

涡流传感器在前沿工程技术领域的应用综述

李世震

长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2022年9月15日; 录用日期: 2022年12月1日; 发布日期: 2022年12月7日

摘要

涡流传感作为近年国内外传感器发展的热门领域之一, 日益得到重视和应用。涡流传感器可以实现非接触测量金属导体表面多种物理量, 具有结构简单, 灵敏度高, 频率响应宽, 不受油污等介质影响, 抗干扰能力强等特点。本文首先对涡流传感的原理和关键技术进行了详细介绍, 然后论述了涡流传感器在前沿工程技术领域的应用, 综述了国内外研究新进展, 最后分析了当前涡流传感技术面临的瓶颈并对未来的发展趋势进行展望。

关键词

涡流传感器, 关键技术, 应用领域, 发展趋势

Summary of the Application of Eddy Current Sensors in the Frontier Engineering Technology Fields

Shizhen Li

College of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: Sep. 15th, 2022; accepted: Dec. 1st, 2022; published: Dec. 7th, 2022

Abstract

Eddy current sensing, as one of the hot fields of sensor development at home and abroad in recent years, has received increasing attention and applications. The eddy current sensor can realize the non-contact measurement of various physical quantities on the surface of the metal conductor. It has the characteristics of simple structure, high sensitivity, wide frequency response, not affected by oil and other media, and strong anti-interference ability. This article first introduces the principles and key technologies of eddy current sensing in detail, then discusses the application of eddy current sensors in the field of cutting-edge engineering technology, reviews the new research

progress at home and abroad, finally analyzes the bottlenecks faced by the current eddy current sensing technology and prospects for future development trends.

Keywords

Eddy Current Sensor, Key Technology, Application Field, Development Trend

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金属导体内部在外界磁场变化的作用下产生感应电流，这种电流如水中旋涡一样在导体内部转圈，因此称之为涡流或电涡流，这种现象就是涡流效[1] [2]。涡流传感器利用涡流效应，将一些无法直接测量的非电量信息转化为可由电路直接测量的线圈阻抗、电感及品质因数等信息[3]。近年来，在前沿工程技术领域航空发动机带冠叶片的振动检测、盾构机滚刀的磨损监测、石油钻探管道缺陷检测及钻轴工况监测中得到一系列应用并表现出极大的应用潜力。

涡流传感技术领域的四大核心问题是测量范围、测量精度、灵敏度及线性度[4] [5]。为解决上述四个问题，人们开展了两个方面的技术研究。一是涡流传感器的设计与构型，实际上涡流传感器由线圈和被测金属导体共同组成，因此它的设计和使用必须考虑被测金属导体的物理性能和几何参数，这决定了涡流传感的测量范围与精度。二是测量转换电路，根据涡流传感器原理，被测参量先转换为传感器线圈的阻抗、电感和品质因素，再由电路将这三个参数转换为电压或电流输出[6] [7]，测量转换电路的优良设计标明了传感器测量的灵敏度与线性度。本文详细介绍了涡流传感的关键技术，综述国内外涡流传感技术在前沿工程技术领域的最新研究进展，同时概括现有涡流传感器技术面临的主要问题，并对其未来发展进行展望。

2. 涡流传感器关键技术

涡流传感器线圈和测量转换电路是涡流传感的技术核心。目前，国内外从线圈形状、材质、绕制方式、匝数、磁芯形状等角度，对传感器线圈开展了大量且详实的基础性研究，同时对测量转换电路进行搭建与优化。涡流传感器凭借自身大范围、高精度、高灵敏度及非接触测量的特性，与其他传感器相比处于优势地位，在前沿工程技术领域得到广泛应用，其工作原理如图 1 所示。

