

文章编号: 1000-8055(2002) 03-0363-04

基于三阶累积量 的转子振动信号降噪方法研究

宋 友¹, 柳重堪¹, 李其汉²

(1. 北京航空航天大学 电子工程系, 北京 100083;

2. 北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 本文根据信号分离理论研究了发动机转子系统振动信号的降噪问题。当转子系统发生轻微碰摩时, 由于振动信号中含有瞬时突变的微弱高频信息, 这可能与高频随机噪声的频带互相叠加, 所以利用传统的滤波方法不能有效地去噪, 为碰摩故障诊断带来了困难。本文利用基于高阶累积量的盲信号分离方法, 设计了相应算法, 成功地从被噪声污染的信号中恢复源振动信号, 从而可确保碰摩故障的检测和诊断能顺利进行。

关键词: 转子; 碰摩; 高阶累积量; 盲分离; 降噪

中图分类号: V 233. 92

文献标识码: A

Denoise of Rotor Vibration Signal Based on Higher-Order Cumulants

SONG You, LIU Chong-kan, LI Qi-han

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The denoise of vibration signal in engine rotor system is proposed, which is based on signal blind separation. Under the circumstance of lighter rub-impact, the vibration signal contains instantaneous and high frequency weak information, and frequency mixing with the stochastic noise may take place. The classical filtering is ineffective in terms the denoise. Blind separation of sources based on higher-order cumulants is applied to the separation between vibration signal and noise, which is important to diagnosis of rub-impact fault.

Key words: rotor; rub-impact; higher-order cumulants; blind separation; denoise

1 引言

研究转子的振动信号, 是发动机转子系统碰摩故障诊断的重要方法。当转静件不发生碰摩时, 振动信号一般为稳定的周期运动; 当发生早期碰摩时, 振动信号中包含微弱的高频信息。长期以来, 早期碰摩的故障诊断一直是一项研究的热点与难点。在工程实践中, 由于环境噪声的影响, 实际测得的信号是转子振动信号与噪声信号的混

叠, 为早期碰摩故障的准确诊断增加了更大的难度。为了准确地进行故障诊断, 研究转子振动信号中是否含有碰摩信息, 就需要有效地进行降噪处理。

在振动信号中, 由于碰摩故障信息是在转子系统转静件接触的短时内产生的, 具有高频特性, 而噪声信号通常也是高频的随机信号, 高频带的信号互相混叠, 所以利用传统的滤波方法不能仅将噪声滤掉而保留振动信号中的碰摩故障信

息^[1]。因此,许多学者提出了另外一种思想,就是将光滑的周期背景信号提取并剔除掉,以减少背景信号对故障信号的干扰,然后根据残余信号(故障信号+ 噪声)来进行故障诊断。基于此思想,有许多方法应用到此领域,例如:时域平均处理、信号奇异值分解、时间序列重构的吸引子轨迹矩阵的奇异值分解^[1]。这些方法本质上是在噪声中检测碰摩信号。但当碰摩信号与噪声的特征相似时,或噪声很强碰摩很弱时,很难诊断出碰摩故障来。

近年来,基于高阶累积量的信号盲分离理论已有了比较完善的发展,并且在分离多个独立源信号中取得了成功应用^[2~7]。该问题除了假设源信号相互独立,其概率密度函数为非对称分布外,不需要其它先验信息。实际中源信号之间的耦合作用是未知的,信号盲分离理论通过构造解耦系统来消除源信号之间的耦合效应,得到输出信号,使其为源信号的一种逼近,从而达到信号分离的目的。在碰摩故障诊断中,噪声和振动信号可以认为是相互独立的源信号,其耦合作用也是未知的,所以是一个盲问题。本文运用信号盲分离理论,研究了旋转机械振动信号与随机噪声混叠时的分离问题,以期得到不受噪声干扰的振动信号,从而可确保碰摩故障的检测和诊断能顺利进行。本文的计算结果得到了较好的分离效果。

