

脉冲涡流检测微弱信号调理电路设计

孙思成,付跃文

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

摘要:分析了铁磁性材料脉冲涡流检测后期微弱信号的特点,在此基础上进行了脉冲涡流微弱信号调理电路的设计。设计采用了阻抗匹配、对称式限幅差分前置放大、浮空的电压源和屏蔽与接地技术,有效地提高了信号的共模抑制比和信号调理系统的信噪比。试验结果表明:设计的信号调理电路改善了接收系统的信噪比,提高了脉冲涡流晚期微弱信号的分辨能力(有效检测信号为几个微伏),提高了在复杂电磁环境下测量铁磁性材料厚度的检测灵敏度。

关键词:脉冲涡流;信号调理;信噪比;低噪声

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2013)06-0018-05

Design of Weak Signal Conditioning Circuit for Pulsed Eddy Current

SUN Si-Cheng, FU Yue-Wen

(Key Lab of Nondestructive Testing Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: This paper analyzed the weak late stage signal of pulsed eddy current testing of the ferromagnetic materials briefly, and signal conditioning circuit was designed based on the analysis. Techniques of the impedance matching, electromagnetism shielding, grounding, floating empty DC voltage source and limited different pre-amplifying symmetrically are used and the SNR (Signal-to-Noise Rate) of signal conditioning system is improved effectively. The experiment results show that the design of weak signal conditioning circuit for pulsed eddy current improves the SNR and signal of several microvolts can be detected. Effective detection for the small corrosion of ferromagnetic materials in complicated electromagnetic environment is implemented.

Keywords: Pulsed eddy current; Signal conditioning; Signal-to-Noise Rate; Low noise

脉冲涡流(PEC)检测技术采用具有一定占空比的方波,具有平均功率小、瞬时功率大、穿透深度大、信息量丰富等优点,近几年有效地应用于铁磁性管道壁厚的检测。但铁磁性管道的脉冲涡流检测需要检测微伏级信号,信号调理电路设计要求很高^[1]。

由于铁磁性材料检测要求的激励源功率比较大、检测技术难度大、晚期的信号特征微弱难于提取等特点,导致铁磁性材料的 PEC 检测技术发展比较滞后。国外已研制出商品化的基于 PEC 检测技术针对铁磁性材料检测设备 RTD-INCOTEST,能够

实现在线连续检测,但是此项技术没有公开。国内则有厦门爱德森的 EEC-83 型脉冲涡流检测仪器,及华中科技大学研制出钢腐蚀脉冲涡流检测系统,但在国内还没有针对铁磁性脉冲涡流接收系统中的信号调理电路进行专门深入的研究,为此笔者作了一次尝试,进行了脉冲涡流微弱信号调整电路的设计。

1 脉冲涡流检测原理

脉冲涡流检测装置主要由激励系统和信号接收系统两部分组成。工作流程分为脉冲激励信号的发射、试件中感应暂态涡流和瞬态感应电压的接收,脉冲涡流检测原理如图 1。

激励系统是使用一个周期性的单极性或双极性宽带脉冲电流(或电压)作为激励源,当激励脉冲源关断的瞬间,激励线圈中产生暂态电流,并在被检试

收稿日期:2012-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51067007);江西省自然科学基金资助项目(2007GZW1530)

作者简介:孙思成(1986—),男,硕士研究生,主要从事电磁无损检测。

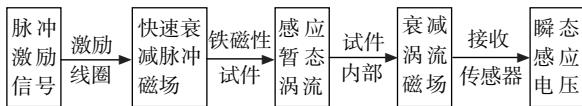


图 1 脉冲涡流检测原理

件上感应出瞬时涡流磁场。

接收系统是通过接收传感器获取试件中产生的脉冲涡流磁场随时间衰减产生的瞬态感应电压信号进行数字化并保存,待后期调用和处理。

由于接收电压的衰减速度等特性同探头附近区域的试件厚度相关,通过对曲线的特征进行分析,就能够得到测量区域的铁磁性材料厚度或缺陷的信息^[1]。

2 脉冲涡流信号特点

铁磁性材料脉冲涡流检测用宽带脉冲电流作为激励源,脉冲涡流瞬变感应电压信号特点:早期衰减快、幅度大(从几微妙到几百微妙,幅度从 $N \times 10^2$ V 衰减到毫伏量级),而晚期感应电压信号衰减缓慢且幅度小(从几百微妙到几毫秒,幅度从毫伏衰减到微伏量级或者纳伏量级)。图 2 为激励电流 I 为 2 A 频率 f 为 4 Hz 双极性脉冲激励的条件下,铁磁性材料感应电压信号衰减曲线。

