

文章编号: 1001-0920(2005)12-1429-05

基于协方差 ICA 分析的多重振荡源分离方法

夏春明, 郑建荣

(华东理工大学 机械电子工程研究室, 上海 200237)

摘要: 提出一种新的基于协方差独立源分析(ICA)的多重振荡源分离定位方法。把控制系统中受到振荡干扰的过程数据变换到协方差函数,利用 ICA 分析的方法进行多重振荡源分离。通过仿真实验对比分析,指出其他时域主元分析(PCA)、时域 ICA、协方差 PCA 等方法的不足,而协方差 ICA 分析能够准确地分离并定位多重振荡干扰源。仿真结果表明该方法是可行的。

关键词: 独立源分析; 协方差; 振荡检测与诊断; 故障诊断

中图分类号: TP277

文献标识码: A

ICA on Auto-covariance Approach to Multi-oscillation Isolation

XIA Chunming, ZHENG Jianrong

(Center for Mechatronics Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China
Correspondent: XIA Chunming, Email: cmxia@ecust.edu.cn)

Abstract: A novel method based on auto-covariance independent component analysis (ICA) for multi-oscillation isolation and localization is proposed. The auto-covariance dataset, calculated from perturbed oscillatory operation data in process control system, is analyzed for the aimed tasks. Simulation test and comparison analysis between simulated sources and analysis results show that ICA on auto-covariance is capable of isolating and localizing multiple oscillatory sources accurately, whilst other approaches, such as those based on time-domain principal component analysis (PCA), time-domain ICA or PCA on auto-covariance, are lack of such capabilities. Simulation results demonstrate the feasibility of the proposed approach.

Key words: Independent component analysis; Auto-covariance; Oscillation detection and diagnosis; Fault diagnosis

1 引言

振荡源在全厂范围内的传播会降低产品质量和控制性能,而某些工厂中有 30% 的控制回路因阀门等问题而处于振荡状态^[1]。对于拥有上千个控制回路的大型工业系统,其关键需求就是能有一种自动化方法来检测和分离故障源,特别是针对全厂范围振荡波动的检测、分离与诊断。

对于振荡波动的检测、分离与诊断的研究,大部分只针对单回路控制系统,而对于全厂性多回路振荡问题和振荡源定位问题的研究则较少。Xia 和 Howell^[2]提出一种基于综合回路性能指标的故障定位技术,通过分析该统计指标,可在多回路过程数据中找出全厂振荡干扰源,但该方法只能定位出单个

振荡源,不能分离多重主导振荡源。Thornhill 等^[3]提出了功率谱主元分析法(PCA),该方法可对多路过程数据中包含的振荡进行归类,但无法进行多重振荡源的分离。另一种方法是将过零点检测方法应用于多路工厂数据的协方差函数振荡曲线,以此来检测工厂范围内的多个振荡^[4],该方法可以检测出多重振荡干扰源,但不能进行干扰源定位。功率谱独立源分析(ICA)技术^[5]的提出,为多重主导振荡源的分离和定位提供了可能。该方法从控制器输出功率谱数据中提取并定位振荡源,但不足是所提取的独立源可能带有微小的负值,虽然不影响分析结果,但同功率谱非负特性的对应解释不一致。

本文在以上方法的基础上,提出一种新的多重

收稿日期: 2004-11-05; 修回日期: 2005-01-24

作者简介: 夏春明(1969—),男,上海人,副教授,博士,从事控制系统监控、性能分析等研究; 郑建荣(1955—),男,上海人,教授,博士,从事机电一体化、系统仿真与分析等研究。

振荡源分离定位方法 该方法首先将受到振荡干扰的过程数据变换为协方差函数,以此过滤掉随机白噪音,然后进行ICA分析,以分离出多重振荡源

2 独立源分析(ICA)技术

2.1 ICA技术简介

ICA是一种多变量盲分析技术,它可从给定的多变量数据集中提取出隐含的独立源,即每个变量可分解为若干个独立源的组合.这些独立源在统计意义上是独立的,且属非高斯分布^[6,7].PCA分析中分解出的主元只保证二阶统计不相关,在高阶仍有可能相关.在化工过程控制领域,Li和Wang^[8]给出一个ICA应用例子,用于过程动态趋势分析和维数降低.随后,ICA技术又应用于多变量统计分析、过程监控和故障检测^[9],其分析和监控检测效果优于传统的多变量统计控制方法.然而,同时域PCA类似,在过程信号有相移或滞后的情况下,时域ICA对信号也需一些特殊处理,如时间平移或对齐.这在许多情况下很难实现,特别是信号之间需要多个成分对齐.