2 问题的描述

不失一般性,考虑信号的分离模型如图1所示。

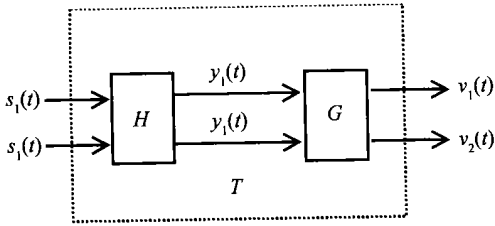


图1 信号分离模型
Fig. 1 Model of signal separation

其中, $s(t) = [s_1(t) \ s_2(t)]^T$ 为未知源信号, H 为未知的 LTI 耦合系统, $y(t) = [y_1(t) \ y_2(t)]^T$ 为观测信号。信号盲分离的目的就是要构造适当的 LTI 解耦系统 G , 使得输出信号 $v(t) = [v_1(t) \ v_2(t)]^T$ 是 $s(t)$ 的一种加权估计, 保持 $s(t)$ 的特征信息, 即:

$$v(t) = G y(t) = GH s(t) = T s(t) \quad (1)$$

其中合成系统 T 为对角(或反对角)形式,称为信号可分离。

与通常的盲分离类似,不失一般性,本文考虑耦合系统 H 的频率响应为:

$$H(w) = \begin{bmatrix} 1 & H_{12}(w) \\ H_{21}(w) & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

相应地, G 和 T 的频率响应分别为:

$$G(w) = \begin{bmatrix} 1 & G_{12}(w) \\ G_{21}(w) & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T(w) = \begin{bmatrix} T_{11}(w) & T_{12}(w) \\ T_{21}(w) & T_{22}(w) \end{bmatrix} \quad (4)$$

若 H 已知,则直接进行逆运算可以求得信号可分离时 G 的理想值,从而完全消除源信号之间的耦合效应。但是, H 常常是未知的,所以不能通过求逆运算来分离信号。若源信号为可分离的,则源信号相互独立时,输出信号也是相互的独立的。在源信号相互独立的假设条件下,由输出信号的相互独立性,可以得出信号是可分离的,并且此条件可以进一步减弱,只需知道信号的累积量信息即可^[5]。

3 基于高阶累积量的信号盲分离

定理^[5,7,8] 若存在 τ_1 和 τ_2 , 使得:

$$\text{cum}(s_i, s_j, s_k) \neq 0 \quad (5)$$

$$\text{cum}(s_i, s_j, s_k) = 0 \quad (6)$$

其中 $i, j, k = 1, 2$ 且不全相等。如果 $\det T(0) \neq 0$, 则信号可分离的充分条件为:

$$\text{cum}(v_i, v_j, v_k) = 0 \quad (7)$$

$i, j, k = 1, 2$, 且不全相等。

定理给出了信号可分离条件, 只需知道信号的累积量信息即可。式(5)要求信号的概率密度函数为非对称分布, 因为概率密度函数为对称分布的过程的三阶累积量恒为零^[8]。

由式(2)得观测信号与源信号的关系为:

$$y_1(t) = s_1(t) + s_2(t) * h_{12}(t) \quad (8)$$

$$y_2(t) = s_2(t) + s_1(t) * h_{21}(t) \quad (9)$$

由式(3)得输出信号与观测信号的关系为:

$$v_1(t) = y_1(t) + y_2(t) * g_{12}(t) \quad (10)$$

$$v_2(t) = y_2(t) + y_1(t) * g_{21}(t) \quad (11)$$

式中* 表示卷积运算。计算时采用卷积运算的离散表达式, 可设 G 的频率响应为如下形式:

$$G_{12}(w) = \sum_{k=0}^m a_k e^{-jw k} \quad (12)$$

$$G_{21}(w) = \sum_{k=0}^n b_k e^{-jwk} \tag{13}$$

则式(10),(11)可写为如下形式:

$$v_1(t) = y_1(t) + \sum_{k=0}^m a_k y_2(t-k) \tag{14}$$

$$v_2(t) = y_2(t) + \sum_{k=0}^n b_k y_1(t-k) \tag{15}$$

所以,由式(7),(14)和(15)可得:

$$\sum_{k=0}^n b_k \text{cum}(\pi_1, \pi_2 - k) = - \text{cum}(\pi_1, \pi_2) \tag{16}$$

$$\sum_{k=0}^m a_k \text{cum}(\pi_1, \pi_2 - k) = - \text{cum}(\pi_1, \pi_2) \tag{17}$$

