

X 射线检测捕获的熔渣焊缝图像显示边界处具有不规则棱角的长条状或圆形图像，以及均匀清晰的黑色图像。通常，带渣的延伸方向与焊缝的延伸方向相同。焊缝特征分析是识别缺陷图像的形状、大小、黑度、分布等信息，为缺陷类型的判断提供基础条件。

### 3 提升 DR 数字射线检测技术识别焊缝缺陷精度的策略

#### 3.1 开发新射线源

核心目标是解决传统射线源能量范围有限、强度不稳定、焦点尺寸大的问题。传统的射线源能量范围有限、辐射强度不稳定，需要探索新型的射线源，其中包含微焦点 X 射线源、同步辐射源和激光驱动射线源等，新型射线源可以提高能量输出，且焦点尺寸更小，稳定性较高，能够保障射线图像的高质量化，强化对缺陷检测的灵敏度和分辨率。其中，同步辐射源主要是通过同步加速器产生的高亮度、高频率的电磁辐射进行检测，该射线源分辨率、精度较高；激光驱动射线源就是利用激光和物质相互作用，进而产生高能射线，该射线源检测速度较快，对环境适应性好。

#### 3.2 开发高灵敏探测器

核心目标是提高图像分辨率、对比度，加快响应速度，并降低辐射剂量。传统的探测器存在一定的局限性，如动态范围窄、响应速度慢等，需要积极改进探测器，进而提高图像质量，精准识别焊缝缺陷。如开发平板探测器、线阵探测器和半导体探测器等，使其具备更高的灵敏度和响应速度，提高图像分辨率，以便对摄像图像进行实时捕捉和动态处理，保障检测结果的准确性。其中，平板探测器是利用间接转换技术，把射线转化为电信号，在高精度缺陷检测中发挥重要作用，噪声较低，动态范围较宽，且图像分辨率高；半导体探测器是通过半导体材料的电离效应，在高等射线检测中进行使用，该设备响应速度快，且分辨率高。新型高灵敏的探测器能够有效捕捉到射线与物质相互作用产生的信号，从而提高图像的对比度和细节分辨能力。例如，采用先

进的半导体材料和光电转换技术的探测器，如碲化镉(CdTe)和碲锌镉(CZT)探测器，具有更高的量子效率和更低的噪声水平，能够在较低的射线剂量下提供高质量的图像<sup>[6]</sup>。高灵敏度探测器的应用不仅提高了缺陷的检出率，还降低了辐射对人体和环境的潜在风险。

#### 3.3 优化软件系统

核心目标是实现缺陷的自动、精准、鲁棒识别与分类，减少对人工评片的依赖。在缺陷识别工作中引进深度学习技术，在具体应用中，可以通过卷积神经网络(CNN)，训练大量的缺陷图像数据集，深度学习模型，进而学习到缺陷特征和模式，实现复杂缺陷的自动识别和分类。引进多尺度图像分析技术，即不同空间分辨率上处理和分析图像，进而全面识别和描述缺陷，该方法集合尺度空间表示、多分辨率分解、多尺度特征融合等方法，进而有效处理中的噪声、伪影，增强缺陷可见性，通过深度学习获得强大的特征学习和识别能力，通过多尺度分析保证了对不同大小缺陷的鲁棒性和识别精度。

### 4 结论

综上所述，为了提升焊缝缺陷识别精度和效率，需要对 DR 数字射线检测技术进行优化应用，进而提升焊缝缺陷识别精度，保障管道安全运行。通过综合应用硬件升级(射线源、探测器)和软件智能化(深度学习等算法)来优化 DR 技术，是提升焊缝缺陷识别精度和效率、保障工业设施安全的关键路径。

#### 参考文献

- [1] 刘浩,曹灿,陈亚楠,等. 数字射线检测技术在压力管道检测中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2025, (14): 157-160.
- [2] 唐飞阳亮,王恒,张立斌,等. 相控阵超声与数字射线检测技术在锅炉水冷壁焊缝检测中的应用对比 [J]. 无损检测, 2019, 41 (08): 58-61+72.
- [3] 赖强. 焊缝缺陷识别的数字化模型构建与图像化表征[C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集 (七). 新疆天维无损检测有限公司;, 2024: 92-94.

