

# 基于独立分量分析的缺陷信号串扰消除

查君君<sup>1</sup>, 何辅云<sup>2</sup>

(1. 安徽工程科技学院 电气工程系, 芜湖 241000; 2. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

**摘要:**漏磁检测设备中纵向传感器阵列特殊的物理结构, 使得采集的缺陷信号之间不可避免地产生串扰, 因而降低了检测设备的可靠性。结合采集信号的阵列特性, 通过使用基于独立分量分析(ICA)的阵列信号处理方法, 分离出各路消除串扰的源信号。仿真试验结果表明, ICA 的定点算法可以消除信号之间的串扰, 满足检测设备要求, 具有较大的应用潜能。

**关键词:**独立分量分析; 定点算法; 漏磁检测; 缺陷信号; 串扰消除

中图分类号: TG115. 28; TN911. 72

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)05-0328-04

## Reduction of Disturbance Between Flaw Signals Based on Independent Component Analysis

ZHA Jun-Jun<sup>1</sup>, HE Fu-Yun<sup>2</sup>

(1. Department of Electric Engineering, Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China;

2. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The special structure of longitudinal sensor array in magnetic leakage detecting equipment leads to the inevitable disturbance between flaw signals and the low performance of equipment. Considering the characteristic of array in detecting signals, the array signal process method based on the independent component analysis(ICA) was used to separate the non-disturbance source signals. Simulation experiment was carried out, and the result showed that this method could reduce the disturbance between flaw signals and met the detected equipment requirements. Thus the fixed point algorithm for ICA has large potential in flaw signals process.

**Keywords:** Independent component analysis; Fixed point algorithm; Magnetic leakage testing; Flaw signal; Disturbance reduced

大直径超长钢管的漏磁检测中, 多通道传感器阵列随探头高速旋转采集缺陷信号<sup>[1]</sup>。由于纵向检测装置中探头传感器阵列特殊的物理构造, 使得各传感器采集到的信号之间产生了互扰, 造成管道缺陷无法精确定位, 影响了检测设备的可靠运行。

独立分量分析(ICA)的发展是和盲信源分离紧密联系的, ICA 是盲分离算法的一大类<sup>[2-3]</sup>。信号盲分离问题对源信号及混合通道未知, 仅从混合观测信号出发, 对其施加一系列变换后能恢复出源信号, 使得盲信号分离在无线通信、图像处理、地震、声

纳、语言和生物医学等领域具有广泛的应用前景。

在对检测设备中纵向传感器阵列特殊物理结构深入分析后, 结合串扰信号的特点, 笔者试探性地将独立分量分析方法运用到多路信号串扰消除。通过试验仿真, 验证该方法可以从多路传感器获得的混合观测信号中分离出实际需要的源信号, 从而提高整个检测设备的可靠性。

### 1 纵向传感器物理构造及串扰产生原因

漏磁探伤机中纵向检测装置包括径向磁化装置和纵向缺陷检测装置<sup>[4]</sup>, 如图 1 所示。在该装置中, 通过触头和滑环组提供给磁化线圈很强的直流磁化电流, 电流产生的磁场通过待测钢管形成回路。在与磁化线圈垂直的方向上分布着两组 16 个线圈传感器, 用来扫查与钢管表面垂直的漏磁通分量, 整个

收稿日期: 2009-08-19

基金项目: 安徽工程科技学院青年基金(自然科学)立项项目资助(2007YQ034); 安徽省年度科研计划项目资助(08020203022)

作者简介: 查君君(1981-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究信号采集与信号信息处理。

