

# 基于盲源分离算法的 压水堆松动件信号提取方法

曾 复<sup>1</sup>, 方力先<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**压水堆一回路松动件状态监测系统的关键环节在于如何从复杂背景噪声中提取松动件冲击信号。利用基于最大信噪比的盲源分离算法,将压水堆背景噪声和松动件冲击信号从观测到的混合信号中分离,并利用相似系数对该算法的分离效果进行了评估。根据该算法,当分离信号之间关系均独立时,信噪比函数取得最大值。研究结果表明,该算法可高效、准确地实现压水堆一回路松动件冲击信号和背景噪声信号的分离。

**关键词:**压水堆一回路;松动件;最大信噪比;盲源分离算法

中图分类号:TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2009)12-1110-04

## Approach to Extracting Loose Parts Impact Signal From Pressurized Water Reactor Based on Blind Source Separation Algorithm

ZENG Fu<sup>1</sup>, FANG Li-xian<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The key problem of the loose parts monitoring system for primary loop of pressurized water reactor is how to extract loose parts impact signal from complex background noise. A blind source separation algorithm based on maximum signal to noise ratio was used to extract loose parts impact signal and background noise of power water reactor from complex mixed-signals, and an evaluate method using similarity coefficients was used to evaluate the separation effect of the algorithm. The maximum value of signal to noise ratio function was obtained according to the algorithm when separated signals were independent. The research results show that loose parts impact signal and background noise from primary loop of pressurized water reactor can be separated efficiently and accurately with the algorithm.

**Key words:** primary loop of pressurized water reactor; loose parts; maximum signal to noise ratio; blind source separation algorithm

压水堆一回路系统主要由压力容器、主泵、蒸汽发生器、主管道等构成,各机械构件大部分由螺栓和销连接。各连接件在设计时虽已考虑了各种防松措施,但在流体长时间的反复作用下,仍不可避免出现连接件松脱现象<sup>[1]</sup>。一回路系统内的松动件若不能及时发现并排除,可能会引起反应堆回路阻塞、增加核泄漏风险、损坏主泵等事故,给核反应堆的安全运行造成严重危害。因此,在核反应堆一回路的安全规范中明确规定,必须为其配备相应的松动件监测系统(LPMS)。LPMS主要任务<sup>[2]</sup>包括:1) 检测松动件冲击信号并报警;2) 确定松动件发生位置;3) 估计松动件质量大小。欲完成上述任务,必须能够在复杂的反应堆一回路系统背景噪声中准确识别并提取松动件的冲击信号。

由于各类核反应堆的结构复杂,安装和使用环境有较大差异,因此,反应堆背景噪声类型也各不相同。反应堆一回路系统背景噪声主要由冷却水循环水流噪声和结构振动构成,属于非高斯噪声,难以利用传统的消噪技术去除。盲源分离(BSS)是指在源信号、传输信道特性未知的情况下,仅由观测信号和源信号的一些先验知识(如概率密度)估计出源信号各分量的过程。该技术是从20世纪80年代发展起来的信号处理方法,目前已成为现代信号处理研究的一个活跃领域,在语音识别、通信、地震信号分析以及机械故障诊断等方面已得到成功应用。

## 1 基于最大信噪比的盲源分离算法<sup>[3-4]</sup>

### 1.1 盲源分离算法基本原理

设有  $N$  个相互独立的非高斯信号源  $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$ ,  $M$  路观测信号  $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$ 。设传感器的数量不少于信号源数量,即  $M \geq N$ , 观测信号  $x(t)$  是源信号  $s(t)$  的线性组合,满足:

$$x(t) = Hs(t) \quad (1)$$

其中:  $H$  为  $M \times N$  阶混合矩阵。

盲源分离算法就是要从观测信号  $x(t)$  中分离出源信号  $s(t)$  的估计值  $y(t)$ :

$$y(t) = Wx(t) = WHs(t) = Gs(t) \quad (2)$$

其中:  $y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)]^T$  为  $N$  维估计信号;  $W$  为  $M \times N$  维分离矩阵;  $G$  为全局变换矩阵。

盲源分离算法需确定分离矩阵  $W$ , 首先必须依据某种准则建立以  $W$  为变量的目标函数  $F(W)$ , 采用有效的  $W$  求解优化算法。若某个  $W$  能使  $F(W)$  达到极值, 则该  $W$  为所需的解。当采用不同的准则建立目标函数和不同的寻优算法时, 可得到各种盲源分离算法。

### 1.2 盲源分离算法

该算法以信噪比最大化为准则, 建立目标函数。确定分离矩阵  $W$  的寻优算法转化为求解广义特征值的过程, 避免反复的迭代计算, 降低了算法复杂度。不失一般性, 为分析方便, 假设源信号数量与传感器数量相等, 即  $M = N$ 。

信噪比函数定义为:

$$F(W) = 10 \lg \frac{\bar{y}\bar{y}^T}{(\bar{y} - y)(\bar{y} - y)^T} \quad (3)$$

