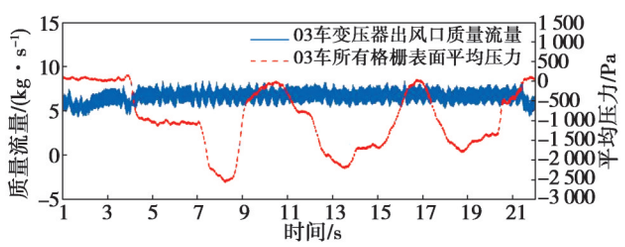


图 15　03 车牵引变压器舱内质量流量与格栅表面压力变化图

Fig. 15　Time-history plot of mass flow rates through the traction transformer and grille surface pressure for car 3

04 车通过裙板格栅的质量流量与压力波动随时间的变化如图 16 所示。与 03 车情况类似，04 车进入设备舱的质量流量与其表面压力波动无明显关系。01 车和 04 车舱内设备相同且仅充电机用风，对比图 16 和图 11 可知，04 车作为尾车，其裙板格栅处流场非定常性加剧，涡脱更为剧烈，导致其通风量受尾车复杂流场的影响更大，表现出剧烈的波动性。在此背景下，进出隧道压力波动的影响在尾车不占主导地位。

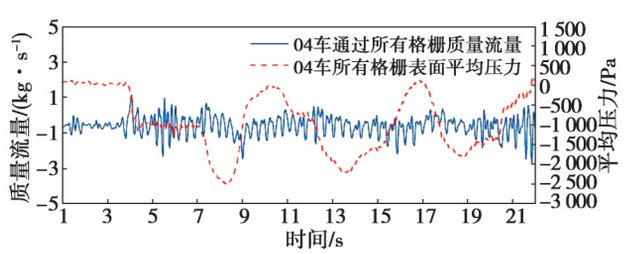


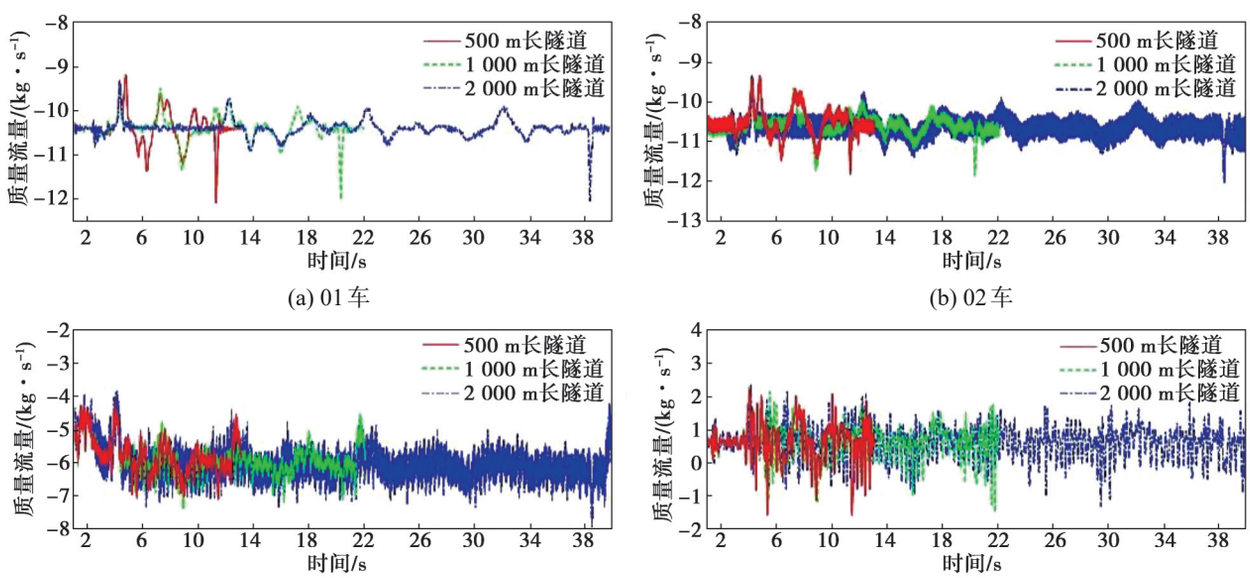
图 16　04 车裙板格栅进入设备舱内总质量流量与表面气压波

Fig. 16　Time-history plot of total mass flow rate of intake through grilles for car 4 equipment compartment and surface pressure

