

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407301

# 脉冲涡流缺陷检测理论与技术研究综述\*

陈涛<sup>1,3</sup> 尹永奇<sup>1</sup> 吕程<sup>2</sup> 宋小春<sup>1</sup> 邓志扬<sup>1</sup> 廖春晖<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068; 2. 湖北特种设备检验检测研究院 武汉 430077;

3. 襄阳湖北工业大学产业研究院 襄阳 441100)

**摘要:** 由于具有非接触、效率高、检测信号的信息含量丰富等诸多优点,脉冲涡流技术被广泛应用工业产品的缺陷检测,尤其是带包覆层、异质、以及多层导电结构等检测难度极大的工业产品。脉冲涡流探头结构的设计和优化是提高检测灵敏度和准确度的关键,目前大量的研究工作围绕探头结构的设计和优化开展;不同材质、结构、以及缺陷类型或形状需要选用合适特征量表征,特征量的选取与分析也是脉冲涡流技术研究的关键;另外,由于脉冲涡流检测信号受提高高度影响极大,未知提高高度的缺陷准确检测面临极大的挑战,因此提高效应的抑制也是研究的重点之一。本文从探头的设计与开发、特征量的选取与分析、提高效应的抑制等方面,对脉冲涡流检测技术的研究进展进行综述。同时,为更好的推动脉冲涡流检测技术发展,论文在现有的研究基础上,对脉冲涡流探头设计、特征量分析、以及提高效应抑制等进行了展望。

**关键词:** 脉冲涡流;探头设计;特征量分析;提高效应抑制

**中图分类号:** TN06;TM85 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:**

## Review of research on theory and technology of pulsed eddy current testing for detection of defects

Chen Tao<sup>1,3</sup> Yin Yongqi<sup>1</sup> Lyu Cheng<sup>2</sup> Song Xiaochun<sup>1</sup> Deng Zhiyang<sup>1</sup> Liao Chunhui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Hubei Special Equipment Inspection and Testing Research Institute, Wuhan 430077, China;

3. Xiangyang Industrial Institute of Hubei University of Technology, Xiangyang 441100, China)

**Abstract:** Due to the advantages of non-contact, high efficiency, and rich information content of the detection signal, pulsed eddy current technology is widely used in the defect detection of industrial products, especially those with cladding, heterogeneous, and multi-layer conductive structures that are extremely difficult to detect. The design and optimization of pulsed eddy current probe structure is the key to improve the detection sensitivity and accuracy, and a lot of research work has been carried out around the design and optimization of the probe structure; different materials, structures, and defects of different types or shapes need to be characterized by the use of appropriate features, and the selection and analysis of the features is also the key to the research of pulsed eddy current technology; In addition, since the pulse eddy current detection signal is greatly affected by the lift-off height, the accurate detection of defects with unknown lift-off height faces great challenges, so the suppression of the lift-off effect is also one of the research focuses. In this paper, the research progress of pulsed eddy current detection technology is reviewed from the aspects of probe design and development, selection and analysis of feature quantity, and suppression of lift-off effect, etc. At the same time, in order to better promote the development of pulsed eddy current detection technology, the paper, on the basis of the existing research, makes an outlook on the design of pulsed eddy current probe, feature quantity analysis, and the suppression of lift-off effect.

**Keywords:** pulsed eddy current; probe design; feature quantity analysis; inhibition of lifting effect

## 0 引言

涡流检测作为五大常规无损检测技术之一,具有无需接触工件表面、检测速度快、检测精度高等优点,被广泛应用于航空航天、石油化工、精密机械等领域。但是,受趋肤效应的影响,传统涡流检测方法无法对工件较深处的缺陷以及带包覆层的工件缺陷进行检测。为解决上述问题,脉冲涡流(pulsed eddy current, PEC)检测技术应运而生。脉冲涡流技术采用脉冲信号作为激励,极大地增加了涡流的渗透深度,有效克服了传统涡流趋肤效应的限制;而且相对于传统的单频涡流信号,脉冲信号具有更多的频率成分,可以携带更多的缺陷信息。脉冲涡流技术一经问世,就被广泛应用于带包覆层管道壁厚减薄检测<sup>[1]</sup>、多层金属结构缺陷检测<sup>[2]</sup>、异质金属缺陷检测<sup>[3]</sup>等方面。

随着科技日益发展,钢、铁、铜等金属材料的使用大幅增加,尤其是航空航天、石油机械、电力电工等工程领域。受环境因素的影响,金属材料在使用中会出现腐蚀、断裂、弯曲等情况,对应产生腐蚀坑、孔状或者点状缺陷,影响材料的使用寿命,甚至会威胁到人民的生命和财产安全,因此需要对这些金属材料的状态进行检测,及时进行材料的更换,预防重大事故的发生。近些年来,许多国内外学者针对脉冲涡流技术开展了多方面的深入研究,主要包括脉冲涡流探头的设计与开发、脉冲涡流响应信号特征量的选取、脉冲涡流提离效应的抑制等。

## 1 脉冲涡流检测技术基础

脉冲涡流的检测原理如图 1 所示。检测时,在激励线圈上加载脉冲电流,在脉冲电流的高电平阶段,激励线圈产生初级磁场  $B_1$ ;在脉冲电流的上升沿/下降沿,激励线圈的初级磁场快速增大/衰减,使得试件表面感应出涡流  $E$ ,感应涡流的信号特征跟试件的材料及几何参数相关。利用接收线圈提取感应涡流  $E$  产生的次级磁场  $B_2$  并分析,即可得到试件的材料及几何特征参数。

## 2 脉冲涡流技术发展现状

脉冲涡流检测技术作为新兴无损检测技术之一,克服了传统涡流检测由于受趋肤效应影响,检测深度浅、检测距离短的问题。近十几年来主要应用于带包覆层管道壁厚减薄检测、多层金属内部状态检测、油井套管缺陷检测等领域。在上述应用领域中,国内外学者开展了脉冲涡流探头的设计与开发、脉冲涡流响应信号的选取与分析、提离效应的抑制等方面的研究。

