



140 km/h 地铁列车隧道气动噪声 大涡模拟研究

贺蕾铭¹, 杨元元¹, 王睿¹, 李宗澎^{2,3}, 高鹏飞², 邓自刚²

(1. 成都中电建瑞川轨道交通有限公司, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;

3. 西南交通大学 力学与航空航天学院, 四川 成都 610031)

摘要: 城际地铁列车以 140 km/h 速度运行时, 产生的气动噪声会对乘客的乘坐舒适性产生负面影响。文章针对某快速地铁列车以 140 km/h 速度在隧道内运行受到的气动力及产生的气动噪声开展研究, 通过 STAR-CCM+ 仿真软件对 1:20 精细化建模的地铁列车模型进行网格划分, 采用大涡模拟 (LES) 方法开展数值计算。结果表明: 尾车相较于头车和中车, 受到的阻力系数和升力系数最大, 在所有转向架中, 转向架 1 受到阻力系数和升力系数最大, 头车司机室下方、转向架 1 前方出现最高声功率级区域, 列车头车司机室及其底部转向架、受电弓等区域噪声较大。研究能有效评估 140 km/h 速度下地铁列车产生的气动噪声声功率级, 为之后快速地铁噪声治理研究提供参考。

关键词: 快速地铁列车; 气动力; 气动噪声; 大涡模拟; 声功率级

中图分类号: U231; U270.1+6

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)01-0109-09

0 引言

随着经济发展和生活水平的提高, 人们对轨道交通的快捷性、便利性和舒适性提出了越来越高的要求, 这对现有的轨道交通制式和运行状况提出了新的挑战。地铁列车在便利公众出行的同时, 车内噪声问题日益凸显。研究显示, 噪声会对人体健康产生负面影响, 人在较强的噪声环境下暴露一定时间后, 听力短期内难以恢复; 长期暴露会导致听力下降, 内耳感觉器官发生器质性病变, 甚至引起噪声性耳聋或永久性听力丧失^[1-4]。当环境噪声超过 50 dB 时, 会严重干扰乘客休息; 当噪声水平超过 70 dB 时, 乘客的精神状态会受到显著影响; 而超过 90 dB 的噪声甚至可能对乘客的生理健康造成损害^[5]。针对地铁列车车内噪声问题, 我国标准《城市轨道交通列车噪声限值和测量方法》明确规

定了限值^[6], 其中, 隧道内运行时司机室和乘客室内噪声限值分别为 80 dB 和 83 dB。因此, 降低车内噪声刻不容缓。研究数据表明, 列车所受到的气动阻力与列车运行速度的平方成正比, 列车运行时的气动噪声与速度的 6 次方到 8 次方成正比, 当速度达到某一临界值时, 气动噪声将会成为地铁车内最主要的噪声源^[7-9]。快速地铁列车在隧道内运行, 并不向外辐射噪声, 其产生的气动噪声受到隧道壁和车体表面的多重反射, 混响环境提高了车内噪声水平, 将会进一步降低乘客的乘坐舒适性。因此, 开展地铁列车气动噪声分析尤为重要。

目前, 国内外学者已针对地铁列车噪声问题开展了大量研究^[10-16], 并对地铁气动噪声特性进行了相关探讨。文献[17]研究了北京地下铁道列车内部噪声的影响, 发现地铁车辆内噪声与地铁线路质量、列车运行速度及地铁列车性能结构有关。文献[18]阐述了地铁列

基金项目: 中电建铁路建设投资集团有限公司科技项目 (DJTL-YBXM-2024-01)

通信作者: 邓自刚, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高温超导磁浮交通方面的研究; E-mail: deng@swjtu.cn

引用格式: 贺蕾铭, 杨元元, 王睿, 等. 140 km/h 地铁列车隧道气动噪声大涡模拟研究[J]. 机车电传动, 2026(1): 109-117. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.015.

Citation: HE Leiming, YANG Yuanyuan, WANG Rui, et al. Study of aerodynamic noise for metro trains running in tunnels at 140 km/h based on large eddy simulation[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 109-117. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.015.

车振动和噪声源的产生原理,列举了地铁列车噪声预测的方法、列车噪声的测量技术和减振降噪技术。文献[19]利用计算气动声学方法对深圳地铁1号线A型车在空旷地段匀速直线行驶和由地下隧道匀速驶出地面这两类营运工况的气动噪声进行了数值仿真。文献[20]对快速地铁车辆可能产生的气动问题进行了描述,并从工程实践的角度分析了与气动效应相关的车辆设计参数及其变化规律,为快速地铁车辆的设计提供参考。文献[9]分析了不同速度下地铁列车流场脉动性能、气动噪声源性能和远场辐射噪声性能,研究了列车外部流场情况及其声学规律。文献[21]采用统计能量法研究了地铁列车在明线上及隧道内以80 km/h、100 km/h、120 km/h车速行驶时的车内气动噪声。

成都轨道交通18号线是国内第一条以140 km/h速度运行的市域轨道交通兼机场线工程。列车设计时需考虑气动噪声影响,但该速度下的气动噪声研究尚属空白。因此,本文对成都轨道交通18号线地铁列车的气动力和气动噪声开展深入研究,有效评估140 km/h运行速度下地铁列车产生的气动噪声声功率级,可为该线路的噪声治理研究提供理论依据与数据支撑。

1 计算模型与计算方法

1.1 计算模型

计算列车周围流场需要建立真实的列车几何模型和计算域。本研究参照成都轨道交通18号线地铁列车的实际外形建立了3编组地铁列车几何模型,如图1所示。气动简化模型保留了连接架、受电弓、风挡、车钩和转向架等结构,与真实列车结构保持一致。列车车高 $H=4.65$ m,列车宽度为 $0.68H=3.16$ m,列车总长度为 $16.56H=77$ m,头车、中车和尾车底部都有2个转向架,头尾车司机室和2个风挡下面都有车钩。同时建立了如图2所示的外部隧道计算域,设定隧道阻塞比为0.3,列车在流向方向上的投影面积为 10.95 m²,管道的横截面积为 36.5 m²,半径约为 3.37 m。设定列车头部到隧道入口的距离为 $21.51H=100$ m,列车尾部到隧道出口的距离为 $47.96H=223$ m,以上参数设置确保了流场充分发展。为成功捕捉列车周围较高频率的噪声,对真实列车模型和外部隧道进行1:20缩比,并对缩比后的列车模型开展数值模拟。