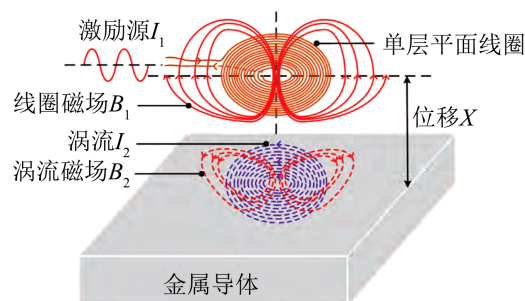


Figure 1. Working principle diagram of eddy current sensor

图 1. 涡流传感器工作原理图

2.1. 传感器线圈

线圈作为涡流传感器的核心部件, 激发被测金属介质内涡流磁场的形成, 通过与被测物体之间磁场耦合将被测物理量转换为阻抗等信号。其几何形状、尺寸、材质、绕制方式、匝数、磁芯的形状以及线圈的激励频率等参数均影响涡流的大小[8] [9]。吴斌[10]分析涡流传感器内部线圈弯曲的不同角度对模拟裂纹缺陷方向角及深度检测能力影响的变化规律, 随着线圈弯曲角度的增加, 涡流传感器对裂纹的检测灵敏度呈现快速下降的趋势, 且下降幅度与线圈弯曲角度呈正相关。荣锋则[11]从线圈的半径、厚度、匝数和激励频率出发, 探究线圈相关参数与电感值的关系。实验测得线圈直径不大于 40 μm 、内半径 0.1 mm、外半径为 2.5 mm 的 60 匝单层漆包线圈具有最佳的电感灵敏度和测量分辨率, 并采用半径 5.5 cm, 厚度 0.5 cm 的圆形铜板作为被测体进行实际测量, 验证结论的真实性。程玉龙[12]在使用铁氧体作为磁芯材料的前提下, 选择 3 种不同的磁芯形状: 半圆形、罐型和空罐型; 同时选取了 2 种线材用于线圈烧制: 适用于高频电路的利兹线和小截面线。为避免周围环境因素的影响, 使用固定的实验台进行测试, 实验结果表明使用合适的磁芯形状和利兹线可以大幅度提高线圈的检测性能。N. O. Romero-Arismendi [13]通过对探针特性的优化来提高涡流传感器的测量精度, 使用四个探头和不同的线圈, 为每个探针进行设计和构造。分析励磁线圈填充系数和内径变化对涡流探头的平均灵敏度影响, 结果表明探头灵敏度与励磁线圈内径和填充系数之间存在很强的依赖性, 实际测量出优化探头的测量精度是未优化探头的两倍。Matthias Arndt [14]通过薄膜技术开发了一种新型的用于监测深冲过程中物料流动的涡流传感器, 将光刻技术、电镀铜技术和嵌入光敏聚酰亚胺技术结合制造晶圆级线圈, 直接将线圈建立在不锈钢基板的上部, 增强其附着力、耐磨性和耐压性, 通过有限元分析(EFA)在深冲工具中涡流传感器具有大范围高精度的特性。因此, 线圈的结构设计是提升涡流传感器检测精度、范围和灵敏度等核心的关键。

2.2. 测量转换电路

根据涡流传感器工作原理, 测量转换电路是传感器信号处理的硬件基础和关键环节, 直接影响传感器的灵敏度与线性度, 决定其测量精度, 因此国内外对测量转换电路的各核心组成部分进行了优化设计并深入研究。

辛佳兴[15]针对管道变形内部检测探头环向检测面积较小的问题, 设计了一款涡流变形检测探头的机械结构和电路系统, 如图 2 所示。该电路主要由磁性敏感元件、高精度放大器、高精度电阻、电容组成, 其主要功能包含滤波、放大、芯片固定等。通过数值模拟和实验表明该探头结构和电路的设计增加了管道环向检测的面积, 变形测量精度可达到 1 mm。Sun, Maolin [16]提出一种改进的涡流传感器驱动电路, 将具有功率提升功能的晶体振荡电路代替传统的振荡器电路, 改进后的调制电路具有结构简单, 可靠性高等特点, 由于其良好的线性度和灵敏度, 在磁悬浮系统关键部件的检测备受瞩目。Li, Manhong [17]从激励电路、信号转换电路、温度补偿电路和非线性补偿电路四个方面进行设计, 大幅度提升涡流传感器的灵敏度、品质因数、温度稳定性和线性度。可应用在微量位移测量、导电介质缺陷以及设备运行状态检测等工业领域。Anil Kumar, A.S. [18]开发了一种新型涡流 360° 范围非接触角传感器, 并对信号调节电路进行优化设计, 通过简单而有效的算法即可获得在整个圆形范围角度测量值与信号的线性输出关系。搭建涡流传感器实验平台, 实验测得其分辨率高达 0.08°, 最大非线性度为 0.25%, 具有高可靠性和高分辨率。而后 Anil Kumar A. S. [19]在基于涡流传感技术的新型非接触式位移传感器的前提下, 提出一种信号调节电路, 该电路可测量两个线圈之间的电感差异, 并通过算法将电感值转化为位移值, 测量范围为 80 mm, 误差小于 1.65%, 适用于垂直有限空间范围的测量。吕春峰[20]为提高变面积式涡流位移传感器灵敏度和测量速度, 采用差动结构线圈布局和不平衡阻抗桥式测量电路。将 4 MHz 晶振频率的石英晶体

用于正弦波振荡电路, 借鉴马克斯维尔——维恩电桥结构设计阻抗桥测量电路, 而信号调理电路由 PCB 工艺设计制作, 通过实验验证, 该系统具有响应速度快、灵敏度高优点, 满足测量要求。