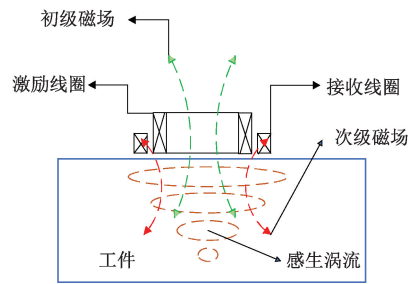


图 1 脉冲涡流检测原理图

Fig. 1 Pulsed eddy current testing (PECT) schematic diagram

### 2.1 脉冲涡流探头设计与开发

近年来,脉冲涡流检测技术的基础研究主要集中在脉冲涡流探头的设计与开发方面,这在脉冲涡流的应用中是至关重要的一步,一个好的探头可以使检测事半功倍。因此,对于探头设计的基础理论与知识的研究与探索也是非常重要的,这也是进行探头的设计和开发的第一步。近年来,许多学者对探头设计的理论进行了研究与探索。

周德强等<sup>[4]</sup>提出了一种基于不同金属材料表面涡流分布规律的脉冲涡流矩形差分探头设计方法,并通过仿真和实验验证了该方法的有效性。崔赞等<sup>[5]</sup>结合脉冲涡流检测技术的特点,阐述了制作激励、接收线圈的重要公式,为今后激励、接收线圈的优化提供了理论支持。张曦郁等<sup>[6]</sup>在利用脉冲涡流检测腐蚀缺陷中,研究了激励周期和占空比与检测腐蚀缺陷灵敏度的关系,并得出最佳设计参数。雷美玲<sup>[7]</sup>在传统的圆柱形和矩形单探头的基础上进行了参数优化,提高了探头检测灵敏度;并对比了两者在旋转检测铆钉周围裂纹时的灵敏度。Ona 等<sup>[8]</sup>研究了激励线圈与检测线圈的间距以及探头的提高高度对互感式检测探头检测信号的影响,并指出改变激励线圈与检测线圈的间距以及探头的提高高度,可以提高探头的检测灵敏度。

脉冲涡流检测探头设计理论的研究,为下一步针对不同的对象的检测打下了坚实的基础。目前,对于不同对象的检测,所设计开发的探头主要包括常规探头(以圆柱型探头为例,如图 2(a)所示)、差分探头(以矩形差分探头为例,如图 2(b)所示)、阵列探头(以双线圈型探头为例,如图 2(c)所示)、聚焦探头(以跑道型探头为例,如图 2(d)所示),差分探头能够提高信噪比,获取到更易于观察的脉冲涡流响应信号;阵列探头在一定程度上可以减少人工扫描的难度、提高检测效率;聚焦探头能够提高探头的磁场聚焦能力,以及增强大提离下的缺陷检测精度。以上几种探头的检测能力与优点如表 1 所示。

表 1 中所列出的几种探头是除常规圆型、矩型探头外最为常用的探头,可以满足目前的检测需求。但

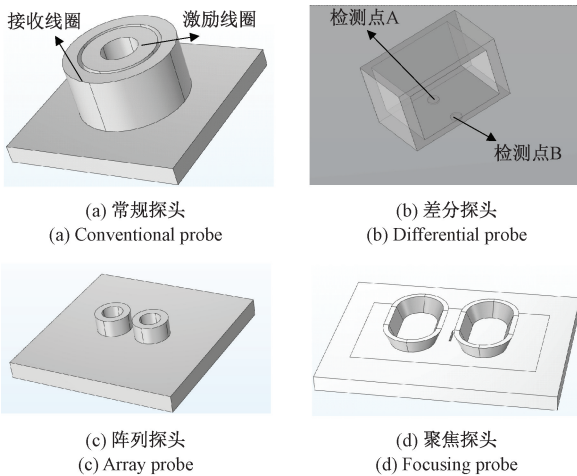


图 2 不同类型探头示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different types of probes

表 1 不同类型探头对比

Table 1 Comparison of different types of probes

探头类型	探头类型	检测能力/特点
差分探头	平面差分型 <sup>[9]</sup>	可以检测到 8.55 mm 提离下的表面裂纹,以及无提离下埋深 4.8 mm 的内部裂纹
阵列探头	双线圈型 <sup>[10]</sup>	得到的特征信号峰值分别与表面缺陷宽度、缺陷深度呈正比以及指数关系
聚焦探头	磁芯+线圈型 <sup>[11]</sup>	对飞机铆接结构内部缺陷具有较强的检出能力
	屏蔽罩+线圈型 <sup>[12]</sup>	可以检测到非导电条件下钢管的表面腐蚀型缺陷
	圆台型 <sup>[13-14]</sup>	提高了检测大面积腐蚀以及局部腐蚀缺陷的能力
聚焦探头	U 型 <sup>[15-17]</sup>	可以在双层钢管间隙中,同时检出内管的内壁和外壁减薄缺陷;具有更高的聚焦性能;在提离 50 mm 下可以对不锈钢板局部缺陷进行有效检测
	双激励、双接收型 <sup>[18]</sup>	对于带保温层的管道腐蚀缺陷具有较好的检出能力
	跑道型 <sup>[19]</sup>	可以有效地减少检测过程中电磁能量的耗散,增大检测面积,缩短检测时间
	半圆型 <sup>[20]</sup>	半圆型探头的磁场聚焦性能比矩形、U 型的探头更好

