附件1 浙江工程师学院(浙江大学工程师学院) 同行专家业内评价意见书

学号: <u>22160327</u>

浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)制

2025年03月24日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护 、军工项目保密等内容,请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告,可另行附页或增 加页数,A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔,亲 笔签名或签字章,不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写,编号规则为:年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4 位+流水号3位,共11位。

一、个人申报

(一)基本情况【围绕《浙江工程师学院(浙江大学工程师学院)工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》,结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准,举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

首先,本人熟练掌握能源动力专业中多相流测试研究方向的基础理论知识。具体到此次工程 实践,主要是采用了数字全息的理论方法,该方法能够对微米级的颗粒物实现粒径、浓度等 多参数的在线实时测量。其次,面对燃煤电厂湿烟气雾滴这一测量场景,详细学习了企业目 前所采用的烟气脱硫技术以及该技术所涉及的整体工作流程、技术标准等行业知识。最后, 为了将数字全息理论用于解决实际工程问题,还对光学、环保、控制等跨专业知识进行了学 习和应用。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

本人在工程实践过程中参与了燃煤电厂湿烟气雾滴在线测量及烟气余热实时深度回收技术研 发项目,主要负责数字全息测量系统方面的研究工作。针对烟气中雾滴颗粒直径很小、浓度 非常低的特点,采用了数字同轴全息技术结合远心成像、脉冲光照明的方法对烟气雾滴颗粒 进行测量,对结合远心成像的数字全息技术的粒径测量测量范围、浓度测量范围进行了研究 ,对不同工作距离、放大倍率的远心镜头的性能进行了分析比较,最终设计了适合烟气雾滴 测量环境的全息测量系统。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

燃煤电厂烟气在经过脱硫塔后会携带一定量的液滴,其中粒径大于15µm的雾滴能够被除雾 器基本脱除,粒径小于15µm将随着烟气进入下游。随着脱硫系统运行时间的延长,除雾器 效率逐渐下降之后,除雾器出口烟气中可能夹带的大量液滴。这些微小液滴中携带了大量的 可溶性盐类、烟尘、石灰石、石膏颗粒,当烟气排放到大气之后,易造成严重的二次污染。 在燃煤电厂湿烟气雾滴在线测量及烟气余热实时深度回收技术研发项目的工程实践中,由于 烟气中的雾滴颗粒粒径微小,大致为5-30µm,同时其组分复杂,是液固多相的含杂液滴。因 的全息成像理论,对不同粒径大小的微米级液滴及含杂液滴的全息图像特性进行研究。 在不同的测量系统参数下,如成像系统、相机像素尺寸、记录距离等,对全息成像的测量准 确性进行了研究。为了适应实际工程应用场景,需要选择合适的成像系统,因此分别考察了 经过显微成像、远心成像系统之后的全息图像特性。而相机像素尺寸大小也对测量微小颗粒 的准确性有着重要影响,当颗粒的粒径小于像素尺寸时,测量误差较大,甚至难以识别。另 外,数字全息记录距离也存在理论上的极限值,在实践中研究了不同记录距离对测量结果的 影响,进而确定了最优的记录距离。

经过以上针对烟气雾滴颗粒的全息成像研究,本工程实践最终采用了数字同轴全息技术结合远心成像、脉冲光照明的方法对烟气雾滴颗粒进行测量。在此光学系统中,有效的测量区域位于成像系统焦平面前方的一段距离内。由于相比普通的显微镜头,远心镜头一般具有较长的工作距离,可以达到65^{~150}mm甚至以上,因此该段测量区域距离镜头镜片有一定间隔距离。同时,远心镜头的景深比显微镜头更大,这在一定程度上扩展了测量体积,在颗粒数浓度较稀疏的场合更具有应用优势。另外,该测量系统中的激光单元与成像单元为独立分置的模块,因此两部分原件易于更换。在测量区域气体流速较大的场合,可以将激光单元中的激光器替换为脉冲激光器,能够解决流速过大造成拖影成像的问题。同时,激光经过准直扩束后形成的圆柱平行光具有比成像透镜更大的直径,这解决了激光单元与成像单元之间的对准问题,给两者的空间匹配留下较大的调整空间。

在完成测量方法的研究后,实践中还针对软件算法进行了研究。研究比较了基于小波变换和 菲涅尔近似的全息重建算法在雾滴颗粒测量方面的适用性,提出了更适合于雾滴颗粒光散射 的全新重建方法。最终,开发了针对烟气雾滴颗粒的全息成像处理软件,包括烟气雾滴颗粒 在重建图像中的定位识别算法,以及颗粒细度的计算方法,并对烟气雾滴颗粒全息图进行了 模拟研究和分析。

在本次工程实践中,通过综合运用能源、光学、计算机等相关所学知识,最终解决了在线测 量湿烟气雾滴的复杂工程问题。 (二)取得的业绩(代表作)【限填3项,须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利 证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实,并提供复印件一份】

1.

