

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905166

电涡流传感器性能优化关键技术^{*}

李满宏¹, 王经天¹, 吴 玉², 陈嘉杰², 张明路¹

(1. 河北工业大学 机械工程学院 天津 300130; 2. 中广核研究院有限公司 深圳 518031)

摘 要:电涡流传感器因具备无损检测、非接触测量等优异特性,广泛应用于工业生产等各领域中的微量位移测量、导电介质缺陷检测以及设备运行状态监测。然而,受限于线圈结构参数优化、检测电路创新设计和测量误差动态补偿等技术瓶颈,现有电涡流传感器普遍存在灵敏度欠佳、线性度不足、突变温度场下检测精度亟待提升等突出局限,直接制约着其在各类极限环境下高精度检测领域的推广应用。为此,在深入剖析和系统总结国内外电涡流传感器研究与应用现状的基础上,聚焦线圈结构、检测电路以及误差补偿方法,重点探讨了优化其核心性能的基本原理与关键技术,并对相关研究的发展趋势进行了初步构想与展望,以期多维度提升传感器性能、根源促进其发展应用提供有效借鉴。

关键词:电涡流传感器;线圈参数优化;检测电路设计;误差补偿方法

中图分类号: TH73 TP212.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Key technologies for eddy current sensor performance optimization

Li Manhong¹, Wang Jingtian¹, Wu Yu², Chen Jiajie², Zhang Minglu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen 518031, China)

Abstract: Having excellent characteristics of non-destructive testing, non-contact measurement and etc., eddy current sensor is widely used in micro-displacement measurement, conducting medium defect detection and equipment operation condition monitoring in various industrial production fields. However, limited by the technical bottlenecks such as coil structure parameter optimization, detection circuit innovative design and measurement error dynamic compensation, the existing eddy current sensor generally has prominent limitations such as poor sensitivity, low linearity and being urgently improved detection precision under abrupt change temperature field, which directly restricts its popularization and application in the fields of high-precision detection under various extreme environments. Therefore, based on deeply analyzing and summarizing the research and application status of eddy current sensor both at home and abroad, this paper concentrates on the coil structure, detection circuit and error compensation method. The paper emphasizingly discusses the basic principles and key technologies for eddy current sensor core performance optimization, preliminarily outlines and forecasts the development trend of the related research, and hopefully provide effective reference for improving sensor performance in multiple dimensions and promoting its development and application.

Keywords: eddy current sensor; coil parameter optimization; detection circuit design; error compensation method

0 引 言

电涡流传感器基于其与导电介质间的涡流互感效应,可实现被测对象内部缺陷与微量位移的高精度检测,因具备非接触测量、频响特性优异、抗干扰能力突出等显

著优势,广泛应用于设备无损检测、在线状态监测等国民经济生产重要领域^[1]。自20世纪40年代世界上首个电涡流传感器问世,国内外围绕其检测原理与关键技术已开展系统深入研究,经多年发展,常规领域电涡流传感器制备与检测技术已日臻成熟,系列化产品已初步能够满足各类日常工业生产需求。

收稿日期: 2019-05-18 Received Date: 2019-05-18

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1302504)资助项目

然而,伴随当今检测领域的不断拓展与检测要求的急剧提升,传统电涡流检测技术应用已初现瓶颈。尽管当前激光测距、渗透探伤等同类新型检测技术飞速发展^[2],但电涡流检测得益于其独特优势,在核电检测、航空制造等众多特殊领域仍具有不可替代的作用。目前,电涡流传感器受限于线圈结构参数优化、检测电路创新设计和测量误差动态补偿等技术瓶颈,普遍存在灵敏度欠佳、线性度不足、突变温度场下检测精度亟待提升等突出局限,根源制约着其在各类极限环境下高精度检测领域的应用。如何面向特定应用需求,协同优化线圈结构参数及其阻抗特性,创新设计高性能核心电路模块与集成检测电路,并建立高精度测量误差动态补偿机制与方法,以从信号激发、转换、处理等多维度入手,系统改善多变检测环境下传感器灵敏度、线性度、温度稳定性等核心性能,对提升电涡流传感器检测精度和拓展其应用领域至关重要。为此,国内外聚焦电涡流传感器性能优化核心理论与关键技术已掀起新一轮研究热潮,虽已取得众多突破性成果,但尚未形成系统完善的理论与技术体系。

针对上述问题,本文在深入剖析和系统总结国内外电涡流传感器相关研究成果基础上,聚焦制约其性能提升的线圈结构参数优化、检测电路创新设计和测量误差动态补偿等瓶颈问题,重点探讨了优化其核心性能的基本原理与关键技术,并对相关研究的发展趋势进行了初步构想与展望,以期电涡流传感器的后续研究提供有效借鉴。

1 电涡流传感器线圈优化设计

线圈作为电涡流传感器的核心部件,主要用于产生激发被测介质内电涡流的磁场,并通过与被测介质间的磁场能量耦合将被检物理量转换为阻抗电信号。由于其结构形式与阻抗参数本质决定检测磁场的空间分布特性,因而直接影响着传感器的灵敏度与线性度,同时外界温度变化将导致线圈原有物理参数改变,造成温漂现象,对控制传感器温度稳定性至关重要^[3-4]。因此,线圈优化设计是有效提升电涡流传感器灵敏度、线性度、温度稳定性等核心性能的关键。目前,国内外已分别从线圈结构、截面形状、几何参数等角度对传感器线圈开展了大量基础性研究,有效提升了常规领域中传感器性能。

1.1 线圈结构优化

线圈结构重点影响线圈轴向磁场的强度及其变化梯度,直接决定着传感器的灵敏度与线性度。目前,常见的线圈结构主要分为典型的平面单线圈、空间多线圈、正交矩形柱线圈和非常规的柔性线圈。由于各型线圈空间磁场分布特性存在显著差异,其适用领域亦存在明显区别^[5]。

平面单线圈主要包括矩形柱线圈和圆柱线圈^[6-7]。如图1所示,矩形柱线圈因轴向磁场强度梯度变化显著,故其阻抗参数对提离距离变化尤为敏感,位移灵敏度较高,相对适用于位移检测领域;而圆柱线圈因磁场强度相对较大,易于激发被测介质内的大面积涡流效应,尤为适用于缺陷检测领域。

