

高速铁路声屏障宽频穿孔吸声降噪结构

盛 峰^{1,2}, 姜在秀^{3,4}, 贺银芝^{4,5}, 曾小清⁶, 邓 波⁶, 安雪晖¹, 俞悟周^{3,4}

(1. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 2. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100070; 3. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092;
4. 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 上海 201804; 5. 同济大学 汽车学院, 上海 201804;
6. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 采用传递矩阵法对高铁声屏障的多层微穿孔结构的吸声进行计算。对给定空腔深度, 适当增加具有不同声阻抗的微穿孔板可改善吸声性能。经遗传算法得到具有优化参数的 4 层和 5 层微穿孔结构可显著拓宽吸声频带, 提高整个频带的吸声系数, 在 200~3 150 Hz 频率范围内的平均吸声系数分别为 0.70 和 0.80, 吸声频带涵盖 250~350 km·h⁻¹ 高速铁路主要噪声频率范围。5 层结构在 400~4 000 Hz 频率范围内吸声系数可达 0.8。

关键词: 高速铁路; 噪声; 声屏障; 微穿孔

中图分类号: O429

文献标志码: A

layer and 5-layer micro-perforated panels with optimized parameters obtained by genetic algorithm can significantly broaden the sound absorption frequency bandwidth and improve the absorption coefficient of the whole frequency range, with an average absorption of 0.7 and 0.8 respectively in the range of 200 - 3 150 Hz which covers the main noise frequency range of high-speed train at 250 - 350 km·h⁻¹. For 5-layer absorbers, absorption coefficients can be higher than 0.8 at 400 - 4 000 Hz.

Keywords: high-speed railway; noise; sound barrier; micro-perforated panel

Multi-Layer Micro-Perforated Panels with Broadband Absorption for Reduction of High-Speed Railway Noise

SHENG Feng^{1,2}, JIANG Zaixiu^{3,4}, HE Yinzi^{4,5}, ZENG Xiaoping⁶, DENG Bo⁶, AN Xuehui¹, YU Wuzhou^{3,4}

(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Powerchina Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing 100070, China; 3. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Tongji University, Shanghai 201804, China; 5. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 6. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the transfer matrix method, the calculation of absorption of multi-layer micro-perforated panels (MPP) is conducted. Properly increasing the number of layers with different impedance in given cavity depths can improve sound absorption performance. The 4-

高速铁路具有快速、便捷、准时、低耗的特点, 在各国得到广泛的使用。高速铁路极大促进了沿线区域的资源开发和经济发展, 也带来了不可忽视的噪声污染。我国许多高铁经过人口密集区域, 高速列车行驶时辐射的噪声对周边环境产生影响。距轨道中心线 25.0 m、距轨顶面 3.5 m 处, 350 km·h⁻¹ 车速时我国 CRH (China Railway Highspeed) 的噪声级为 92~93 dB, 300 km·h⁻¹ 时 CRH 噪声级约为 87 dB^[1]。

高速列车行驶时辐射噪声主要由轮轨噪声、集电系统噪声、空气动力噪声和高架桥结构噪声组成^[2]。轮轨噪声与速度的三次方成正比, 气动噪声则与速度的六到八次方成正比^[3]。随着车速的增加, 气动噪声影响增强, 当车速超过 300 km·h⁻¹ 时气动噪声将逐渐成为主要噪声源^[4]。

噪声降低通常在噪声源、传播路径和受声点三个方面采取综合措施。高速铁路噪声源的噪声降低须针对轮轨噪声和气动噪声采取措施, 包括降低车轮和轨道表面粗糙度、定期打磨车轮、采用阻尼钢

收稿日期: 2023-06-02

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0208000); 国家自然科学基金(11874290); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 盛 峰, 正高级工程师, 工程硕士, 主要研究方向为土木结构工程, 土木水利。