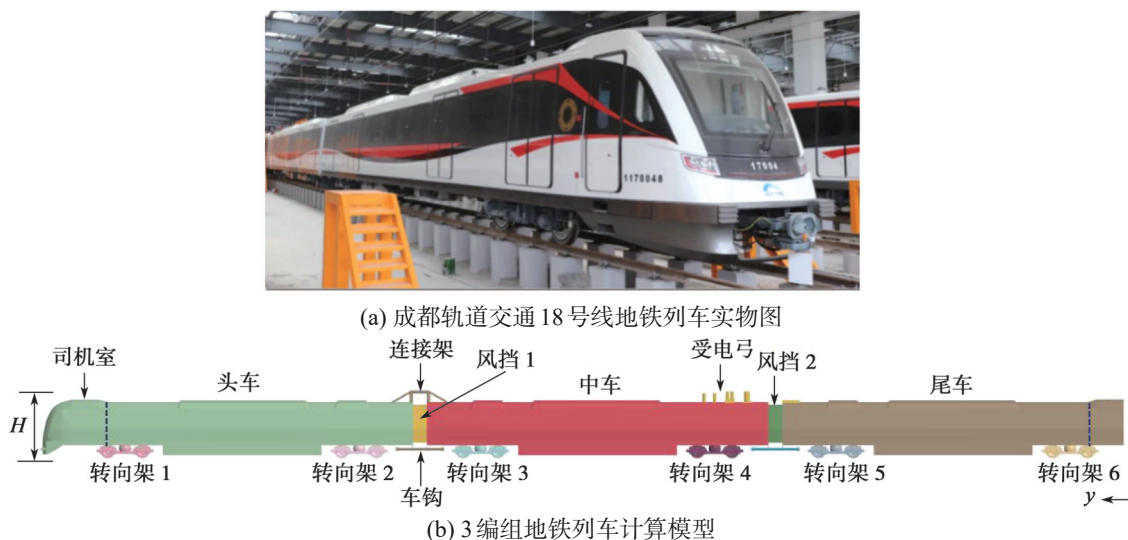


图1 地铁列车模型及气动计算模型

Fig. 1 Metro train model and aerodynamic calculation model

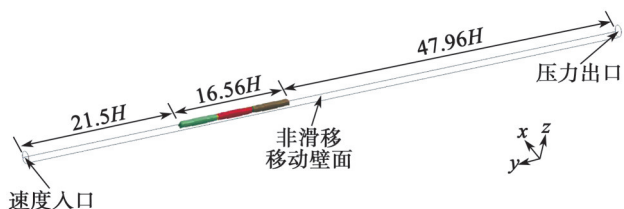


图2 地铁列车几何模型和外部计算域

Fig. 2 Metro train geometric model and external computational domain

1.2 计算模型

当地铁列车在隧道中运行时,通常采用相对运动原理来模拟其真实的运行状态。计算方法为在列车和

计算区域同时静止的情况下,通过为流场施加速度模拟出列车的运动速度^[22]。将隧道入口和出口分别设为速度入口和压力出口,列车的运行速度设定为 $V_{\text{train}}=140$ km/h,地面和隧道设置为无滑移的绝热固定壁面,指定切向速度为 $-V_{\text{train}}$ 来模拟地面和隧道与列车相对运动的影响。外界温度设定为 27 °C,对应外界气体的密度为 1.176 kg/m³。列车流场的数值仿真涵盖稳态计算与瞬态计算两方面,稳态计算能确保瞬态计算有较好的初始流场。具体流程为首先采用雷诺时均方法(RANS)和SST $k-\omega$ 湍流模型开展稳态计算,计算步数达到5 000步之后,通过大涡模拟(large eddy simulation, LES)开展瞬态计算。设定时间步长为 0.2 ms,

计算总时长为1 s, 总时间步为5 000步, 每个时间步长迭代10步。

1.3 网格划分

本文采用STAR-CCM+仿真软件开展网格划分和数值模拟。列车面网格和计算域体网格展示如图3所示。划分网格时, 选择切割体网格分割流场区域, 并在列车表面附近使用棱柱层网格来捕捉列车边界层内的流

动。使用低 y^+ 壁面处理方法, 经过反复试算, 设置棱柱层网格12层, 层增长率为1.2, 总厚度为0.62 mm, 如图3(b)所示; 确保列车表面大部分的 y^+ 值小于1, 如图4所示。同时由于计算资源的限制, 需在流动复杂的区域如连接架、受电弓、转向架以及尾车附近设置加密块来捕捉微小的流场扰动, 其大小依次为2 mm、4 mm、8 mm, 如图3(a)所示, 体网格数目总计为2 818万。