2.2 特征量的选取与分析

近几年,脉冲涡流检测技术在检测厚度、裂纹缺陷以及孔状缺陷等方面做出了巨大的贡献。为准确反映缺陷的几何信息,特征量的提取与分析是脉冲涡流检测技术中不可或缺的一部分。在脉冲涡流检测中经常使用的特征量包括:差分信号峰值/检测信号峰值、差分信号过零时间/检测信号过零时间、差分信号峰值时间/检测信号峰值时间等。常用时域特征量如图 3 所示。常规特征量及其对应的检测类型如表 2 所示。

表 2 中的展示的是常用的特征量,主要是从时域检测电压信号中提取而来。除却常用特征量外,众多学者也从其他信号中提取需要的特征量,如:磁场信号、频域信号以及经算法处理之后的信号等。刘相彪等<sup>[41]</sup>选择磁场信号的峰值时间作为特征量,实现了内外管管壁减薄以及局部腐蚀缺陷深度的定量分析;同时,刘相彪等<sup>[42]</sup>还提取磁场梯度信号的峰值作为腐蚀程度的表征量,并根据磁场梯度信号峰值-探头位置扫描曲线实现了腐蚀缺陷成像;任淑廷等<sup>[43]</sup>选取磁场梯度脉冲涡流信号在不同方向上的积分作为特征量,并证明了该特征量与

是,对于一些特殊的检测环境如石油井下管的检测,这些较为常规的探头发挥的作用的就很小了。为实现对石油井下管的检测,Yang 等<sup>[21]</sup>提出了一种具有不同绕组方向和匝数的脉冲涡流检测探头(STC)设计方案,同时搭建了具有磁场聚焦效果的井下管 PEC 检测系统。Liu 等<sup>[22]</sup>修改了多发射阵列的激励电流方式,使得 PEC 阵列能够把涡流场聚焦在发射阵列的中心。在石油管道的检测中还涉及到不同方向裂纹的检测,在付跃文等<sup>[23-24]</sup>的研究下,得到初步的结论,横向脉冲涡流探头更适合检测油管腐蚀缺陷,纵向探头更适合检测保护套管腐蚀缺陷。

目前,脉冲涡流的探头的设计和开发在体量上是很大的,这也限制了脉冲涡流应用领域的拓展。将脉冲涡流探头朝着轻量化、柔性化发展是脉冲涡流检测技术进一步发展的方向与难点。

表 2 常规特征量

Table 2 Conventional characteristic quantities

特征量	检测缺陷类型/特点
差分信号峰值/ 检测信号峰值 <sup>[25-30]</sup>	缺陷深度、缺陷横截面积、缺陷位置变化
	腐蚀减薄量
	两金属板之间的空隙
	油井套管局部缺陷
差分信号过零时间/ 检测信号过零时间 <sup>[31]</sup>	上表面缺陷深度
	腐蚀深度
提离交叉点 <sup>[32-34]</sup>	不受提离高度影响
	导电结构涂层下的缺陷深度
单对数坐标系下 信号斜率 <sup>[35-36]</sup>	金属厚度测量
	非铁磁性镀层厚度测量
电压信号衰减率 <sup>[37-40]</sup>	可以进行材料壁厚测量
	与被测工件壁厚呈指数关系
	铁磁性材料厚度定量
	不适用于局部缺陷评估

缺陷深度存在一定的关联性;齐勇等<sup>[44]</sup>选取磁场梯度信号的峰值作为特征量,通过特征量与表面缺陷长度之间的关系,实现了表面缺陷长度的定量分析;Ge 等<sup>[45]</sup>选取后峰值时间作为特征量之一,通过比较峰值时间与后峰



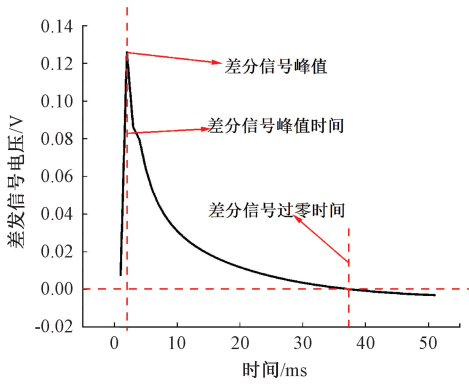


图 3 常用时域特征量

Fig. 3 Commonly used time-domain eigenvectors

值时间处 Bx 曲线峰值,成功区分被测工件上下表面缺陷;张曦郁等<sup>[46]</sup>提出了一种基于堆叠自编码器神经网络的双层套管腐蚀缺陷分类识别方法;Johnston 等<sup>[47]</sup>提出了一种检测和识别松散部件材料的方法,该方法采用脉冲涡流(PEC)结合改进的主成分分析(MPCA)方法;Wei 等<sup>[48]</sup>提出了一种可以对氧化状态进行判断的特征量—边缘谱(希尔伯特谱)质心,其与工作辊的表面氧化状态呈线性负相关;Sun 等<sup>[49]</sup>提出了一种基于互相关性的脉冲涡流响应信号处理方法,并提取互相关信号的峰值作为缺陷深度表征的特征量;Ulapane 等<sup>[50]</sup>提出了一种新的测厚方法,将材料厚度作为一个三维的函数,单对数坐标系下脉冲涡流响应信号的中期信号斜率的负倒数与截距随材料厚度变化而变化;

以上皆是使用单特征量来对不同缺陷类型进行检测。但是在实际检测工况中,会涉及到不同缺陷类型的分类、内外伤的区分等,这时候就需要使用两个或多个特征量来对不同缺陷类型进行区分,以达到检测的需求。

Jin 等<sup>[51]</sup>采用改进的主成分分析法与 FFT 幅度谱低频量的值作为组合特征,实现了对油气井多层管状结构不同缺陷的识别和分类。许向东<sup>[52]</sup>根据峰值以及峰值时间的变化来区分不同深度的亚表面缺陷。Huang 等<sup>[53]</sup>使用脉冲涡流测量铁磁性涂层的厚度,通过组合脉冲涡流响应信号的典型特征与熵特征作为铁磁性涂层厚度测量的特征量。

