

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902792

多通道在线涡流检测系统研制*

孟繁悦¹ 韩赞东^{1,2} 石承昊¹

(1. 清华大学 北京 100084; 2. 摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘 要:针对当前工业生产线上对涡流检测设备多通道、高速化的需求,设计了一种可应用于在线检测的多通道涡流检测系统。系统由涡流信号处理电路、多通道数据采集系统、基于 Vxworks 系统的实时控制计算机、数据管理计算机以及相关软件组成。涡流信号处理电路的激励频率范围为 300 Hz~3 MHz,灵敏度 0~72 dB 可调。多通道数据采集系统能同时对四路涡流检测信号进行采集,每个通道采集率可达 200 K,能够满足 1 200 m/min 生产线上穿过式涡流检测的需求。涡流检测数据可通过 PC104 总线送往实时控制计算机以进行缺陷识别和标注。数据管理计算机可实时显示当前检测试件的阻抗平面图并储存缺陷数据,还可对检测参数进行调节以适应不同的检测条件。薄壁铜管的穿过式涡流检测实验表明,系统具备多通道检测能力,检测信号信噪比高,对 0.6 mm 微小缺陷有很好的检测效果。

关键词: 涡流检测;多通道;高速采集;Vxworks

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on multichannel online eddy current testing system

Meng Fanyue¹ Han Zandong^{1,2} Shi Chenghao¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Tribology, Beijing 100084, China)

Abstract:Aiming to meet demand of the multi-channel and high-speed eddy current testing equipment used in current industrial production line, a multichannel online eddy current testing system is designed. The testing system is composed of eddy current signal processing circuit, multi-channel data acquisition system, real-time control computer based on Vxworks operating system, data management computer and relative software. The excitation frequency of eddy current signal processing circuit varies from 300 Hz to 3 MHz. The range of adjustable sensitivity is 0~72 dB. With 200 K sample rate for every channel, multi-channel data acquisition system can acquire the data from four eddy current signal channel simultaneously, which is able to work on the 1 200 m/min production line with through-type eddy current probe. Transferred through PC104 bus to real-time computer, the data is identified and labeled by procedure. The data management computer displays the impedance plane according to the data. To adapt to different testing condition, it is also responsible for the parameter adjustment. In thin-wall copper pipe testing experiment, the testing system shows multi-channel data acquisition ability, high SNR and good effect for 0.6 mm minor defect testing.

Keywords: eddy current testing; multi-channel; high-speed data acquisition; Vxworks

0 引 言

涡流检测是以电磁感应原理为基础的无损检测方法,主要用于检测金属材料和一些导电的非金属材料^[1-2]。相比其他检测方法,涡流检测有许多优势,比如

不需要接触工件,也不需要添加耦合剂,检测速度快,而且尤为适合检测表面和近表面缺陷^[3]。涡流检测在工业部门有着非常广泛的应用,例如可以应用于金属薄板的厚度测量^[4-7],用来对金属表面缺陷进行检测^[1,8,9],根据试件的电导率和磁导率进行材质分选^[10-12],对金属表面的锈蚀状况进行检测^[13],进行间隙测量^[14]和金属筋板

定位^[15]。

在涡流检测仪器方面,目前各类制造生产线趋向高速化、自动化,且对在线、在役检测有需求,涡流检测设备的制造商也相应地生产出检测性能更高,类型更多样的设备^[16]。在众多的涡流检测设备制造商中,德国福斯特公司生产的涡流检测设备因其优秀的检测性能、丰富的检测类型、高速的采集及处理能力在世界上得到了最广泛的应用。相对于国外最先进的涡流检测设备,国产的设备在以下方面还有待提高。

1) 微小缺陷检测能力,为了保证检测的精度,涡流检测设备应该具备对微弱信号的测量能力,以便检测细微的缺陷。

2) 高速信号采集能力,高速化的生产线日益增多,如铜管生产线的速度已达到 480 m/min,缺陷信号的频率也就相应增加,所以涡流设备应该具备高速的信号采集能力。

3) 多通道检测能力,生产线上需要布置多个探头增加检测效率和准确度。在高速的检测场景下,旋转涡流传感器需要在周向布置多个探头,从而达到更大的覆盖面积。这就要求单个涡流检测仪器应具备多通道检测的能力。