E-mail: sl8663726777f@126.com

通信作者: 俞悟周, 副教授, 理学博士, 主要研究方向为环境声学, 交通工具声学仿真及降噪, 新型声学结构。

E-mail: ywzh@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

轨、优化设计气动外形、安装受电弓导流罩等^[5-6]。近年来通过对动车组整体技术的提升及采取的噪声振动控制措施,我国动车组运行辐射噪声水平总体呈下降趋势^[7]。除降低车辆辐射噪声外,在传播路径上设置声屏障措施也是高铁重要的降噪措施。对不同线路的测试结果表明,声屏障具有良好的降噪效果,列车运行时速在 $250\sim 385\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时距离高架桥段轨道中心线30 m处,2.15 m和3.15 m高声屏障的插入损失约为4.5~8.5 dB(A)和6.0~10.0 dB(A)^[8-9]。屏体的吸声性能是影响声屏障实际降噪效果的重要因素之一,屏体吸声不足时,噪声在车身表面与声屏障之间产生多重反射,降低声屏障的实际降噪效果。吸声性能的差异可使声屏障的插入损失相差高达6 dB(A)^[10]。

微穿孔结构是孔径一般不超过1 mm的小孔和其后的空腔形成的共振结构,无需阻性纤维材料,可提供良好的吸声性能。由于微穿孔共振吸声结构具有抗潮湿、耐腐蚀、卫生清洁、环境友好等优点,在声学领域得到广泛应用。

本文采用传递矩阵法对由多层微穿孔板形成的共振结构进行吸声计算。通过参数优化,针对高速铁路的主要噪声频带400~4 000 Hz提出了宽频多层微穿孔结构。

1 高铁噪声源分布及频谱特性

1.1 主要噪声源

国内外学者采用多通道声阵列测试系统对高速列车的车外噪声进行了测量^[1,11-14]。声阵列测试显示,我国高速列车的车外噪声的主要声源为转向架区域噪声、受电弓及其底座以及车辆连接处的气动噪声^[11]。采用78通道4 m直径的声阵列在距离轨道中心7.5 m、阵列中心距离轨面1.8 m处测量得到的 $160\sim 350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内不同车速时高铁的辐射噪声云图显示转向架区域的噪声最高^[13],该噪声包括轮轨滚动噪声和转向架气动噪声两大部分。

1.2 噪声频谱特性

高速铁路噪声为宽频带噪声,以中高频为主。图1为车速约 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时距离高架桥段轨道中心7.5 m、轨顶3.5 m处,我国不同高速列车的噪声频谱图^[11-12],总噪声级分别为98.0 dB(A)和101.0 dB(A)。图2为同一高速列车在不同车速下行驶时在距离高架段轨道中心7.5 m、轨顶3.5 m处的噪声频谱^[11]。不同的高速铁路在基本一致的车速下辐射噪

声的频谱特性有所不同,尤其是在500~2 000 Hz范围内,噪声级可相差5 dB以上。同一高速铁路在不同车速时噪声频谱也有较大的变化,噪声级随着车速提高,噪声的频带宽度也随着车速的提高而增加。声屏障措施的有效吸声频带范围应涵盖不同车速的高铁主要噪声频率范围。总体上,对于车速为 $250\sim 350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高速列车,声屏障吸声结构的有效吸声频带宜为500~3 150 Hz,车速达 $380\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上时,声屏障吸声结构的有效吸声频带宜为400~5 000 Hz。

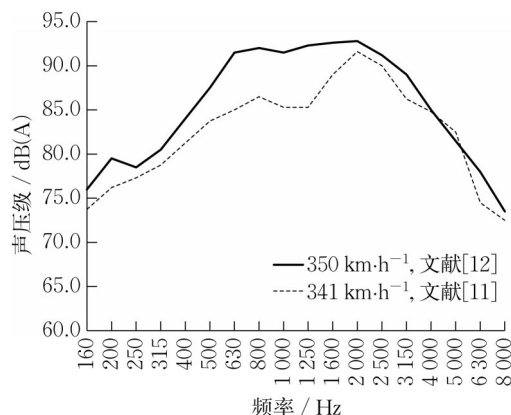


图1 车速约为 $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的高速列车辐射噪声频谱
Fig. 1 Noise spectrum of high-speed train at $350\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

