

文章编号: 1000-5013(2007)03-0228-04

应用时间序列分析的液压溢流阀故障诊断法

刘少谦, 黄宜坚

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 基于液压溢流阀工况, 提出一种振动频率特性的故障诊断方法。利用溢流阀体振动信号的相关性、自回归模型的参数和功率谱特性, 获得故障的突变信息, 从而确认溢流阀的工作状态, 为液压系统故障的诊断提供判断依据。测试系统采用 LabVIEW 虚拟仪器构建, 并通过计算机自动完成测试和分析。实验结果表明, 正常状态和故障状态下的电压信号没有明显的趋势, 是一种平稳时间序列; 有故障时, 相关函数衰减比正常状态慢, 但都不够明显; 正常状态和故障状态下的特征根分布明显不同, 故障状态下的系统可能处于某种稳定状态; 正常状态的自回归 (AR) 功率谱比任何一种溢流阀常见故障的功率谱都低。

关键词: 溢流阀; 故障诊断; 时间序列; 频谱分析

中图分类号: TH 165⁺.3; TP 271⁺.31; O 211.61

文献标识码: A

在工业系统中, 应用时间序列进行故障诊断已十分普遍。羊拯民等^[1]研究了时序分析在汽车变速箱齿轮故障诊断中的应用; 张仕海等^[2]研究了集装箱吊前大梁振动的时间序列分析与故障诊断; Wang 等^[3]研究了瞬态振动信号的适应性建模。本文就液压系统中因油液脉动引起溢流阀体的振动, 通过位移传感器检测阀体的振动信号, 建立自回归 (Auto-Regressive, AR) 模型。技术人员可以根据 AR 模型, 获得溢流阀的工作状态。

1 实验部分

1.1 溢流阀工作原理

先导式溢流阀由先导阀和主阀两部分组成, 如图 1 所示。先导式溢流阀的故障, 会在阀体工作时所产生的振动信号中表现出来。

1.2 检测系统

检测系统结构简图, 如图 2 所示。其工作过程如下: 位移传感器采集振动阀体位移、电压信号, 经调理和去噪声后通过数据采集卡输入计算机, 在基于 LabVIEW 虚拟仪器测控平台上进行处理、分析和显示, 然后根据正常状态和故障状态所测量的数据, 建立的 AR 时间序列模型。

1.3 测试过程

在对溢流阀振动的测试过程中, 我们分两个步骤对阀体振动的位移信号和电压信号进行提取。首先测量正常工作状态下的溢流阀体的振动信号, 然后测量故障状态下的振动信号。在实验过程中, 共设置了如下 4 种故障。(1) 将溢流阀的主阀芯弹簧两端各剪去半圈, 弹簧两端向外翘起, 受力时会向一侧弯曲。(2) 溢流阀主阀芯的阻尼孔穿上一根细导线, 导线横截面积略小于阻尼孔横截面积的一半。(3) 溢

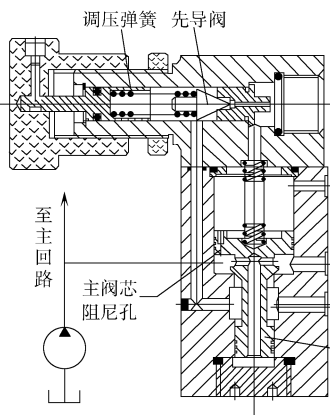


图 1 溢流阀结构图

Fig. 1 Configuration of relief valve

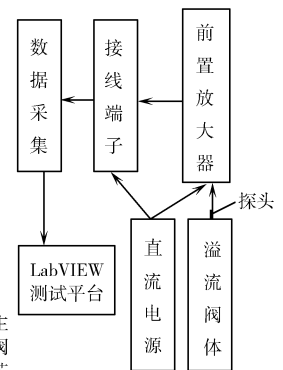


图 2 检测系统结构简图

Fig. 2 Schematic of detection system

收稿日期: 2006-11-01

作者简介: 刘少谦(1979-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事机械电子的研究; 通信作者: 黄宜坚(1945-), 男, 教授, E-mail: yjhuang@hqu.edu.cn

基金项目: 福建省高新技术计划重点项目(2005 H035)

流阀中先导阀的弹簧两端向外翘起。(4) 前 3 种故障之和. 在每种测量中,油路压力分 1,2,3,4,5,6 MPa 共 6 个压力等级,采样频率 250 Hz,读取频率 125 Hz,采样过程时间约 2 min.

