

Research on Root Cause Identification and Structural Optimization Solution of Engine Noise Fault

Zhan Shen Haichao Pan Na Wei

Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

Engine noise is a critical factor affecting the NVH performance and user experience of vehicles. With the development of lightweight and complex powertrain systems, noise issues have become multi-source and high-frequency. This paper analyzes the formation types, propagation paths, and structural coupling patterns of engine noise based on acoustic mechanisms, proposing an integrated diagnostic method that combines signal identification with structural optimization. By employing vibration signal analysis, short-time Fourier transform (STFT), and wavelet packet decomposition for sound source localization, combined with finite element simulations and experimental validation for modal optimization and material improvement, the results demonstrate that this method can accurately identify typical noise sources such as piston pin knock and valve train impact, reducing noise by approximately 28% and improving fatigue life by 16%. This provides an effective technical pathway for engine NVH performance optimization.

Keywords

engine noise; root cause identification; structural optimization; acoustic vibration characteristics; NVH performance

发动机异响故障根源识别及结构优化解决方案研究

申展 潘海朝 魏娜

长城汽车股份有限公司, 中国·河北 保定 071000

摘要

发动机异响是影响整车NVH性能与用户体验的重要因素。随着动力系统轻量化与复杂化发展, 异响问题呈多源化与高频化特征。本文基于声学机理, 分析异响的形成类型、传播路径与结构耦合规律, 提出信号识别与结构优化相结合的综合诊断方法。利用振动信号分析、短时傅里叶变换(STFT)与小波包分解实现声源定位, 并结合有限元仿真与实验验证进行模态优化与材料改进。结果表明, 该方法可准确识别活塞销敲击、配气冲击等典型异响源, 噪声降低约28%, 疲劳寿命提升16%, 为发动机NVH性能优化提供了有效技术路径。

关键词

发动机异响; 根源识别; 结构优化; 声振特性; NVH性能

1 引言

发动机异响是整车开发中最复杂的振动噪声问题之一, 涵盖燃烧冲击、机械摩擦、结构共振及装配缺陷等多种因素。异响不仅降低车辆舒适性, 还可能预示潜在机械故障, 对系统可靠性与寿命构成威胁。随着高压缩比、直喷燃烧及轻量化材料的广泛应用, 发动机振动激励显著增强, 结构件间的耦合复杂度提高, 使传统的经验排查与声学试验手段难以实现精确定位与定量分析。近年来, 基于信号特征与结构建模的综合诊断方法逐渐成为研究热点。通过声学信号时频特征提取与三维结构动力学建模相结合, 可实现从故障识别到结构优化的闭环控制。然而, 当前研究仍存在两个突出问题:

一是声学信号特征与结构动态参数之间缺乏有效映射, 二是缺乏跨域协同的优化策略。本文在系统分析发动机异响成因的基础上, 构建多源信号融合与有限元耦合的识别模型, 并提出针对关键部件的结构优化方案, 旨在实现从“声学识别—结构修正—性能验证”的系统化工程方法。

2 发动机异响的机理分析与分类研究

2.1 异响的声学机理与传播路径

发动机异响的形成源于声、振动与结构动态响应之间的耦合效应, 其本质为局部激励能量通过结构与空气介质的非线性传播过程。主要机理包括冲击激励、摩擦滑移与气体脉动三类。燃烧室中的高频压力波由爆燃产生, 经缸体、缸盖及支承结构传播, 引发典型的燃烧敲击声; 机械部件如活塞、连杆及凸轮机构在运动间隙变化时产生冲击激励, 形成周期性机械噪声; 而摩擦滑移则导致宽频能量扩散。声能传播路径主要包括固体传声与空气辐射两种形式。前者通过结

【作者简介】申展(1990—), 男, 本科, 工程师, 从事发动机开发及质量问题解决研究。

构节点及连接件传导，后者由结构表面辐射至外部空气。材料刚度、阻尼特性及装配紧度直接影响振动能量的传递效率与辐射特性，因此控制结构路径的声能流动是异响治理的关键技术手段。

2.2 二典型异响类型与特征频段

发动机异响可按声源特征分为燃烧类、机械类与装配类三大类型。燃烧类异响主要包括爆震声与预燃敲击声，其特征频率集中在 5~8 kHz 区间，能量峰值明显且持续时间短；机械类异响涵盖活塞销敲击、气门冲击、曲轴扭振及正时链条共振等，主要分布在 1~4 kHz 中频段，表现为周期性或调制性信号；装配类异响多与结构松动、连接不均或共振偏差有关，声谱呈宽频散布特征。通过频域与包络谱分析可发现，不同类型异响在峰值频率、能量分布及谱峭度等参数上具有稳定差异性，因此可建立基于声谱特征的分类模型，实现异响类型的定量识别与溯源分析。