本文在进行多重振荡源分离定位分析时,充分考虑到振荡信号在各测量变量中的相移,采用对相移天然免疫的协方差函数进行ICA分解,克服了相移或滞后带来的问题

2.2 时域ICA模型

ICA基本模型是瞬时混合模型

$$X = AS \quad (1)$$

其中:矩阵 $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T$ 为包含 m 个变量的测量值,矩阵 $S = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]^T$ 为 n 个独立的非高斯源信号. X 的每一行即 $x_i^T (i = 1, \dots, m)$,是第 i 个测量值的有限时间序列; S 的每一行即 $s_j^T (j = 1, \dots, n)$,是第 j 个源信号的有限时间序列.通常 s_j^T 称为独立源, A 为混合矩阵.每个测量值被分解成一组独立源的线性组合,即

$$x_i^T = a_{i1}s_1^T + a_{i2}s_2^T + \dots + a_{in}s_n^T, \quad i = 1, \dots, m. \quad (2)$$

ICA的目标是在只有测量值已知的情况下,依据一定的目标函数和约束,优化学习 A 和 S .该目标等价于找到一个分解矩阵 W ,满足

$$\hat{S} = WX = \begin{bmatrix} w_1^T \\ w_2^T \\ \vdots \\ w_n^T \end{bmatrix} X \quad (3)$$

其中一种估计方法可通过最大化 $s_j^T = w_j^T \hat{X}$ 的非高斯指标来获得.非高斯程度可用统计峰度值或负熵等指标来衡量^[6].

3 基于协方差ICA的多重振荡源分离方法

当一个控制系统中出现多个振荡源干扰时,由于系统内部关联耦合,经常会出现多回路振荡现象,且每个回路都可能受到多个振荡源的干扰.基于协方差ICA分析技术首先对这些波动信号进行计算,获得自协方差函数.此时,数据矩阵 X 的每一行包含以滞后拍数为自变量的归一化协方差函数,协方差函数定义为^[10]

$$C(\tau) = E\{[x(t) - \mu_x][x(t - \tau) - \mu_x]^T\} \quad (4)$$

其中: $E\{\cdot\}$ 表示数学期望, μ_x 表示 $x(t)$ 的均值.对于 $x(i) (i = 1, \dots, N)$ 时间序列,计算过程和算法如下:

1) 均值计算

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i). \quad (5)$$

2) 协方差函数计算

$$C(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} (x(i + \tau) - \mu_x)(x(i) - \mu_x), & \tau \geq 0 \\ \tau & 0; \\ C(-\tau), \tau < 0 \end{cases} \quad (6)$$

3) 归一化处理

$$C(\tau) = C(\tau)/C(0). \quad (7)$$

Matlab信号处理包中xcov函数可用于该计算

由协方差函数的性质可知,一个振荡信号的协方差函数也是同频率的振荡,不带相位信息,且已过滤掉白噪音.因此,可从协方差数据矩阵 X 中分解出不带相移或滞后的多重振荡源

1) 数据矩阵 X : 测量值协方差数据矩阵为 $(m [N + 1])$,表示 m 个测量变量 $-N/2$ 到 $N/2$ 拍滞后的协方差数据

2) 非高斯指标: 采用统计峰度值

$$\text{kurt}(x) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x^4 - 3\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x^2\right)^2}{\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x^2\right)^2}. \quad (8)$$

3) 算法: 采用公共域可获得FastICA软件包,并对 IC 进行归一化.每个 IC 在0拍滞后处,即中点值调整为1,并相应调整混合矩阵值

4) 混合矩阵 A 的初值和独立源 IC 的个数: 先对协方差数据 X 进行PCA分解,得到的主元空间方向矩阵作为 A 的初值.依据主元的能量百分比来确定 IC 的个数,若前 n 个主元PC的特征值所占的波动能量百分比大于 α/n 便定为 IC 的个数(一般 α 取95%~100%之间的一个常数).