公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含 发明专利申请)、软件著 作权、标准、工法、著作 、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申 请时间等	刊物名称 /专利授权 或申请号等	本人 排名/ 总人 数	备注
Experimental Study on Digital Holographic Measurement of Wear Particles in Lubricating Oil of Wind Power Gearbox	核心期刊	2024年03 月06日	新能源进展	1/6	录用

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自 主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方 案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效 益等】

(三)在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况						
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩: 89 分					
专业实践训练时间及考 核情况(具有三年及以上 工作经历的不作要求)	累计时间: 1.3 年(要求1年及以上) 考核成绩: 86 分					
本人承诺						
个人声明:本人上述所填资料均为真实有效,如有虚假,愿承担一切责任, ,特此声明!						
申报人签名: 动板						

,

二、日常表现考核评价及申报材料审核公示结果

日常表现 考核评价	非定向生由德育导师考核评价、定向生由所在工作单位考核评价。 □ 优秀 □ 良好 □ 合格 □ 不合格 德育导师/定向生所在工作单位分管领导签字(公章)
申报材料 审核公示	根据评审条件,工程师学院已对申报人员进行材料审核(学位课程成绩;支业 实践训练时间及考核、学位论文、代表作等情况),并将符合要求的中报材料 在学院网站公示不少于5个工作日,具体公示结果如下: □通过 □不通过(具体原因:) 工程师学院教学管理办公室审核签字(公章): 年月日

浙江大学研究生院

学号: 22160327	姓名: 张柯挺	性别: 男		学院	: 工程师	币学院		专业: 能源动力			学制:2	2.5年
毕业时最低应获: 24	. 0学分	已获得: 2	26.0学	分				入学年月: 2021-09	毕训	毕业年月: 2025-03		-03
学位证书号: 103353	2025602051				毕业证	书号: 103351	202502600039	授予学位:能源动力硕士			动力硕士	
学习时间	课程名称		备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2021-2022学年秋季学期	智慧能源工程案例分析			2.0	94	专业学位课	2021-2022学年秋冬学期	研究生英语		2.0	83	公共学位课
2021-2022学年秋季学期	动力与电气工程工业应用综述			2.0	83	专业选修课	2021-2022学年秋冬学期	中国特色社会主义理论与实践研究		2.0	85	公共学位课
2021-2022学年冬季学期	综合能源系统集成优化			2.0	87	专业选修课	2021-2022学年夏季学期	工程伦理		2.0	89	公共学位课
2021-2022学年冬季学期	智慧能源系统工程			2.0	86	专业学位课	2021-2022学年春夏学期	优化算法		3. 0	96	专业选修课
2021-2022学年冬季学期	智慧能源工程实践			2.0	93	专业学位课	2021-2022学年夏季学期	自然辩证法概论		1.0	95	公共学位课
2021-2022学年冬季学期	能源过程先进控制			2.0	94	专业学位课	2022-2023学年春季学期	研究生英语基础技能		1.0	76	公共学位课
2021-2022学年秋冬学期	研究生论文写作指导			1.0	90	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制,两级制(通过、不通过),五级制(优、良、中、

及格、不及格)。

2. 备注中"*"表示重修课程。

学院成绩校核章: 成绩校核人:张梦依 打印日期:2025-03-31



《新能源进展》录用通知书

张柯挺,金其文,李承浩,林志明,吴学成,吴迎春 同志:

浙江大学能源高效清洁利用全国重点实验室,杭州 310027

你们于 2023 年 12 月 12 日投来的文稿《数字全息测量风电齿轮 箱润滑油中磨粒实验研究》(稿件注册序号: 230148)的修改稿已经 收到。鉴于你们已经参考评审意见做了认真的修改,现决定正式录用 此稿。

特此通知。

《新能源进展》编辑 2024年3月6日

230148

2024 年 12 月

文章编号: 2095-560X (2024) 06-0681-07

数字全息测量风电齿轮箱润滑油中磨粒实验研究*

张柯挺,金其文,李承浩,林志明,吴学成*,吴迎春

(浙江大学,能源高效清洁利用全国重点实验室,杭州 310027)

摘 要:在线监测润滑油中的磨损颗粒对及时评估风力发电机组齿轮箱的运行状态和实现故障预警具有重要意义。 基于数字全息技术搭建了润滑油磨损颗粒在线监测实验系统,对含不同粒径大小、不同浓度磨粒的润滑油进行在线 测量,并将粒径分布测量结果与激光粒度仪的测试结果进行对比,以验证测量系统的可行性与准确性。结果表明, 在 20~350 µm 粒径范围内,全息实验系统的测量结果与激光粒度仪的测量结果一致,中位径 *D*v50 测量误差小于 6%, 能够满足对异常磨损颗粒的监测需求。此外,数字全息技术不仅能够准确测量磨损颗粒大小,还能够同步获取颗粒的 形貌特征,以辅助分析齿轮箱的磨损程度和磨损部位,在润滑油磨粒在线监测领域具有进一步研究的价值。

关键词:数字全息;润滑油;磨损颗粒;在线监测 中图分类号:TK83 文献标志码:A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2024.06.008 CSTR: 32236.14.issn.2095-560X.2024.06.008

