

Acoustic Characteristics of Micro-Pressure Wave at the High Speed Railway Tunnel Exit

Jintong Liu, Renxian Li

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan
Email: liujintong@my.swjtu.edu.cn

Received: Jun. 9th, 2018; accepted: Jun. 21st, 2018; published: Jun. 28th, 2018

Abstract

The micro-pressure wave will be generated when the compression wave propagates to the tunnel exit. In some cases, there will be a sonic boom at the tunnel exit, which has a negative impact on the surrounding environment. In order to analyze the causes of the sonic boom at tunnel exit, the large eddy simulation method was used to calculate the parameters of the flow field of tunnel exit. Based on the Lighthill acoustic analogy theory, the finite element method was used to calculate the acoustic characteristics of micro-pressure wave, and the audibility threshold of human was introduced to analyze the mechanism of the sonic boom phenomenon at the tunnel exit. In the calculation model of this paper, the micro-pressure wave sound fields of the tunnel exit under different train speeds were compared. It is found that when the speed of the train is higher than 300 km/h, the sonic boom will occur.

Keywords

High-Speed Train, Micro-Pressure Wave, Sonic Boom, Acoustic Analogy, PML, Threshold of Audibility

高速铁路隧道出口微气压波声学特性计算分析

刘金通, 李人宪

西南交通大学, 机械工程学院, 四川 成都
Email: liujintong@my.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2018年6月9日; 录用日期: 2018年6月21日; 发布日期: 2018年6月28日

摘 要

高速列车进入隧道产生的压缩波传播至隧道出口时会生成微气压波, 某些情况下还会出现隧道口音爆,

对周围环境产生负面影响。为分析隧道出口外音爆现象的产生原因, 本文采用大涡模拟法计算隧道出口流场参数, 并基于Lighthill声类比理论运用有限元法计算隧道出口声场分布, 参考人耳听阈曲线分析了隧道出口外音爆现象的发生机理。在本文计算模型中, 对比不同车速条件下隧道出口微气压波声场计算结果, 发现当车速高于300 km/h时, 隧道出口将会出现音爆现象。

关键词

高速列车, 微气压波, 音爆, 声类比理论, PML, 听阈曲线

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速列车进入隧道时产生的压缩波在隧道内近似以当地声速沿列车运行方向向前传播, 当压缩波传播至隧道出口时, 由于隧道洞口的影响, 一部分能量以膨胀波的形式在隧道内反向继续传播, 另一部分能量快速向隧道出口外部释放形成微气压波。前人研究成果表明, 微气压波属于次声波, 通常情况下人耳不会感觉到, 主要会引起隧道出口建筑的低频振动[1]。但在日本新干线和德国佛罗伦萨-罗马高速铁路线上, 某些情况下隧道出口还会出现了人耳可听的音爆的现象。图1给出了隧道出口外微气压波产生过程的示意图。

目前, 国内外研究人员针对铁路隧道出口微气压波现象的研究方法主要分为实测分析、理论推导和数值计算三类。在实测方面, 日本学者在新干线铁路隧道中做了大量实验测试, 得到了丰富的实验数据, 实验数据表明隧道出口微气压波噪声主要能量集中在10 Hz以下, 属次声声波[2]; 德国学者 M. Hieke [3] [4]基于 Euerwang 隧道的测试结果给出了微气压波噪声的评价标准; 王学英、高波等[5]搭建隧道空气动力学试验模型, 分析了缓冲结构对微气压波减缓作用。理论推导方面, Yamamoto [6]在线性声学理论的基础上, 用低频近似和远场近似的方法得到了微气压波的理论计算公式, 证明了微气压波幅值与隧道出口位置的压缩波波前梯度最大值成正比, 与微气压波的传播距离成反比。数值计算方面, 梅元贵[7]基于特征线法编写了隧道洞口微气压波的一维计算程序; 杨志刚[8]用基于高阶谱差分的CAA技术对高速列车在隧道出口产生的微气压波进行二维数值模拟; 史宪明[9]、张雷[10]基于三维有限体积法分别计算了隧道出口微气压波的不同影响因素。

