

## 320 kA 系列预焙铝电解槽槽电压波动的频谱解析

唐 骞<sup>1,2</sup>, 周子民<sup>1</sup>, 单 峰<sup>1</sup>, 李贺松<sup>1</sup>, 蒋科进<sup>2</sup>, 郭 洁<sup>1</sup>

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083;  
2. 中国铝业公司广西分公司 电解厂, 531400)

**摘 要:** 通过大量收集 320 kA 系列预焙铝电解槽典型槽况下的槽电压波动数据, 利用快速傅里叶变换(FFT)以及功率谱(PSD)估计技术提取槽电压波动的特征谱峰。采用参数估计法进行 PSD 估计, 并将槽电压波动的小波包分析结果和频谱分析结果进行比较。研究表明: 不同的参数估计法得到趋于一致的频谱分析结果, 正常槽只有 1 个尖锐谱峰, 对应于阳极下熔融氧化铝涌动的特征峰, 其他故障槽都有 2 个特征谱峰, 即 1 个主峰和 1 个次峰, 碳渣槽的主峰仍然对应着阳极下熔融氧化铝涌动特征峰, 次峰对应悬浮碳渣的涌动特征峰; 铝液波动槽主峰对应铝液波动特征峰, 次峰对应着熔融氧化铝涌动的特征峰; 频谱分析相对于小波包分析具有算法简单、耗时少、物理意义明确等特点, 在槽况在线诊断系统的大规模推广中具有优势。

**关键词:** 铝电解槽; 电压波动; FFT; 频谱分析; PSD 估计; 铝液波动; 小波包

中图分类号: TF821; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)02-0299-06

## Spectral analysis of cell voltage fluctuation in 320 kA pre-baked aluminum reduction cells

TANG Qian<sup>1,2</sup>, ZHOU Jie-min<sup>1</sup>, SHAN Feng<sup>1</sup>, LI He-song<sup>1</sup>, JIANG Ke-jin<sup>2</sup>, GUO Jie<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. Aluminum Electrolytic Plants, Guangxi Branch of Aluminum Corporation of China, 531400, China)

**Abstract:** An awful lot of data of cell voltage fluctuation under typical working conditions were collected, and a method based on fast fourier transform (FFT) and power spectral density (PSD) estimation was put forward to extract the spectral characteristics of cell voltage. Parametric methods were employed in PSD estimation. Spectral analysis was also compared with wavelet packet analysis. The results reveal that spectra obtained by different parametric methods are similar. The spectra of normal cells' voltage have only one noticeable lobe due to fluctuation of molten alumina at anodes, while spectra of other abnormal cells have one mainlobe and one sidelobe. In cells with carbon in bath the spectral mainlobe of cell voltage is still due to the fluctuation of molten alumina at anodes and the sidelobe is due to the fluctuation of carbon in bath; in cells with metal pad wave, the spectral mainlobe is due to metal pad waving and the sidelobe is still due to the fluctuation of molten alumina at anodes. Compared with wavelet packet analysis, spectral analysis is simpler and takes less time in calculation, which is a big merit in the large-scale application of online diagnosis systems of working conditions in aluminum reduction cells.

**Key words:** aluminum reduction cell; voltage fluctuation; FFT; spectral analysis; PSD estimation; metal pad wave; wavelet packet

槽电压波动是铝电解槽生产不稳定的最直观体现, 目前槽电压是控制铝电解槽生产的重要参数。通

过槽电压波动曲线可直观地发现槽子的不稳定状况。目前, 国内对槽电压波动的研究较多停留在应用层面

收稿日期: 2008-04-25; 修回日期: 2008-07-25

基金项目: 国家教育部博士点基金资助项目(20010533009)

通信作者: 唐 骞(1964-), 男, 湖南会同人, 博士, 教授级高工, 从事热工设备仿真与优化研究; 电话: 0776-5802500; E-mail: gx\_tang@gx.chalco.com.cn