Experimental Study on Digital Holographic Measurement of Wear Particles in Lubricating Oil of Wind Power Gearbox

ZHANG Keting, JIN Qiwen, LI Chenghao, LIN Zhiming, WU Xuecheng[†], WU Yingchun (State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: On-line monitoring of wear particles in lubricating oil can help to evaluate the operating status of wind turbine gearbox in time, which is of great significance for the early warning of potential faults. This paper established an online monitoring experimental system of lubricating oil wear particles based on digital holography. The lubricating oil containing different particle sizes and different concentrations of wear particles was measured, and the measurement results were compared with those of the laser particle size analyzer. The results show that in the particle size range of 20-350 μ m, particle size distribution measured by the holographic method is consistent with those of the laser particle size analyzer, and the measurement error of the median diameter D_{v50} is less than 6%. In addition, digital holography can not only accurately measure the size of wear particles but also obtain the morphology characteristics of particles synchronously, which can assist in the analysis of gearbox wear degree and wear part. In conclusion, digital holography is valuable for further research and on-line application in monitoring of lubricating oil wear particles.

Keywords: digital holography; lubricating oil; wear particles; on-line monitoring

0 引 言

近年来,风电作为一种可再生能源发展迅速,随着其累计和新增风机装机容量的不断增长,其运 维问题也日益突出。研究表明,齿轮箱作为风力发 电机组最重要的传动部件之一,一旦发生故障会导 致较长的维修停机时间,产生较高的维修成本^[1]。因 此,研究如何有效监测风电机组齿轮箱运行状态、 实现故障预警,对保证风电机组安全稳定运行和降 低风电场运维成本具有十分重要的现实意义。

目前,针对风电机组齿轮箱的监测主要有振动 状态监测、声发射监测以及油液润滑状态监测^[2-7]。 其中,针对油液润滑状态的监测可以分为对润滑油 理化性能的监测和对油液中磨损颗粒的监测^[1]。研

^{*} 收稿日期: 2023-12-02 修订日期: 2024-03-02

基金项目:浙江省自然科学基金项目(ZCLQ24E0601);国家自然科学基金项目(52276167);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022ZFJH004)

[†] 通信作者: 吴学成, E-mail: wuxch@zju.edu.cn

引用本文: 张柯挺, 金其文, 李承浩, 等. 数字全息测量风电齿轮箱润滑油中磨粒实验研究[J]. 新能源进展, 2024, 12(6): 681-687.

Citation: ZHANG Keting, JIN Qiwen, LI Chenghao, et al. Experimental study on digital holographic measurement of wear particles in lubricating oil of wind power gearbox[J]. Advances in new and renewable energy, 2024, 12(6): 681-687.

究表明,齿轮箱的故障大多发生在轴承和齿轮上, 两者在运行过程中均会产生磨损颗粒^[8]。其产生磨 损颗粒的数量、大小及形貌能够反映齿轮箱的运行 状况及其传动部件之间的磨损情况^[1,9]。通常,齿轮 箱正常运行时产生的磨损颗粒大小约在 1~10 μm 之间,而当齿轮箱进入异常状态时,可以检测到 10~50 μm之间的磨损颗粒^[8,10-11]。当磨损颗粒的尺 寸超过 100 μm 时,则认为设备处于临界状态,具有 较高的故障风险。因此,对油液中磨损颗粒的监测 能够帮助了解齿轮箱轴承及齿轮的磨损状况,适合 为风电机组齿轮箱的故障提供早期预警。

针对润滑油磨损颗粒的监测技术可以分为离线 检测方法和在线检测方法。离线检测方法主要有铁 谱分析法、光谱分析法、颗粒计数法等^[1,12],具有灵 敏度高、检测精度高等优势,但同时也存在成本高、 检测滞后性、取样要求高等缺点[13]。目前,在线检 测方法主要依赖在线磨损颗粒传感器进行,根据工 作原理不同,可以将其分为光电型、导电型、电磁型 和超声波型等。光电型磨粒监测传感器灵敏度最高 (>5µm), 但难以区分铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒, 测量效果易受油液透明度和气泡的影响,且不适合 大流量测量环境[14]。导电型磨粒监测传感器灵敏度 相对较高, MURALI 等^[15]研究了一种检测和计数非 导电润滑油中微量磨损颗粒的装置,能够测量 10~ 25 µm 的磨损颗粒。但该类型传感器存在无法区分 磨粒材质,易受油液理化性能(如酸值、黏度)及水 滴影响等缺点。超声型磨粒监测技术[16-17]能够区分 固体碎屑和气泡,但灵敏度较低(>45 µm),无法区 分金属和非金属颗粒,且检测区域声场的不均匀性 会影响粒径估算的准确性[11,13]。DU 等[18]设计了一种 由超声脉冲传感器和电感式脉冲传感器组合而成的 磨损颗粒传感器,能够区分检测非金属、黑色金属 和有色金属颗粒。电磁型磨粒监测技术应用最广, 可区分铁磁性颗粒和非铁磁性颗粒,检测效果不受 气泡和水滴的影响,但通常只能测量 100 µm 以上的 磨粒^[6,19]。为了提高此类传感器的灵敏性, WU 等^[20] 设计了一种基于微流控芯片的电磁型磨粒监测传感 器,能够检测 5~10 µm 的小颗粒。然而微通道结构 在提高传感器灵敏度的同时也限制了允许通过的流 量,不利于在大型机械设备上的应用。综上所述,不 同磨粒监测技术各有其优点,也存在各自的局限性。