上述研究主要分析了隧道出口微气压波的压力特性及其影响因素, 但无法解释隧道外出现人耳可听的音爆现象的原因, 更没有相关判定依据。因此, 有必要对隧道出口外微气压波声学特性做进一步的分析。本文试图通过混合计算方法分析微气压波声学特性, 即根据有限体积法求解隧道出口微气压波流场参数, 并基于Lighthill声类比理论, 运用有限元法求解隧道出口声场分布, 以期对改善高速铁路隧道出口环境噪声提供参考依据。

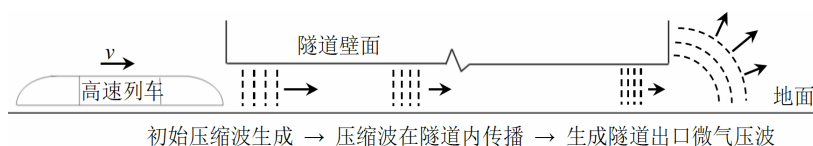


Figure 1. The generation process of micro-pressure wave at tunnel exit
图1. 高速铁路隧道出口微气压波的产生过程示意图

2. 研究方法

计算微气压波声学特性时, 采用基于 Lighthill 声类比理论的混合噪声计算方法, 该方法将气动噪声计算分为流场参数计算和声场分布计算两部分。

2.1. 微气压波流场计算方法

计算微气压波流场参数时, 利用动网格技术[11]实现列车相对于隧道的运动, 并采用结合两方程 $k-\varepsilon$ 紊流模型的有限体积法[12]求解三维、粘性、可压缩 N-S 方程, 得到隧道内压缩波传播至隧道出口时的流场参数。此时, 为保留微气压波流场脉动参量, 需要通过大涡模拟法求解微气压波流场进行模拟。

2.2. 微气压波声场计算方法

2.2.1. Lighthill 声类比理论

Lighthill 根据流体流动的连续性方程和动量方程, 直接推导得到了将流体与声波动相联系的声学波动方程, 并被命名为 Lighthill 方程。Ffowcs Williams 和 Hawkings 仿照 Lighthill 方程的推导方法, 考虑运动边界对噪声的影响, 根据广义格林函数给出了物体表面存在非定向运动的声场 FW-H 方程[13]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2\right) H\rho' = \underbrace{\frac{\partial^2 (HT_{ij})}{\partial x_i \partial x_j}}_A - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \rho u_i [(u_i - u_j) + p_{ij}] \frac{\partial H}{\partial x_i} \right\}}_B + \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \left\{ [\rho(u_i - u_j) + \rho_0 u_j] \frac{\partial H}{\partial x_j} \right\}}_C \quad (1)$$

FW-H 方程右侧 A 项被视作四极子源项, B 项视作偶极子源项, C 项视作单极子源项。在计算隧道出口微气压波噪声时, 由于微气压波是隧道内压缩波向出口外部空间快速释放产生的, 并且当压缩波传播至隧道出口时, 并不会引起气体明显的宏观流动, 因此计算时可忽略偶极子源的影响; 此外, 单极子源与壁面的法向气流脉动速度相关, 流场计算时将隧道出口壁面看作刚体, 不会产生垂直于壁面方向的气流振动, 因此计算时同样不考虑单极子源。

2.2.2. 有限元法求解声波方程

由于计算微气压波声学特性时主要关注的是声场分布状态, 一般不考虑声波随时间的传递过程, 可将简化后的 FW-H 方程通过分离变量法得到只包含空间变量的 Helmholtz 方程[14]:

$$\nabla^2 p(x_i) + k^2 p(x_i) = \varphi(x_i) \quad (2)$$

采用有限元法求解 Helmholtz 方程时, 进行有限元格式离散后, 得到数值形式的声压计算表达式[15]:

$$\left(\mathbf{K}_a + j\omega\mathbf{C}_a - \omega^2\mathbf{M}_a\right) \cdot \mathbf{p}_i = \mathbf{Q}_i + \mathbf{V}_{ni} + \mathbf{P}_i = \mathbf{F}_{ai} \quad (3)$$

式中, \mathbf{Q}_i 表示输入的声源向量, \mathbf{V}_{ni} 表示质点速度边界条件, \mathbf{P}_i 表示输入的声压边界条件, \mathbf{F}_{ai} 表示声学激励, \mathbf{p}_i 表示待求解的网格节点声压。 $\left(\mathbf{K}_a + j\omega\mathbf{C}_a - \omega^2\mathbf{M}_a\right)$ 表示方程矩阵, 属于稀疏矩阵。

