

文章编号: 1006-2343(2013)03-014-04

# 复三阶累积量耦合性质对故障诊断结果的影响

吴文兵<sup>1,2</sup>, 黄宜坚<sup>3</sup>, 陈文彦<sup>2</sup>

(1. 福州外语外贸学院 福州 350202, E-mail: wwbyqsq@fjnu.edu.cn;

2. 厦门大学 信息科技学院 福建 厦门 361000; 3. 华侨大学 机电及自动化学院 福建 泉州 362021)

**摘要:** 复数三阶累积量具有不同的定义形式, 定义形式不同, 其包含的耦合信息也不相同。在复数累积量切片以及三阶对角累积量的基础上, 定义了复三阶累积量切片谱以及三阶对角累积量谱, 实验中利用这两种谱的不同的耦合方式, 通过计算容量维, 对采集的故障信号和正常信号进行故障判别。实验结果表明, 两种定义方式的谱, 在不同的耦合方式下, 对同一故障的诊断正确率结果类似, 表明了影响故障诊断结果的不是谱的形式, 而是其中包含的不同的耦合信息。

**关键词:** 复数三阶累积量; 耦合; 容量维; 故障诊断

中图分类号: TH161 文献标识码: A

## The Impact of Complex Cumulants' coupling Properties on the Results of Fault Diagnosis

Wu Wenbing<sup>1,2</sup>, Huang Yijian<sup>3</sup>, Chen Wenxing<sup>2</sup>

(1. Fuzhou Technical College of Foreign Studies, Dept. of Computer, Fujian Fuzhou 350018, China;

2. Xiamen University; 3. Huaqiao University, Fujian Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Complex third-order cumulant has different definition forms. Different forms conclude different information. Based on three order cumulant slices and diagonal cumulants, complex third-order cumulant slices spectrum and diagonal cumulant spectrum are defined. In experiments using the different coupling modes, the capacity dimensions are calculated to diagnose faults. Experiments indicate the two kinds of spectrum in different modes, the detection accuracy rates on the same fault are similar, thus, the experiments proved that the diagnosis result is not effected by different kinds of spectrum forms, but by the different coupling information included in the spectrum.

**Key words:** complex third-order cumulants; coupling; capacity dimensions; fault diagnosis

利用高阶累积量可以自动地抑制高斯背景噪声(有色或白色)的影响, 正因为这样, 高阶累积量这一统计量已日益受到人们的重视并已成为信号处理中一种非常有用的工具。一般而言, 机械振动过程中工件的振动信号是非线性、非高斯的, 环境中的噪声可以近似当作高斯噪声处理, 因而用高阶累积量分析振动信号更容易提取与工件有关的特征信息。因此, 高阶累积量已经在机械振动、故障诊断等领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。M. R. Raughveer 和国内学者王树勋等人对高阶累积量的耦合性质进行了深入研究, 明确指出各种复数高阶累积量的不同定义形式及其耦合特征<sup>[5-8]</sup>。由于目前在故障诊断领域应用的基本都是实数形式的高阶累积量和高阶谱, 因此本文在此基础上, 定义了复数三阶累积量切片谱, 以及  $1/\frac{1}{2}$  维谱, 然后根据这两种谱所呈现出的自相似性, 通过计算这两种谱的容量维数进行溢流阀故障诊断, 并对其

诊断效果进行对比, 同时还对相应的实数形式的三阶累积量的实验结果进行了研究。

### 1 复数三阶累积量切片

设  $[x(n)]$  为零均值  $k$  阶平稳随机过程, 则该过程的三阶累积量为<sup>[9]</sup>:

$$c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)\} \quad (1)$$

根据文献[7]在式(1)中, 令  $x(n)$  为复数信号, 并进行如下定义:

$$\text{定义一: } c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)\} \quad (2)$$

$$\text{定义二: } c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x^*(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)\} \quad (3)$$

$$\text{定义三: } c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x^*(n)x(n+\tau_1)x^*(n+\tau_2)\} \quad (4)$$

