

Blind Separation of Remote Field Eddy Current Defect Signal from Magnetic Perturbation Based on Independent Component Analysis

Xiaojie Xu, Wenlin Pei, Haojie Zhang

Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi
Email: dr_xxj@163.com

Received: May 25th, 2015; accepted: Jun. 20th, 2015; published: Jun. 24th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

According to influence of magnetic perturbation in remote field eddy current defect detection, a novel blind separation technique based on independent component analysis was proposed. Firstly, finite element method was adopted to declare the applicability of independent component analysis in remote field eddy current. Secondly, a new method based on real part and imaginary part rather than amplitude and phase signal was proposed, and simulation and experiment was implemented to verify it. At last, a conclusion could be deduced from simulation and experiment results as followed: the influence of magnetic perturbation could be eliminated significantly by using independent component analysis.

Keywords

Nondestructive Testing, Remote Field Eddy Current, Independent Component Analysis, Defect, Magnetic Perturbation

基于传感器阵列和独立分量分析的远场涡流缺陷信号盲分离技术研究

徐小杰, 裴文林, 张浩杰

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安
Email: dr_xxi@163.com

收稿日期: 2015年5月25日; 录用日期: 2015年6月20日; 发布日期: 2015年6月24日

摘要

针对远场涡流检测中管道磁导率不均匀严重影响缺陷信号检测的问题, 本文提出一种新的基于独立分量分析的远场涡流缺陷信号盲分离技术。首先利用有限元仿真对独立分量分析在缺陷分离中的适用性进行了详细分析, 证实了磁导率不均匀和缺陷信号满足独立分量分析的应用前提。提出了基于实部和虚部信号的独立分量分析缺陷分离方法, 并进行了仿真和实验验证。结果表明, 基于独立分量分析技术能够有效的从磁导率不均匀区域分离和识别出缺陷。

关键词

无损检测, 远场涡流, 独立分量分析, 缺陷, 磁导率不均匀

1. 引言

远场涡流作为涡流无损检测技术的重要分支, 在管道尤其是铁磁性管道的检测和评估中发挥着重要作用[1] [2]。然而, 工业管道由于长期外界环境不同或制造过程条件差异等原因, 往往造成各段管道磁导率不均匀, 进而覆盖远场涡流缺陷检测信号, 如不能对其进行有效分离和识别, 极易造成漏检和误检发生。为解决这一问题, Atherton [3]等人提出带磁饱和窗的远场涡流技术, 但在激励线圈和检测线圈附近实现局部磁饱和, 难度很大, 且磁轭装置既增加了系统复杂度, 又降低了通过弯管时的灵活性。随着数字信号处理技术发展, 人们开始探索从信号处理角度出发消除磁导率不均匀影响, 如 Mandayam 等人提出一种基于特征不变量的方法, 构造一种只对缺陷变化敏感对磁导率变化不敏感的特征向量以消除其影响, 但此方法需要事先设定特定模型, 适用性不强。

独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)理论是在统计独立性假设下, 对观测到的多路混合信号进行盲分离, 获取隐含在混合信号中的独立信源[4]-[6]。在电磁检测领域, 近年来开始逐渐有人应用独立分量分析技术解决实际工程中遇到的难题, 如功能核磁共振成像(FMRI)中利用 ICA 技术对生物电信号进行分离; 海底管道缺陷漏磁法检测中应用 ICA 技术消除电磁干扰; 利用涡流阵列传感器和 ICA 消除提离对检测信号带来的影响。独立分量分析方法无需增加系统复杂度, 且对混合信号仅要求很少的先验知识, 具有良好的对象适应性。有鉴于此, 我们提出一种新的基于独立分量分析技术实现远场涡流缺陷和磁导率不均匀的盲分离。

2. 原理分析与有限元仿真

2.1. 原理分析

独立分量分析要求两个前提条件: 信源统计独立且符合线性叠加。依据电磁场散射定理, 磁导率不均匀和缺陷从其电磁本质上可以近似看作激励电磁场在传播和扩散过程中遇到的两个不同散射体, 再根据电磁场等效定理, 在不考虑二者之间进一步相互作用前提下, 缺陷和磁导率不均匀可以看作两个独立的二次散射源。电磁场中的叠加定理描述如下: 在一个线性、各向同性的系统中, 两个独立散射源所产

生的电磁场等价于每个单独源存在时的矢量叠加。在有限元仿真中，线性和各向同性的前提显然满足，对于实际检测系统，也近似工作于线性区域，因此均可近似认为二者符合线性叠加关系。