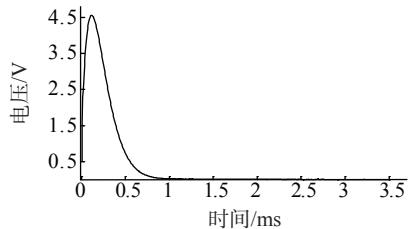


图 2 瞬态感应电压信号

试验中,由于铁磁性材料具有高磁导率、低电导率的特性,对于早期的幅值和衰变率大的感应电压信号易于观察和收集,但是信号特征区别较小;而用来区别试件不同厚度或者是否有缺陷信号特征量主要体现在瞬变感应电压后期微伏量级的信号,很容易受到外界噪声的干扰,所以需要设计优良的信号调理系统将后期的瞬变感应电压信号在较低失真的状态下调理到采集卡有效的采集范围内。因此,在较强、较复杂的电磁干扰及噪声背景下提取微弱的低频脉冲涡流信号,是对缺陷精确地进行判断的关键。

为了有效地抑制工频干扰噪声和放大电路的噪声,优化信号调理电路的信噪比,提高对脉冲涡流后期微弱信号的检测能力,笔者主要从电路结构和提

高信噪比措施两方面进行设计。电路结构的设计:主要针对脉冲涡流感应电压后期微弱信号的特点,在与传感器阻抗匹配的基础上设计了 RFI 滤波电路、差分限幅前置放大电路、二阶低通滤波电路、主级程控放大电路,信号最后送到采集卡进行数据采集(信号调理电路流程如图 3)。提高信噪比措施:电路元器件的选择、对称式差分放大电路、采用稳定的低纹波浮地正负双电源供电、合理的屏蔽和正确的接地技术。

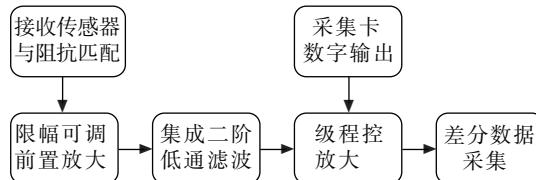


图 3 信号调理电路框图

3 信号调理电路的设计

3.1 阻抗匹配与限幅前置放大电路设计

在涡流检测接收系统中为了提高数据采集的准确度和灵敏度,尽可能的减小系统的噪声,须对信号源阻抗与前置放大器源阻抗进行合理的匹配。根据脉冲涡流信号的特点,通过 LCR 桥式电路对脉冲涡流检测的接收传感器进行了不同频率相关参数的测量,设计合理的阻抗匹配电路,从而使接收传感器达到最佳的噪声性能,具体的匹配电路如图 4。

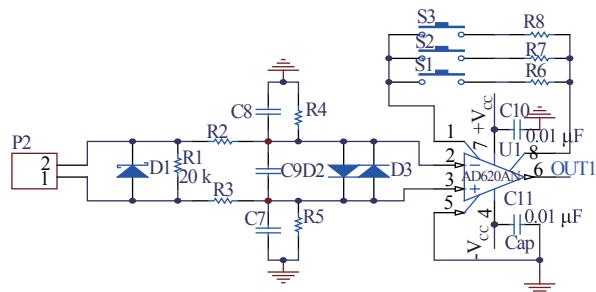


图 4 阻抗匹配与限幅前置放大电路

脉冲涡流检测装置接收系统中,脉冲涡流瞬态感应电压早期信号幅值超过了前置放大器的增益范围或甚至超过了电源电压,而且瞬态过载的时间为几百微妙,所以在阻抗匹配的前面加了一片双向的瞬态抑制二极管(TVS)D1 对大电压信号进行钳位。双向的 TVS 可以在两个方向吸收瞬时的大脉冲功率信号,并把电压钳制到预定水平,可承受的瞬时功率可达上千瓦,钳位响应时间仅为 $1 \text{ ps} (10^{-12} \text{ s})$ ^[2]。瞬态抑制二极管的使用,一方面保证了后级精密电

