

机械工程振动噪声形成机理与综合治理措施研究

王嘉誉

郑州大学机械与动力工程学院, 河南省郑州市, 450001;

摘要: 在机械系统持续运行中, 振动与噪声现象的加剧已成为工程实践与日常环境中不可忽视的突出问题, 对人员舒适度、设备持久性及生产安全均构成显著影响。本文系统剖析机械振动与噪声的形成机制, 进而探讨当前工程实践中可行的振动与噪声综合治理方法。结合若干典型行业案例, 阐明科学运用振动噪声控制策略, 能够显著抑制机械系统的振动幅度与声压级, 从而提升整机运行平稳性、延长服役寿命并改善环境友好性。研究对推动机械装备低振动低噪声设计与运维具有重要参考价值。

关键词: 机械系统; 振动抑制; 噪声治理; 减振降噪; 结构动力学

DOI: 10.64216/3080-1508.26.03.071

引言

机械工程作为工业生产和现代生活基础设施的核心组成部分, 其运行过程中伴生的振动与噪声问题, 已从早期的局部性工程困扰演变为关乎装备效能、环境合规与公共健康的全局性挑战。在高端制造、精密加工、交通运输及能源动力等关键领域, 即便是微米级的异常振动或数分贝的超标噪声, 都可能导致产品加工精度丧失、仪器测量失准、设备可靠性下降及使用寿命缩短。更为严峻的是, 振动与噪声能量通过结构传递和空气辐射, 不仅会诱发金属疲劳、紧固件松动、密封失效等一系列连锁故障, 增加非计划停机风险与维护成本, 还在宏观上构成了主要的工业环境污染源之一。与此同时, 随着全球对环境保护、绿色制造和可持续发展的要求日益严格, 各国法规对工业设备及产品的振动噪声排放限值不断收紧。这使得振动与噪声控制能力不再仅仅是衡量机械产品“好用”与否的辅助指标, 而已成为决定其能否进入市场、满足法规准入门槛的核心性能属性, 直接关联到企业的市场竞争力和品牌形象。因此, 超越传统的“事后治理”模式, 深入探究机械振动与噪声产生的多物理场耦合机理与复杂传播规律, 并系统性发展从源头抑制、路径阻断到智能监测的前沿控制技术, 对于推动我国装备制造业向高端化、智能化、绿色化转型升级具有至关重要的战略意义。这不仅是提升国产装备核心竞争力和可靠性的必然技术路径, 也是践行“以人为本”发展理念、建设健康生态环境和实现工业文明与自然和谐共生的关键工程实践。

1 机械系统振动与噪声的生成机制

1.1 机械系统振动的产生机理

机械振动源于系统内外多种激励力的耦合作用。在运转过程中, 内部因素如构件间的非均匀摩擦、间歇性冲击、质量分布不平衡等, 以及外部激励如地基波动、流体载荷等, 均可引发系统机械振动。振动源大致可分为: (1) 旋转电机或往复机构产生的惯性力与电磁力; (2) 流体经过叶片、阀门时引发的压力脉动与涡脱落; (3) 齿轮、轴承等接触副的啮合冲击与滚动振动; (4) 结构在特定频率下发生的共振响应。

根据动力学特征, 机械振动主要表现为自由振动、受迫振动及自激振动三类。自由振动常由初始扰动激发, 其幅值随时间因阻尼而衰减, 但在低阻尼系统中可能形成持续振荡; 受迫振动则由外部周期性激励主导, 其稳态响应频率与激励频率一致, 幅值受系统阻抗特性调制; 自激振动则源于系统内部能量反馈机制, 如摩擦引起的颤振、流体诱发的涡激振动等, 这类振动往往具有频率锁定与幅值自持特点。振动的频域成分复杂, 时域波形多样, 且常伴随非线性行为, 因此必须结合振源特性与传递路径进行针对性治理。

