

电磁感应式油液磨损传感器性能评价体系 及齿轮箱故障诊断方法研究

王振尧

珠海市鑫世达测控技术有限公司，广东 珠海 519000

DOI: 10.61369/SSSD.2025040033

摘 要： 风电齿轮箱磨损故障导致运维成本激增，电磁感应式油液磨损传感器可实现实时磨粒监测，但存在灵敏度差异、环境误判及诊断脱节三大瓶颈。本文构建“设计参数－环境干扰－诊断算法”全链路分析框架，揭示磁场梯度、颗粒速度、气泡 / 振动干扰等动态机制，提出基于技术评价因子（TF）的静态性能评价体系，创新引入工业过程控制理论建立分级预警策略及增量累积分布（ICDT）智能诊断算法，为风电齿轮箱监测标准化提供技术路径。

关 键 词： 电磁感应传感器；油液磨损监测；风电齿轮箱；性能评价体系；故障诊断

Research on the Performance Evaluation System and Gearbox Fault Diagnosis Method of Electromagnetic Induction Oil Wear Sensor

Wang Zhenyao

Zhuhai Xinshida Measurement and Control Technology Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： The wear and tear of wind turbine gearboxes has led to a sharp increase in operation and maintenance costs. Electromagnetic induction oil wear sensors can achieve real-time wear particle monitoring, but there are three major bottlenecks: sensitivity differences, environmental misjudgment, and diagnostic disconnection. This article constructs a full chain analysis framework of "design parameters environmental interference diagnostic algorithm", revealing dynamic mechanisms such as magnetic field gradient, particle velocity, and bubble/vibration interference. It proposes a static and dynamic performance evaluation system based on technical evaluation factor (TF), innovatively introduces industrial process control theory to establish a hierarchical warning strategy and incremental cumulative distribution (ICDT) intelligent diagnostic algorithm, providing a technical path for the standardization of wind power gearbox monitoring.

Keywords： electromagnetic induction sensor; oil wear monitoring; wind turbine gearbox; performance evaluation system; fault diagnosis

引言

风电装机容量突破 400GW 规模，齿轮箱故障导致的非计划停机占运维成本 35% 以上。电磁感应式油液磨损传感器通过实时捕获金属磨粒特征，已在 80% 新建风场部署应用，但行业调查揭示三大核心矛盾：①缺乏统一标准导致不同产品灵敏度差异达 40%；②气泡 / 水分干扰及振动噪声使监测数据与磨损状态关联度不足^[1]；③海量监测数据未能有效支撑故障诊断需求。本研究构建“设计参数－环境干扰－诊断算法”全链路分析框架，通过灵敏度与流量承载能力的制衡关系量化建模、复杂油液环境数据质量衰减机制解析与监测数据与诊断需求的协同优化路径的研究为风电齿轮箱润滑磨损监测标准化提供理论支撑与技术路径。

一、传感器工作原理与技术演进

电磁感应式传感器的核心原理基于铁磁性颗粒的磁化效应与非铁磁性颗粒的涡流效应。当金属颗粒通过高频磁场时，铁磁性颗粒（如钢、铁）因磁导率差异产生磁偶极矩扰动，而非铁磁性颗粒（如铜、铝）则通过涡流效应形成反向磁场，并且由于涡流效应作用下铜颗粒在同等激励频率下产生的信号远小于铁磁性磨

粒。实验数据验证，粒径为 200 μm 的铁颗粒在某厂家高频激励下可产生 2300mV 的峰值电压，而同尺寸铜颗粒需提升至更高的激励频率方能达到等效信号强度，而如果激励不变，同尺寸铜颗粒仅能得到 190mV 的峰值电压^[2]。

另外值得提及的是，该原理传感器均采用近似球形颗粒进行实验标定，其磁化模型基于球对称假设。球形颗粒在磁场中的磁化均匀，产生的涡流和磁通量变化可预测，信号幅度与体积成正