本文基于数字全息技术设计搭建能实时在线监测润滑油磨损颗粒的实验系统。通过模拟实验对含

不同粒径规格磨粒的润滑油分别进行测量,并将测量结果与激光粒度仪的离线测量结果进行比较。另外,数字全息技术作为一种三维测量技术,在测量 磨粒粒径的同时还可获取其二维形貌信息,通过分 析润滑油中磨粒的形貌特征,能够辅助判断齿轮箱 发生的磨损类型和磨损程度,对定位异常磨损位置、 研究磨损机理等具有重要意义。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

实验系统总体结构如图 1 所示,主要由数字全 息光路系统和润滑油循环系统两部分组成。





数字全息光路系统主要由激光器、滤波扩束准 直系统、镜头和相机组成。激光器出射光首先经过 由显微物镜、光学针孔组成的空间滤波器,滤掉光 束中的高频噪声,提高光束质量,然后经过准直透 镜扩束成平行光。平行光照射测量区域流道内的待 测润滑油,润滑油中磨粒的散射光与直透光干涉形 成全息图,被另一侧的高速相机记录。其中,所使用 激光器由法国 OXXIUS 公司生产,型号为 LCX-532, 发射波长为 532 nm 的稳定激光束; CCD 相机由德 国 BASLER 公司生产,型号为 acA2440-75uc,像素 尺寸为 3.45 μm。相机前加装了一个远心镜头,经标 定实验系统实际的等效像素尺寸为 1.72 μm。

润滑油循环系统主要由润滑油箱、电动搅拌器、 蠕动泵和测量区域流道组成,其间采用硅胶管连接 各部件。润滑油箱中装有待测润滑油样,油液中含 有一定数量的磨损颗粒。实验中所用润滑油为适用 于机械设备齿轮箱的 320 号工业齿轮油;磨损颗粒 由不同细度规格的铁粉颗粒替代;润滑油的流速通 过蠕动泵调节,调节范围为 0.1~510 mL/min;电动 搅拌器使磨损颗粒均匀分散在润滑油液中,转速调 节范围为 100~3 000 r/min。

1.2 实验方法

实验采用对照的方法来验证数字全息技术在监 测润滑油磨损颗粒上的可行性与测量准确性。实验 分为实验组和对照组,实验组由图1所示的全息测 量系统测量,对照组采用激光粒度仪测量。

实验组将不同细度规格的铁粉颗粒与未使用的 320 号工业齿轮油以不同比例进行配比作为待测油 液样本。所使用铁粉颗粒的细度规格分别为 100、 200、300、500 和1000 目,该细度规格仅作为铁粉 细度的大致参考。在待测油液样本的具体配置过程 中,控制每次油液容积均为400mL,改变加入其中 的铁粉规格及质量使每组油液样本中所含磨粒的大 小和浓度均不同,具体组别与配比情况见表1。

使用铁粉规格/目组別磨粒质量浓度/(mg/mL)1001-10.1371-21.3522-10.1642002-20.1652-30.6252-40.7873-10.0483-20.0913-30.1383-40.1843-50.2283-60.2683-70.3133-80.3593-90.4083-100.4545004-30.0484-10.0164-20.0314-30.0484-40.0634-50.0784-60.0945-10.0085-20.0155-30.0205-40.033	Table 1 Parameters of the experimental oil samples					
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	使用铁粉规格/目	组别	磨粒质量浓度/(mg/mL)			
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	100	1-1	0.137			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	100	1-2	1.352			
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		2-1	0.164			
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	200	2-2	0.165			
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	200	2-3	0.625			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		2-4	0.787			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		3-1	0.048			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		3-2	0.091			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		3-3	0.138			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		3-4	0.184			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	200	3-5	0.228			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	300	3-6	0.268			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		3-7	0.313			
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		3-8	0.359			
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		3-9	0.408			
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		3-10	0.454			
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		4-1	0.016			
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		4-2	0.031			
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	500	4-3	0.048			
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	300	4-4	0.063			
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$		4-5	0.078			
$\begin{array}{ccccccc} 5-1 & 0.008 \\ 5-2 & 0.015 \\ 5-3 & 0.020 \\ 5-4 & 0.033 \end{array}$		4-6	0.094			
1 000 5-2 0.015 5-3 0.020 5-4 0.033		5-1	0.008			
5-3 0.020 5-4 0.033	1.000	5-2	0.015			
5-4 0.033	1 000	5-3	0.020			
		5-4	0.033			

