

特色专题

设备低噪声技术助力“宁静中国”建设

项红荧, 许升, 房丽红, 赵海霞, 王伟, 孙兴朋, 楚德见, 李建

摘要 随着城市化进程加速,设备噪声污染成为社会生活噪声治理的核心挑战。综述了设备噪声污染的治理路径及降噪技术,现在面临被动降噪对低频噪声(<500 Hz)衰减率不足,且增重显著;主动降噪在高频噪声(>1 kHz)控制、实时算力及功耗方面存在瓶颈;声品质优化受限于心理声学参数的个体差异3大核心问题。针对上述局限,提出前沿技术突破方向:声学超材料的低频高效吸声(吸声系数>0.95)、空气动力仿生技术的降噪增效协同、智能降噪的人工智能动态适应等。建议通过“政策-技术-标准”三链融合,构建从物理静音到心理宁静的声景生态,支撑“宁静中国”建设落地。

关键词 设备噪声污染;宁静中国;被动降噪;主动降噪;声品质优化

近年来,营造宁静环境被纳入美丽中国建设的核心议题,成为生态文明的关键维度。生态环境部发布的《中国噪声污染防治报告(2024)》数据显示:2023年全国噪声投诉中,社会生活噪声占比68.4%,建筑施工噪声占比24.1%,工业噪声占比3.2%,交通运输噪声占比4.3%。社会生活噪声是噪声污染防治的重中之重。

根据《中华人民共和国噪声污染防治法》(2021年12月24日通过,2022年6月5日起施行),社会生活噪声是指“人为活动产生的除工业噪声、建筑施工噪声和交通运输噪声之外的干扰周围生活环境的声音”,包括住宅内设备运行噪声(如空调、破壁机、吸油烟机)、群体活动噪声(如商业促销、广场舞)、室内装修施工噪声(如电钻、切割机)。其中设备作为重要噪声源,主要包括:冷却塔、风机、空调设备、音响设备、洗衣机、油烟机、电梯、水泵、通风设备等。2023年,国家发布了第一批《低噪声施工设备指导名录》,引导设备低噪声化;2024年,在第一批名录的基

础上进行了更新完善,入选设备种类由6类扩大到8类,型号数量由46个扩大到63个。2025年,深圳出台的《社会生活噪声管理技术规范》要求设备选型时优先考虑低噪声设备。未来,随着智能家居普及(如扫地机器人、人工智能(AI)空调),设备低噪声治理将成为城市宜居性的核心指标。

1 设备噪声污染防治概况

设备噪声结合其声学特性可采用不同的噪声治理路线,以家用设备为例,可划分为2大类:(1)强声源设备(如破壁机^[1]、洗地机、吸油烟机等,典型声压级>60 dB(A)):这类设备噪声能量高,对环境和用户干扰大,首要任务是通过源头削减和传播路径阻隔实现声压级降低。(2)弱声源设备(如高端冰箱、酒柜等,典型声压级<20 dB(A)):这类设备声压级虽然很低,但特定的、易被感知的声学瑕疵(如音调性、粗糙度、波动度)会成为主要困扰,影响用户舒适度与产品高端感,这类噪声的治理路径主要是优化声品质。但不管是降低声压级还是优化声品质都离不开减振降

青岛海尔智能技术研发有限公司超前创新中心,青岛 266101

收稿日期:2025-06-19;修回日期:2025-11-06

作者简介:项红荧,工程师,研究方向为家电减振降噪,电子信箱:xianghongying@haier.com

引用格式:项红荧,许升,房丽红,等.设备低噪声技术助力“宁静中国”建设[J].科技导报,2026,44(4):127-134;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.09.00078

噪技术的支撑。现代设备减振降噪技术已形成从源头防控、路径降噪到声品质优化的完整体系,在社会生活噪声控制方面实现了显著效果。

1.1 源头防控

源头防控是噪声治理最直接有效的降噪策略。其核心是通过技术改进和工艺优化,从源头上减少或消除噪声的产生。主要控制方法如下,(1) 结构改进:优化齿轮齿形、提高加工精度,减少摩擦和碰撞噪声^[2];(2) 减振结构设计:在设备内部采用隔振结构或填充阻尼材料,降低机械振动;(3) 工艺改进:用低噪声工艺替代高噪声工艺,例如焊接替代铆接;(4) 变频技术应用:采用变频驱动技术,减少设备启停冲击;(5) 结构形貌设计:优化风机叶片设计,降低气流扰动^[3];(6) 运行参数调整:合理调整设备转速、负荷等运行参数,使设备运行在高效点降低噪声。源头防控为后续的传播路径控制奠定了良好基础,是实现高效噪声治理的首要环节,现阶段面临声源特性分析(不同频段噪声传播差异大)、降噪与性能的平衡(隔声措施可能影响设备散热性能)等难题。