2.2.3. 完美匹配层

能够在满足计算精度的前提下缩小计算域以减少计算工作量, 在包含微气压波主要流场参数的空间边界处设置完美匹配层(Perfect Matched Layer, 简称 PML [16])。当声波进入 PML 层后会被吸收, 并以指数形式衰减。而远场空间的声辐射情况可通过基于 Green 函数的 Kirchhoff 积分计算得到[17]。

3. 微气压波声学计算模型的建立

进行隧道出口流场计算时, 建立的列车模型参照日本 E2 系高速列车[18], 隧道阻塞比约为 0.2。不考虑隧道出入口缓冲结构和山体的影响, 对简化后得的列车-隧道模型进行划分网格, 如图 2 所示。经

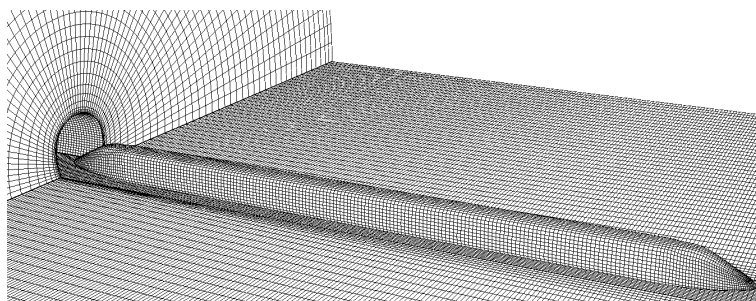


Figure 2. Partial grid of train-tunnel model at the entrance of tunnel
图 2. 列车 - 隧道模型入口处局部网格

网格无关性验证后, 流场计算网格总数量约为 430 万。

基于三维有限体积法求解 N-S 方程, 得到列车以 200 km/h 的速度进入长度为 500 m 的隧道后, 距离隧道出口中点不同距离测点处的微气压波波形, 如图 3 所示。微气压波噪声计算分析范围为 1.8~2.8 s。

根据隧道出口不同距离处微气压波幅值大小, 为尽可能保留微气压波流场参数, 设置隧道出口外半径为 30 m, 并向隧道内部延伸 30 m 的隧道出口附近空间作为微气压波声学计算域, 如图 4 所示。

对于图 5 所示的微气压波噪声计算域边界, 由于隧道出口实体边界处(隧道内壁面、地面和出口立面)的吸声属性没有实际的测试结果, 且根据常用混凝土材料对次声声波吸声性能极低的特性, 尝试性的将其定义为全反射边界条件。具体参数大小和其余边界条件类型如表 1 所示。

4. 隧道出口外部声场分析

当列车进入隧道时生成的压缩波传播至距离隧道出口 35 m 左右, 采用大涡模拟法进行隧道出口微气压波流场瞬态计算。在得到稳定的隧道出口附近流场后, 开始提取计算域内空间流场参数的脉动信号。为体现图 3 所示的隧道出口压力主要变化过程, 在满足 Nyquist 采样定理的最高频率(取 200 Hz)与时间步长关系条件下, 定义采样时间步长为 5×10^{-4} s。连续保存 2000 个时间步的时域脉动信号, 采样总时长为 1s。运用有限元法计算得到隧道出口中垂面和水平高度 3.5 m 处的横截面上微气压波噪声声压级分布情况, 如图 6 所示。

隧道出口微气压波噪声声压分布云图中, 次声频段内声压分布在隧道出口外呈现明显的球面形状, 且噪声的次声频段集中了大部分能量, 1 Hz 的微气压波噪声最大声压级达 177 dB。

读取隧道出口外隧道中线上高度为 3.5 m 距离洞口 20 m 的测点处不同频率对应声压级, 如图 7 中所示。由于 100 Hz 以上频率噪声声压级低于 20 dB, 在计算微气压波噪声时, 100 Hz 以上的微气压波噪声极易被实际情况的环境噪声淹没, 在后续计算分析时, 主要分析 100 Hz 以下频率的微气压波噪声。

5. 隧道出口微气压波音爆成因分析

为分析高速铁路隧道出口音爆的发生机理, 即判定隧道出口微气压波噪声能否可以被人耳听到, 参考 GB/T4963-2007《声学标准等响度级曲线》, 我们引入人耳听阈曲线作为音爆的判定依据。