为进一步改善国内涡流检测仪器水平,本文研制了一种能够满足现有生产线检测需求的多通道在线涡流检测系统。系统主要包括涡流信号处理电路、多通道数据采集系统、实时控制计算机、数据管理计算机。涡流信号处理电路对探头输出的信号进行处理;多通道数据采集系统用于信号的采集、缓存和传输;实时控制计算机对缺陷进行实时判断,协调控制涡流信号处理电路和生产现场设备。数据管理计算机实时显示检测结果,储存缺陷数据,控制检测参数。相比于国内现有的涡流检测系统,本系统对微小缺陷检测能力强,检测速度快,且具备多通道的检测能力。

1 检测系统整体方案

检测系统整体结构如图 1 所示,包括检测探头、涡流信号处理电路、多通道数据采集系统、实时控制计算机、数据管理计算机和现场设备接口。

涡流信号处理电路产生激励信号驱动探头产生交变的电磁场,并在待检测试件中感生出涡流。当试件中存在缺陷时,涡流场的分布会产生变化,从而影响检测探头输出的感应电压。涡流信号处理电路通过对探头输出的信号进行放大、解调、滤波等处理,得到水平和垂直相位信号,并发送给多通道数据采集系统。多通道数据采集系统可对四路涡流检测信号进行高速采集,采集率可由生产线速度信号进行控制,采集到的数据通过 PC104 总

线发送给实时控制计算机。

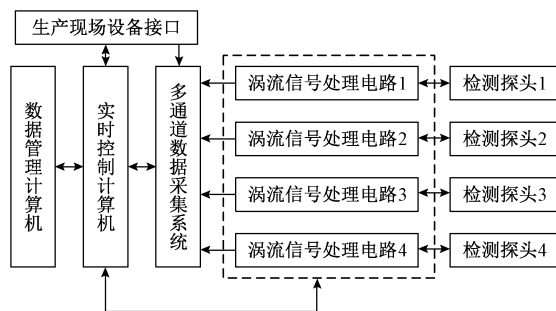


图 1 多通道涡流检测系统整体结构

Fig. 1 The Structure of multichannel eddy current testing system

为保证缺陷检测的实时性,实时控制计算机使用了 Vxworks 操作系统,对信号进行缺陷识别,并将识别结果在每个数据点进行标注,完成后通过网络接口发送给数据管理计算机。另外,实时控制计算机通过串口将数据管理计算机设置的参数信息发送给涡流信号处理电路,还能依据检测结果灵活搭配生产线上的具体设备进行控制,完成试件的标注和分选。数据管理计算机用于对试件的阻抗平面图进行实时显示,并将有缺陷的信号数据进行储存,同时用于设置涡流信号处理电路的频率、灵敏度、滤波截止频率等参数,以匹配不同的探头,从而适应不同的检测需求。

2 涡流信号处理电路

涡流信号处理电路的组成如图 2 所示,激励源由正弦信号发生器和功率放大模块组成。检测信号处理部分主要包括滤波模块、解调模块和灵敏度调节模块。

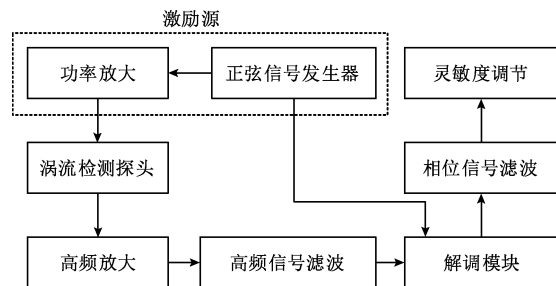


图 2 涡流信号处理电路基本构成

Fig. 2 The Structure of eddy current signal process circuit

2.1 激励源

激励信号是驱动涡流检测探头的频率可变的正弦波,本系统中采用了直接数字频率合成技术(DDS 技术)来进行正弦信号的发生,以保证激励信号频率、幅值和相位的稳定。本系统通过 STM32F103 单片机和

DDS 数字合成器 AD9854 搭建了一个频率可调的正弦信号发生器。AD9854 内部有 6 个 8 位寄存器用来储存 48 位频率控制字,单片机通过 6 位地址线和 8 位数据线向寄存器写入频率控制字,AD9854 根据寄存器中储存的数据来输出相应频率的正弦信号。AD9854 共有四路输出,相位分别相差 90° ,选择相位相反的其中两路经过差动放大以及功率放大后用作激励信号。其余两路信号将用作解调模块中的参考信号。经验证,产生的正弦波频率可调,转换速度快,频率、幅值及相位稳定,符合系统要求。