1.2 路径降噪

1.2.1 被动降噪

被动降噪(passive noise control, PNC)是通过物理材料或结构设计阻断、吸收或反射声波能量。其关键技术及应用如下,(1) 吸声技术:采用多孔或黏弹性材料(例如泡沫、纤维)将声能转化为热能,对声能进行吸收,通过优化孔隙结构、运用新型材料,提高材料的吸声性能,如大型公共空间的通风管道内安装吸声纤维,减少空气流动或风机产生的噪声^[4];(2) 隔声技术:高密度材料通过阻抗失配反射声波,对声波进行阻隔,例如家电产品压缩机声学包降噪^[5];(3) 消声器技术:通过特定的声学结构和材料,在允许气流正常通过的同时,通过吸声、反射、干涉等多种物理机制有效降低噪声传播的专业降噪装置。例如空调通风系统消声器、压缩机排气管道消声器,防止压缩机噪音通过管路传递到室内^[6];(4) 隔振技术:指在振源和需要保护的设备或结构之间插入弹性元件(隔振器),以减弱或隔离振动传递的技术措施。其核心目的是通过特定的隔振装置,阻断或减弱振动能量的传递路径。例如动力源(压缩机、水泵、风机等)的安装位置都会采用橡胶隔振器,有效阻断振动能量的传递^[7],管

道、风管采用软连接减少振动传递;(5) 阻尼技术:指通过特定的物理机制将振动系统的机械能转化为热能或其他形式的能量,从而使振动幅度减小的技术手段。其核心功能是控制和消耗系统的振动能量,提高系统的稳定性和安全性。例如,洗衣机减振器是通过弹性支撑和阻尼耗能相结合的方式,将机械振动转化为热能,从而减少机器晃动和噪音^[8]。PNC 技术具有可靠性高、维护简单、成本相对较低等优势,是噪声控制工程中最基础和最广泛应用的技术手段。

1.2.2 主动降噪

主动噪音控制(active noise control, ANC)技术是基于声波干涉原理的实时噪声抑制方法,其核心是通过产生与目标噪声相位相反、幅值相等的“反相声波”实现破坏性干涉。ANC 系统的关键组件包括:声学传感器阵列(参考麦克风和误差麦克)、实时处理单元和次级声源布局(扬声器)。ANC 因为其卓越的适用性和优秀的低频段降噪能力而成为热门的研究课题,除在汽车、耳机有成熟应用外,目前在家用油烟机机上已有成功应用^[9]。在医院环境中,通过天花板嵌入 ANC 单元,降低公共服务设备的运行噪声,助力患者康复^[10]。虽然 ANC 解决了低频噪声的难题,但高频噪声抑制不足(需与被动技术结合)、硬件成本高、多场景自适应延迟等问题限制了其大规模应用。

1.3 声品质优化

声品质(sound quality, SQ)技术是指通过心理声学模型和信号处理方法,对声音进行主观感知优化和客观参数控制的跨学科技术。该技术超越分贝限制,重构声景舒适度^[11]。其关键技术包括声景设计、声学参数解析,以及多维度声品质评价体系的建立。当前在家电冰箱、空调室内机等声压级很低的产品上已经建立了多维度的声品质评价体系^[12],通过基于人耳感知特性的评价体系筛选出声学瑕疵的产品,避免影响用户体验。声品质技术近年来受到多个行业的关注,但仍面临评价的准确性、复杂声环境的建模以及实时性要求等局限。