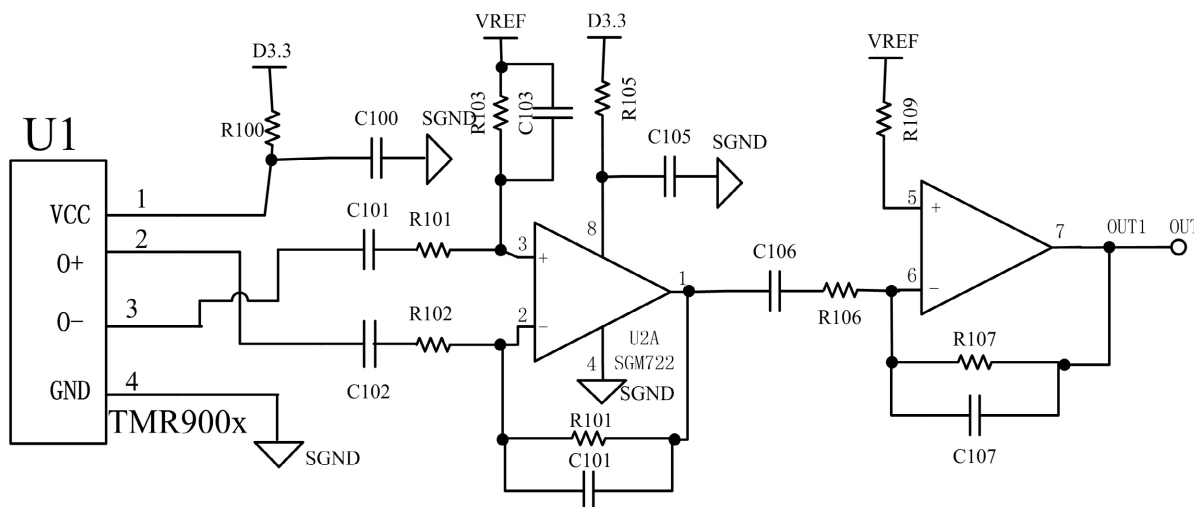


Figure 2. Circuit diagram of operational amplifier
图 2. 运算放大电路图

3. 应用领域

涡轮叶片是航空发动机最重要的零部件之一, 向着高性能、高可靠的方向发展[21] [22] [23] [24], 而带冠叶片作为涡轮机的工作叶片, 恶劣的工作环境极易导致叶片产生疲劳破坏, 对航空发动机的安全产生极大的安全隐患, 因此对叶片稳定性与可靠性要求越来越高, 对带冠叶片的振动测量具有重要意义[25] [26]。旋转机械通常工作在高温蒸气环境中, 光纤、电容式等类型传感器不适合用于在线监测。而涡流传感器凭借着自身非接触、不受油污、水蒸气等高温工作环境影响的优势, 是极为理想的叶片振动测量传感器, 因此涡流传感器表现出极大的应用潜力。

邢琛[27]为实现对发动机叶片振动情况的非接触式测量, 提出基于变面积型涡流传感器带冠叶片振动测量技术。并在汽轮机末级带冠叶片上进行振动测量试验, 结果表明, 涡流传感器能准确测量带冠叶片振动的幅值和频率, 可以应用在实际叶片的振动测量中。V. Sridhar and K. S. Chana [28]针对光学、电容、霍尔效应等传感器在缺乏主动冷却的条件下无法长时间在高于 400℃ 的温度环境中持续检测的问题, 开发出一种新的高温涡流传感器, 因其具有极好的鲁棒性足以承受恶劣的环境, 可用于测量温度显著较高的燃气涡轮发动机中定子与转子的振动参数。而后 Sridhar, V. [29]在此基础上又加以改良, 使涡流传感器能够在 1400℃ 的高温下工作, 在喷气式发动机高压涡轮中降低叶片的高度增加叶尖间隙, 并且在最低和最高运行速度下进行测量。发现该传感器可以在恶劣的环境下持续工作, 具有足够的敏感性和极强的生存能力。由于汽轮机末级叶片采用整体护罩、中跨和榫卯设计, 造成非接触测量叶片振动参数的复杂性, 因此 Z. Kubín [30]设计一种新型涡流传感器测量叶片振动, 并提供叶尖测量和标定方法, 建立传感器与叶片之间的测量模型, 通过实验验证该模型的正确性。Nidhal Jamia [31]针对光学传感器在测量时对污染物耐受性较低的不足, 提出涡流传感器对汽轮机叶片振动情况监测方案。因其自身对污染物和粉尘碎片的不敏感性, 在保持较高精度测量的同时, 可适用于恶劣环境下的振动测量, 实验装置如图 3 所示。由于对汽轮机末级叶片灵活操作带来的运行工况不稳定, 事故发生频率高, 同时为满足非接触式健康监测的要求, YE-De-chao [32]提出一种基于高频涡流传感器的汽轮机带冠叶片振动测量的方法。同时