# Research on Intelligent Monitoring and Fault Early Warning Technology for Marine Diesel Engine Lubrication Systems

Jinfei Mo

Shanghai Salvage Bureau, Ministry of Transport, Shanghai, 200090, China

## Abstract

This chapter elaborates on the research ideas of intelligent monitoring and fault warning technology for marine diesel engine lubrication systems. In terms of sensors, it introduces the design of online monitoring sensors based on principles such as dielectric constant, viscosity, and wear particles, as well as the installation schemes of wet and dry oil pan systems. It focuses on a grey correlation algorithm that integrates trend similarity and Euclidean distance improvement to improve the accuracy of typical fault diagnosis such as filter blockage and cooler fouling. Through real ship cases, it is verified that this technology system can effectively achieve early identification and precise positioning of abnormal wear, providing technical support for the transformation of marine diesel engines from regular maintenance to on-demand maintenance.

## Keywords

marine diesel engine; Lubrication system; Intelligent monitoring; Fault warning

# 船舶柴油机润滑系统智能监测与故障预警技术研究

莫金飞

交通运输部上海打捞局，中国 · 上海 200090

## 摘要

本章阐述了船舶柴油机润滑系统智能监测及故障预警技术研究思路，在传感器方面介绍了介电常数、粘度、磨损颗粒等原理的在线监测传感器设计以及湿式和干式油底壳系统的安装方案，重点介绍了一种融合趋势相似性与欧式距离改进的灰色关联算法以提高滤清器堵塞、冷却器积垢等典型故障诊断准确率，并通过实船案例验证该技术体系能够有效实现异常磨损早期识别和精确定位，为船舶柴油机从定期维修向视情维护转变提供了技术支持。

## 关键词

船舶柴油机；润滑系统；智能监测；故障预警

## 1 引言

柴油机是船舶的核心部件，它的润滑系统状态直接关系到航行的安全性、可靠性和经济性能，在高温高压且具有强腐蚀性的工况下长时间运行时，润滑系统的失效已经成为引发严重机械事故的主要原因之一<sup>[1]</sup>。传统的依靠定期检修以及离线油样检测的方法存在一定的滞后现象，并不能很好地满足现代智慧航运对于实时监测和动态维护的需求。为此，本文选取了船舶柴油机润滑系统的智能监测及故障预警技术这一研究对象，希望通过全面的研究工作来完成智能传感器的设计安装，做到早期发现和精准定位，给船舶动力系统的安全性和可靠性提供理论基础和技术路径。

【作者简介】莫金飞（1972-），男，中国上海人，本科，工程师，从事船舶机电设备研究。

## 2 船舶柴油机润滑系统智能监测传感器设计与安装方案

### 2.1 在线监测传感器的设计原理探究

船舶柴油机润滑系统在线监测传感器主要是监测油液的理化性能、污染度和磨损颗粒这三类参数。它依照许多物理与化学原理来开展设计，其中就包含了电容法、粘度测量法、光谱分析法等等。

介电常数法是油品质量检测技术的一种，主要是通过润滑油的电磁特性来评价其综合性能。该方法的基本原理在于：在氧化程度加重、水分含量增多及金属微粒浓度提升等因素的影响下，润滑油所对应的介电常数值会发生明显改变<sup>[2]</sup>；当油液老化后生成了酸性物质或者含水量增加时，它的介电常数往往会上升；相反，如果被燃料稀释就会使介电常数降低，在这种情况下利用上述特点就可以对实际状况作出相应的判断并将其应用到现实操作当中去。

作为在线监测设备中的关键部分，粘度传感器在润滑油品质检测领域起着非常重要的作用。它的工作水平直接关系着润滑效果的好坏，而黏度是评判润滑油质量好坏的一个重要指标。目前市场上比较常用的在线测量技术大多为振动式原理，通过驱动装置来促使其中一些特定元件按固有频率进行振荡运动，并把它们放置于待测油液环境中开展运行过程；由于液体介质会对机械震动产生一定的阻尼影响，这种现象与所处环境中的黏度大小存在着正向关联性特征，在浸入目标样品之后因彼此之间的差异而导致了振幅衰减、谐波偏移等情况发生，被捕捉下来后可成为可用于测定流体黏度值的一种有效手段，为了尽可能地减少由温度波动所带来的系统误差干扰，很多现代设计都会采取集成温控方案并实施动态校准处理措施。

磨损颗粒传感器主要用于监测油液中的金属磨损颗粒的含量和分布情况。目前最常用的在线式磨损颗粒传感器是采用电感原理设计的，当金属颗粒流过传感器线圈时，会使线圈的电感发生变化，这种变化程度取决于颗粒的大小以及材质<sup>[3]</sup>。先进的磨损颗粒传感器可对铁磁性和非铁磁性颗粒加以辨别，并能对颗粒予以计数和大致分类。另一种是利用光学原理的颗粒传感器，根据油液中的颗粒对光的遮挡或散射来判断颗粒浓度以及尺寸分布。