由于人耳对不同频率的声音的敏感程度不同, 不同频率声音的声压级只有在图 8 中虚线所示的听阈曲线之上才能被人耳听到, 并且同一频率的响度级(单位 phon)越高, 人耳对该频率声音的感觉越明显(图 9)。

对比可知, 当列车运行速度为 200 km/h 时, 隧道出口附近 20 Hz 以上的微气压波噪声声压级位于人耳听阈曲线下方, 即该速度条件下生成的微气压波无法被人耳听到。列车运行速度为 300 km/h 时, 对应计算得到的声压级变化曲线会有部分进入到人耳听阈曲线以上的区域, 但响度级低于 10 phon。而当列车

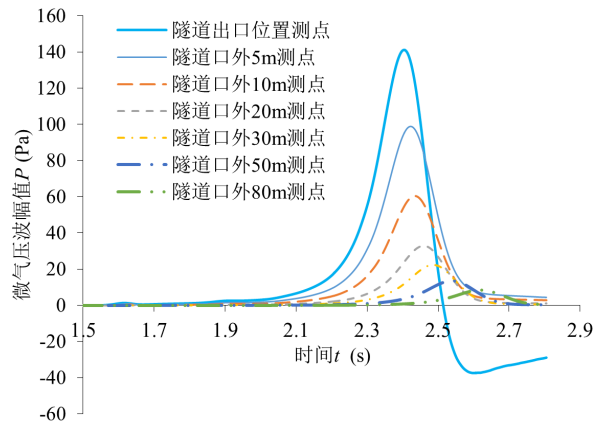


Figure 3. Micro-pressure wave at the tunnel exit
图 3. 隧道出口微气压波

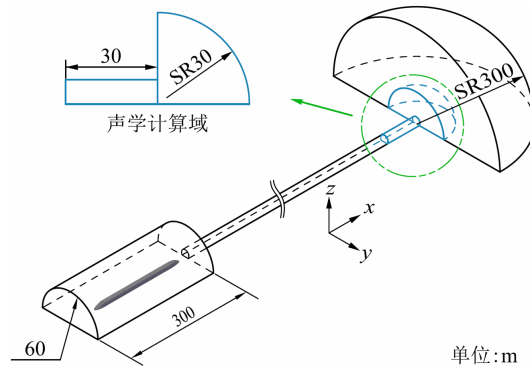


Figure 4. Schematic of Micro-pressure wave calculate domain
图 4. 隧道出口微气压波噪声计算域示意图

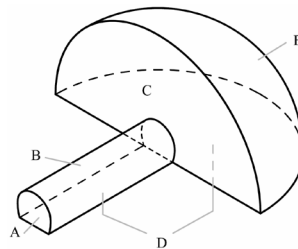


Figure 5. The acoustic boundaries of domain
图 5. 声学计算域边界

Table 1. Boundary condition type and parameter setting of calculate domain
表 1. 声学计算域边界条件类型和参数设定

边界面	边界条件类型	参数说明
隧道内横截面 A	全吸收	声阻抗实部 $416.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 声阻抗虚部 $0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
隧道内壁面 B 出口立面 C 地面 D	全反射	声阻抗实部 $9500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 声阻抗虚部 $0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
空间辐射面 E	PML 层	保持默认属性