2 设备低噪声前沿进展

源头防控、路径降噪及声品质优化构成了噪声控制的基本体系,但仍面临显著瓶颈:噪声源多样性与

复杂性,被动技术难克低频,主动技术在复杂声场中成本高昂且易失稳,声品质优化则受制于主观体验量化等难题。为突破设备向更低噪声发展,前沿技术成为关键突破方向。

2.1 声学超材料

声学超材料是一类通过人工精确设计的周期性或非周期性几何结构单元构成的微结构,利用声子带隙、局域共振、超表面相位调控等机制实现声波超常调控。声学超结构能够突破经典的质量作用定律,实现“轻质低频”吸声效果。传统吸声材料厚度与降噪效果成正比,而超结构在不增加质量的情况下实现优异低频吸声(低频吸声系数可达 0.95)^[13]。声学超材料的优异特性:可精确针对特定低频噪声源进行优化(频率靶向)、相比传统厚重的隔声结构显著减小体积和质量(轻薄)、实现传统材料难以达到的声学功能(多功能)^[14],为设备的振动噪声控制提供了全新的技术手段,国内外学者展开了大量研究,提出了多种类型的声学超材料结构,以 Helmholtz 共振型超材料(图 1(a))、薄膜型超材料(图 1(b))为典型代表。

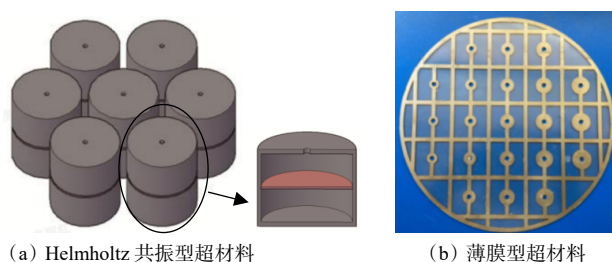


图 1 声学超材料

Helmholtz 共振型超材料通过周期性排列的弹性散射体,形成禁止特定频率声波传播的带隙^[15],带隙产生机理主要有 Bragg 散射原理^[16]和局域共振原理, Bragg 散射原理是一种波动(例如声波、电子波等)在周期性结构(例如晶体)中发生相干散射的现象,而局域共振机理主要是靠单个晶格(Helmholtz 共振腔)的共振来消耗声能量。Helmholtz 共振腔阵列的腔体几何参数和阵列方式均会影响声学超材料的带隙位置,单个 Helmholtz 共振腔的腔体体积、几何形状以及短管的几何形状与布置位置等影响共振腔的共振频率和吸声性能。如图 1(a)所示的超材料结构,在 280 和 350 Hz 低频段内传递损失提高约 20 dB^[17]。

薄膜型声学超材料^[18]可以看成是一个“质量-弹簧”

系统,薄膜相当于“弹簧”,附加在薄膜上的质量块相当于“质量”,刚性框架用于固定施加了预紧力的薄膜。当“质量-弹簧”系统受弹性波作用时,系统将在谐振力作用下做简谐振动。

当质量块附近的薄膜振动位移与其余四周处的薄膜振动位移反相时,整个薄膜的平均振动位移约等于 0,此时引起的声透射量几乎为 0,此时的频率即为薄膜型声学超材料隔声时的工作频率;薄膜型声学超材料隔声性能影响较大的参数分别是薄膜厚度、质量块质量和薄膜预应力,随着薄膜厚度或薄膜预应力的增加,超材料单元的有效隔声频率范围变宽;改变质量块质量,可以在某些频率范围内改变传声损失峰值及其所对应的频率。图 2 所示为薄膜型声学超材料在冰箱上的应用,总声压级比原始结构降低 3.8 dB(A),在最大峰值 800 Hz 频带,声压级降低 10 dB(A)。

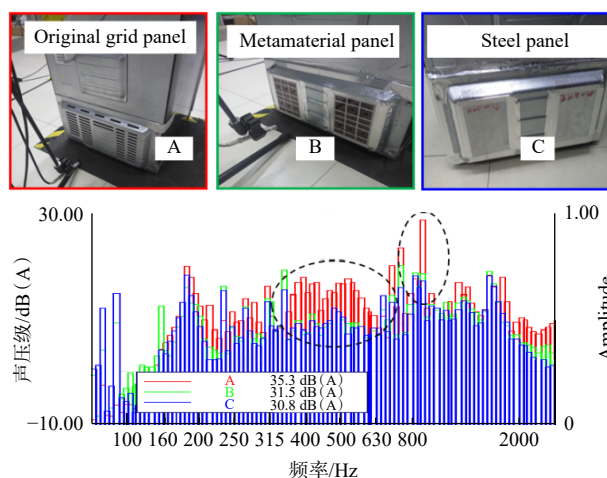


图 2 薄膜型声学超材料的应用

2.2 声学黑洞

在研究楔形薄板结构声波调控时发现,当结构的厚度按照一定的幂指数减小时,弯曲波的波速随着厚度的减小而减小,在理想情况下,波速可减小为 0,此时声波不再反射,这种结构称为声学黑洞(acoustic black hole, ABH)^[19],如图 3 所示。ABH 结构主要是通过薄板结构厚度的改变,在结构局部区域实现波的聚集和操控。相较于声子晶体和声学超材料,声学黑洞结构具有耗能效率高、宽频减振等特点。因此在减振降噪领域具备广阔的应用前景。

