

文章编号: 1000-5013(2009)02-0123-04

调速阀故障诊断的 AR 双谱定阶方法比较

蒋雨燕, 黄宜坚

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 为解决故障诊断中确定最优的自回归(AR) 模型阶数的问题, 运用最终预测误差(FPE)、阿凯克信息准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC), 以及奇异值分解(SVD) 的切片法和 Frobenius 法共 5 种定阶方法对调速阀的故障进行自回归模型定阶实验. 结果表明, FPE, AIC, BIC 及 SVD 切片法确定的阶数较低, 而用 SVD Frobenius 法确定的阶数较高. 通过不同阶数、不同故障的调速阀故障诊断实验可知, 用 SVD Frobenius 法建立的 AR 模型效果优于其他方法.

关键词: 调速阀; 故障诊断; 自回归模型; 时间序列双谱; 定阶方法; 奇异值分解

中图分类号: TH 137.52⁺2; TH 165⁺.3

文献标识码: A

模型类型选择和模型适用性检验是时序建模的两个基本问题, 而时序模型适用性检验的核心问题是模型阶数的确定. 在故障诊断中, 对于 AR 模型的识别主要是如何确定最优的 AR 模型阶数. 关于时间序列 AR 模型定阶问题, 国内外学者进行了大量的研究. 自回归模型主要有最终预测误差(FPE)^[1]、阿凯克信息准则(AIC)^[2]、贝叶斯信息准则(BIC)^[3], 以及奇异值分解(SVD)^[4] 的切片法和 Frobenius 法共 5 种定阶方法. 本文对 5 种定阶方法得到的模型阶数的 AR 双谱进行对比实验, 寻找一种较为适用的模型定阶方法.

1 定阶方法的比较

假设 $\{a_t\}$ 为具有零均值和方差 σ_a^2 的白噪声, 若时间序列 $\{x_t\}$ 满足

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_p x_{t-p} + a_t, \quad (1)$$

则称 $\{x_t\}$ 为 p 阶自回归时间序列, 简记为 $AR(p)$. 其中, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 为 $AR(p)$ 模型的自回归系数. 最优阶数 p 是建模中首先要解决的问题.

1.1 常用的定阶准则

3 种常用的定阶准则分别为最终预测误差(FPE) 准则、AIC 定阶准则及 BIC 定阶准则. 其函数表达式^[5] 分别为

$$FPE(p) = \frac{N+p}{N-p} \sigma_a^2, \quad AIC(p) = \ln \sigma_a^2 \frac{2p}{N}, \quad BIC(p) = \ln \sigma_a^2 \frac{p \ln N}{N}. \quad (2)$$

提高模型拟合的阶次, 则残差方差 σ_a^2 将减小, 而阶次 p 将增大. 这样, FPE, AIC, BIC 值均将有一个极小值, 对应于此极小值的模型阶次可认为是最佳的模型阶次. 即当 $FPE(p) = \min FPE(k), AIC(p) = \min AIC(k), BIC(p) = \min BIC(k)$ 时, $p = k$ 是 AR 模型的最优阶数.

1.2 奇异值分解定阶法

奇异值分解(SVD) 定阶法是一种有效的, 从多维时间序列中抽取特征动力系统的方法, 主要有切片法和归一化 Frobenius 范数法.

若 A 为 $m \times n$ 维复数矩阵, 则分别存在一个 $m \times m$ 维和 $n \times n$ 维的正交矩阵 U 和 V , 使得

收稿日期: 2008-07-09

通信作者: 黄宜坚(1945-), 男, 教授, 主要从事机械电子的研究. E-mail: yjhuang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省重点高新技术项目(2005H035); 福建省自然科学基金计划资助项目(A0610020)

$$A = U \Sigma V^* \tag{3}$$

式(3)中, $*$ 为矩阵的共轭转置, Σ 为一个 $m \times n$ 维对角矩阵, 其主对角线上的元素是非负的, 并按顺序排列为: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$. 对角元素 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 称为矩阵 A 的奇异值, U 和 V 分别为矩阵 A 左奇异阵和右奇异阵.