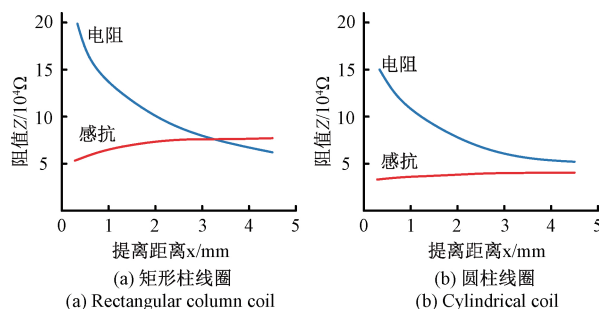


图1 平面单线圈
Fig.1 Planar single coils

在缺陷检测领域,圆柱线圈得益于磁场强度综合性能具有明显优势,但因其磁场主要集中于单一轴线方向,在裂纹宽度检测中普遍存在精度欠佳问题。为此,部分学者尝试将矩形柱线圈正交布置,提出了正交矩形柱线圈结构,通过降低阻抗参数对提离距离的敏感程度以削弱提离效应对缺陷检测的干扰,并利用其磁场方向的多变特性及矩形柱线圈固有的高灵敏度特性,实现导电介质内细小裂纹宽度的高精度检测。正交矩形柱线圈按构型可分为单正交矩形柱型和双正交矩形柱型,2种线圈在被测介质内激发的磁场分布如图2所示,其中双正交矩形柱型线圈磁力线分布更为集中,磁能亦相对较大,故较单正交矩形柱型线圈具有更高的裂纹检测灵敏度和更大的线性检测范围^[8]。

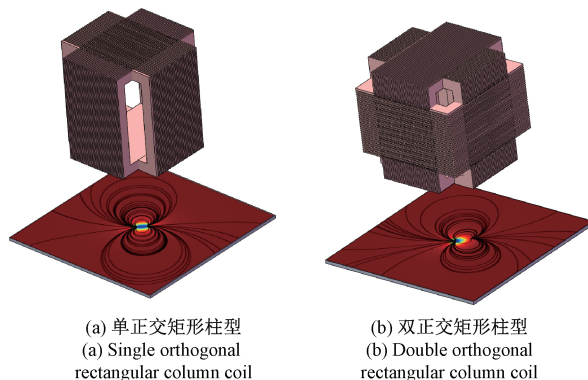


图2 正交矩形柱线圈
Fig.2 Orthogonal rectangular column coils

在位移检测领域,矩形柱线圈虽具备较高的位移灵敏度,但受限于磁场强度,其线性检测范围存在一定局

限。为此,部分学者尝试将多个圆柱线圈优化布置,提出了空间多线圈结构,旨在利用圆柱线圈的高强度磁场特性,提高位移灵敏度并扩大线性范围^[9]。空间多线圈通常采用并列双线圈、交错双线圈、同轴双线圈和同轴三线圈4种结构。如图3所示,并列双线圈将激励线圈和检测线圈并列布置,以增强线圈对信号的接收强度;交错双线圈中激励线圈和检测线圈适当重合,以抑制双线圈并列布置产生的磁交链作用,基于抑制载波原理,使检测线圈不接收激励线圈信号,仅接收涡流信号,从而扩大其线性范围,但由于双线圈间相对位置关系难以准确确定,实际应用存在一定困难;同轴双线圈和同轴三线圈对磁交链具备一定的抑制作用,且磁场能量分布更为集中,故其灵敏度相对较高,同时得益于其紧凑结构,应用较为广泛^[10]。如中国科学技术大学王洪波等创新提出将磁芯插入同轴三线圈轴处,以抑制内外层激励线圈对中间检测线圈的影响,大幅提升了传感器对被测介质内涡流的灵敏度。

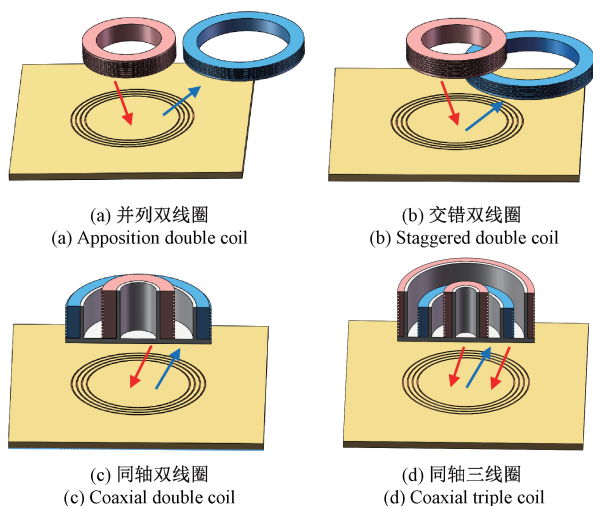


图3 空间多线圈
Fig.3 Spatial multiple coils

为解决狭小空间下曲面介质的检测问题,部分学者尝试将线圈嵌入塑料、薄金属等柔性基板,提出了非常规的柔性线圈结构,使其能够贴附于各种不规则曲面,并随被测物体表面弯曲甚至折叠,大幅拓宽了电涡流传感器的应用领域。如图4所示,JENTEK公司基于MWM阵列式柔性平面线圈,研发出了柔性电涡流传感器,大幅提升了涡流的渗透深度,且可实现复杂曲面的深处缺陷检测^[11]。丁华等^[12]通过对其改进,提出花萼状柔性电涡流传感器,实现了曲面表面微细裂纹的高精度定量检测。

1.2 线圈截面形状优化

线圈截面形状主要影响线圈的磁力线分布范围和空间磁场能量传导效率,是影响传感器灵敏度和线性度的

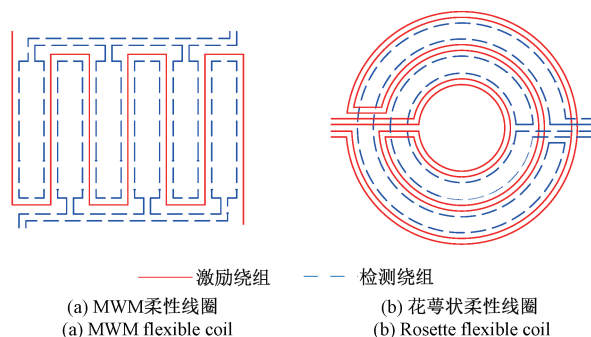


图4 柔性线圈
Fig.4 Flexible coils

重要因素。以典型的平面单线圈为例,目前常用的线圈截面形状主要有正梯形、矩形和倒梯形。

图5所示为相同截面积和匝数状态下3种典型截面形状线圈激发的磁场的磁力线分布情况^[13]。经对比分析可知,正梯形截面线圈的磁力线分布范围最广,磁场能量损失也最大,以致其磁场强度梯度变化最大,阻抗参数对提离距离变化也最为敏感,故传感器灵敏度最高而线性范围则最小;而倒梯形截面线圈磁力线分布范围和磁场能量损失均最小,故传感器线性范围最大但灵敏度最低;矩形截面线圈性能则介于正梯形和倒梯形之间。由于不同截面形状线圈性能特性存在明显差异,故可根据不同应用需求灵活选取适当的截面形状。