改进叶尖定时(BTT)技术, 可用于测量叶片的同步振动, 当叶片尖端速度达到 624m/s 时, 高频响应涡流传感器依然可以有效的工作。

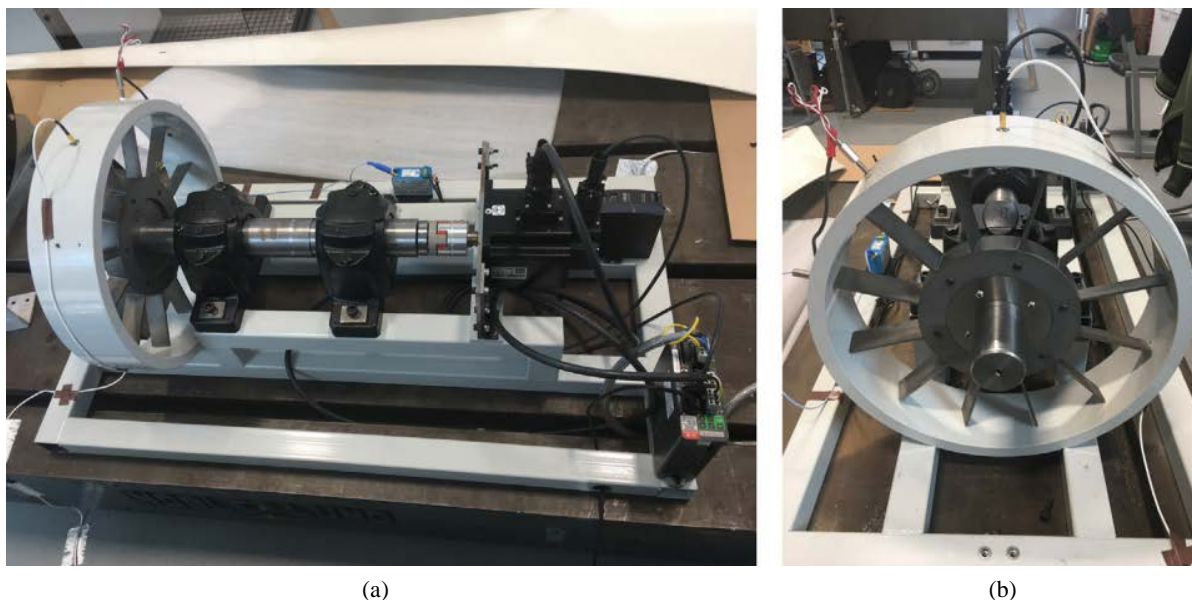


Figure 3. (a) Test rig setup and (b) Mounting of the sensors on the casing
图 3. (a) 测试装置的安装和 (b) 涡流传感器安装在套管上

由于隧道工程和地铁施工项目等地下空间基础设施建设日益增多, 盾构机 TBM (tunnel boring machine) 已经成为我国地下资源开发以及基础建设中关键性前沿机械设备[33] [34]。地下岩层结构的复杂性以及工作环境的恶劣性, 盾构机在掘进过程中盘型滚刀及刮刀直接与岩石接触造成磨损, 进而影响设备的工作性能。因此为了保证盾构机正常持续高效的工作, 需要在其工作期间对盘型滚刀磨损情况进行实时监测, 从而为盘型滚刀的检修更换、掘进过程中相关参数的调节及提供盾构机高效率施工的参数依据[35] [36]。由于涡流传感器具有体积小, 高精度, 非接触, 非金属如水、土壤、岩石及灰尘等介质对检测结果不会造成影响等特点, 被广泛应用于盾构机盘型滚刀磨损状况的实时监测。

