

一种新型脉冲涡流提离交汇点的实验研究

齐勇^{1,2}, 李勇¹, 陈振茂¹, 肖美华¹

(1.西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室,陕西西安,710049;2.94354部队,山东济宁,272400)

摘要 由于多层金属结构由于服役环境较为恶劣,其结构的亚表面层材质电气性能会出现劣化,直接威胁到大型、复杂装备的安全运转。本文提出一种新型提离交汇点,即脉冲涡流差分信号提离交汇点,并基于该交汇点,提出一种对多层结构亚表面层材质劣化进行检测和评估的新方法。通过理论及实验研究,对本文所提出的新型提离交汇点特性及其对多层结构亚表面层材质劣化评估的灵敏度进行了集中探究。研究发现,与传统磁场信号提离交汇点相比,差分信号提离交汇点对金属部件亚表面层材质劣化灵敏度较大,体现了脉冲涡流差分信号提离交汇点在金属部件亚表面层材质劣化定量评估中的优势。

关键词 亚表面材质劣化;电磁无损检测;脉冲涡流检测;新型提离交汇点;磁场测量

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.06.017

中图分类号 TG115 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2012)06-0080-05

脉冲涡流检测技术(Pulsed Eddy Current Testing,简称PECT)^[1-3]是近些年兴起的无损检测新技术。由于其采用的方波脉冲激励信号包含很宽的频谱,拾取的磁场信号涵盖丰富的缺陷信息,因此对多层金属结构的厚度测量以及亚表面缺陷检测能力较强,与传统涡流检测技术相比,具有较强优势^[4-5]。目前,脉冲涡流检测技术主要采用峰值、峰值时间、过零点等信号特征对亚表面材质缺陷进行评估^[6-7]。然而,在实际工业检测中,由于工件表面一般不平整,造成脉冲涡流检测探头与工件表面之间距离(即提离)在检测中发生改变,因而提离噪声对检测信号的影响不可避免。此外,由于提离变化无法精确测量,对其进行削弱及补偿难度较大。如何有效抑制提离噪声的影响,提高多层金属结构完整性评估,特别是金属结构亚表面层材质劣化定量评估的精度,已成为脉冲涡流检测技术的关键问题之一^[8]。Mandache、Lefebvre等人^[9-10]发现不同提离下脉冲涡流信号交汇于一点,采用提离交汇点可有效地对多层金属结构内部缺陷进行高精度成像。鉴于脉冲涡流检测阻抗信号对金属结构深层缺陷响应灵敏度较低的不足,Tian、Li等人^[11]提出了脉冲涡流检测磁场信号提离交汇点技术,建立了该提离交汇点的理论解析式,并基于该提离交汇点,建立了脉冲涡流检测逆问题求解模型,以实现具有镀层的金属工件镀层厚度和工件导电率的脉冲涡流定量评估。

本文基于Li等人建立的脉冲涡流检测固态磁场传感器信号解析式,推导出脉冲涡流差分信号提离交汇点解析式,提出基于差分信号提离交汇点的金属结构亚表面层材质劣化脉冲涡流检测技术。通过理论以及实验研究,验证了差分信号提离交汇点相比于磁场信号提离交汇点在检测灵敏度上的优势,探究了这种新型提离交汇点在金属结构亚表面层材质劣化评估中的技术应用。

1 脉冲涡流差分信号提离交汇点的理论基础

见图1,一个由盘式线圈与固态磁场传感器(如霍尔元件、聚磁阻传感器等)构成的脉冲涡流检测探头放置于双层金属结构上方,对双层金属结构进行脉冲涡流检测。

收稿日期 :2012-01-04

基金项目 :国家自然科学基金资助项目(51007069);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(08142005)