比,便于定量分析。而不规则形状(如片状、长条状)可能导致磁化分布不均,这会使得信号幅度与颗粒体积的非线性关系增强,降低检测精度。

二、性能影响因素分析

(一) 灵敏度与口径的负相关性

电磁式磨损传感器灵敏度与口径的负相关性是金属微粒检测技术中的核心规律,其本质源于磁场梯度强度与口径尺寸的立方反比关系,以及微粒扰动信号的放大效应。磁场梯度的定义为磁场强度的空间变化率(单位长度内的磁场变化量)。由于 $B \propto \frac{1}{d}$, 梯度 ∇B 进一步与 d^3 成反比^[3]。金属微粒通过传感器时,其运动切割磁感线产生的感应电动势(EMF)为: $EMF \propto V \cdot \nabla B \cdot v$ 。其中: V 为微粒体积, ∇B 是磁场梯度, v 是微粒运动速度。在微粒体积 V 和速度 v 恒定时, EMF 与 ∇B 成正比,因此: $EMF \propto \frac{1}{d^3}$, 即,口径每缩小1倍,信号幅值理论上增大8倍(立方关系)。

(二) 大颗粒与小颗粒检测的矛盾

业内往往仅聚焦于电磁式磨损传感器的最小检测尺寸,忽略了传感器的大颗粒检测能力。而大颗粒金属磨粒往往与齿轮的严重磨损、疲劳剥落、断裂等故障密切相关。相较于小颗粒磨粒,大颗粒磨粒更容易被监测到,且其产生的原因更为明确。因此,监测大颗粒金属磨粒对于齿轮箱故障诊断具有更高的准确性。传感器信号调理电路(如前置放大器)通常采用固定增益设计以匹配AD转换器的动态范围。当大颗粒的原始信号(未放大时)已接近电路供电电压时,经过放大后极易超出AD转换器的量程,导致信号顶部被削平(“消顶”)。笔者在测试过程中,8mm内径的传感器在检测800um以上颗粒时,出现检测不到颗粒的问题,印证了上述结论。

(三) 颗粒经过速度影响

根据上述电磁式传感器的技术原理,不同颗粒速度对传感器的影响机制不同,最终导致不同材质的颗粒的检出受颗粒速度影响^[4]。铁磁性颗粒(如Fe)在经过螺线管时,涡流效应与磁化效应的竞争,在低速情况下,磁化效应占主导,颗粒被磁场感应产生涡流,信号幅度与速度正相关。在高速情况下,涡流效应增强,导致磁化强度降低,信号幅度下降。非铁磁性颗粒(如Cu、Al)在经过螺线管时,纯涡流效应增强,速度增加直接提升涡流强度,信号幅度显著增大。但高频噪声随速度升高而加剧。

(四) 环境干扰作用机制

电磁式磨损传感器的目标检测物为金属微粒,然而润滑油通常是非均质的。气泡、水滴等杂质不可避免地会掺杂在其中,引起的干扰噪声会影响目标微粒的有效识别。在泵送润滑系统中,空气含量通常远远超过50%^[5]。空气、油和水的相对介电常数分别约为1、2.5和81.5,当气泡或水滴通过线圈时,分布电容可能会发生很大变化。检测电路对气泡和水滴的响应非常类似于由金属微粒引起的响应,称之为杂质干扰噪声^[6]。当不同大小的“水滴或气泡”分别通过管道时,传感器的输出信号如下图1所示。由于水、气泡和油的介电特性的差异,传感器会产生杂质干扰噪声,

并且随着尺寸的增大,干扰信号也逐渐增大^[7-8]。

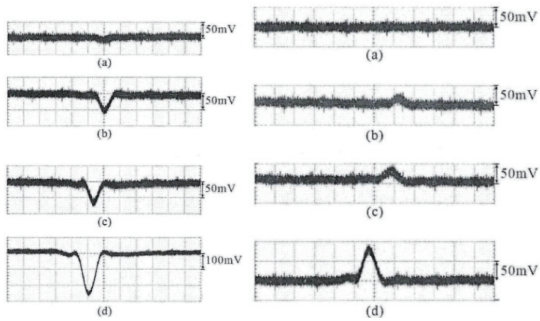


图1 不同水滴的信号反应不同气泡的信号反应

笔者在实际的过油测试中,现场的油液循环环境体现了风力发电机组的油液循环状态,泵后的油液富含大量的气泡。测试时,某些厂家传感器在新油的无金属颗粒的情况下,会存在每十五分钟两千多个的虚检颗粒。

(五) 机械振动干扰机制

振动是工业环境中传感器面临的典型机械干扰因素,其通过改变传感器磁场结构和引入额外噪声信号影响检测性能。振动会使感应线圈产生振动,从而在空间产生变化的磁场,这会导致感应线圈自身产生感应电动势,形成附加信号,改变磁场结构。当振动频率与微粒信号频率相近时,振动引起的干扰信号会与微粒信号混叠,导致难以区分两者。