令 a_k 和 b_k 的初值为0,由式(14)~(17)进行迭代运算,可求满足式(7)的分离信号 $v(t)$ 。

本文选取的源信号是以均匀分布的一段随机噪声为 $s_1(t)$,以Jefcott转子系统碰摩模型^[1]发生早期碰摩时的一段振动信号为 $s_2(t)$, $s_2(t)$ 中包含微弱的碰摩高频信息,如图2和图3所示。

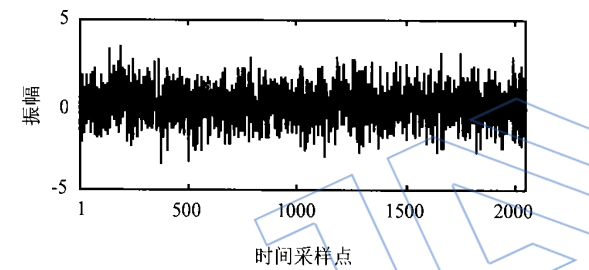


图2 均匀分布的随机噪声源信号 $s_1(t)$

Fig. 2 Uniformly distributed stochastic source $s_1(t)$

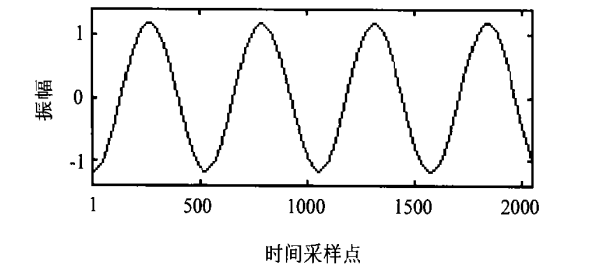


图3 Jefcott 转子系统振动信号 $s_2(t)$

Fig. 3 Vibration signal $s_2(t)$ of Jefcott stator system

对耦合系统 H ,取:

$$h_{12} = (0.8 \quad -0.5 \quad 0)$$

$$h_{21} = (0.5 \quad 0.9 \quad -0.3)$$

则观测信号 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 分别如图4和图5所示。构造解耦系统 G 时选 g_{12} , g_{21} 的初值为三维零向量,进行迭代运算,可得到输出信号 $v_1(t)$, $v_2(t)$ 分别