5) 振荡源定位: 对于任意的 IC ,每个测量变量

都有可能包含该 IC, 而包含该 IC 能量最多的那个变量所在的回路或检测区域便定位为振荡源 其依据是过程系统通常体现为低通滤波特性, 振荡源在传播过程中会衰减 具体定位方法是混合矩阵 A 的每一列对应一个 IC, 该列中最大值那一行所对应的测量变量便定位为该 IC 的源发地

将一实例同时域 PCA/ICA, 协方差 PCA 等方法进行对比分析, 以此说明本方法的效果和其他几种方法的不足 设有 2 个振荡源 $S_1(0), S_2(0)$, 3 个测量变量 $Y_1, Y_2, Y_3, e_i (i = 1 \sim 3)$ 为噪音

$$S_1(\phi) = \sin\left(\frac{2\pi}{100}t + \phi\right),$$

$$S_2(\phi) = \sin\left(\frac{2\pi}{250}t + \phi\right),$$

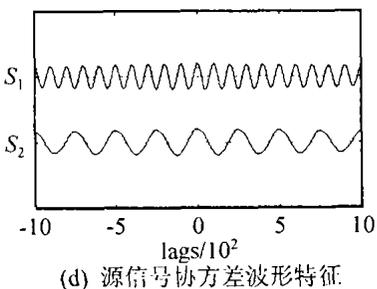
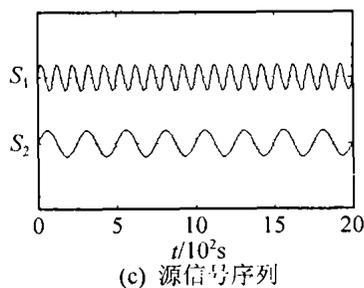
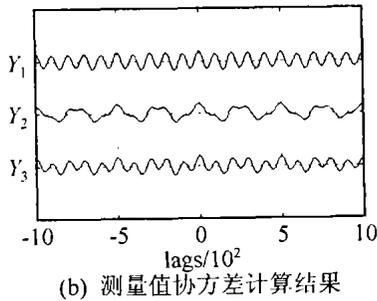
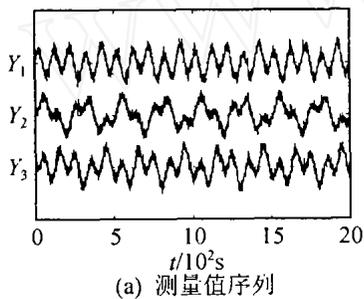


图 1 测量变量、源信号及其协方差

$$Y_1 = S_1(0) + 0.4S_2(\pi) + e_1,$$

$$Y_2 = 0.6S_1(\pi/4) + S_2(0) + e_2,$$

$$Y_3 = 0.91S_1(\pi/4) + 0.65S_2(\pi) + e_3$$

其中 ϕ 为相移 源 S_1 在 Y_1 测量变量中能量最强, 源 S_2 在 Y_2 测量变量中能量最强 图 1 给出了测量变量及振荡源的时序和协方差 现在需要从 3 个测量变量信息中分离出两个源信号, 即分析结果和源信号具有相同的波形特征, 并进行准确定位, S_1 定位于 Y_1, S_2 定位于 Y_2

(1) 时域分析

对测量变量的时序进行时域 PCA 和 ICA 分析, 其结果如图 2(a) 和 (b) 所示 图中“%”表示所提取的 IC 源所占的能量百分比 对比图 2(a) 和 (b) 与

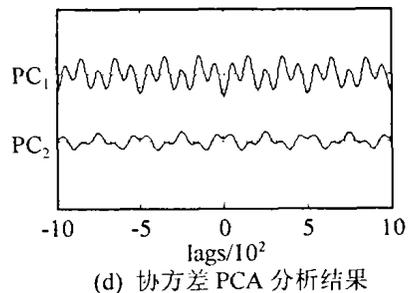
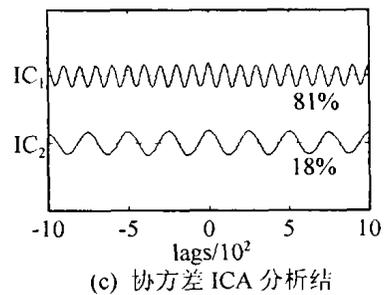
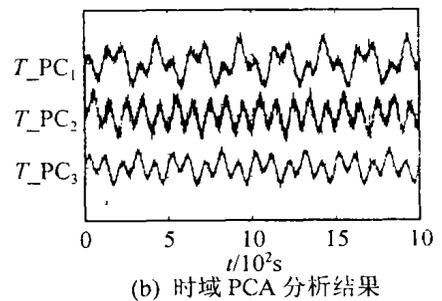
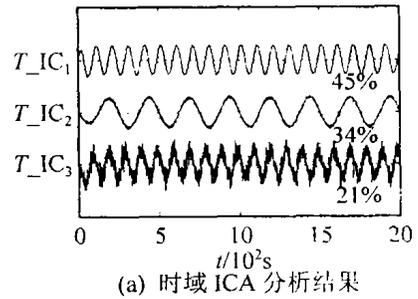