(六) 温度波动的影响

温度对电磁感应式金属微粒检测器线圈参数、热噪声及电子元件性能的影响是多维度且显著的,直接威胁传感器精度与可靠性。线圈参数漂移方面,温度变化会导致线圈电阻与电感量发生非线性变化;热噪声会严重削弱微弱信号的信噪比。电子元件性能退化表现为放大器增益误差、AD转换器失调电压及ADC积分非线性误差^[9],高温环境下可能引发信号放大失真、量化误差(超过1LSB)及分辨率下降。

三、传感器性能评价体系构建

前文系统揭示了电磁感应式油液磨损传感器在复杂工况下面临的灵敏度-流量耦合矛盾、环境干扰耦合机制以及信号处理瓶颈等核心问题。然而当前风力发电行业既缺乏对传感器本征性能的科学度量,又缺失对动态工况适应能力的系统评价,导致产品选型与现场应用存在显著的技术盲区。为此,本章突破传统实验室标定与工程经验相割裂的局限,通过建立多维度、分层次的性能评价体系,将第三章揭示的物理机制转化为可量化验证的技术指标,为风电行业润滑磨损监测的标准化提供可工程化实施的技术规范。

(一) 技术指标定义

技术评价因子(TF): $TF = D / Pd_{min} / (1600 / Pd_{max})$, 其中: D 为传感器螺线管内径, Pd_{min} 为传感器检出率高于60%的最小金属颗粒直径, Pd_{max} 为传感器检出率高于90%的最大金属颗粒直径。检出率的概念为单一金属颗粒以恒定速度经过螺线管 N 次

后，能够检测到的次数为 n 次，则检出率 $= \frac{n}{N} \%$ 。

该技术评价因子充分考虑了传感器的设计内径、最小检测颗粒以及最大检测颗粒（1600um 为上限）之间的技术能力，是从磁场强度、小信号处理能力以及 AD 最大采集幅值综合判断传感器的指标，TF 值越大越好。

（二）静态性能指标

即传感器可检测的最小与最大金属颗粒尺寸的灵敏度，分为铁磁性（Fe）与非铁磁性（Cu/Al）两类。可通过皮带试验台加入单颗已知尺寸的球形颗粒，记录传感器信号输出的颗粒大小范围，并结合光学显微镜验证传感器检出颗粒与皮带机中真实颗粒的尺寸分布一致性。指标要求铁磁性 / 非铁磁性颗粒：100 ~ 500 μm , 500 ~ 1000 μm , 1000 μm 以上三个档位要求各区间检出率不低于 60%，并且 TF 值在 100 以上。

（三）动态性能指标

上述静态性能指标主要表征传感器在理想工况下的基础检测能力，然而实际工业场景中，传感器需要在高动态油液环境与复杂干扰源的持续作用下保持稳定输出。为系统评估传感器在真实工况下的可靠性，结合第三章揭示的核心干扰机制，将动态性能解构为四大干扰类型，并通过量化测试方法与合格标准建立可工程化实施的技术规范，具体分类与指标如下：

表 1 干扰评定指标

干扰类型	评价方法	合格标准
气泡干扰	传感器过新油测试，并在油中注入气泡	虚检率 < 100 个 / 15min
水分干扰	传感器过新油测试，并在油中注入 10% 的水	虚检率 < 100 个 / 15min
机械振动	橡胶锤敲击测试或实验台架 10~500HZ 扫频实验	虚检率 < 100 个 / 次实验
温度漂移	-20℃~80℃温变为 10℃ / 30min 温箱实验	虚检率 < 100 个 / 次实验

四、齿轮箱故障诊断依据构建

在完成传感器性能评价体系的构建后，如何将传感器输出的多维数据有效转化为齿轮箱健康状态的诊断依据成为亟待解决的核心问题。当前行业普遍存在的虚警率高、故障误判等问题，本质上源于传感器数据与设备失效机理的映射关系缺失。本节基于电磁感应式传感器特有的金属磨粒检测能力构建诊断体系，突破传统阈值报警的粗放模式，实现齿轮箱磨损状态的量化评估与故障溯源。