由 AD9854 产生的正弦信号的输出电流仅有 10 mA 左右,无法驱动涡流检测探头产生足够大的涡流,所以本系统中采用 LT1210 芯片对正弦波进行功率放大,使其输出电流达到 1 A,从而满足了探头对激励信号的要求。激励信号的频率范围为 300 Hz~3 MHz,18 级可调,使用时可通过数据管理计算机进行设置,相关的控制信号将通过串行通信传入单片机,再由单片机对 AD9854 进行编程控制,完成频率变换。

2.2 解调模块

涡流检测探头输出的信号是与激励信号同频的正弦信号,其中调制了表征试件状况的相位信号,解调模块就是通过相敏检波的方式将缺陷信号从载波中还原出来,以便区分不同信号源的影响。在相敏检波的过程中,只有和参考信号同频的信号中所调制信息才会得到保留,这极大地提高了系统的抗干扰能力。

如图 3 所示,本系统由过零比较器、单稳态触发器和采样保持器对待检信号在固定相位点进行信号采集,再通过减法器输出垂直相位信号和水平相位信号。

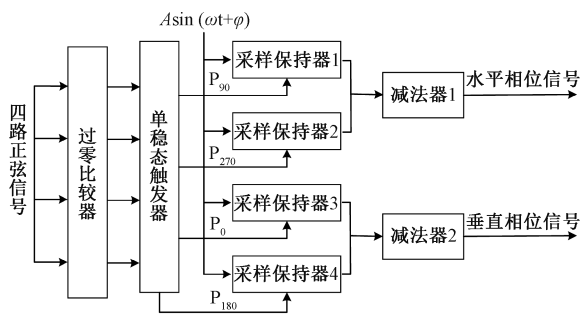


图3 解调模块工作原理

Fig. 3 The operating principle of demodulation module

具体方法为通过过零比较器将 AD9854 产生的四路正弦参考信号转化为同频方波信号,再通过单稳态触发器在四路信号的上升沿触发,从而产生四路脉冲分别位于参考信号 0° 、 90° 、 180° 、 270° 相位处的脉冲信号(图 3 中 P0、P90、P180、P270)。设被检信号为 $A\sin(\omega t + \varphi)$,将四路脉冲信号作为采样保持器的控制端,在脉冲处采

样保持器的输出信号将等于该点的输入信号,从而完成了对待检信号在 4 个固定相位的采集。4 个采样保持器的输出结果分别为 $A\sin\varphi$ 、 $-A\sin\varphi$ 、 $A\cos\varphi$ 、 $-A\cos\varphi$,通过减法器后得到水平相位信号 $2A\cos\varphi$ 和垂直相位信号 $2A\sin\varphi$ 。后续还需要用低通滤波器对信号进行平滑处理。相比于传统的模拟相敏检波方法,此方法对低频噪声、温漂和失调电流等影响因素不敏感,有着更好的稳定性。

2.3 滤波及灵敏度调节

本系统的滤波环节包括高频信号滤波部分和相位信号滤波部分。

高频信号滤波部分采用全极点带通滤波电路对经过放大后的检测信号进行滤波。根据检测频率的不同共设计了 12 种频带,当激励频率改变时,通过多路选通器选择与之匹配的带通滤波电路,从而确保与激励信号同频率的检测信号通过,滤去频带外的干扰。

相位信号滤波部分是对解调后的水平相位信号和垂直相位信号进行处理,分为低通滤波器部分和高通滤波器部分,截至频率由 1 Hz~16 kHz 变化,可根据预先设置的生产线最小速度和生产线最大速度设置低通和高通滤波器的截止频率,便于实际使用。由于缺陷信号的频率与生产线速度成正相关,这样设置滤波频带可以保证缺陷信号能全部落入通带内,而其它频率的干扰信号则不会通过。

灵敏度调节部分是为了将相位信号调整到易于观测的范围,可由用户自行设置,通过多路选通器选择不同阻值的电阻并入增益网络,达到放大倍数可调的效果。可设置的增益范围为 0~72 dB,每 0.5 dB 一级。