在实际检测中,脉冲涡流检测信号容易受激励源、线圈缠绕精度、硬件之间的连接等因素的影响,检测信号往往会携带大量的噪声,同时检测信号的幅值以及相位等特征量会发生波动,导致提取的特征量不准确,进而造成误判或者错算的结果。因此,为了规避这些影响因素的影响,应当选择不受这些因素影响的特征量进行提取和分析。

### 2.3 提高效应的抑制方法

脉冲涡流克服了传统涡流的趋肤效应,因此逐渐被应用在带包覆层管道腐蚀、带保温层管道内部缺陷以及大提高下管道或者板材局部缺陷的检测。但是,脉冲涡流检测技术受提高影响较大,因此抑制提高影响至关重要。众多国内外学者就该问题做了大量的研究,主要集中在提高高度预测、提高信号处理、特征量选择等。提高抑制方法如表 3 所示。表 3 中提到的各种方法各有优

表 3 提高抑制方法

Table 3 Extraction inhibition methods

	提高抑制方法	应用/特点
特征量选择	频域脉冲涡流响应信号的实部和虚部的提高交叉点 <sup>[54]</sup>	金属厚度测量
	峰值时间 <sup>[55-56]</sup>	对提高变化不敏感
	脉冲涡流响应信号的功率谱密度峰值 <sup>[57]</sup>	在 80 mm 提高下壁厚测量误差在 9% 以内
	相对磁通量 <sup>[58]</sup>	该特征量只与板厚相关
	磁通量的相对变化量 <sup>[59]</sup>	适用于几十毫米提高下的铁磁性平板检测
提高信号处理	差分信号二次微分零时刻值匹配补偿法 <sup>[60]</sup>	检测多层金属结构的内部缺陷有较好的提高抑制效果
	基于提高数据库的峰值补偿法 <sup>[61]</sup>	通过线性阵列探头实现检测成像
	差分信号峰值、提高高度与缺陷深度构成三次函数曲线 <sup>[62]</sup>	用该曲线进行缺陷深度的反演可以消除提高效应
	快速傅里叶变换动态轨迹法 <sup>[63]</sup>	降低提高效应
	基于偏最小二乘模型的预测值 <sup>[64]</sup>	减少提高高度的影响,提高检测精度
提高高度预测	分段互相关处理 <sup>[65]</sup>	提高高度不大于 120 mm 的条件下,厚度测量相对误差小于 10%
	基于线圈耦合模型的动态时间常数的方法 <sup>[66]</sup>	在检测非铁磁性金属厚度时不受提高效应影响
	带控制量的自回归 (ARX) 模型的系统辨识度 <sup>[67]</sup>	该系统模型的高频特性可用来表征提高高度
	探头与试件之间的分布电容 <sup>[68]</sup>	预测提高高度
	双对数坐标系下中期信号直线段的截距 <sup>[69]</sup>	测量保温层厚度
	基于持续同调的脉冲涡流提高距离测量方法 <sup>[70]</sup>	该方法在 60~140 mm 提高下检测 18 mm 以上板厚的相对误差在 6% 以内
	脉冲涡流中非同轴 T-R 传感器的电导率交叉点 <sup>[71]</sup>	可以准确反演试件厚度与传感器的提高高度

劣,特征量选择需要在检测之前构建特征量-缺陷参数模型才可以进行定量检测,操作比较繁杂;提高信号处理减少了检测前的准备时间,但是受到处理过程复杂程度的影响可能会使信号处理的时间过长,导致检测速度过慢;提高高度预测主要是进行提高高度即包覆层或保温层的厚度的预测,可以作为其他提高抑制方法的补充方法。

提高交叉点 (lift-off intersection point, LOI) 指的是当检测探头与被测金属板材之间距离变化时,随距离变化的脉冲涡流信号交于一点,该点即为提高交叉点,如图 4 所示。由于提高交叉点 (LOI) 在 2.2 中已经提到过了,因此在本节中暂不对提高交叉点常规用法进行总结。提高交叉点作为脉冲涡流检测技术抑制提高效应最常用的方法,也存在一些问题,比如:非铁磁性金属的脉冲涡流检测信号的一次差分信号中存在提高交叉点,而铁磁性金属的脉冲涡流检测信号的一次差分信号中不存在提高交叉点,这极大的限制了提高交叉点在脉冲涡流检测中使用。为了解决这个问题,Wen 等<sup>[72-74]</sup>使用二次差分方法提取铁磁性材料脉冲涡流响应信号的提高交叉点;与此同时,他还发现了铁磁性和非铁磁性材料的频域提高交叉点;并通过改变脉冲激励上升时间来调整提高交叉点,进一步扩大测量范围和提高灵敏度。此外,Fan 等<sup>[75]</sup>比较了提高交叉点与 PEC 信号及其导数的峰值、峰值时间之间的差异,认为提高交叉点在灵敏度、线性度和测量范围等方面具有更良好的性能。

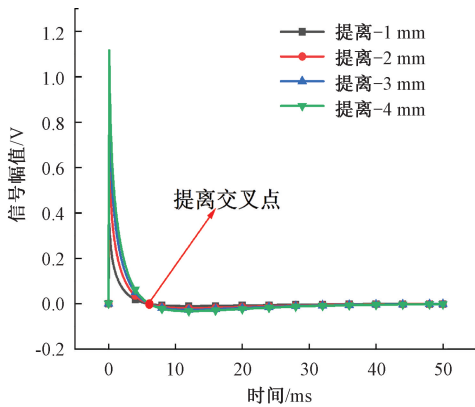


图 4 提高交叉点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of Lift-off intersection point