表1 实验组油液样本参数

采用中国丹东百特公司研发的 Bettersize2600 型激光粒度仪(量程范围 0.02~2600 µm),分别测 量 100、200、300、500 和 1 000 目铁粉的粒径分布。 该组实验采用湿法测量模式,其中分散介质的不同 会影响铁粉能否均匀分散在溶液里,从而影响测量 准确性。通用的分散介质一般为去离子水、乙醇、甘 油等[21]。本实验选择去离子水作为分散介质,六偏 磷酸钠作为分散剂,其与铁粉无化学反应且无毒无

害,制备好的分散系统状态稳定,铁粉颗粒无溶解 或集聚现象,能够满足测量要求。

1.3 数据处理

采集到润滑油中的颗粒全息图后, 需先对全息 图进行一系列图像处理才能获取所需要的颗粒信息, 其主要过程为去噪、小波重建、景深拓展、颗粒识 别、孔隙填充等。全息图处理具体流程如图2所示。



Fig. 2 Flowchart of hologram processing

1.3.1 预处理

在预处理过程中,首先需要预先记录润滑油未流 过测量区域时的空白全息图作为背景图 $I_{bg}(x, y)$ 。 后续将待处理全息图 $I_{or}(x,y)$ [图 3 (a)] 及背景图 灰度化,并通过背景相减法进行去噪处理:

$$I_{\rm bd}(x,y) = I_{\rm or}(x,y) - I_{\rm bg}(x,y)$$
(1)

式中: 下标 bd 表示去噪后的全息图, or 表示原始待 处理全息图, bg 表示空白背景全息图。



图 3 (a)原始全息图;(b)景深拓展图;(c)二值化图 像; (d) 磨粒在测量体积内的三维分布

Fig. 3 (a) Raw hologram; (b) depth-of-field extended image; (c) binary image; (d) 3D distribution of wear particles in the measurement volume

采用小波重建方法^[22-23]对去噪后的全息图进行 重建。在基于线性不变系统的小波重建算法中,重 建图像的光强*I*(*x*,*y*,*z*)可表示为:

$$I(x, y, z) = 1 - I_{bd}(x, y) \otimes \psi_{\alpha}(x, y) =$$

$$1 - I_{bd}(x, y) \otimes \left\{ \frac{1}{\alpha^{2}} \left[\sin\left(\frac{x^{2} + y^{2}}{\alpha^{2}}\right) - M_{\psi} \right] \exp\left(-\frac{x^{2} + y^{2}}{\alpha^{2} \sigma^{2}}\right) \right\}$$
(2)

式中: $I_{bd}(x,y)$ 为去噪后全息图的强度分布, $\psi_{\alpha}(x,y)$ 为校正的小波函数; $\alpha = (\lambda z/\pi)^{1/2}$ 为尺度参数; σ 为 窗 函 数 的 带 宽 因 子 。 调 零 参 数 $M_{\psi} = \sigma^2 / (1 + \sigma^4)$, 使得 $\psi_{\alpha}(x,y)$ 平均值为零。采用 上述重建方法,可获得一系列不同深度的重建图像。 1.3.3 景深拓展

为了便于分析颗粒信息,采用基于小波分解的 景深拓展方法^[24]将不同深度的重建图像合成为一张 景深拓展图,如图3(b)所示,使所有颗粒以聚焦 形态呈现。

1.3.4 二值化

获得景深拓展图后通过设置亮度阈值将颗粒识 别出来,生成二值化图像,如图3(c)所示。采用 全局阈值法^[25],即设定一个全局亮度阈值*I*_{th},对*I*_{eff} 进行二值化处理:

$$I_{bw}(x, y, z) = \begin{cases} 1, I_{efi}(x, y, z) > I_{th} \\ 0, I_{efi}(x, y, z) \le I_{th} \end{cases}$$
(3)

式中:下标 th 表示设定的阈值, efi 表示景深拓展 图, bw 表示二值化结果。

1.3.5 颗粒信息获取

通过计算机图像处理技术可以将二值化图像进行孔隙填充,计算颗粒等效粒径,统计粒径分布,定位颗粒三维位置,如图3(d)所示,获取颗粒形貌特征参数等。

对于磨粒等效粒径的表征,本文采用等效面积 圆直径来进行计算,其计算公式为:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{4}$$

式中: *A* 为颗粒图像的面积, 通过颗粒占据的像素 点数目来求取。

2 实验结果与分析

2.1 粒度分布测量结果比较

通过图像处理算法对所有全息图完成处理后, 依据测量方法和使用的铁粉规格不同,分组统计所 有有效颗粒。根据各组颗粒的等效粒径,以体积分 布绘制了实验组、对照组的粒度累积分布曲线,结 果如图 4 所示。



Fig. 4 Comparison of particle size distributions measured by holographic method and laser particle size analyzer