1.2 机械系统噪声的产生机理

机械噪声本质上是振动能量经由空气或结构媒介辐射而形成的可听声波, 其主要来源包括结构表面振动辐射声(结构声)以及气流、液流运动形成的气动噪声与液动噪声。按物理成因可划分为: (1) 空气动力噪声, 如风机、泵类设备中因湍流、旋转失稳产生的宽频噪声; (2) 机械结构噪声, 由齿轮、链传动等零件的冲击、摩擦振动通过壳体向外辐射; (3) 电磁噪声,

电机及变压器内交变磁场引起铁芯与绕组振动所发声波。

噪声传播路径主要包括空气传播与结构传播两类。空气传播为声波经空气介质直接辐射至接收点；结构传播则指振动通过设备底座、管道、支架等固体路径传递至远距离结构表面，再二次辐射形成噪声。依据频谱特征，噪声又可区分为低频(<300 Hz)、中频(300 - 1000 Hz)与高频(>1000 Hz)。低频噪声穿透力强、衰减慢，易引发建筑结构共振及人体不适；高频噪声则方向性强、易被吸收，但对人耳听力的潜在损伤更为直接。

2 振动与噪声控制的关键技术

2.1 振动控制技术

2.1.1 阻尼减振技术

阻尼减振技术是通过在机械系统中引入具有高耗能特性的阻尼材料或专用阻尼元件，将系统振动机械能转化为热能等其他形式能量进行耗散，从而实现振动抑制的技术途径。阻尼材料的性能通常以其损耗因子为衡量指标，该因子越高，表明其能量转换与耗散能力越强。在实际工程应用中，阻尼材料不仅可直接涂覆于振动部件表面形成约束层阻尼结构，也可预制或独立阻尼垫、阻尼夹层或复合隔振模块，安装在振动源与承载结构之间，以增强系统整体阻尼特性。此外，专用阻尼装置如粘滞阻尼器、调谐质量阻尼器(TMD)和摩擦耗能支撑等，通过提供与振动速度相关或具有特定非线性特征的阻尼力，可有效衰减系统共振幅值并拓宽减振频带。该技术不仅普遍应用于车辆、航空航天及轨道交通等动力机械领域，以改善乘坐舒适性与结构疲劳寿命，也在建筑抗震、风电塔筒振动控制及精密仪器隔振等方面发挥重要作用，是现代振动工程中基础且关键的一种被动控制方法。

2.1.2 结构优化设计

结构优化设计是从系统动力学特性出发，通过调整机械结构的拓扑形态、材料分布、截面尺寸及连接方式等设计变量，在满足约束条件下主动改善结构的刚度、质量与阻尼分布，从而提升其固有振动特性与抗振能力的设计方法。在概念设计阶段，即应重视振动传递路径的规划，例如采用柔性支承载代替刚性连接、设置振动隔离界面、合理布局加强筋与肋板等，以阻断或衰减振动能量传递。在材料选择方面，可选用具有高比刚度、高内阻特性的金属复合材料、高分子阻尼材料或智能材料，

从源头上增强结构的减振潜力。针对复杂机械系统，现代设计流程常依托有限元分析(FEA)、多体动力学仿真等数字化工具，建立参数化模型并进行模态分析、谐响应分析及随机振动分析。在此基础上，可进一步结合拓扑优化、形状优化与尺寸优化等多层次优化策略，在轻量化目标下寻求最佳动态性能设计方案，从而在结构设计源头实现振动控制的目标。

2.2 噪声控制关键技术

噪声控制技术主要围绕噪声产生与传播的物理过程，形成了从声源处理、传播路径阻断到接收端防护的完整技术体系。其核心策略可归纳为吸声、隔声与消声，三者常结合应用以实现最佳的综合降噪效果。

2.2.1 吸声处理技术

吸声技术旨在降低封闭或半封闭空间内的混响声能，其原理是利用多孔性、共振性或特殊结构的材料，将入射声能通过空气摩擦粘滞损耗转化为热能。多孔吸声材料(如离心玻璃棉、岩棉、聚酯纤维棉)依靠其内部丰富的相互连通微孔耗散声能，对中高频率噪声吸收效果显著；共振吸声结构(如穿孔板、微穿孔板、膜共振结构)则针对特定低频噪声设计，通过结构共振消耗声能。现代吸声材料与结构正向复合化、功能化发展，例如兼具吸声与装饰功能的木质穿孔板、布艺软包，以及适用于洁净环境的金属或陶瓷泡沫吸声体。在工业厂房、大型办公空间、设备机房等场所，通过在天花板、墙面铺设吸声材料或悬挂空间吸声体，可有效降低室内噪声级3-10 dB，改善语言清晰度与声学舒适性。该技术是噪声控制中处理反射声、优化听闻环境的基础手段。