路的安全,另一方面仪表放大器前的限流电阻 R2 与 R3 就可以选择较小阻值的电阻,从另一个角度有效地减小了前置放大的输入噪声。

前置放大电路采用了对称式差分放大电路,有效地提高了脉冲涡流微弱信号的信噪比。前置放大器选用了集成的、低功耗、低噪声、性价比高的仪表放大器 AD620,通过选用一个不同的外接电阻就可以设置 1~1 000 不同的放大倍数,信号调理电路前置放大倍数设置为 5 倍、10 倍、20 倍放大(通过外部的接线实现不同倍数的转换),放大倍数 G 的计算公式为:

$$G = 49.4 / R_g + 1 \quad (1)$$

式中: R_g 为外接电阻。

仪表放大器 AD620 内部结构是三运放组合式测量放大器,放大器的第一级是具有平衡对称结构同相输入的运算放大器,该结构使共模增益、失调电压、电流及温度漂移具有相互抵消的优点;此外仪表放大器还有高输入阻抗、高共模抑制比等优点,可以在有共模信号的条件下,放大很微弱的信号。

低噪声的仪表放大器 AD620 在 1 kHz 处输入噪声为 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$,脉冲涡流后期的微弱信号放大时,易受到环境中射频干扰(RFI)的影响,需要设计更具有鲁棒性质的滤波器。设计采用了一个差分低通滤波器在仪表放大器前对 RF 进行衰减滤波,减小了信号的输入带宽,尽可能多地从输入端去除 RF 能量,提高了输入信号的信噪比。此外,在仪表放大器的前面采用了两个开关二极管实现对大动态涡流衰减电压信号的低压钳位,把后期噪声影响较大、信噪比较低的但是蕴含丰富低频缺陷信息的电压信号,从整个动态信号中截取出来,设计单独针对微弱信号进行低噪声、高精度的信号调理电路。

3.2 低通滤波电路设计

滤波器选用了 BB 公司生产的性能优良的通用性集成有源滤波器 UAF42,设计了截止频率为 2 kHz 反相输入的二阶低通滤波器,对幅度比较小、工作频率比较低经前置放大后微弱瞬态感应电压信号进行滤波,以减小信号调理板的本底噪声和工频干扰等因素的影响。

UAF42 具有以下优点:

(1) 它采用典型的状态可调(state-variable)模拟结构,可以根据需要设计成低通、带通、高通和带阻滤波器,而且可以通过改变外部电阻的阻值,实现不同截止频率的设定。

(2) 内部集成四级精密运算放大电路,50 k Ω 、

0.5%精密电阻,1 000 pF、0.5%精密电容,解决了设计滤波器所需要的高精度的电阻和电容的问题。

(3) 具有高精度的频率和 Q 值(UAF42 的频率设置与连接方式如图 5 所示)。

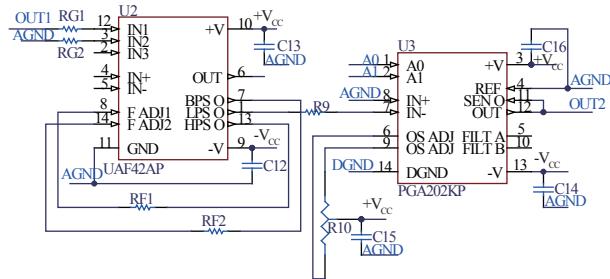


图 5 二阶低通滤波与主级程控放大电路

3.3 主级程控放大设计

主级程控放大设计,选用了 BB 公司的可编程放大器 PGA202,它具有高共模抑制比、低噪声等优点。PGA202 通过数字输入 A0 与 A1 实现 1,10,100,1 000 不同倍数的放大,从而与前置放大组合实现 100,200,500,1 000 等不同的放大倍数^[3](PGA202 外围电路如图 5)。