设 AR 模型阶数 k 对应的奇异值为 $\lambda(k)$, 则切片法的定义是当取得 $\max | \lambda(k) - \lambda(k-1) |$ 时, 对应的 k 值即为模型所需的最优阶数^[6]; 而归一化 Frobenius 范数^[7] 定义为

$$\mu(p) = \frac{[\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_p^2]^{1/2}}{[\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_n^2]^{1/2}}, \quad p = 1, 2, \dots, n. \tag{4}$$

式(4)中, 分母事实上就是对角矩阵 Σ 的 Frobenius 范数. 显然, $\mu(p) \leq 1$. 令 $\alpha \approx 1$ 是一个接近 1 的门限值. 于是, 当 $\mu(p) \geq \alpha$ 时, 认为前 p 个奇异值占主导地位, 即选择满足此条件的最小 p 值作为矩阵 A 有效秩 (即 AR 阶数) 的估计结果. 典型地, 常选择 $\alpha = 0.995$, 即 $\mu(p) \geq 0.995$ 所对应的 p 值即为所需要的最优阶数.

奇异值具有非常好的稳定性, 当矩阵中的元素发生小的变化时, 奇异值的变化很小; 奇异值是矩阵的固有的特征, 能反映出矩阵的特性^[8]. 奇异值分解的归一化 Frobenius 范数法, 在高阶谱模型定阶中是十分适用的. 3 种常用的定阶准则和奇异值分解法定阶, 如图 1 所示.

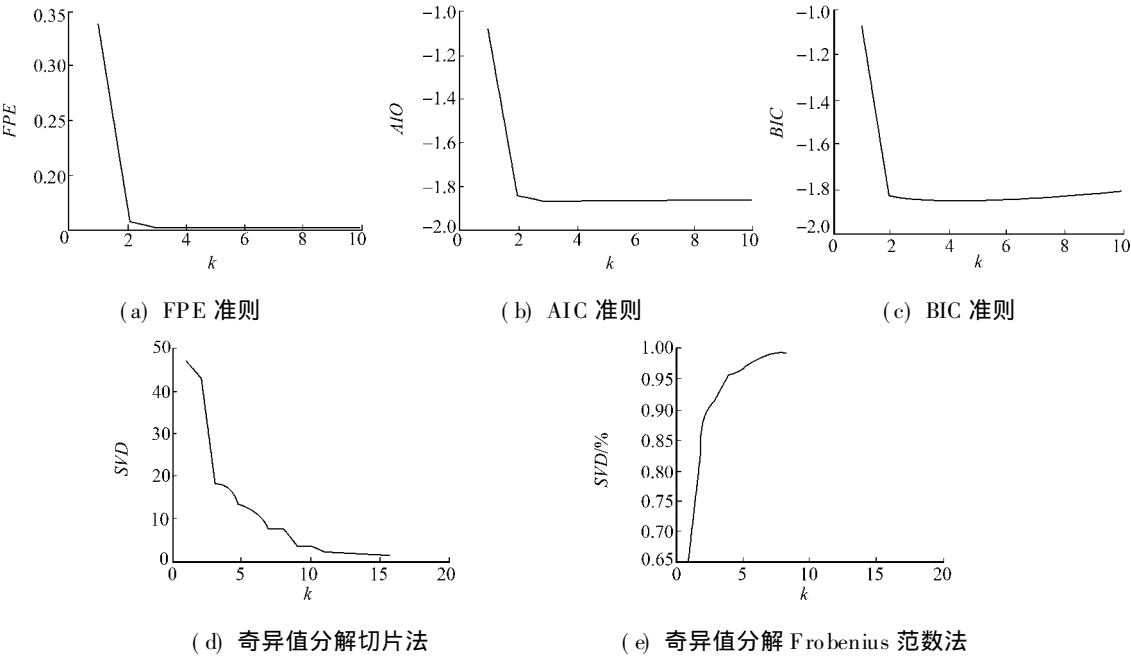


图 1 5 种定阶方法的比较

Fig. 1 Comparison of five methods of determining the order

由图 1 可知, 当 AR 模型的阶数 $k = 3$ 时, FPE, AIC, BIC 均取得最小值, AR 模型的最优阶数均为 3; 用奇异值分解的切片法定阶时, $\max | \lambda(3) - \lambda(k-2) |$ 为最大, AR 模型的最优阶数为 3; 而用归一化 Frobenius 范数法定阶时, 当 $\mu(p) \geq 0.995$ 时, 模型对应的阶数 10, 即为 AR 模型的最优阶数.

2 AR 双谱故障诊断实验

当节流阀后油腔的弹簧损坏或阀内缺圆柱体铁芯时, 均会使调速阀产生故障, 使得整个液压系统无法正常运行, 这些故障情况均会在阀体工作时产生的振动信号中表现出来. 应用 AR 双谱进行调速阀故障诊断实验^[9], 并设置共如下 5 种故障: (1) 节流阀后腔的弹簧变形; (2) 弹簧里有异物; (3) 节流阀后腔缺圆柱体铁芯; (4) 阀内的圆柱体铁芯是垫片; (5) 故障(2)和故障(4)的综合.