一维 ABH 结构厚度变化 $h(x)$ 满足 $h(x) = \varepsilon x^m$, $m \geq 2$ (ε : 截面变化系数, m : 幂指数),如图 4 所示,当

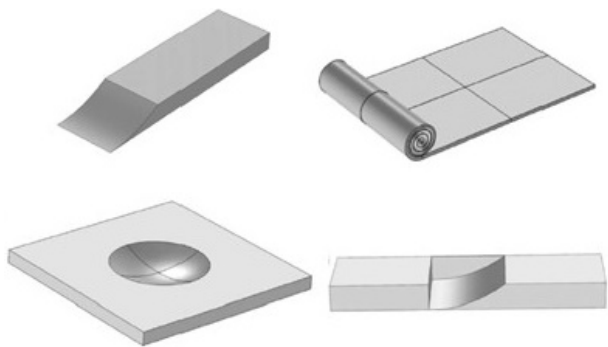


图3 声学黑洞结构

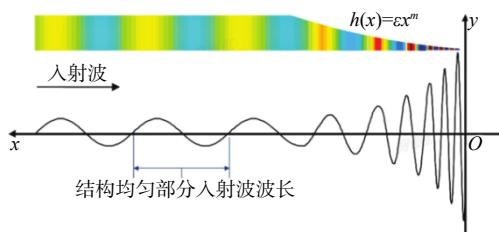


图4 一维 ABH 结构

弯曲入射波由均匀部分传播到声学黑洞部分时,波长被压缩,波动幅值逐渐增大^[20]。当厚度逐渐减小至0,弯曲波传播到靠近声学黑洞楔形边缘时,累积相位将会达到无穷大,理论上,弯曲波将无法到达结构的边缘,从而也就无法从边缘反射回来。但在实际应用中,受到制造工艺的限制,理想 ABH 在实际结构中难以实现,往往会在结构厚度减小到一定值时截断,这将使得反射系数明显增大,严重影响声学黑洞效应。研究表明,在截断的一维声学黑洞结构的尖端附近粘贴很少的阻尼材料,即可很好地降低由截断引起的反射系数。在声学黑洞中,截止频率是指该结构能够有效实现波导和能量聚集的最低频率:

$$f_{\text{cut-on}} = \frac{4\pi h_b}{L_{\text{ABH}}^2} \sqrt{\frac{E_b}{12\rho_b}}$$

式中, h_b 为 ABH 厚度, L_{ABH} 为 ABH 长度, E_b 为材料弹性模量, ρ_b 为材料密度。

声学黑洞的结构参数、布置位置和阻尼层的厚度与面积对减振降噪效果起关键的作用。

图5为二维声学黑洞结构吸振器在船用隔膜真空泵的应用^[21],加速度级在315~8000 Hz 频率范围内,加速度级明显降低;真空泵底板的安装脚振动加速度级在10~315 Hz 减小了2.1 dB,在>315~8000 Hz 减小了3.0 dB。声学黑洞技术核心价值在于通过“结构替代材料”的思路实现轻量化减振。未来的发展需要