如图6和图7所示。

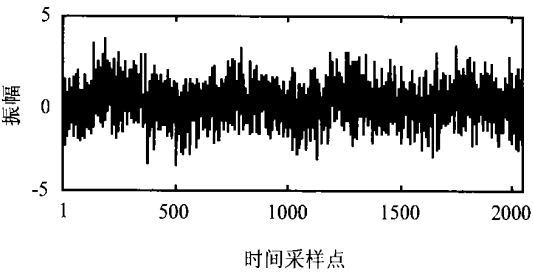


图4 观测信号 $y_1(t)$

Fig. 4 Observation signal $y_1(t)$

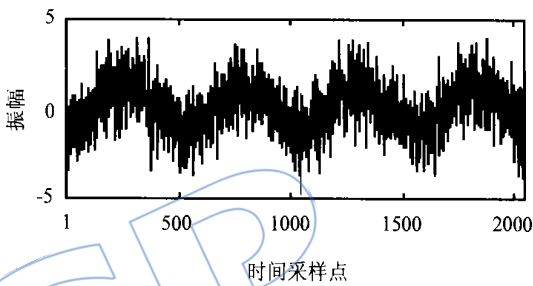


图5 观测信号 $y_2(t)$

Fig. 5 Observation signal $y_2(t)$

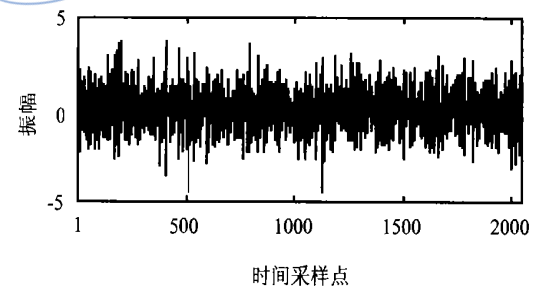


图6 输出信号 $v_1(t)$

Fig. 6 Output signal $v_1(t)$

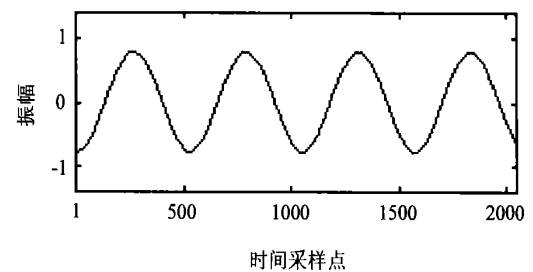


图7 输出信号 $v_2(t)$

Fig. 7 Output signal $v_2(t)$

从上面各图可以看出,振动信号 $s_2(t)$ 与输出

信号 $v_2(t)$ 非常相似。通过量化分析可知, $v_2(t)$ 能很好地保留 $s_2(t)$ 的波形特征。若 H 已知, 直接进行逆运算求得信号可分离时 G 的理想值, 利用本文的方法求得 G 的数值实验值, 理想值与数值实验值如表1所示。

表1 解耦系统参数的理想值与数值实验值

系统参数	理想值	数值实验值
a_0	- 0. 8	- 0. 83 16
a_1	0. 5	0. 5957
a_2	0. 0	- 0. 01 25
b_0	- 0. 5	- 0. 4988
b_1	- 0. 9	- 0. 90 12
b_2	0. 3	0. 3005

根据表1与式(15) 可求得 $s_2(t)$ 的理想分离信号与本文中数值分离信号的误差:

$$e_2(t) = \|1. 2 y_1(t) - 1. 2 y_1(t - 1) - 0. 5 y_1(t - 2)\| \times 10^{-3} \leq 10^{-2}$$

由此可以看出, 利用信号分离方法, 可以削弱噪声与振动信号的耦合作用, 从而达到预期的降噪效果, 保留振动信号的波形特征。

考虑更简单的模型, 当 H 和 G 为常系数增益系统时, 这为 LTI 系统的特殊情况。本文通过数值实验, 得到了同样的信号分离效果。

4 结 论

本文将基于三阶累积量的信号分离方法应用于发动机转子振动信号的降噪处理, 通过数值仿

真取得了理想的信号分离效果, 较好地达到了噪声消除的目的。利用信号分离方法降噪有利于保留振动信号特征, 这为碰摩故障诊断研究中的降噪难点提供了值得参考的价值。

传统的信号分离理论与降噪技术是两个独立的研究领域, 本文的研究表明两者有结合点, 这对特殊信号的降噪技术与工程应用无疑都是有研究意义的。

参考文献:

[1] 刘献栋. 旋转机械转静件碰摩故障及其诊断技术的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学博士论文, 1999.

[2] Jutten C, Herault J. Blind Separation of Sources, Part I: An Adaptive Algorithm Based on Neuromimetic Architecture[J]. Signal Processing, 1991, 24(1): 1- 10.

[3] Comon P, Jutten C, Herault J. Blind Separation of Sources, Part II: Problems Statement[J]. Signal Processing, 1991, 24(1): 11- 20.

[4] Bin-Chul Ihm, Dong-Jo Park. Blind Separation of Sources Using Higher Order Cumulants[J]. Signal Processing, 1999, 73: 267- 276.

[5] Yellin D, Weinstein E. Criteria for Multichannel Signal Separation[J]. IEEE Trans. Signal Process. 1994, 42(8): 2158- 2168.

[6] 虞晓, 胡光锐. 基于统计估计的盲信号分离算法[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(5): .

[7] 汪军, 何振亚. 瞬时混叠信号盲分离[J]. 电子学报, 1997, 25(4): .

[8] 张贤达. 时间序列分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

(责任编辑 王震华)