作者简介 :齐勇(1983-),男,辽宁鞍山人,硕士生,主要从事电磁无损检测理论和实验研究。

E-mail:yong.li@mail.xjtu.edu.cn

假设多层金属结构各层材料为线性、均匀且各向同性的静止媒质。从该探头输出磁场信号理论解析式^[12-14]出发,注意到脉冲涡流检测差分信号直接与被测体参数关联,而与激励线圈参数项无关,从而得到脉冲涡流检测差分信号解析式:

$$\Delta B_{zv}^2(t) = \frac{\mu}{\pi r_0 c} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_1(a r_0) \chi(a r_1, a r_2)}{a^5 [h J_0(a h)]^2} (e^{-a_i c_2} - e^{-a_i c_1}) (e^{-a_i z_2} - e^{-a_i z_1}) \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{i}(\omega) \left(\frac{V_{11}}{U_{11}} - \frac{V_{10}}{U_{10}} \right) e^{j\omega t} dt \quad (1)$$

式中: B_{zv}^2 为涡流激发磁场; μ 为真空磁导率; J_n 为贝塞尔(Bessel)函数; $\dot{i} = NI / [(z_2 - z_1)(r_2 - r_1)]$,其中, N 为激励线圈匝数, I 为激励电流幅值; a 为特征值,即 $J_1(a h) = 0$ 的正根; r_0 为磁场传感器半径, $c = c_1 - c_2$ 为磁场传感器厚度; V_{11} / U_{11} 和 V_{10} / U_{10} 分别代表被检双层金属板和标准试块对应的金属体电磁场反射系数,可由参考文献[14]提供的相关公式求取。当提高发生变化时(即引入提高变化量 l_0),式(1)修改为:

$$\Delta B_{zv}^2(t) = \frac{\mu}{\pi r_0 c} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_1(a r_0) \chi(a r_1, a r_2) e^{-2 a_i l_0}}{a_i^5 [h J_0(a h)]^2} (e^{-a_i c_2} - e^{-a_i c_1}) (e^{-a_i z_2} - e^{-a_i z_1}) \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{i}(\omega) \left(\frac{V_{11}}{U_{11}} - \frac{V_{10}}{U_{10}} \right) e^{j\omega t} dt \quad (2)$$

通过采用式(2)计算不用提高下的脉冲涡流差分信号发现,提高交汇点同样出现于脉冲涡流差分信号中,该提高交汇点对应时间的解析式可写为:

$$T_{bi} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_k} \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^{\infty} M'_i (1 - e^{-2 a_i l_0}) I \left(\frac{V_{11}}{U_{11}} - \frac{V_{10}}{U_{10}} \right)}{\sum_{i=1}^{\infty} M'_i (1 - e^{-2 a_i l_0}) R \left(\frac{V_{11}}{U_{11}} - \frac{V_{10}}{U_{10}} \right)} \right]; M'_i = \frac{J_1(a r_0) \chi(a r_1, a r_2) (e^{-a_i c_2} - e^{-a_i c_1}) (e^{-a_i z_2} - e^{-a_i z_1})}{a_i^5 J_0^2(a h)} \quad (3)$$

式中: k 为脉冲涡流检测信号谐波分量阶数; R 和 I 分别代表求解结果的实部和虚部。

由式(3)可以发现,差分信号提高交汇点与激励线圈参数无关联,而直接与被测体电磁场反射系数(V_1 / U_1)相关,一定程度上摆脱了激励线圈参数项对提高交汇点的影响,可有效提升被测体定量评估的灵敏度。进一步研究表明,与传统磁场信号提高交汇点相比,差分信号提高交汇点对第 2 层金属板导电率变化灵敏度较大(提升近 2 个数量级)^[15]。

2 脉冲涡流差分信号提高交汇点的实验研究

为进一步验证脉冲涡流检测差分信号提高交汇点在金属部件亚表面层材质劣化定量评估中的优势,本文着重对该提高交汇点进行了实验研究。

2.1 脉冲涡流检测实验系统

图 2 为脉冲涡流差分信号提高交汇点实验研究所开发系统的框图。该系统主要由信号发生器、功率放大器、前置放大电路、高速数据采集卡和电脑组成。信号发生器为 NF 公司生产的 WF1944B,产生方波激励信号,频率为 100 Hz,占空比为 0.5。功率放大器为 NF 公司生产的 HSA4014,功率放大 10 倍。激励电流最大幅值为 0.5 A。