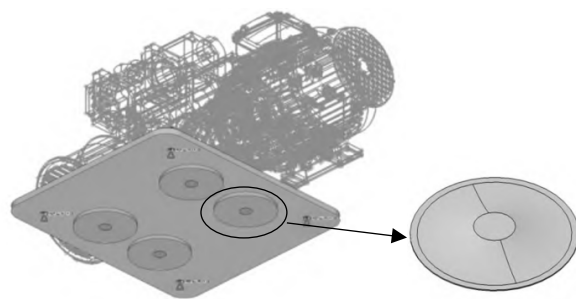


图5 声学黑洞应用

深入探索声学黑洞全频段减振机制,通过结合局域共振型声学超材料的低频共振优势与声学黑洞效应,实现全频段高效减振降噪。

2.3 准零刚度隔振器

准零刚度隔振器^[22]核心思想是通过非线性弹性元件的巧妙设计,在平衡位置形成刚度趋近于0的非线性特性,可将系统固有频率降至0.1~5.0 Hz,突破传统线性隔振器的低频隔振瓶颈(传统隔振器固有频率 ≥ 10 Hz)。准零刚度隔振器的刚度曲线如图6所示,在承载力为隔振物体的重力时,准零刚度隔振器在动刚度区微小范围内达到静力平衡,在平衡区间力 F 和位移 x 的比值为动刚度($k \approx 0$),其余范围比值为静刚度($k > 0$)^[23]。由图6所示的刚度曲线可以看出,准零刚度隔振器属于非线性系统,刚度随着位移产生变化并具有高静低动的特性;高静态刚度可以使结构在静力作用下保持足够的承载能力,避免系统产生大位移,从而降低主体结构倾覆的可能性,同时低动态刚度可有效隔离低频振动,提高系统的隔振性能。因此,准零刚度系统可以很好地克服传统线性隔振系统稳定性和隔振性能之间的矛盾。

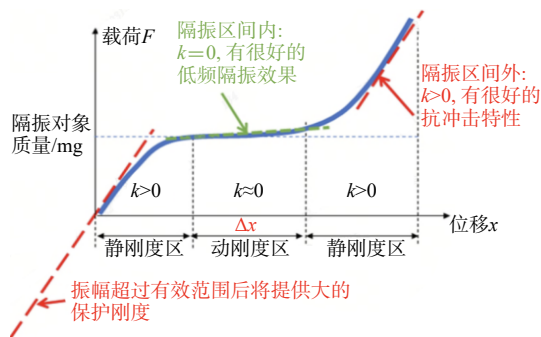


图6 准零刚度隔振器刚度曲线

图7是家电领域研究的一种压缩机准零刚度脚垫,利用杆状结构失稳和限位原理,通过控制受压状



图7 准零刚度隔振器

态非连续薄壁壳结构失稳以及设置限位柱实现。实验结果证明：与原始脚垫相比具有良好的低频隔振性能。这类隔振器受到了国内外很多学者的关注，近年来，准零刚度隔振器的研究主要集中在2个方向：一是对于自适应型隔振器结构或主动控制方面的拓展研究；二是在原本各种准零隔振器结构的基础上，进行多方向多自由度隔振平台的设计。新材料和仿生结构的运用为准零刚度隔振系统的设计提供了源源不断的多样性，例如形状记忆合金、磁流变液和压电晶体等。此类创新结构可满足精密及微纳结构的高精度隔振需求，将成为未来振动控制领域的重要课题之一。

2.4 空气动力仿生技术

空气动力学声学是研究气流与声波相互作用的交叉学科，主要关注由流体运动产生的噪声及其传播机制。主要噪声包括：湍流噪声—高速流体中涡旋的破碎和相互作用产生宽频噪声，涡脱落噪声—流体绕过钝体（例如圆柱、车辆）时周期性涡脱落导致单频噪声，边界层噪声—表面湍流边界层压力脉动引起的噪声。随着技术的不断发展和进步，许多研究者从生物界获得灵感，通过研究天空中静音飞行的鸟类、水中游动的鱼类，获取有利于改善流体流动性能和降噪的特征元素，从而控制噪声。

空气动力仿生降噪优化设计过程：（1）从生物界中选取生物在进化过程中形成的静音飞行特征或者有利于流体流动的特征作为研究对象；（2）对所选取的生物原型加以研究并数字化；（3）进行简化，保留有利于流体流动性能研究和降噪方面的内容；（4）采用三维扫描或者逆向工程的方法获取一个生物形态模型，构建数学仿生模型。例如，猫头鹰翅膀的锯齿状

尾缘是其实现静音飞行的关键生物力学特征之一^[24]，其降噪机理包括：涡流调控——将大尺度涡流破碎为小尺度涡，降低涡脱落相干性，分散声能至更高频段；湍流边界层控制——锯齿结构干扰边界层中的湍流压力脉动，减少尾缘处声辐射效率。这一结构为仿生降噪技术提供了重要灵感。空调室外机普遍采用仿生翼型风扇（图8），将风噪降低3~5 dB(A)，同时风量提升5%~10%^[25]。