图 2 时域及协方差 PCA 和 ICA 分析结果

图1中的源信号序列,可以看出时域PCA无法准确提取出源信号;时域ICA虽然能提取源 S_1 和 S_2 的估计值(分别为图2中的 T_{IC_1} 和 T_{IC_2}),但同时提取出了“伪”源 T_{IC_3} ,其频率和 S_1 一样,且能量占21%,无法忽略该“伪”源是由相移引起的,因此时域PCA和ICA分析无法保证得到准确的结果

(2) 协方差分析

图2(c)和(d)给出了基于协方差的PCA和ICA分析结果。将其与图1中的源信号协方差相比较,可知协方差的PCA仍无法准确提取源信号,只有协方差ICA才能正确获取与源信号协方差一致的 IC_1 和 IC_2 (分别对应于 S_1 和 S_2),并且它们表征了99%的能量(81% + 18%),从而可以判断源的个数为2。另外,由协方差ICA分析所得的混合模型参数(即混合矩阵)为

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.89 & 0.13 \\ 0.27 & 0.73 \\ 0.69 & 0.33 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} IC_1 \\ IC_2 \end{bmatrix}$$

混合矩阵A的第一列对应于 IC_1 (即 S_1),该列中最大值0.89对应于 Y_1 ,因此 IC_1 被定位到 Y_1 。同理, IC_2 被定位到 Y_2 ,与实际情况完全一致

4 仿真实例

使用双回路耦合关联控制系统来验证协方差ICA的多重振荡源分离方法,仿真控制系统如图3所示。每个回路分别引入一个波动干扰(回路1为 $\sin(2\pi/300)$,回路2为 $\sin(2\pi/500)$),外加测量噪音。

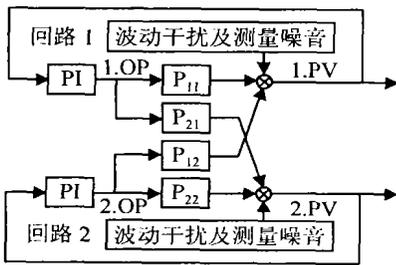
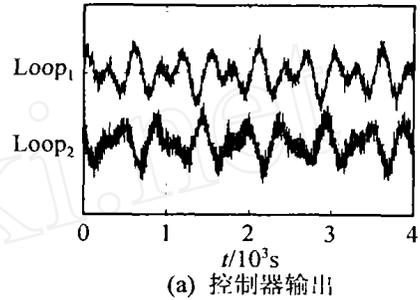


图3 仿真控制系统

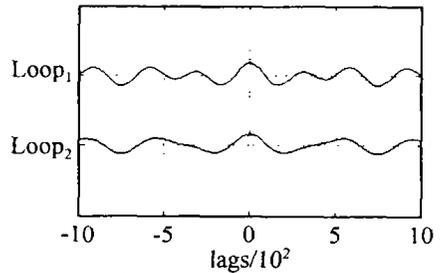
协方差ICA方法应用于控制器输出时间序列,图4(a)和(b)是控制器输出序列及其协方差,(c)和(d)是干扰源协方差和协方差ICA结果。很明显, IC_1 分离出了 D_2 干扰源, IC_2 分离出了 D_1 干扰源,且由表1的混合矩阵参数和上节所述的定位法则,可知 IC_1 代表的干扰源被定位到回路2, IC_2 代表的干扰源被定位到回路1,这与仿真系统的实际情况完全对应。

另外,分离出的 IC_1 及 IC_2 表达了99.9%(92.1% + 7.8%)的能量,完全可以说明信

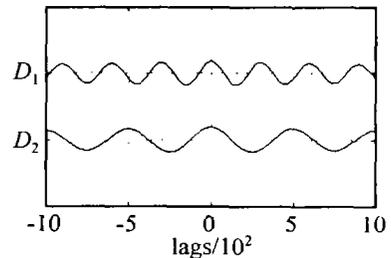
息提取的完整性。 IC_2 所包含的能量远低于 IC_1 的原因是 IC_2 的频率较高,而控制系统的低通特性使得 IC_2 对应的干扰源易于被系统衰减过滤掉。分析时将时域PCA,时域ICA以及协方差PCA所提取的结果与实际的干扰源相对比,结果发现这些方法无法精确提取干扰源信息,再一次证实了这些方法的不足。



