

基于振动检测的内燃机车柴油机故障诊断技术探究

王宇龙

安阳钢铁股份有限公司 运输作业部机务作业区 河南 安阳 455000

摘要: 本文针对内燃机车柴油机故障诊断需求,系统阐述了振动检测技术的基础原理、典型故障振动信号特征、标准化操作流程及现场干扰控制措施。基于柴油机各运动副故障对振动信号在时域、频域上产生的差异化响应,建立了活塞连杆机构间隙异常、气门配气机构故障、轴承磨损及齿轮啮合故障三类典型故障的振动特征辨识体系。明确了测点布置、信号采集、信号处理与故障判定的标准化操作流程,并针对传感器安装干扰、车体耦合共振干扰、工况波动干扰三类现场主要干扰因素提出了系统性控制措施。该技术体系可实现柴油机常见机械故障的在线精准诊断,为机车运维提供可靠的技术支撑。

关键词: 内燃机车; 柴油机; 振动检测; 故障诊断; 技术研究

引言: 内燃机车柴油机作为机车动力系统的核心部件,其运行状态直接关系到整列机车的牵引能力与行车安全。传统的定期拆检模式存在检测周期长、人力成本高、对设备运行产生中断等局限性,难以满足现代机车运维对故障早发现、早处置的要求。振动检测技术基于机械故障必然引起振动信号特征变化这一基本物理规律,通过在柴油机关键部位布置传感器采集振动响应信号,经信号处理与特征分析即可实现故障的在线诊断与精准定位。该技术具备非侵入式、实时性强、不干扰设备正常运行等显著优势,已成为内燃机车柴油机状态监测领域的核心技术手段。本文针对该技术的原理、典型故障振动特征、标准化操作流程及现场干扰控制措施进行系统梳理。

1 振动检测用于柴油机故障诊断的基础原理

内燃机车柴油机在持续运转过程中,活塞组件的往复直线运动、曲轴系统的连续回转、配气机构的周期性启闭、传动齿轮副的交替啮合以及高压燃油喷射所引发的瞬时冲击,均作为持续激励源不断向机体结构传递机械振动能量。在设备无故障正常工况下,整机各关键测点的振动振幅、主频成分及波形特征均保持稳定,其振动响应参数处于预设的标准范围之内,具备明确的基准参照体系。当内部零部件发生磨损、裂纹扩展、连接松动或配合间隙超出允许公差时,部件间的接触力学状态与动力学特性随之改变,运动过程中的冲击载荷幅值、摩擦阻力特性及能量传递路径均产生可观测的偏离,最终体现为原始振动信号在峰值大小、频率成分构成及时域波形形态上的显著差异。振动检测诊断技术的核心实施流程为:在柴油机缸体、主轴承座、齿轮箱壳体等关键部位布置专用压电式或磁电式振动传感器,实时采集

原始振动响应信号;随后通过带通滤波、自适应降噪等信号处理手段剔除环境噪声与无关干扰成分;继而采用时域统计分析与频谱分析方法对有效信号进行特征提取与分解,将实测振动参数与柴油机正常运行基准参数进行逐项对比。依据参数偏差所对应的频率区间与幅值大小,即可精确定位故障发生的具体部件,辨识故障类型,并评估故障严重程度。该技术全程无需对柴油机进行任何拆解操作,不干扰设备正常运行状态,属于非侵入式在线检测手段,在工程应用中具备显著的维护效率优势^[1]。

2 内燃机车柴油机常见故障及振动信号特征

2.1 活塞连杆机构间隙异常故障

活塞销、连杆轴瓦及主轴瓦在柴油机长期运行过程中持续承受往复交变载荷作用,内壁接触面会因反复摩擦而产生均匀磨损,导致各运动副配合间隙逐步增大并超出允许范围。当配合间隙超标后,在柴油机做功冲程阶段,活塞、连杆与曲轴之间因间隙过大而产生周期性硬性冲击碰撞,冲击载荷沿连杆传递至曲轴及主轴承座。该类故障的振动信号特征集中体现为低频段振动响应异常,振动主频与曲轴转动频率保持严格同步关系,缸体下部测点处振动幅值显著升高。此外,该类故障振动强度与柴油机负荷大小呈正相关,负荷越高则周期性冲击振动越剧烈,空载运行状态下异常振动幅值会有所减弱。振动波形呈现规律性尖峰脉冲形态,与正常运行波形差异明显,故障特征在时域与频域上均具备较高的辨识度。