3 多通道数据采集系统

多通道数据采集系统对多个涡流信号处理电路检测到的相位信号进行采集和缓存,并通过 PC104 总线与主控板进行数据通信。多通道数据采集系统设计的基本思路是以 FPGA 为核心,搭配数模转换芯片完成高速的数据采集。其基本结构如图 4 所示。

本系统中选择了两片 AD7829 模数转换芯片分别对 4 个通道的水平相位信号和垂直相位信号进行采集,数模转换精度为 8 位,每个通道的采集率可以达到 200 K,符合当前生产线高速检测的需求。

对于涡流信号处理电路而言,其输出的水平相位信号和垂直相位信号既包含正信号,也包含负信号。而 AD7829 最大的采集范围是 0~3 V,故需要信号调理电路将原有的检测信号的范围线性映射到符合模数转换芯片转换范围的信号,本系统中的信号调理电路可将 -6~6 V 的相位信号线性映射到 0~2.4 V,便于 AD7829 的采集。

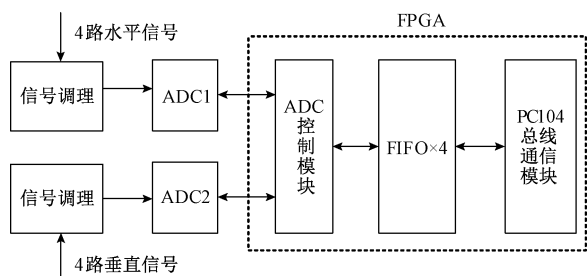


图4 多通道信号采集系统基本结构

Fig. 4 The structure of multi-channel signal acquisition system

数字逻辑电路包括ADC控制模块、数据缓存模块以及PC104总线通信模块。ADC控制模块用于实现AD7829与FPGA的通信来获取不同通道的采集数据,并实现数据采集通道的切换。FPGA控制AD7829进行数据采集的时序如图5所示,通过ADC控制模块按照一定周期拉低CONVST引脚,即可使能AD7829的模数转换,当控制模块接收到EOC(转换结束信号)的低电平后,即代表转换完成,再通过拉低RD引脚完成对转换数据的读取,同时AD7829也会在RD信号的下降沿读入下一次转换的通道序号,之后会等待一段时间进行下一次转换,该段时间的长短可根据生产线速度信号来进行调整。

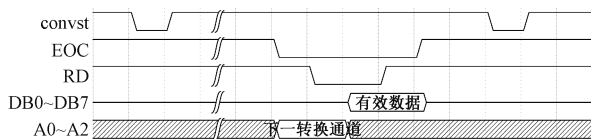


图5 数据采集时序图

Fig. 5 The timing diagram of data acquisition

由于ADC的转换速度要慢于PC104总线的通讯速度,所以在它们之间进行数据传输时,应设置一个数据的缓冲模块以提高系统的工作效率。FIFO是一种常用的数据缓冲器,用来实现数据的先进先出的读写方式。在本系统中,共使用了4个FIFO,数据深度为256,数据宽度为16位,将每个通道的水平和垂直相位信号并成16位数据分别存入4个FIFO。当FIFO的储存接近满时,FIFO的almost full信号就会拉高,从而触发实时控制计算机的中断,在中断服务程序中使能对PC104总线上的数据读取。实时控制计算机每次会固定从4个FIFO中各读取240组数据,然后停止读取,等待下一次almost full信号。

PC104的通信模块是为了适应PC104总线的读取时序而编写的,它将4个FIFO的地址设置为实时控制计算机内存中的4个空闲地址,当实时控制计算机有读取数据的请求时,通讯模块会拉低IOCS16引脚,表明这是16位数据的读取,之后FIFO中的数据就会在IOR的下降沿不断地通过PC104总线传入实时控制计算机。

