

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-072-11

# 隧道出口微压波噪声计算方法对比研究

陈宇翔 王宏林 毕海权 罗文锋

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 高速列车进入隧道产生的初始压缩波传播到隧道出口时会产生微压波并引发噪声, 严重时会引起“音爆”现象, 影响隧道出口沿线的周边环境。为了分析微压波噪声的声学特性, 对比研究了两种微压波噪声的数值计算方法, 一种由隧道出口的流场参数作为声源传播至隧道外不同距离计算噪声(声学有限元法), 另一种由传播至隧道外不同距离的微压波作为声源直接计算噪声(监测球法)。以 CRH2 型动车组为参考, 首先建立了微压波的流场计算模型, 并采用动模型实验进行了隧道出口微压波的验证; 其次分别采用声学有限元法和监测球法计算了微压波引起的噪声, 并对比分析了不同计算方法下微压波噪声的声学特性。研究表明: 声学有限元法与监测球法计算的微压波噪声频域变化规律基本一致, 能量集中在 20Hz 以下, 峰值频率为 3Hz, 监测球法计算的声压级峰值与总声压级比声学有限元法高 2-3dB, 整体误差分别为 2.42%与 2.72%; 监测球的尺寸对微压波的大小会产生一定影响, 但对微压波噪声的影响较小; 监测球法计算的微压波声压级峰值在不同传播角度差异不明显。

**【关键词】** 高速列车; 高速铁路隧道; 微压波噪声; 声学有限元法; 监测球法

中图分类号 U25 文献标志码 A

## A New Computational Method for Micro-pressure Wave Noise at Tunnel Exits

Chen Yuxiang Wang Honglin Bi Haiquan Luo Wenfeng

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 61003)

**【Abstract】** The initial compression wave generated when a high-speed train enters a tunnel will produce a micro-pressure wave and noise when it propagates to the tunnel exit. In severe cases, it may cause a "sonic boom" phenomenon, affecting the surrounding environment along the tunnel exit. To analyze the acoustic characteristics of the micro-pressure wave noise, this paper compares and studies two numerical calculation methods for micro-pressure wave noise. One method calculates the noise by propagating the flow field parameters at the tunnel exit as the sound source to different distances outside the tunnel (acoustic finite element method), and the other directly calculates the noise by using the micro-pressure wave at different distances outside the tunnel as the sound source (monitoring sphere method). Taking the CRH2 EMU as a reference, a flow field calculation model of the micro-pressure wave was first established, and the micro-pressure wave at the tunnel exit was verified by a dynamic model experiment. Then, the noise caused by the micro-pressure wave was calculated using the acoustic finite element method and the monitoring sphere method, respectively, and the acoustic characteristics of the micro-pressure wave noise under different calculation methods were compared and analyzed. The research results show that the frequency domain variation laws of the micro-pressure wave noise calculated by the acoustic finite element method and the monitoring sphere method are basically the same, with the energy concentrated below 20 Hz and the peak frequency at 3 Hz. The peak sound pressure level and the total sound

作者简介: 陈宇翔 (2000-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1621319567@qq.com

通讯作者: 王宏林 (1984-), 女, 博士, 副教授, E-mail: wanghonglin305@163.com

收稿日期: 2025-02-25

pressure level calculated by the monitoring sphere method are 2-3 dB higher than those calculated by the acoustic finite element method, and the overall errors are 2.42% and 2.72%, respectively. The size of the monitoring sphere has a certain influence on the size of the micro-pressure wave, but has a small impact on the micro-pressure wave noise. The peak sound pressure level of the micro-pressure wave calculated by the monitoring sphere method does not show significant differences at different propagation angles.

【Keywords】 High-speed train; High-speed railway tunnel; Micro-pressure wave noise; Acoustic finite element method; Monitoring sphere method

## 0 引言

高速列车进入隧道时,列车车头压缩周围空气产生初始压缩波,初始压缩波在隧道内以当地声速向前传播,当压缩波传播至隧道出口时,会产生微压波并引发噪声<sup>[1-3]</sup>。由于我国微压波控制标准仅关注幅值,隧道出口的微压波噪声未能引起研究人员的关注。随着列车速度的不断提升,运行线路网越来越密集,隧道洞口产生的微压波噪声将会严重影响沿线建筑安全和附近居民的身心健康<sup>[4,5]</sup>,成为制约列车提速的关键因素。

目前微压波噪声的研究尚处于探索阶段,国内学者采用理论分析、现场测试和数值模拟开展了少量研究。Yoon 等人<sup>[6]</sup>通过求解 Euler 方程,并根据流场数据使用线性 Kirchhoff 公式预测远场噪声,提出了一种新的音爆预测方法,预测结果与实验测量数据吻合较好。Manuel 等人<sup>[7]</sup>研究了高速列车进入隧道时产生的第一压缩波的传播与变形,第一压缩波的最大初始压力梯度和振幅是音爆现象的决定性因素。刘金通<sup>[8]</sup>采用大涡模拟 (LES) 和声学有限元法 (AFEM) 探究了微压波噪声的声学特性,并分析了隧道出口产生音爆现象的原因,即当列车速度超过 300km/h 时,隧道出口微压波噪声等响度级大于人耳可听阈。Kikuchi 等人<sup>[9]</sup>现场测量了高速列车(新干线)路边产生的低频噪声,实测结果表明,隧道洞口低频噪声的主要成分为脉冲微压波和连续压力波。Miyachi<sup>[10]</sup>基于线性声学理论考虑隧道洞口周围的地形扩展了 Yamamoto 的立体角声学模型,以便更准确地预测微压波。杜麒麟<sup>[11]</sup>采用现场实测的方法,对遂渝铁路古家垭口隧道洞口处的噪声进行了监测,通过分析古家垭口隧道洞口的环境噪声特性,总结出了隧道洞口处噪声的衰减规律。