2 数据分析和时间序列建模

2.1 数据分析

在正常状态和故障状态下,分别任取一组数据(本文取电压信号数据)进行分析. 首先对所取数据消除趋势项,然后进行零均值处理,如图 3 所示. 由图 3 可知,正常状态和故障状态下的电压信号没有明显的趋势,均值为一常量,是一种平稳时间序列.

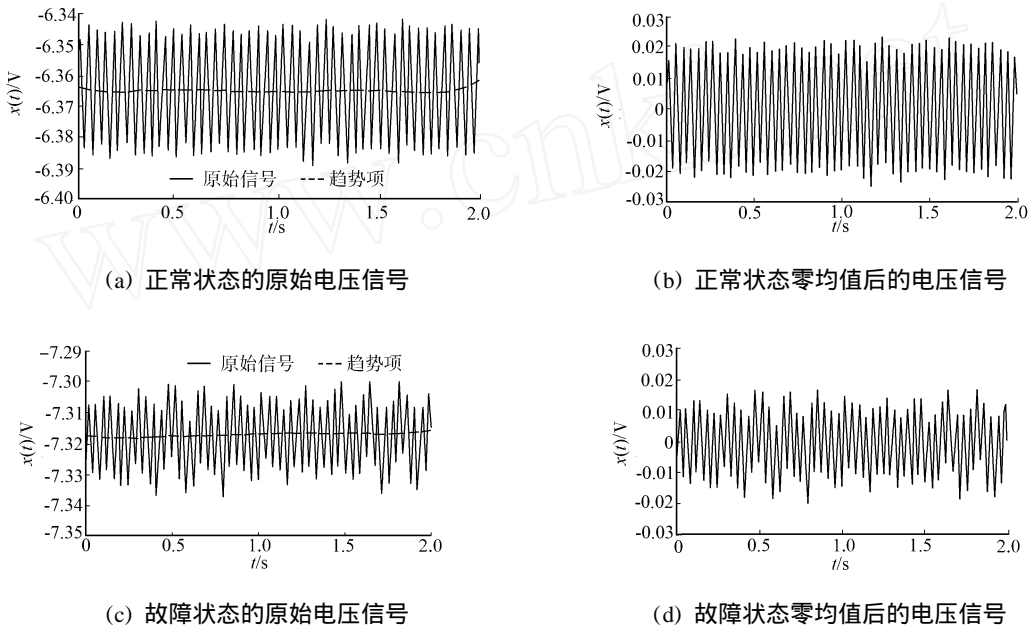


图 3 不同状态的电压信号数据图

Fig. 3 The voltage signals on different states

2.2 时间序列建模

利用最小二乘法^[4]进行分析,可以得到任意 p 阶的 AR 模型. AR(p) 公式为

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

式(1)中, $\varphi_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 为自回归参数, a_t 为白噪声. 将式(1)改写成矩阵形式为

$$Y = X \varphi + E. \tag{2}$$

其中 $Y = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}$, $X = \begin{bmatrix} x_0 & x_{-1} & \dots & x_{1-p} \\ x_1 & x_0 & \dots & x_{2-p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-2} & \dots & x_{N-p} \end{bmatrix}$, $\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_p \end{bmatrix}$, $E = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix}$.

利用阀体工作过程中所输出的振动信号建立时间序列模型,是为了辨识系统是否处于正常工作状态,或者有故障. 从式(1)可知,通过建模可以将阀体振动的过程信息提取成几个自回归参数,再根据参数的分布特征进行分析. 另外,选取数据点个数的多少与正确判断系统工作状态密切相关. 本文以 1 000 个数据为一组,取 20 组数据,建立 AR 模型,分别计算其自回归参数,并采用赤池信息准则(AIC 准则)^[5]对模型的阶次进行适应性检验. 即 $AIC(p) = N \ln \frac{\sigma_a^2}{2} + 2p$. 其中, $\sigma_a^2 = S / (N - p)$, $S = \sum_{t=p+1}^N (x_t - \varphi_1 x_{t-1} - \varphi_2 x_{t-2} - \dots - \varphi_p x_{t-p})^2$, N 为数据个数, σ_a^2 为残差方差, $AIC(p)$ 是模型阶次 p 的函数,取 $AIC(p)$ 绝对值最小时的模型阶次 p 为最佳模型阶次. 根据参数矩阵 φ 的最小二乘法估计,则有

$$\varphi = (X^T X)^{-1} X^T Y. \tag{3}$$

计算出自回归模型参数 φ_k ,得出 2~5 阶次模型 AIC 值分别为 -10 569, -10 632, -11 157, -13 833, 则最佳模型阶次为 2 阶.