4 程序设计

实时控制计算机上使用Vxworks操作系统,它是一种实时操作系统,提供了高效实时的多任务调度、中断管理、实时的系统资源及任务间通信。涡流检测仪的控制系统对实时性有很高的要求,同时需要用到多任务调度和中断,所以选用了Vxworks作为实时控制计算机的操作系统。其控制程序如图6所示,程序中共使用了两个线程,一个用于通过PC104总线接收数据,进行缺陷判断与标注后,通过以太网向数据管理计算机发送数据,另一个用于通过以太网接收数据管理计算机的参数信号和心跳信号并将参数通过串口发送给涡流信号处理电路。首先,配置两个socket,一个socket用来向数据管理计算机发送采集到的数据,另一个用来接收数据管理计算机传来的参数信息和心跳信号。当FIFO的almost full置1时,系统会产生中断,中断服务程序中使能数据读取。第1个线程就会通过PC104总线从每个FIFO中各读取240个16位数据并暂存。之后通过预先设置的缺陷信号阈值,判断是否存在缺陷信号以及缺陷信号的大小等级。根据判断结果,在每个数据点用特定协议进行标注,标注内容包括当前点是否为缺陷起始点、是否为缺陷结束点、缺陷等级等信息,标注完成后通过以太网发送给数据管理计算机。另外,还能根据生产线的实际情况,通过I/O口灵活地搭配不同的生产现场接口,根据缺陷判断结果以及生产线的速度信号控制现场设备进行试件的缺陷标注及分选。第2个线程会周期性地socket的接收缓存区里读取数据,当读到有关参数设置的报文时,将相关信息通过串口发送给相应的涡流信号处理电路,发送成功后向数据管理计算机发送应答信号。数据管理计算机每隔2s向实时控制计算机发送心跳信号,以确定实时控制计算机的连接情况,当实时控制计算机读到心跳信号后,会向数据管理计算机发送应答信号;若没有读到,则表明已经断开连接,实时控制计算机则会关闭线程,并重新等待连接。

数据管理计算机的软件通过C#编写,它通过以太网接口向实时控制计算机发送参数设置信息以及心跳信号,并对检测结果进行实时储存和显示。检测参数的设置包括激励频率、滤波器截止频率以及灵敏度,每当需要设置时即通过以太网向实时控制计算机发送相应的报文,实时控制计算机通过串口通信的方式将信息发送给涡流信号处理电路上的单片机,由单片机完成相关参数的改变。检测结果显示则是通过接收到的水平和垂直相位信号数据绘制阻抗平面图,当接收到跟缺陷信号相关的数据时,数据管理计算机将这部分数据存入数据库,从而完成对每个缺陷的数据记录。

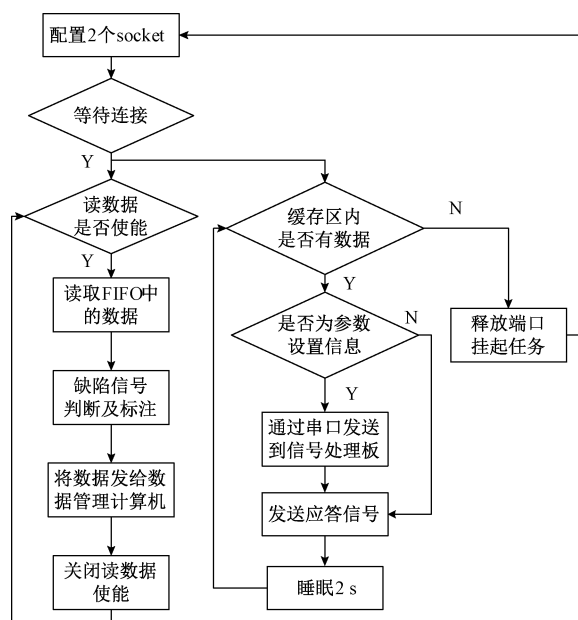


图6 实时控制计算机程序结构

Fig. 6 The procedure structure of real-time control computer

5 检测实验

将研制好的涡流信号处理电路,多通道数据采集系统与实时控制计算机、数据管理计算机进行系统集成,搭配4个NTSL-F型穿过式涡流检测探头进行检测实验,各部分的实物图如图7所示。检测对象均为薄壁铜管,分别对2 mm周向刻痕和直径0.6 mm的通孔缺陷进行检测。检测时,4个涡流信号处理电路设置了不同的检测频率和灵敏度,检测结果如图8和9所示。通过检测结果可知,研发的检测系统可以实现多通道信号的实时采集和处理,检测信号信噪比很高,对微小缺陷具有很强的检出能力,能够满足管材和线材在线检测的需求。本系统每个通道的数据采集率可以达到200 K,对于当前生产线每0.1 mm采集一个数据点的要求,系统可对1 200 m/min的生产线进行检测,远高于当前生产线的速度。