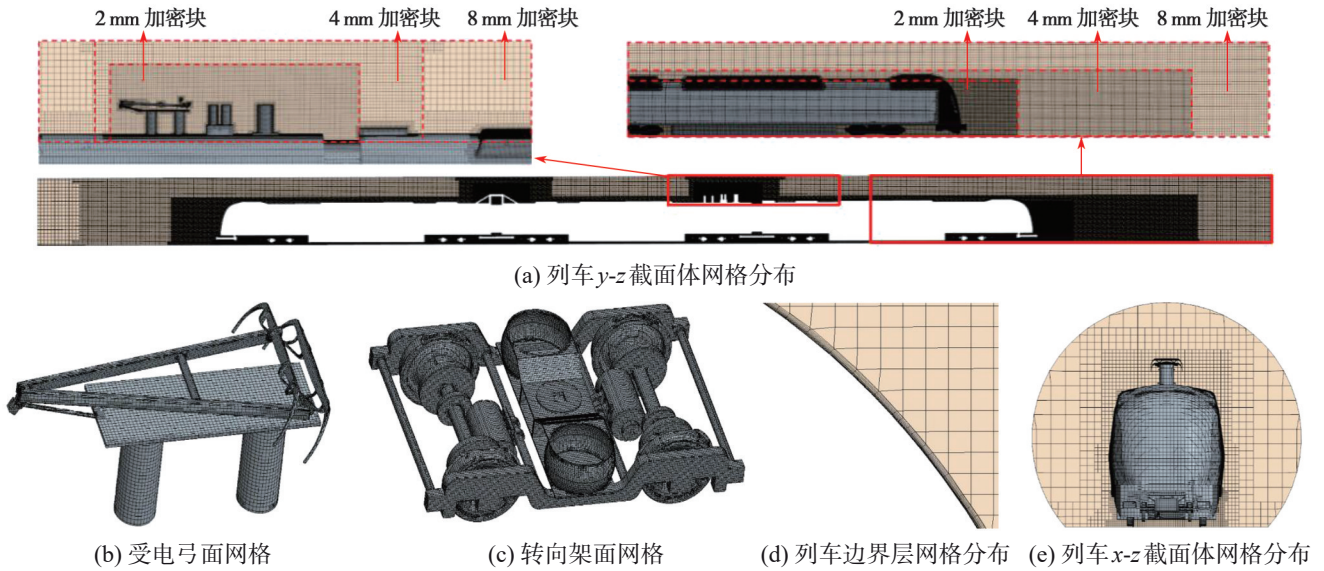


图3 列车面网格和计算域体网格展示

Fig. 3 Train surface mesh and computational domain volume mesh display

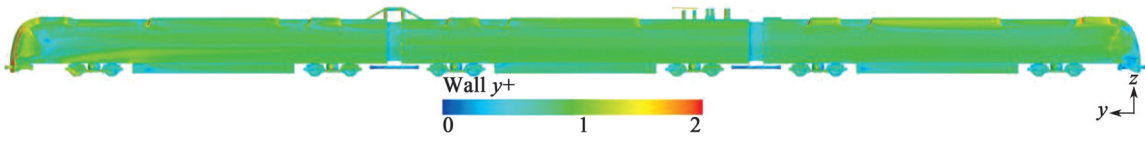


图4 列车表面 y^+ 值

Fig. 4 Train surface y^+ value

1.4 湍流模型

考虑到空气流速 $V_{\text{train}}=38.9$ m/s且其对应马赫数小于0.3, 对于非定常流场计算使用了分离的不可压缩大涡模拟LES。在LES中, 大尺度涡流被直接解析, 而小尺度涡流则被建模。过滤后的质量、动量传输方程分别为:

$$\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\mathbf{u}}) + \nabla \cdot (\rho \tilde{\mathbf{u}} \otimes \tilde{\mathbf{u}}) = -\nabla \tilde{p} + \nabla \cdot (T + T_{\text{SGS}}) \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; $\tilde{\mathbf{u}}$ 和 $\tilde{p}$ 分别为滤波速度和压力; T 为由式(3)定义的黏性应力张量; T_{SGS} 为亚网格尺度应力张量, 其分量为式(4), 通过式(5)计算得出。

$$T = \mu(\nabla \tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\mathbf{u}} \nabla) - \frac{2}{3}(\mu \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}})I \quad (3)$$

$$T_{\text{SGS}}(ij) = -\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (4)$$

$$T_{\text{SGS}} = \mu_t(\nabla \tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\mathbf{u}} \nabla) - \frac{2}{3}(\mu_t \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}})I \quad (5)$$

式中: I 为单位矩阵; μ 为动态黏度; μ_t 为由壁面适应局

部涡黏度(wall-adapting local eddy viscosity, WALE)子网格尺度模型给出的亚网格尺度黏度^[23]。

利用声学扰动方程(acoustic perturbation equations, APE)理论, 可以预测液流(通常是不可压缩流)产生的噪声, 该理论被用于计算近场声压。噪声源项是从非定常流场中得出的, 控制方程^[24]被写为方程(6)和方程(7)。

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p^a}{\partial t^2} + \frac{2\bar{\mathbf{u}}}{c^2} \cdot \nabla \frac{\partial p^a}{\partial t} + \frac{(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla)}{c^2} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} p^a) - \nabla^2 \left(p^a + \tau \frac{\partial p^a}{\partial t} \right) = - \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \frac{2(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla)}{c^2} \frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla)}{c^2} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} p') \right) \quad (6)$$

$$\tau = \chi \frac{\Delta t}{\pi \lambda} \quad (7)$$

式中: c 代表声速; p^a 表示声压; $\bar{\mathbf{u}}$ 为时间平均速度; $\bar{\rho}$ 代表时间平均密度; p' 代表流体动力压力。

在LES/APE混合方法中, p' 等于方程(2)中滤波压力 $\tilde{p}$ 。在物理阻尼项方程(7)中, χ 为声阻尼系数; Δt 为时间步长; $\lambda = c\Delta t/\Delta x$ 为局部CFL数, 其中 Δx 为网格

尺寸。

噪声源区域涵盖了在非定常流动中产生的关键噪声源，它在APE求解之前被明确指定，即噪声源加权系数等于1的区域，如图5所示。噪声源加权系数的值定义为1减去阻尼系数 χ ，因此在噪声源区域中阻尼系数为零。噪声区域位于网格细化区域的内部，网格细

化区域的尺寸为4 mm。当数据采样在流动和声压场达到非稳态稳定状态时，APE求解器开始启动，该时间为0.2 s，此时自由流动已经通过了计算域长度的4倍以上。在接下来的4 000个时间步长内，即0.8 s内，进行数据采样，采样包括从LES和APE的结果中分别采样的湍流压力和声压。