（一）分级预警机制

传统基于单一阈值触发的静态预警策略已难以适应复杂工况下的动态监测需求。研究表明，齿轮箱磨损故障具有显著的多尺度特征：小颗粒的持续累积表征早期磨损状态，而突发性大颗粒则对应机械失效的临界点。为此，本文提出 " 时序 - 尺寸 - 材质 " 三维联动的分级预警机制，通过构建金属磨粒产生速率、粒径分布演变及材料成分变化的动态评价矩阵，将传统故障诊断中离散的阈值判断转化为具有过程追溯能力的连续监测体系。具体分级规则与响应策略如下：

表 2 分级规则与响应策略

颗粒类型	时间维度	预警判据	响应措施
铁磁性磨粒	月	后一个月颗粒总数比上个月翻倍及以上	安排振动检测与内窥镜检查齿轮，并检测油液气泡 / 消泡含量指标
	天	出现 $\geq 1\text{mm}$ 颗粒 100 个以上	启动油液光谱复核与功率复核
非铁磁性磨粒	月	后一个月颗粒总数比上个月翻倍及以上	安排振动检测与内窥镜检查轴承，并检测油液水分含量指标
	天	出现 $\geq 1\text{mm}$ 颗粒 100 个以上	启动油液光谱复核与功率复核

（二）智能诊断算法

针对风力发电机组齿轮箱磨损状态诊断的智能化需求，本研究提出基于增量累积分布技术（ICDT）的智能诊断算法。该算法突破传统固定阈值诊断的局限性，其核心在于利用在线油液磨粒监测数据的累积特性，将相邻时间点磨损量差值 $M_x = D_{x+1} - D_x$ 构建增量序列做统计分析，有效捕捉设备磨损速率的变化特征。这一设计不仅解决了传统标准对机型、油品差异的敏感性缺陷，更通过实时数据迭代更新模型参数，使诊断系统具备持续进化的智能特性^[10]。

实际工程验证表明，该智能诊断算法在风电场 SCADA 系统中的集成应用成效显著。以某 2.5MW 机组为例，算法在 H1=130、H2=190 阈值设定下成功提前 14 天识别出齿轮箱高速轴承磨损异常，较传统振动分析法预警时效提升 62%。

五、结论与展望

本研究围绕风电齿轮箱润滑磨损监测需求，系统揭示了电磁感应式油液磨损传感器 " 设计参数 - 环境干扰 - 诊断算法 " 全链路作用机制，发现在风力发电行业实际使用该传感器的多方面制约因素。通过建立技术评价因子以及动态流速范围指标，构建了涵盖灵敏度与抗扰性的评价体系，结合工业过程控制理论优化分级预警机制，实现了监测数据与故障诊断的有效衔接。未来可构建融合振动 / 油温 / 功率曲线的数字孪生诊断系统，通过深度学习挖掘多源数据隐性关联，最终依托风场长周期实证完善技术体系，为风电润滑磨损监测标准化提供理论支撑与实践范式。

参考文献

[1] 钱敏 . 高分辨率电磁感应式金属微粒检测器研究 [J].
[2]Wu,X.et al.A New Inductive Debris Sensor Based on Dual-Excitation Coils and Dual-Sensing Coils.Sensors 2021.
[3]Fan,B.et al.A Permanent Magnet Ferromagnetic Wear Debris Sensor Based on Axisymmetric High-Gradient Magnetic Field. Sensors 2022.
[4]Li,W.et al.Analysis of the Effect of Velocity on the Eddy Current Effect of Metal Particles.Sensors 2022.
[5]Rao X,Sheng C X,Guo Z W,et al.A review of online condition monitoring and maintenance strategy for cylinder liner-piston rings of diesel engines[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2022.
[6]Massarini A,Kazmierczuk M K.Self-capacitance of inductors[J].IEEE transactions on power electronics,1997.
[7]郭明远 等 . 电磁磨粒检测中气泡对铜颗粒信号的影响特性分析 . 2024.
[8] 史皓天 . 基于多参数分析的金属磨粒材质区分机理及多污染物检测研究 [D]. 大连海事大学 ,2023.
[9]Moschytz G S. High-Q factor insensitive active RC network, similar to the Tarmy-Ghausi circuit but using single-ended operational amplifiers[J]. Electronics Letters,1972.
[10] 边瑞卿 . 基于电磁感应的嵌套式油液磨粒检测技术研究 [D]. 中北大学 ,2024.