现阶段对于微压波噪声的数值计算方法主要为声学有限元法,通过进行流场瞬态计算,提取声源脉动数据,接着在声场计算中使用流场网格与声

场网格映射的方式,将瞬态流场的脉动信号转变为声源,最后进行远场辐射噪声的计算。声学有限元法在计算气动声学领域有广泛的应用。但该方法在声学计算的过程中会涉及声辐射计算,而声辐射计算往往需要较大的计算资源,为了在确保计算准确性的情况下降低计算资源,本文提出了由传播至隧道外不同距离的微压波作为声源直接计算噪声的“监测球法”,并分别采用声学有限元法和监测球法计算了微压波引起的噪声,进而对比分析了不同计算方法下微压波噪声的声学特性。

## 1 计算方法

### 1.1 流场计算

在 CFD (计算流体动力学) 湍流模型中,分离涡模拟 (DES) 则实现了计算精度和计算量之间的平衡,其结合了雷诺时均模拟 (RANS) 湍流模型计算量小和大涡模拟 (LES) 计算精度高的特点。其主要思想就是利用 RANS 模型求解物体近壁面的小尺度涡,用大涡模拟求解离壁面较远的核心区,因此,本文使用 DES 方法获取隧道出口的流场特性。根据 RANS 湍流模型的差异,分离涡模拟也分为不同的模型,其中在铁路行业使用较多的是基于 SST 湍流模型的分离涡模拟,其方程如式(1)、式(2)所示<sup>[12]</sup>。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = P_k + \frac{\partial}{\partial x_i} [(u + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i}] - \beta^* \rho k \omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \gamma \frac{\omega}{k} \cdot P_k + \frac{\partial}{\partial x_i} [(u + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i}] - \rho \beta \omega^2 + \frac{2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中:  $u$  为动力粘性系数;  $u_t$  为涡粘性系数;  $F_1$  为混合函数。

### 1.2 FW-H 声学类比

目前求解气动噪声广泛采用 FW-H 方程<sup>[13,14]</sup>,

相关的方程如式 (3) - (5) 所示。

$$\left( \frac{\partial^2}{c_0^2 \partial t^2} - \nabla^2 \right) \rho = \nabla \cdot \nabla T_{ij} \quad (3)$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j - \tau_{ij} \left[ (p - p_0) - c_0^2 (\rho - \rho_0) \right] \quad (4)$$

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial}{\partial t} \left\{ [p_0 u_n + \rho(u_n - u_v)] \delta(f) \right\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ [p_0 n_j + \rho u_i (u_n - u_v)] \delta(f) \right\} + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] \quad (5)$$

式中： $p'=p-p_0$ ， $p$  和  $p_0$  分别为扰动和未扰动状态下空气的压力； $c_0$  为空气声速； $\rho_0$  为空气初始密度； $u_n$  为流体在固体表面法向上的速度分量； $u_v$  为固体表面在法向上的速度分量； $T_{ij}$  是 Lighthill 应力张量； $\nabla$  为拉普拉斯算子； $\delta(f)$  为狄利克雷分布； $H(f)$  为 Heaviside 函数。

FW-H 方程可根据 CFD 计算获得的近场非定常流体数据来预测等效声源<sup>[14]</sup>。式 (5) 右端第一项、第二项和第三项分别代表单极子源、偶极子源和四极子源。隧道出口区域的壁面可视为刚体，在垂直于壁面方向上不会产生气流振动，脉动体体积量为零，可以忽略单极子声源项。结合流场信息，对式 (5) 进行求解，便能够得到流场气动声源的远场声场特性，FW-H 的积分形式如式 (6) 所示。

$$p'(x, t) \approx \frac{1}{2\pi c_0} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{x_i p_i(y, t)}{|x|^2 |1 - Ma|} \right] dS(y) \quad (6)$$

### 1.3 声学有限元法

声学有限元法 (AFEM) 的基本思想是将声学系统分割成有限数量的小区域或单元，每个单元内的声场可以用一组基函数进行近似表示。通过将连续的声场离散化为有限数量的单元，AFEM 能够将声学问题转化为求解线性代数方程组的问题<sup>[15]</sup>。

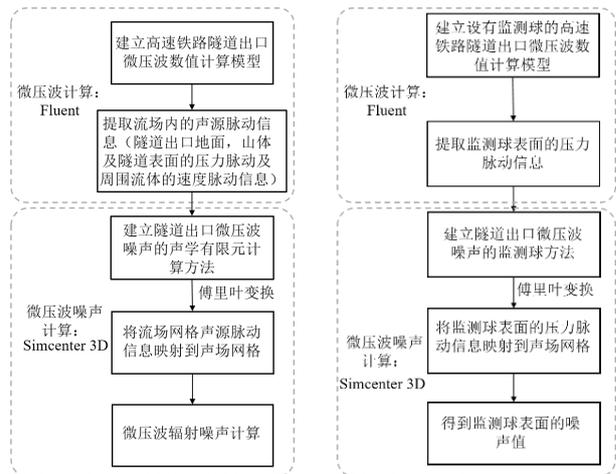
### 1.4 声学有限元法与监测球法计算流程

当微压波在隧道出口处向外传播的过程中，声学有限元法 (方法一) 与监测球法 (方法二) 的计算流程如图 1 所示，具体的计算步骤分别如下：

声学有限元法通过对流场里隧道内壁面、隧道地面以及隧道出口立面的压力脉动数据，还有整个声学计算域内的湍流脉动数据进行采集。依据奈奎斯特采样定理，当采样频率达到信号最高频率的两倍以上时，所采集的信号能够完整留存原始信号的全部信息。因此，将采样步长设定为 0.001s，并且连续记录 400 个时间步的时域信号，总采样时长为

0.4s，频率分析区间设定在 1 至 200Hz。使用声学计算软件 Simcenter 3D，将获取的流场脉动数据映射到对应的声学网格上，之后通过傅里叶变换，将脉动数据从时域形式转换为频域形式。

监测球法如图 1 (b) 所示，将隧道出口处的监测点替换为监测球，球表面为壁面，当进行流场计算时，提取监测球壁面上的脉动压力信号，在声学计算软件中通过傅里叶变换将球壁面上的脉动压力信号转换为声源，并且能够直接得到监测球上的声压级，将这个声压级作为隧道出口微压波的声压级。这种计算方法没有声辐射的计算步骤，但通过这个方法提取到的监测球表面脉动压力数据是微压波在时域连续传播过程中的数据，在一定程度上也可以反映微压波引起的噪声大小。



