

机械工程中的振动与噪声控制技术

安百利

一工机器人银川有限公司 宁夏 银川 750000

摘要: 机械振动与噪声影响设备性能及环境质量。本文阐述其基础理论,包括振动分类、噪声产生传播及二者关系。介绍测量分析技术,如振动、噪声测量及模态分析。探讨振动与噪声控制的基本方法策略,涵盖消振、隔振等技术。还介绍智能控制技术与新型材料应用。通过系统研究,为机械工程领域振动与噪声控制提供理论支撑与实践指导,助力提升设备稳定性与环境舒适度。

关键词: 机械工程; 振动与噪声; 测量分析; 控制技术; 新型材料

引言: 在机械工程领域,机械振动与噪声问题普遍存在。机械振动不仅影响设备自身性能,降低运行精度与可靠性,缩短使用寿命;机械噪声还会对工作环境造成干扰,损害人员身心健康。随着机械工程向高精度、高性能方向发展,对振动与噪声控制的要求日益严苛。深入探究机械振动与噪声的基础理论、测量分析技术以及控制方法策略,并关注先进技术与新型材料应用,成为提升机械工程整体水平的关键所在。

1 机械振动与噪声的基础理论

1.1 机械振动的基本概念与分类

(1) 定义与物理本质。机械振动是力学系统普遍存在的运动形式,其定义为物体或系统在平衡位置附近所做的往复性运动。从力学本质来看,这种运动源于系统内部弹性力与惯性力的动态平衡被打破,外力扰动使系统偏离平衡位置后,弹性力产生回复效应,惯性力则维持运动延续,二者交替转化形成周期性往复^[1]。弹簧振子的运动便是典型例证,外力使弹簧形变后,弹性力与惯性力的相互作用推动物体在平衡位置两侧持续运动。

(2) 分类方式及特点。按振动自由度划分,单自由度振动可通过单个广义坐标确定位置,如钟摆运动;多自由度振动需多个坐标描述,常见于复杂机械结构。按激励性质分类,自由振动由初始能量激发,频率仅与系统质量刚度相关,阻尼存在时振幅逐渐衰减;受迫振动依赖外界持续激励,频率与激励频率一致,幅值受系统特性与激励参数影响;自激振动则由系统内部摩擦或非线形反馈维持,频率接近固有频率。按振动规律区分,线性振动可用常系数线性微分方程描述,满足叠加原理;非线性振动则因力与位移非正比关系,固有频率随振幅变化。

1.2 机械噪声的产生机理与传播特性

(1) 噪声源分类与产生机理。机械噪声核心来源包

括三类。结构振动辐射噪声由零部件撞击摩擦引发,齿轮啮合的碰撞、轴承的摩擦均会激发结构固有振动并向外辐射声波,材料刚度与结构形状直接影响噪声频率。空气动力性噪声源于流体扰动,气流分离形成的涡流或压力突变会引发空气振动,风机叶片旋转产生的噪声即属此类。电磁噪声则因电磁场交变导致部件振动,电机运行中定转子磁场相互作用常引发这类噪声。(2) 噪声的传播方式与衰减规律。噪声在空气介质中以声波形式传播,呈现直达声直接辐射、反射声经障碍物反弹、衍射声绕射传播等方式。在固体中则通过弹性波传递,传播速度显著高于空气。衰减过程中,距离衰减表现为声能随传播距离扩散而降低;屏障衰减依靠障碍物阻挡声波传播,材质密度越大效果越优;吸收衰减则通过多孔材料消耗声能,将声波振动转化为热能散失。

1.3 振动与噪声的相互关系

振动与噪声存在紧密耦合关系。机械振动是噪声的主要激发源,结构振动使周围介质产生疏密变化,进而形成声波辐射。而噪声作用于机械结构时,会通过声波入射传递能量,可能引发结构共振或加剧原有振动。这种相互作用决定了振动与噪声控制需统筹考量,仅控制单一环节难以达到理想效果,需从振动源抑制、传播路径阻隔等多维度制定方案。

2 振动与噪声的测量与分析技术

2.1 振动测量技术

(1) 测量仪器与传感器。振动测量中,振动仪可直接获取加速度等参数,频谱分析仪则将时域信号转化为频域信息以识别特征频率^[2]。传感器是核心部件,加速度传感器基于压电效应,受振时压电材料产生电荷输出,灵敏度高适合高频测量;速度传感器依靠电磁感应原理,线圈切割磁场产生与速度成正比的电压,稳定性好用于中低频场景;位移传感器通过电容或电感变化