其中  $x^*(n)$  是  $x(n)$  的共轭复数, 本文的复数信号由采集的原始信号进行 Hilbert 变换得到。文献[7]指出, 按定义一的方式, 可以用复数谐波形式表示的发生了二次相位耦合的信号(如式(5))其中  $\phi_3 = \phi_2 + \phi_1$ , 谐波分量  $\omega_3$  是由谐波分量  $\omega_1$  和  $\omega_2$  通过二次相位耦合而成的, 且  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ , 其三阶累积量  $C_1$  为 0, 以定义二的方式其三阶累积量  $C_2$  如式(6)所示, 以定义三的方式其三阶累积量  $C_3$  如式(7)所示。

收稿日期: 2012-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975098); 厦门市科技计划资助项目(3502Z20123013)

$$x(n) = \sum_{i=1}^3 A_i \exp(j\omega_i n) + \phi_i \quad (5)$$

$$C_2 = A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)] + \exp[j(\omega_2 \tau_1 - \omega_1 \tau_2)]] \quad (6)$$

$$C_3 = A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_3 \tau_1 - \omega_1 \tau_2)] + \exp[j(\omega_3 \tau_1 - \omega_2 \tau_2)]] \quad (7)$$

分别在式(6)和式(7)中令  $\tau_2 = 0$  则式(6)变为:

$$C_2 = A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_1 \tau_1)] + \exp[j(\omega_2 \tau_1)]] \quad (8)$$

式(7)变为:

$$C_3 = A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_1 \tau_1)] + \exp[j(\omega_3 \tau_1)]] \quad (9)$$

从式(1)可以看出,当  $\tau_2 = 0$  时所求出的即为三阶累积量切片,式(8)和式(9)分别表明,当信号可以由复数谐波形式表示时,按定义二和定义三方式得出的三阶累积量切片,分别只包含参加耦合的信号和耦合后的信号。再令  $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ ,按定义一、二、三得出的三阶对角累积量分别为  $C_4 = 0$ ,

$$C_5 = 2A_1 A_2 A_3 \exp(j\omega_3 \tau) \quad (10)$$

$$C_6 = A_1 A_2 A_3 [\exp[j(\omega_1 \tau)] + \exp[j(\omega_2 \tau)]] \quad (11)$$

同样,式(10)和式(11)分别表明,当信号可以由复数谐波形式表示时,按定义二和定义三方式得出的三阶对角累积量,分别只包含耦合后的信号和参加耦合的信号。

### 2 容量维

本文按照文献[10],即采用盒子覆盖算法来计算功率谱的容量维数。计算相似比时,本文采用方块填充被测对象,统计覆盖所需的方块数来计算其维数,方块大小由 0.1 递减到 0.002,以此方法计算容量维数。如果用长度为  $r$  尺子去测长度为  $L$  的线段,  $L$  与  $r$  之比为  $N$ 。 $N$  值的大小与  $r$  长短有关,  $r$  越小  $N$  越大。对于  $D_c$  维物体<sup>[11][12]</sup>:

$$N(r) \propto (1/r)^{D_c} \rightarrow \lim_{r \rightarrow 0} N(r) = (1/r)^{D_c}$$

取对数得容量相似维数:

$$D_c = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \frac{\log N(r)}{\log(1/r)} \right)$$

### 3 数据采集

本实验研究的机械振动部件为溢流阀。当溢流阀进出口有异物,压力偏高或偏低都会影响到溢流阀的正常运行,为了获取溢流阀在故障状态下的运行信号,本文进行的实验人为设置了如下故障:

故障一:使主阀弹簧变形

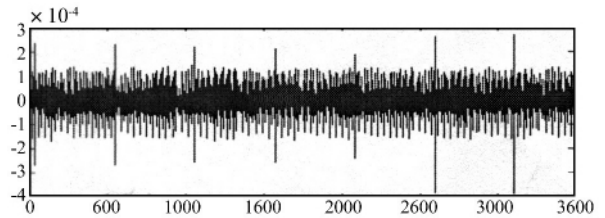
故障二:使先导阀弹簧变形

通过实验可以近似模拟溢流阀工作故障状况。

本文利用 LabVIEW 软件及 PCI-6014 的数据采集卡和

一个加速度传感器,依次采集溢流阀在正常和故障状态下的振动信号。在每种测量中,将油路压力从 1 MPa ~ 5 MPa 分五个压力等级。采样频率 250 Hz,读取频率 125 Hz,采样过程时间约 2 min。本次实验分别在溢流阀正常工作状态和两种故障状态各自采集了 13 组共 39 组数据。本文实验使用的数据个数为 1 536 个。