2.2 气门配气机构故障

气门间隙超标、气门弹簧弹力衰减及挺柱滚轮表面磨损是配气机构最常见的三类故障。气门间隙超限会导

致气门启闭时刻偏离设计相位, 弹簧弹力不足使气门关闭冲击力减弱, 挺柱滚轮磨损则造成凸轮与挺柱之间接触状态劣化, 三者均会引发气门启闭时序错乱与闭合不严, 进而产生高频瞬时冲击振动。该类故障振动信号以中高频段异常为主, 振动主频与凸轮轴运转频率保持对应关系, 不存在连杆机构故障所特有的低频周期性冲击成分。故障气缸对应的缸体上部测点振动数据明显高于其余正常气缸, 波形中出现无规律的杂乱脉冲序列, 且该异常振动幅值不随柴油机负荷变化而出现大幅波动, 与活塞连杆机构故障的负荷相关性特征形成清晰区分, 可有效实现故障类型的准确辨识^[2]。

2.3 轴承磨损与齿轮啮合故障

柴油机主轴承与凸轮轴轴承在长期运行中因持续承受交变载荷与润滑不足, 滚道表面会出现点蚀剥落、滚珠接触面磨损等损伤; 正时齿轮因长期啮合运转, 齿面会产生磨损与齿隙增大现象。上述损伤均会在运转过程中激发连续性高频振动信号。其中轴承故障振动波形表现为固定时间间隔的连续脉冲序列, 振动噪声具有持续性强、衰减缓慢的特征, 频谱中可见轴承特征频率及其倍频成分; 齿轮啮合故障则因齿面损伤与齿隙增大导致啮合冲击加剧, 在频谱图中出现额外啮合边频峰值, 整机振动稳定性明显下降。该类故障振动信号主要集中在柴油机齿轮箱与曲轴箱体对应测点处, 表现为持续性高频振动, 不具备活塞连杆机构故障所呈现的明显周期性负荷相关性, 可据此与其他类型故障有效区分。

3 振动检测故障诊断标准化操作流程

3.1 检测测点布置

测点布置方案直接决定所采集振动信号的有效性与故障特征提取的准确性。布置原则为: 传感器应尽量贴近振动激励源, 以获取最强的故障特征信号; 同时须远离机体减震结构、弹性支撑座及防护薄壁盖板等区域, 避免非目标振动源信号混入采集数据。结合内燃机车柴油机结构特征, 统一设置以下固定测点: 在各气缸缸体上侧与下侧分别布设测点, 上侧测点用于监测气门机构运动状态, 下侧测点用于监测活塞连杆机构运行状态; 在曲轴箱左右侧壁对称布设测点, 用于监测主轴承瓦润滑与运行状态; 在前端齿轮箱外壳布设测点, 用于监测正时齿轮副啮合状态; 在柴油机输出端轴承座处增设测点, 用于监测末端轴承运行状态。现场统一采用磁吸式振动传感器安装方式, 确保传感器与被测机体表面实现刚性贴合, 消除接触间隙对信号传递的衰减影响。

3.2 现场振动信号采集

为消除转速波动与负荷变化对振动信号的干扰, 现

场采集统一在柴油机怠速与额定负荷两种稳态工况下开展。采样频率设置须完整覆盖柴油机全部故障特征频率范围, 确保各阶次激励信号及高频冲击成分均能被准确捕获。单次采集时长须覆盖柴油机完整做功循环周期, 保证时域与频域分析所需的最小信号长度, 避免因截断效应导致频谱泄漏与特征频率丢失。同一测点须连续重复采集多组数据, 通过组间对比识别并剔除因瞬时扰动产生的异常数据段, 仅保留稳态运行条件下的有效振动数据, 确保后续时域分析与频谱分析所依据的原始数据具备充分的代表性与可靠性, 为故障特征提取与诊断判断提供坚实的数据基础^[3]。

3.3 振动信号处理与故障判定

现场采集的原始振动信号中混杂车体耦合共振、电磁干扰及轨道颠簸激发的杂波成分, 须在故障判定前完成系统的信号预处理。预处理阶段首先采用数字滤波技术剔除与柴油机本体无关的高频杂波与随机噪声, 保留有效振动成分。随后进入时域分析环节, 提取振动峰值、有效值及峭度三项核心统计指标, 对整机振动异常程度作出初步判定。继而通过傅里叶变换将时域信号转换至频域, 开展频谱分析, 逐阶拆分不同频率成分所对应的振动幅值分布, 精确定位异常特征频率所在区间。最后将异常特征频率与柴油机各部件固有故障频率逐一匹配比对, 直接锁定产生异常振动的故障部件, 完成故障类型与故障位置的精准判定。

4 现场检测干扰因素及对应控制措施

4.1 传感器安装干扰及控制方法

振动传感器的安装质量直接决定所采集信号的真实性与可靠性。在现场检测环境中, 测点表面若存在漆面锈蚀层, 会在传感器与机体之间形成弹性过渡层, 导致振动能量传递路径中断, 引起高频信号衰减与波形畸变; 油污残留同样会降低接触面摩擦系数, 使传感器与被测表面之间产生微滑移, 造成信号相位偏移与幅值失真; 磁吸式传感器若吸附力不足, 在柴油机持续振动激励下极易发生松动或偏移, 导致采集信号中混入随机噪声成分; 若传感器被安装在薄壁防护罩或减震垫周边区域, 薄壁结构自身的局部共振会叠加到原始振动信号中, 严重干扰故障特征的准确提取。针对上述干扰因素, 现场控制措施需严格执行以下操作规范: 检测作业开始前, 使用细目砂纸对测点位置的漆面、锈蚀层及油污进行彻底打磨清理, 直至露出光滑洁净的金属基体表面, 确保传感器与被测机体之间实现刚性耦合; 传感器安装位置应严格选取缸体、轴承座等机体刚性厚壁结构处, 禁止安装于防护盖板、减震橡胶垫及任何薄壁壳体