Wang, Fei [37]研究了涡流传感器的线圈几何参数和电路结构, 采用 Ansoft Maxwell 仿真进行优化, 设计了一种用于测量 TBM 圆盘铣刀磨损的涡流传感器测量电路, 如图 4, 通过对 17 英寸的圆盘铣刀进行实际测量, 满足磨损量的测量要求。Lan, Hao [38]基于涡流传感器在线测量系统, 比较了三种类型的岩石和泥水混合物对测量数据的影响, 并在多功能圆盘滚刀性能测试台上进行功能实验, 又在 TBM 项目中对圆盘滚刀进行实时连续测量, 结果表明, 涡流传感器可以解决圆盘滚刀被岩石覆盖后测量不准确问题。Daniely G [39]以检测远距离(12 mm)金属物体为目标, 设计了一种振荡器拓扑结构, 该结构使用了提供负跨导效应的交叉耦合振荡器, 部分电路如图 5 所示, 该电路具有低偏置电流和小功耗等优势。曹清香[40]针对柴油机为动力的大型设备轴瓦磨损的问题, 研制出一种能够有效安全检测的涡流传感器, 通过测量主轴瓦的下止点到传感器的距离, 反映磨损量的数值, 并借助 STM32F407IGT6 和 DP83848 芯片为核心进行数据处理和传输, 对主轴承磨损量实时监控和报警。邓绍海[41]则针对低速二冲程柴油机轴承按时间拆机检修对自身安装精度的破坏性影响, 提出以涡流传感器为基础的轴承工况监控系统。通过获取柴油机十字头位移的微小变化和 500 小时的自学习过程确定轴承的正常工作范围, 准确把握检修时间降低损坏。

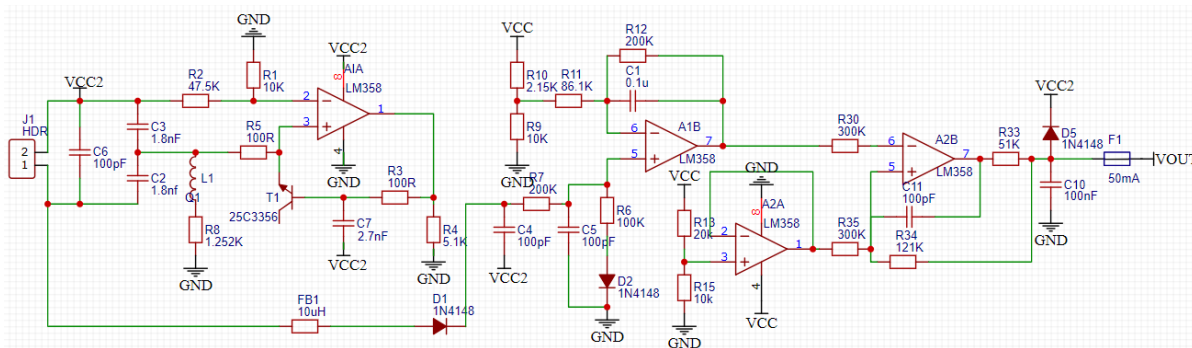


Figure 4. Circuit design of eddy current sensor

图 4. 涡流传感器电路设计

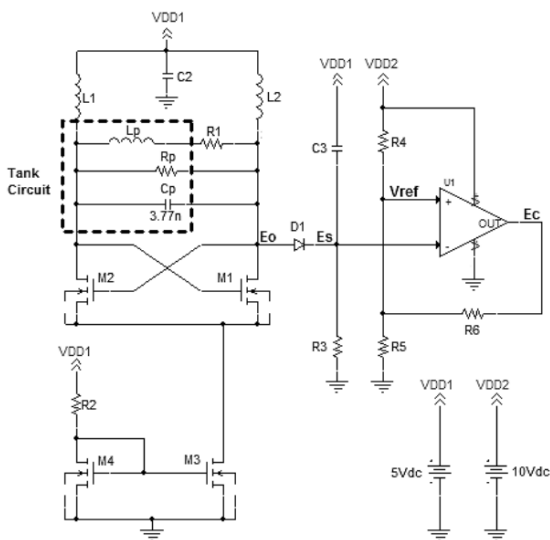


Figure 5. Sensor with negative resistance oscillator

图 5. 带负电阻振荡器的传感器

石油钻探中修井管柱工作环境复杂，在常规作业中水平井垂直段、造斜段和水平段下入过程中要受到多种交变载荷的共同作用，极易形成缺陷[42] [43]。程强强[44]采用涡流传感技术针对连续油管使用过程中常见的管道腐蚀、裂纹缺陷和椭圆度缺失等问题进行检测，具有检测速度快、效率高、稳定可靠等特性。由于井下金属管道壁厚测量对于管道的评估和维护具有重要意义，Sun, H. [45]采用涡流传感技术对管道进行定期检查以防止管道出现故障。采用拟牛顿法并结合实验验证得出涡流传感具有较高的测量精度和短时间测量特性。Chu, ZQ [46]开发出具有高检测能力、极低功耗、兼容物联网的涡流传感器，对埋在地下或分布于海底的石油天然气管道中不同裂纹尺寸的一维分布裂纹进行识别和定位，功耗低至 0.625 uW，与其他磁阻传感器相比提高了 2~3 个数量级。针对石油钻探井下钻柱振动现象复杂问题，Westermann, Henrik [47]采用涡流传感器测量转轴的横向偏转，借由油井 - 钻柱动力学分析钻柱振动。张红[48]为检测井眼轨迹控制工具主轴的造斜性能，在工具组合轴承与钻头之间的主轴上沿径向方向涡流传感器，检测工具主轴在径向方向的位移。借由涡流传感器的高精度，高可靠性，可应对井下恶劣的工作环境。在井眼轨迹控制工具组合轴承支撑主轴旋转过程中，由于空间结构的限制和奇压、偶压现象的影响，对轴承径向位移的测量十分困难。由此施雷[49]基于涡流传感特性设计了径向位移测量短节，安装在紧靠组合轴承位置，用于检测工具主轴位移并反推组合轴承的径向位移。