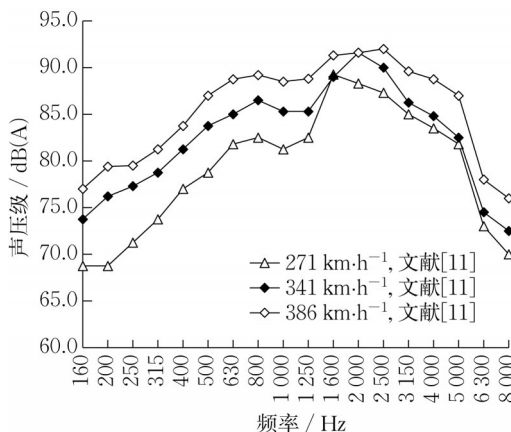


图2 不同车速的高速列车辐射噪声频谱
Fig. 2 Noise spectrum of high-speed trains at different speeds

2 多层微穿孔结构的吸声计算

多层微穿孔结构由多层微穿孔板及多个空腔组成,如图3所示。根据各层微穿孔板的传递矩阵和空腔的传递矩阵,可得到整体结构的表面声阻抗^[15]。第*i*层微穿孔板的传递矩阵 P_i 和空腔的传递矩阵 S_i 如式(1)和式(2)所示。

$$P_i = \begin{bmatrix} 1 & Z_{pi} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S_i = \begin{bmatrix} \cos kD_i & (j\rho_0 c_0) \sin kD_i \\ \left(\frac{j}{\rho_0 c_0}\right) \sin kD_i & \cos kD_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: ρ_0 、 c_0 、 k 分别为空气的密度、声速和波数; Z_{pi} 为第*i*层微穿孔板的声阻抗; D_i 为第*i*层空腔深度。

将各层板的传递矩阵 P_i 与对应空腔的传递矩阵 S_i 连乘,得到整个结构的传递矩阵 T 。

$$T = \prod_{i=1}^n P_i S_i = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

结构的声阻抗为

$$Z = \frac{T_{11}}{\rho_0 c_0 T_{21}} \quad (4)$$

第*i*层微穿孔板的声阻抗 Z_{pi} 采用马大猷模型计算^[16]。

$$Z_{pi} = \rho_0 c_0 \left[\frac{32\mu t_i}{\sigma_i c_0 d_i^2} \left(\sqrt{1 + \frac{x_i^2}{32}} + \frac{\sqrt{2} x_i d_i}{32 t_i} \right) + j \frac{kt_i}{\sigma_i} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + x_i^2/2}} + 0.85 \frac{d_i}{t_i} \right) \right] \quad (5)$$

式中: μ 为运动黏滞系数; t_i 为第*i*层板的厚度; $x_i = \sqrt{\frac{2\pi f}{\mu} \frac{d_i}{2}}$; σ_i 为第*i*层板的穿孔率; d_i 为第*i*层板的孔径; f 为频率。

对于孔径超过1 mm的穿孔板,可采用式(6)模型计算声阻抗 Z_{pi} ^[17]。

$$Z_{pi} = \frac{\rho_0}{\sigma_i} \sqrt{8\mu\omega} \left(1 + \frac{t_i}{d_i} \right) + j \frac{\omega\rho_0}{\sigma_i} \left[\sqrt{\frac{8\mu}{\omega}} \left(1 + \frac{t_i}{d_i} \right) + t_i + \delta_i \right] \quad (6)$$

式中: $\omega = 2\pi f$; $\delta_i = 0.85d_i(1 - 1.47\sqrt{\sigma_i} + 0.47\sqrt{\sigma_i^3})$ 。