3.3　隧道长度对设备舱通风性能影响

未来山区铁路发展加速，对长大铁路隧道需求高，列车在隧道内长时间运行设备舱通风量的变化规律对牵引设备通风散热设计有重要工程意义[21]。受计算成本制约，本节通过研究列车以200 km/h分别通过500 m、1 000 m和2 000 m单洞单线隧道（分别需约16 s、22 s和42 s）的仿真，初步探讨隧道长度对列车设备舱通风性能的影响。所选隧道长度下各车进入设备舱内空气质量流量的时间历程如图17所示。在01车和02车中，仍然可见进入隧道和驶出隧道压力波动导致的质量流量剧烈变化。列车进入隧道时刻相同，流量曲线突变位置重叠；不同隧道长度下列车驶出隧道时刻不同，质量流量突变时刻也不同，但突变幅度相当。此外，隧道长度越短，压力波返回车身时间越短，500 m长隧道工况下，进入设备舱的质量流量幅值和变化程度最剧烈。

从图17(c)和图17(d)来看，隧道长度变化后，进入03车和04车设备舱质量流量的特性与上一节情况一致，即列车后半部分车辆车体表面附面层分离加剧，表面涡脱增多，03车和04车设备舱的通风量受进出隧道压力波动的影响相对减弱，呈现无规律的脉动特性。尤其是04车设备舱与01车设备舱的用风部件与布置方式呈对称布置，但二者通风量随时间变化规律存在显著差异。



(a) 01车　(b) 02车

(c) 03车　(d) 04车

图17　不同隧道长度下各车通过裙板格栅进入设备舱的质量流量变化

Fig. 17　Mass flow rates of intake through grilles into equipment compartments of cars in different tunnel lengths

为开展定量分析，研究团队计算列车车头鼻尖进入隧道至列车尾车鼻尖驶出隧道时间段内，各车设备舱流入的空气质量总量，以及对应的时均质量流量及其百分比差异，结果如表3所示。从整车设备舱的时均空气质量流量来看，隧道长度对其影响很小，处于仿真误差范围内。研究团队分析各车设备舱情况发现，除03车设备舱在通过2 000 m长隧道时的时均质量流量相比通过500 m长隧道时增加了6.10%外，其余各车设备舱的时均质量流量与隧道长度的关联很弱，与整车情况一致。将03车设备舱时均质量流量进一步向长大隧道（长度大于10 km）外推，03车设备舱内进风量会随隧道长度增加而增加。因此，在各牵引设备设计时充分考虑通风散热的需求下，对于低海拔山区长大隧道，现有设计仍可满足通风量的要求。

表3　通过隧道时各车设备舱总时均质量流量

Table 3　Time-averaged total mass flow rates for equipment compartments of all cars during tunnel passage

隧道长度/m	01车流量/(kg·s⁻¹)	相对误差/%	02车流量/(kg·s⁻¹)	相对误差/%	03车流量/(kg·s⁻¹)	相对误差/%	04车流量/(kg·s⁻¹)	相对误差/%	整车流量/(kg·s⁻¹)	相对误差/%
500	0.59		−10.33		−5.57		0.61		14.70	
1 000	0.60	1.69	−10.48	1.45	−5.78	3.77	0.61	0.00	15.05	2.38
2 000	0.60	1.69	−10.18	−1.45	−5.91	6.10	0.60	−1.64	14.89	1.29

4　结论

研究团队基于某型4节编组列车模型，在通过不同长度隧道下对高速列车设备舱的通风特性开展数值仿真研究，得到主要结论如下：

① 基于标准k-ε湍流模型的URANS方法和重叠网格技术，可有效模拟列车设备舱在隧道内运行的复杂

流场。经过网格无关性验证的模型能够准确捕捉列车经过隧道时设备舱内的通风流量，与实车试验误差小于5%，满足工程需求。

② 在隧道内稳定运行时，列车设备舱内压力从头车到尾车逐渐减小，并且各车设备舱内上游部分压力低于下游部分压力。舱内流场结构表明，通过裙板格栅进入设备舱的气流因叠加车速，会快速向舱内下游部分流动，之后撞击舱内设备和端墙形成涡流，因此舱内下游区域用风设备进风阻力小、风量大，布置裙板格栅与用风设备进风口平行而不利于设备吸风。