笔者采用了 NI 公司 LabVIEW 软件和 16 位 PCI6251 多功能数据采集卡,通过采集卡数字信号输出来控制 PGA202 增益倍数。对于程控放大增益的设计有两个方案:可以通过采集卡数字信号的输出控制,一方面根据脉冲涡流不同时间信号衰变幅度不同的特点,实现信号的分段放大,瞬态感应电压早期信号比较大采用较小的放大倍数 10 倍,后期信号比较微弱采用较大的放大倍数 100,1 000 倍,可以有效地避免因前段电压信号的饱和造成信息的丢失,增大了有用信号采集的动态范围;另一方面可以设定固定放大器的放大倍数,如固定放大 10 倍或者 100 倍、1 000 倍。待测的脉冲涡流信号经过前置放大、二阶低通滤波、程控放大电路后,采集卡在激励源同步信号的触发下实现数据采集并保存。

4 提高信噪比措施

基于脉冲涡流晚期衰减信号比较微弱,很容易受到噪声的污染,在设计了适用于脉冲涡流采集系统的低噪声信号调理电路结构的情况下,从硬件的方面提出了提高调理电路信噪比的措施。

4.1 电路元器件的选择

电路中的每个元器件都是一个噪声源,采用低失调、低噪声、低功耗的仪表运放电路,减小电路中元器件的数量;电阻选用高精确度的金属膜电阻,尽

量选用小阻值的电阻。尽可能地使前置放大的差分输入对地阻抗相等,从而减小放大电路与输入地之间的共模干扰,此外电路中的滤波电容采用滤波效果较好的陶瓷电容。

4.2 低纹波浮地电源

该信号调理电路的放大器和有源滤波器的供电电源采用统一的正负 9 V 浮地双电源的供电。对于微弱信号放大,影响模拟信号性能的一个关键参数是放大器供电电源线上的噪声或纹波。为了使路径中的噪声信号达到最小,在使电源线回路和测量回路面积最小的基础上,采用了干电池加稳压管作为放大器的供电电源。选用了电源抑制比较高、噪声较小的 LDO(low dropout regulator)作稳压处理并进行合理的电源旁路处理,为低噪声放大器提供稳定的低纹波的供电电源。

4.3 屏蔽措施与接地

屏蔽和接地技术是低噪声设计的关键技术之一,采用合理的屏蔽和接地技术,可以最大限度地降低环境噪声和干扰的影响(具体的屏蔽与接地方式如图 6)。

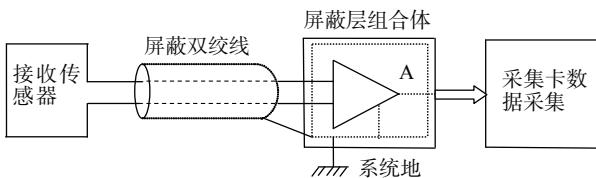


图 6 屏蔽与接地示意图

该信号调理电路屏蔽设计,采用了源电阻浮地、屏蔽体一点接地的方式。接“地”指的是信号调理系统的一个等电位点,作为信号调理电路的基准电位,而不是大地。采用了信号源浮地,用屏蔽线双绞线将信号传输到仪表放大器的输入端,而且屏蔽双绞线的屏蔽层接到信号调理电路的参考地。根据脉冲涡流感应电压晚期信号为低频小信号的特点,该设计采用屏蔽双绞线一点接地的方案^[4],都接到信号调理电路的参考地。一点接地的方式减小了回路的面积,同时防止了容性干扰,获得了良好的屏蔽效果。

屏蔽的方式一般是由金属屏蔽体把元器件、电路、组合部件、电缆和传输线等包围起来,以达到消除噪声电压的效果。根据干扰对象的不同,屏蔽有静电屏蔽、电磁屏蔽和磁场屏蔽。设计采用了铝板和铁板做成的组合屏蔽体,将屏蔽层与信号调理系统的参考地连接在一起,这样屏蔽可以看成不需要电流返回参考点的泄漏通道^[5-6]。此外,在信号线