上,即利用经验来分析槽电压波动曲线进而处理槽电压的波动。国内的研究工作主要有:对电压波动的原因进行了探讨<sup>[1]</sup>;从保持工艺技术条件、提高换极质量、控制阳极效应等方面着手解决槽电压大幅度波动的问题<sup>[2]</sup>;运用电压波动信息处理电压波动问题和优化电解工艺技术参数<sup>[3]</sup>;将电压信号作为软测量信号开发极距在线显示系统<sup>[4]</sup>。另外,丁蕾等<sup>[5]</sup>在实验室对槽电阻信号进行了频谱分析,认为槽电阻和系列电流的主频段分别为 0.002~0.04 Hz 和 0.05~0.2 Hz。李劫等<sup>[6]</sup>还将槽电阻信号的针振强度作为阳极效应智能预报的辅助判据。这些研究对认识槽电压波动的原因、在生产上如何根据经验有效地处理槽电压大幅度波动等方面起了一定的作用,但他们对槽电压波动的特征信息提取尚未进行深入的研究,也没有充分挖掘出槽电压波动信号中所包括的槽子运行工况的动态特性等有价值的信息。国外对槽电压波动的研究从实验室小型铝电解槽开始,主要观察和分析了阳极下气泡对槽电压波动的影响<sup>[7-8]</sup>。这些实验室研究可从机理上分析气泡对槽电压的影响,为在生产操作中辨别槽电压波动原因并做出相应处理提供参考。国外还有学者对电压波动进行较详细的分类<sup>[9-10]</sup>,并对槽电压信号进行低通滤波处理,分离出槽电压信号的一些特征,挖掘了槽电压信号的一些动态信息。

本文作者通过大量提取某铝厂 320 kA 系列预焙铝电解槽实际生产的数据,结合自身工作经验,归纳总结出该系列电解槽几种典型工作状态的电压波形,利用快速傅里叶变化(FFT)和参数谱估计方法对典型电解槽工作状态的电压波形进行 PSD 分析,以便为正确判断 320 kA 铝电解槽的运行状态、提取故障典型特征从而更好地控制电解槽生产的稳定性提供可靠依据。

## 1 槽电压信号的构成

铝电解槽的槽电压  $V$  组成为<sup>[11]</sup>:

$$V = E_0 + \eta_{SA} + \eta_{CA} + \eta_{CC} + I(R_A + R_B + R_C + R_X) \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为电解质熔体中  $Al_2O_3$  的理论分解电压, V;  $\eta_{SA}$  为阳极反应过电压, V;  $\eta_{CA}$  为阴极表面的浓度扩散电压, V;  $\eta_{CC}$  为阴极过电压, V;  $R_A$  为阳极电阻,  $\Omega$ ;  $R_B$  为电解质熔体电阻,  $\Omega$ ;  $R_C$  为阴极电阻,  $\Omega$ ;  $R_X$  为热平衡体系之外的母线电阻,  $\Omega$ ;  $I$  为系列电流, A。

由式(1)可以发现,槽电压  $V$  是一个可以反映全槽

状态的物理量,而且槽电压也能很方便地进行在线检测,所以,通过槽电压来分析槽子的运行状态是一种快捷、方便且可靠性较高的方法。

## 2 电压波动信号处理的算法

### 2.1 FFT 算法和频谱分析概述

离散时间傅里叶变换(DFT)是数字信号处理的最基本工具。DFT 最常用的算法称为快速傅里叶算法(FFT),它是一种可节省大量计算时间的 DFT 算法。FFT 变换以及其逆变换按下面的公式计算:

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) \exp\left[-j2\pi(k-1)\left(\frac{n-1}{N}\right)\right], (1 \leq k \leq N); \quad (2)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) \exp\left[-j2\pi(k-1)\left(\frac{n-1}{N}\right)\right], (1 \leq n \leq N). \quad (3)$$