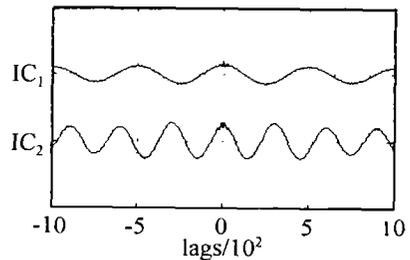
(a) 控制器输出



(b) 控制器输出协方差计算结果



(c) 干扰源协方差



(d) 协方差ICA分析结果

图4 实例数据及主要分析结果

表1 混合矩阵参数及能量分布

控制器输出	IC_1	IC_2
回路1	0.59	0.41
回路2	0.84	0.16
能量/%	92.1	7.8

5 结论

本文提出一种多重振荡源分离定位方法。通过

算法描述及仿真实例分析可知, 基于协方差 ICA 分析的多重振荡源分离定位方法切实可行. 同时通过对比分析, 发现其他时域 PCA/ICA, 协方差 PCA 等方法对解决该类问题存在着不足

参考文献(References)

- [1] Hagglund T. A Control-loop Performance Monitor[J]. *Control Engineering Practice*, 1995, 3(11): 543-1551.
- [2] Xia C, Howell J. Loop Status Monitoring and Fault Localisation [J]. *J of Process Control*, 2003, 13(7): 679-691.
- [3] Thornhill N F, Shah S L, Huang B, et al Spectral Principal Component Analysis of Dynamic Process Data [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(8): 833-846
- [4] Thornhill N F, Huang B, Zhang H. Detection of Multiple Oscillations in Control Loops[J]. *J of Process Control*, 2003, 13(1): 91-100
- [5] Xia C, Howell J. Isolating Multiple Sources of Plant-wide Oscillations Via Independent Component Analysis [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(8): 1027-1035
- [6] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. *Independent Components Analysis* [M]. New York: Wiley-Interscience, 2001.
- [7] 杨竹青, 李勇, 胡德文. 独立成分分析方法综述[J]. *自动化学报*, 2002, 28(5): 762-772
(Yang Z Q, Li Y, Hu D W. Independent Component Analysis: A Survey[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(5): 762-772.)
- [8] Li R F, Wang X Z. Dimension Reduction of Process Dynamic Trends Using Independent Component Analysis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, 26(3): 467-473
- [9] Kano M, Hasebe S, Hashimoto I, et al Evolution of Multivariate Statistical Process Control: Application of Independent Component Analysis and External Analysis [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(6-7): 1157-1166
- [10] 张贤达. *现代信号处理*[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 7-8
(Zhang X D. *Modern Signal Process* [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 7-8.)

(上接第 1425 页)

- [4] Claudio B, Andrea P, Lorenzo M. Fault Tolerant Control of the Ship Propulsion System Benchmark [J]. *Control Engineering Practices*, 2003, 11(4): 483-492
- [5] Zhang X D, Polycarpou M M, Parisini T. A Robust Detection and Isolation Scheme for Abrupt and Incipient Faults in Nonlinear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(4): 576-593
- [6] Jiang B, Wang J L, Soh Y C. An Adaptive Technique for Robust Diagnosis of Faults with Independent Effects on System Outputs [J]. *Int J of Control*, 2002, 75(11): 792-802
- [7] 王占山, 张化光. 一类自适应观测器的故障估计性能 [J]. *东北大学学报*, 2004, 25(12): 1134-1137.
(Wang Z S, Zhang H G. Performance of Fault Estimation of a Class of Adaptive Observer [J]. *J of Northeastern University*, 2004, 25(12): 1134-1137.)

(上接第 1428 页)

- [4] 罗翊, 石纯一. Agent 协作求解中形成联盟的行为策略 [J]. *计算机学报*, 1997, 20(11): 961-965
(Luo Y, Shi C Y. Behavior Strategy to Form Coalition in Agent Cooperative Problem-solving [J]. *Chinese Journal of Computers*, 1997, 20(11): 961-965)
- [5] Leen K S, Costas T. Utility-based Multiagent Coalition Formation with Incomplete Information and Time Constraints [A]. *Proc of SM C-03* [C]. Washington, DC: IEEE Press, 2003: 1481-1486
- [6] Leen K S, Costas T. Real-time Satisficing Multiagent Coalition formation [A]. *Working Notes of the AAAI Workshop on Coalition Formation in Dynamic Multiagent Environments* [C]. Menlo Park: AAAI Press, 2002: 7-15
- [7] Maria V B, Ricardo C, Jose L P, et al A Stable and Feasible Payoff Division for Coalition Formation in a Class of Task Oriented Domains [A]. *Proc of the 8th Int Workshop on Intelligent Agents VIII* [C]. London: Springer-Verlag Press, 2002: 324-334