脉冲涡流探头由激励线圈、中空圆柱形铁氧体和霍尔元件(霍尼韦尔 SS490A)组成。激励线圈匝数 405,线径为 0.2 mm,线圈内半径 7.5 mm,外半径 10 mm,高 14 mm,设计提高为 0.1 mm。霍尔元件用以拾取总磁场垂直分量(B_{zv})信号,置于线圈底部中心位置。由于霍尔元件拾取信号较弱,同时信号本身具有 2.5 V 的直流分量,鉴于此,设计和实现了一个放大倍数可调的信号交流耦合放大电路,其中运算放大器采用 INA114,放大电路初始增益设置为 50,输出信号通入数据采集卡(ADLINK PCI-9812)。通过 LabVIEW 实

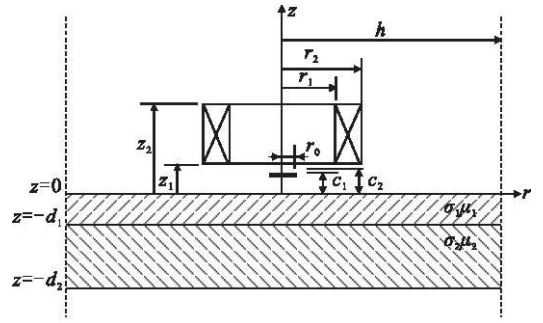


图 1 双层金属板脉冲涡流检测模型示意图

Fig. 1 A model of PECT inspection on a 2-layer conductor

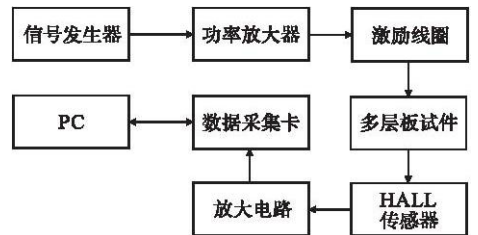


图 2 脉冲涡流检测实验系统框图

Fig. 2 Schematic illustration of the experimental setup of PECT

现对实验信号的显示、实时处理以及分析。

为模拟多层金属板亚表面材质劣化,选用典型双层金属板结构,上层金属板尺寸为 $100 \times 100 \times 1.5 \text{ mm}^3$ 下层金属板尺寸为 $100 \times 100 \times 3 \text{ mm}^3$ 。上层板材质为黄铜(导电率为 14 MS/m ;下层板材质可变,分别为铝(导电率为 34 MS/m)、钨(导电率为 20 MS/m)以及铝。各层板材料的相对导磁率均为1。

2.2 实验结果分析

由于实验系统受一定噪声干扰,且噪声主要集中于信号的高频部分,故对采集到的磁场信号进行了低通数字滤波。当提离不发生变化时($l_0=0 \text{ mm}$),以第二层金属板导电率为 34 MS/m 时的脉冲涡流检测信号为参考信号(V_{z01}),其导电率降低时的脉冲涡流检测信号为材质劣化信号(V_{z11}),求取差分信号: $\Delta V_{z1} = V_{z11} - V_{z01}$ 。当提离发生变化时($l_0=1 \text{ mm}$),同理,求取差分信号: $\Delta V_{z2} = V_{z12} - V_{z02}$ 。在2种提离情况下,如果差分信号 ΔV_{z1} 和 ΔV_{z2} 交汇于一点,可得到差分信号提离交汇点,这样 $\Delta^2 V = (\Delta V_{z1} - \Delta V_{z2})$ 存在过零点。实验模拟导电率变化范围为 $0 \text{ MS/m} \sim 34 \text{ MS/m}$ 。分别求取下层板为空气(0 MS/m),铜(14 MS/m),钨(20 MS/m),铝(34 MS/m)的 $\Delta^2 V$ 信号(如图3所示)。将3种情况 $\Delta^2 V$ 信号在 $0 \text{ ms} \leq t \leq 0.6 \text{ ms}$ 内放大,见图4,可见 $\Delta^2 V$ 信号存在过零点,即提离发生变化时脉冲涡流检测差分信号存在交汇点,且该交汇点与第2层金属板导电率成单调函数关系。