(a) 声学有限元法

(b) 监测球法

图 1 计算流程图

Fig.1 Schematic diagram of high-speed train and tunnel model

## 2 计算模型

### 2.1 流场计算

#### 2.1.1 几何模型

本文计算的列车模型以 CRH2 型动车组列车作为参考，将列车模型长度缩短为三车编组，包括头车、中间车和尾车，忽略转向架、受电弓、车间风挡等结构，保留列车典型的气动外形，简化后的几何模型如图 2 所示。列车总长度为 108.6m，宽为 3.35m，高为 3.78m。隧道选用断面积为 100m<sup>2</sup> 的双线隧道，阻塞比约为 0.127。

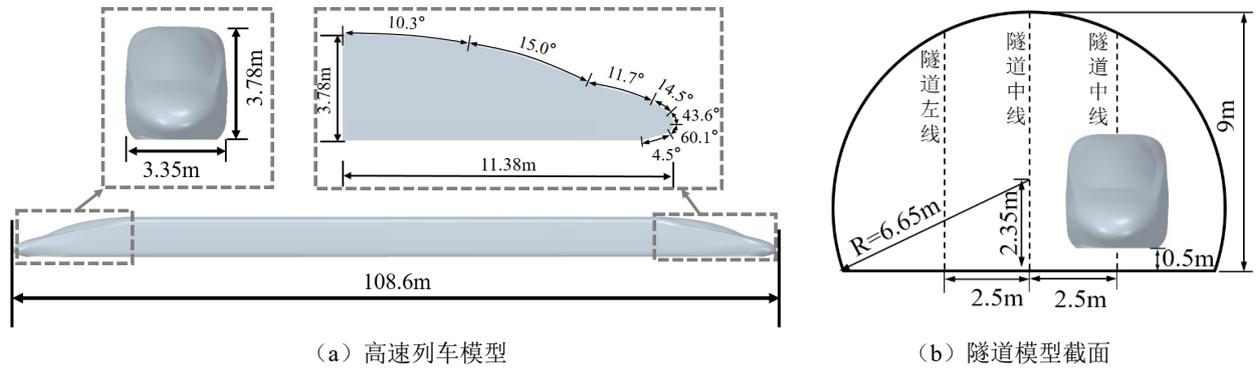


图 2 高速列车与隧道模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of high-speed train and tunnel model

2.1.2 计算域和边界条件

列车在隧道内高速运行时流场的计算域如图 3 所示, 隧道长度为 500m, 入口端空气域为长度 308.6m, 半径 50m 的半圆柱, 出口端空气域为 250m×160m×80m 的立方体。列车从距离隧道入口 100m 处开始启动, 以 350km/h 的速度驶入隧道。数值计算中通过动网格中的 Layering 方法实现列车在隧道内的运动, 在流场内的交界面上定义 interface 属性以实现运动区域和固定区域之间流场数据的实时传递。隧道两端空气域设置为压力远场边界条件, 列车表面、地面、隧道内壁面和隧道立面等均定义为无滑移的壁面条件。

声学有限元法在流场计算中, 在隧道出口外

10 至 50m 处分别设置 5 个测点, 每个测点相距 10m, 并划分以隧道出口为中心向内延伸和向外扩展 30m 范围作为微压波噪声的计算域(见图 3(a)), 计算域与其他流场区域的数据传输通过 interface 交界面 (A 面, E 面) 来实现, 该范围内的流场信息将作为之后噪声计算的声源。

监测球法(见图 3(b))将隧道出口处的监测点替换为监测球, 并且向水平角度为 45°, 90° 与 135° 的传播角度上分别布置 5 个监测球, 共计 15 个, 球表面为壁面。为了研究监测球尺寸对计算的影响, 分别设置了监测球直径为 100mm, 200mm 的计算工况。

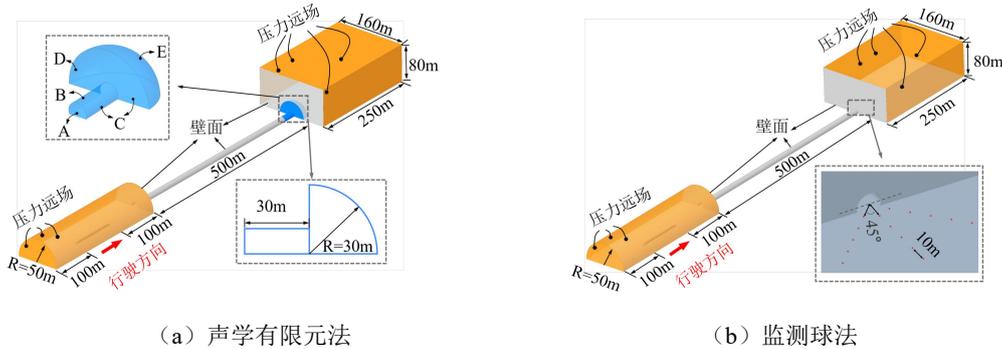


图 3 计算域及边界条件

Fig.3 Computational domain and boundary conditions

2.1.3 计算网格

考虑到高速列车外形复杂, 且需要在隧道出口区域进行声源信息的提取, 因此选择混合网格对计算域进行离散。列车周围区域为四面体网格, 其余部分离散为六面体网格, 列车表面的第一层网格高度设置为 0.02mm, 网格增长率为 1.2, 共计 15 层, 列车周围网格划分如图 4(a) 所示。图 4(c) 所

示为声学有限元法计算的声源区域网格, 为精准捕捉隧道出口区域流场脉动信息, 在此特定区域采取精细壁面边界层网格划分方法, 设置边界层网格首层高度为 0.01 mm, 增长率 1.2, 共 20 层; 图 4(d) 展示了监测球法计算的监测球体表面网格, 监测球表面网格为 10mm。