综上所述,提高效应抑制的研究可以被分为 3 个主要方面:提高高度预测、提高信号处理和特征量选择。特征量选择因其在应用中的广泛性而显得尤为重要。然而,现阶段特征量选择存在一些问题,例如在提取特征量时需采集大量信号以获取所需信息,这导致检测准备过程耗时过长。因此,未来的研究应当寻找能够缩短这一阶段时间的方法或特征量。除此之外,提高信号处理和提高高度预测的研究也应当致力于发展更加简便快捷

的技术手段。这样,整体的检测时间将得以减少,从而为更快速、更精准的测量技术奠定基础。

### 3 结 论

脉冲涡流作为一种新兴的无损检测技术,具有非接触、效率高、检测信号的信息含量丰富等显著优点,被认为是最有潜力的、用于带包覆层、异质、以及多层导电结构等检测难度极大的工业产品无损检测新技术之一。但是,目前脉冲涡流技术还面临探头体积大及精度低、特征量提取不精确、以及提高效应的干扰等 3 个方面的挑战。本文对现有的研究进展进行详细的综述及讨论,并围绕脉冲涡流技术的准确性、效率、成本、信号处理的便捷性等问题,以探头设计、特征量分析、以及提高效应的抑制等为重点,对脉冲涡流技术未来的研究重点和发展方向进行了展望。通过技术创新和应用优化,脉冲涡流检测技术有望在复杂结构工业产品无损检测领域发挥更大作用,为结构安全和设备寿命的延长提供强有力的技术支持。

### 参考文献

- [1] 陈定岳,赖圣,陈虎,等. 包覆层管道内壁局部腐蚀脉冲涡流检测探头的性能比较 [J]. 无损检测, 2015, 37(8): 12-16.  
CHEN D Y, LAI SH, CHEN H, et al. Performance comparison of probes for detecting localized corrosion on the inner wall of coated pipelines by pulsed eddy current testing [J]. *Nondestructive Testing*, 2015, 37(8): 12-16.
- [2] 邹国辉. 飞机多层铆接结构脉冲涡流检测传感器的设计与参数优化研究 [D]. 南昌:南昌航空大学, 2015.  
ZOU G H. Design and parameter optimization of pulsed eddy current testing sensor for multi-layer riveted structure of aircraft [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [3] 张超,李勇,闫贝,等. 双层异质金属套管缺陷的脉冲涡流检测研究 [J]. 传感器与微系统, 2019, (11): 8-10, 14.  
ZHANG CH, LI Y, YAN B, et al. Research on pulsed eddy current testing for defects in double-layer heterogeneous metal sleeves [J]. *Sensors and Microsystems*, 2019, (11): 8-10, 14.
- [4] 周德强,王俊,潘萌,等. 脉冲涡流矩形差分探头缺陷检测机理 [J]. 中国机械工程, 2016, 27(22): 3032-3037.  
ZHOU D Q, WANG J, PAN M, et al. Detection mechanism of pulsed eddy current testing with rectangular differential probe for defect detection [J]. *China*

- Mechanical Engineering, 2016, 27(22): 3032-3037.
- [ 5 ] 崔赞,孙志毅,谢嘉麟. 脉冲涡流检测探头的研究与设计[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(9): 130-131, 133.  
CUI Y, SUN ZH Y, XIE J L. Research and design of pulsed eddy current testing probe [J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(9): 130-131, 133.
- [ 6 ] 张曦郁,李勇,敬好青,等. 铁磁性套管脉冲远场涡流检测激励参数优化[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(8): 7-10.  
ZHANG X Y, LI Y, JING H Q, et al. Optimization of excitation parameters for pulsed far-field eddy current testing of ferromagnetic pipeline casing [J]. Sensors and Microsystems, 2017, 36(8): 7-10.
- [ 7 ] 雷美玲. 多层铆接结构铆钉孔周裂纹的脉冲涡流检测及其自动化扫描实现[D]. 南昌:南昌航空大学, 2018.  
LEI M L. Pulse eddy current testing for the detection of rivet hole peripheral cracks in multi-layer riveted structures and its automated scanning implementation [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [ 8 ] ONA D I, TIAN G Y, SUTTHAWEEKUL R, et al. Design and optimisation of mutual inductance based pulsed eddy current probe[J]. Measurement, 2019, 144: 402-409.
- [ 9 ] 杨冉,翟国富,徐博,等. 基于脉冲涡流技术的柔性平面差分探头设计[J]. 仪表技术与传感器, 2022(10): 1-5.  
YANG R, ZHAI G F, XU B, et al. Design of flexible planar differential probe based on pulsed eddy current technology [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2022(10): 1-5.
- [ 10 ] 郭庆,张洪波,胡鸿志,等. 脉冲涡流阵列探头与铝合金缺陷定量检测[J]. 科学技术工程, 2022, 22(2): 593-599.  
GUO Q, ZHANG H B, HU H ZH, et al. Pulsed eddy current array probe and quantitative detection of aluminum alloy defects [J]. Science and Technology Engineering, 2022, 22(2): 593-599.
- [ 11 ] YANG B, ZHANG H, KANG Z, et al. Investigation of pulsed eddy current probes for detection of defects in riveted structures [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2013, 28(3): 278-290.
- [ 12 ] MAJIDNIA S, RUDLIN J, NILAVALAN R. Investigations on a pulsed eddy current system for flaw detection using an encircling coil on a steel pipe [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2014, 56(10): 560-565.
- [ 13 ] 蔚道祥,杨宇清,司俊,等. 基于圆台型传感器的带包覆层铁磁性管道脉冲涡流检测研究[J]. 化工装备技术, 2017, 38(5): 12-14, 17.  
WEI D X, YANG Y Q, SI J, et al. Research on pulsed eddy current testing for coated ferromagnetic pipeline based on circular-based sensor [J]. Chemical Equipment Technology, 2017, 38(5): 12-14, 17.
- [ 14 ] LI Y, LIU Z, YAN B, et al. A funnel-shaped probe for sensitivity enhancement in pulse-modulation eddy current inspection of subsurface flaws in conductors [J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2020, DOI: 10.1016/j.sna.2020.111991.
- [ 15 ] 江礼凡,付跃文,余兆虎,等. 带钢制保护套管的钢管腐蚀缺陷的脉冲涡流检测方法研究[J]. 失效分析与预防, 2019, 14(6): 378-383, 400.  
JIANG L F, FU Y W, YU ZH H, et al. Research on pulsed eddy current testing method for corrosion defects of steel pipe with protective steel tube [J]. Failure Analysis and Prevention, 2019, 14(6): 378-383, 400.
- [ 16 ] YU Z, YANG F, FU Y, et al. Investigation of focusing properties of probes for pulsed eddy current testing [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23): 26830-26838.
- [ 17 ] 杨帆,余兆虎,付跃文,等. 基于U形磁导体聚焦探头的脉冲涡流检测研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(2): 267-276.  
YANG F, YU ZH H, FU Y W, et al. Research on pulsed eddy current testing based on U-shaped magnetic conductor focusing probe [J]. Journal of Sensing Technology, 2022, 35(2): 267-276.
- [ 18 ] 曹爱松,张烨,张蒲根,等. 基于聚焦型探头脉冲涡流检测的保温层下腐蚀仿真研究[J]. 化工装备技术, 2020, 41(4): 10-14.  
CAO AI S, ZHANG Y, ZHANG P G, et al. Simulation research on corrosion detection under insulation layer based on focused probe pulsed eddy current testing [J]. Chemical Equipment Technology, 2020, 41(4): 10-14.
- [ 19 ] 宋韵,武新军. 不锈钢小径管跑道型脉冲涡流测厚传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(5): 30-32, 37.  
SONG Y, WU X J. Research on pulsed eddy current thickness sensor with racetrack shape for stainless steel small diameter tube [J]. Sensors and Microsystems, 2021, 40(5): 30-32, 37.
- [ 20 ] YANG F, LI Z, FU Y, et al. Comparison of different types of focusing probes in pulsed eddy current testing [J]. AIP Advances, 2022, DOI: 10.1063/5.0090311.
- [ 21 ] YANG L, LIU C, DANG J, et al. Synthesized transmitting coil for magnetic focusing of pulsed eddy current for downhole casing inspection [J]. Applied Sciences-Basel, 2022, DOI: 10.3390/app12157695.
- [ 22 ] LIU C, DANG B, WANG H, et al. Synthesized magnetic