6 结论

本文研发了一个可以用于在线检测的多通道涡流检测系统,主要包括涡流信号处理电路、多通道数据采集系统、实时控制计算机、数据管理计算机。涡流信号处理电路为检测探头提供了稳定的激励源,并能够对检测信号进行放大、滤波、解调、灵敏度调节等处理,得到便于观测的水平相位信号和垂直相位信号。基于FPGA的多通道数据采集系统实现了对四路水平和垂直相位信号的高速采集,采集率可达200 K,并通过PC104总线将数据发送



(a) 涡流信号处理电路
(a) Eddy current signal processing circuit



(b) 多通道数据采集系统及实时控制计算机
(b) Multi-channel data acquisition system and real-time control computer



(c) NTSL-F型穿过式涡流检测探头
(c) NTSL-F through-type eddy current testing probe

图7 涡流检测系统实物图

Fig. 7 The picture of eddy current testing system

给实时控制计算机。实时控制计算机使用了Vxworks实时操作系统,实现了与数据管理计算机和多通道数据采集系统的数据传输,可对采集到的数据进行缺陷判断并标注,还可以通过串口将上位机设置的参数信息发送到涡流信号处理电路。实时控制计算机可通过I/O口灵活搭配生产现场的设备,根据检测结果完成对试件的标注和分选。检测管理计算机可对检测信号进行实时显示,

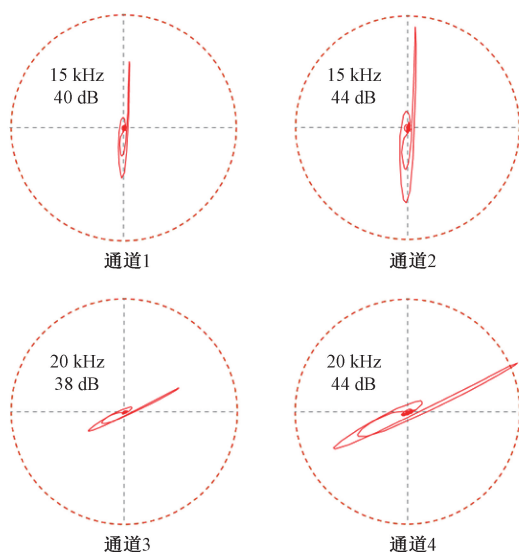


图8 2 mm 刻痕检测阻抗平面图

Fig. 8 Impedance diagrams of 2 mm notch

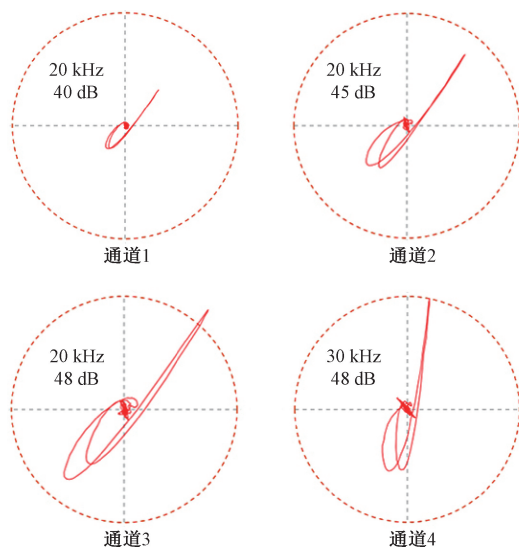


图9 0.6 mm 通孔检测阻抗平面图

Fig. 9 Impedance diagrams of 0.6 mm through-hole

并能对频率、灵敏度、滤波截止频率进行设置。通过薄壁铜管的检测实验可以发现,系统可以有效地对微小缺陷进行检测,信号信噪比很高,并具备多通道采集能力。本系统为应用于高速生产线上的涡流检测设备的设计提供了一种完善可行的新方案。

参考文献

- [1] 张荣华,叶松,马明,等. 电涡流相位梯度及其在导电材料缺陷识别中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 134-141.
ZHANG R H, YE S, MA M, et al. Eddy current phase gradient and its application in identification of conductive material defects [J]. Chinese Journal of Scientific