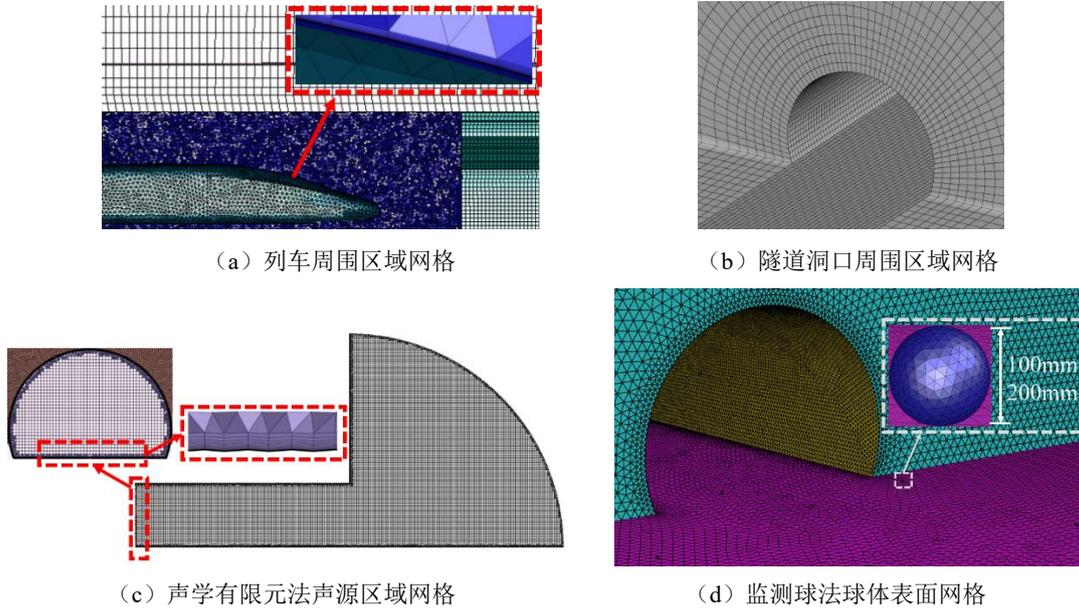


图 4 网格划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of grid division

为避免网格尺度对数值模拟结果产生较大影响，划分了粗、中、细三种网格进行对比分析，三种网格的网格总量分别为 1520 万、2275 万和 3859 万，具体网格信息如表 1 所示。不同网格尺寸下隧道入口 450m 处监测点压力梯度和隧道出口 20m 处微压波的变化曲线如图 5 所示，从图中可以看出不

同网格下数值计算结果差异很小，压力梯度峰值以及压力峰值的最大误差不超过 5%。不同尺寸网格下的计算结果如表 1 所示，由表可知当网格量大于 2275 万时，继续增大网格量对结果的影响较小，综合考虑计算资源与计算精度，因此采用本文采用中网格的尺寸进行后续研究。

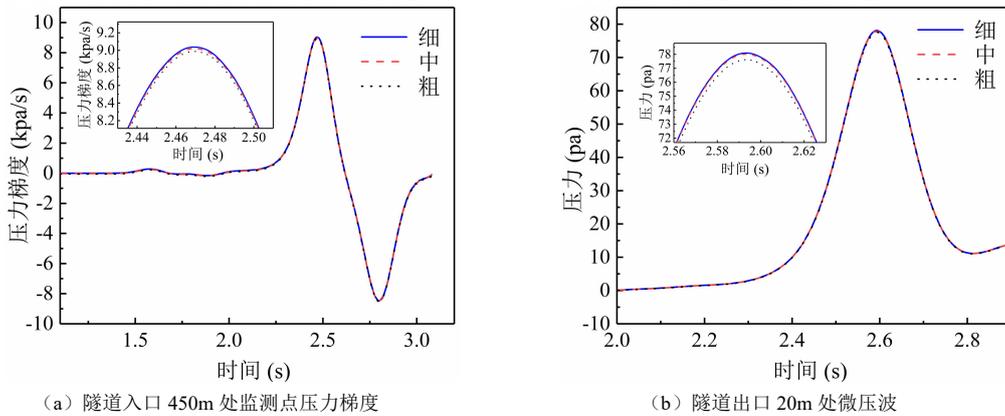


图 5 三种网格尺寸计算结果

Fig.5 Calculation results of three grid Sizes

表 1 网格尺度和不同网格下计算结果对比

Table 1 Comparison of grid scales and calculation results under different grids

网格密度	基础网格尺寸 /m	边界层第一层高度 /mm	网格总数/万	压力梯度幅值 /kPa	偏差 /%	微压波幅值 /Pa	偏差 /%
粗	0.6	0.02	1520	8.988	—	77.61	—
中	0.4	0.01	2275	9.020	1.31	78.01	4.05
细	0.2	0.005	3859	9.038	0.6	78.10	1.30

2.1.4 求解设置

本文使用 ANSYS FLUENT 流体计算软件, 基于 SST  $k-\omega$  湍流模型的 DES 方法, 对整个计算域内流场进行数值模拟。求解器采用基于有限体积法的压力和速度耦合的 SIMPLE 算法, 对流项与扩散项均采用二阶迎风格式, 时间项采用二阶隐式格式<sup>[6]</sup>。物理时间步长设置为 10-3s, 每个时间步的迭代次数为 50 次。

2.1.5 数值计算方法验证

本文采用文献中的动模型实验进行微压波的验证, 试验采用 1:20 的缩比模型, 模型列车长度为 2585mm, 高度为 194.5mm, 宽度为 163.3mm。模型隧道长度为 164m, 线间距 0.25m, 横截面积为 5m<sup>2</sup>, 列车试验速度为 350km/h, 该动模型实验平台如图 6 所示<sup>[17,18]</sup>。