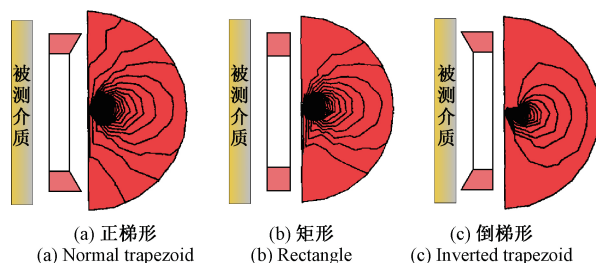


图5 常用线圈截面形状

Fig.5 The common section shapes of the coils

1.3 线圈参数优化

待线圈结构与截面形状确定后,线圈参数将直接影响其空间磁场分布特性,决定线圈轴向磁场强度及其梯度变化。如何基于应用需求综合优化线圈参数以获取理想的灵敏度、线性度和温度稳定性对提升电涡流传感器性能至关重要。

目前,国内外学者普遍基于毕奥萨伐尔定律开展线圈参数优化相关研究^[14-15]。以下以典型矩形截面圆柱线圈为例简述线圈参数优化基本原理,由于电涡流传感器性能主要取决于线圈轴向磁感应强度特性,根据毕奥萨伐尔定律,示例线圈的轴向磁感应强度可表示为:

$$B = \frac{m_0 N I}{2(r_b - r_a)c} \left((x+c) \ln \left(\frac{r_b + \sqrt{r_b^2 + (x+c)^2}}{r_a + \sqrt{r_a^2 + (x+c)^2}} \right) - x \ln \left(\frac{r_b + \sqrt{r_b^2 + x^2}}{r_a + \sqrt{r_a^2 + x^2}} \right) \right) \quad (1)$$

式中: B 为磁感应强度; μ_0 为真空磁导率; I 为线圈通过电流; x 为提离距离; r_a 为线圈外径; r_b 为线圈内径; c 为线圈厚度; N 为线圈匝数。

由式(1)可知线圈各参数对电涡流传感器性能的影响规律主要如下: 1) 线圈外径 r_a 与电涡流分布范围正相关, 与磁感应强度梯度变化负相关, 因此线圈外径越大, 线性测量范围则越大, 但灵敏度将随之降低, 故在满足线性测量范围的基础上外径越小越好; 2) 线圈距被测对象较远时, 线圈内径 r_b 和厚度 c 对传感器性能影响不大, 而当线圈距被测体较近时, 线圈内径 r_b 与厚度 c 越小传感器灵敏度和线性度则越高; 3) 线圈匝数 N 主要影响邻近效应产生的电涡流大小, 在允许范围内匝数越多传感器灵敏度则越高。

针对传感器灵敏度与线性度的优化, 通常根据具体应用需求, 构建线圈性能的多目标优化函数, 通过线圈相关参数的协同优化, 实现对线圈的优化设计。如 Cao 等^[16] 基于非线性误差构建了线圈目标优化函数, 通过采用遗传算法搜索线圈最优参数, 实现了对传感器线性度的深度优化; 清华大学黄小秋等融合灵敏度与线性测量范围要求, 建立了线圈多目标优化函数, 通过线圈各参数的整合优化, 解决了灵敏度与线性度间的技术冲突, 使传感器能够在给定的线性测量范围内具备要求的灵敏度特性。

温度稳定性是衡量电涡流传感器性能的关键指标。由于外界温度变化将直接导致线圈几何参数和电阻率产生细微变化, 间接影响线圈固有的阻抗及空间磁场分布特性, 极易引发潜在的温漂现象, 将严重影响传感器固有性能。因此, 针对传感器的温度稳定性, 国内外从线圈优化设计角度开展了广泛研究, 提出了多种优化设计方法, 旨在通过线圈结构参数的优化有效降低温度变化对传感器性能的影响。如东南大学方秋华等通过优化线径等线圈关键参数, 以获取理想的交流电阻(取决于集肤效应)和等效交流电阻(受电流密度分布影响), 利用突变温度场下二者参数变化的互补作用, 实现了温度漂移的自动补偿。浙江大学凌保明等创新提出多股辫线方案, 通过降低线圈电阻变化对其阻抗作用的影响, 并利用电感对温度变化不敏感特性, 有效降低了温度变化对传感器性能的影响。王薇等提出基于温度升高时线圈品质因数微小上升形成的正温漂与传感器热膨胀导致的负温漂间的相互补偿作用, 通过线圈结构参数的优化设计, 有效提升了传感器的温度稳定性。

2 电涡流传感器检测电路优化设计

电涡流传感器检测电路主要由激励电路、信号转换电路、温度补偿电路和非线性补偿电路 4 部分构成, 用于将被测对象的位移信息、缺陷信息等非电物理量转换为电压、频率等电信号, 其工作原理如图 6 所示。激励电路主要用于调制生成接入线圈的交变电流, 以产生交变磁场, 从而激发被测介质内涡流效应; 信号转换电路将线圈与被测介质磁场耦合作用下产生的阻抗等物理量转换成电压、频率等电信号; 温度补偿电路和非线性补偿电路主要用于校正温度变化对输出电信号的影响以及修正其非线性特性。由于检测电路是传感器信号转换处理的硬件基础与关键环节, 直接影响传感器的灵敏度、线性度和温度稳定性, 决定其检测精度, 为此国内外针对检测电路各核心组成部分的优化方法已开展系统深入研究。

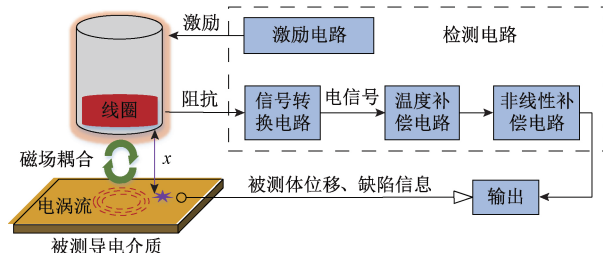


图6 检测电路工作原理

Fig.6 The working principle of detection circuit

2.1 激励电路

激励电路主要用于调制生成激发线圈交变磁场的交变电流, 为检测电路提供检测源信号, 其信号特性及其质量直接影响传感器检测性能。根据信号频率与波形特征, 现有激励电路可分为常规激励电路和非常规激励电路。