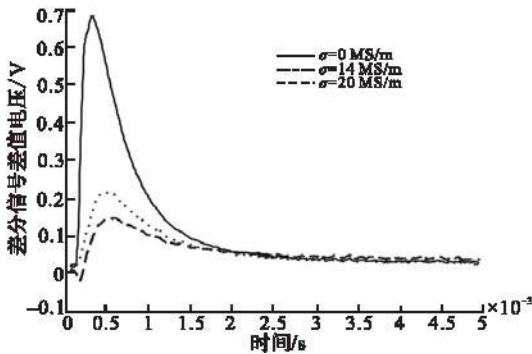


图3 $\Delta^2 V$ 信号图

Fig. 3 Figure of $\Delta^2 V$ signals

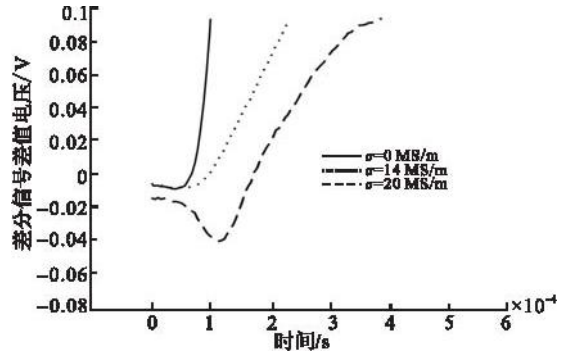


图4 $\Delta^2 V$ 信号放大图

Fig. 5 Zoom-in figure of $\Delta^2 V$ signals

由 $\Delta^2 V$ 信号出发,分别求取了第2层金属板不同导电率所对应的差分信号提离交汇点。为了便于对该提离交汇点灵敏度分析,采用SPLINE拟合函数建立了差分信号提离交汇点与第二层金属板电导率间的关联规律,并对该拟合函数进行求导,即 $d(l_0)/d(\sigma)$,得到3种导电率对应的差分信号提离交汇点灵敏度。对于磁场信号提离交汇点采用相同的分析方法,将分析结果与差分信号提离交汇点进行对比。表1所示为2种提离交汇点的对比结果。

表1 差分信号提离交汇点和磁场信号提离交汇点及其一阶导数

Tab. 1 Differential-signal-based and magnetic-signal-based l_0 s and their first-order derivative

材料	提离变化/mm	提离交汇点/ μs		提离交汇点灵敏度/arb	
		差分信号	磁场信号	差分信号	磁场信号
空气	$l_0=1$	63	8.6	5.4×10^{-6}	$4.8 \times e^{-7}$
	$l_0=2$	56	10.2	4.7×10^{-6}	$3.6 \times e^{-7}$
	$l_0=3$	61	4.3	2.3×10^{-5}	$4.6 \times e^{-7}$
铜板	$l_0=1$	92	10.6	9.5×10^{-6}	2.5×10^{-7}
	$l_0=2$	74	13	7.3×10^{-6}	7.6×10^{-7}
	$l_0=3$	102	9.9	1.4×10^{-5}	3.4×10^{-7}
钨板	$l_0=1$	167	16.8	1.6×10^{-5}	1.3×10^{-7}
	$l_0=2$	133	19	1.2×10^{-5}	1.2×10^{-6}
	$l_0=3$	212	11.8	2.3×10^{-5}	2.9×10^{-7}

从表1可以看出,与传统磁场信号提离交汇点相比,差分信号提离交汇点对第2层金属板导电率变化灵敏度较大(提升10倍以上)。该结果印证了前述理论仿真结论,体现了脉冲涡流检测差分信号提离交汇点在金属部件亚表面层材质劣化定量评估中的优势。此外,当探头提离在 1 mm 至 3 mm 范围内变化时,对应于