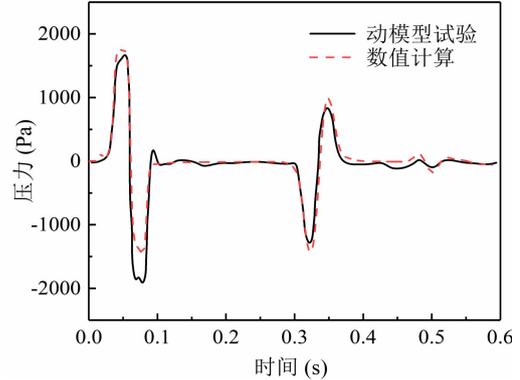


图 6 动模型试验平台

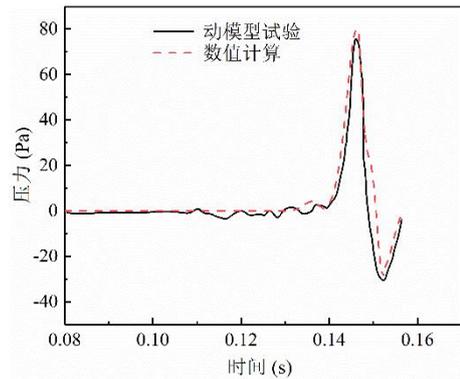
Fig.6 Moving model test platform

为了验证本文数值计算方法的正确性, 将文献[18]中的动模型试验结果与完全相同条件下数值计算结果进行对比。如图 7 所示, 隧道内压力波和隧道外微压波的变化趋势与动模型试验基本一致。

两者偏差约为 4.73%, 但最大差异仍在 5% 以内, 说明本文的数值计算方法能较好地模拟高速列车进入隧道时引起的微压波问题。



(a) 隧道入口 3 m 处压力曲线比较



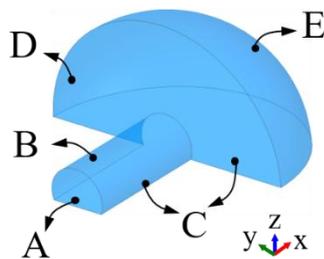
(b) 隧道出口 1 m 处微压波曲线比较

图 7 仿真与动模型试验结果比较

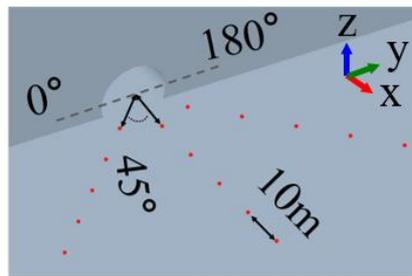
Fig.7 Comparison of numerical simulation and moving model test results

2.2 声场计算

2.2.1 计算域和边界条件



(a) 声学有限元法



(b) 监测球法

图 8 计算域及边界条件

Fig.8 Computational domain and boundary conditions

图 8 (a) 为声学有限元法计算的声场计算域, 计算域范围以隧道出口为中心向内延伸和向外扩

展 30m, 不考虑出口缓冲结构和隧道表面吸隔声材料, 并且隧道内壁面 B、出口地面 C 和出口立面 D

为声学全反射的边界条件,声学计算域与流体区域的交界面 A 为全吸收的边界条件,声学计算域向外辐射面 E 定义为自动匹配层(Automatic Matching Layer, AML) [19]。

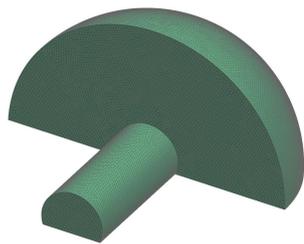
图 8 (b) 为监测球法的声场计算域,计算域为水平方向 (x, y 平面, z=3.95m) 上向水平角度分别为 45°, 90° 与 135° 的传播方向上分别布置的 5 个监测球, 共计 15 个。为了研究监测球尺寸对计算的影响, 分别设置了监测球直径为 100mm, 200mm 的计算工况。

### 2.2.2 计算网格

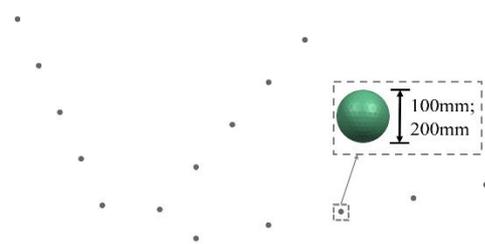
之后, 需要对其进行声学网格划分。微压波噪

声的大部分能量都集中在低频。因此, 本文的最高分析频率取为 200Hz (波长约为 1.7m), 在声学网格划分中需要保证网格最大尺寸小于 0.283m。

在声学网格的划分中, 为了保证计算的准确性, 一个波长内至少要有 6 个声学单元, 即所计算的最大频率声波波长的 1/6。根据上述的原则, 结合所分析的频率范围, 最大网格单元的长度  $\Delta X_{max} \leq 0.283m$ 。采用声学有限元法划分的声学网格数量约为 61 万, 具体的声学网格划分如图 9 (a) 所示; 对于监测球法计算使用的声学网格, 取表面网格尺寸为 10mm, 总网格数为 3 万, 具体的声学网格划分如图 9 (b) 所示。



(a) 声学有限元法



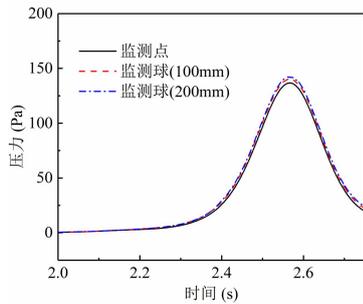
(b) 监测球法

图 9 声场网格划分示意图

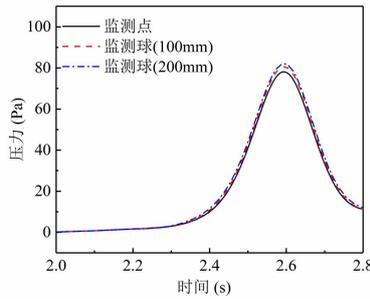
Fig.9 Schematic diagram of grid division