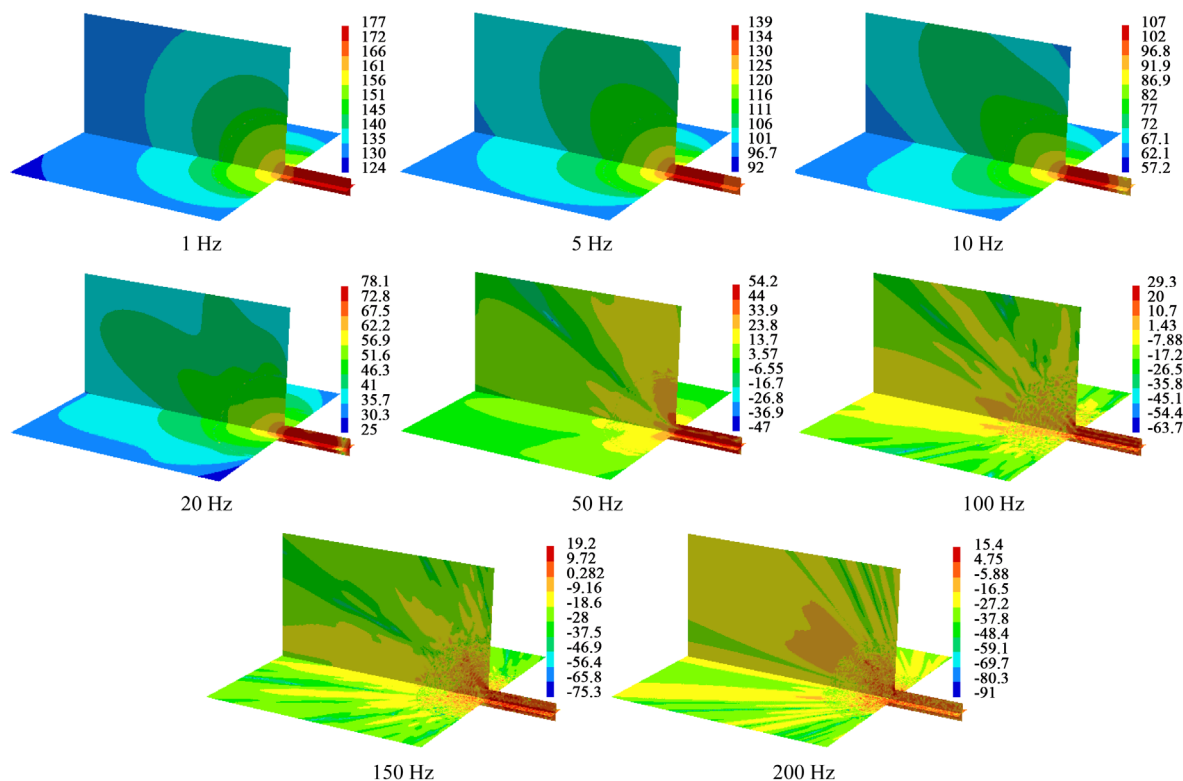


Figure 6. Distribution of SPL of micro-pressure wave at tunnel exit at different frequencies (unit: dB)

图 6. 不同频率下隧道出口微气压波噪声的声压级分布情况(单位: dB)

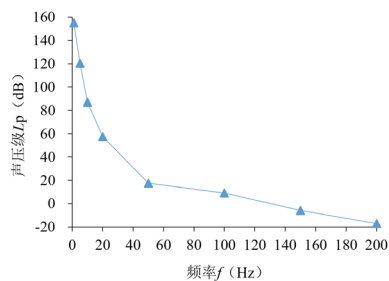


Figure 7. The SPL line of micro-pressure at tunnel exit

图 7. 隧道出口外微气压波噪声的声压级曲线

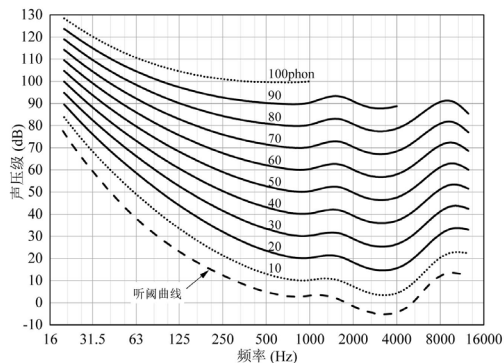


Figure 8. The equal-loudness curve

图 8. 等响曲线图[19]

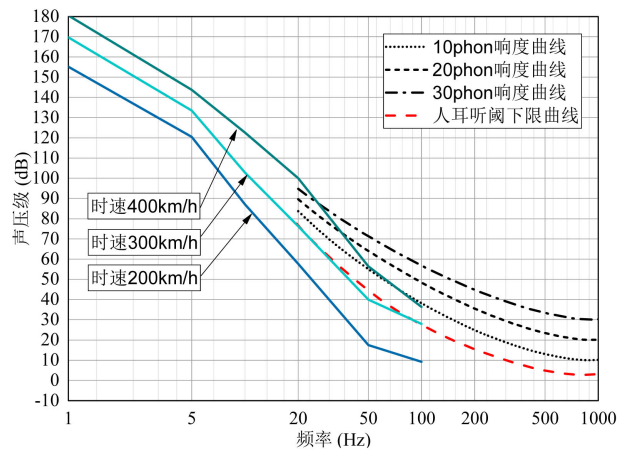


Figure 9. The SPL line of micro-pressure at tunnel exit
图 9. 隧道出口附近的微气压波噪声声压级变化曲线