其中:  $j$  为虚数单位;  $x(n)$  为信号;  $X(k)$  为其 FFT 变换;  $n$  为信号长度;  $N$  为 FFT 的长度。

进行频谱分析的目的就在于用有限的数据在频域上描述信号中所含的能量分布情况。常用的频谱分析方法可以分为以下 3 类:非参数法,参数法,子空间法。在非参数法中,PSD 直接通过信号自身进行估计。子空间法也被称为高分辨率或超分辨率的方法。它们是基于相关矩阵的特征分析或特征分解得到信号的频率成分。参数法也称为 AR(Autoregressive)谱分析法,它并不直接从数据本身进行 PSD 估计,而是事先设计一个由白噪声驱动的线性系统,此线性系统的输出就是所要分析的信号,然后,对线性系统的参数进行估计。由于实际应用中期望能够非常迅速地利用槽电压的波形分析出槽子的运行状态,因此,希望利用较短的信号长度获得精确的谱分析结果。而经典的非参数方法在短信号的频谱分析时,往往不能获得精确的结果。此外,虽然子空间法被称为超分辨的方法,但由于实际电解槽运行所含的波动信息显然不具备简单的正弦信号的特征,所以,运用它们在分析铝电解槽电压波动信号的频谱时,并不能获得比参数法更好的结果,同时,由于子空间法相对于参数法算法更复杂,故也不采用。

### 2.2 AR 谱分析的算法

#### 2.2.1 AR 谱估计的 Yule-Walker 法

AR 谱估计的 Yule-Walker 法通过一个信号的自相关函数的有偏估计来计算 AR 参数,此方法将一个线性自回归模型作用于信号,通过最小二乘方式最小化

向前预测误差(基于输入序列的所有观测值), 这样得到 Yule-Walker 方程。Yule-Walker 方程可以通过 Levinson 方法进行有效求解, Levinson 方法利用了自相关矩阵的 Toeplitz 结构。

### 2.2.2 AR 谱估计的 Covariance 法及修正 Covariance 法

AR 谱估计的 Covariance 法是基于最小化向前预测误差得到的, 而修正的 Covariance 法是基于最小化向前与向后预测误差得到的。Covariance 方法(或无窗口法)将一个通过最小二乘法最小化向前预测误差(基于信号的因果执行的)AR 线性预测滤波模型作用于信号。它得到的谱估计是此 AR 模型的频率响应幅值的平方。

AR 谱估计的修正 Covariance 法通过最小二乘法同时最小化向前与向后的预测误差(基于输入信号的因果观测值), 将一个自回归的(AR)线性预测滤波模型用于信号, 得到的谱估计也是此 AR 模型的频率响应的幅值的平方。

### 2.2.3 AR 谱估计的 Burg 方法

AR 谱估计的 Burg 方法是基于满足 Levinson-Durbin 递归条件下, 同时最小化向前以及向后的预测误差。Burg 方法与其他谱估计方法不同, 它避免了计算自相关函数, 代之以直接估计反射系数。Burg 法的优点是区分低噪声信号中相隔很近的信号, 并且估计很短的信号时, 估计值与真实值非常接近。另外, Burg 方法确保了一个稳定的 AR 模型, 并能有效地进行计算。采用 Burg 方法对较短的数据也能得到较高的精度。

## 3 样本数据的获取

### 3.1 数据来源及预处理

文中所用的数据均来源于中铝广西分公司 320 kA 系列预焙铝电解槽生产时的计算机实时监测数据, 采样频率为 1 Hz, 分析的频率范围为 0~0.5 Hz。所有样本均在系列电流恒定以及排除人为操作干扰的情况下获取, 避免了人为因素如设定电压变化、升降系列电流、换极、出铝等对槽电压的频谱构成的影响, 保证了频谱分析的可靠性。

数据预处理是进行信号分析前的一个非常重要的步骤, 它能提高分析结果的可靠性。在进行槽电压波动频谱分析前, 由于并不了解其信号的频率构成, 只对样本数据进行去均值处理, 这样, 不仅能够保留所有的信息, 而且可以避免在 0 频率附近出现一个很大的峰值而影响频谱分析<sup>[5]</sup>。

### 3.2 典型情况的槽电压波形

选取 320 kA 电解槽的 3 种典型工作状态的电压波形进行频谱分析。这 3 种状态分别为: 正常槽, 铝液波动槽和阳极下悬浮碳渣槽, 它们的电压波形分别如图 1~3 所示。