不同提离的差分信号提离交汇点存在微小差异,其变化范围为: $56\ \mu\text{s} \leq t_{oi} \leq 63\ \mu\text{s}$ (空气); $74\ \mu\text{s} \leq t_{oi} \leq 102\ \mu\text{s}$ (铜板); $133\ \mu\text{s} \leq t_{oi} \leq 212\ \mu\text{s}$ (钨板),所以在提离发生变化时,差分信号提离交汇点呈现一定的“区域性”(range character)而非“固定点性”(point character),与磁场信号提离交汇点特性^[1]相似。在工程实际检测中,可预判提离变化范围,在此情况下,预置已知提离,采用文献[11]提出的提离交汇点分布中点(loicentre)和宽度(loicwidth)以及逆问题求解模型,对未知提离和亚表面层导电率变化进行定量评估,本文下一步将对此进行研究。

3 结语

本文通过脉冲涡流检测理论和实验,提出了一种基于脉冲涡流差分信号的新型提离交汇点,由作者前期推导出的固态磁场传感器信号解析式出发,建立多层金属结构脉冲涡流差分信号提离交汇点理论解析;设计并开发了基于霍尔元件的脉冲涡流检测系统,通过实验探究了差分信号提离交汇点与金属结构亚表面层材质(导电率)间的关联规律,对该提离交汇点进行了灵敏度分析实验研究表明,与传统磁场信号提离交汇点相比,差分信号提离交汇点对金属部件亚表面材质劣化灵敏度较大,在金属部件亚表面材质劣化定量评估中具有优势。

参考文献(References):

- [1] 杨宾峰,张辉,赵玉丰,等.基于新型脉冲涡流传感器的裂纹缺陷定量检测技术[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(1):73-77.
YANG Bin Feng, ZHANG Hui, ZHAO Yufeng, et al. Quantification of crack defect using a new pulsed eddy current sensor[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(1):73-77. (in Chinese)
- [2] 曹海霞,王畅,杨宾峰,等.脉冲涡流无损检测提离效应研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(3):45-48.
CAO Haixia, WANG Chang, YANG Bin Feng, et al. Study of lift-off effects for pulsed eddy current testing technique [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(3):45-48. (in Chinese)
- [3] 杨宾峰,罗飞路,曹雄恒,等.脉冲涡流腐蚀成像阵列传感器应用研究[J].传感技术学报,2005,18(1):112-115.
YANG Bin Feng, LUO Feilu, CAO Xiongheng, et al. The study of pulsed eddy current imaging array probe used to detect corrosion [J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2005, 18(1):112-115. (in Chinese)
- [4] Smith R A, Hugo G R. Transient eddy current NDE for ageing aircraft-capabilities and limitations[J]. Insight, 2001, 43(1): 14-25.
- [5] Tian G Y, Sophian A, Taylor D, et al. Pulsed eddy current system for dynamic inspection of defects[J]. Insight, 2004, 46(5):256-259.
- [6] 吴鑫,李方奇,石坤,等.脉冲涡流测厚技术理论与应用[J].北京交通大学学报,2009,33(1):20-23.
WU Xin, LI Fangqi, SHI Kun, et al. Theory and application of thickness measurement technique by pulsed eddy current[J]. Journal of beijing jiaotong university, 2009, 33(1):20-23. (in Chinese)
- [7] 徐平,罗飞路.多层金属结构腐蚀缺陷脉冲涡流检测技术研究[J].自动化仪表,2007,28(11):25-28.
XU Ping, LUO Feilu. Research on pulsed eddy current detecting technology about corrosion defects in multi-layer metal structure[J]. Process automation instrumentation, 2007, 28(11):25-28. (in Chinese)
- [8] 郑岗,刘丁,张震,等.基于提离点的脉冲涡流测厚研究[J].仪器仪表学报,2008,29(8):1745-1749.
ZHENG Gang, LIU Ding, ZHANG Zhen, et al. Research on thickness measurement based on lift-off intersection of pulsed eddy current[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2008, 29(8):1745-1749. (in Chinese)
- [9] Mandache C, Lefebvre J H V. Transient and harmonic eddy currents; lift-off point of intersection[J]. NDT & E international, 2006, 39(1):57-60.
- [10] Lefebvre J H V, Mandache C. Pulsed eddy current measurement of lift-off[J]. Review of progress in quantitative non-destructive evaluation, 2005, 25(1):669-676.
- [11] Tian G Y, Li Y, Mandache C. Study of lift-off invariance for pulsed eddy current signals[J]. IEEE transactions on magnetics, 2009, 45(1):184-191.
- [12] Li Y, Chen ZM, Qi Y. Generalized analytical expressions of liftoff intersection in PEC and a liftoff-Intersection-based fast inverse model[J]. IEEE transactions on magnetics, 2011, 47(10):2931-2934.
- [13] Li Y, Theodoulidis T P, Tian G Y. Magnetic field-based eddy-current modeling for multilayered specimens[J]. IEEE