$\bar{y}$  为估计信号经滑动平均处理后的信号, 计算公式为:

$$\bar{y}(n) = \frac{1}{p} \sum_{j=0}^p y(n-j) \quad (4)$$

因  $y = Wx$ ,  $\bar{y} = W\bar{x}$ ,  $\bar{x}$  为混合信号经滑动平均处理后的信号。

$$\bar{x}(n) = \frac{1}{p} \sum_{j=0}^p x(n-j) \quad (5)$$

则信噪比目标函数可写为:

$$F(W) = 10 \lg \frac{W\bar{x}\bar{x}^T W^T}{W(\bar{x} - x)(\bar{x} - x)^T W^T} \quad (6)$$

令相关矩阵  $C = \bar{x}\bar{x}^T$ ,  $\tilde{C} = (\bar{x} - x)(\bar{x} - x)^T$ ,  $V = WCW^T$ ,  $U = W\tilde{C}W^T$ , 则:

$$F(W) = 10 \lg \frac{WCW^T}{W\tilde{C}W^T} = 10 \lg \frac{V}{U} \quad (7)$$

以分离矩阵  $W$  为变元, 计算目标函数  $F(W)$  的梯度:

$$\frac{\partial F}{\partial W} = 10 \left( \frac{2W}{V} C - \frac{2W}{U} \tilde{C} \right) \quad (8)$$

当  $\frac{\partial F}{\partial W} = 0$  时, 目标函数  $F(W)$  取得极值, 因此:

$$WC = \frac{V}{U} \tilde{C} \quad (9)$$

通过求解上式可得到分离矩阵  $W$ , 该问题可通过求解广义特征值方法解决。

### 1.3 分离效果评估

为评价所得分离矩阵  $W$  的分离效果, 采用分离信号  $y_i$  和源信号  $s_j$  的相似系数  $\xi_{ij}$  作为性能指标:

$$\xi_{ij} = \xi(y_i, s_j) = \left| \frac{\sum_{t=1}^M y_i(t) s_j(t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^M y_i^2(t) \sum_{t=1}^M s_j^2(t)}} \right| \quad (10)$$

根据式(10),当分离结果与源信号仅在幅值上存在差异,即  $y_i = cs_j$ ,  $c$  为常数时,相似系数  $\xi_{ij} = 1$ ;而当分离结果  $y_i$  与源信号  $s_j$  相互独立时,相似系数  $\xi_{ij} = 0$ 。因此,当源信号已知时,可利用相似系数  $\xi_{ij}$  作为分离效果的度量,当相似系数矩阵中的每行和每列中仅有 1 个元素接近 1,而其他元素近似于 0 时,表明分离效果较为理想。

## 2 仿真计算

由于条件限制,压水堆松动件故障数据难以获取。本工作的思路是在压水堆一回路实际正常背景信号的基础上,随机叠加冲击振动信号,得到混合的仿真观测信号,模拟松动故障。然后,将仿真的混合信号作为输入,通过最大信噪比盲源分离算法得到分离信号,最后利用相似系数对算法的分离效果进行评估。

在仿真计算中,设源信号的数量  $N$  为 2 (图 1)。源信号 1 为某压水堆一回路系统的正常背景噪声,采样间隔 0.059 474 ms/点,纵坐标为检测到的加速度振幅(已进行归一化处理),横坐标为采样时间,共含数据 9 600 点/

组,该信号从压力容器上的加速度传感器上获取。源信号 2 为松动件冲击所产生的归一化加速度振荡衰减信号,采样频率和采样点数与源信号 1 相同。这两路源信号均为非高斯信号。

在仿真计算中,设传感器的数量  $M$  为 2。通过混合矩阵  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.15 \\ 0.90 & 0.10 \end{bmatrix}$ ,将两路源信号混合叠加后,得到如图 2 所示的两路混合(观测)信号。从图 2 可看出,观测信号中松动件产生的冲击信号完全湮没在背景噪声中。

图 3 为采用基于最大信噪比的盲源分离算法后,从图 2 所示的两路混合信号中得到的分离信号。盲源分离算法虽存在幅值和顺序的不确定性,但从图 3 中可直接分辨出压水堆一回路系统的背景噪声信号和松动件冲击信号,即分离信号 1 为松动件冲击信号的估计,而分离信号 2 为压水堆一回路背景噪声的估计。比较图 1 和图 3,分离信号与源信号的波形则几乎完全相同,松动件故障发生的时刻也完全吻合。

为判断分离效果,根据式(10),计算得到分离信号与源信号的相似系数矩阵:

$$\xi = \begin{bmatrix} 0.0039 & 0.9997 \\ 0.9991 & 0.0055 \end{bmatrix}$$

相似系数  $\xi_{12}$  和  $\xi_{21}$  接近于 1,而  $\xi_{11}$  和  $\xi_{22}$  接近于 0,说明该算法的分离效果非常理想。分