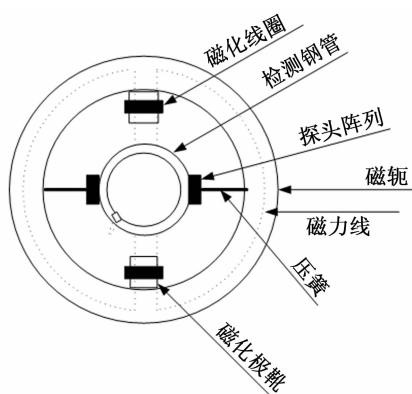


图1 纵向检测装置示意图

装置在检测过程中高速旋转。

为提高检测灵敏度,减小钢管表面接触噪声和温度影响,单个磁敏传感器是在  $15\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$  微带内光刻成长  $12.5\text{ mm}$  的数十匝感应线圈构成。传感器电阻分量约  $0.2\ \Omega$ ,减小了温度变化的影响。8个传感器阵列贴敷在与钢管表面吻合的耐磨块内形成探头,如图2所示,它们受相同的环境影响。

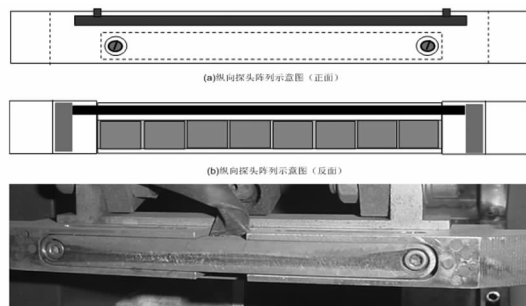


图2 纵向探头传感器阵列图

由图2可见,纵向探头中传感器排列得如此紧密,不可避免地造成在检测过程中采集信号之间的互扰,降低了检测设备的精度。

## 2 ICA 的基本概念和定点算法

### 2.1 ICA 的基本概念

多导观测信号  $\mathbf{X}(\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_m]^T)$  是多个信源  $\mathbf{S}(\mathbf{S}=[s_1, s_2, \dots, s_n]^T)$  经混合矩阵  $\mathbf{A}_{m \times n}$  组合而成 ( $\mathbf{X}=\mathbf{AS}$ )。ICA 的任务就是在  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{S}$  均未知的情况下,解得一个解混阵  $\mathbf{W}_{n \times m}$ ,使得  $\mathbf{X}$  通过它解混后得到  $\mathbf{Y}(\mathbf{Y}=\mathbf{WX})$  是  $\mathbf{S}$  的最优逼近。其中  $\mathbf{Y}=[y_1, y_2, \dots, y_n]^T, m \geq n$ 。

### 2.2 独立分量的定点算法

文献<sup>[5-6]</sup>提出的基于四阶累计量定点算法,是一种收敛速度快(立方收敛)、鲁棒性好(超高斯或次

高斯分量都能提取)的批处理算法。并且在算法中无需学习速率或其它调整参数的设置,使得该算法使用非常容易。具体算法如下:

- (1) 设  $m$  是待提取独立分量的个数,令  $p=1$ 。
- (2) 取任意初始矢量  $\mathbf{w}_p(0)$ ,并要求  $\|\mathbf{w}_p(0)\|_2=1$ 。
- (3) 令  $\mathbf{w}_p(k)=\mathbf{E}\{\mathbf{X}(\mathbf{w}_p(k-1)^T \mathbf{X})^3\}$ 。其中  $\mathbf{E}(\cdot)$  可通过对  $\mathbf{X}$  向量的大量采样值(如 1 000 点)的均值估计得到。
- (4) 令  $\mathbf{w}_p(k)=\mathbf{w}_p(k)-\sum_{j=1}^{p-1} \langle \mathbf{w}_p(k), \mathbf{w}_j \rangle \mathbf{w}_j$ ,使得  $\mathbf{w}_p(k)$  正交化,去除已提取的独立分量。
- (5) 将  $\mathbf{w}_p(k)$  归一化:  $\mathbf{w}_p(k)/\|\mathbf{w}_p(k)\|_2$ 。
- (6) 如果  $|\mathbf{w}_p(k)^T \mathbf{w}_p(k-1)|$  不接近 1,令  $k=k+1$ ,返回第 3 步,否则输出  $\mathbf{w}_p(k)$ 。
- (7) 令  $p$  加 1,若  $p \leq m$ ,则返回第 2 步,否则,运算结束。

最后得到解混阵  $\mathbf{W}=[\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_m]$ ,进而可求出源信号的最优逼近  $\mathbf{Y}=\mathbf{WX}$ 。