测试系统由传感器测量系统和数据采集、显示、处理及分析系统组成. 前者包括各种振动传感器, 其作用是拾取表征机器状态的各种信号或参数, 并使之变成标准的电压或电流信号; 后者是虚拟仪器的部分, 其作用是获取信号并显示具体振动值, 同时进一步地进行数据处理和分析^[10-11].

3 不同阶数的双谱分析

双谱是零均值平稳随机信号 $x(t)$ 的三阶累积量的二维 Fourier 变换, 三阶累积量为

$$C_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E[x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)]. \tag{5}$$

三阶累积量的二维 Fourier 变换, 即双谱为

$$S_{xx}(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} C_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)}, \quad j = \sqrt{-1}. \tag{6}$$

当 AR 模型的阶数 k 分别为 3 阶和 10 阶时, 其调速阀故障情况的 AR 双谱, 如图 2 所示.

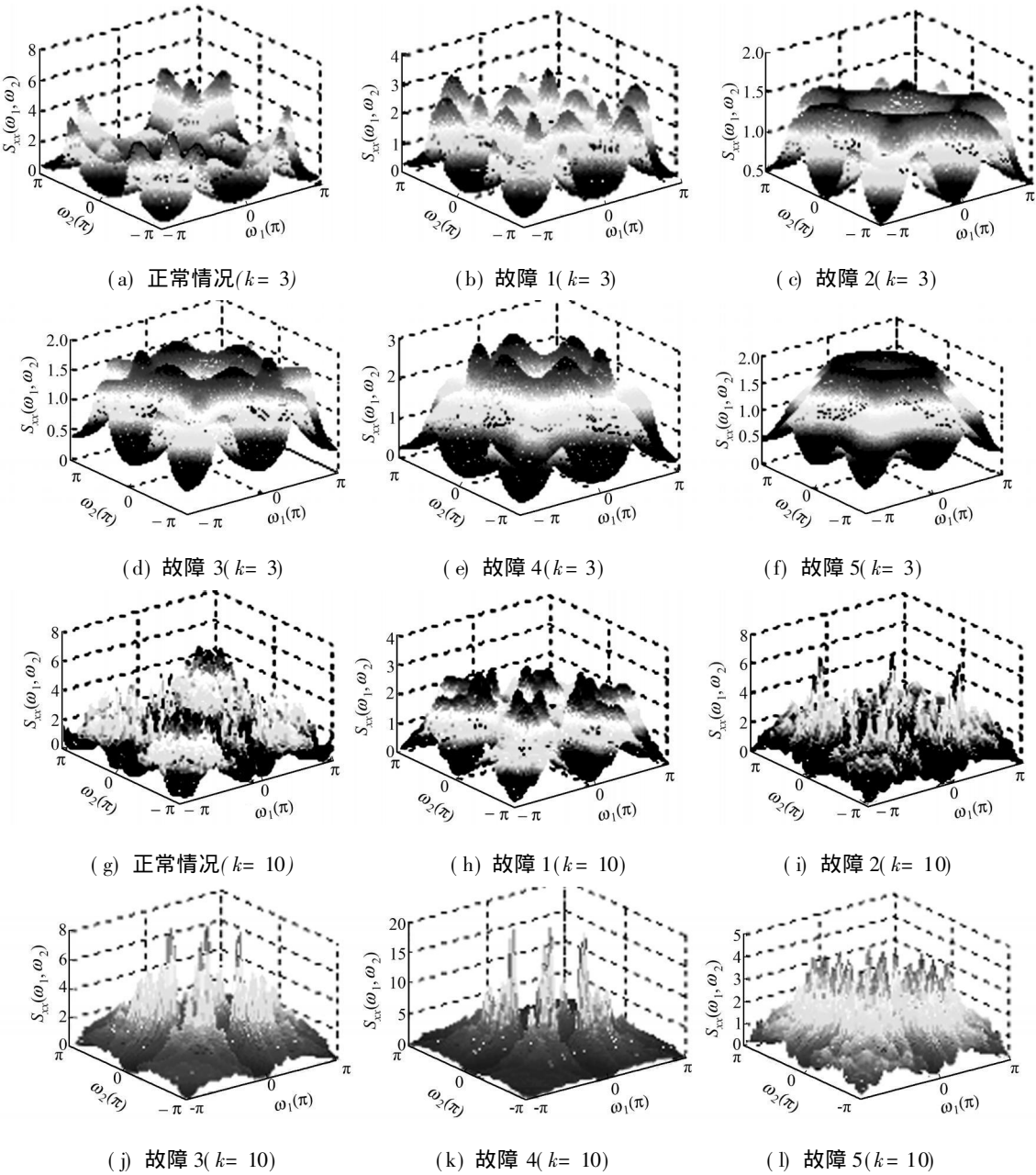


图 2 不同故障情况的 AR 双谱

Fig. 2 AR bispectrum for different failures

由图 2 的谱图可知, 当模型阶数 k 为 3 阶时, 频谱简单、平坦, 无法显示频谱峰谷结构的细节, 得不到详细的二次相位耦合信息; 而当模型阶数为 10 阶时, 峰谷适当, 能够比较好的提取信号的特征. 以上各图双谱幅值存在且不为零, 可以清楚地表明, 调速阀振动信号是非线性、非高斯信号^[12-13]. 对于非线性系统来说, 在某些频率处会显现出较强的相关性, 其表现是在双频率坐标下的双谱图上出现较高的谱峰, 而且故障越严重, 谱峰越高, 非线性越强.

4 结 束 语

实验表明,采用奇异值分解的归一化 Frobenius 范数法定阶时,用 AR 双谱对调速阀故障进行分析,效果明显.在双谱分析中,利用奇异值分解的归一化 Frobenius 范数法定阶,建立调速阀正常和故障状态的双谱谱,可以为调速阀的在线监测和诊断提供新的分析手段和方法.对于自回归双谱较为全面的物理意义解释,亟待进一步的探讨.

参考文献:

[1] AKAIKE H. Fitting autoregressive models for prediction[J]. Ann Inst Stat Math, 1969, 21: 243- 247.
[2] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. IEEE Trans Auto Control, 1974, AC- 19: 716- 723.
[3] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model[J]. Ann Statistics, 1978, 6: 461- 464.
[4] KANJILAL P P, PALIT S, SAHA G. Fetal ECG extraction from single channel maternal ECG using singular value decomposition[J]. IEEE Trans, 1997, 44(1): 51- 59.
[5] 吴光霞. 时序模型定阶准则评述与改进[J]. 西安矿业学院学报, 1995, 15(4): 308.
[6] 刘 波, 文 忠, 曾 涯. MATLAB 信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 298.
[7] 张贤达. 时间序列分析——高阶统计量方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 85.