感知位置变动,精度优异适用于微小位移测量。不同场景对传感器选择差异显著,旋转机械振动测量多采用加速度传感器,而精密机床定位误差检测常选用位移传感器。(2)测量方法与信号处理。接触式测量通过传感器与被测体刚性连接实现,测量结果准确但可能干扰被测系统;非接触式测量如激光多普勒法,无需物理接触,适合高速或易变形构件。信号处理中,时域分析通过峰值、均值等参数反映振动强度;频域分析借助傅里叶变换将信号分解为不同频率分量,明确主导频率;时频分析针对非平稳信号,短时傅里叶变换通过滑动窗捕捉频率随时间的变化,小波变换则兼具时域和频域局部化优势,在冲击振动分析中应用广泛。

2.2 噪声测量技术

(1)测量仪器与设备。声级计通过传声器将声压转化为电信号,经放大滤波后显示声级数值,普通型用于环境噪声普查,精密型适用于实验室校准。声强计通过双传声器测量声压梯度计算声强,可定位噪声源;声功率计则通过测量声压或声强推导声功率。传声器作为前端部件,电容传声器频响宽、精度高,是精密测量的首选;声校准器用于仪器定期校准,保证测量数据可靠。高噪声工业现场需选用高量程仪器,而声学实验室测量则对仪器精度要求严苛。(2)测量方法与评价标准。声压级测量是基础方法,通过声级计在指定测点获取数据;声强测量可直接确定噪声源贡献量;声功率测量需在标准环境下通过多点测量计算。评价方面,NR曲线和NC曲线分别用于评估环境噪声和室内噪声对人的干扰;等效连续A声级反映一段时间内噪声的平均强度,是环境噪声评价的核心指标;统计声级则用于描述噪声的波动特性。不同场合限值标准不同,工业企业厂界噪声白天限值通常低于65分贝,居民区夜间限值则需低于50分贝。

2.3 振动与噪声的模态分析技术

(1)模态分析原理与方法。模态分析基于结构动力学理论,通过识别固有频率、阻尼比、振型等参数揭示结构动态特性。实验模态分析通过对结构施加激励,采集响应信号后运用模态参数识别算法获取结果,步骤包括试验设计、数据采集、参数识别;计算模态分析则借助有限元法建立模型进行数值仿真^[3]。参数识别常用频域法和时域法,频域法通过频响函数峰值定位固有频率,时域法则利用自由衰减信号识别参数,测量误差主要来源于激励方式和传感器布置。(2)模态分析在振动与噪声控制中的应用。模态分析可明确结构薄弱环节,通过优化结构刚度避免共振;在故障诊断中,模态参数变化能反映部件劣化程度,如轴承磨损会导致固有频率偏

移。振动噪声控制中,通过模态分析确定关键频率后,可采用阻尼材料敷设或结构修改等方式针对性抑制振动,减少噪声辐射。汽车车身模态分析便是典型应用,通过优化车身结构模态分布,有效降低行驶过程中的振动噪声。

3 振动与噪声控制的基本方法与策略

3.1 振动控制方法

(1)消振技术。消振核心是结构优化或参数调整切断振动激励源。机械设计常用模态分析确定共振频率,优化构件刚度分布避共振。如汽轮机叶片调整榫接结构减气流激振,往复机械借平衡配重抵消惯性力。消振装置如动力消振器可削弱特定频率激励,从源头抑制振动,在精密机床主轴设计等场景降振动幅值超50%。

(2)隔振技术。隔振靠弹性元件阻隔振动传递,被动隔振用弹簧阻尼系统衰减振动,适用于风机水泵等;主动隔振结合作动器实时调节,多用于精密仪器防护。隔振元件选型匹配设备重量与频率,钢弹簧适合低频,橡胶阻尼器中高频更优。系统设计经参数计算、仿真与测试,以振动传递率为核心指标,工业合格设计使传递率低于0.2。(3)吸振技术。吸振通过附加吸振器吸收特定频率振动能量,动力吸振器利用共振转移主系统能量,阻尼吸振器靠阻尼耗能。这类装置对窄频振动控制显著,如桥梁用调谐质量吸振器削弱风致振动。设计时通过频率匹配确定参数,结合模型优化质量与刚度,降低目标频率振动幅值。(4)阻振技术。阻振依托阻尼材料转化振动能量为热能,金属阻尼结构靠塑性变形耗能,高分子阻尼材料在动态应力下产生粘弹损耗。船舶舱壁用阻尼涂层抑制振动传播,汽车底盘通过阻尼结构降振动。施工中保证阻尼层与基体紧密结合,依振动频率选阻尼材料,通过损耗因子测试验证阻振效果。