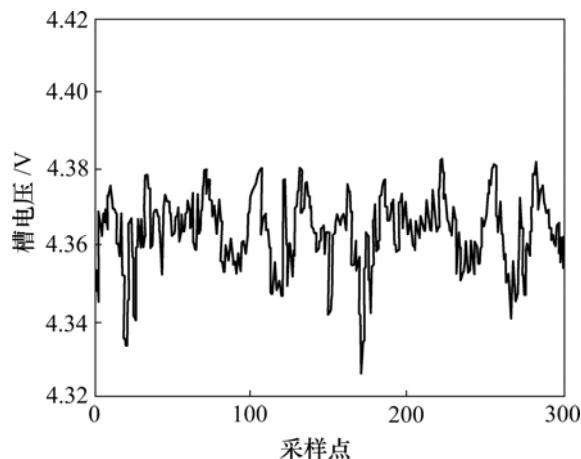


图 1 正常槽槽电压波动

Fig.1 Fluctuation of cell voltage of normal cell

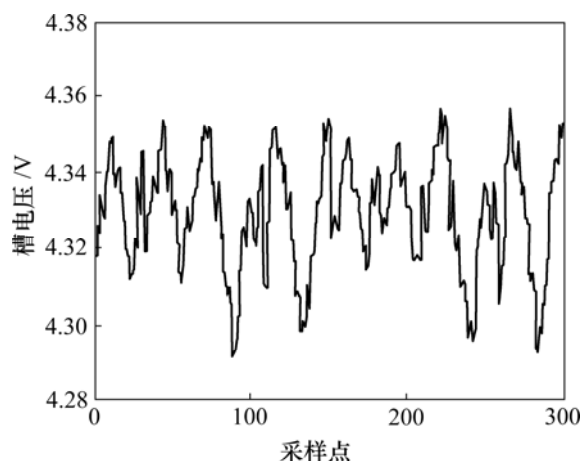


图 2 铝液波动槽槽电压波动

Fig.2 Fluctuation of cell voltage in cells with metal pad wave

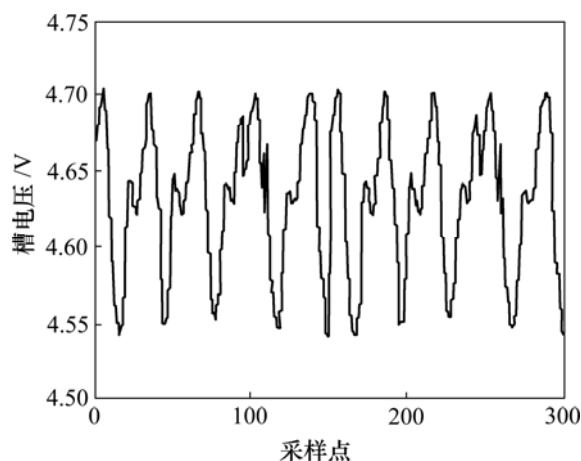


图 3 碳渣槽槽电压波动

Fig.3 Fluctuation of cell voltage in cells with carbon in bath

### 4 频谱分析的结果分析

采用 4 种 AR 谱估计法估计不同槽况时电压波动的功率谱, 通过研究发现这 4 种方法都能较好地估计电压波动的功率谱, 得到的结果也一致, 只是谱峰的频率稍有不同, 但在工程实际应用所要求的精度范围内可以忽略。当然, 采用不同的谱估计方法时, 最优的全极点模型阶数会稍有区别。这里只给出正常槽况下这 4 种方法得到的 PSD 估计图, 如图 4~7 所示(其余槽况下类似)。同时, 给出 Burg 法估计的其他槽况的 PSD 图(图 8~9), 其中, Burg 法谱估计的阶次  $p$  根据文献[12]所提供的最终预测误差准则确定。该准则的计算公式为:

$$e(k) = \rho_k \frac{N + (k + 1)}{N - (k - 1)} \quad (4)$$

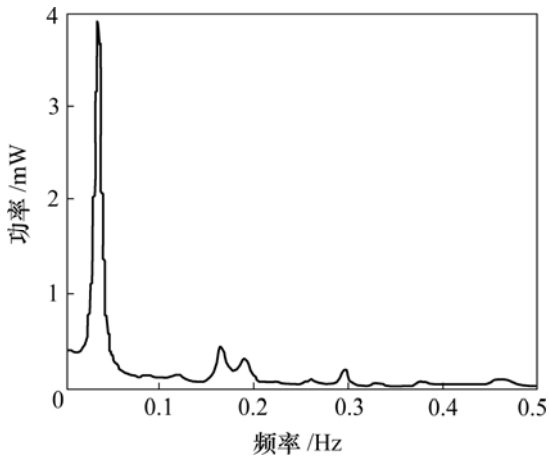


图 4 Burg 法估计的 PSD 图(30 阶)