## 3 ICA 在缺陷信号串扰消除中的应用

### 3.1 缺陷信号串扰消除的原理

为了消除采集信号之间的串扰,可以通过数学建模来计算干扰信号的影响。由于需要对信号传输通道参数进行估算,实际操作并不容易,这时盲分离就体现出其简单易于操作的特点。同时,由于各个缺陷随机分布,缺陷处产生的源信号彼此互相独立。可以认为这种串扰是瞬时的线性混迭。这样就基本满足了使用盲分离的前提条件<sup>[5]</sup>。可以将 ICA 引入到检测信号处理中来。

基本思路如下:利用中心化和白化方法对传感器观测数据进行预处理,并生成新的混合信号(预处理后信号);对预处理后混合信号估计源信号的个数;利用固定点算法获得对源信号的波形估计。利用信号盲分离完成后的输出信号和对源信号的附加信息,实现对信号的次序校正和幅度校正。将校正后的信号作为对源信号的估计输出。

### 3.2 试验仿真

图3是取自检测设备其中一组纵向探头中连续的 3 路传感器采集得到的信号。由图可见,3 路传感器在采集信号过程中发生了串扰。若仅以此图对检测结果进行评价,将会误认为:  $x_1$  路传感器在 50 和 350 ms 处检测到缺陷;  $x_2$  路传感器在 50, 150 和 350 ms 处检测到缺陷;同样,  $x_3$  路传感器在 150 和

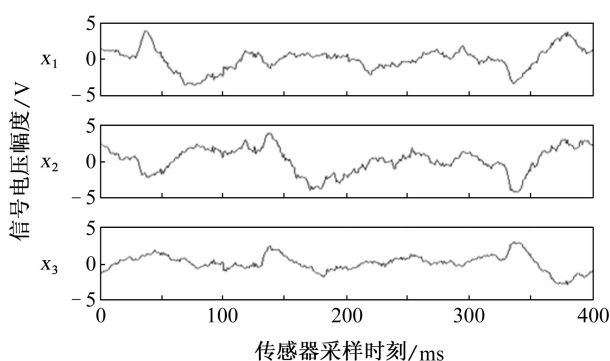


图3 3路传感器采集的缺陷信号

350 ms 处检测到缺陷。由于探头中传感器阵列以一字排开,之间的间距又非常小,使得 50,150 和 350 ms 处产生的信号在传感器  $x_1$ ,  $x_2$  和  $x_3$  中产生串扰。所以,只有将这种串扰逐个分离,才能准确地判断各个传感器采集到缺陷的具体时刻。

### 3.2.1 预处理

对图3信号进行预处理,即中心化和白化。中心化即去均值,从向量  $\mathbf{x}=[x_1, x_2, x_3]^T$  中减去均值向量  $\mathbf{m}=\mathbf{E}\{\mathbf{x}\}$ ,使得  $\mathbf{x}$  成为一个零均值向量;白化处理的目的是消除原始各路数据间的二阶相关性,使得进一步分析可集中在高阶统计量上。实现白化处理的方法有多种,笔者采用特征分解方法。即  $\mathbf{E}\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\}=\mathbf{E}\mathbf{D}\mathbf{E}^T$  的特征值分解(EVD),其中  $\mathbf{E}$  是  $\mathbf{E}\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\}$  的特征向量组成的正交矩阵,  $\mathbf{D}$  为特征值组成的对角阵,  $\mathbf{D}=\text{diag}(d_1, d_2, d_3)$ 。注意  $\mathbf{E}\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\}$  可由采样值  $\mathbf{x}(1), \dots, \mathbf{x}(t)$  估计得到。故白化后的向量  $\tilde{\mathbf{x}}=[\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3]^T$  可由  $\tilde{\mathbf{x}}=\mathbf{E}\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^T\mathbf{x}$  求得,其中矩阵  $\mathbf{D}^{-1/2}$  按  $\mathbf{D}^{-1/2}=\text{diag}(d_1^{-1/2}, d_2^{-1/2}, d_3^{-1/2})$  求得。