1) 常规激励电路

常规激励电路主要包括 RC 振荡电路、LC 振荡电路、晶体振荡电路和 DDS 信号源, 虽均采用单频正弦电流作为输入, 但其工作原理与输出特性却存在显著差异, 因此适用领域亦有所不同^[17], 具体如表 1 所示。

激励电路输出不易受温度影响、具有稳定幅值和频率的标准信号是实现高精度检测的基础。国内外针对当前常规激励电路普遍存在的幅值和温度稳定性欠佳问题, 已提出多种优化方法。如 Bozomitu 等^[18] 基于深度负反馈网络提出了 AGC 电路, 利用反馈理论将电路输出信号反送至振荡器输入端以控制振荡器输出幅值, 构建了振幅自调节振荡器, 大幅提升了激励信号幅值稳定性。为降低温度变化对激励信号的影响, 部分学者提出了直流和交流相融合的混合激励方式, 首先通过直流激励

表 1 常规激励电路
Table 1 Conventional excitation circuits

	RC 振荡电路	LC 振荡电路	晶体振荡电路	DDS 信号源
原理	R 与 C 构成选频网络	L 与 C 构成谐振回路	压电效应	直接数字频率合成技术
优势	电路简单,成本低	功率增益高,易起振	频率稳定性高,温度敏感性低	调频范围宽,稳定性高,温度敏感性低
劣势	幅值稳定性低,频率难调节,温度稳定性低	振幅易受频率影响,温度稳定性低	相对不易起振	输出电流小,需接功放、高速 D/A 转换和低滤波波
应用	适用于低频振荡且稳定性要求不高的场合	适用于频率固定不变的场合	适用于频率稳定性要求高的场合	适用于频率变化范围宽的场所

获取温漂信号,而后将温漂信号加权叠加至交流激励,从而生成标准稳定的激励信号。

2) 非常规激励电路

电涡流传感器性能与激励信号的波形和频率特性关系极为密切。受限单频正弦激励信号,基于常规激励电路的传感器通常存在检测深度单一、信息提取量不足、检测效率低下等突出问题。为此,国内外学者提出了多种非常规激励电路,旨在通过调制生成多变波形与频率特性的激励信号以有效提升传感器性能。

目前,常见的非常规激励电路主要有多频涡流激励电路、深层涡流激励电路和脉冲涡流激励电路。多频涡流激励电路可调制出含有多种频率成分的激励信号,由于不同频率激励信号的穿透能力明显不同,故其能够获取多层深度信息,并可减小信号失真,提高检测精度,主要适用于存在层间间隙的多层铆接结构的检测^[19-20]。深层涡流激励电路通常工作于较低频率以提升涡流渗透深度,并可生成多种频率的激励信号以获取不同深度信息,其通过低频涡流和多频涡流技术的深度融合,可实现对构件深层部位缺陷的有效检测^[21]。脉冲涡流激励电路通常激发方波或阶跃波激励信号,主要通过检测涡流在构件中的衰减特性以提取有效信息^[22],由于其激励信号中包含超低频成分,故可获取构件深层信息,同时因其能够克服传统电涡流检测中趋肤效应的影响,激发出大幅值磁场,故可在较大提高距离下实现对被测对象的有效检测^[23-24]。

2.2 信号转换电路

信号转换电路作为检测电路的核心,主要用于将线圈阻抗等物理量转换成电压、频率等电信号。早期电涡流传感器的信号转换电路普遍采用单臂分压电路,直接提取线圈两端电压信号,以致传感器灵敏度、线性度及温度稳定性均相对较低,为此国内外学者在优化单臂分压电路的基础上分别提出了谐振电路、差动电路 2 种典型信号转换电路。

1) 谐振电路

在线圈两端并联一谐振电容,使线圈与电容形成一

并联谐振回路,即构成典型的谐振电路。通过测量谐振体两端电压信号或频率变化即可间接提取被测物理量^[25]。谐振电路根据调制方式,可分为调幅式电路和调频式电路,其原理如图 7 所示,其中调频式电路根据输出信号不同又可分为调频幅值输出式和调频频率输出式,各型谐振电路特性如表 2 所示。

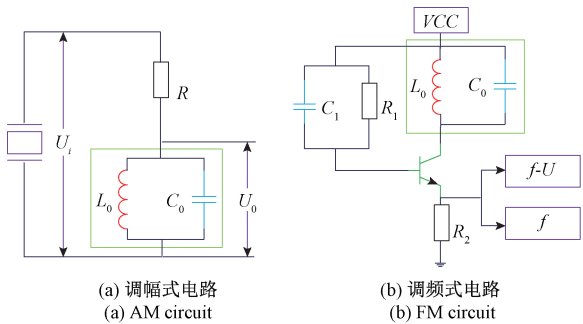


图 7 谐振电路分类
Fig.7 The resonant circuit classification

表 2 各型谐振电路特性对比
Table 2 The characteristic comparison of various types of resonant circuits

电路类型	工作频率	输出信号	反映量	输出电压	优点	缺点
调幅	恒定	电压	等效阻抗	变化	响应快、功耗低、稳定性好	灵敏度欠佳
调频幅值输出	变化	电压	品质因数	变化	灵敏度高、线性范围大	频率稳定性不足、电路相对复杂
调频频率输出	变化	频率	等效电感	恒定	温度稳定性高、适于数字化集成	线性范围小、电路稳定性低

谐振电路相比于单臂分压电路,能够有效提升传感器的灵敏度和线性度,并可显著降低检测电路的整体功

耗,但因其通常仅应用于平面单线圈结构,故测量结果易受外界温度变化等环境因素影响^[26]。为此,国内外学者针对谐振电路开展了大量优化研究,如南京理工大学花榕泽等基于谐振电路灵敏度的深度分析,提出了一套完整的谐振电路优化方法。Cheng 等^[27]通过对谐振电路关键参数的系统匹配与优化,大幅提升了传感器的灵敏度和品质因数。

2) 差动电路

差动电路如图 8 所示,其中典型的差动电桥电路分别将检测线圈和补偿线圈置于电桥 2 个桥臂,以消除线圈静态电感和电阻干扰,仅放大线圈检测状态下的微小阻抗变化量,因而具备灵敏度高、非线性误差小等突出优点^[28]。由于差动电桥电路对温漂造成的阻抗变化成分抑制能力有限,在一定程度上制约了传感器温度稳定性的提升,为此学者对差动电桥电路进行改进提出了差分放大电路。差分放大电路区别于差动电桥电路阻抗层面的差动测量,将检测线圈和补偿线圈的阻抗变化分别转化为电压信号后作差,以便通过电压层面的差动测量有效抑制温漂作用下 2 线圈产生的共模干扰信号,因此能够有效提升传感器的灵敏度和温度稳定性^[29]。