- field focusing for the non-destructive testing of oil and gas well casing pipes using pulsed eddy-current array [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022, DOI: 10.1109/TMAG.2022.3186548.
- [23] 付跃文, 喻星星. 脉冲涡流方法过油管检测套管横向裂缝研究[J]. *机械工程学报*, 2014, (24): 1-9.  
FU Y W, YU X X. Study on lateral crack detection of pipeline casing by pulsed eddy current method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, (24): 1-9.
- [24] 付跃文, 喻星星. 油套管腐蚀脉冲涡流检测中探头类型的影响[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(1): 208-217.  
FU Y W, YU X X. Influence of probe types on corrosion detection of oil and gas pipeline by pulsed eddy current testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(1): 208-217.
- [25] 董智文. 带包覆层工业管道腐蚀程度测量方法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.  
DONG ZH W. Research on corrosion measurement method for industrial pipelines with coating [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020.
- [26] 张超, 李勇, 刘正帅, 等. 航空金属套管结构脉冲远场涡流检测机制及探头优化[J]. *空军工程大学(自然科学版)*, 2021, 22(1): 16-21.  
ZHANG CH, LI Y, LIU ZH SH, et al. Detection mechanism and probe optimization of aerospace metal casing structures by pulsed far-field eddy current testing [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2021, 22(1): 16-21.
- [27] CHEN X, NIU H. Pulsed eddy current testing for gap measurement of metal casing [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, DOI: 10.1088/1361-6501/ac6486.
- [28] 孙虎. 基于脉冲涡流的套管缺陷检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.  
SUN H. Research on casing defect detection method based on pulsed eddy current [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [29] XIE S, LU G, ZHANG L, et al. Quantitative evaluation of deep-shallow compound defects using frequency-band-selecting pulsed eddy current testing [J]. *NDT & E International*, 2023, DOI: 10.1016/j.ndteint.2022.102750.
- [30] CHEN H, XU Z, ZHOU Z, et al. Study on the effect of metal mesh on pulsed eddy-current testing of corrosion under insulation using an early-phase signal feature [J]. *Materials*, 2023, DOI: 10.3390/ma16041451.
- [31] XIE S, ZHANG L, ZHAO Y, et al. Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects [J]. *NDT & E International*, 2020, DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.102211.
- [32] LI Y, JING H, ABIDIN I M Z, et al. A gradient-field pulsed eddy current probe for evaluation of hidden material degradation in conductive structures based on lift-off invariance [J]. *Sensors (Switzerland)*, 2017, DOI: 10.3390/s17050943.
- [33] ZHAO L, LI C J, DUAN Z X, et al. The metal thickness detection using pulsed eddy-current computation and detection method [J]. *Cluster Computing*, 2018, DOI: 10.1007/s10586-018-2335-4.
- [34] 王垚. 基于脉冲涡流提离交叉点的镀层厚度检测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
WANG Y. Research on coating thickness measurement method based on pulse eddy current lift-off crossover point [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [35] 柯海. 脉冲涡流测厚信号斜率法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
KE H. Research on slope method of pulse eddy current thickness measurement signal [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [36] 蔡勤, 李继承, 戚政武, 等. 基于脉冲涡流(瞬变电磁)技术的带包覆层压力管道壁厚检测研究[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(2): 21-26.  
CAI Q, LI J CH, QI ZH W, et al. Research on wall thickness detection of coated pressure pipeline based on pulsed eddy current (transient electromagnetic) technology [J]. *Thermal Processing Technology*, 2023, 52(2): 21-26.
- [37] ULAPANE N, ALEMPIJEVIC A, VALLS MIRO J, 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.
- [38] SUN H, SHI Y, ZHANG W, et al. A study on ferromagnetic casing wall thinning evaluation based on pulsed eddy current testing [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, DOI: 10.1109/TIM.2021.3111002.
- [39] 邢仁飞, 杨帆, 付跃文, 等. 水冷壁管腐蚀脉冲涡流检测信号处理与成像[J]. *无损检测*, 2023, 45(1): 8-13.  
XING R F, YANG F, FU Y W, et al. Signal processing and imaging of corrosion in water-cooled wall tubes by pulsed eddy current testing [J]. *Nondestructive Testing*, 2023, 45(1): 8-13.