图8 仿猫头鹰锯齿尾缘设计

2.5 智能降噪技术

智能降噪(AI-ANC)技术融合了经典主动噪音控制、AI算法与环境感知系统，实现了声学系统的AI进化，其核心原理是双模协同机制：物理降噪层+AI增强层。与经典ANC相比，AI-ANC具备更多优势：（1）深度学习，通过AI算法智能识别和消除噪音；（2）自适应，根据环境变化自动调整降噪策略；（3）个性化，基于用户偏好定制降噪效果。AI-ANC正在从单一的音频设备扩展到生活的方方面面，通过与AI、物联网等技术的深度融合，为人们创造更加舒适、安静的生活和工作环境。

2.6 数字孪生驱动的声音品质正向设计

数字孪生(digital twin, DT)是物理实体(例如设备、产品或系统)的虚拟映射，通过实时数据同步和仿真技术实现对物理对象的动态监控、预测和优化^[26]；声音品质指人对声音的主观感知评价，涉及响度、音色、尖锐度、粗糙度等心理声学参数。数字孪生与声音品质的结合，旨在通过虚拟仿真与物理世界的实时交互，实现从“问题后优化”到“设计前预测”的转变，从而高效优化产品的声学体验^[27]。其核心理论框架包括以下3个环节。

1) 多域耦合建模: 多域耦合建模是 DT 技术实现高精度声品质优化的核心方法。物理域可建立高保真声学-结构-流体耦合仿真模型, 模拟产品在不同场景下的声学性能; 感知域集成心理声学模型, 将物理声压信号映射为人耳感知指标; 数据域实时采集物理样机的噪声数据, 修正数字孪生模型的参数偏差。

2) 闭环优化逻辑: 在虚拟环境中模拟不同设计方案的声学输出; 通过灵敏度分析, 识别影响声品质的关键参数, 指导设计迭代。

3) 实时交互机制: 实现物理样机与数字孪生的数据同步, 动态调整结构参数^[28]。

数字孪生驱动的声品质正向设计在虚拟环境中快速仿真不同结构、材料、工况下的声学响应, 避免物理样机重复迭代, 显著提升了传统噪声、振动与声振粗糙度(noise、vibration、harshness, NVH)开发的效率与精度; 通过这种技术构建声学设计规则库, 实现企业 Know-How 的数字化复用; 图 9 为 HEAD acoustics 公司利用数字孪生技术展示如何通过虚拟技术优化汽车座舱声学性能。HEAD acoustics 公司的数字孪生平台不仅能进行声学仿真, 还能将仿真数据与真实测试数据结合, 更快、更精确地优化 NVH 性能。



图 9 数字孪生声学座舱

3 发展方向

3.1 更精确更智能振动测试分析设备研发

实现设备低噪声设计需要应用各种振动噪声分析技术手段, 在该领域国外起步较早, LMS Test.Lab、B&K PULSE 系统等, 可开展结构模态试验、旋转机械分析、声学和环境试验、传递路径分析等振动噪声

全面分析, 已成熟应用于汽车、家电行业噪声控制。但在精度、动态范围、便携性、智能化等方面存在明显不足。未来需要通过技术创新(例如声纹识别等噪声溯源技术)、标准化建设和跨学科融合, 开发新一代高精度、智能化、微型化、网络化的测试设备, 以满足日益复杂的工程应用需求, 大大提高源头控制的有效性。

3.2 新技术的创新

新技术的创新应用将引领振动降噪水平出现跨越式提升, 其中包括机理创新、结构创新、材料创新、工艺创新在内的技术发展。目前声学超材料、仿生风机等国内外都已开展大量研究及成果, 这些新技术的落地应用必然会使降噪性能大幅超越传统设备。

3.3 基于数字孪生技术的声品质正向设计

建立噪声环境主客观评价方法, 使声环境质量与人民群众的主观感受逐步统一起来, 通过跨模态感知融合、智能化参数调优以及个性化声音适配, 大幅减少噪声投诉。国外在航空和汽车等领域已取得引领性发展, 可以预计, 国内设备的低噪声设计将向该方向快速发展。

3.4 AI 与降噪技术的深度融合

目前减振降噪技术已处于跨技术领域协同的成熟阶段, 如声学振动工程的协同实现声振耦合分析与控制; 材料科学与机械工程的协同实现新型减振降噪材料的开发; 电子技术与控制理论协同实现主动噪声控制。随着 AI 技术的发展, 以 ANC、声学超材料技术为本体的智能声频技术将能够对噪声进行更精确地靶向控制^[29], 形成更为综合、有效的噪声控制方案。