## 3 计算结果

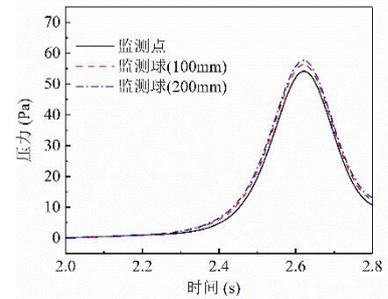
### 3.1 微压波



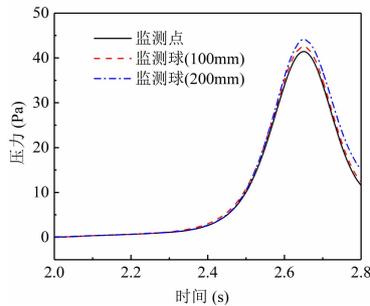
(a) 10m



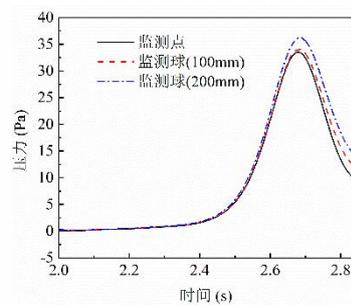
(b) 20m



(c) 30m



(d) 40m



(e) 50m

图 10 计算方法对比

Fig.10 Comparison of calculation methods

图 10 给出了当列车运行速度为 350km/h 时, 隧道出口外不同位置处的微压波时程曲线。从图中可以看出距离隧道相同位置处监测点与监测球得到的微压波波形一致, 但监测球得到的结果略大于监测点, 这主要因为监测球存在体积大小对流场计算结果会有一定影响。隧道出口不同距离微压波峰值计算结果如表 2 所示, 由表可知监测球越小对流场计算结果影响越小, 100mm 监测球相比于监测点的最大误差为 4.10%, 200mm 监测球相比于监测点的最大误差为 8.13%。

表 2 计算结果 (单位: dB)

Table 2 Calculation results (Unit: dB)

纵向距离	监测对象		
	监测点	监测球 (100mm)	监测球 (200mm)
10m	136.72	140.45	142.45
20m	78.10	80.52	82.00
30m	54.17	56.40	57.67
40m	41.43	42.51	44.13
50m	33.52	34.10	36.25

### 3.2 微压波噪声

鉴于隧道出口的微压波噪声主要由偶极子声源与四极子声源构成, 故以这两种声源向外部环境辐射的噪声能量进行计算。图 11 给出了隧道出口 20m 处利用声学有限元法计算得到的不同类型声源的噪声声压级对比。从图可以得出偶极子噪声在

200Hz 频率范围内的声压级要高于四极子噪声, 尤其在声压级峰值上, 偶极子噪声比四极子噪声高出 45dB。根据噪声叠加原理可以判断, 当列车以 350km/h 进入隧道产生的微压波噪声主要是由偶极子声源引起的, 四极子噪声可忽略不计, 故后续的计算仅考虑偶极子声源产生的噪声。

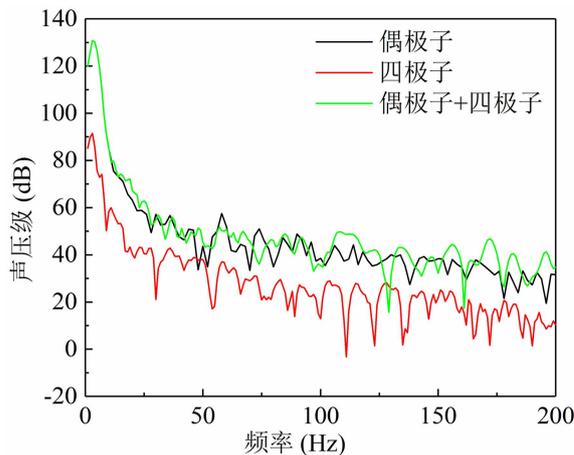


图 11 不同声源类型的噪声频谱分布对比

Fig.11 Comparison of sound pressure levels of noise radiated from different types of sound sources

通过声学有限元法计算得到的, 隧道出口垂直 x-z 平面 (y=0m) 和水平 x-y 平面 (z=3.95m) 上不同频率的偶极子噪声的分布如图 12 所示。在隧道出口外部, 偶极子噪声在 2Hz 时的声压级分布近似呈半椭球体的形状, 随着频率升高, 偶极子噪声声压级逐渐减小, 噪声分布逐渐呈散射状。

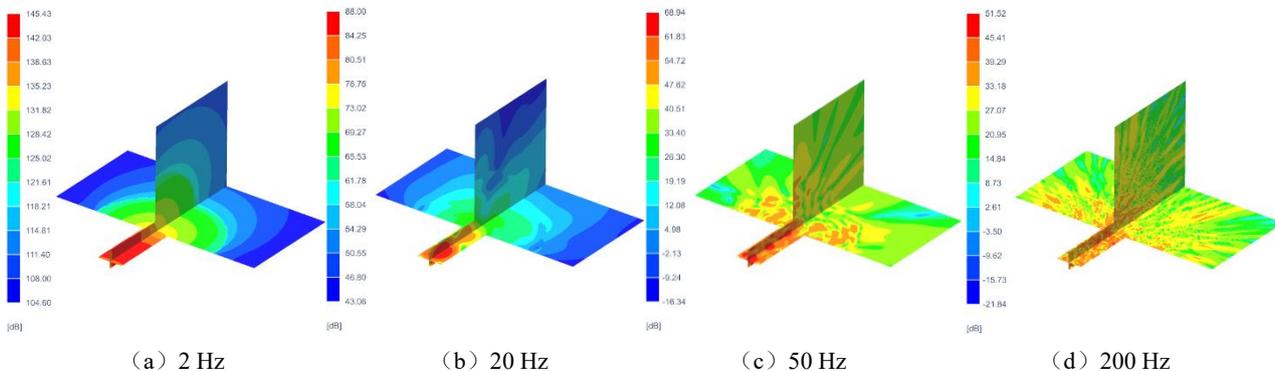


图 12 不同频率下辐射噪声的空间分布

Fig.12 Spatial distribution of radiated noise at different frequencies

图 13 对比了分别采用声学有限元法与监测球法计算得到隧道出口外 10m, 20m, 30m, 40m 以

及 50m 处微压波噪声的结果。从图 13 可以看出, 两种计算方法得到的变化趋势相近且声压级峰值

频率相同，均为 3Hz。由表 3 可知监测球法得到的声压级峰值以及总声压级比声学有限元法的计算结果大 2~3dB，差异为 2.42%和 2.72%，这是由于监测球法的计算过程没有声辐射的传播衰减，所以计算结果会大于声学有限元法。但从整体的计算结果来看，声学有限元法与监测球法的计算结果近