- [40] ZHANG W, SUN H, TAO A, et al. Local defect detection of ferromagnetic metal casing based on pulsed eddy current testing [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, DOI: 10.1109/TIM. 2022. 3175264.
- [41] 刘相彪, 李勇, 陈振茂, 等. 基于磁场测量的脉冲远场涡流检测双层套管仿真研究[C]. 2013 远东无损检测新技术论坛论文集, 2013.  
LIU X B, LI Y, CHEN ZH M, et al. Simulation research on pulsed far-field eddy current testing of double-casing based on magnetic field measurement [C]. *Proceedings of the 2013 Far East Forum on New Nondestructive Testing Technologies*, 2013.
- [42] 刘相彪, 李勇, 闫贝, 等. 基于脉冲涡流磁场梯度检测的多层金属结构层间腐蚀缺陷成像[J]. *西安理工大学学报*, 2014, 30(4): 460-464.  
LIU X B, LI Y, YAN B, et al. Imaging of interlayer corrosion defects in multi-layer metal structures based on pulsed eddy current magnetic field gradient detection [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2014, 30(4): 460-464.
- [43] 任淑廷, 李勇, 张曦郁, 等. 基于磁场梯度脉冲涡流检测的航空结构亚表面腐蚀缺陷可视化方法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 20(3): 84-89.  
REN SH T, LI Y, ZHANG X Y, et al. Visualization method of subsurface corrosion defects in aviation structures based on magnetic field gradient pulsed eddy current testing [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2019, 20(3): 84-89.
- [44] 齐勇, 刘相彪, 李勇, 等. 基于磁场梯度测量的脉冲涡流检测关键技术研究[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(8): 1108-1112, 1135.  
QI Y, LIU X B, LI Y, et al. Research on key technologies of pulsed eddy current testing based on magnetic field gradient measurement [J]. *China Machinery Engineering*, 2014, 25(8): 1108-1112, 1135.
- [45] GE J, YANG C, WANG P, et al. Defect classification using postpeak value for pulsed eddy-current technique [J]. *Sensors (Switzerland)*, 2020, 20(12): 1-10.
- [46] 张曦郁, 李勇, 闫贝, 等. 基于堆叠自编码器神经网络的复合电磁检测铁磁性 双层套管腐蚀缺陷分类识别方法[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 19(1): 72-78.  
ZHANG X Y, LI Y, YAN B, et al. Classification and recognition method of composite electromagnetic detection ferromagnetic double-layer casing corrosion defects based on stacked autoencoder neural network [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2018, 19(1): 72-78.
- [47] JOHNSTON D P, BUCK J A, UNDERHILL P R, et al. Pulsed eddy-current detection of loose parts in steam generators[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(6): 2506-2512.
- [48] WEI C, SONG S, LI X, et al. On-line monitoring of oxidation states in HSS work rolls during hot rolling using pulsed eddy current testing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(7-8): 3667-3678.
- [49] SUN G, HU M. Signal processing and defect characterization of pulsed eddy current testing based on cross-correlation[C]. *Procedia Computer Science*, 2022, 208300-309.
- [50] ULAPANE N, THIYAGARAJAN K, MIRO J V, et al. Surface representation of pulsed eddy current sensor signals for improved ferromagnetic material thickness quantification[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 5413-5422.
- [51] JIN H, HUANG H, YANG Z, et al. Defect recognition and classification techniques for multi-layer tubular structures in oil and gas wells by using pulsed eddy current testing[C]. *2nd World Congress on Condition Monitoring, WCCM 2019, December 2, 2019-December 5, 2019. Singapore, Singapore: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, 2021.
- [52] 许向东. 客车不锈钢车体焊缝脉冲涡流检测系统研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.  
XU X D. Research on pulse eddy current testing system for weld seams of stainless steel body of passenger car [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [53] HUANG X, LIU Z, GONG Y, et al. Quantitative estimation of Fe-based amorphous coating thickness based on pulsed eddy current technology [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2023, DOI: 10.1007/s10921-022-00912-y.
- [54] WEN D, FAN M, CAO B, et al. Lift-off point of intersection in spectral pulsed eddy current signals for thickness measurement [J]. *IEEE Sensors Letters*, 2018, DOI: 10.1109/LSENS. 2018. 2822296.
- [55] YANG P, FAN M, CAO B, et al. Investigation on time-to-peak feature insensitive to liftoff effect for pulsed eddy current evaluation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(7): 5064-5071.
- [56] 原鹏, 孙全德, 王恪典, 等. 大提离下脉冲涡流对铁磁性材料测厚研究 [J]. *中国测试*, 2021, 47(4): 14-18, 61.