### 3.2.2 独立信源数目的估计

对预处理后的传感器信号进行源数估计,这里使用主奇异值数方法<sup>[7]</sup>。即首先对预处理后信号构成的数据矩阵  $\mathbf{A}$  进行  $\mathbf{A}=\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H$  分解。其中  $\mathbf{U}, \mathbf{V}$  为酉阵,  $\mathbf{\Sigma}$  是对角阵,其对角元素  $\sigma_i$  对应于矩阵  $\mathbf{A}^H\mathbf{A}$  或  $\mathbf{A}\mathbf{A}^H$  的特征值的正平方根,称为矩阵  $\mathbf{A}$  的奇异值。若存在正整数  $\xi$ ,使得任意的  $i \geq \xi$  和  $j < \xi$ ,总有  $\sigma_j \geq \sigma_i$ ,则称  $\xi$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的主奇异值数。所得混合数据矩阵的奇异值为 1.63, 1.57 和 1.48。

由于这三个奇异值彼此非常接近,故可以直接认为这个数据矩阵的主奇异值数就为 3,即观测信号的个数等于源信号的个数。

### 3.2.3 信号盲分离

采用具有较快收敛速率并且操作方便的固定点算法,具体算法见 2.2 节。在进行盲分离前,根据上

一步的结果,将算法中待提取的信号源个数参量  $m$  置为 3。最后得到解混阵  $\mathbf{W}$ ,进而可求出源信号的最优逼近  $\mathbf{Y}=\mathbf{W}\tilde{\mathbf{x}}$ ,其中  $\mathbf{Y}=[y_1, y_2, y_3]^T$ 。图4显示了分离后的信号。

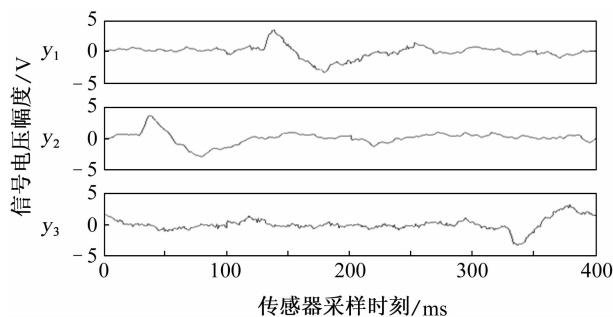


图4 分离后得到的3路信号

从图4中可以准确地判断出各个传感器通道采集到缺陷信号的具体时刻。即  $y_1$  传感器在 150 ms 处采集到缺陷信号;  $y_2$  传感器在 50 ms 处采集到缺陷信号;  $y_3$  传感器在 350 ms 处采集到缺陷信号。说明信号分离已经达到预期效果。但由于盲分离固有的信号次序和幅度的不确定性,例如:估计的  $y_1$  信号并不一定与传感器  $x_1$  采集到的实际信号相对应,使得对分离后的信号还要进行必要的校正处理。

### 3.2.4 信号校正

由于是对观测到的传感器串扰信号进行分离,判断各个传感器在何时采集到缺陷信号,只要能判断出缺陷信号来就可以了。因此信号幅度的校正可以忽略不计,这里关键是分离信号次序的校正。考虑到纵向探头中传感器阵列呈一字排列,检测设备在检测时,待测钢管将沿其轴向匀速前进。这样排在外面的传感器将首先感应到缺陷信号,仅跟着是它后面的传感器。以此为依据,认为  $x_1$  传感器首先采集到信号,其次是  $x_2, x_3$  传感器。所以,对图4的信号阵列进行初等变换来完成信号校正。经过校正后的输出信号如图5所示。