4. 存在问题

综合现有文献可知,当前针对涡流传感器的研究已经取得了诸多成果。但是受限于传感器结构、自身性能以及使用环境的影响,尚有以下问题亟待解决。

1) 结构设计缺乏泛用性:由于线圈和被测金属导体共同组成涡流传感器,因此必须以被测金属导体的物理性能和几何参数作为基准来设计和使用。这将导致针对不同工作对象就必须设计相对应的传感器,一种型号的传感器只能应用于某种单一的情况,涡流传感器的泛用性大大降低,制作成本增加。

2) 集成化程度较低:虽然传感器集信息感受-信息转化-信息输出为一体,但实际制作过程中,三者制作的流程往往是分开的,彼此是相对独立的部件。因此大多数涡流传感器具有体积较大、质量重、可靠性低等缺点,在安装和检测过程中易造成信息获取的不完整性和不准确性。传感器所采集的外界信息绝大多数以电信号的形式进行传输,作为电信号传输的载体(电线、光纤等)将传感器与信号采集器相连。传输方式存在安全性能差、综合布线复杂和维护成本高等缺点。

3) 环境适应性不足:在实际工作中,涡流传感器故障大多是由温度、湿度、压力等环境因素突变所引起的,如温度,压力的急剧变化、大功率设备启停瞬间产生的高压脉冲,捆扎在一起的信号线之间的电流扰乱,各种电磁、电流突变等都会对涡流传感器的正常工作造成影响。此外,传感器测量电路也会因工作环境的温度、湿度的变化而发生改变。尤其是温度对磁场与测量电路的影响极大,虽然可以通过设置温度补偿系统来弥补缺陷,但由于补偿系统的滞后性,依然无法消除温度造成的影响。

5. 发展趋势

在如今物联网高速发展的时代,传感器发展作为重要组成部分,逐渐融入人们生活、服务息息相关的产业,随着技术的发展和科学的进步,面向物联网的传感器也需进一步优化,从而满足人们的不同需求。传感器相关问题的提出也就是今后研究发展的重要方向,综上所述涡流传感器有以下几条发展方向:

1) 泛用性与灵活性方向:普通涡流传感器使用范围过于单一,同一类传感器只能应付特定的工作条件,被测金属导体物理性能和几何参数的微小变化,就会导致涡流传感器测量能力的衰减甚至缺失。因此提高涡流传感器的灵活性,使一类传感器可以应对多种工作对象,大大提高其泛用性。

2) 高度集成化和无线传输方向:微型化、集成化及智能化是当今科学技术发展的时代主题。尤其对电介质、半导体和强磁体等新型材料的进一步开发,促使传感器向着微型迈进,因此涡流传感器高度集成化必然拥有广阔的发展空间。同时无线传输作为当前热门的研究领域之一,因无线传输的独特优势,解决了有线传输信号线布置复杂繁乱的问题。在未来的新兴技术领域中必然占据举足轻重的地位。

3) 抗环境干扰方向:环境因素的影响是一个极其复杂的问题,在实际设计使用过程中,需根据工作环境变化,应对温度、湿度、压力及人为因素的干扰,保证涡流传感器的正常工作。因此抗干扰技术是提高传感器精度与可靠性的重要研究方向之一。

参考文献

- [1] 阎耀保,郭文康,胡云堂,李锐华.考虑电涡流效应的射流管伺服阀建模及频率特性[J].航空动力学报,2020,35(8):1777-1785.
- [2] 吕程,杨宾峰,冯建民,赵洪伟.矩形阵列涡流传感器的设计与实现[J].科学技术与工程,2018,18(25):148-153.
- [3] 佟宇,张东利,姜禄,王闯龙.基于涡流检测信号的金属曲面距离测量方法研究[J].中国测试,2021,47(1):133-138.
- [4] 张新雨,王露,宋念龙,常帅,张东坤.基于电涡流传感器的温度位移智能检测方法[J].传感技术学报,2020,33(8):1176-1182.
- [5] 降帅,孟立凡,李菠,王红宇.3D刻录电涡流传感器特性研究[J].仪表技术与传感器,2019(9):1-4+9.