Fig.4 PSD estimation by Burg method (30th order)

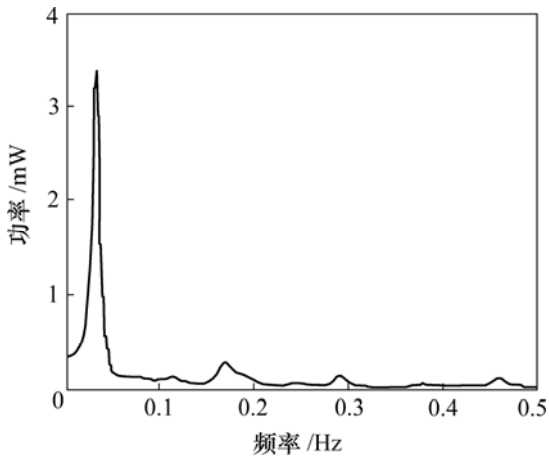


图 5 Covariance 法估计的 PSD 图(25 阶)

Fig.5 PSD estimation by using Covariance method (25th order)

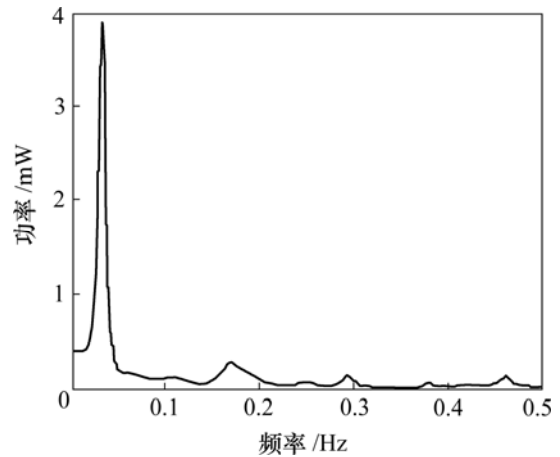


图 6 修正 covariance 法的 PSD 图(27 阶)

Fig.6 PSD estimation by modified covariance method (27th order)

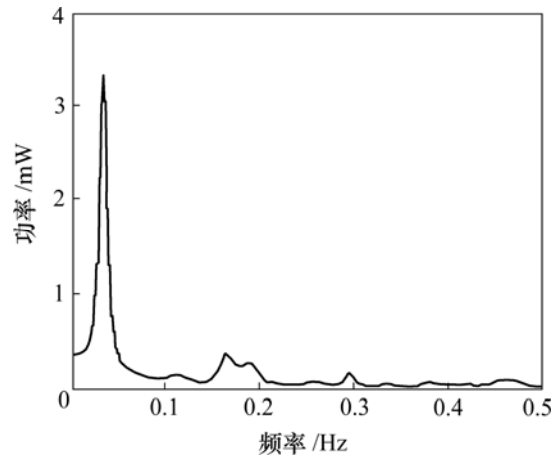


图 7 Yule AR 法估计的 PSD 图(29 阶)

Fig.7 PSD estimation by Yule AR (29th order)

其中:  $e(k)$ 为预测误差;  $\rho_k$ 为最小预测误差功率;  $N$ 为数据  $x(n)$ 的长度,  $k=1, 2, \dots, N$ 。最终选择的模型阶次为 30。

图 8 和图 9 所示分别为碳渣槽和铝液波动槽的槽电压波动的功率谱。可见, 所有的功率谱都具有尖锐谱峰, 且除正常槽只有 1 个很高的尖锐峰以外, 其他槽况下的电压波动的功率谱都具有 2 个尖锐谱峰。在正常槽的 PSD 图中, 发现这个单独的尖锐谱峰位于 0.03~0.04 Hz。这与丁蕾等的研究结果<sup>[5]</sup>以及实际经验结果<sup>[13]</sup>基本一致, 不同之处在于, 所研究的具体槽型以及系列电流不同, 频率的范围稍有区别。这个特征谱峰一般认为是由于阳极下熔融氧化铝在电磁场的作用下周期性地阳极下循环涌动而引起极小的电压振动, 其周期为 30 s 左右<sup>[14]</sup>, 对应的频率则为 0.03 Hz