2.2. 有限元仿真

为验证上述结论有效性，我们采用 Atherton 等人提出的缺陷等效源方法进行有限元仿真：首先仿真得到完好管道的矢量磁位 A_n ，以及存在缺陷或者磁导率不均匀情况时的矢量磁位 A_d ，然后将空间对应各点的两者进行矢量相减，即可得到缺陷源的矢量磁位空间分布： $A_s = A_d - A_n$ 。仿真对象是一段内径 140mm，外径 148 mm，壁厚 4 mm，长 800 mm 的铁磁性钢管，电导率 $\sigma = 5.96 \times 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ，相对磁导率 $\mu_r = 329.5$ ；激励线圈外径 134 mm，内径 124 mm，长 30 mm，施加电流密度为 $5.5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ，激励频率 60 Hz，初始相位角为 0。缺陷位于距离激励线圈 0.57 m 处，磁导率不均匀位于 0.63 m 处，两者均位于远场区位置 [7]-[9]。分磁导率不均匀和缺陷同时存在、仅存在磁导率不均匀、仅存在缺陷三种情况进行仿真。

图 1 为同时存在磁导率不均匀和缺陷时的等效源磁力线分布图，可以看出，图中对应于磁导率不均匀和缺陷的区域，等效于分别存在两个不同的二次散射源。图 2 为仅存在磁导率不均匀的情况，此时等效为一个存在于磁导率不均匀区域的单独二次散射源；图 3 为仅存在缺陷情况，此时等效为另一个存在于缺陷区域的单独二次散射源。为证实两者之间满足叠加定理，我们将图 2 和图 3 对应点进行矢量叠加，得到图 4。对比图 1 和图 4 可知，二者分布基本吻合。因此，可以证实缺陷和磁导率不均匀可以看作两个不同的二次散射源，且两者之间满足叠加定理。

3. 基于负熵判据的固定点算法

熵定义为信号中所含有的平均信息量。对于连续的信源 x ，如果其概率密度函数为 $p(x)$ ，则该信源的熵为：

$$H = -\int p(x) \log p(x) dx \quad (1)$$

熵的一个重要特性就是在具有相同协方差阵的信号中高斯信号的熵最大，因此任意概率密度函数为 $p(y)$ 的信号的熵与具有相同协方差阵的高斯分布信号的熵二者之差即该信号负熵：

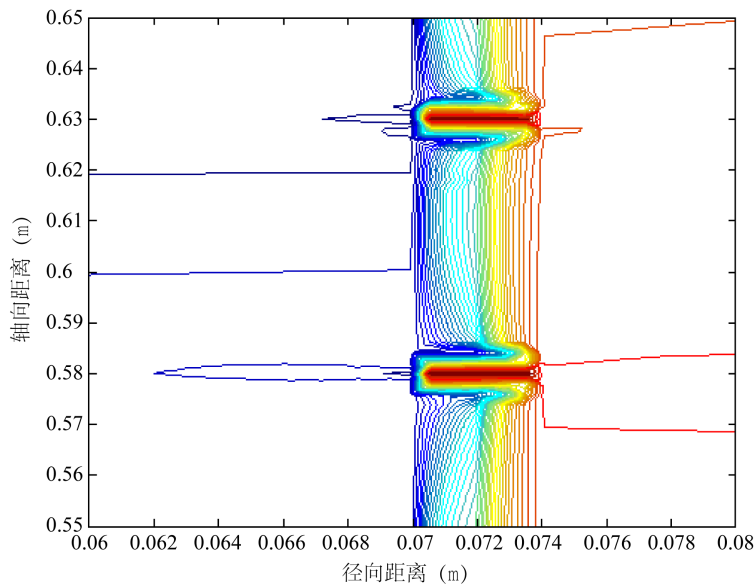


Figure 1. Contour map of $r \cdot A_s$ of defect and magnetic perturbation

图 1. 二者同时存在情况下的 $r \cdot A_s$ 等值图

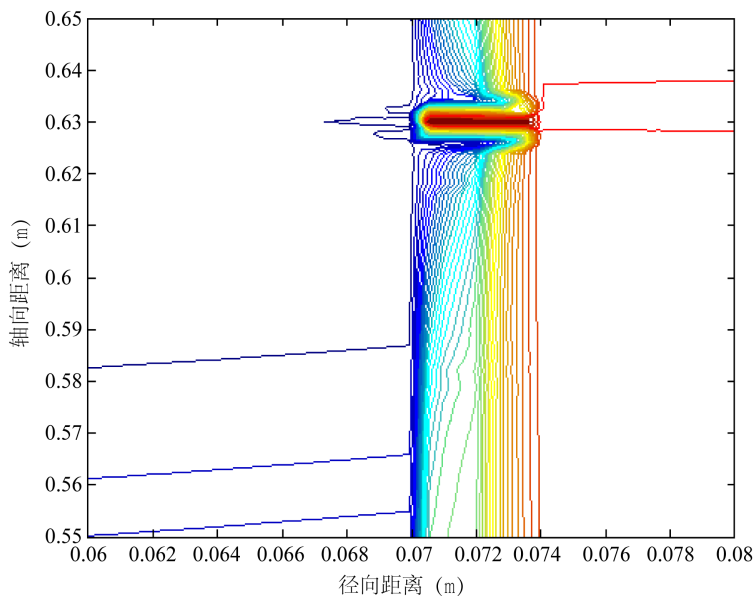


Figure 2. Contour map of rA_{s1} of magnetic perturbation only
图 2. 仅存在磁导率不均匀时的 rA_{s1} 等值图