3 故障分析

3.1 相关性分析^[6]

建立二阶模型后,根据

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau)dt, \quad (4)$$

对电压信号进行相关性分析,绘制出自相关函数曲线图.任取正常与 4 种故障状态下的数据各 500 组,分析计算并绘制自相关函数图,如图 4 所示.通过对图 4 的分析,可看出正常状态和故障状态下电压信号的自相关曲线明显不同,有故障时,自相关函数衰减比正常状态时慢,但都不太明显.

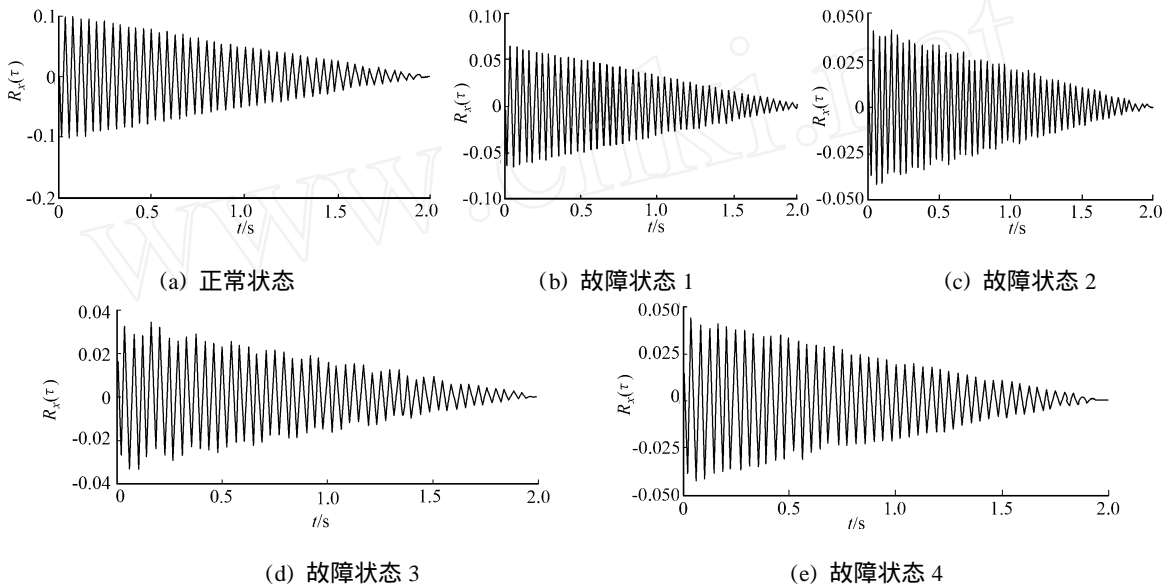


图 4 5 种状态下自相关曲线图

Fig. 4 Auto-regressive curve on five states

3.2 自回归系数分布

建立二阶模型后,根据式(3)计算出正常与故障状态下自回归参数 λ_1, λ_2 ,并绘成 $\lambda_1 - \lambda_2$ 相平面,如图 5(a)所示.由图 5(a)可以看出,正常与故障状态下的模型参数有着明显不同的分布,正常状态下的自回归系数位于相平面的右下角,故障状态位于左上角.

3.3 自回归模型的稳定性判定

对于 AR(2) 模型,有 $x_t = \lambda_1 x_{t-1} + \lambda_2 x_{t-2} + a_t$,即 $x_t = a_t / (1 - \lambda_1 B - \lambda_2 B^2)$.对于分母多项式则有 $1 - \lambda_1 B - \lambda_2 B^2 = (1 - \lambda_1 B)(1 - \lambda_2 B)$.其中, λ_1, λ_2 是分母多项式的特征根, $\lambda_1 = \lambda_1 + j\lambda_2, \lambda_2 = -\lambda_1 - j\lambda_2$.即

$\lambda_{1,2} = [-\lambda_1 \pm \sqrt{\lambda_1^2 + 4\lambda_2}]/2$.根据上式计算出 λ_1, λ_2 ,并绘制 $\lambda_1 - \lambda_2$ 相平面,如图 5(b)所示.由图 5(b)可看出,正常状态和故障状态下的特征根分布明显不同,正常状态下的特征根分布在 λ_1 (0.75, 0.85), λ_2 (0.7, 0.9) 区间,而故障状态下的特征根分布在 λ_1 (0.6, 0.9), λ_2 (0.4, 0.7) 区间.虽然两个状态的系统都是稳定的,但这两个状态的分布区间不同.