运行速度为 400 km/h 时, 20 Hz 以上的部分微气压波频率噪声响度级将达 30 phon, 已经能被人耳听到。可见, 当列车以高于 300 km/h 的车速进入长度为 500 m、阻塞比为 0.2 时, 隧道产生的压缩波传播至隧道出口后, 产生的隧道出口外微气压波噪声将可能被人耳听到, 即产生隧道出口音爆现象。

6. 结论

本文采用大涡模拟法计算隧道出口流场参数, 基于 Lighthill 声类比理论运用有限元法计算隧道出口声场分布, 并引入人耳听阈曲线分析了隧道出口外微气压波音爆现象的发生机理。得到结论如下:

- 1) 隧道出口微气压波噪声声源可类比为四极子源的发声;
- 2) 微气压波噪声频率主要集中在 20 Hz 以下, 当频率高于 100 Hz 时微气压波噪声极易被环境噪声淹没;
- 3) 在长度为 500 m、阻塞比为 0.2 的隧道中, 当列车进入隧道的速度高于 300 km/h 时, 引起的隧道出口外微气压波噪声将会出现人耳可听的音爆现象。
- 4) 计算分析是基于日本新干线 E2 车型建立的简化计算模型, 若考虑缓冲结构, 并且隧道长度和阻塞比的不同, 可能会得到不尽相同的结论。

参考文献

- [1] 赵有明. 高速铁路隧道气动效应[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
- [2] Yamamoto, A., Ozawa, S. and Maeda, T. (1984) Reduction of Micro-Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit by Side Branches in Tunnel. In: *Railway Technical Research Institute Quarterly Reports, Volume 25*, 102-105.
- [3] Gerbig, C. and Degen, K.G. (2012) Acoustic Assessment of Micro-Pressure Wave Emissions from High-Speed Railway Tunnels. In: Maeda, T., et al. Eds., *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, vol 118, Springer, Tokyo, 389-396. https://doi.org/10.1007/978-4-431-53927-8_46
- [4] Gerbig, C. and Hieke, M. (2015) Micro-Pressure Wave Emissions from German High-Speed Railway Tunnels—An Approved Method for Prediction and Acoustic Assessment. In: Nielsen, J., et al. Eds., *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, vol 126, Springer, Berlin, Heidelberg, 571-578. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44832-8_67
- [5] 王英学, 高波, 郑长青, 等. 高速列车进入隧道产生的微气压波实验研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(1): 5-8.
- [6] Yamamoto, A. (1977) Micro-Pressure Wave Radiated from Tunnel Exit. *Nihon Butsuri Gakkai Haru Bunkakai*.
- [7] 梅元贵, 许建林, 耿烽, 等. 基于无限大障板圆形活塞辐射原理的隧道微压波计算方法[J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 74-78.

- [8] 杨志刚, 谭晓明, 梁习锋, 等. 基于高阶谱差分的 CAA 模型预测高速列车过隧微气压波[J]. 铁道学报, 2014(7): 85-89.
- [9] 史宪明, 吴剑, 冷希乔, 等. 补强套衬对高速铁路隧道洞口微气压波的影响[J]. 铁道建筑, 2017(10): 53-55.
- [10] 张雷, 杨明智, 李志伟, 等. 隧道出口洞门护坡对微气压波的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(10): 3671-3675.
- [11] 米百刚, 詹浩, 朱军. 基于动网格的真空管道高速列车阻力计算方法研究[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(9): 877-882.
- [12] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [13] Williams, J.E.F. and Hawkings, D.L. (1969) Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **264**, 321-342. <https://doi.org/10.1098/rsta.1969.0031>
- [14] 李人宪. 高速列车气动影响[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [15] 李增刚, 詹福良. Virtual. Lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [16] Berenger, J.P. (1994) A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. Academic Press Professional Inc., Cambridge.
- [17] 陆晓柳, 李人宪, 柳丛彦. CRH380A 型高速列车远场气动噪声计算分析[J]. 机械设计与制造, 2017(s1): 137-140.
- [18] 钱立新. 世界高速铁路技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [19] 全国信息与文献标准化技术委员会. GB/T4963-2007 声学标准等响度级曲线[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0530, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ojav@hanspub.org