## 2.2 传感器系统的安装方案

船舶柴油机润滑系统传感器的安装方案要依照润滑系统的种类（湿式油底壳或者干式油底壳）和船舶的空间安排来制定。合理的安装方案是保证传感器能有效的监测。

对于湿式油底壳润滑系统可采取两种安装方式：一是直接将传感器安装在油底壳上，这种方法的安装比较简单，但是对密封的要求比较高，要防止油液的泄漏；二是从油底壳外面接一根循环管路，在管路上装一个传感器，这种方法是在外接管路上可以接更多的传感器，对柴油机本身的改造是最小的，但需要附加泵等附件，可能会降低系统的可靠性。

对干式油底壳润滑系统，因有独立的滑油箱、传感器，因此安装方案较灵活。一般采用外接循环管路的方法，在回油管或供油管上安装传感器，对于回油管自然落差较大的情况，可以利用落差安装传感器，不需要额外的泵，但是受空间限制大。

在实际的安装设计上要考虑以下几点：首先传感器是可拆卸的方便后期维护；其次要考虑到探头到前置电路盒的距离，不能太近避免信号衰减；然后要考虑到安装的位置是否合适，能否让油液充分流动并且有代表性；最后不能选择气泡积累的地方，避免影响测量结果。

## 2.3 在线监测系统硬件架构设计

对于完整船舶柴油机润滑系统在线监测系统而言，大多数都是采取分布式结构，在设计时包括了以下几部分，传感器层、数据采集层、数据处理层以及应用层。

传感器层是由多种油液传感器组成，用于采集润滑系

统的状态参数。常用传感器有：介电常数传感器、粘度传感器、温度传感器、水分传感器、磨损颗粒传感器等。这些传感器把油液的物理化学性质转变为电信号，随后进行后处理。

数据采集层负责对传感器的信号进行调理、采集以及转换。由于传感器所接收到的数据都是比较小的信号，并且容易被各种各样的干扰因素影响到，所以要对其进行调理，比如放大、滤波等操作处理之后才能将其作为输入端口接入 A/D 转换器将信号转换成数字信号形式。数据采集层负责多个信号的切换及初步处理。

数据处理层是整个在线监测系统的核心部分，一般用微处理器或者单片机。这一层是对收集到的数据进行分析处理，提取出一些特征参数，判断润滑状态是否正常，如果不正常就报警。处理层先进的还可以存储数据和通信，并能和上层管理系统进行交互。

应用层为用户提供人机交互界面，显示状态信息、报警提示、历史数据查询等。现代在线监测系统一般都具有远程监控的功能，通过网络把数据传送到岸基管理系统，从而实现对船舶柴油机的远程状态监测和故障诊断。

在实际系统中，多传感器信息融合技术的应用提高了监测的准确性，利用不同的传感器信息融合可以弥补单个传感器的不足之处，提高故障诊断的准确度。测量介电常数和粘度的同时进行，可以区分油品氧化和燃油稀释这两种不同的故障情况。

## 3 改进灰色关联分析的润滑系统故障诊断方法研究

### 3.1 优化灰色关联分析算法流程

改进灰色关联分析在传统的灰色关联分析上增加了欧式距离因子，同时考虑特征向量的趋势接近和距离接近，在一定程度上提高了故障诊断的准确率。该方法主要包括 4 个步骤：数据初值化处理、参考特征向量的计算、改进灰色关联度的计算以及故障模式识别。

数据初值化处理是灰色关联分析的基础工作，船舶柴油机润滑系统处于不同状态下的运行数据共有滑油泵后滑油温度、滤清器前滑油温度、滤清器后滑油温度、冷却器冷却水出口温度、滑油泵后滑油压力、滤清器前滑油压力、滤清器后滑油压力、滑油进机压力以及冷却器冷却水出口压力等 9 个监测点。因为各监测点的量纲和数量级不同，需要将原始数据做初值化处理来消除量纲的影响。其公式为：

初值化后数据 = 某状态下的监测点原始数据 ÷ 无故障状态下该监测点的初始数据

其中“某状态下的监测点原始数据”指待分析状态中某个监测点的实际采集数据，“无故障状态下该监测点的初始数据”指系统正常运行时该监测点的初始采集数据，通过该处理可让不同参数具备可比条件。