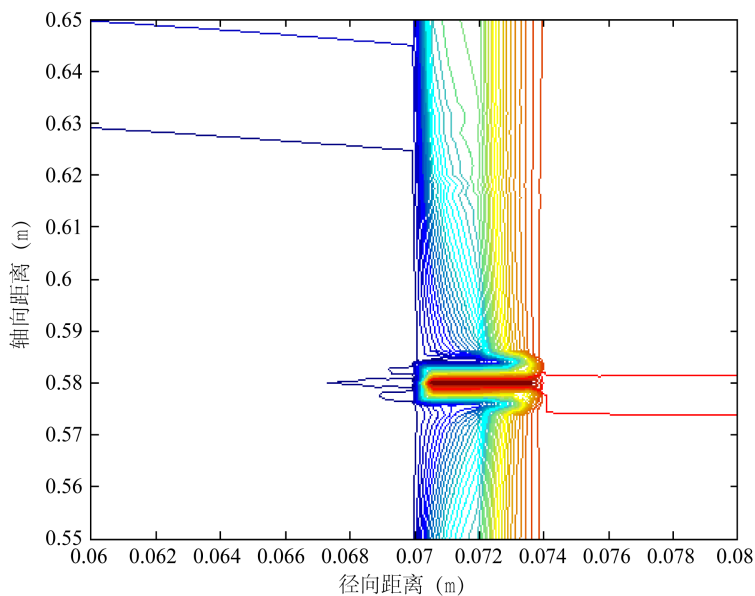


Figure 3. Contour map of rA_{s2} of defect only
图 3. 仅存在缺陷时的等效源 rA_{s2} 等值图

$$Ng(x) = H(x_{Gauss}) - H(x) \tag{2}$$

信号的负熵越大，则其非高斯性越强，因此可用其来度量分离信号非高斯性，且信号负熵在线性变换前后保持不变。由中心极限定理可知，独立信源经过线性迭加后，混合信号的高斯性信源信号强，通过观测分离信号非高斯性，当其达到最大时，表明分离效果达到最佳。基于负熵判据的固定点算法因其收敛速度很快，也称之为 FastICA 算法。

在远场涡流缺陷识别中，与常规独立分量分析应用有所区别的是：我们并不需要确切知道混合信号

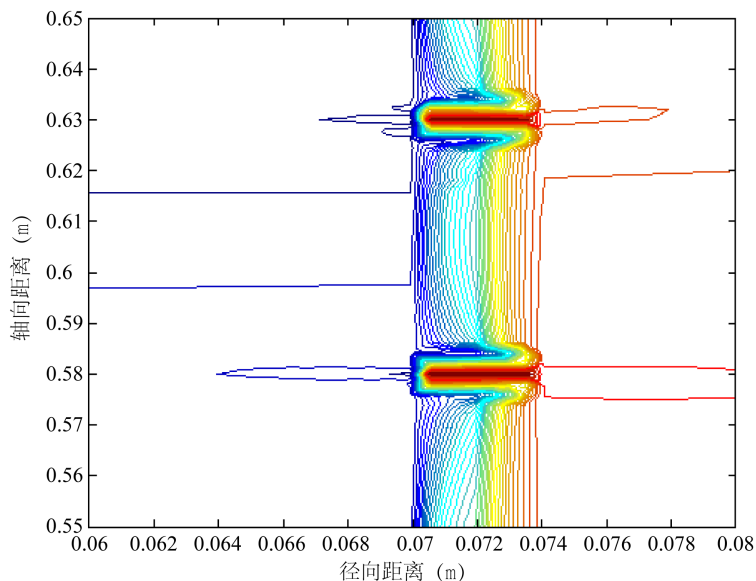


Figure 4. Vector superposition of $r \cdot A_{s1}$ and $r \cdot A_{s2}$

图 4. $r \cdot A_{s1}$ 和 $r \cdot A_{s2}$ 矢量叠加

中所包含的全部独立信源，仅仅需要利用先验信息，找出我们所关心的缺陷信号，同时去除其余干扰信号(磁导率不均匀和其他干扰)的影响。本文采用“去伪迹”算法进行处理，其基本思路如下：首先利用独立分量分析算法计算出分离矩阵，并利用这一分离矩阵估计出各个独立的源信号；然后利用先验知识，判断出缺陷信号，将其余的独立信源全部设置为 0，最后反推计算即可得到缺陷单独存在情况下的传感器响应。