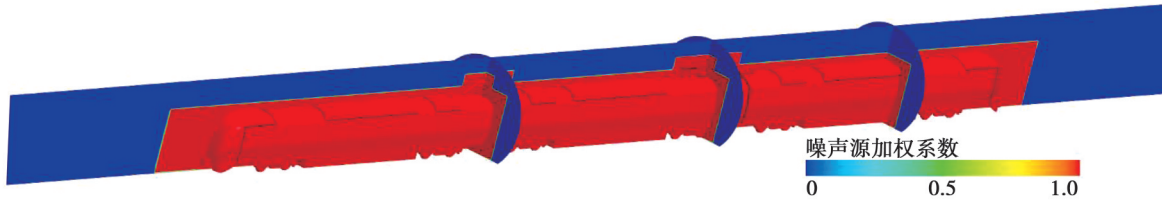


图5 噪声源区域

Fig. 5 Noise source area

本文采用1:20的缩比模型，因此需要使用无量纲气动系数和压力系数，动压力 q_∞ 、力系数 C_i 和压力系数 C_p 分别定义为：

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho V_{\text{train}}^2 \quad (8)$$

$$C_i = \frac{F_i}{q_\infty S} \quad (9)$$

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{q_\infty} \quad (10)$$

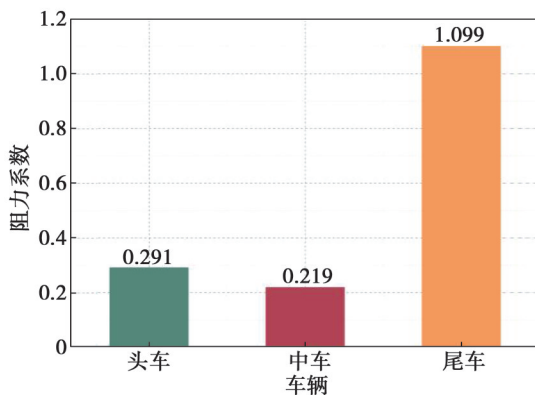
式中： F_i 为y和z方向上的气动力； ρ 为空气密度，具体为1.225 kg/m³；S为地铁列车或转向架的正投影面积，大小分别为2.74E-2 m²和3.67E-3 m²； V_{train} 为列车速

度；P和 P_∞ 分别为列车表面的静压和远场参考压力，远场参考压力的值是101 325 Pa。

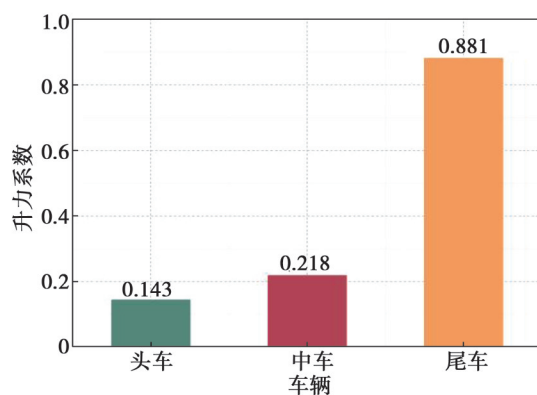
2 数值计算结果分析

2.1 稳态计算

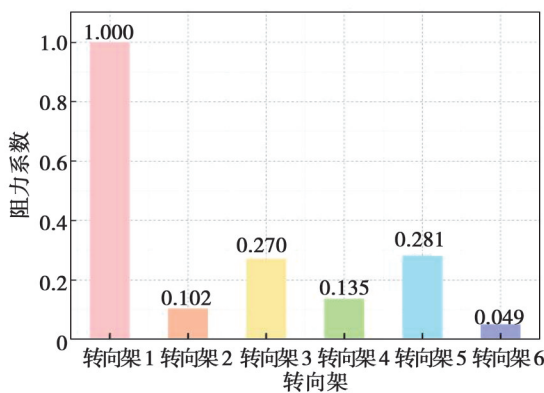
首先进行了稳态的计算。文献[25]指出，进行车速、风速和编组数量等参数对列车气动力大小等影响规律的研究时建议使用定常数值模拟方法，因此本文采用该方法计算得到了列车头车、中车和尾车以及各转向架所受的阻力系数和升力系数，如图6所示。



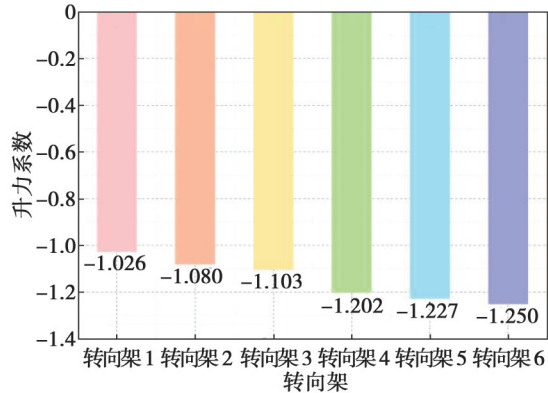
(a) 头车、中车和尾车阻力系数



(b) 头车、中车和尾车升力系数



(c) 各转向架阻力系数



(d) 各转向架升力系数

图6 列车各部件所受阻力系数和升力系数

Fig. 6 Drag and lift coefficients of train components

由图6可知,头车、中车和尾车所受的阻力系数分别为0.291、0.219和1.099,头车、中车和尾车所受的升力系数分别为0.143、0.218和0.881。头车阻力系数大于中车,但头车升力系数小于中车,尾车阻力系数和升力系数都远大于头车和中车。分析6个转向架的阻力系数时,可以发现转向架1的阻力系数显著大于其余转向架,对于单节车厢底部的2个转向架,前部转向架阻力系数均大于后部转向架;对于6个转向架的升力系数,其系数都为负值,说明转向架都受到向下的压力,其幅值从转向架1到转向架6逐渐增大。

之后通过云图展现了列车周围流场速度、列车周围流场和表面的压力系数,列车周围流场 Proudman 声功率分布和列车表面 Curle 声功率级分布,如图7~图10所示。

观察图7列车周围流场速度云图,可以发现列车前

部和尾部下游区域流场速度较小,列车上方流速较大。但因为连接架的存在导致中车和尾车上方高流速区域和低流速区域之间存在明确的分界线,头车司机室底部车钩会因阻碍气流的流动使气流流动速度变小。在转向架1前方、车钩后方气流流动速度可达22 m/s,显著高于其余5个转向架周围气流流动速度,因受电弓区域的不规则形状导致该区域流场较为混乱。

观察图8列车压力系数云图,发现列车头部正前方周围流场压力最大,而尾车司机室上方流场压力较小。列车司机室头部和底部车钩与气流迎面接触,导致列车司机室头部和车钩正前方压力较大,与尾车司机室背面形成显著对比。总体而言,从列车头车到尾车,列车周围流场压力和列车表面压力都逐渐降低。