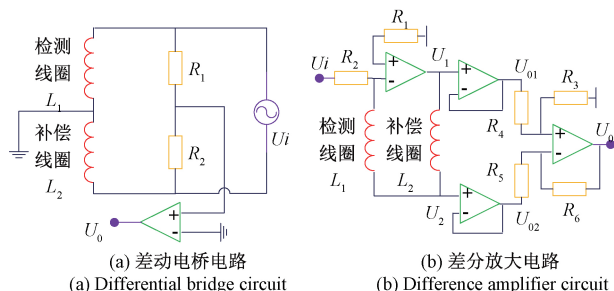


图 8 差动电路
Fig.8 Differential circuits

2.3 温度补偿电路

温度是影响电涡流传感器检测精度的重要因素。变化温度场下检测电路元件参数特性难免发生不可预期微量调整,引发温漂现象,造成一定的随机测量误差,严重影响检测精度。为此,国内外学者普遍在检测电路中设置温度补偿电路,用以校正温度变化对输出信号的影响,从而提升传感器的温度稳定性与检测精度。

目前,国内学者外通常采用在信号转换电路中串入热敏电阻等热敏元件的方式校正传感器输出信号,以补偿温漂现象造成的测量误差^[30]。如吕云腾等^[31]提出将热敏电阻融入检测电路,用以实时检测线圈及其所处环境温度变化,通过动态调节信号转化电路输出信号增益,有效降低了温度对输出信号影响。樊树江等创新将具备负温度系数 NTC 电阻串联于检测线圈之中,利用相同温度变化下 NTC 电阻与线圈电阻变化趋势互异特性,保障

变化温度场下检测电路阻抗特性基本稳定,在一定程度上提升了传感器的温度稳定性。受限于 NTC 电阻固有的非线性特征,以致与线圈电阻温升特性难以完美匹配,严重制约了上述电路的补偿精度,为此学者提出了用于 NTC 电阻温升特性线性处理的指数对数电路,大幅提升了温度补偿电路的补偿精度与线性度。

串接热敏元件虽能在原理上有效解决传感器温度补偿问题,但其要求热敏元件与线圈电阻温升特性遵循严苛的比例关系,受限于二者温升特性的非线性特征,对元件参数匹配提出了极高要求,在一定程度上制约了应用领域与补偿精度。为此,部分学者提出了线圈电阻、电感分离方法,旨在利用电涡流传感器检测电路自身特性实现对温度漂移的补偿。如 Wang 等^[32-34]提出了基于交流电桥的电感、电阻分离电路,利用解调出的线圈电阻分量充当热敏电阻,进而对线圈和检测电路的温漂统一补偿,并且 Wang 等还基于电感、电阻分离原理,利用电感固有的高灵敏度与高温稳定性,通过解调线圈电感变化量获取被测位移信息,以提升电涡流传感器的温度稳定性。

2.4 非线性补偿电路

电涡流传感器本身即具备一定的非线性特性,同时受调制方法影响,信号转换电路输出信号亦具备明显的非线性特征,将严重影响检测精度。因此,在检测电路中设置非线性补偿电路,用以修正传感器输出信号非线性特性,对提高传感器检测精度至关重要,国内外学者对此已开展大量研究。

典型的非线性补偿电路主要包括开环补偿电路和闭环补偿电路^[35]。开环补偿电路通常在传感器检测电路中串接非线性校正环节以修正输出信号非线性特性,如高松巍等在调幅式测量电路中融入指数运算电路,用以线性化补偿输出信号的非线性阶段。由于开环补偿电路仅直接利用非线性校正环节区间校正非线性信号,故其校正精度存在一定局限。而闭环补偿电路则依据反馈原理,把补偿电路的输出经反馈网络引至补偿电路输入端,通过信号的复杂处理校正各阶段输出信号线性度,因而具备较高精度,通常应用于线性度要求较高场合。如 Yang 等^[36]基于闭环二阶拟合函数法设计出了非线性补偿电路,大幅提升了传感器输出信号的线性度。

此外,针对部分典型检测电路中典型非线性环节,国内外学者亦提出了多种补偿方法。如为解决激励电路输出信号的非线性问题,学者提出了压控变流法,通过改变放大器的静态工作点,改善激励电路输出信号特性,间接提升传感器线性度;针对交流电桥电路中输出电位与桥臂电阻变化存在的非线性关系,学者提出了可变电桥法,通过消除单臂不平衡电桥的非线性误差,有效提高了传感器输出结果的线性度。

3 测量误差补偿机制与方法

检测精度是电涡流传感器性能的核心体现。尽管在传感器设计过程中已针对线圈、检测电路等关键部件从灵敏度、线性度、温度稳定性等多维度展开优化,但受限于传感器制备工艺、检测方法、环境因子等综合因素的耦合作用,检测结果难免出现误差。如何建立有效的误差补偿机制,发展高精度误差补偿方法,对提升传感器检测精度至关重要,长久以来一直是电涡流检测领域研究的重点与难点。目前,典型的误差补偿方法主要有误差分析补偿法、误差修正补偿法、数据融合补偿法和基于神经网络的误差补偿法。

3.1 误差分析补偿法

受限于多变测量环境,电涡流传感器系统误差将呈现一定随机特征,以致各组测量数据误差概率化区域分布存在明显差异。为此,国内外学者拟基于海量测量数据的系统分析,通过深入探索测量数据间内在联系及其误差分布规律,以建立高精度误差评价与补偿模型,提出了误差分析补偿方法,旨在通过测量数据的后续处理,实现测量误差的高精度补偿,以有效提升传感器检测精度^[37]。目前,国内外通常采用多元线性回归方法,构建测量数据统计模型,通过调整置信区间,以评价补偿测量误差。但受测量过程中测量位姿、接触作用力等主观因素影响,测量数据将存在较大的共性随机误差,以致数据分布呈现整体偏移现象,在一定程度制约了检测精度的有效提升^[38-39]。为此,Yao等^[40]创新引入顺序批次测量模式,通过综合评价各组别测量数据及其误差分布特征,以有效剔除主观因素诱发的共性随机误差,同时结合置信区间动态调整方法,提出了新型误差分析补偿方法,大幅提高了电涡流传感器的检测精度。鉴于误差分析补偿法可有效剔除测量数据中普遍存在系统误差和共性随机误差,因而具备较高的误差补偿精度,但受限于数据多次测量与后续处理补偿模式,故其通常仅适用于测量精度要求较高且允许测量误差离线补偿的应用场景。