3.4 功率谱分析

得到 AR 模型的参数后,可以利用 AR 模型的功率谱表达式^[7],绘制出光滑的功率谱密度图.本文

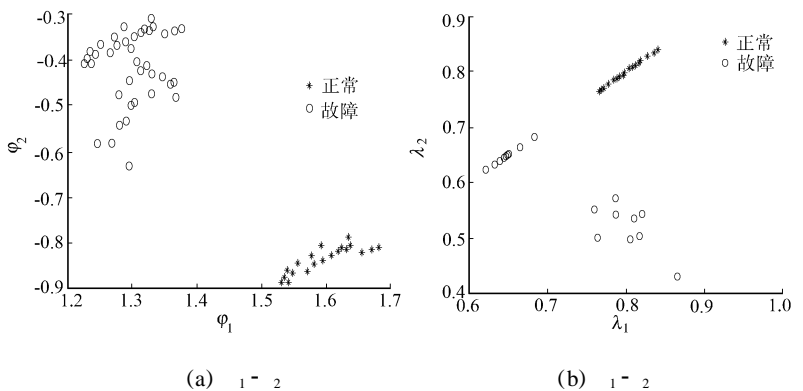


图 5 正常与故障状态分布图

Fig. 5 Distribution diagram of normal and fault states

任取正常与 4 种故障状态下的数据各 500 组,分析计算并绘制功率谱密度(S_{AR})与频率(f)的关系,如图 6 所示.图 6 中,实线 1~4 分别为故障状态 1~4 下的功率谱曲线,虚线为正常状态下的功率谱曲线.从图 6 可看出,正常状态下功率谱曲线最低,而在 4 种故障状态中,故障状态 2,3,4 比故障状态 1 更严重,故障状态 4 最严重,结果与实验过程事实相符.

4 结束语

利用液压阀正常与故障状态下的输出振动信号,可以获得系统工作状态的相关信息.振动信号的相关性分析表明,有故障时,相关函数衰减比正常状态慢,但都不够明显.从输出信号的 AR 模型绘制的系数 $\alpha_1 - \alpha_2$ 相平面可以看出,正常状态下的自回归系数位于相平面的右下角,故障状态位于左上角,可以明确诊断出溢流阀故障.从输出信号的 AR 模型的特征根绘制的 $\alpha_1 - \alpha_2$ 相平面可以看出,故障状态下的系统也可能处于某种稳定状态,而从 AR 功率谱可以获得故障信息.上述分析说明,采用 AR 模型对溢流阀振动信号进行分析,对元件的故障诊断有实用意义.

参考文献:

[1] 羊拯民,张成宝. 时序分析在汽车变速箱齿轮故障诊断中的应用[J]. 农业机械学报, 2000,31(3): 92-95.
[2] 张仕海,朱建元. 集装箱吊前大梁振动的时序分析与故障诊断[J]. 上海海事大学学报, 2004,25(4): 1-3.
[3] WANG Feng-lin,MECHEFSKE C K. Adaptive modelling of transient vibration signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2006,20(4): 825-842.
[4] LENNART L. System identification[M]. New Jersey: PTR Prenticel Hall,1989.
[5] 杨叔子,吴雅. 时间序列分析的工程应用:上册[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1991: 255-256,353.
[6] REHORN A G, SEJDIC E, JIANG Jin. Fault diagnosis in machine tools using selective regional correlation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2006,20: 1221-1238.
[7] 张旭东,陆明泉. 离散随机信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2005: 156-157.

Fault Diagnosis of Hydraulic Relief Valve Using Time Series Analysis

LIU Shao-qian , HUANG Yi-jian

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

Abstract : In this paper , a fault diagnosis method for hydraulic relief valve has been put forward according to their vibration frequency characteristics. Using the correlation analysis , the parameters and spectra of a time series model of the vibrant signals from the relief valve , the abrupt change informations can be obtained. Therefore the fault conditions of the relief valve can be confirmed and the decision support is provided for the fault diagnosis of hydraulic relief valve. The experiment and diagnosis process based on virtual instruments LabVIEW are automatically controlled by computer in this paper. The experiment shows that voltage signals on normal and fault states are a steady time series which have no apparent tendency; the correlated functions on fault states attenuate more slowly than one on normal state , but they are not pretty apparent; the distributions of characteristic roots are obviously different between normal and fault states; the system on fault states may be in a stable condition; auto-regressive (AR) power spectrum curve on normal state is different from other fault states of hydraulic relief valve.

Keywords : relief valve ; fault diagnosis ; time series ; spectral analysis

(责任编辑:黄仲一)