由于测试过程中系统外部和内部各种因素的影响必然在输出过程中夹杂着不需要的成分,本文采用中值法对采集的振动信号进行预处理剔除混杂在信号中的干扰噪声。滤波后的信号如图 1 所示。



▲图 1 滤波后信号

### 4 谱图

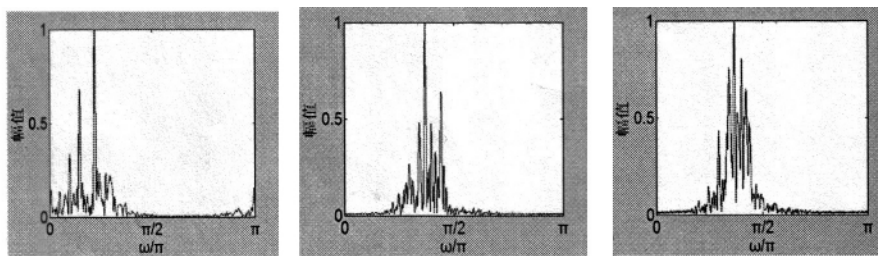
本文为了进行故障识别,将实验中测得的正常状态和故障一状态的 36 组数据分别按式(2)、(3)、(4),并令  $\tau_2 = 0$ ,令  $-64 < \tau_1 < 64$ 。本文为了进行故障诊断,定义如下形式的三阶累积量切片谱:

$$\text{Slice}(\omega) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, \rho) e^{-j\omega\tau_1} \quad (12)$$

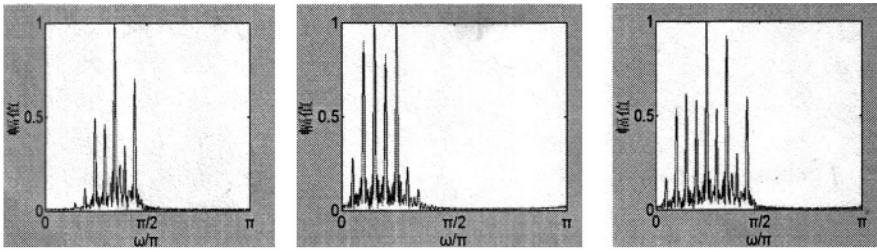
以及  $1/2$  维谱:

$$B(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau, \sigma) e^{-j\omega\tau} \quad (13)$$

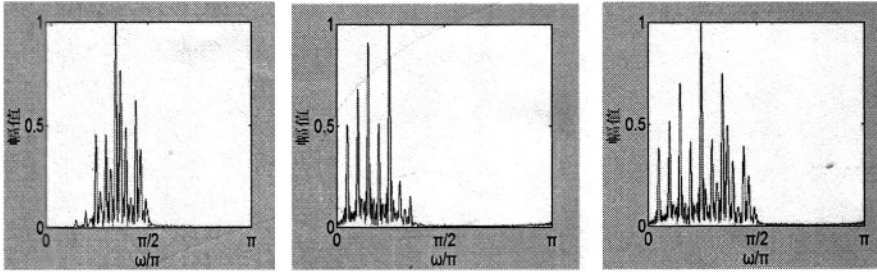
本实验首先将正常状态和故障一状态的 36 组数据,分别按前述的三种定义方式得出每组数据的三阶累积量切片共 108 组数据,再按式(12)求出其复数三阶累积量切片谱。本文在正常状态和故障一状态下,当油压分别为 1 MPa, 3 MPa, 5 MPa 时,将两种状态的三阶累积量切片谱各选取 1 组示于图 2 至图 7。图中  $x, y$  轴表示圆频率,单位为  $\pi$ ,纵轴表示归一化后的幅值大小,无量纲。由图 2 至图 6 可以看出,三阶累积量切片谱都呈现出一定的自相似性,总体上来说,在定义一方式下,从谱峰的构成和数量来看,正常状态和两种故障状态的区分较为明显,而两种故障之间则比较难以区分。而在定义二减去定义一的方式下,两种故障之间的区分则较为明显。