周边区域;数据采集全过程须安排专人现场监护,实时检查传感器安装状态,一旦发现松动或位移立即停止采集并重新固定,确保信号采集的连续性与准确性^[4]。

4.2 车体耦合共振干扰及控制方法

内燃机车柴油机作为机车动力系统核心部件,其运转过程中产生的激振力会通过弹性悬挂与结构连接路径向车体框架传递,进而激发机车整体车体产生低频结构共振。该车体共振响应信号与柴油机本体振动信号在频谱上存在明显的频率重叠区域,尤其在低频段范围内,共振信号幅值往往远大于柴油机早期微弱故障所激发的低频振动成分,导致故障特征信号被共振背景所掩盖,严重制约早期故障的检出灵敏度与诊断准确率。针对该干扰,现场控制措施需从信号处理与检测工况两个维度同步实施。信号处理层面,在正式检测前应对机车车体进行固有频率标定试验,准确获取车体结构在各方向的固有共振频率值,随后在振动分析软件中设置针对性带阻滤波器,对该固定频段内的共振信号进行定向衰减处理,有效剥离车体共振对柴油机本体振动信号的叠加影响。检测工况层面,应严格选择机车处于静止状态且无轨道激励条件下开展振动采集作业,避免车轮与轨道接触产生的颠簸冲击及线路不平顺激发的附加振动混入检测信号,从源头上降低外部激励干扰,最大程度提升柴油机本体有效振动信号在采集数据中的占比,保障故障诊断结果的可靠性。

4.3 柴油机工况波动干扰及控制方法

柴油机在实际运行过程中,短时加减负荷操作会引起燃烧室内压力突变与曲轴扭矩瞬时波动,各气缸因喷油量不均匀导致的做功差异同样会产生周期性的激励扰动。上述工况波动会在振动信号中叠加非稳态瞬态分量,表现为瞬时非正常振动峰值的出现,其频谱特征与机械零部件损伤所引发的振动响应存在相似性,极易被故障诊断系统误判为齿轮损伤、轴承失效等机械类故障,导致诊断结果出现假阳性。针对该类干扰,现场控制措施须从采集时机、操作规范与数据筛选三个环节严格执行。采集时机方面,应在柴油机启动后充分暖机,

待机油温度与运转转速均达到完全稳定状态后方可启动振动采集作业,避免冷机或暖机过渡阶段因润滑不充分、燃烧不稳定引起的异常振动混入检测数据。操作规范方面,数据采集全过程须固定油门开度,严禁进行任何加减载操作,确保柴油机持续处于稳态运行工况。数据筛选方面,应对多组连续采集的振动数据进行横向对比分析,识别并剔除无规律的瞬时突变数据段,仅保留稳态运行条件下采集的有效数据作为故障分析依据,从根本上排除工况波动对诊断结果的干扰,保障故障判断的准确性与可靠性^[5]。

结束语

本文围绕内燃机车柴油机振动检测故障诊断技术,系统阐述了从信号采集、干扰控制到故障判定的完整技术体系。振动检测作为非侵入式在线监测手段,无需拆解设备即可实现对活塞连杆机构、气门配气机构、轴承及齿轮等关键部件的故障定位与类型辨识,在工程实践中具备显著的维护效率优势。现场实施中,传感器安装质量、车体耦合共振及工况波动是影响诊断准确性的三类主要干扰因素,须通过标准化操作流程与针对性控制措施加以消除。随着机车运用年限增长与运维压力加大,振动检测技术的规范化应用对保障柴油机运行可靠性、降低非计划停机风险具有重要的工程价值,后续可结合智能算法进一步提升早期微弱故障的检出能力。

参考文献

- [1]赵瑞峰.内燃机车柴油机常见故障与处理[J].内燃机与配件,2022(03):124-126.
- [2]邓国璋.内燃机车柴油机常见故障及应对策略[J].内燃机与配件,2021(06):101-102.
- [3]张宇,谢宝忠.基于多传感器信息融合的内燃机车柴油机故障诊断方法研究[J].铁道学报,2021,43(7):45-52.
- [4]赵瑞峰.内燃机车柴油机常见故障与处理[J].内燃机与配件,2022(03):124-126.
- [5]杜鑫,赵子策.内燃机车走行部轴承的疲劳损伤机理研究[J].材料科学与工程,2025(5):72-80.