4. 基于信号实部和虚部的分离算法

采用图 5 所示的仿真模型对独立分量分析算法的分离效果进行验证。

由于远场涡流的检测信号通常以幅值和相位的形式表示，我们首先以信号幅值作为输入信号进行分离，如图 6 所示，可以看出，经过去伪迹算法处理后恢复出的信号波形与原信号波形相比产生了很大畸变。

分析其原因，按照叠加定理，在空间位置处的场是两个独立二次散射源的矢量线性叠加，而信号幅值和相位是经过运算得到的，是对场信号的非线性叠加，从而带来分离结果的误差。实质上，信号的实部和虚部分量才是真正意义上的矢量线性叠加。因此，在采用独立分量分析时，应首先对所得到的实部和虚部分别进行分离以后，然后再综合利用两者求出幅值和相位信号。基于实部的分离结果如图 7 所示，此时的分离效果与缺陷单独存在时的信号波形基本一致，证实了所提出的基于实部和虚部信号进行缺陷信号分离的有效性。

为进一步了解存在噪声情况下，独立分量分析方法有效性，我们针对两种不同污染程度的噪声情况进行进一步仿真验证。对应仿真得到的 2 路传感器阵列实部信号，每一路分别叠加同一信噪比的随机加性高斯噪声，经独立分量分析算法和去伪迹算法处理以后的缺陷信号如图 8 和图 9 所示。在加入 20 dB 随机加性高斯噪声时，算法分离效果有所下降，分离出的缺陷信号明显存在叠加的干扰噪声，但仍能有效识别出缺陷的存在；当叠加 10 dB 随机加性高斯噪声时，此时分离出的缺陷信号受噪声干扰十分严重，难以有效判别出不同位置的独立源。因此，要想获得较好的分离结果，在进行独立分量分析处理以前，应对实际信号进行必要的如低通滤波等预处理算法。