得到多层穿孔结构的总声阻抗 Z 后,吸声系数 α 由式(7)计算。

$$\alpha = \frac{4\operatorname{Re}\left(\frac{Z}{\rho_0 c}\right)}{\left[1 + \operatorname{Re}\left(\frac{Z}{\rho_0 c_0}\right)\right]^2 + \left[\operatorname{Im}\left(\frac{Z}{\rho_0 c_0}\right)\right]^2} \quad (7)$$

图4为某4层结构的吸声系数的驻波管实测结

果与计算结果比较。吸声结构的总厚度为15 cm,各层板的厚度为1 mm,各层板的穿孔孔径为1.5 mm,各层板的穿孔率为1.8%~2.5%。吸声结构的参数见表1。由表1可知,计算值和试验值吻合良好,表明传递矩阵法可简便快速地得到多层微穿孔结构的吸声性能。

多层穿孔结构的吸声性能取决于各层穿孔板的孔径、板厚、空腔、穿孔率,因此多层结构涉及的计算参数较多。为快速得到具有宽频高吸声的结构,采用遗传算法进行优化,以计算频率范围内的平均吸声系数作为目标函数,最大平均吸声系数为目标优化结果。

图5为总厚度20 cm,各层板的穿孔参数范围一致(各层板厚为1.0~1.5 mm、孔径为1.0~1.5 mm、穿孔率为0.5%~15%)时,不同层数的微穿孔机构的优化吸声性能比较。通常来讲,在参数优化的情况下,增加微穿孔层数可显著改善吸声性能,吸声频带显著拓宽,吸声峰值显著提高。相较于2层结构,4层或5层结构吸声系数在0.5以上的吸声频带可拓宽1个倍频带以上,形成宽频吸声结构。

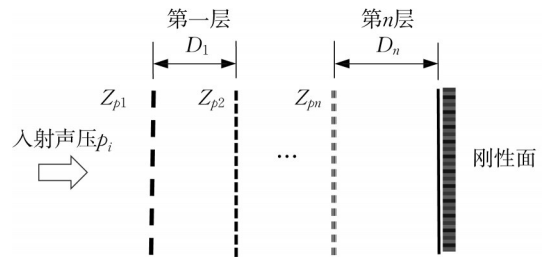


图3 多层微穿孔结构示意图

Fig. 3 Sketch of multi-layer micro-perforated panel

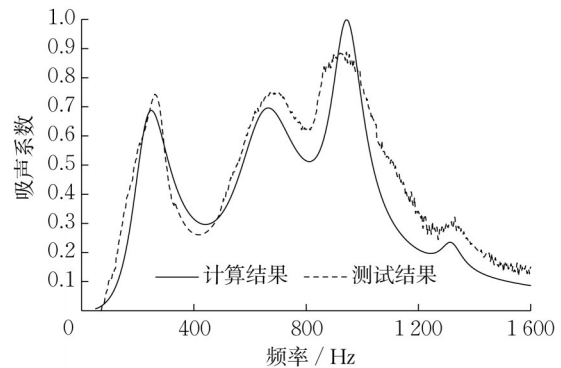


图4 4层结构吸声系数的计算值和实测值的比较

Fig. 4 Comparison of calculation and measurement result of 4-layer micro-perforated panel assembly

表1 4层穿孔结构的参数

Tab. 1 Parameters of 4-layer MPP resonator

位置	孔径/mm	板厚/mm	穿孔率/%	空腔深度/mm
第一层	1.5	1.0	2.5	55
第二层	1.5	1.0	1.2	32
第三层	1.5	1.0	1.5	30
第四层	1.5	1.0	1.8	28