3.2 误差修正补偿法

为有效补偿电涡流传感器固有特性与外界时变环境因子耦合作用造成的系统测量误差,国内外学者基于传感器检测原理及其物理特性分析,融合外界多变环境因子耦合作用机制,提出了误差修正补偿方法,旨在通过构建融合环境因变物理参数的传感器测量误差动态补偿模型,在线补偿多变测量环境下因传感器固有特性微量调整导致的系统测量误差,以提升传感器检测精度^[41]。目前,国内外普遍采用简单易行的多元线性回归法构建在线误差补偿模型,但其补偿精度仍待提升^[42]。为此,部

分学者融合预测补偿原理,对传统误差修正补偿方法展开了深度改进,如Miao等^[43]基于被测对象历史变化规律,实现了其短期数据误差的精确预测,提出基于自回归分布滞后模型的误差修正补偿方法,利用其误差自适应修正机制,有效降低了传感器因非线性与迟滞特性导致的测量误差,大幅提高了电涡流传感器的检测精度。误差修正补偿法的核心在于精确构建融合环境因变物理参数的传感器测量误差动态补偿模型,但由于目前外界多变环境因子对传感器固有特性的耦合作用机制尚未明晰,以致其测量误差补偿精度仍相对有限,然而得益于其在线补偿模式及快速响应特性,通常适用于测量精度要求相对较低的高速测量场景。

3.3 数据融合补偿法

电涡流传感器检测数值系目标参量与非目标参量耦合作用结果,其中外界环境因素等非目标参量对目标参量存在的干扰作用是造成测量误差的主导因素。为此,部分学者创新提出了基于数据融合的测量误差补偿方法,旨在通过深度分析目标参量与各典型非目标参量间相关性及其耦合作用关系,以基于参量间的解耦处理,构建各参量数据间的融合机制,进而有效剔除非目标参量影响,以从数据处理角度实现对检测误差的高精度在线补偿^[44-45]。如Lei等^[46]利用多源传感器动态监测环境温度等非目标参量,基于二元回归方程深度融合目标位移参量与非目标参量数据,有效降低了非目标参量对检测精度的影响。Song等^[47]将支持向量机模型与最优回归函数引入误差补偿机制,提出了新型数据融合测量误差补偿方法,通过利用多变环境下大量传感器标定数据,训练优化涵盖环境因子与目标参量耦合作用关系的支持向量机模型,以有效抑制非目标参量对目标参量的影响,进而大幅提升检测精度。区别于误差修正补偿法动态修正传感器物理检测模型环境敏感参数的测量误差补偿思想,数据融合补偿法则基于构建的物理检测模型,通过非目标参量与目标参量间的数据融合,解耦模型各输入参量,以有效抑制非目标参量对测量精度的影响。鉴于数据融合补偿法无需动态修正存在极强耦合关系的模型参数,仅通过相对简单有效的数据融合方式实现测量误差的在线补偿,故其可应用于测量精度要求相对较高的在线检测场景。

3.4 基于神经网络的误差补偿法

鉴于外界多变环境因子对传感器固有特性耦合作用机理尚未完全揭示,复杂环境下传感器测量误差生成机制亦未深度明晰,以致难以精确构建及时变环境因子的高精度误差补偿模型,根源上制约了涡流检测精度的进一步提升^[48]。为此,部分学者尝试借鉴神经网络无需精确建模的独特优点,提出了基于神经网络的误差补偿

方法,旨在通过海量检测数据样本的训练学习,构建多维环境变量下检测数据与高精度补偿量间的映射关系,以在线补偿传感器测量误差^[49]。如 Li 等^[50]将传感器测量位移和输出电压作为输入,标定位移作为输出,构建了 2-4-1 型 BP 神经网络,提出了基于神经网络的误差补偿方法,极大提高了电涡流传感器的检测精度。鉴于 BP 神经网络模型收敛速度相对慢,训练时间亦相对较长,付立华等将具有高速收敛与非线性映射特性的小波函数作为神经元间传递函数,以有效提升训练效率及输出线性化程度,同时融合遗传算法搜索网络最优参数,提出了基于小波神经网络和遗传算法的误差补偿方法,显著提高了传感器误差补偿效果。基于神经网络的误差补偿法因具备无需精确建模的独特优势,尤为适用于电涡流传感器测量误差的高精度在线补偿,但因其需利用大量同类环境下标定数据样本训练学习,以逐步建立多维环境变量下检测数据与高精度补偿量间的映射关系,故通常应用于特定环境下高精度在线检测场景。

4 展 望

尽管当前激光测距、渗透探伤等同类新型检测技术飞速发展,但电涡流传感器因具备非接触测量、频响特性优异、抗干扰能力突出等显著优势,仍将在核电检测、航空制造等众多特殊领域发挥不可替代的作用。然而,伴随当今检测领域的不断拓展与检测要求的急剧提升,传统电涡流传感器性能已初现瓶颈,突出表现为灵敏度欠佳、线性度不足、突变温度场下检测精度亟待提升等,根源制约着其在各类极限环境下高精度检测领域的应用。目前,国内外虽已围绕制约传感器性能提升的线圈结构参数优化、检测电路创新设计和测量误差动态补偿等关键技术开展系统深入研究,并取得众多突破性成果,但仍未形成系统完善的理论与技术体系。为本质提升传感器性能,根源促进其发展应用,未来可结合以下几个方面展开研究。

1) 面向多目标的线圈结构参数协同优化设计

线圈作为电涡流传感器的核心部件,其结构参数本质决定着检测磁场的空间分布特性,直接影响着传感器的各项性能。目前,针对线圈结构参数的优化,国内外学者通常基于毕奥萨伐尔定律,通过构建单一目标优化函数,单独优化线圈的灵敏度、线性度或温度稳定性。事实上,不同检测场合对传感器各项性能均有严苛要求且存在明显差异,而线圈各结构参数均在一定程度上同时影响各项性能,以致传统的单一性能优化方法难以满足传感器应用所需的综合性能。如何面向具体应用需求,合理分配灵敏度、线性度、温度稳定性等性能权重,研究线圈结构参数的协同优化设计方法,有效提升传感器综合

性能,将是线圈结构参数优化研究的重点。

2) 高性能标准化检测电路集成设计方法

检测电路是传感器信号转换处理的硬件基础与关键环节,直接影响传感器的灵敏度、线性度、温度稳定性等核心性能,决定其检测精度。目前,国内外围绕检测电路的优化设计方法已开展广泛深入研究,创新提出了多种新型电路与优化方法,大幅提升了传感器的相关性能。但现有检测电路研究仍存在一定局限,突出表现为:现有优化方法仅针对检测电路部分单元,很少着眼于整体电路的综合优化,制约了传感器综合性能的整体提升;检测电路缺乏标准体系,通用性与互换性差,线圈、电路及线缆难以根据应用需求模块化调整,使用过程中需重复标定;受限于当前分立元件制作工艺,传感器制备过程中随机误差较大。因此,如何基于电涡流传感器信号转换机理,着眼于检测电路整体性能,协同优化电路各核心单元,制定检测电路互换匹配标准,研究高性能标准化检测电路集成设计方法,甚至开发内置校准功能的集成芯片,极有可能成为检测电路研究的热点。