- [6] 韩宁, 张志杰, 尹武良, 赵晨阳. 基于涡流传感的金属表面缺陷检测方法研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(5): 704-710.
- [7] 吕阳, 罗茹丹, 刘莉娜, 郑良广. 高速磁浮导向间隙传感器抑制双线圈互感影响的研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(7): 18-20.
- [8] 黄云龙, 谢振宇, 张浩, 张晓阳. 电涡流传感器探头线圈的参数化设计与制造[J]. 机械与电子, 2017, 35(3): 37-41+46.
- [9] 陈国龙, 张卫民, 庞炜涵, 秦峰, 果艳. 基于分形理论的平面线圈激励涡流传感器[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(1): 10-14.
- [10] 吴斌, 杨挺, 刘秀成, 何存富. 线圈弯曲角度对柔性涡流传感器缺陷检测能力的影响[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 41-48.
- [11] 荣锋, 王一, 郭翠娟, 闫淑霞. 电感变化率对涡流传感器性能影响的仿真研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(10): 1467-1472.
- [12] 程玉龙. 一种矿山窄轨车辆用接近传感器[J]. 煤矿安全, 2020, 51(5): 142-145.
- [13] Romero-Arismendi, N.O., Pérez-Benítez, J.A., Ramírez-Pacheco, E. and Espina-Hernández, J.H. (2020) Design Method for a GMR-Based Eddy Current Sensor with Optimal Sensitivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, **314**, Article ID: 112348. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112348>
- [14] Arndt, M., Dencker, F. and Wurz, M.C. (2019) Novel Eddy-Current Sensor for Industrial Deep-Drawing Applications. 2019 *IEEE Sensors*, 27-30 October 2019, 1-4. <https://doi.org/10.1109/SENSOR543011.2019.8956948>
- [15] 辛佳兴, 李晓龙, 朱宏武, 陈金忠, 孟涛. 油气管道涡流变形检测探头研制[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13654-13659.
- [16] Sun, M., Zhou, J., Dong, B. and Zheng, S. (2020) Driver Circuit Improvement of Eddy Current Sensor in Displacement Measurement of High-Speed Rotor. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 7776-7783. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3044592>
- [17] 李满宏, 王经天, 吴玉, 陈嘉杰, 张明路. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 233-243. <https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J1905166>
- [18] Kumar, A.S.A. and George, B. (2019) A Noncontact Angle Sensor Based on Eddy Current Technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **69**, 1275-1283. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2908508>
- [19] Kumar, A.S.A., George, B. and Mukhopadhyay, S.C. (2020) An Eddy Current Based Non-contact Displacement Sensor. 2020 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Dubrovnik, 25-28 May 2020, 1-6.
- [20] 吕春峰, 朱建平, 匡兴红, 叶海雄. 栅式变面积电涡流位移传感器阻抗桥测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2018(11): 14-17.
- [21] 罗亮, 肖程波, 陈晶阳, 李青, 戴圣龙. 工业燃气轮机涡轮叶片用铸造高温合金研究及应用进展[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 34-41.
- [22] 武立明. 航空发动机转子扭振激励下叶片振动分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [23] 刘美茹, 滕光蓉, 肖潇, 张震相, 乔百杰, 陈雪峰. 基于叶尖定时的航空发动机涡轮叶片振动测量[J]. 航空动力学报, 2020, 35(9): 1954-1963.
- [24] 熊伟, 王建磊, 嵇佳佳, 李神龙. 航空发动机流体动压密封优化设计与验证[J]. 机械工程与技术, 2022, 11(3): 249-256
- [25] 余星奇. 高速旋转叶片叶尖定时测振技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [26] Fan, Z., Li, H., Dong, J., Zhao, X. and Cao, H. (2021) Shifting Straight-Line Fitting Method to Calculate Blade Vibration Based on Blade Tip Timing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **70**, 1-13. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3057325>
- [27] 邢琛, 段发阶, 叶德超, 周琦, 李杨宗. 变面积电涡流传感器带冠叶片振动测量[J]. 中国测试, 2021, 47(2): 119-124.
- [28] Sridhar, V., Chana, K.S. and Pekris, M.J. (2107) High Temperature Eddy Current Sensor System for Turbine Blade Tip Clearance Measurements. 12th *European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics*, Stockholm, 3-7 April 2017, Article ID: ETC2017-217. <https://doi.org/10.29008/ETC2017-217>
- [29] Sridhar, V. and Chana, K.S. (2017) Tip-Clearance Measurements on an Engine High Pressure Turbine Using an Eddy Current Sensor. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, Charlotte, 26-30 June 2017, Article ID: GT2017-63803. <https://doi.org/10.1115/GT2017-63803>