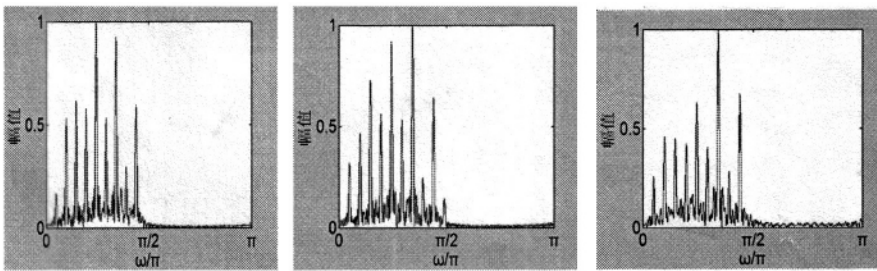
▲图 2 定义一方式正常状态三阶累积量切片谱图



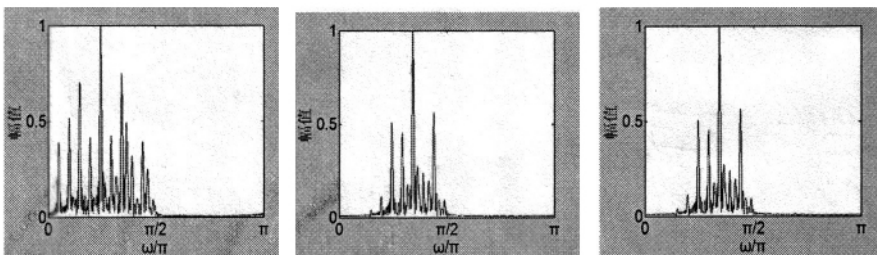
▲图 3 定义一方式故障一状态三阶累积量切片谱图



▲图 4 定义一方式故障二状态三阶累积量切片谱图



▲图 5 定义二减去定义一方式故障一状态三阶累积量切片谱图



▲图 6 定义二减去定义一方式故障二状态三阶累积量切片谱图

## 5 实验结果

本文为了有效判别故障,利用容量维作为工具,分别计算了原始信号经过 Hilbert 变换后得出的复信号在正常状态和两种故障状态下按三种不同定义方式得出的切片谱的容量维数,将按定义一方式计算出的三种信号状态的容量维数示于表 1。为了对结果进行有效观察,特绘制了表一的点折线图,见图 7。图 7 的横坐标代表实验次数,单位为次,纵坐标表示计算出的容量维数,无量纲。从图 7 中可以看出,在定义一方式下,正常状态和两种故障状态下信号的容量维数在整体上区别较为明显,也就是说,当信号中能够以复数形式表示的,并且产生了二次耦合现象的信号被消除了的时候,正常状态和两种故障状态的区分比较明显,更进一步分析,以正常状态第 5 个数据点作为分界值,即以容量维数大于等于 1.266 3 判断为正常状态,以小于 1.266 3 判断为故

障状态,则对于正常状态来说,误判的数据个数是 4 个,故障一状态误判的个数为 0 个,而故障二状态误判的个数为 2 个,总体正确率为  $(39 - 4 - 2) / 39 = 33 / 39$ ,超过了 80%,结果是相对满意的。进一步观察,在定义一方式下,两种故障状态本身却难以区分,即难以找到一个适当的分界值,将故障一状态和故障二状态区分开来。为了将两种故障状态区分出来,本文继续在定义二和定义三的方式下,计算正常状态和两种故障状态的容量维数,但结果均不理想,在定义二方式下计算出的三种状态的容量维数示于图 8,从图中可以看出,三种状态均难以区分,按定义三方式计算的结果也与图 8 类似。为了区分两种不同的故障状态,本文在上述基础上,将按定义二得出的三阶累积量切片谱,减去按定义一方式求出的三阶累积量切片谱,然后再计算三种状态的容量维数,结果示于图 9。从图 9 可以看出,虽然正常状态和两种故障状态难以区分,但两种故障状态之间则区分比较明显,为了进一步分析,将图 9 中的两种故障状态的容量维数折线图单独画出,并对刻度加以放大,结果示于图 10。从图 10 可以看出,故障一和故障二状态之间存在一个比较明显的分界值,如确定大于 1.30 判断为故障二状态,小于等于 1.30 判断为故障一,则故障二误判的