3) 多环境变量下高精度误差补偿机制与方法

外界时变环境因素是造成传感器检测误差的首要原因,为此国内外已针对传感器误差补偿方法开展深入研究,大幅提升了传感器检测精度。事实上,电涡流传感器测量误差是多种环境变量耦合作用结果,而现有误差补偿方法普遍针对单一环境变量,在一定程度上制约了传感器性能的提升。如何揭示不同环境变量对传感器测量过程的作用机理,建立有效的动态误差补偿机制,融合数据融合、神经网络等各类误差补偿方法优势,研究多环境变量下高精度误差补偿方法,以有效提升传感器检测精度,将是电涡流检测领域研究的重点与难点。

4) 面向多物理量检测的新型电涡流传感器

目前,电涡流传感器主要应用于各领域内导电介质内部缺陷与微量位移的高精度检测。事实上,基于毕奥萨伐尔定律,电涡流效应除对位移、缺陷敏感外,与温度、磁导率等多种物理量均存在单调的映射关系。因此,如何构建电涡流敏感物理量与传感器输出信号间的映射关系,研发特殊用途甚至多物理量同步检测的新型电涡流传感器,以拓展传感器应用领域,将有可能成为未来电涡流传感器研究的发展趋势。此外,研发新型柔性阵列电涡流传感器等非常规传感器,解决大面积曲面介质间微小间隙的检测问题,极有可能成为电涡流传感器研究的热点。

5 结 论

在深入剖析和系统总结国内外电涡流传感器研究与应用现状的基础上,聚焦线圈结构、检测电路以及误差补

偿方法,重点探讨了优化其核心性能的基本原理与关键技术,并对相关研究的发展趋势进行了初步构想与展望。总体而言,国内外学者已在电涡流传感器性能优化核心理论与关键技术研究方面取得丰硕成果,但仍未形成系统完善的理论与技术体系可供借鉴,以致现有电涡流传感器普遍存在灵敏度欠佳、线性度不足、突变温度场下检测精度亟待提升等突出局限,根源制约着其在各类极限环境下高精度检测领域的应用。因此,亟需基于现有研究成果,深入开展线圈结构参数协同优化设计、高性能标准化检测电路集成设计方法、高精度测量误差动态补偿机制与方法、多用途新型电涡流传感器研制等相关研究,重点突破线圈结构参数优化、检测电路创新设计和测量误差动态补偿等技术瓶颈,为本质提升电涡流传感器性能,根源促进其发展应用提供理论依据和技术支撑。

参考文献

- [1] 孙艳秋. 电涡流传感器的技术优势及应用[J]. 电子元件与材料, 2014, 33(3): 99-100.
SUN Y Q. Technical advantages and applications of eddy current sensors [J]. Electronic Components and Materials, 2014, 33(3): 99-100.
- [2] VASILIEV V P. Current state of high-accuracy laser ranging[J]. Physics-Uspekhi, 2018, 61(7): 707-713.
- [3] WANG H B, LI W, FENG ZH H. Noncontact thickness measurement of metal films using eddy-current sensors immune to distance variation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(9): 2557-2564.
- [4] ZHOU D Q, WANG J, WU J L, et al. Investigation of rectangular differential probes for pulsed eddy current non-destructive testing [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2016, 58(2): 87-100.
- [5] ULAPANE N, ALEMPIJEVIC A, MIRO J V, et al. Non-destructive evaluation of ferromagnetic material thickness using pulsed eddy current sensor detector coil voltage decay rate [J]. NDT & E International, 2018, 100: 108-114.
- [6] 于亚婷,杜平安,廖雅琴. 线圈形状及几何参数对电涡流传感器性能的影响[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6): 1045-1050.
YU Y T, DU P AN, LIAO Y Q. Study on effect of coil shape and geometric parameters on performance of eddy current sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(6): 1045-1050.
- [7] 赵梓好,刘振侠,吕亚国,等. 高分辨率转子叶尖间隙测量传感器的设计及验证[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 132-139.
- [8] ZHAO Z Y, LIU ZH X, LYU Y G, et al. Design and verification of high resolution eddy current sensor for blade tip clearance measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 132-139.
- [9] ZHOU H T, HOU K, PAN H L, et al. Study on the optimization of eddy current testing coil and the defect detection sensitivity [J]. Procedia Engineering, 2015, 130: 1649-1657.
- [10] REN Y J, LI W, ZHAO G F, et al. Inductive debris sensor using one energizing coil with multiple sensing coils for sensitivity improvement and high throughput[J]. Tribology International, 2018, 128: 96-103.
- [11] ARJUN V, SASI B, RAO B P C, et al. Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2015, 226: 69-75.
- [12] SHEIRETOV Y, GRUNDY D, ZILBERSTEIN V, et al. MWM-array sensors for in situ monitoring of high-temperature components in power plants [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1527-1536.
- [13] 丁华,何宇廷,杜金强,等. 花萼状涡流传感器及其飞机金属结构疲劳损伤监测试验研究[J]. 机械工程学, 2013, 49(2): 1-7.
DING H, HE Y T, DU J Q, et al. Rosette eddy current sensor and its experimental research on aircraft metallic structure fatigue damage monitoring [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 1-7.
- [14] ZHU W, CRUCHLEY S, YIN W, et al. Evaluation of rail decarburisation depth using a H-shaped electromagnetic sensor [J]. NDT & E International, 2012, 46: 63-69.
- [15] 吕春峰,朱建平,匡兴红,等. 变面积式电涡流传感器线圈阻抗理论计算模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1907-1914.
LYU CH F, ZHU J P, KUANG X H, et al. Calculation model for coil impedance of area-variable eddy current sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1907-1914.
- [16] WU D H, YANG F, WANG X H, et al. Impedance calculation of arbitrary-shaped thin-walled coils for eddy-current testing of planar media[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2018, 279: 537-542.
- [17] CAO X G, SHI CH L. Linearity optimization of eddy current sensor using genetic algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(10): 7-9.
- [18] WANG P, ZHANG Y M, YANG J. Design and implementation of modified DDS based on FPGA [J]. Procedia Computer Science, 2018, 131: 261-266.