2.3 声振信号的耦合特性

发动机异响信号具有明显的瞬态与非平稳特征，同时存在多源耦合效应。燃烧激励产生的高频声波与结构振动叠加后形成复合信号，传统的线性谱分析方法难以有效分离各成分。为实现多源信号的特征提取，可采用短时傅里叶变换（STFT）捕捉信号的时变频率特性，并利用小波包分解（WPD）对不同频带进行能量分布分析，从而揭示声振能量在时间与频率维度上的耦合规律。研究表明，信号中主要频率成分与发动机结构的模态特征密切相关，特定频带的能量聚集区对应于结构共振区域。通过建立时频域与模态参数的映射关系，可为异响源定位与结构优化提供关键输入，实现从信号分析到结构控制的闭环设计。

3 发动机异响根源识别技术体系构建

3.1 多传感融合与信号特征提取

为了实现发动机异响源的高精度识别与定位，构建了集振动加速度传感器、声压传感器与缸内压力传感器于一体的多通道采集系统。通过高频同步采样与时域对齐算法，确保多源信号的时空一致性与同步性。在信号预处理阶段，引入自适应滤波与奇异值分解（SVD）方法去除环境噪声与背景干扰，从而提取更纯净的特征信息。时频分析采用短时傅里叶变换（STFT）与小波包分解技术，捕捉异响信号的非平稳特征。基于时频能量分布、谱峭度、包络均值与主频能量比构建多维特征向量，为后续机器学习模型提供高分辨率输入。该融合策略显著提升了信号的特征完整性与诊断鲁棒性，使异响识别具备较强的抗噪能力与实时性。

3.2 基于模式识别的故障分类模型

在特征数据集基础上，采用支持向量机（SVM）与卷积神经网络（CNN）相结合的复合分类架构。SVM 利用核函数实现非线性映射，适用于小样本与高维特征空间的快速分类；CNN 则通过卷积核自学习机制自动提取信号的时频

纹理特征，实现复杂模式的自适应识别。模型训练过程中，采用交叉验证与批归一化技术防止过拟合，并通过特征融合层实现统计特征与深度特征的协同学习。实验结果表明，该复合模型在活塞销敲击、气门冲击、曲轴扭振等三类典型异响识别中平均准确率超过 95%，较传统阈值判定算法提升约 20%，在多工况下具有优良的泛化性能。

3.3 故障定位与信号反演方法

在异响类型识别完成后，基于声学反演与声场重构方法实现故障源的精确定位。采用近场声全息（NAH）技术与声压映射法，对发动机外壳声场进行三维可视化重建。通过空间频谱分析与声强矢量反演，识别声辐射能量密度最高区域，从而确定具体的声源位置。反演结果与有限元模态分析结果进行耦合比对，验证声源区域与结构固有频率之间的耦合强度。结果显示，该方法在定位缸盖敲击与连杆冲击等异响时空间误差小于 15 mm，声能量重构相关系数达到 0.93，为后续结构优化与噪声控制提供了精确的物理依据和验证路径。

4 关键部件异响根源分析与影响机理

4.1 活塞销与连杆组的冲击异响机理

活塞销与连杆小头孔之间的配合间隙对发动机机械噪声有决定性影响，是引发高频冲击异响的主要源头之一。在活塞换向及燃烧压力突变阶段，连杆小头与活塞销间的相对位移会导致瞬态碰撞，从而产生强烈的冲击激励。通过多体动力学与有限元耦合分析发现，当配合间隙超过 0.02 mm 时，冲击能量急剧增加，系统主振频率集中于 2.5 kHz 左右，与整机结构固有频率耦合后易形成共振放大。材料硬度匹配、润滑膜厚度及油膜压力分布是影响冲击强度的关键因素。若润滑膜因温度波动或油压下降而局部破裂，金属直接接触将导致冲击能量提升约 40%。采用高精度间隙控制与表面镀膜工艺（如 DLC 涂层），能有效减弱干摩擦冲击。实验验证表明，在优化配合公差与油膜稳定性后，冲击噪声幅值下降约 4.2 dB，系统高频能量显著衰减，机械冲击异响得到有效抑制。

4.2 配气机构冲击与振动传递特征

配气系统是发动机高频噪声的集中来源之一，其由凸轮、挺柱与气门弹簧构成的传动链在高速运行下极易发生周期性冲击。尤其在高速区间，凸轮与挺柱接触特性决定了系统的声振行为。实验测得，当气门弹簧刚度不足或挺柱磨损后，冲击声强度增加约 30%，并在 3~4 kHz 频段出现显著峰值。该频段与气门机构的局部模态频率高度重合，易形成结构共振。通过动态接触仿真分析发现，凸轮轮廓边缘的不连续性与润滑油膜厚度变化共同导致接触应力峰值增大。采用曲率连续的凸轮轮廓设计与强化润滑通道，可有效降低接触冲击能量。此外，在挺柱与气门杆间引入耐磨陶瓷镀层与油膜稳定涂层技术，能够显著减少金属间冲击。改进后的