transactions on magnetics ,2007 ,43 (11) :4010-4015 .

- [14] Li Y , Tian G Y , Simm A . Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation[J] . NDT & E international , 2008 ,41 (6) : 477-483 .
- [15] 李勇 , 齐勇 , 陈振茂 , 等 . 基于脉冲涡流差分信号提离交汇点的亚表面层材质劣化检测技术理论研究[J] . 无损检测 , 2012 ,34 : 发表中 .
- LI Yong , QI Yong , CHEN Zhenmao , et al . Evaluation of subsurface material degradation based on a new lift-off intersection point of pulsed eddy current[J] . Nondestructive testing , 2012 ,34 : in press .

(编辑:徐敏)

Experimental Investigation on A New Lift-off Intersection Point of Pulsed Eddy Current testing

QI Yong^{1,2} ,LI Yong¹ ,CHEN Zhen-mao¹ ,XIAO Mei-hua¹

(1 . State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures , Research Centre for Inspection and Evaluation of Nuclear Structural Integrity , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049 , China ; 2 . Unit 94371 , Jining 272400 , Shandong , China)

Abstract: Because of the rigorous working environment , Subsurface Material Degradation (SMD) occurs in the stratified metallic structures which are extensively employed in industries such as aerospace and energy fields . This directly influences the angle operation of crucial components in the large-scale complex apparatus . This paper investigates a new Lift-off Intersection Point (LOI) via theoretical study of Pulsed Eddy Current Testing (PECT) . Following the analysis of the forward problem of the new LOI , a method for evaluation of SMD in stratified metallic structures is proposed . Through experiments the proposed method displays some advantages . By using it the sensitivity of PECT based on the new LOI to subsurface material degradation is higher than that of the traditional-LOI based PECT , which benefits the quantitative evaluation of subsurface material degradation occurred within the practical stratified metallic structures .

Key words: subsurface material degradation ; electromagnetic nondestructive evaluation ; pulsed eddy current testing ; lift-off intersection point ; magnetic field measurement

本刊相关链接文献:

- [1] 崔文岩 , 朱荣新 , 杨宾峰 , 张辉 , 李龙军 . 铁磁性平板构件远场涡流传感器设计与仿真分析[J] . 空军工程大学学报:自然科学版 , 2012 ,13 (5) :71-75 .
- [2] 张辉 , 杨宾峰 , 王晓锋 , 赵玉丰 . 脉冲涡流检测中参数影响的仿真分析与实验研究[J] . 空军工程大学学报:自然科学版 , 2012 ,13 (1) :52-57 .
- [3] 荆毅飞 , 王晓锋 , 杨宾峰 , 张辉 , 康志斌 , 李水芳 . 管道轴向裂纹检测脉冲远场涡流传感器设计与仿真[J] . 空军工程大学学报:自然科学版 , 2011 ,12 (6) :74-78 .
- [4] 杨宾峰 , 张辉 , 余付平 , 王韞江 . 新型脉冲漏磁传感器的仿真设计与实验研究[J] . 空军工程大学学报:自然科学版 , 2010 ,11 (4) :57-61 .