观察图9列车周围流场 Proudman 声功率级分布,列车正前方、头车上方以及连接架上方 Proudman 声功

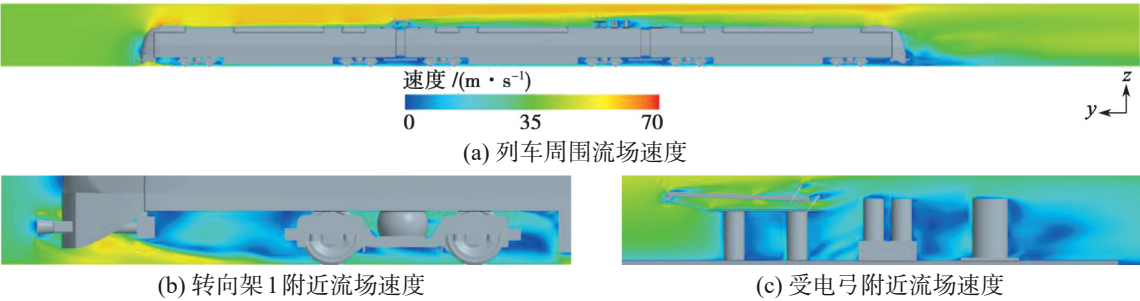


图7 列车周围流场速度分布
Fig. 7 Flow field velocity distribution around train

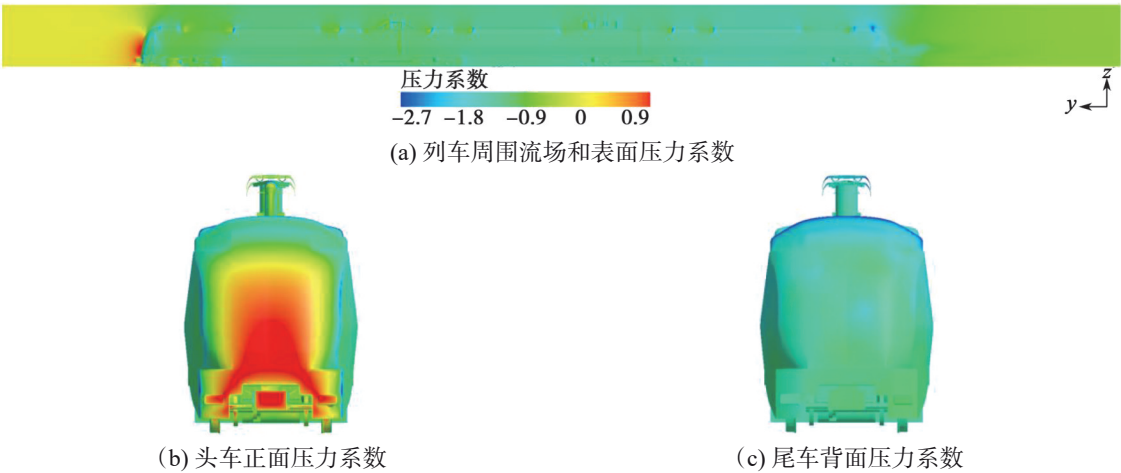


图8 列车周围流场和表面压力系数分布
Fig. 8 Flow field around train and train surface pressure coefficient distribution

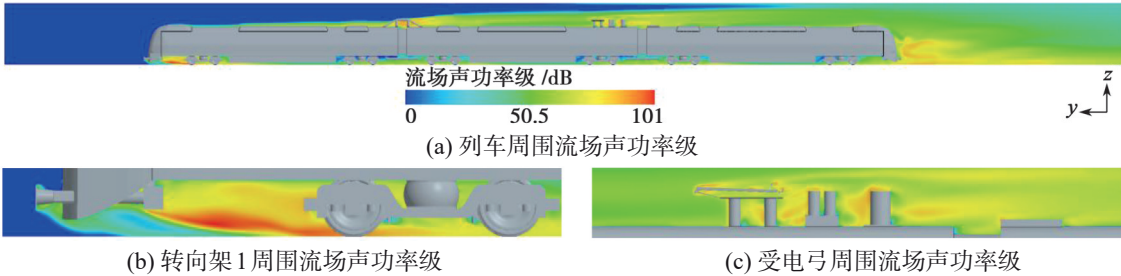


图9 列车周围流场 Proudman 声功率级分布
Fig. 9 Proudman sound power level distribution of flow field around train