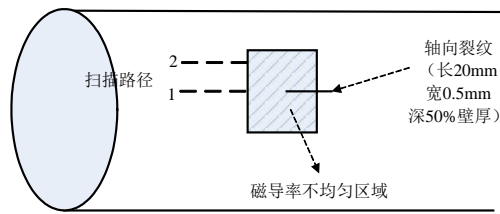


Figure 5. Simulation model

图 5. 仿真模型

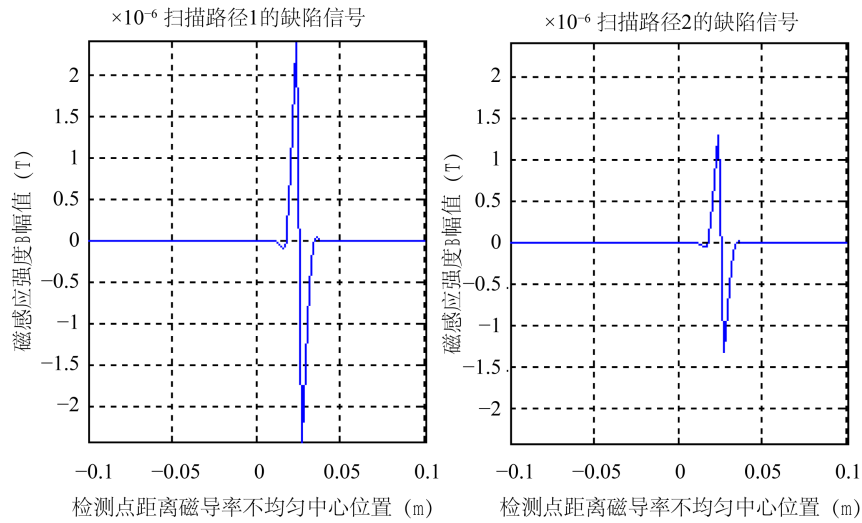


Figure 6. Separation effect based on amplitude

图 6. 基于信号幅值的分离效果

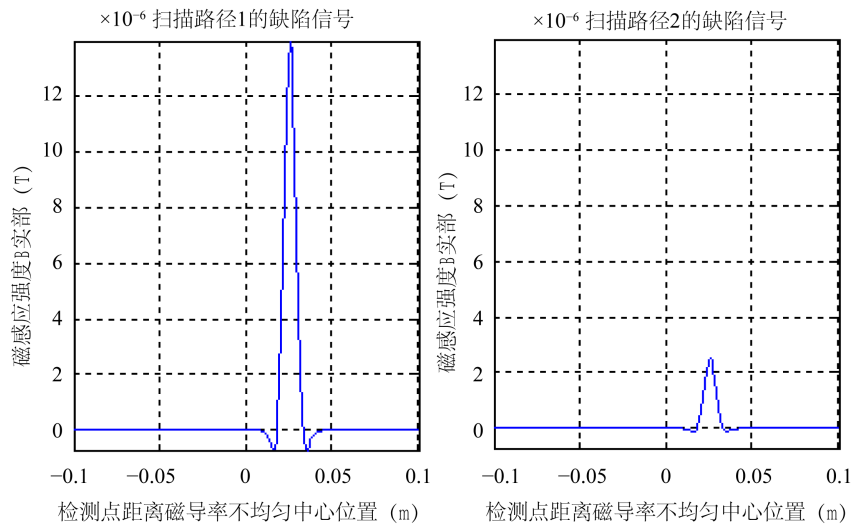


Figure 7. Separation effect based on real part

图 7. 基于信号实部的分离效果

5. 实验验证

采用如图 10 所示的远场涡流检测装置进行实验验证。被测试件和检测线圈以及阵列传感器配置如图 11 所示。

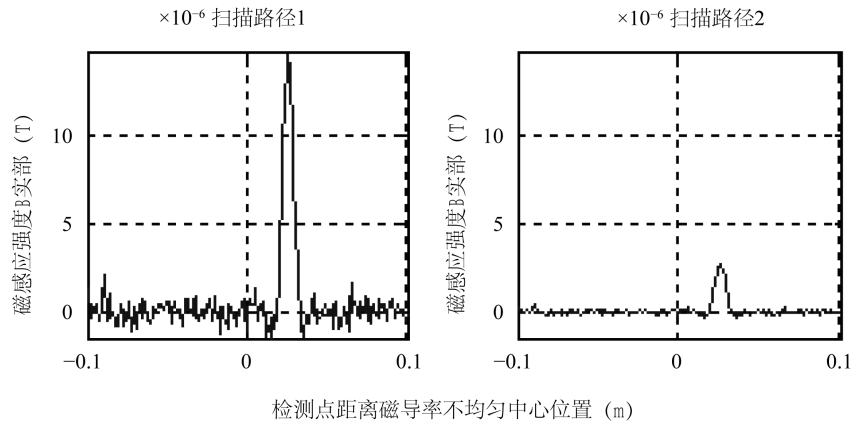


Figure 8. Separation effect under 20 dB noise.

图 8. 20 dB 噪声情况下的分离效果

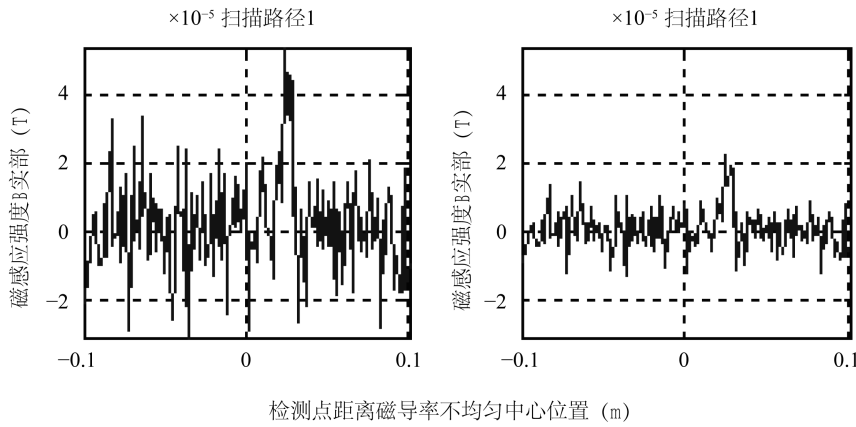


Figure 9. Separation effect under 10 dB noise

图 9. 10 dB 噪声情况下的分离效果



Figure 10. Experimental setup and schematic diagram

图 10. 实验装置实物图与原理图

我们采用对管道局部区域进行热处理的方式模拟磁导率不均匀，并在此局部区域与被测管道未经过热处理的区域交界处加工一个宽 3 mm、深 50%壁厚、长 25 mm 的轴向裂纹。检测线圈采用均匀分布于管道周向的六个沿周向分布的棒形磁芯线圈(即传感器之间周向间隔 60°)，其中检测线圈 1 位于轴向裂纹缺陷正下方。