4 建议

中国在设备低噪声前沿技术研究创新领域虽已取得显著进展, 然而基础理论研究薄弱、核心器件依赖进口、标准体系滞后等问题仍需突破。(1) 在技术创新方面应强化基础理论研究, 包括设立“声学超材料”国家专项攻克低频控制, 建立覆盖南北方言的中国人听觉特征库以支撑声品质优化^[30]; (2) 在市场推广方面需完善认证体系并拓展应用场景, 推广“静音认证”标识体系(例如睡眠级 ≤ 30 dB(A)、舒适级 $\leq$

40 dB(A)), 以提升消费者认知, 同时打造典型示范工程, 如“宁静医院”工程旨在打造噪声 ≤ 35 dB(A)的医用级静音环境, “绿色小区”示范工程强制使用低噪设备, 并实施实时监测, 使公共服务设备噪声降低 30%; (3) 在政策保障方面应完善噪声控制标准体系^[31], 包括推动标准与国际接轨(参考 IEC60704)、完善测试方法、制定更严噪声限值引导升级、从评价噪声大小转向评价声品质并建立基于尖锐度和波动强度等心理声学参数的声品质标准、建立设备噪声全生命周期监管机制^[32]、推动智能降噪普及与创新(鼓励中低端产品普及轻量化 ANC, 并探索 AI 与声学深度融合), 以及推动绿色低碳设备消费(加大财政补贴力度, 鼓励购买低噪音、高能效绿色家电)。

5 结论

设备低噪声是“宁静中国”建设的核心支撑, 多技术融合是实现噪声治理的必要手段, 前沿技术是实现跨越式突破的关键。唯有通过强制性标准升级(例如对标欧盟限值)、技术创新(材料/结构降噪)、市场机制(健康分级)的三轨并进, 才能从源头削减噪声污染, 化解邻里矛盾, 实现“安静权”这一基本民生诉求。未来需通过“基础研究-技术转化-政策驱动”三位一体模式, 推动声学超材料等前沿技术的规模化应用, 完善噪声分级认证制度, 加强政策协同深化, 最终实现从单一设备降噪到城市声环境系统优化的跨越, 为建设宜居、宜业、宜游的“宁静中国”提供坚实保障。

参考文献 (References)

- [1] 明进武, 万军, 郭红伟. 基于TRIZ的无人豆浆机静音破壁技术研究[J]. 家电科技, 2022(增刊1): 50-56.
- [2] 张为民, 卢允庄. 降低双螺杆制冷压缩机噪声和振动的实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(2): 50-54.
- [3] Krause R, Friebe C, Kerscher M, et al. Investigations on noise sources on a contra-rotating axial fan with different modifications[C]//Clima 2019 REVHA 13th HVAC World Congress. Bucharest: ATOM, 2019: 02076.
- [4] 吴佳伟. 通风管道噪声的主被动复合控制[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [5] 邓玉平, 王振, 杜明龙, 等. 压缩机隔声罩吸声性能提升与验证[J]. 制冷与空调, 2022(6): 37-40.
- [6] 韩悦. 腔体消声器在喷流噪声控制中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [7] 杨立志. 空气压缩机隔振装置的设计优化[J]. 机械管理开发, 2024(10): 231-232, 247.
- [8] 吕艳芬, 许升, 彭秀文. 滚筒洗衣机用磁性变阻尼减震器及其控制方法[C]//2015年中国家用电器技术大会论文集. 合肥: 中国轻工业出版社, 2015: 625-629.
- [9] Swinbanks M A. The active control of sound propagation in long ducts[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 27(3): 411-436.
- [10] 王浩竹. 主动降噪技术在排风管道降噪装置设计中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(9): 392-393.
- [11] Heinrichs B M. Sound quality evaluation of interior vehicle noise using an efficient psychoacoustic method[J]. Process. of European Noise, 1998, 23(6): 376-387.
- [12] Heinrichs B M. Sound radiation and sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments[J]. Applied Acoustics, 2007, 68: 1118-1134.
- [13] Ma F, Huang M, Wu J. Ultrathin lightweight plate-type acoustic metamaterials with positive lumped coupling resonant[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(1): 015102.
- [14] Mei J, Ma G, Yang M, et al. Dark acoustic metamaterials as super absorbers for low-frequency sound[J]. Nature Communications, 2012, 3(1): 1-7.
- [15] Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [16] Xiao Y, Wen J. Broadband locally resonant beams containing multiple periodic arrays of attached resonators[J]. Physics Letters A, 2012, 376(16): 1384-1390.
- [17] 周榕, 吴卫国, 闻轶凡. 一种带薄膜结构的Helmholtz腔声学超材料[J]. 声学技术, 2017, 36(4): 297-302.
- [18] Langfeldt F, Kemsies H, Gleine W, et al. Perforated membrane-type acoustic metamaterials[J]. Physics Letters A, 2017, 381(16): 1457-1462.
- [19] Mironov M A. Propagation of flexural waves in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval[J]. Soviet Physics-Acoustics, 1988, 34: 318-319.
- [20] 季宏丽, 黄薇, 裘进浩, 等. 声学黑洞结构应用中的力学问题[J]. 力学进展, 2017, 47(10): 333-384.
- [21] 凌晨昊, 刘志恩, 夏婉扬. 基于声学黑洞结构的附加吸振器设计与开发[J]. 现代车用动力, 2023, 190(2): 6-10.
- [22] Gritchin, A P. Vibration protecting and measuring systems with quasi-zero-stiffness[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989: 7-21.
- [23] 刘琪, 李占龙, 王建梅, 等. 准零刚度低频隔振技术的研究进展[J]. 机械强度, 2021, 43(1): 17-26.