3.2 噪声控制方法

(1)声源控制技术。声源控制是噪声治理的根本手段,机械设计中采用圆弧齿轮替代直齿轮可降低啮合噪声,电机设计通过优化气隙结构减少电磁噪声。低噪声工艺如激光切割替代机械切削能显著降低噪声辐射^[4]。实施需经噪声源识别、方案设计与原型验证,确保在满足性能要求的同时实现噪声控制目标。(2)传播途径控制技术。吸声技术利用多孔材料耗散声能,隔声结构通过质量定律削弱声能传递,消声器则结合抗性与阻性原理抑制气流噪声。工厂车间常采用吸声吊顶与隔声墙体组合方案,风机出口安装消声器可使噪声降低20分贝以上。效果评估通过测量声压级衰减量实现,综合设计需结合噪声频谱特性匹配控制措施。(3)受声点防护技

术。受声点防护依赖个人防护装备阻隔声能，耳塞适合高频噪声环境，耳罩则在中低频防护中更具优势。这类措施在无法实施声源或传播途径控制时尤为必要，但长期使用需关注舒适度与防护性能衰减。选型需依据噪声频谱与作业环境，定期检测装备隔声量确保防护效果。

4 先进振动与噪声控制技术及新型材料应用

4.1 智能振动与噪声控制技术

(1) 智能控制原理与算法。智能振动与噪声控制以动态系统特性辨识为核心，实时感知外部激励与结构响应实现自适应调节。自适应控制算法依托递推最小二乘法等参数辨识，可动态修正策略，适用于激励频率时变的工业场景。主动控制算法通过次级声源或作动器输出抵消信号，在低频振动噪声控制中表现突出，常见于航空航天设备减振。半主动控制调节阻尼或刚度参数优化效果，兼具主动控制的适应性与被动控制的可靠性，在建筑结构抗振领域应用广泛。这类算法突破被动控制频率局限，但复杂工况下实时性与鲁棒性待提升，算法与硬件算力匹配问题亟待解决。(2) 智能控制系统的组成与实现。智能控制系统由感知、决策、执行三大模块构成。传感器选用高精度加速度计与声级计，确保精准采集振动位移与声压信号；控制器多采用嵌入式处理器，结合实时操作系统保障数据处理效率；执行器根据场景选用压电作动器或磁流变减振器等。硬件选型依据控制精度与环境适应性，如高温环境优先采用陶瓷基传感器。软件设计以模块化思想构建，包含信号滤波、算法求解等功能模块。系统实现经离线仿真与在线调试，通过阶跃响应测试验证效果，采用梯度下降法优化参数提升稳定性。

4.2 新型材料在振动与噪声控制中的应用

(1) 高性能阻尼材料。高分子阻尼材料凭借玻璃化转变区的高损耗因子，在汽车内饰领域实现宽频减振；金属阻尼材料通过金属基体的塑性变形耗散能量，适用于工程机械的结构减振；复合阻尼材料结合基体与填料的协同作用，如碳纤维增强树脂基复合材料，在轨道交

通车体中可降低结构振动30%以上。这类材料的优势在于轻量化与阻尼性能可调，通过材料配方优化可实现特定频率的靶向控制^[5]。未来发展方向集中在极端环境适应性改良，如耐高低温阻尼材料的研发，以及阻尼性能与结构强度的协同提升。(2) 吸声与隔声新材料。纳米吸声材料通过纳米孔道的粘滞摩擦作用耗散声能，多孔吸声材料则依托孔隙结构的空气柱共振实现吸声，两者在建筑声学领域配合使用可提升中高频吸声系数至0.8以上。复合隔声材料采用金属薄板与阻尼层复合结构，通过阻抗失配削弱声能传递，新型隔声屏障则结合声学超材料设计，实现低频隔声性能突破。这类材料在城市轨道交通噪声控制中应用效果显著，可使沿线噪声降低15分贝以上。发展方向聚焦于超薄化设计与环保性能提升，生物基吸声材料的研发成为当前研究热点。

结束语

机械工程中的振动与噪声控制技术对保障机械系统稳定运行、改善工作环境意义重大。通过掌握振动与噪声的基础理论，运用科学的测量分析技术，可精准定位问题根源。采用多种基本控制方法与策略，能有效降低振动与噪声水平。智能控制技术与新型材料的应用，为解决复杂工况下的振动与噪声问题提供了新途径。不断优化和完善这些技术，将进一步提升机械工程的质量与效益，推动行业持续健康发展。

参考文献

- [1]李龙,温毅,康文凯,等.现代机械设计中减振降噪技术的运用[J].现代制造技术与装备,2023,59(6):138-140.
- [2]张伟.机械工程中的振动与噪声控制技术研究[J].机械工程学报,2022,58(10):1-10.
- [3]李明刚.机械设备振动噪声的主动控制技术研究[J].噪声与振动控制,2021,41(2):89-93.
- [4]王磊涛.混合控制在振动与噪声控制中的应用研究[J].振动工程学报,2023,36(1):15-22.
- [5]赵一鸣,徐进.机械设备噪声对人体健康的影响及防护措施[J].劳动保护,2023(3):45-48.