的末端分别将对地电阻(如图 4 的 R4,R5)接到信号调理电路的参考点位。两个阻值电阻中间引出的信号电位为输入信号的共模成分,这种接法将仪表放大器输入端的共模信号引入了参考点位。采用了对称平衡结构电路及屏蔽双绞线作为传输线,使两线得到的对地噪声及其它干扰在输入端相互抵消;此外组合屏蔽体的使用与合理的接地有效地屏蔽了环境中的电磁噪声和静电噪声信号,提高了信号的信噪比。

5 实际测试

5.1 信号调理电路性能测试

低噪声放大器关注的性能指标是输入失调电压、失调电流、共模抑制比、等效的输入噪声电压以及放大器增益与带宽的关系等。笔者设计的信号调理电路均采用的是低失调电压、高共模抑制比的市售的比较成熟的集成放大器,该处只对放大器的增益和带宽进行说明。

脉冲涡流接收系统的带宽,主要由信号调理电路决定的,其中包括仪表放大器的带宽、低通滤波器的截止频率、程控放大器的带宽。通过对应放大器官方网站上查到的 DATASHEET 资料显示,在设定放大倍数为 100 时,AD620 仪表放大器和 PGA202 的带宽分别为 120 kHz 和 100 kHz,笔者设定的放大倍数一般都不会超过 100 倍。由于脉冲涡流所要采集的数据主要集中在 0 Hz~2 kHz 的低频信号,因此仪表放大器 AD620 和 PGA202 的增益带宽均满足试验的需要。低通滤波器是按照 UAF42 仿真和设计软件 FILTER42 设计为二阶截止频率为 2 kHz 的切比雪夫滤波器。综上所述,该信号调理电路的带宽为滤波器的带宽 2 kHz。

在实验室环境噪声很大的条件下,不能通过信号发生器和示波器用信号调理电路观察微伏级信号的放大效果。所以,此处仅对信号调理电路的本底噪声和系统的分辨率在实验室条件下进行测试。通过脉冲涡流接收系统直接对噪声信号进行采集,这样测试结果不仅与信号调理电路有关而且还和采集卡的分辨率有关。首先将采集卡的输入短路,采集 1 024 次叠加平均测得采集卡的系统噪声大约为 300 μ V,如图 7 所示,与从 NI 官方网站查到的该型号采集卡的有效精度为 280 μ V 接近。

信号调理电路输入端短路且设定的放大倍数为 500 倍,采集 1 024 次叠加平均得到信号调理电路与系统的本底噪声大约为 1 μ V 如图 8 所示,与不接

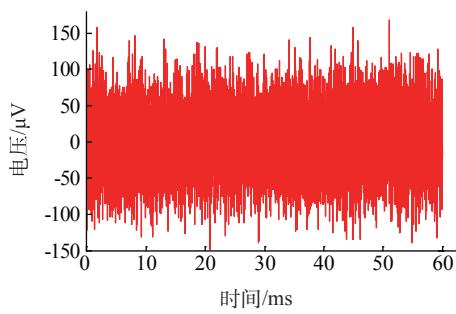


图 7 采集卡的有效精度

信号调理电路的采集系统相比,脉冲涡流接收系统的分辨率得到较大的提升。因此,经过信号调理电路放大滤波后,该脉冲涡流接收系统的本底噪声和分辨率约为 $1 \mu\text{V}$ 。