由图可见:首先是  $x_1$  传感器采集到估计信号

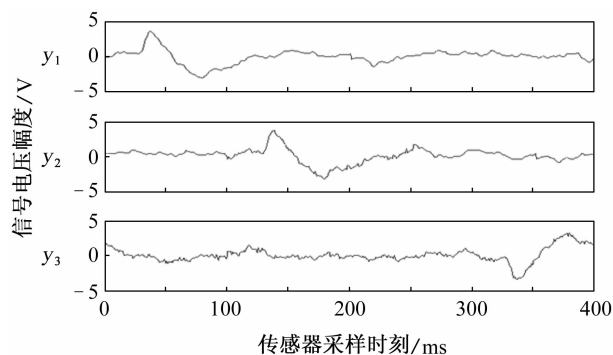


图5 校正后的输出信号



$y'_1$ ; 随后是  $x_2$  传感器采集到信号  $y'_2$ ; 最后是  $x_3$  传感器采集到信号  $y'_3$ 。这样就与实际情况相吻合了。

#### 4 结论

采用基于 ICA 算法的多路信号串扰消除方法, 可以从多路传感器获得的混合观测信号中分离出实际需要的源信号。在实践中解决了多路检测信号之间的串扰问题, 提高了检测设备的可靠性, 进一步完善了检测设备。

使用的串扰消除方法是一种“软处理技术”, 其性能提升空间有限, 但便于检测系统的维护和升级。若在条件允许的情况下, 可以适当增加纵向传感器之间的距离, 同时对各个传感器进行电磁屏蔽。这样两者结合起来串扰消除效果将更好。

#### 参考文献:

[1] 何辅云. 磁探伤中多路缺陷信号的滑环传送方法[J].

(上接第 324 页)

(2) 采用包络的极值延拓方法对 Lamb 波信号处理后得到的频率中心与缝缺陷深度之间的线性关系要远远好于没有延拓时的情况, 所以, 在用 HHT 方法得到非平稳信号的瞬时特性时, 要根据信号的特点, 对信号进行必要的延拓。

(3) Lamb 波信号经延拓后, 与无缺陷时 Lamb 波频率中心相比较, 有缺陷时的频率中心均左移, 有减小的趋势, 但频率中心的变化与缝深之间的线性关系并不是很理想, 所以, 当板中存在缝缺陷时, 可以用 Lamb 波信号频率中心的变化来发现此类缺陷, 然而, 用其来定量缺陷还有待于进一步的研究。

(4) 采用时频分析方法对 Lamb 波信号进行分析, 可有效识别激发的 Lamb 波模式。

#### 参考文献:

[1] Alleyne D, Cawley P. A two-dimensional fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(3): 1159—1168.

合肥工业大学学报(自然科学版), 1998, 21(3): 128—131.

[2] 焦李成, 慕彩红, 王伶. 通信中的智能信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 87—90.

[3] 杨福生, 洪波. 独立分量分析的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 1—6.

[4] 何辅云, 王晓芒. 地下油气输送管道电磁高速检测技术及系统[J]. 合肥工业大学学报, 2002, 25(2): 218—221.

[5] Hyvärinen A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3): 626—634.

[6] Bingham E, Hyvärinen A. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1997, 9(7): 1483—1492.

[7] 张洪渊, 贾鹏, 史习智. 确定盲分离中未知信号源个数的奇异值分解法[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(8): 1155—1158.

[2] Alleyne D, Cawley P. The interaction of lamb waves with defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, 1992, 39(3): 381—397.

[3] 应崇福, 张守玉, 沈建中. 超声在固体中的散射[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 17—19.

[4] Zheng X M, Shi Y W, Lei Y P, et al. Nondestructive characterization of adhesive bond strength by Lamb waves[J]. Insight — Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2003, 45(8): 558—565.

[5] 葛哲学, 陈仲生. MATLAB 时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 2—17.

[6] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 17—19.

[7] 龚志强. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3947—3957.

[8] Sun B, Zhang H. Flow regime identification of gas-liquid two-phase flow based on HHT[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2006, 14(1): 24—30.

[9] 黄大吉. 希尔伯特-黄变换的端点延拓[J]. 海洋学报, 2003, 25(1): 1—11.

QC 检测仪器网  
WWW.QCTESTER.COM

全新改版上线

更便于 搜寻仪器、专业展会、专业期刊  
更多 行业信息、供求信息

www.qctms.cn 天下机械网 天下机械  
欢迎点击 查看更多 精彩内容