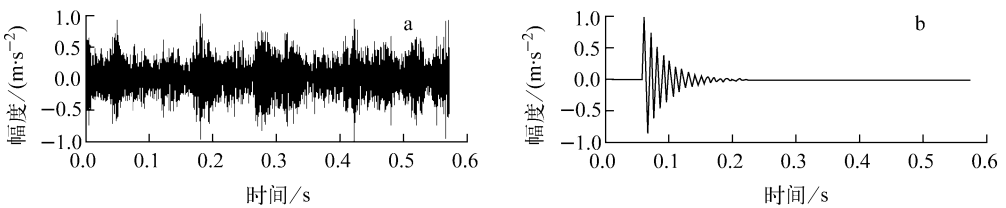


图 1 归一化源信号

Fig. 1 Two normalized source signals

a——源信号 1; b——源信号 2

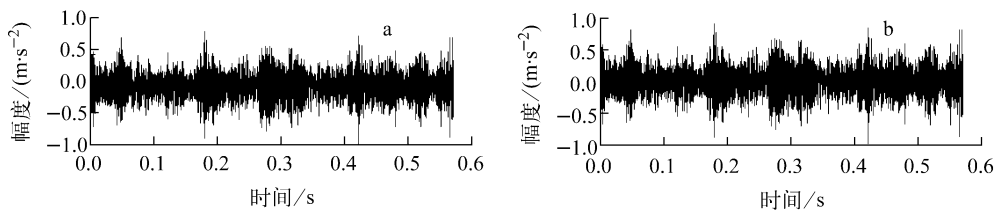


图 2 混合信号

Fig. 2 Mixture of two source signals

a——混合信号 1; b——混合信号 2

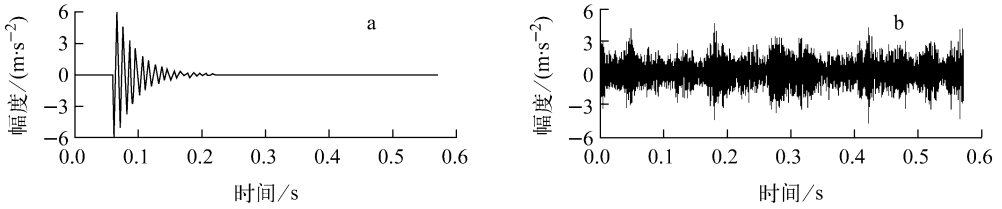


图3 分离信号

Fig. 3 Two recovered signals

a——混合信号 1; b——混合信号 2

离信号 1 与松动件冲击信号仅在幅值上存在差别,而分离信号 2 与压水堆一回路系统背景噪声也仅在幅值上存在差别。

为比较其它盲源分离算法的有效性,在研究中尝试使用盲定点抽取算法<sup>[5]</sup>(FastICA 算法)对图 2 的随机混合信号进行分离。计算结果表明,FastICA 算法在此种情况下常常无法收敛,只在一些特定的混合比例下,才能得到正确的分离信号。

### 3 结论

根据上述最大信噪比的盲源分离算法用于压水堆一回路松动件冲击信号提取的仿真计算结果,可得到以下结论。

1) 压水堆一回路背景噪声信号和松动件冲击信号均为典型非高斯信号,当传感器的观测信号为两者的线性混合叠加时,该算法可实现背景噪声和冲击信号的分离,分离效果理想。

2) 分离信号与松动件冲击源信号仅在幅值上存在差别,两者的波形、频率成分以及事件发生时刻几乎完全相同,有利于后续松动件报警、定位和松动件质量估计。

3) 与其他盲源分离算法(如 FastICA 算法、基于峭度的盲源分离算法等)相比,该算法不需任何迭代过程,计算复杂度低、效率高。

上述结论是在假设观测信号为压水堆背景

噪声与松动件冲击信号的线性混合叠加,且不同传感器间的信号时延忽略不计的条件下得到的,仿真计算结果还需通过实验进一步验证。

### 参考文献:

- [1] 姚伟达,杨仁安,王吉星. 核电厂松动件监测概况与运行经验[R]. 上海:上海核工程研究设计院,1991.
- [2] 方力先. 基于小波分析的跌落物状态检测技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.
- [3] 马建仓,牛奕龙,陈海洋. 盲信号处理[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [4] 张小兵,马建仓,陈翠华,等. 基于最大信噪比的盲源分离算法[J]. 计算机仿真,2006,23(10): 72-75.  
ZHANG Xiaobing, MA Jiancang, CHEN Cuihua, et al. A blind source separation algorithm based on maximum signal noise ratio [J]. Computer Simulation, 2006, 23(10): 72-75(in Chinese).
- [5] HYVARINEN A, OJA E. A fast fixed-point algorithm for independent analysis [J]. Neural Computation, 1997, 9: 1 483-1 492.
- [6] CHEUNG Y M, LIU H L. A new approach to blind source separation with global optimal property[C] // Proceedings of the IASTED International Conference of Neural Networks and Computational Intelligence. Grindelwald, Switzerland: [s. n.], 2004: 137-141.