2.2.2 隔声技术

隔声技术侧重于阻断噪声的传播路径，其核心原理是利用密实、厚重的材料或结构形成声学屏障，以反射大部分入射声能，从而减少噪声的透射。隔声性能遵循“质量定律”，即单位面积质量越大或结构双层间的空气层越厚，隔声量通常越高。常用隔声构件包括：

隔声罩/箱体用于封装单个噪声源设备(如电机、泵、齿轮箱)，采用钢板、铝板结合阻尼层和吸声内衬制成，可有效隔离设备辐射的空气噪声。隔声间/室为操作人员或精密仪器提供安静环境，由隔声墙板、隔声门窗及通风消声系统构成。隔声屏障用于开放或半开放空间(如厂区边界、高速公路旁)，通过声波的衍射衰减来降低特定区域的噪声。关键材料与构造包括高面密度隔音板、

复合阻尼隔声毡、密封性能优异的声学门窗及弹性密封胶条等。设计时需特别注意解决“声桥”、缝隙漏声等薄弱环节，确保隔声系统的整体有效性。

2.2.3 消声技术

消声技术是一种允许气流通过但同时能有效衰减气流噪声的专用技术，主要应用于各类通风、排气系统及动力设备的进、排气口。根据消声原理，主要分为：阻性消声器，内部装有多孔吸声材料，利用气流通道衬贴的吸声结构来消耗声能，对中高频宽带噪声有良好效果；抗性消声器，通过管道截面的突变或旁接共振腔，利用声阻抗失配引起的反射、干涉来消声，特别适用于低中频及有突出纯音成分的噪声控制；阻抗复合式消声器，结合阻性与抗性结构，可在宽频带范围内实现高消声量。消声器的设计需在满足声学性能的同时，兼顾空气动力学性能（压力损失）、结构强度及环境适应性。其广泛应用于风机、空压机、燃气轮机、柴油机排气以及空调通风管道系统，是控制空气动力学噪声最直接有效的手段之一。

3 典型应用案例

3.1 案例概况

某热电厂的循环冷却水系统配备有多台大型离心风机，其设备平台紧邻厂区西侧居民区，最近距离不足20米。根据国家《声环境质量标准》（GB 3096-2008）中的2类声环境功能区要求，该区域夜间噪声限值为50 dB(A)。然而，风机在额定工况下运行产生的空气动力学噪声及结构振动辐射噪声，使厂界测点噪声值高达78-82 dB(A)，严重超标，导致周边居民频繁投诉。为彻底解决此问题，并履行企业社会责任，决定对该风机群实施综合性、系统性的噪声与振动治理工程。

3.2 振动与噪声控制技术的应用

3.2.1 针对空气动力学噪声的消声与隔声治理

风机的进、排气口是主要的空气动力学噪声源，频谱呈宽频特性且含有明显的中低频成分。为此，技术方案采取了针对性措施：安装阻抗复合式消声器，在风机进风口和排风管道出口处，设计安装了定制的大型阻抗复合式消声器。该消声器前端采用抗性扩张室结构，针对低频噪声进行有效衰减；后端衬贴高性能离心玻璃棉吸声层，并覆盖穿孔护面板，以消除中高频噪声。单台消声器的设计消声量不低于25 dB(A)；设置可拆卸式隔

声罩，为隔绝风机机壳、电机等部件辐射的机械噪声，为每台风机设计了模块化可拆卸式隔声罩。隔声罩主体采用双层钢板复合结构，中间填充阻尼材料及吸声棉，内表面覆盖穿孔吸声板，整体隔声量不低于20 dB(A)。罩体设计考虑了设备的通风散热需求，配备了低噪声轴流风机及配套的消声通道。