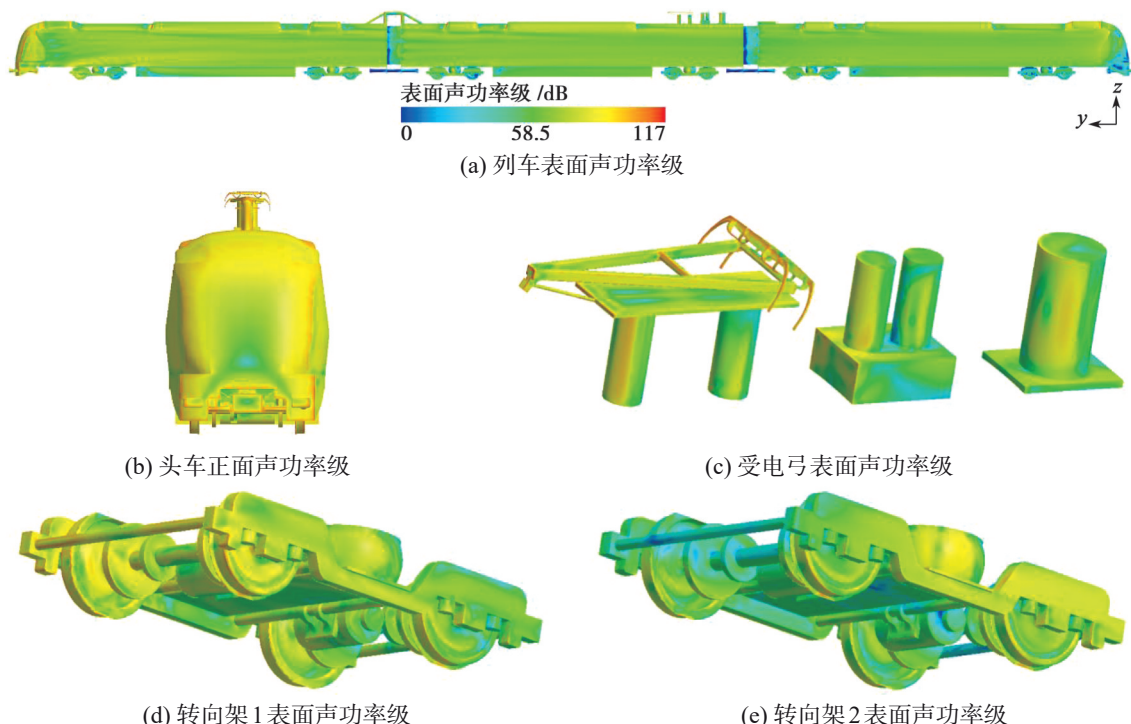


图 10 列车表面 Curle 声功率级分布

Fig. 10 Curle sound power level distribution of train surface

率级均为 0，连接架的存在导致中车和尾车上声功率级为 0 区域和非 0 声功率级区域之间存在与图 7(a) 中相似的分界线，受电弓区域由于受电弓的不规则也导致了其周围区域的 Proudman 声功率级分布较为混乱。头车司机室下方由于车钩的存在导致转向架 1 前方出现 1 个高声功率级区域，该区域声功率级可达 101 dB，此分贝为列车产生的最高分贝。

观察图 10 列车表面 Curle 声功率级分布，发现列车表面整体最大噪声出现在头车司机室区域，噪声超过 100 dB。列车车厢的噪声分布显示，表面噪声值大约为 85 dB。同时，转向架 1 和车顶的受电弓等关键部位也检测到了较高的声压级，如图 10 红色区域所示。转向架 1 的声功率级明显大于其他转向架，而风挡和底部转向架轮子区域的噪声则相对较弱，如图 10 中蓝色区域所示，2 个风挡底部车钩部位噪声更弱，几乎在 40 dB 以下。从头车至尾车，列车表面的噪声总体呈现逐渐降低的趋势。

图 11 展示了不同高度下列车表面 Curle 声功率级分布的区别，线条 1 距离底面的高度为 0.129 m，线条 2 距离底面的高度为 0.109 m。从图 11 可以看出，声功率级较大的位置位于头尾车司机室以及风挡 1、风挡 2 前端后端处。线条 1 声功率级分布波动较大，线条 1 在头车司机室前端处声功率级可达 103.9 dB，而在风挡 1 前端处和在风挡 2 前端处声功率级较小，分别为 45.3 dB 和 36.8 dB。线条 2 上声功率级最大值和最小值明显较小，头车司机室前端处声功率级为 97.6 dB，最小声功率级处位于风挡 1 前端，数值为 46.8 dB。在头车车厢处，线条 1 处分贝值高于线条 2 处，车厢处线条 1 分贝

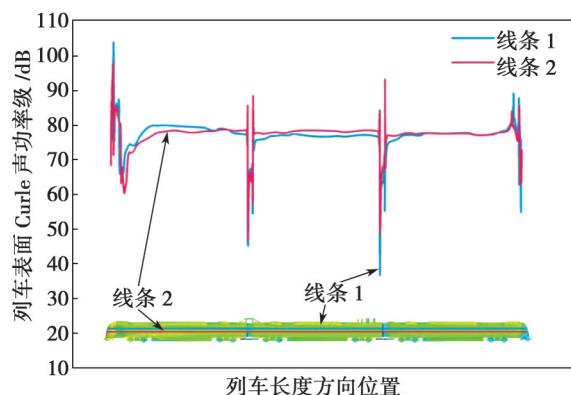


图 11 不同高度下列车表面 Curle 声功率级分布

Fig. 11 Curle sound power level distribution on train surface at different heights

值最大为 80 dB；而在中车车厢处，线条 2 的分贝值高于线条 1 处分贝值，车厢处线条 2 分贝值最大为 78.6 dB；在尾车车厢处，线条 1 和线条 2 分贝值几乎相同，数值约为 77.8 dB。

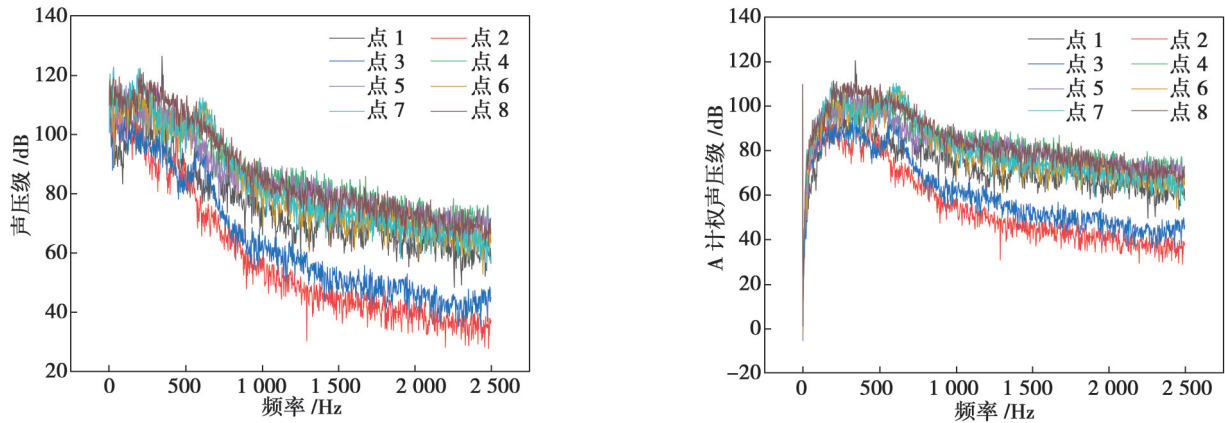
2.2 瞬态计算

在头尾车司机室、车厢不同位置处以及车厢连接处增加测点，这些测点与图 11 中的线条 1 的高度一致，测点从头车到尾车依次标记为点 1~点 8，具体位置如图 12 所示。计算各测点的声压级、功率谱密度和 A 计权声压级，其频率谱图如图 13 所示。