数据个数是 4 个,故障一误判的个数则只有 1 个,总体正确率为  $(26 - 4 - 1) / 26 = 21 / 26$ ,也超过了 80%。为了进行对比,实验中还计算了实数信号的双谱对角切片的容量维,结果示于图 11,可以看出,信号的三种状态比较难以区分。最后按照式(13)的定义进行了完全相同的实验,实验结果也与前述类似。

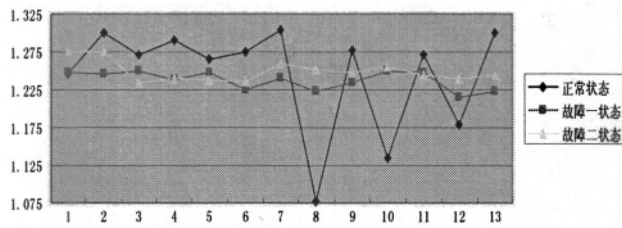
## 6 实验结果分析

文献[8]指出,在发生二次相位耦合时,实数双谱对角切片包括了参加耦合的信号信息和耦合后信号信息,本实验出现的结果应该与此有关,也就是说,在复数信号的某种耦合形式下,即消除了耦合信息后,或者单纯的耦合后信息或者参加耦合的信号信息,与两者混合在一起相比,其自相似性可能更能保留信号特征,从而更有利于信号分类和故障判别。整个实验结果表明,实验中的故障诊断准确率与复数信

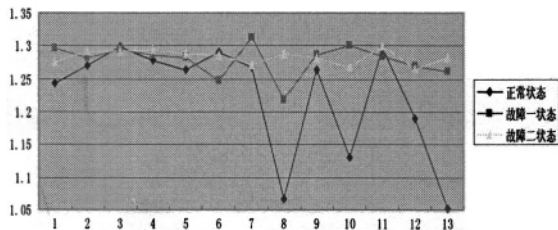
号的不同耦合方式有关。其中定义二减去定义一的含义可以作如下理解: 在采集的振动信号中, 经过 Hilbert 变换后, 其中能够以复数形式表示的、并且产生了二次耦合的信号, 因为按照定义一的方式, 其三阶累积量为 0, 则由定义二方式的三阶累积量切片减去定义一方式的 0 以后, 还是与定义二的方式相同, 即只包含了参加二次耦合的信号, 但信号中那些不能由复数谐波形式表示的信号, 在进行减法运算以后则必然发生改变, 由于机械振动信号的复杂性, 具体细节需要分情况讨论, 本文作者将另文进行研究。

表 1 正常状态和故障状态三阶累积量切片谱容量维值

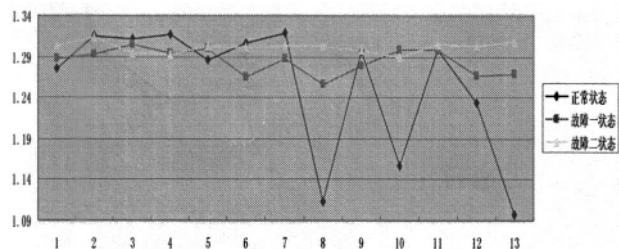
正常状态	1.246 3	1.299 1	1.270 2	1.290 9	1.266 3	1.274 1	1.303 0	...
故障一	1.247 3	1.245 6	1.250 9	1.237 6	1.249 0	1.224 8	1.241 2	...
故障二	1.274 4	1.274 7	1.234 9	1.241 0	1.237 8	1.236 9	1.259 5	...