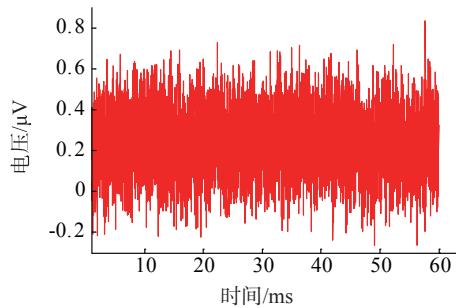


图 8 电路放大 500 倍系统短路噪声

5.2 检测能力的测试

试验中,接收传感器采用了内通式传感器,激励信号采用了频率为 4 Hz 、占空比 50% 双极性脉冲恒流源,发射电流为 $\pm 3 \text{ A}$,对 J55 油水井专用钢制管道进行试验。检测时,探头放入管子的内部,对不同管壁厚度的位置进行检测。接收传感器信号通过信号调理电路然后接入采集卡,在激励发射同步触发下,对瞬态感应电压信号进行数据采集并将数据存为文件,方便对信号进行叠加、滤波等处理。其中信号调理电路参数设置如下:前置放大电路设置为 5.15 倍、二阶低通滤波设置了 2 kHz 的截止频率、程控放大采用固定的方式,放大倍数设置为 100 倍,总的增益为 515 倍。采集卡的采样率为 200 kHz 、采样点数为 12 k 点,信号叠加平均 60 次,通过软件进行了相关的处理。

图 9 为笔者基于信号调理电路实际测得的单一壁厚管道脉冲涡流衰变电压曲线,横轴为采样长度为 50 ms ,纵轴为接收传感器的感应电压,采用线性显示方式。由于用来区别试件不同厚度特征量主要体现在瞬变感应电压后期信号,线性显示很难显示出曲线的细节,不适合大动态范围信号的显示。对

于不同厚度试件,在同样的传感器和激励参数下的脉冲涡流衰变电压信号曲线采用双对数的显示方式。图 10 分别为壁厚为 5.7 mm 与 4.7 mm 的瞬变电压衰变曲线双对数显示,由图可以看出不同壁厚的脉冲涡流衰减曲线在早期是基本重合的,与壁厚有关的特征量主要出现在晚期,试验结果证明:该信号调理电路具有较好的小信号识别能力,能检测的有效信号为 $1 \mu\text{V}$ 量级。

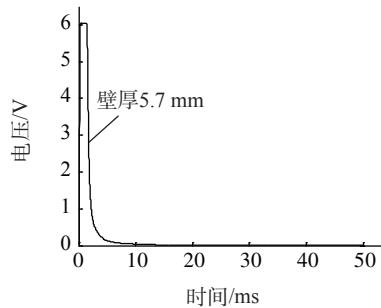


图 9 经过信号调理电路的波形

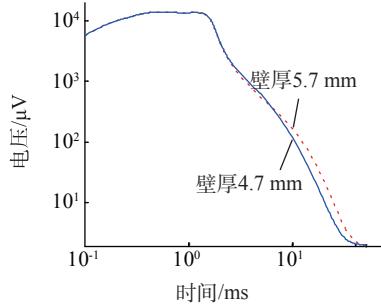


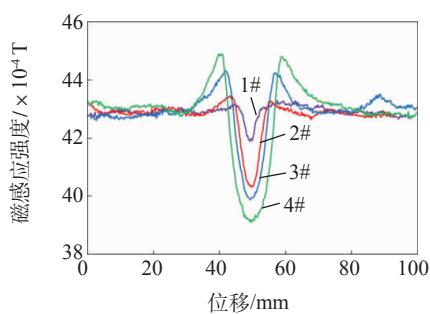
图 10 不同厚度试件信号对数显示

6 结论

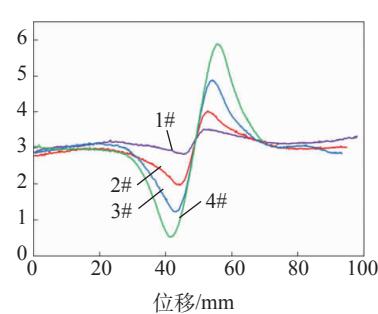
在分析了脉冲涡流检测原理的基础和介绍铁磁性材料脉冲涡流微弱信号特点的基础上,设计了对称式限幅前置放大、二阶低通滤波、程控放大电路,并介绍了提高微弱信号信噪比的相关措施。试验证明:该信号调理电路具有性能稳定、信噪比高、低噪声、低功耗的特点,成功应用于脉冲涡流后期微弱信号的调理放大,提高了铁磁性材料检测缺陷信号的分辨率,在具体应用中取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 黄琛. 基于脉冲涡流技术的无损检测实验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.
- [2] 段景汉. 瞬态电压抑制(TVS)二极管及其应用[J]. 国外电子元器件, 1996(3):13~15.
- [3] 刘丽萍. 基于 DSP 的瞬变电磁数据采集系统的研制[D]. 长春:吉林大学, 2005. (下转第 48 页)