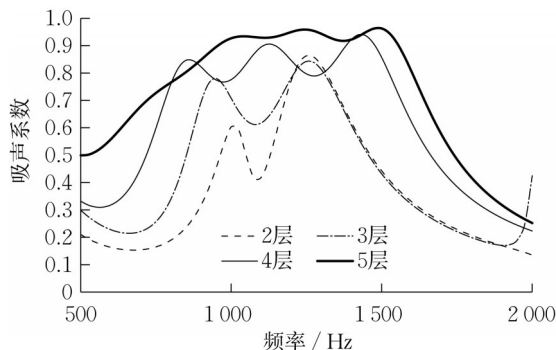


图5 不同层数的微穿孔结构吸声性能

Fig. 5 Absorption of resonator with micro-perforated panel of different multi-layer

3 高速铁路声屏障吸声结构优化设计

高速列车以转向架区域的噪声为主,包括轮轨滚动噪声和转向架气动噪声,采取吸声型声屏障可获得良好的降噪效果。针对高铁的主要噪声频率范围,考虑到屏体的实际安装条件,对厚度不超过15 cm的不同层微穿孔结构进行优化计算。为便于实际加工,孔径范围为0.6~1.5 mm,板厚为0.8~1.5 mm,穿孔率范围为0.3%~15.0%。对于多层结构,影响吸声性能的参数众多,采用优化算法针对高铁的主要噪声频谱范围进行参数优化。

图6为不同层数微穿孔板共振结构的优化吸声系数频谱。在400~4 000 Hz范围内,4层结构吸声系数为0.40~0.95,绝大部分频率吸声系数在0.60以上,吸声系数频谱起伏较大;5层结构吸声系数为0.70~0.95,绝大部分频率处吸声系数在0.80以上,起伏显著降低,具有很宽的吸声频带。4层和5层的优化结构在200~3 150 Hz的平均吸声系数为0.70和0.80。对于高铁声屏障采用5层结构可获得更好的吸声性能。

结果显示,在给定的参数范围内,适当增加微穿孔板层数可以显著改善吸声性能。经过参数优化,可显著拓宽吸声频带,提高整个频带的吸声性能,吸声频带可涵盖车速为250~350 km·h⁻¹的高速列车主要噪声频率范围。

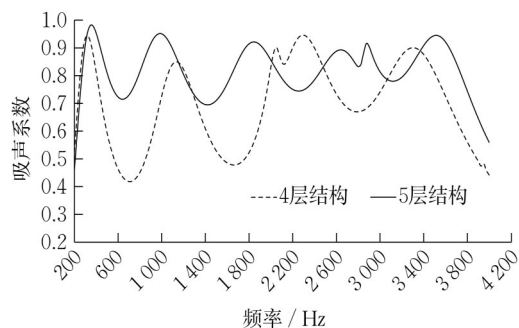


图6 优化多层微穿孔结构的吸声性能

Fig. 6 Absorption of resonator with micro-perforated panel of optimized multi-layer

4 结论

高速列车的主要噪声源是转向架区域噪声、受电弓气动噪声和车厢连接处的气动噪声,其中转向架区域的噪声最高,包括轮轨滚动噪声和转向架气动噪声。车速为250~350 km·h⁻¹时高速列车噪声的主要频率范围为500~3 150 Hz,380 km·h⁻¹以上时高速列车噪声的主要频率范围为400~5 000 Hz。声屏障是降低高速列车噪声影响的重要措施,应针对高速列车的主要噪声频谱进行吸声优化设计。

采用传递矩阵法可计算多层微穿孔共振结构的吸声。在厚度不超过15 cm、孔径范围为0.6~1.5 mm、板厚为0.8~1.5 mm、穿孔率范围为0.3%~15.0%等便于加工的参数下,适当增加微穿孔板层数可显著拓宽吸声频带,提高整个频带的吸声性能。在400~4 000 Hz内,4层和5层微穿孔结构具有良好的吸声,吸声系数在绝大部分频率分别为0.60~0.95和0.80~0.95,在200~3 150 Hz频率范围内的平均吸声系数为0.70和0.80,吸声频带可涵盖车速为250~350 km·h⁻¹的高速列车主要噪声频率范围。