3.2.2 针对结构传声与固体传振的治理

风机运行引发的振动通过基础与建筑结构传递，不仅产生二次辐射噪声，还可能影响结构安全。对此，采取了双重隔离措施：高效弹簧减振基座，将风机机组整体安装在大型钢结构惯性基座上，基座与建筑基础之间布置多组大阻尼弹簧隔振器。该设计有效隔离了中低频振动，减振效率超过85%，显著降低了振动向建筑结构的传递。管道柔性连接与隔振吊架，所有与风机连接的进、排风管道均采用高强度橡胶柔性接头进行软连接，切断振动沿管道的传递路径。同时，支撑管道的吊架全部更换为弹性隔振吊架，避免了“声桥”效应。

3.2.3 辅助设施与细节处理

为确保整体治理效果，对相关辅助设施进行了同步改造：冷却塔周边声屏障，在紧邻居民区一侧的厂界围墙处，增设了高度为5米的吸隔声复合型声屏障，屏障主体采用隔声板材，面向声源侧附加吸声结构，有效阻挡了噪声的远程直达传播。密封与阻尼处理，对隔声罩的所有拼接缝隙、检修门、电缆穿孔等部位采用专用密封条和密封胶进行严格密封。同时对部分振动较大的管道外壁涂抹约束层阻尼材料，抑制其共振发声。

3.3 应用效果

综合治理工程竣工后，经有资质的第三方检测机构在不同工况下进行连续监测。结果表明，厂界西侧敏感点夜间噪声值稳定降至45 dB(A)以下，完全满足《声环境质量标准》要求，且昼间噪声也大幅改善。治理工程成功解决了长期困扰企业与居民的噪声污染问题，取得了显著的社会效益与环境效益，为同类高噪声工业设备的厂界噪声治理提供了可复用的系统解决方案。

4 结语

机械系统的振动与噪声问题作为影响装备性能、环境友好性与人员健康的关键因素，其有效控制已成为现代机械工程领域不可或缺的核心环节。本文系统剖析了振动与噪声的内在产生与传播机制，并着重论述了以阻尼减振、结构优化为主的振动抑制技术，以及涵盖吸声、

隔声与消声的噪声综合治理策略。这些技术并非孤立存在,实践中常需依据“源—径—接收者”的系统模型进行协同设计与集成应用,如典型工程案例所示,方能实现标本兼治的理想效果。当前,振动与噪声控制技术正朝着深度集成化、主动智能化及材料与结构功能一体化的方向迅速发展。新型智能材料(如压电材料、形状记忆合金)、自适应有源控制技术、基于数字孪生的预测性维护以及超结构/声学超材料等前沿研究,正在不断突破传统被动控制的性能边界。未来,振动与噪声控制领域正处在从被动应对到主动智能、从局部改进到系统融合、从传统材料到新构型的深刻变革期。克服上述挑战,把握技术趋势,将推动该领域从“辅助性”技术转变为提升装备核心竞争力的“赋能性”技术,为下一代安静、精密、可靠的机械系统奠定基础,成为实现装备高端化、绿色化与智能化的重要支撑技术,为构建更加安静、高效、可持续的工业环境与社会生活提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1]冯浩. 矿山智能化技术在机械工程自动化中的应用研究[J]. 世界有色金属, 2022(09): 16-18.
- [2]杨鼎屹. 电气工程自动化的智能化技术应用与研究[J]. 科学咨询(科技·管理), 2020(04): 77.
- [3]薛春生. 信息化背景下煤矿智能化建设的探索与实践[J]. 当代化工研究, 2022(13): 186-188.
- [4]范丽君, 陈冠, 袁辉, 等. 基于声阵列的电力设备强干扰噪声源识别系统设计. 电子设计工程, 2024, 32(5): 70-74.
- [5]赵君成, 覃启铭, 张志富, 等. 基于声成像技术的变电站电力设备噪声源识别技术研究[J]. 电气技术与经济, 2023(8): 90-92.
- [6]甄帅, 李基芳, 刘海, 等. 基于 EEMD-AESSAICA 的电驱动单通道噪声源分离识别[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 157-163.