正交锁相放大输出的两路信号恰好为同相信号和正交信号，即对应仿真中的实部和虚部信号，因此

将这两路信号进行独立分量分析处理以后，再通过计算即可得到检测信号幅值和相位，或直接以同相和正交信号为纵坐标和横坐标绘出极坐标图。分离前传感器阵列的同相信号如图 12 所示，裂纹信号几乎完全淹没于磁导率不均匀所产生的干扰信号中，难以有效判别其存在。由于局部热处理区域覆盖整个圆周，传感器阵列中六路传感器所检测到的磁导率不均匀信号基本相同，而对于缺陷信号，则只有位于缺陷正下方的传感器 1 检测到了较强的信号。其余 5 路传感器所检测到的缺陷信号则随着远离缺陷位置而迅速衰减。因此以下部分仅给出两路传感器的检测结果。

采用 FastICA 算法得到六个独立信源如图 13 所示。结合先验知识，第 1 个信源应为缺陷信号，第 6 个信源因周向覆盖范围大且变化趋势较为缓慢，应为磁导率不均匀所对应的信号，而其余几个信源，应该是热处理不均匀以及检测系统所带来的干扰信号。



Figure 11. Specimen and sensor array
图 11. 被测试件与传感器阵列

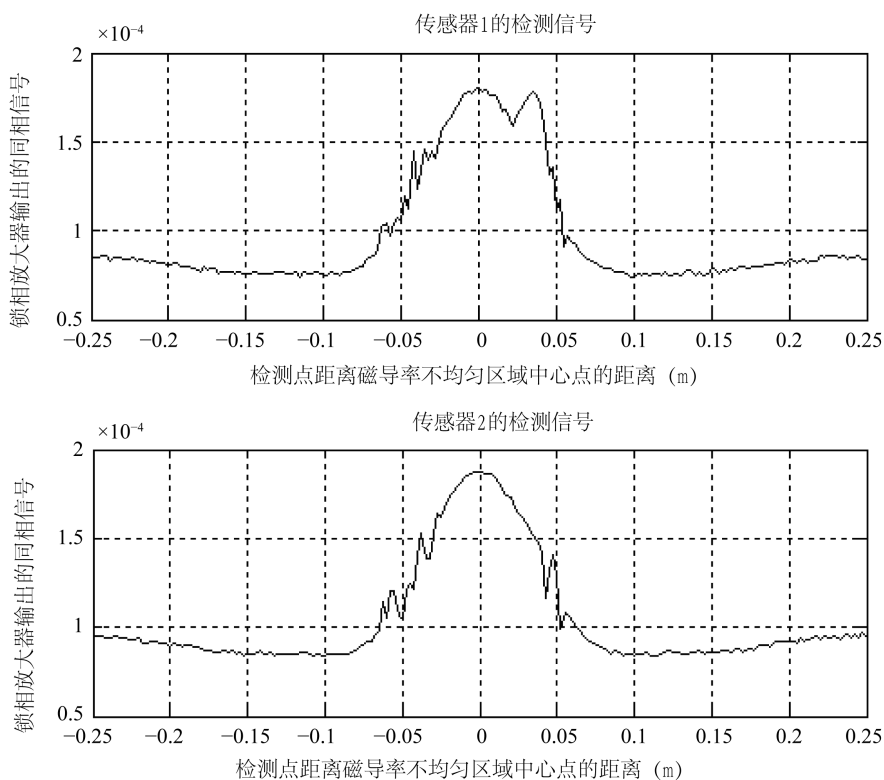


Figure 12. In-phase part before separation
图 12. 分离前的传感器阵列同相信号

利用去伪迹算法，保留信源 1 并消去其它几个信源影响，得到消除磁导率不均匀以后的传感器阵列同相信号如图 14 所示。可以看出，采用独立分量分析技术，可以有效去除原有检测信号中磁导率不均匀部分的干扰，获得只有缺陷存在时所对应的信号。

图 15 为利用同相信号和正交信号计算出的传感器阵列信号幅值，图 16 为远场涡流检测系统中常用的极坐标图，由于去除了磁导率不均匀的影响，仅传感器 1 所对应的位置有明显信号变化，其余传感器由于周向距离缺陷较远而检测不到信号，因而可以更为清晰的判断和识别出缺陷存在，且可以大致确定出缺陷信号的周向和轴向位置，进而为缺陷的定量评估提供基础。

6. 结论

- 1) 尽管磁导率不均匀与缺陷在远场涡流响应信号的各个特征上难以区分开来，但从其电磁场本质而言，可以将两者等效为两个相互独立的二次散射源，且两者之间的关系近似满足叠加定理。
- 2) 在选择实部和虚部而非幅值和相位作为输入混合信号的前提下，基于传感器阵列和独立分量分