- [30] Jamia, N., Friswell, M.I., El-Borgi, S. and Rajendran, P. (2019) Modelling and Experimental Validation of Active and Passive Eddy Current Sensors for Blade Tip Timing. *Sensors and Actuators A: Physical*, **285**, 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.10.034>
- [31] Kubín, Z., Mísek, T., Hlous, J., et al. (2018) Calibration of Blade Tip-Timing Sensor for Shrouded 40" Last Stage Blade. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **108**, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.001>
- [32] 叶德超, 段发阶, 周琦, 程仲海, 李旭, 牛广越. 基于高频响涡流传感器的汽轮机带冠叶片振动测量技术(英文) [J]. *测试科学与仪器*, 2019, 10(4): 315-321.
- [33] 宁海洋. 盾构滚刀磨损状态在线检测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- [34] 刘新军, 田俊峰, 叶万军, 张磊霄, 王岩, 马宝芬. 南京地铁软流塑地层盾构下穿既有隧道处理加固技术[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(1): 366-373.
- [35] 张宁川. TBM、盾构盘形滚刀硬岩掘进的刃口磨损形状分析及优化对策[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(4): 657-665.
- [36] 秦银平, 张竹清, 孙振川, 陈馈, 杨延栋. 基于现场试验的 TBM 滚刀磨损分析及预测[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(11): 1914-1921.
- [37] Wang, F., Men, C., Kong, X. and Meng, L. (2019) Optimum Design and Application Research of Eddy Current Sensor for Measurement of TBM Disc Cutter Wear. *Sensors*, **19**, Article No. 4230. <https://doi.org/10.3390/s19194230>
- [38] Lan, H., Xia, Y., Ji, Z. and Miao, B. (2019) Online Monitoring Device of Disc Cutter Wear—Design and Field Test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **89**, 284-294. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.010>
- [39] Silva, D.G., Ribeiro, J.A.J. and Pimenta, T.C. (2013) Design of Eddy Current Sensor IC for Large Displacement. 2013 *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Taipei, 28-31 May 2013, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2013.6563635>
- [40] 曹清香. 柴油机主轴承磨损监测装置的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(5): 28-30+34.
- [41] 邓绍海. 一种基于电涡流传感器的主机轴承工况监控系统研究[J]. *中外企业家*, 2018(19): 116.
- [42] Wang, K., Zhang, L., Zheng, S., Zhou, J. and Liu, X. (2017) Analysis and Experimental Study of a Novel Self-Differential Eddy Current Sensor for High-Speed Magnetic Electrical Machine. 2017 *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Sydney, 11-14 August 2017, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2017.8056069>
- [43] 程强强, 夏桂锁, 于润桥, 程东方, 周兆明. 基于微磁的连续油管在线检测技术[J]. *天然气工业*, 2014, 34(7): 109-114.
- [44] 刘峰, 李秋实, 姜杰, 侯如雪, 颜浩, 任浩洁. 连续油管半挂车双后桥液压转向系统的设计研究[J]. *机械工程与技术*, 2021, 10(5): 537-546.
- [45] Sun, H., Shi, Y., Zhang, W. and Li, Y. (2021) RFEC Based Oil Downhole Metal Pipe Thickness Measurement. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **40**, Article No. 35. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00766-w>
- [46] Chu, Z., Jiang, Z., Mao, Z., Shen, Y., Gao, J. and Dong, S. (2021) Low-Power Eddy Current Detection with 1-1 Type Magnetolectric Sensor for Pipeline Cracks Monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, **318**, Article ID: 112496. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112496>
- [47] Westermann, H., Gorelik, I., Rudat, J., Moritz, C., Neubauer, M., Wallaschek, J. and Hohn, O. (2015) A New Test Rig for Experimental Studies of Drillstring Vibrations. *SPE Drilling & Completion*, **30**, 119-128. <https://doi.org/10.2118/176019-PA>
- [48] 张红, 向正新, 钱利勤, 冯定, 涂忆柳. 井眼轨迹控制工具主轴载荷与造斜能力关系研究[J]. *力学与实践*, 2017, 39(2): 152-157+134.
- [49] 施雷. 井眼轨迹控制工具组合轴承力学与疲劳寿命研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 长江大学, 2017.