- [24] Ye X, Zheng N, Zhang R. Effect of serrated trailing-edge blades on aerodynamic noise of an axial fan[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(6): 2937–2948.
- [25] Chen K, Liu Q P, Liao G H, et al, Aerodynamic noise reduction of small axial fan using hush characteristics of eagle owl feather[J]. Journal of Jilin University, 2012, 42: 79–84.
- [26] Tao F, Qi Q. Make more digital twins[J]. Nature, 2019, 48(5): 490–491.
- [27] 刘文广. 数字孪生概念浅析[J]. 机械制造, 2023(10): 1–4.
- [28] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 141–144.
- [29] 袁旻恣, 王彦琴, 邵社刚, 等. 道路交通噪声控制技术研发进展[J]. 科技导报, 2024, 42(20): 85–94.
- [30] 毛跃辉. 复杂声学环境下语音空调语音降噪方法研究及应用[J]. 家电科技, 2021(A1): 91–95.
- [31] 魏志勇. 《噪声污染防治法》引领噪声与振动控制技术创新的思考[J]. 中国环保产业, 2022, 3: 21–23.
- [32] 毛玉如, 汪赞, 张建勋. 中国噪声自动监测的现状和发展[J]. 科技导报, 2024, 42(20): 23–31.

Low-noise technology in equipment contributes to the construction of a "Quiet China"

XIANG Hongying, XU Sheng, FANG Lihong, ZHAO Haixia, WANG Wei, SUN Xingpeng, CHU Dejian, LI Jian

Advanced Innovation Center, Qingdao Haier Intelligent Technology R & D Co., Ltd., Qingdao 266101, China

Abstract With the acceleration of urbanization, equipment noise pollution has become a core challenge in the management of social life noise. This review summarizes the governance pathways and noise reduction technologies for noise pollution from equipment. It identifies three major current challenges: passive noise reduction shows insufficient attenuation for low-frequency noise (<500 Hz) and significant weight increase; active noise cancellation (ANC) faces bottlenecks in high-frequency noise (>1 kHz) control, real-time computing power, and power consumption; sound quality optimization is constrained by individual differences in psychoacoustic parameters. Aiming at the above limitations, this paper proposes frontline technological breakthrough directions: low-frequency efficient sound absorption of acoustic metamaterials (sound absorption coefficient>0.95), noise reduction-efficiency synergy of aerodynamic bionic technology, and artificial intelligence-driven dynamic adaptation of intelligent noise reduction. It is recommended to build a soundscape ecology from physical silence to psychological tranquility through the integration of the three-chain "policy-technology-standard" to support the implementation of the "Quiet China" strategy.

Keywords equipment noise pollution; Quiet China; passive noise reduction; active noise cancellation (ANC); sound quality optimization ●



(责任编辑 徐丽娇)