作者贡献声明:

盛 峰:文献查阅及文章修改建议。

姜在秀:文献查阅,文章撰写及图表绘制。

贺银芝:文章修改建议。

曾小清:需求分析与应用。

邓 波:数据分析。

安雪晖:文章修改建议。

俞悟周:思路设计及文章修改建议。

参考文献:

- [1] 张曙光. 350 km·h⁻¹高速列车噪声机理、声源识别及控制[J]. 中国铁道科学, 2008, 30(1): 86.

- ZHANG Shuguang. Noise mechanism, sound source localization and noise control of $350\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ high-speed train [J]. China Rail Way Science, 2008, 30(1): 86.
- [2] Railway Technical Research Institute. Japanese railway technology today [M]. Tokyo: East Japan Railway Culture Foundation, 2001.
- [3] TALOTTE C, GAUTIER P E, THOMPSON D J, *et al.* Identification modeling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267(2): 447.
- [4] THOMPSON D J, LATORRE IGLESIAS E, LIU X, *et al.* Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains [J]. International Journal of Rail Transportation, 2015, 3(3): 119.
- [5] VINCENT N. Rolling noise control at source: state-of-the-art survey [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3):865.
- [6] 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.
- SUN Zhenxu, YAO Yongfang, YANG Yan, *et al.* Overview of the research progress on aerodynamic noise of high-speed trains in China[J]. Acta Aerodynamic Sinica, 2018, 36(3): 385.
- [7] 伍向阳, 辜小安, 刘兰华, 等. 高速铁路环境噪声排放标准限值研究[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2019, 9(2): 1.
- WU Xiangyang, GU Xiaolan, LIU Lanhua, *et al.* Study on emission standards of high-speed railway environmental noise [J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2019, 9(2): 1.
- [8] ZHANG X, LIU R, CAO Z, *et al.* Acoustic performance of a semi-closed noise barrier installed on a high-speed railway bridge: measurement and analysis considering actual service conditions[J]. Measurement, 2019, 138: 386.
- [9] 伍向阳, 张格明, 董孝卿, 等. 高速铁路噪声控制技术进展与展望[J]. 中国铁路, 2021, 6:35.
- WU Xiangyang, ZHANG Geming, DONG Xiaoqing, *et al.* Progress and prospect of noise control technology for high speed railway[J]. China Railway, 2021, 6:35.
- [10] 周信, 肖新标, 何宾, 等. 高速铁路声屏障插入损失影响因素及规律[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(6):1024.
- ZHOU Xin, XIAO Xinbiao, HE Bin, *et al.* Influential factors and rules for insertion loss of high-speed railway noise barriers [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6):1024.
- [11] HE Bin, XIAO Xinbiao, ZHOU Qiang, *et al.* Investigation into external noise of a high-speed train at different speeds[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2014, 15(12): 1019.
- [12] ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, WANG Dewei, *et al.* Source contribution analysis for exterior noise of a high-speed train: experiments and simulations [J]. Shock and Vibration, 2018 (1): 5319460.
- [13] LI Muxiao, DENG Tiesong, WANG Di, *et al.* An experimental investigation into the difference in the external noise behavior of a high-speed train between viaduct and embankment sections [J]. Shock and Vibration, 2022 (1) : 8827491.
- [14] NOH H M. Noise-source identification of a high-speed train by noise source level analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part F. Journal of Rail and Rapid Transit, 2017, 231: 717.
- [15] LEE D H, KWON Y P. Estimation of the absorption performance of multiple layer perforated panel systems by transfer matrix-method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 278(4/5):847.
- [16] MAA Dayou. Potential of microperforated panel absorber [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104 (5): 2861.
- [17] LEO L B, ISTVAN L V. Noise and vibration control engineering[M]. New York: John Wiley and Sons, 1992.