③ 在通过隧道时，列车靠近头车设备舱受隧道内压力波影响明显，表现为裙板格栅上正压抑制向舱内通风，负压促进向舱内通风；靠近列车尾车设备舱则受压力波动影响较小，受附面层分离和涡脱影响更大，表现为通风量波动幅度在隧道内基本保持不变，呈脉动状。

④ 在通过隧道时，牵引变流器、牵引电机散热风机和牵引变压器的出风口质量流量随隧道内压力波动变化不明显。设备舱内空间及格栅滤网对剧烈压力波动有缓冲作用，舱内用风设备通风量受压力波动影响很小。

⑤ 通过不同长度隧道时，通过裙板格栅的质量流量仍然表现出随进入隧道压缩波、驶出隧道膨胀波和发射波的影响较大，但对质量流量波动的影响相当。对通过设备舱裙板格栅的空气质量流量进行时间平均后对比，发现整车通风量基本与隧道长度无关，仅03车设备舱通风量有大于5%的增加。

当前受限于牵引设备表面发热功率参数的缺失以及超长隧道计算量过大等问题，未来研究将进一步结合实测牵引设备发热量和构建更长隧道内的列车设备舱通风加散热仿真，更全面地研究长大隧道对列车设备舱通风散热的影响。

参考文献：

[1] Wei K, Mei Y, Sun Q, et al. Propagation characteristics of initial compression wave induced by 400 km/h high-speed trains passing through very long tunnels[J]. Applied Sciences, 2024, 14(13): 5946.

[2] Du J M, Fang Q, Zhang X, et al. Aerodynamic effect associated with tunnel length[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(7): 2997-3008.

[3] 李爽, 杨明智 . 重联动车组通过隧道时气动性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(1): 16-24.
Li Shuang, Yang Mingzhi. Study on the aerodynamic performance of a couple multiple units high-speed train entering into a tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(1): 16-24.

[4] 贺义, 杨成, 杨志刚, 等 . 超导磁浮列车明线与隧道内气动噪声仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(2): 485-495.
He Yi, Yang Cheng, Yang Zhigang, et al. Simulation study of aerodynamic noise of superconducting maglev trains in open air and tunnels[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(2): 485-495.

[5] Baker C, Hemida H, Iwnicki S, et al. Integration of cross-wind forces into train dynamic modelling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225(2): 154-164.

[6] Baker C J. A review of train aerodynamics part 1-fundamentals[J]. The Aeronautical Journal, 2014, 118(1201): 201-228.

[7] Liu T H, Chen X D, Li W H, et al. Field study on the interior pressure variations in high-speed trains passing through tunnels of different lengths[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 169: 54-66.

[8] Lu Y B, Wang T T, Yang M Z, et al. The influence of reduced cross-section on pressure transients from high-speed trains intersecting in a tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 201: 104161.

[9] Zhou M, Liu T H, Xia Y T, et al. Comparative investigations of pressure waves induced by trains passing through a tunnel with different speed modes[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(8): 2639-2653.

[10] Liu L, Jing L, Li T, et al. Effects of high geotemperature and high altitude on the pressure wave of high-speed trains running in a long tunnel[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2024, 25(11): 953-969.

[11] 刘磊 . 高速列车在高海拔长大隧道运行时的气动性能与乘客舒适性研究[D]. 成都: 西南交通大学,2023.
Liu Lei. Research on the aerodynamic performance and passenger comfort of high-speed trains running in long tunnels of high altitude area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.

[12] Wu Y T, Zhou W, Liang X F, et al. Influence of trains meeting on the ventilation performance of equipment compartment with independent air duct in high-speed train: numerical and experimental study[J]. Railway Engineering Science, 2025, 33(1): 127-150.

[13] 蒋奎, 吴楠楠, 何守宝, 等 . 地铁列车设备舱通风冷却设备布置优化[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 94-96.
Jiang Kui, Wu Nannan, He Shoubao, et al. Optimization layout of ventilation and cooling in metro equipment cabin[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 94-96.

[14] 胡文锦 . 高速列车设备舱通风散热及气动响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
Hu Wenjin. Ventilation and heat dispersion and aerodynamic response of high-speed train equipment compartment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[15] 章国平, 范乐天, 王广明, 等 . 高速列车车下设备舱温度场分析[J]. 铁道机车车辆, 2012, 32(6): 5-8.
Zhang Guoping, Fan Letian, Wang Guangming, et al. Temperature field analyze of the high-speed train off-vehicle equipment cabin[J]. Railway Locomotive & Car, 2012, 32 (6): 5-8.