[8] 李竹林, 张根耀, 赵宗涛, 等. 奇异值特征在目标识别中的应用[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(11): 27.
[9] 刘少谦, 黄宜坚. 应用时间序列分析的液压溢流阀故障诊断法[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2007, 28(3): 228- 231.
[10] 赵永立, 杨建成, 张玉红. 基于 Lab VIEW 的虚拟振动测试分析系统[J]. 天津工业大学学报, 2006, 25(4): 77- 78.
[11] 钱 阳, 周月平, 陈俊伟. 基于 Lab VIEW 的振动测试分析系统[J]. 温州大学学报: 自然科学版, 2005, 18(4): 58- 59.
[12] SWAMI A, MENDEL M, NIKIAS C L. High order spectral analysis toolbox user's guide[M]. INC: The Math- works, 1999.
[13] ZOLTAN A D, BAUMGAR D R. Applications of higher order spectral analysis to detection and identification of seismic and acoustic signals generated by machinery[J]. SPIE, 1997(3081): 99- 109.

Comparison of Different Methods of Determining
the Order of Autoregressive Bi Spectrum

JIANG Yu-yan, HUANG Yi-jian

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In order to determine the optimal order of autoregressive (AR) models, the 5 methods including final prediction error (FPE), Akaike's information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC), singular value decomposition (SVD) based Slicing, and Frobenius are used in the corresponding experiments for the faults of speed regulating value. The results have revealed that the selected orders of the AR model using the FPE, AIC, BIC, SVD slicing methods are lower than that obtained using the SVD Frobenius method. It has been proven that the AR model obtained by the SVD Frobenius method is more efficient than those obtained using other methods under the different fault diagnosis experiments for speed regulating value.

Keywords: speed regulating value; fault diagnosis; autoregressive model; time series bi spectrum; method of determining the order; singular value decomposition

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)