似，都能够计算隧道出口微压波噪声，此外，直径为 100mm 的监测球与 200mm 直径的监测球在计算结果上相近，说明当监测球的直径在 100mm 至 200mm 以内时，监测球的尺寸对微压波噪声的计算结果影响较小。

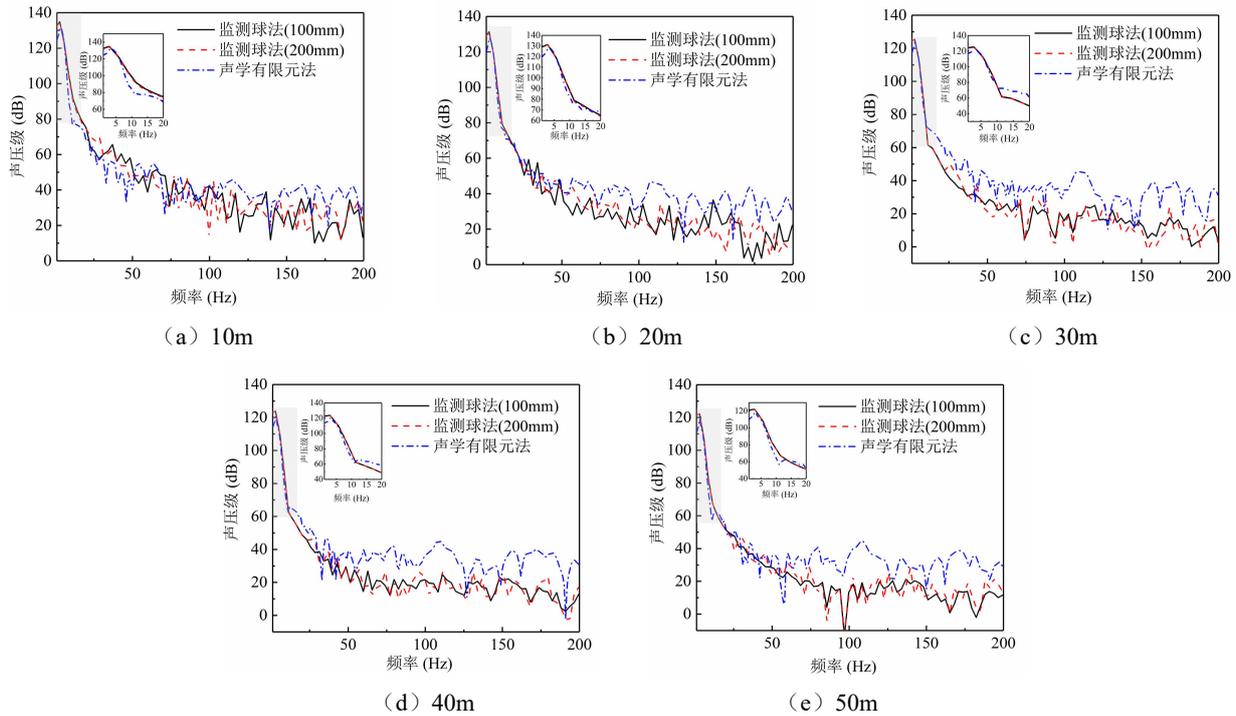


图 13 计算方法对比

Fig.13 Comparison of calculation methods

表 3 计算结果 (单位: dB)

Table 3 Calculation results (Unit: dB)

纵向距离	计算方法					
	声学有限元法		监测球法 (100mm)		监测球法 (200mm)	
	峰值	总声压级	峰值	总声压级	峰值	总声压级
10m	131.39	136.21	134.68	137.15	134.91	136.95
20m	127.75	132.21	131.43	133.16	131.44	132.95
30m	124.79	127.69	126.49	129.37	126.51	129.14
40m	120.74	123.73	123.91	126.26	123.94	126.01
50m	119.00	121.62	122.27	124.60	122.30	124.33

进一步对比监测球法计算得到的不同传播角度下微压波噪声，图 14 比较了水平面 (xy 平面, z=3.95m) 上传播角度分别为 45°, 90° 以及 135° 的微压波噪声计算结果。从图 14 可知监测球法计