[16] 潘登, 臧建彬, 高乃平 . 高速列车设备舱温度场数值计算[C]//上海市制冷学会2013年学术年会论文集, 2013: 281-

284.
Pan Deng, Zang Jianbin, Gao Naiping. Numerical analysis of the temperature field in the equipment cabin of high speed train[C]//Proceedings of 2013 Academic Annual Meeting of Shanghai Society of Refrigeration, 2013: 281-284.

[17] 林鹏, 王维斌. 高速列车设备舱内大型设备通风方式的数值仿真研究[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(5): 15-21.
Lin Peng, Wang Weibin. Numerical simulation research of different ventilation ways for major ventilating devices used in equipment bay for high-speed train[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(5): 15-21.

[18] Wang C, Xu R N, Jiang P X. Numerical study on spray cooling of aircraft equipment cabin[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239: 122086.

[19] 王维斌, 陈大伟, 姚拴宝, 等. 高速动车组设备舱通风散热仿真研究[J]. 铁道车辆, 2025, 63(2): 38-45.
Wang Weibin, Chen Dawei, Yao Shuanbao, et al. Simulation research on ventilation and heat dissipation of equipment cabin of high-speed EMU[J]. Rolling Stock, 2025, 63(2): 38-45.

[20] Fluent Inc. FLUENT user's guide[M]. Lebanon: Fluent Inc, 2003.

[21] Han S, Zhang J, Xiong X H, et al. Influence of high-speed maglev train speed on tunnel aerodynamic effects[J]. Building and Environment, 2022, 223: 109460.

Numerical simulation of equipment compartment ventilation in high-speed train passing through tunnels

ZHOU Xinxi[1], TANG Xin[2,3,4], HE Rong[2,3,4], ZHOU Wei[2,3,4], XU Cuiqiang[1], JIANG Chen[2,3,4]

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China;
2. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;
3. Key Laboratory of Traffic Safety on Track Ministry of Education, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;
4. National & Local Joint Engineering Research Center of Safety Technology for Rail Vehicle, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China))

Abstract: As many new railways in China will run through mountainous terrain, it is important to systematically investigate how pressure waves induced by train operation in confined tunnels and at tunnel portals affect ventilation characteristics of traction equipment housed in train equipment compartments. To this end, train passage through tunnels was simulated using an unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) approach with the standard k-ε turbulence model, combined with an overset mesh technique and an internal and external flow field model developed for traction equipment in equipment compartments based on a four-car high-speed train model. The simulation results were validated against full-scale train experiments. Results indicate that, under steady operating conditions in tunnels, external air entering the equipment compartment of each car through the skirt grilles accelerates downstream inside the compartment before being drawn into the air-consuming equipment. Internal compartment pressure decreases progressively from the leading car to the tail car. Within each compartment, the upstream pressure is lower than the downstream pressure. Mass flow rates of intake through the grilles into the equipment compartments of the leading car (car 1) and the second car (car 2) fluctuate sharply in response to tunnel entry, tunnel exit, and pressure-wave reflections. The third car (car 3) and tail car (car 4) also experience strong fluctuations, but their responses are less strongly correlated with tunnel-induced pressure waves. Mass flow rates at the outlets of the second-car traction converter and traction motor cooling fans, as well as the third-car traction transformer, also fluctuate, but without a clear correlation with in-tunnel pressure waves. A comparison across different tunnel lengths shows that the leading-car and second-car compartments experience ventilation fluctuations of comparable amplitude; longer tunnels mitigate fluctuations due to delayed wave reflections. Time-averaged mass flow rates of ventilation for the entire train, the leading car, the second car, and the tail car are nearly unaffected during passage in longer tunnels; the third-car equipment compartment shows an approximate 5% difference. These findings reveal the correlations of equipment-compartment airflow and ventilation with tunnel-induced pressure waves, providing a theoretical basis for optimizing skirt grille locations and ventilation equipment layouts on high-speed trains.

Keywords: high-speed train; equipment compartment; ventilation characteristics; tunnel length; overset mesh;numerical simulation

收稿日期：2025-08-25；修回日期：2025-11-05
责任编辑：钟　锋