从各组的粒度累积分布曲线来看,对于较大磨 粒(100、200、300 目)的测量,如图 4(a ~ c) 所示,两种测量方法所得出的粒度累积分布曲线的 形态相当接近,表明全息系统的测量结果与激光粒 度仪的测量结果一致性较高;而对较小磨粒(500、 1000 目)的测量,如图 4(d、e)所示,激光粒度 仪测得的粒径分布结果显示 0 ~ 20 μm 的磨粒占比 超过了 50%,明显大于全息测量方法的测量结果。

为了更好地比较两种测量系统在粒径测量结果 上的差异,引入颗粒粒径分析中典型的指标 Dv50 来 进行分析。Dv50 是指样品的累计粒度分布百分数达 到 50%时所对应的粒径,也被称为中位径或中值粒 径,可以用来表示粉体的平均粒度。分别对实验组 和对照组的数据计算中位径 Dv50,结果见表 2。

表 2 中位径 D_{v50} 及误差分析 Table 2 Median diameter D as and error analy

Table 2 Median diameter Dyso and error analysis							
组돼	实验组	对照组	绝对误差/	相对误差/			
20.01	$D_{ m v50}/\mu{ m m}$	$D_{ m v50}/\mu{ m m}$	μm	%			
100 目	199.69	211.40	11.71	5.54			
200 目	42.12	40.55	1.57	3.87			
300 目	41.65	39.75	1.90	4.78			
500 目	28.95	18.36	10.59	57.68			
1 000 目	30.04	18.39	11.65	63.34			

从表 2 中可以看出, 在测量 500 目和 1 000 目 铁粉时,实验组与对照组的 D_{v50} 误差较大,绝对误 差分别为 10.59 µm 和 11.65 µm,相对误差分别达到 了 57.68%和 63.34%。该误差的产生一方面可能是由 于激光粒度仪对小颗粒(0~20 µm)占比的高估。 有研究表明^[26],分别采用筛分法和光散射法测量煤 粉粒度,在小粒径(<20 µm)范围内激光粒度仪会 高估小颗粒的占比,造成整体测量结果偏细。而另 一方面由于系统分辨率的限制,图像法在数据处理 的过程中容易产生误差。本实验中,实验组系统拍 摄到的图像的单位像素尺寸为 1.72 µm,而经过图像 识别后颗粒的整体像素点数目会受到成像质量以及 亮度阈值选取的影响,从而引入误差。针对小颗粒 而言,由于原本所占的像素点较少,则更容易把误 差放大化。

整体而言,基于数字全息技术搭建的润滑油磨 粒监测系统能够覆盖磨粒监测需求的粒径测量范围 并具有良好的测量准确性。虽然对小颗粒的测量存 在一定的误差,但考虑到 0~20 μm 范围内的小颗粒 基本属于润滑油中的正常磨损颗粒。针对风力发电 机组齿轮箱润滑油磨损颗粒的监测重点在于对较大 异常磨损颗粒的准确识别,小颗粒的测量误差对测 量系统整体的功能实现影响不大。因此,基于数字 全息技术的润滑油磨粒监测方法在磨粒在线监测领 域依然具有相当广阔的应用前景。

2.2 磨粒浓度影响分析

在风电齿轮箱润滑油磨粒监测的过程中,润滑 油中含有的磨粒数量会随着风电机组的运行时间逐 渐增多。磨粒浓度的改变是否会对全息测量的准确 性产生影响是一项值得探究的内容。

以测量 300 目规格铁粉的实验组为例,共计 10 组,每组油液的磨粒浓度逐渐增加,具体配比情况 已在表 1 中列出。其中,颗粒浓度较低的 3-1 实验 组待测油液样本的磨粒质量浓度约为 0.048 mg/mL, 颗粒浓度较高的 3-10 实验组待测油液样本的磨粒质 量浓度约为 0.454 mg/mL,两者的磨粒质量浓度相差 近 10 倍。

分别统计实验组 3-1 组和 3-10 组的磨粒粒径分 布情况,以体积分布绘制成粒度累积分布曲线,如 图 5 所示,两者的粒度累积分布曲线形态接近。针 对该两组实验的数据,分别计算其 D_{v50},得到 3-1、 3-10 实验组的 D_{v50}分别为 40.71、40.43 μm,两者结 果同样相近。结果初步表明,全息测量系统在较低 磨粒浓度下测得的磨粒粒径结果与在较高磨粒浓度 下测得的结果基本一致。





考虑到 300 目铁粉本身存在一定的粒度分布差 异,每次取样可能存在一定的粒度偏差,因此对相 近磨粒浓度的油液进行了平行实验,其结果见表 3。 其中,第一组平行实验中的第三次实验所测得的 D_{v10}、D_{v50}和D_{v90}指标均略小于其他两次实验,第二 组平行实验中的第一次实验测得的D_{v90}指标也略微 偏小。这证实了相同磨粒浓度下,不同次取样的铁 粉存在一定的粒度差异,会导致最终测量结果相近 但不完全相同。

表 3 相近磨粒浓度下 300 目铁粉平行实验测量结果 Table 3 Results of parallel experiments of 300 mesh iron powder under similar wear particle concentration