算得到的微压波声压级峰值在不同传播角度上的差异不明显，差异主要出现在 50Hz 以上的频率区域，但该部分的能量占比较低，由此可知传播角度对微压波噪声的影响较小。

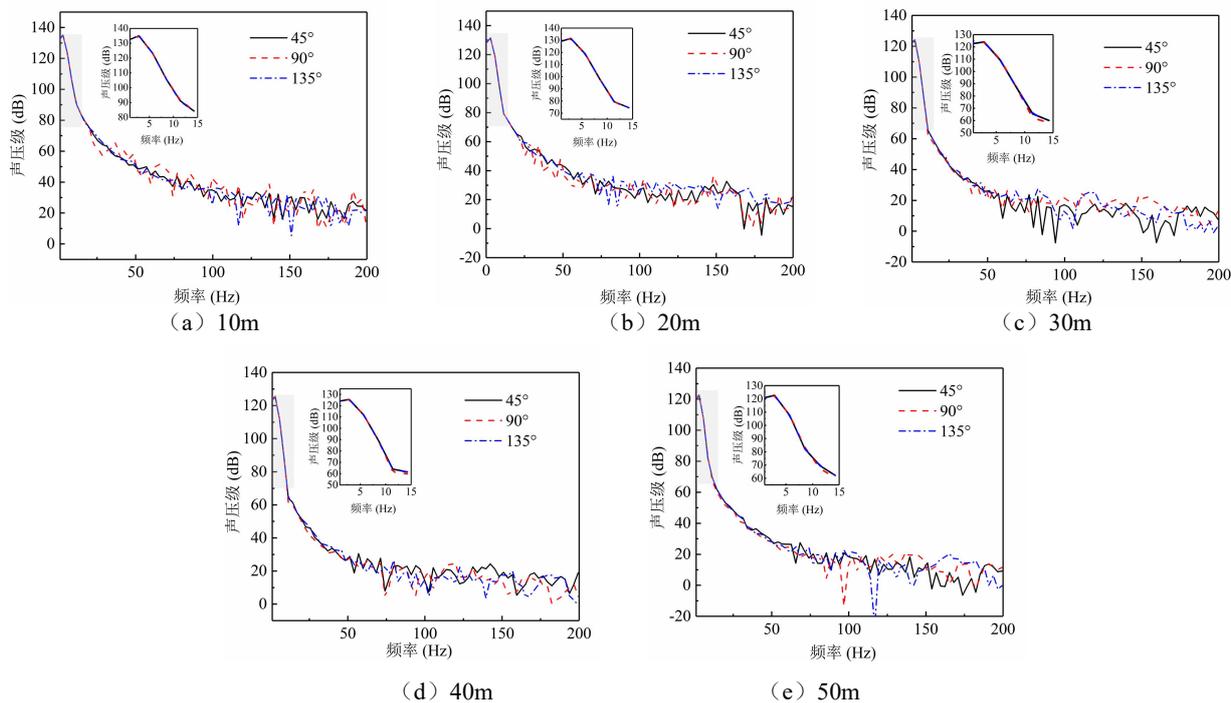


图14 传播角度对微压波噪声的影响

Fig.14 Influence of propagation angle

#### 4 结论

本文采用流场和声场结合的数值计算方法, 对比研究了计算微压波噪声的两种计算方法, 主要研究结论如下:

(1) “监测球”法得到的微压波波形与监测点基本一致, 但由于监测球会影响隧道出口外空间流场, 致使该方法得到的微压波幅值与监测点存在一定的差异, 直径为 100mm 的监测球的差异为 4.10%、直径为 200mm 的差异为 8.13%。

(2) 声学有限元法与监测球法计算得出的微压波噪声在频域上的变化规律基本一致, 能量主要集中在 20Hz 以下, 峰值频率主要处于 3Hz 附近, 但监测球法计算得到的声压级峰值与总声压级比声学有限元法计算结果约高出 2-3dB, 整体误差分别为 2.42%与 2.72%。

(3) 监测球计算方法中传播角度对微压波噪声声压级峰值的影响不大, 主要影响频率为 50Hz 以上的噪声, 但由于该部分能量占比较低, 因此传播角度对微压波噪声的影响较小。

#### 参考文献:

[1] MIYACHI T. Non-linear acoustics analysis of the

pressure rise of the compression wave generated by a train entering a tunnel[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019,458:365-375.

[2] Wang H L, Vardy A E, Bi H Q. Characteristics of pressure waves radiated from tunnel portals in cuttings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2022,521: 116664.

[3] Wang H L, Vardy A E, Bi H Q. Micro-pressure wave radiation from tunnel portals in deep cuttings[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023,237(2): 166-178.

[4] 赵有明. 高速铁路隧道气动效应[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.

[5] Aoxi T, Matsuo K, Hidaka H, et al. Attention and distortion of propagating compression waves in a high-speed railway model and actual tunnel[C]. *20th International Symposium on Shock Waves*. Marseille, France, 1995:178-184.

[6] Yoon T S, Lee S, Hwang J H, et al. Prediction and validation on the sonic boom by a high-speed train entering a tunnel[J]. *Journal of Sound and Vibration*,

- 2001,247(2):195-211.
- [7] Manuel Rivero E F M. A methodology for the prediction of the sonic boom in tunnels of high-speed trains[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019,446.
- [8] 刘金通. 高铁隧道内压缩波传播规律及微气压波声学特性初步分析[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [9] Kikuchi K, Lida M, Takasaki T, et al. Field Measurement of Wayside Low-Frequency Noise Emitted from Tunnel Portals and Trains of High-Speed Railway[J]. *Noise Notes*, 2006,5(3):5-18.
- [10] Miyachi T. Acoustic model of micro-pressure wave emission from a high-speed train tunnel[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017,391:127-152.
- [11] 杜麒麟. 遂渝铁路隧道洞口噪声特性分析[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [12] SPALART P R, DECK S, SHUR M L, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities[J]. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2006,20(3):181-195.
- [13] 陈羽,柳壹明,毛懋,等. 高速列车底部结构参数对气动噪声影响规律[J]. *西南交通大学学报*,2023,58(5):1171-1179.
- [14] 刘加利,于梦阁,陈大伟,等. 考虑四极子声源的高速磁浮列车气动噪声数值模拟方法[J]. *西南交通大学学报*,2024,59(1):54-61.
- [15] 李增刚,詹福良. *Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算高级应用*[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [16] 李涛. 时速 400 公里高铁隧道微气压波特性及缓解措施研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
- [17] WANG J Y, WANG T T, YANG M Z, et al. Effect of localized high temperature on the aerodynamic performance of a high-speed train passing through a tunnel[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020,201:104161.
- [18] 张雷. 京沪高铁隧道洞门对隧道空气动力效应影响的研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
- [19] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 1994,114(2):185-200.

---

### (上接第 63 页)

- [19] Tsutsumi H, Tanabe S, Harigaya J, et al. Effect of humidity on human comfort and productivity after step changes from warm and humid environment[J]. *Building and Environment*, 2007,42(12):4034-4042.
- [20] Tong L, Liu N, Hu S, et al. Research on the preferred illuminance in office environments based on EEG[J]. *Buildings*, 2023,13(2):467.
- [21] GB/T 18883-2022, 室内空气质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2022.
- [22] Cao B, Ouyang Q, Zhu Y, et al. Development of a multivariate regression model for overall satisfaction in public buildings based on field studies in Beijing and Shanghai[J]. *Building and environment*, 2012,47:394-399.
- [23] Lin C, Wu L, Xia H, et al. Characteristics of the thermal environment, air quality, and passenger comfort in the underground transfer space of metro stations in Beijing[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022,59:105093.
- [24] Sarkhosh M, Najafpoor A A, Alidadi H, et al. Indoor Air Quality associations with sick building syndrome: An application of decision tree technology[J]. *Building and Environment*, 2021,188:107446.
- [25] Lin X, Guo C, Wargoocki P, et al. The effects of temperature on work performance in the typical office environment: A meta-analysis of the current evidence[J]. *Building and Environment*, 2025,269:112488.
- [26] Wolkoff P, Azuma K, Carrer P. Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2021,233:113709.