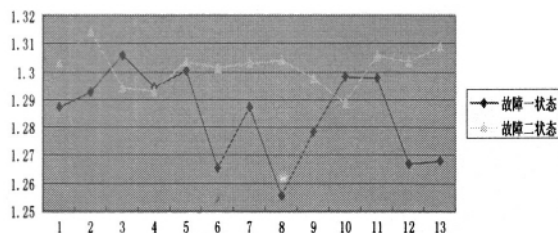
▲图 7 定义一方式正常状态和故障状态模拟结果图



▲图 8 定义二方式正常状态和故障状态模拟结果图

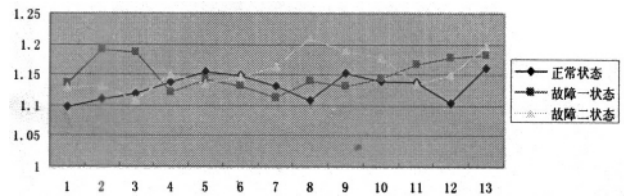


▲图 9 定义二减去定义一方式两种状态模拟结果图



▲图 10 定义二减去定义一方式两种故障状态模拟结果图

通过整个实验可以知道, 要分辨出实验中三种不同的状态, 按照式(12)定义的切片谱, 可以先通过定义一方式分辨出正常状态和两种故障状态, 再通过定义二减去定义一的方



▲图 11 实数双谱对角切片两种状态模拟结果图

式辨别出两种不同的故障状态。由于式(12)和式(13)定义的是两种不同的谱, 而实验结果又类似, 这证明了影响故障诊断结果的因素不是谱的形式, 而是其中所包含的不同的耦合信息。

## 7 结论

复数三阶累积量的不同定义形式决定了其包含了不同的耦合信息, 这种不同的耦合信息必然反应到由其得出的复数三阶累积量切片谱以及 1-2 维谱中。本文通过计算容量维进行的故障诊断实验, 对这种不同的耦合特征进行分析, 得出了具有不同耦合性质的复数三阶累积量其保持同类信号特征的能力是不一样的这一结论, 即在具体的故障诊断中, 可以通过选择不同的耦合方式, 以达到区分正常状态和故障状态、各种不同的故障状态的效果, 同时还通过两种不同形式的谱进行对比的结果表明, 能对故障诊断结果影响的不是谱的形式, 而是其中所包含的不同的耦合信息。

## 参考文献

- [1] Dusan Kocur, Radoslav Stanko. Order bispectrum: a new tool for reciprocated machine condition monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2000, 14(6): 871~890.
- [2] 曹精明, 邵忍平, 胡文涛. HOC 与 EMD 结合的齿轮损伤检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 729~735.
- [3] 邵忍平, 黄欣娜. 基于高阶累积量的齿轮系统故障检测与诊断[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 161~168.
- [4] 蔡奇志, 黄宜坚. 自回归三谱切片研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2).
- [5] Hinich Melvin J. Higher-order cumulants and cumulants spectra [J]. Circuits Systems and Signal Processing, 1994, 13(4): 391~420.
- [6] M R Raughveer. Time-domain approaches to quadratic phase coupling estimation Automatic Control [G]. 1990. AC 35: 48~56.
- [7] 张 严, 王树勋. 非线性相位耦合的切片谱分析方法[J]. 电子学报, 1998, 26(10): 104~109.
- [8] 张 严, 王树勋, 李生红. 二次相位耦合的  $1 \frac{1}{2}$  维谱分析 [J]. 电子学报, 1996, 24(04): 109~112.
- [9] 吴正国, 夏 立, 尹为民. 现代信号处理技术: 高阶谱、时频分析与小波变换 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [10] 吴文兵, 黄宜坚, 陈文彦. 基于机械故障诊断的高阶谱耦合性能分析[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 130~134.
- [11] 唐礼忠, 杨承祥, 潘长良. 大规模深井开采微震监测系统站网布置优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 20~36.
- [12] 王春来, 吴爱祥, 刘晓辉. 深井开采微震活动容量维 Df 变化特征[J]. 北京科技大学学报, 2010(11).

作者简介: 吴文兵(1968-), 男, 博士, 副教授; 主要研究方向: 信号处理, 已发表论文 10 余篇。