(a) 切向磁场



(b) 法向磁场

图 11 1-4 号典型缺陷切向和法向磁场分布曲线

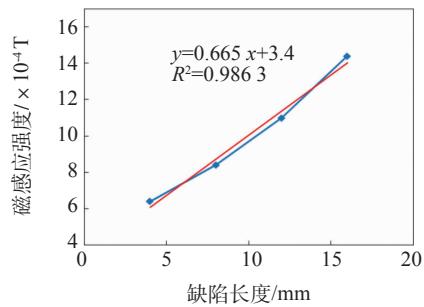


图 13 缺陷长度与法向磁场峰谷距离的线性拟合

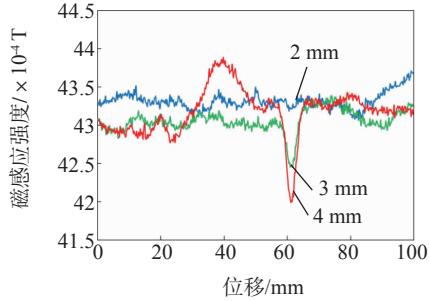


图 4 优化后的探头对微小缺陷的检测结果

最小裂纹长度为 3mm。

6 结论

使用设计的激励装置对 4 种尺寸规格的典型缺陷进行了检测验证,取得了理想的检测效果,裂纹的检测分辨率达到了 3 mm。

参考文献:

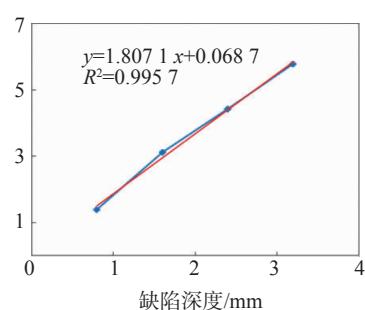
[1] DOVER W D, MONAHAN C C. The measurement of

~~~~~

(上接第 22 页)

[4] 刘竹琴,白泽生. 传感器电路的噪声及其抗干扰技术的研究[J]. 现代电子技术, 2011, 14(34): 161—165

[5] 曾庆勇. 微弱信号检测[M]. 杭州: 浙江大学出版社.

图 12 缺陷深度与切向  
磁场峰峰值的线性拟合

surface breaking cracks by the electrical systems ACPD/ACFM [J]. Fatigue fract. Engng Mater. Struct, 1994, 17 (12): 1485—1492.

- [2] CHEN K, BRENNAN F P, DOVER W D. Thin-skin AC field in anisotropic rectangular bar and ACPD stress measurement [J]. NDT&E International, 2000 (33): 317—323.
- [3] GAYNOR T M, ROBERTS D L, HOMAN E, et al. Reduction in Fatigue Failures Through Crack Detection by Alternating Current Field Measurement [J]. SPE Drilling & Completion, 1997, 12(1): 37—42.
- [4] LeTessier R, COADE R W, GENEVE B. Sizing of cracks using the alternating current field measurement technique [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 79: 549—554.
- [5] ZHOU Jian-wei, MARTIN C. LUGG, Roy Collins. A non-uniform model for alternating current field measurement of fatigue cracks in metals [J]. Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics, 1999 (10): 221—235.
- [6] HASANZADEH R P R, SADEGHIS H H, RAVAN M. A fuzzy alignment approach to sizing surface cracks by the AC field Measurement technique [J]. NDT&E International, 2011, 44: 75—83.
- [7] TOPP D, SMITH M. Application of the ACFM inspection method to rail and rail vehicles [J]. Insight, 2005, 47(6): 354—357.
- [8] 郑文培,苏义脑,方太安,等. 基于 LabVIEW 的交流电磁场检测实验台 [J]. 石油机械, 2012, 40(10): 22—25.

1996, 101—109.

- [6] 王忠,林君,吴国强. TEM 接收机低噪声抗饱和前置放大设计 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2002, 20(4): 1—4.