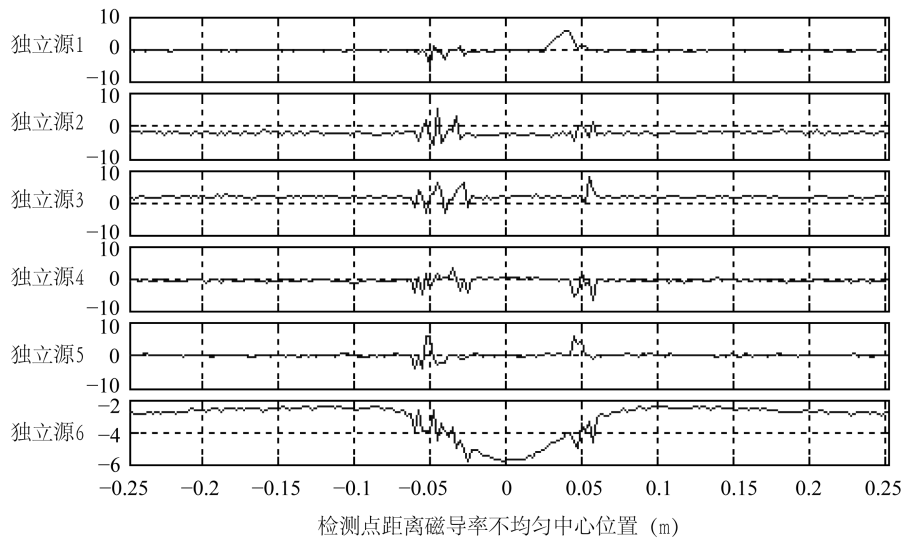


Figure 13. Separated independent source

图 13. 分离出的独立信源

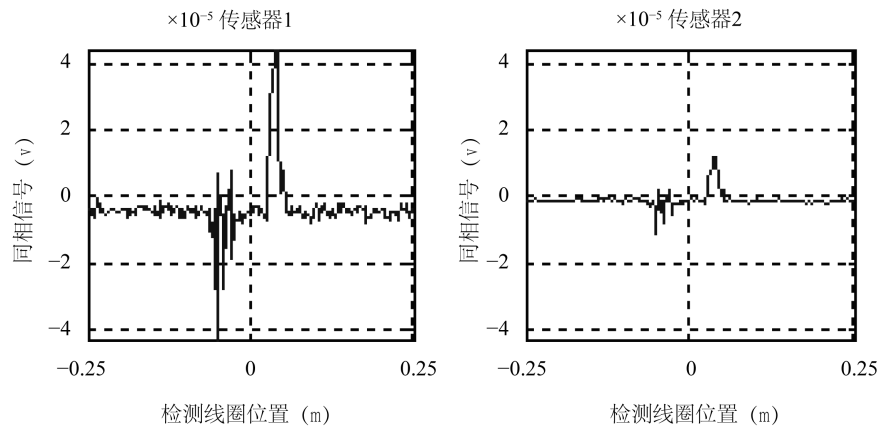


Figure 14. In-phase part after separation

图 14. 分离后的传感器阵列同相信号

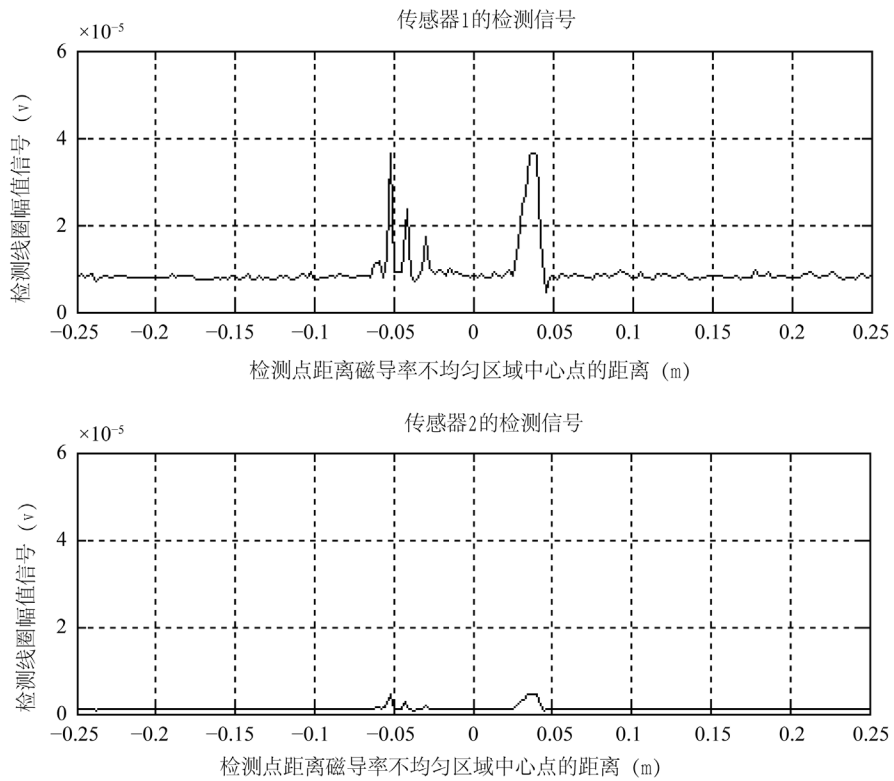


Figure 15. Amplitude of sensor array

图 15. 传感器阵列信号幅值

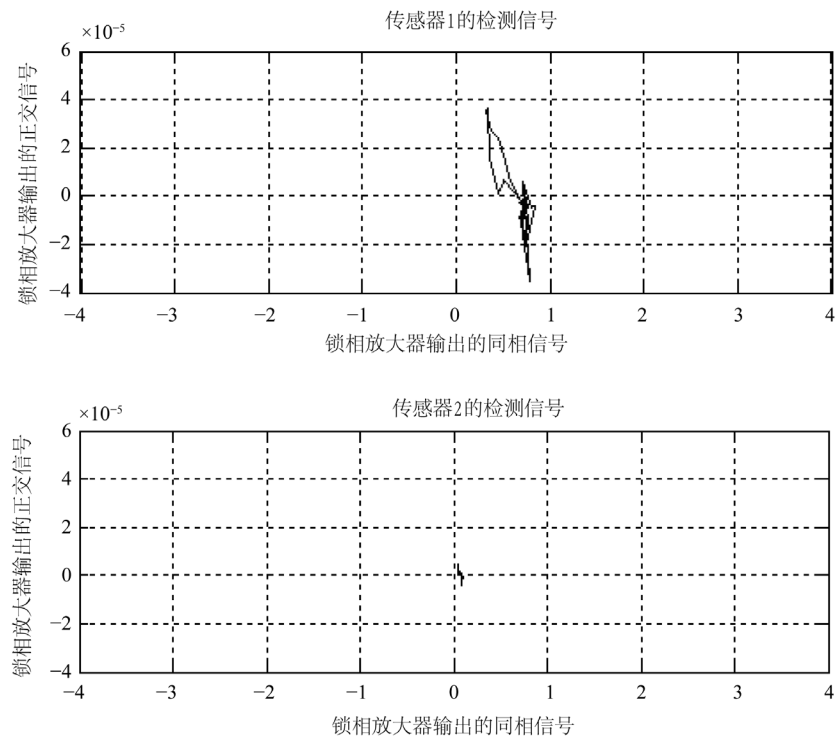


Figure 16. Polar diagram of sensor array

图 16. 传感器阵列信号极坐标图

析技术的能够有效消除磁导率不均匀影响。此种方法相比加磁饱和窗的方法而言，无需增加任何系统的复杂度；相比特征不变量的方法而言，需要先验知识较少，能够适应各种不同的被测对象和应用场合。

基金项目

国家自然科学基金(51107148)，陕西省自然科学基金(2011JQ7006)资助。

参考文献 (References)

- [1] 李家伟, 陈积懋 (2012) 无损检测手册(第二版). 机械工业出版社, 北京, 415-416.
- [2] 徐小杰 (2007) 铁磁性管道中轴向裂纹的远场涡流检测关键技术研究. 博士学位论文, 国防科学技术大学, 长沙.
- [3] Kobayashi, N., Ueno, S., Nagai, S., et al. (2011) Remote field eddy current testing for steam generator inspection of fast reactor. *Nuclear Engineering and Design*, **241**, 4643-4648.
- [4] Atherton, D.L. (1995) Remote field eddy current inspection. *IEEE Transactions on Magnetics*, **31**, 4142-4147.
- [5] Zhang, S.P., Yao, H.X., Sun, X., et al. (2014) Action recognition based on overcomplete independent components analysis. *Information Sciences*, **28**, 635-647.
- [6] Khalil, M. and Sarkar, A. (2014) Independent component analysis to enhance performances of karhunen-loeve expansions for non-gaussian stochastic processes: Application to uncertain systems. *Journal of Sound and Vibration*, **21**, 5600-5613.
- [7] Xie, S.J., Chen, Z.M., Takagi, T., et al. (2012) Development of a very fast simulator for pulsed eddy current testing signals of local wall thinning. *NDT & E International*, **51**, 45-50.
- [8] Chen, Z.M., Rebican, M. and Miya, K. (2005) Three dimensional simulation of remote field ECT using the Ar method and a new formula for signal calculation. *Research in NDE*, **16**, 35-53.
- [9] 吴德会, 黄松岭, 赵伟, 等 (2009) 油气管道裂纹远场涡流检测的仿真分析. *中国机械工程*, **12**, 1450-1454.