- [18] BOZOMITU R G, COJAN N. A new CMOS differential current-mode AGC on the division operation based[J]. *Microelectronics Journal*, 2015, 46(11): 1039-1045.
- [19] EGOROV A V, KUCHERYAVSKIY S V, POLAKOV V V. Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials[J]. *Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems*, 2017, 160: 8-12.
- [20] RICCI M, SILIPIGNI G, FERRIGNO L, et al. Evaluation of the lift-off robustness of eddy current imaging techniques[J]. *NDT & E International*, 2017, 85: 43-52.
- [21] CHENG J, QIU J H, JI H L, et al. Application of low frequency ECT method in noncontact detection and visualization of CFRP material[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 110: 141-152.
- [22] XU W CH, YANG CH, YU H P, et al. Microcrack healing in non-ferrous metal tubes through eddy current pulse treatment[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6016-6026.
- [23] 梁远远, 杨生胜, 文轩, 等. 脉冲涡流无损检测中缺陷量化技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 70-78.
- LIANG Y Y, YANG SH SH, WEN X, et al. Research on the quantification of defect in the nondestructive testing of pulse eddy current[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 70-78.
- [24] XIE L, GAO B, TIAN G Y, et al. Coupling pulse eddy current sensor for deeper defects NDT[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2019, 293: 189-199.
- [25] PEI Y L, LIU Y L, ZUO L. Multi-resonant electromagnetic shunt in base isolation for vibration damping and energy harvesting[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 423: 1-17.
- [26] DAVOODI H, JOUDA M, KORVINK J G, et al. Broadband and multi-resonant sensors for NMR[J]. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 2019, 112-113: 34-54.
- [27] CHENG Q R, DUAN F J, HUANG T T. Eddy-current sensor resonance measurement circuit parameter optimization considering sensitivity and quality factor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(1): 13-18, 24.
- [28] SERRANO-FINETTI E, CASAS O, ARENY R P. Common mode electronic noise in differential circuits[J]. *Measurement*, 2019, 140: 207-214.
- [29] SANTHOSHINI K M, MUSALA S, AVIRENI S. An integrator circuit using voltage difference transconductance amplifier[J]. *Solid State Electronics Letters*, 2019, 1(1): 10-14.
- [30] ATANASIJEVIC P, MIHAILOVIC P. Temperature compensation of NTC thermistors based anemometer[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2019, 285: 210-215.
- [31] 吕云腾, 祝长生. 基于温漂补偿的高温电涡流位移传感器[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(4): 749-753, 781.
- LYU Y T, ZHU CH SH. High temperature eddy current displacement sensor based on temperature drift compensation[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(4): 749-753, 781.
- [32] WANG H B, LI W, FENG ZH H. Noncontact thickness measurement of metal films using eddy-current sensors immune to distance variation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, 64(9): 2557-2564.
- [33] WANG H B, FENG ZH H. Ultraprecise and highly sensitive eddy current displacement sensor using self-temperature compensation[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2013, 203: 362-368.
- [34] WANG H B, JU B, LI W, et al. Ultraprecise eddy current displacement sensor working in harsh temperature environments with comprehensive self-temperature compensation[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2014, 211: 98-104.
- [35] MAHASETH D N, KUMAR L, ISLAM T. An efficient signal conditioning circuit to piecewise linearizing the response characteristic of highly nonlinear sensors[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2018, 280: 559-572.
- [36] YANG W L, ZHANG K. Design of nonlinear compensation circuit for eddy current sensor[J]. *Metrology Technology*, 2012(8): 14-17.
- [37] WOZNIAC A, JANKOWSKI M. Variable speed compensation method of errors of probes for CNC machine tools[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 316-321.
- [38] TRAFIMOW D. Confidence intervals, precision and confounding[J]. *New Ideas in Psychology*, 2018, 50: 48-53.
- [39] YU D L, DING CH, HE N, et al. Robust estimation and confidence interval in meta-regression models[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2019, 129: 93-118.
- [40] YAO H X, MIAO E M, NIU P CH. A new error analysis method for eddy current sensor measurement accuracy[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(22): 2757-2760.
- [41] 孙世政, 周清松, 何泽银. 嵌入式时栅角位移传感器

- 短周期误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 27-34.
- SUN SH ZH, ZHOU Q S, HE Z Y. Short period error analysis and compensation of embedded time grating angular displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 27-34.
- [42] BASKAR C, NESAKUMAR N, RAYAPPAN J B B, et al. A framework for analysing E-Nose data based on fuzzy set multiple linear regression: Paddy quality assessment[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2017, 267: 200-209.
- [43] MIAO EN M, NIU P CH, YAN Y. Research on error correction of eddy current sensor[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(21): 2527-2530.
- [44] 史露强, 何怡刚, 罗旗舞, 等. 基于传感器数据融合的倾斜角度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1683-1689.
- SHI L Q, HE Y G, LUO Q W, et al. Research on the measurement method of tilt angle based on sensor data fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1683-1689.
- [45] DING J, SUN SH L, MA J, et al. Fusion estimation for multi-sensor networked systems with packet loss compensation [J]. Information Fusion, 2019, 45: 138-149.
- [46] LEI B T, YI P X, LI Y H, et al. A temperature drift compensation method for pulsed eddy current technology [J]. Sensors, 2018, 18(6): 1952-1964.
- [47] SONG SH L, LU W K, ZUO F. Research on the displacement measurement accuracy of eddy current sensor in industrial control [J]. Information Technology and Network Security, 2018, 37(2): 85-89.
- [48] KANTOR Z, POLIK Z. Artificial neural network assisted compact inductive distance sensor [J]. Procedia Engineering, 2016, 168: 23-26.
- [49] LIU L, BI M H, XIAO SH L, et al. OLS based RBF neural network for nonlinear and linear impairments compensation in CO-OFDM system [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-8.
- [50] LI L, DING W K. Nonlinear compensation of eddy current sensor based on BP network [J]. Automation & Instrumentation, 2016, 31(2): 25-28.

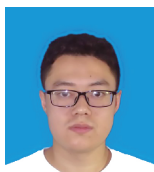
作者简介



李满宏, 分别在 2010 年和 2015 年于河北工业大学获得学士学位和博士学位, 现为河北工业大学讲师, 主要研究方向为核电检测机器人与六足机器人。

E-mail: lmh9181219@163.com

Li Manhong received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Hebei University of Technology in 2010 and 2015, respectively. Now, he is a lecturer in Hebei University of Technology. His main research interest includes nuclear power detection robot and hexapod robot.



王经天(通信作者), 2017 年于石家庄铁道大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电涡流传感器技术。

E-mail: wjtianer@126.com

Wang Jingtian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shijiazhuang Tiedao University in 2017. Now, he is a M. Sc. candidate in Hebei University of Technology. His main research interest includes eddy current sensor technique.