	1		1		
实验 组号	实验 次数	磨粒质量浓度/ (mg/mL)	$D_{ m v10}/\mu m m$	$D_{\rm v50}/\mu{ m m}$	$D_{ m v90}/\mu{ m m}$
	1	0.187	19.83	38.57	59.90
1	2	0.180	21.92	39.20	59.00
	3	0.186	17.30	36.13	56.15
	1	0.313	19.24	37.20	56.18
2	2	0.308	18.86	37.02	60.91
	3	0.311	19.25	38.93	61.21

对测量 300 目规格铁粉的 10 个实验组分别计算 D_{v10}、D_{v50}和 D_{v90} 三个特征粒径指标,如图 6 所示。 10 组实验所测得三个特征指标虽由于铁粉取样偏差 有所差异,但基本保持在一个相近的范围内,随着 磨粒浓度的增加并没有出现趋势性的变化。实验表 明,在润滑油的磨粒浓度适用全息测量方法的前提 下,润滑油中磨粒浓度的改变对粒径测量结果的影 响不大。



2.3 磨粒形貌特征分析

数字全息技术除了能够在线监测风力发电机齿 轮箱润滑油磨粒的粒径,还能够观测磨粒的形貌。 磨粒的形貌特征对判断磨损类型、分析磨损机理等 具有重要意义。例如,正常滑动磨粒通常呈圆形或 椭圆形,表面较为光滑,而严重滑动磨粒则通常呈 多边形或不规则形状,表面存在明显的切削痕迹。

借助图像处理技术,数字全息技术可实现对磨 损颗粒周长、面积、凸包面积、长短轴、圆形度、扁 平度、偏心率、棱角度、凹度等众多形状特征参数的 监测。如图 7 所示,选取几种形状较典型的颗粒为 例进行形貌分析,部分参数的分析结果见表 4。



图 7 磨粒形貌 Fig. 7 Morphology of wear particles

表 4 磨粒形貌特征参数分析结果

Table 4 Analysis of wear particle morphology characteristic

		parameters		
磨粒	面积/μm ²	长轴/µm	短轴/μm	圆形度
颗粒1	3 769.00	91.98	54.38	0.81
颗粒 2	6 943.36	95.59	92.70	0.96
颗粒3	1 778.00	135.92	22.04	0.26

由于实验中润滑油里的磨损颗粒实际为不同细 度规格的铁粉颗粒,并不是典型的磨损颗粒。目前 难以通过磨粒的形貌特征对磨粒的磨损类型进行识 别判断。后续对于实际的润滑油磨损颗粒可以采用 相同的形貌分析方法,提取其形貌特征参数,结合 神经网络、深度学习等算法来判断颗粒的磨损类型, 从而辅助判断齿轮箱的磨损程度、磨损部位等。

3 结 论

设计搭建了基于数字全息技术的风力发电机组 齿轮箱润滑油磨损颗粒在线监测系统,对含不同粒 度规格、不同浓度铁粉颗粒的润滑油样本进行了测 量,并将测量结果与激光粒度仪的测量结果进行对 照,主要结论如下:

(1)搭建的全息测量系统对于较大磨损颗粒
(>20 μm)的测量与激光粒度仪的测量结果一致
性较好,其中位径 D_{v50}测量误差小于 6%;对 0~
20 μm 的小颗粒测量误差较大,但对实际异常磨损
颗粒的监测影响不大。

(2)在颗粒浓度处于适用全息测量方法的前提 下,润滑油中磨粒的浓度变化对粒径测量结果的准 确性影响不大。

(3)数字全息测量技术能同步获取磨粒二维形 貌信息,在磨粒材质识别、磨损类型区分、磨损机理 分析、磨损部位定位等方面具有进一步研究的价值。

参考文献:

- HAMILTON A, QUAIL F. Detailed state of the art review for the different online/inline oil analysis techniques in context of wind turbine gearboxes[J]. Journal of tribology, 2011, 133(4): 044001. DOI: 10.1115/1.4004903.
- [2] LU B, LI Y Y, WU X, et al. A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis[C]// 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. Lincoln, NE, USA: IEEE, 2009: 1-7. DOI: 10.1109/PEMWA.2009.5208325.
- [3] SALAMEH J P, CAUET S, ETIEN E, et al. Gearbox condition monitoring in wind turbines: a review[J]. Mechanical systems and signal processing, 2018, 111: 251-264. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.03.052.
- [4] TCHAKOUA P, WAMKEUE R, TAMEGHE T A, et al. A review of concepts and methods for wind turbines condition monitoring[C]//2013 World Congress on Computer and Information Technology (WCCIT). Sousse, Tunisia: IEEE, 2013: 1-9. DOI: 10.1109/WCCIT.2013.6618706.
- [5] ZHAN Y M, MAKIS V. A robust diagnostic model for gearboxes subject to vibration monitoring[J]. Journal of sound and vibration, 2006, 290(3/5): 928-955. DOI: 10.1016/j.jsv.2005.04.018.
- [6] ZHANG L, YANG Q. Investigation of the design and fault prediction method for an abrasive particle sensor used in wind turbine gearbox[J]. Energies, 2020, 13(2): 365. DOI: 10.3390/en13020365.
- [7] ZHU J D, YOON J M, HE D, et al. Online particlecontaminated lubrication oil condition monitoring and remaining useful life prediction for wind turbines[J]. Wind energy, 2015, 18(6): 1131-1149. DOI: 10.1002/we.1746.
- [8] MAO H J, ZUO H F, WANG H. Electrostatic sensor application for on-line monitoring of wind turbine gearboxes[J]. Sensors, 2018, 18(10): 3574. DOI: 10.3390/s18103574.
- [9] HAMILTON A, CLEARY A, QUAIL F. Development of a novel wear detection system for wind turbine gearboxes[J]. IEEE sensors journal, 2014, 14(2): 465-473. DOI: 10.1109/JSEN.2013.2284821.
- [10] ZHU L, WANG Y S, ZHANG W X, et al. tdEIT and Unetbased rapid imaging of redistributed wear particles in lubricating oil[J]. Tribology international, 2023, 177: 107981. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107981.
- ZHU X L, ZHONG C, ZHE J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring-a review[J]. Tribology international, 2017, 109: 473-484. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.01.015.
- [12] 龚卿青,白文斌,李凯,等.油液磨粒检测技术研究现 状与发展趋势[J].中北大学学报(自然科学版),2021, 42(6):564-576.DOI:10.3969/j.issn.1673-3193.2021.06.012.
- [13] JIA R, WANG L Y, ZHENG C S, et al. Online wear particle detection sensors for wear monitoring of mechanical equipment—a review[J]. IEEE sensors journal, 2022,

22(4): 2930-2947. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3131467.

- HONG W, CAI W J, WANG S P, et al. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: a review[J]. Chinese journal of aeronautics, 2018, 31(5): 867-882. DOI: 10.1016/j.cja.2017.11.016.
- [15] MURALI S, XIA X G, JAGTIANI A V, et al. Capacitive Coulter counting: detection of metal wear particles in lubricant using a microfluidic device[J]. Smart materials and structures, 2009, 18(3): 037001. DOI: 10.1088/0964 -1726/18/3/037001.
- [16] EDMONDS J, RESNER M S, SHKARLET K. Detection of precursor wear debris in lubrication systems[C]//2000 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8484). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2000: 73-74. DOI: 10.1109/AERO.2000.877884.
- [17] XU C, ZHANG P L, WANG H G, et al. Ultrasonic echo waveshape features extraction based on QPSO-matching pursuit for online wear debris discrimination[J]. Mechanical systems and signal processing, 2015, 60-61: 301-315. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.01.002.
- [18] DU L, ZHE J. An integrated ultrasonic-inductive pulse sensor for wear debris detection[J]. Smart materials and structures, 2013, 22(2): 025003. DOI: 10.1088/0964-1726/ 22/2/025003.
- [19] WANG C Y, ZHANG H P, HUO D, et al. A sensor containing high permeability material for mechanical wear particle detection[J]. Sensors and actuators a: physical, 2023, 349: 114075. DOI: 10.1016/j.sna.2022.114075.
- [20] WU Y, ZHANG H P, ZENG L, et al. Determination of metal particles in oil using a microfluidic chip-based inductive sensor[J]. Instrumentation science & technology, 2016, 44(3): 259-269. DOI: 10.1080/10739149.2015.1116007.
- [21] 隋修武,李瑶,胡秀兵,等.激光粒度分析仪的关键技术及研究进展[J].电子测量与仪器学报,2016,30(10): 1449-1459. DOI: 10.13382/j.jemi.2016.10.001.
- [22] LIEBLING M, BLU T, UNSER M. Fresnelets: new multiresolution wavelet bases for digital holography[J]. IEEE transactions on image processing, 2003, 12(1): 29-43. DOI: 10.1109/TIP.2002.806243.
- [23] WU X C, WU Y C, ZHOU B W, et al. Asymmetric wavelet reconstruction of particle hologram with an elliptical Gaussian beam illumination[J]. Applied optics, 2013, 52(21): 5065-5071. DOI: 10.1364/AO.52.005065.
- [24] YINGCHUN W, XUECHENG W, JING Y, et al. Waveletbased depth-of-field extension, accurate autofocusing, and particle pairing for digital inline particle holography[J]. Applied optics, 2014, 53(4): 556-564. DOI: 10.1364/ AO.53.000556.
- [25] PU S L, ALLANO D, PATTE-ROULAND B, et al. Particle field characterization by digital in-line holography: 3D location and sizing[J]. Experiments in fluids, 2005, 39(1): 1-9. DOI: 10.1007/s00348-005-0937-0.
- [26] 金其文,陈锡炯,李培,等.光散射法和筛分法测量煤 粉粒度对比与转化研究[J].能源工程,2022,42(5):16-21. DOI: 10.16189/j.cnki.nygc.2022.05.005.

作者简介:

张柯挺(1993-),男,硕士研究生,主要从事多相流颗粒物 测量研究。

吴学成(1978-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事 多相流光学诊断研究。