气门系统冲击声功率降低约 22%，振动传递至缸盖与缸体的能量下降 18%，整体结构声辐射水平显著改善。

4.3 曲轴扭振与传动系统共振问题

曲轴及其附属传动系统（正时链条、皮带轮等）在复杂动态载荷下容易产生扭振耦合，成为发动机异响的重要诱因。扭振由燃烧冲击及惯性力矩变化引起，其周期性角速度波动会触发传动系统共振，进而引发结构件的二次声学辐射。测试结果表明，曲轴扭振主频约 1.8 kHz，与链条张紧系统的固有频率接近，形成能量叠加效应，导致噪声放大。通过扭振仿真分析可知，曲轴惯量分布与张紧机构阻尼特性是影响共振耦合的关键参数。优化策略包括调整曲轴配重块布局、提高链条张紧阻尼比以及在皮带轮端采用橡胶减振器以吸收高频能量。结构模态调整后，系统共振频率成功避开发动机主要燃烧激励区间，整机噪声峰值下降约 3.8 dB，扭振幅度减少 26%。此外，优化方案显著降低了链传动的疲劳载荷水平，提高了系统可靠性与耐久性。综上所述，针对曲轴扭振的结构性优化不仅改善声学性能，还为整机 NVH 控制提供了长期稳定的工程保障。

5 结构优化与工程改进策略

5.1 基于有限元分析的模式优化

针对发动机异响源高发区域，建立涵盖缸体、气门机构及连杆组的高精度有限元分析（FEA）模型，对结构的固有模态、应力集中与声学辐射特性进行系统分析。研究发现，缸体侧壁、气门桥及连杆小头等区域在主要激励频带内存在局部共振现象，易形成结构声辐射热点。为抑制此类共振，采用拓扑优化与约束模态重构技术，通过调整局部厚度、筋板分布与约束边界条件，改变结构刚度路径，使固有频率与主要激励频率区间实现“错频”设计。优化过程中同时引入声固耦合分析模块，对声辐射效率进行迭代计算。仿真结果表明，优化后的缸体第一阶模态频率提升约 6%，结构总声功率下降 20% 以上，关键节点应力幅值降低约 12%，有效缓解了高频耦合引起的局部共振，为发动机结构 NVH 性能改进提供了可量化的设计依据。

5.2 材料与连接结构优化设计

材料阻尼性能与连接刚度分布是影响发动机声振响应的决定性因素。针对传统铝合金与灰铸铁材料阻尼不足、声能反射率高的问题，采用复合金属与高阻尼合金材料替代关键结构部件，显著提升结构的能量耗散能力。在不增加系统质量的前提下，优化了缸体与曲轴箱的刚度梯度，使局部应变能分布更加均匀。针对连杆小头与活塞销间的冲击声源区域，采用表面微纹理化加工与 DLC（Diamond-Like

Carbon）耐磨涂层技术，提高润滑膜稳定性与抗疲劳性能，降低了接触激励强度。对于螺栓连接处，通过多目标预紧力分布优化与隔振垫片设计，提高了连接面的刚度一致性，减少了结构间的声学能量耦合。实测表明，材料与连接结构优化后发动机结构传递损失增加约 18%，高频噪声幅值显著下降，机械传动噪声的主峰能量衰减超过 4 dB。

5.3 基于实验验证的闭环改进

为验证优化设计的有效性，进行了台架试验与整机声学对比测试。采用三维声强阵列测量系统对发动机主要辐射面进行声功率分布测试，同时利用多点加速度传感器获取结构振动响应数据。实验结果显示，经优化后的发动机在 2500~3500 r/min 典型工况区间内，整体声压级下降 3.5~5 dB，主频段噪声能量显著减弱；燃烧激励与机械冲击引起的高频成分得到明显抑制，整机噪声平顺性显著改善。通过疲劳耐久性试验验证了结构可靠性，缸体与连杆部位未出现异常疲劳裂纹，表明优化方案在保证强度与刚度平衡的前提下，提升了系统稳定性与使用寿命。最终对比结果表明，该闭环优化流程有效实现了从建模、仿真到试验验证的全链路降噪控制，为发动机结构声学性能提升提供了可推广的工程化解决方案。

6 结语

发动机异响问题的根源识别与结构优化是动力系统 NVH 控制的重要组成部分。本文通过多源信号融合、模式识别及有限元仿真分析，建立了异响识别与优化的系统化方法，实现了从声源定位到结构改进的闭环设计。研究表明，基于机理模型与数据驱动融合的异响识别体系能够准确区分不同类型声源，并为结构优化提供定量依据。通过材料改进、模态优化及装配精度控制，发动机噪声水平显著下降，系统稳定性得到提升。该研究为未来发动机轻量化与高效化开发提供了可复制的 NVH 优化思路，也为新能源汽车动力系统的声学舒适性设计奠定了基础。

参考文献

- [1] 赵英豪.汽车发动机常见故障及维修策略研究[J].汽车知识,2024,24(07):153-155.
- [2] 陶书杰,杨国芳,郝少华,等.某发动机气流敲击异响试验分析及优化[J].汽车科技,2022,(01):103-108.
- [3] 曾庆华,靳晓雄.轿车用发动机异响声分析及测试识别方法[J].汽车工程师,2009,(11):55-58.
- [4] 沈凌飞.传统燃油车发动机异响故障维修技术难点及解决方案研究[J].汽车电器,2025,(11):173-175.
- [5] 杨雷.基于LabVIEW的发动机异响监测与诊断系统研究[J].装备制造技术,2017,(06):54-60.