- YUAN P, SUN Q D, WANG K D, et al. Research on thickness measurement of ferromagnetic materials under large lift-off by pulsed eddy current testing [J]. *China Testing*, 2021, 47(4): 14-18, 61.
- [57] 王安泉,刘禹,郝宪锋,等.基于功率谱密度峰值的大提离下脉冲涡流测厚方法[J].*无损检测*,2021,43(10):29-33.
- WANG A Q, LIU Y, HAO X F, et al. Pulse eddy current thickness measurement method under large lift-off based on peak power spectral density [J]. *Nondestructive Testing*, 2021, 43(10): 29-33.
- [58] 吴月东,黄琛,熊波,等.脉冲涡流测厚中的传感器提离效应补偿方法[J].*舰船电子工程*,2015(3):123-125.
- WU Y D, HUANG CH, XIONG B, et al. Compensation method for sensor lift-off effect in pulse eddy current thickness measurement [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2015(3): 123-125.
- [59] LI J, WU X, ZHANG Q, et al. Measurement of lift-off using the relative variation of magnetic flux in pulsed eddy current testing [J]. *NDT & E International*, 2015, 75:57-64.
- [60] 吴少文,付跃文.脉冲涡流检测提离效应的抑制方法研究[J].*无损检测*,2014,36(4):45-48.
- WU SH W, FU Y W. Study on the suppression method of lift-off effect in pulsed eddy current testing [J]. *Nondestructive Testing*, 2014,36(4): 45-48.
- [61] 姚立东,赖圣,付跃文,等.飞机多层金属结构脉冲涡流检测提离效应的抑制[J].*失效分析与预防*,2013,8(3):131-135.
- YAO L D, LAI SH, FU Y W, et al. Suppression of lift-off effect in pulse eddy current testing for multi-layer metal structure of aircraft [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2013, 8(3): 131-135.
- [62] 晏越.提高效应对脉冲涡流检测系统影响及其补偿方法研究[D].成都:电子科技大学,2014.
- YAN Y. Study on the influence of liftoff effect on pulse eddy current detection system and compensation methods [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [63] FU Y, LEI M, LI Z, et al. Lift-off effect reduction based on the dynamic trajectories of the received-signal fast Fourier transform in pulsed eddy current testing [J]. *NDT & E International*, 2017, 87:85-92.
- [64] HUANG P, LUO X, HOU D, et al. Lift-off nulling and internal state inspection of multi-layer conductive structures by combined signal features in pulsed eddy current testing [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2018, 33(3): 272-289.
- [65] 李威.钢板脉冲涡流测厚信号互相关处理方法及软件开发[D].武汉:华中科技大学,2020.
- LI W. Research on the mutual correlation method and software development for pulse eddy current thickness measurement of steel plates [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [66] WANG H, HUANG J, LIU L, et al. A novel pulsed eddy current criterion for non-ferromagnetic metal thickness quantifications under large liftoff [J]. *Sensors*, 2022, DOI: 10.3390/s22020614.
- [67] 顾增涛,付跃文,薛盛龙.基于系统辨识的脉冲涡流信号提离效应[J].*无损检测*,2015(12):20-23,27.
- GU Z T, FU Y W, XUE SH L. Lift-off effect of pulse eddy current signal based on system identification [J]. *Nondestructive Testing*, 2015(12): 20-23, 27.
- [68] SREEVATSAN S, GEORGE B. Simultaneous detection of defect and lift-off using a modified pulsed eddy current probe [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(4): 2156-2163.
- [69] 殷雪峰,程千里,窦凤杰,等.基于脉冲涡流的提高高度检测方法[J].*压力容器*,2021,38(9):81-86.
- YIN X F, CHENG Q L, DOU F J, et al. Detection method of lift-off height based on pulsed eddy current testing [J]. *Pressure Vessel*, 2021, 38(9): 81-86.
- [70] 段淑玉,宋韵,武新军.基于持续同调的脉冲涡流提离距离测量方法[J].*化工自动化及仪表*,2022,49(1):54-59.
- DUAN SH Y, SONG Y, WU X J. Measurement method of lift-off distance based on continuous homology in pulsed eddy current testing [J]. *Chemical Automation and Instrumentation*, 2022, 49(1): 54-59.
- [71] HUANG P D, LI Z, LONG J, et al. Measurement of lift-off distance and thickness of nonmagnetic metallic plate using pulsed eddy current testing [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, DOI: 10.1109/TIM.2023.3285918.
- [72] WEN D D, FAN M, CAO B, et al. A twice subtraction method for obtaining LOI in pulsed eddy current signals of ferromagnetic samples [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, DOI:10.1109/TMAG.2019.2943838.
- [73] 闻东东.脉冲涡流检测提离交叉点的获取及调节方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- WEN D D. Research on the acquisition and adjustment method of lift-off crossover point in pulse eddy current testing [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [74] WEN D D, FAN M, CAO B, et al. Adjusting LOI for

enhancement of pulsed eddy current thickness measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(2): 521-527.

[75] FAN M, TIAN G, CAO B, et al. Thickness measurement using liftoff point of intersection in pulsed eddy current responses for elimination of liftoff effect [J]. Sensors and Actuators: A. Physical, 2016, 251: 66-74.

作者简介



陈涛 (通信作者), 2015 年于湖南大学获得博士学位, 现为湖北工业大学副教授, 主要研究方向为传感器与仪器仪表、无损检测新技术及自动化检测装备。

E-mail: chentao@hnu.edu.cn

**Chen Tao** (Corresponding author)

received his Ph. D. from Hunan University in 2015. Now he is

an associate professor at Hubei University of Technology. His main research interests include sensors and instrumentation, new technologies for non-destructive testing, and automated detection equipment.



尹永奇, 2022 年于湖北工业大学获学士学位, 现为湖北工业大学机械工程学院研究生, 主要研究方向为无损检测新技术及应用。

E-mail: 1533755908@qq.com

**Yin Yongqi** received his B. Sc. degree

from Hubei University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at the College of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology. His main research interests include new technologies and applications for non-destructive testing.