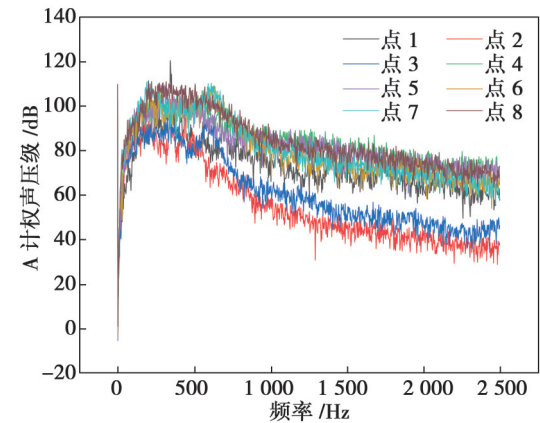
观察图 13 发现，从各监测点来看，声压级、A 计权声压级以及功率谱密度频谱图的总体变化趋势具有一致性，都是先增大后减小，频率从 0 Hz 分布到 2 500 Hz，在频率为 345 Hz 左右时达到转折点，图 13(a)、图



图 12 瞬态计算各监测点位置
Fig. 12 Transient calculation of monitoring points

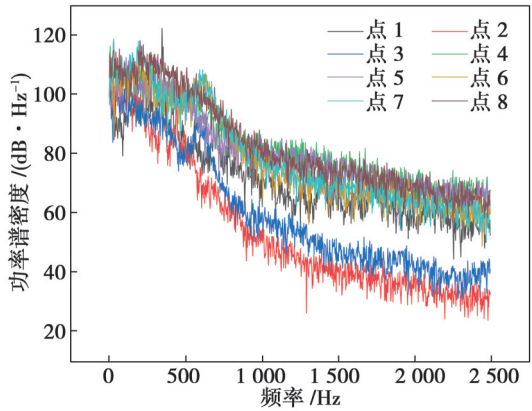


(a) 各监测点声压级频率谱图



(c) 各监测点 A 计权声压级频率谱图

图 13 各监测点声压级、功率谱密度和 A 计权声压级
频率谱图



(b) 各监测点功率谱密度频率谱图

Fig. 13 Frequency spectra of sound pressure level, power spectral density, and A-weighted sound pressure level at monitoring points

3，其余监测点的值差别不大。3 个频率谱图中监测点 1 都在频率为 345 Hz 处达到最大波峰，此处声压级、功率谱密度和 A 计权声压级的值分别为 126.3 dB、122.3 dB/Hz 和 120.4 dB。同时计算得到点 1~点 8 的声压级和 A 计权声压级，具体如表 1 所示。从表 1 数据可看出点 2 和点 3 处声压级和 A 计权声压级较低，而点 7 和点 8 声压级和 A 计权声压级较高。

13(b)和图 13(c)中值最小的监测点都为点 2，其次为点

表 1 点 1~点 8 的声压级和 A 计权声压级
Table 1 Sound pressure levels and A-weighted sound pressure levels at points 1 - 8

参数项目	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6	点 7	点 8
声压级	130.3	123.8	122.9	132.6	132.1	132.5	136.1	136.9
A 计权声压级	123.8	111.1	111.6	123.7	123.5	125.2	127.0	128.8

3 结论

针对时速 140 公里地铁列车在隧道内行驶时的气动噪声问题，以成都轨道交通 18 号线列车为原型，建立了 1:20 缩比的精细化 3 编组列车模型，采用大涡模拟 (LES) 结合声学扰动方程 (APE) 的混合方法进行了数值仿真，系统分析了列车气动力特性与气动噪声源分布规律，结论如下：

①气动力特性：尾车阻力系数和升力系数显著高于头车、中车，隧道高阻塞比使尾车尾流形成强非定常流动分离与涡脱落，气动载荷最为严峻。头车底部

转向架 1 的阻力系数和升力系数均为最大，且各车厢前转向架的气动受力普遍大于后转向架；升力系数均为负值并沿列车纵向逐渐增大，列车底部承受持续向下的压力作用。

②噪声源分布：头车司机室下方、转向架 1 前方区域声功率级最高，达 101 dB，主要由车钩阻流与转向架强湍流脉动所致；受电弓区域因几何不规则性诱导的非定常涡脱落形成明显的声源集中区。列车表面声功率级从头车至尾车整体递减，风挡底部车钩区域噪声最弱。不同高度截面的声功率级分布存在差异，较高位置曲线在头车司机室前端可达 103.9 dB，低位置曲线则为 97.6 dB，在中车车厢段则呈现高水平曲线低于

低水平曲线的反转特征。

③频域特性：各监测点声压级、A 计权声压级与功率谱密度的频率分布总体趋势一致，均呈现先增后减的特征，频率范围为 0~2 500 Hz，在约 345 Hz 处达到峰值，呈宽频噪声特性。对比各监测点数据，点 2 和点 3 的声压级及 A 计权声压级相对较低，而点 7、点 8 较高，A 计权声压级最高达 128.8 dB，已超过现行标准中地铁列车隧道内乘坐噪声限值，需要重点关注尾车端部的噪声控制问题。

本研究仍存在局限，如网格尺度在高频噪声的解析能力不足且未讨论地铁噪声的控制策略。后续将结合现场试验与低噪声结构优化，为市域快线地铁的乘坐舒适性提供更系统的解决方案。