- Instrument, 2018, 39(10): 134-141.
- [2] DEKDOUK B, CHAPMAN R, BROWN M, et al. Evaluating the conductivity distribution in isotropic polycrystalline graphite using spectroscopic eddy current technique for monitoring weight loss in advanced gas cooled reactors[J]. NDT and E International, 2012, 51: 150-159.
- [3] GHONI R, DOLLAH M, SULAIMAN A, et al. Defect characterization based on eddy current technique: Technical review [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(6): 182496.
- [4] SZLAGOWSKA-SPYCHALSKA J M, SPYCHALSKI M M, KURZYDŁOWSKI K J. A novel approach for measuring of thickness of induction hardened layers based on the eddy current method and the finite element modeling [J]. NDT and E International, 2013, 54: 56-62.
- [5] 燕芳,王志春,丁东阳. 电涡流测厚系统特征值提取方法[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(7): 18-20.
YAN F, WANG ZH CH, DING DY. Extraction method of characteristic value of eddy current thickness measurement system [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(7): 18-20.
- [6] CHENG W. Thickness measurement of metal plates using swept-frequency eddy current testing and impedance normalization [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(14): 4558-4569.
- [7] JUSTICE M. Accurate thickness testing via phase-sensitive eddy current [J]. Metal Finishing, 2010, 108(10): 23-25.
- [8] 徐志远,肖奇. 基于脉冲远场涡流的管道缺陷外检测与定量评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 80-87.
XU Z Y, XIAO Q. Outside inspection and quantitative evaluation of pipe defects based on pulsed remote field eddy [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2): 80-87.
- [9] 张涛. 基于脉冲涡流对埋地金属管道缺陷定量算法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20): 28-31.
ZHANG T. Research on quantitative algorithm of buried metal pipeline defects based on pulsed eddy current [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(20): 28-31.
- [10] SHAKOOR A, ZHENGGAN Z. Investigation of 3D anisotropic electrical conductivity in TIG welded 5A06 Al alloy using eddy currents [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1736-1741.
- [11] ALMEIDA G, GONZALEZ J, ROSADO L, et al.

- Advances in NDT and materials characterization by eddy currents[J]. *Procedia CIRP*, 2013(7): 359-364.
- [12] 任芳芳,雷银照. 三层平板导体厚度及电导率的涡流检测[J]. *无损检测*, 2013, 35(8): 50-53.
- REN F F, LEI Y ZH. Thickness and conductivity measurement of three-layered plane conductors based on harmonic eddy current testing [J]. *Nondestructive Testing*, 2013, 35(8): 50-53.
- [13] YAN B, LI Y, REN S T, et al. Recognition and evaluation of corrosion profile via pulse-modulation eddy current inspection in conjunction with improved Canny algorithm [J]. *NDT and E International*, 2019, 106: 18-28.
- [14] 高国旺,董磊,陈凯莉,等. 基于电涡流位移传感器的微间隙测量系统研究[J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(8): 141-144.
- GAO G W, DONG L, CHEN K L, et al. Research on micro-gap measurement system based on eddy current displacement sensor[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(8): 141-144.
- [15] 吴东翰,韩赞东,孟繁悦,等. 铝板 T 型接头背面筋板位置检测方法研究[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(4): 537-541.
- WU D H, HAN Z D, MENG F Y, et al. Research of the detection method for T-type aluminum stiffened panels

welded joints [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(4): 537-541.

- [16] GARCÍA-MARTÍN J, GÓMEZ-GIL J, VÁZQUEZ-SÁNCHEZ E. Non-destructive techniques based on eddy current testing[J]. *Sensors*, 2011, 11(3): 2525-2565.

作者简介



孟繁悦, 2017 年于清华大学获得学士学位,现为清华大学机械工程系硕士研究生,主要研究方向为涡流检测。

E-mail: mfy17@ mails. tsinghua. edu. cn

Meng Fanyue, received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Tsinghua University. His main research interest is eddy current testing.



韩赞东, 1992 年于清华大学获得学士学位, 1997 年于清华大学获得硕士学位和博士学位,现为清华大学副教授,主要研究方向为无损检测理论和方法。

E-mail: hanzd@ tsinghua. edu. cn

Han Zandong, received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 1992, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Tsinghua University in 1997. Now he is an associate professor at Tsinghua University. His main research interest includes nondestructive testing theory and method.