参考文献：

- [1] TIAN H Q. Review of research on high-speed railway aerodynamics in China[J]. Transportation safety and environment, 2019, 1(1): 1-21.
- [2] SUN Z X, YAO S B, WEI L Y, et al. Numerical investigation on the influence of the streamlined structures of the high-speed train's nose on aerodynamic performances[J]. Applied sciences, 2021, 11(2): 784.
- [3] 张洁, 吴雨薇, 高建勇, 等. 时速 600 km 等级高速磁浮列车气动噪声特征数值仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(6): 112-121.
ZHANG Jie, WU Yuwei, GAO Jianyong, et al. Numerical simulation of aerodynamic noise characteristics of high-speed maglev train with a speed of 600 km·h⁻¹[J]. China railway science, 2021, 42(6): 112-121.
- [4] SANDEEP S, GOVINDU S, GAUTAM D, et al. Review of research on environmental noise standards/policies/guidelines and measurement methodology in high-speed rail[J]. Noise & vibration worldwide, 2022, 53(9/10): 487-497.
- [5] 耿明昊. 高速列车复合结构隔声性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2022.
GENG Minghao. Study on sound insulation performance of composite structure of high speed train[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2022.
- [6] 柳明. 隧道内地铁列车车内噪声特性及其关键影响因素研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
LIU Ming. Research on characteristics of interior noise and its key influence factors for a metro vehicle in tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [7] 孙振旭, 姚永芳, 杨焱, 等. 国内高速列车气动噪声研究进展概述[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(3): 385-397.
SUN Zhenxu, YAO Yongfang, YANG Yan, et al. Overview of the research progress on aerodynamic noise of high speed trains in China[J]. Acta aerodynamica sinica, 2018, 36(3): 385-397.
- [8] 朱剑月, 张清, 徐凡斐, 等. 高速列车气动噪声研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 39-56.
ZHU Jianyue, ZHANG Qing, XU Fanfei, et al. Review on aerodynamic noise research of high-speed train[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(3): 39-56.
- [9] 闫磊, 由天宇, 杨志刚. 时速 120 公里地铁列车气动噪声数值仿真分析[J]. 机车电传动, 2022(2): 26-30.
YAN Lei, YOU Tianyu, YANG Zhigang. Numerical simulation on aerodynamic noise of 120 km/h metro train[J]. Electric drive for locomotives, 2022(2): 26-30.
- [10] 温学委, 孙苗苗. 地铁车内噪声成因及影响因素研究概述[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(18): 17-22.
WEN Xuewei, SUN Miaomiao. An overview of the causes and influencing factors of noise inside metro vehicles[J]. Transportation technology and management, 2024, 5(18): 17-22.
- [11] KALKER J J, PÉRIARD F. Wheel-rail noise: impact, randomness, corrugation and tonal noise[J]. Wear, 1996, 191(1/2): 184-187.
- [12] 郭建强, 孙召进, 刘宗财, 等. 地铁车内噪声影响因素分析与改善[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(5): 84-87.
GUO Jianqiang, SUN Zhaojin, LIU Zongcai, et al. Analysis and improvement of the factors influencing interior noise of the metro[J]. Noise and vibration control, 2017, 37(5): 84-87.
- [13] 周海洋. 基于 BP 神经网络的地铁小半径曲线地段车内噪声预测分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHOU Haiyang. Prediction and analysis of in-car noise in metro area with small radius curve based on BP neural network[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [14] 汤继新, 周俊召, 刘艳, 等. 不同轨道参数对地铁车辆车内噪声的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 15-18.
TANG Jixin, ZHOU Junzhao, LIU Yan, et al. Influence of different orbit parameters on interior noise of metro vehicle[J]. Urban mass transit, 2021, 24(6): 15-18.
- [15] 黄建辉. 深圳地铁轨道减振降噪措施[J]. 现代城市轨道交通, 2023(3): 106-109.
HUANG Jianhui. Vibration and noise reduction measures of tracks for Shenzhen metro[J]. Modern urban transit, 2023 (3): 106-109.
- [16] 李朝威. 不锈钢地铁车辆安全性与舒适性研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
LI Chaowei. The safe and comfortable research of stainless steel subway[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013.
- [17] 王毅. 北京地下铁道噪声对环境影响的调查与研究[J]. 地铁与轻轨, 1994(2): 33-36.
WANG Yi. Investigation and research on the impact of Beijing subway noise on the environment[J]. Metro and light rail, 1994(2): 33-36.
- [18] 吴刚. 地铁列车振动和噪声源分析及减振降噪措施[J]. 科技与创新, 2014(5): 28-29.
WU Gang. Subway train vibration and noise source analysis

- and vibration and noise reduction measures[J]. Science and technology & innovation, 2014(5): 28-29.
- [19] 金海, 何连华, 杨立国. 地铁列车气动噪声数值模拟研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(9): 67-72.
- JIN Hai, HE Lianhua, YANG Ligu. Numerical simulation investigation on aero acoustics of subway train[J]. Building science, 2014, 30(9): 67-72.
- [20] 唐闻天, 王丽丽. 快速地铁车辆气动效应及车辆设计参数分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 138-142.
- TANG Wentian, WANG Lili. Analysis on aerodynamic effects and design parameters in rapid metro vehicle design [J]. Urban mass transit, 2019, 22(5): 138-142.
- [21] 陈林. 基于统计能量分析法的地铁列车气动噪声研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2024.
- CHEN Lin. Research on aerodynamic noise of subway based on statistical energy analysis[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2024.
- [22] 杜芳慧. 地铁列车气动特性的数值模拟研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.
- DU Fanghui. Numerical simulation study on the aerodynamic characteristics of subway train[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020.
- [23] NICOUD F, DUCROS F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor[J]. Flow turbulence and combustion, 1999, 62(3): 183-200.
- [24] SIEMENS. Simcenter Star-CCM+2020.3 user guide[Z]. Munich: Siemens PLM software Inc., 2020.
- [25] 杨永刚. 高速磁浮列车明线气动特性及头型局部优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- YANG Yonggang. The aerodynamic performances of the high-speed maglev train in the open air and the local optimization of the train head[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.

Study of aerodynamic noise for metro trains running in tunnels at 140 km/h based on large eddy simulation

HE Leiming¹, YANG Yuanyuan¹, WANG Rui¹, LI Zongpeng^{2,3}, GAO Pengfei², DENG Zigang²

(1. Chengdu Power China Ruichuan Rail Transit Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Aerodynamic noise of intercity metro trains running at 140 km/h will affect passenger comfort. This study examines the aerodynamic force and noise of a fast metro train running at 140 km/h in tunnels. A detailed 1:20 scale metro train model was meshed and simulated using STAR-CCM+ simulation software with a large eddy simulation (LES) method. Results indicate that the trailing car experiences the highest drag and lift coefficients compared to the leading car and the middle cars. Among all bogies, bogie 1 has the highest drag and lift coefficients. The highest sound power level occurs below the leading car's cab, ahead of bogie 1. Noise is particularly strong around the leading car's cab, its underbody bogie, and the pantograph. This study effectively evaluates the aerodynamic noise sound power level of metro trains running at 140 km/h, offering valuable insights for future noise control research on fast metro trains.

Keywords: fast metro train; aerodynamic force; aerodynamic noise; large eddy simulation; sound power level