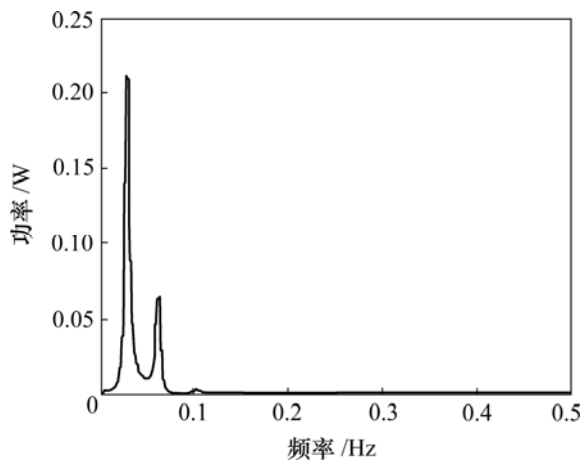


图 8 Burg 法估计的碳渣槽 PSD 图

Fig.8 PSD estimation of cells with carbon in bath by Burg method

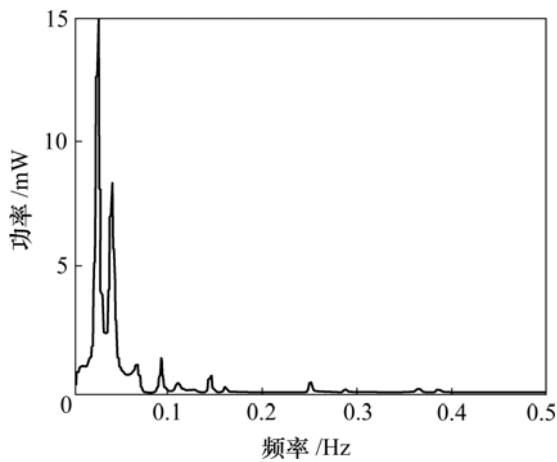


图 9 Burg 法估计的铝液波动槽的 PSD 图

Fig.9 PSD estimation of cells with metal pad wave by Burg method

左右, 与作者的研究结果吻合。从图 8 可以发现, 这个主谱峰仍然存在, 但是, 在更高的频率(0.06~0.07 Hz)处出现了另一个较为明显的次谱峰, 一般认为, 这个谱峰就是阳极下悬浮碳渣循环涌动引起的电压波动导致的特征谱峰。图 9 所示为铝液波动槽槽电压的 PSD

图, 可以发现铝液波动槽也含有 2 个谱峰, 即 1 个主峰和 1 个次峰, 此时, 主峰变成了铝液波动的特征峰, 其频率为 0.02 Hz 左右, 说明此类槽铝液波动的周期约为 50 s, 这与李贺松对同类型的槽的研究结果一致<sup>[14]</sup>。次峰就是正常槽的主峰, 依然对应于熔融氧化铝在阳极下涌动的特征峰。

### 5 频谱分析与小波包分析结果的比较

采用文献[15]中分析方法将槽电压的波动信号进行小波包分析, 以提取波动信号中的特征信息。然后, 用能量方式表示小波包分解结果得到电压信号的小波包能量谱, 并构造了各种槽况下电波动压信号的能量特征向量  $T=[E_{30}, E_{31}, E_{32}, E_{33}, E_{34}, E_{35}, E_{36}, E_{37}]$ 。表 1 所示为小波包分解得到的槽状态与其能量特征向量的对应关系。

从表 1 可知, 频谱分析和小波包分析都能够很好地对文中所研究的槽况的槽电压波动信号特征进行提取, 从而都能够很好地识别槽况。频谱分析在频域内对信号进行分析, 得到的是信号的频率构成, 物理意义十分明确, 同时, 能够很明显地揭示铝电解槽在频域的一些深层特征。例如, 从文中研究的样本看, 得到的正常槽的特征谱峰的频率刚好对应阳极下熔融状态的氧化铝循环涌动的频率, 这个频率在实际生产中是无法精确计算和精确测量的, 但通过对电压信号的频率成分就能得到。同时, 通过对铝液波动引起的电压信号的频谱分析, 也能精确地得到铝液波动的频率。用小波包得到的能量特征向量的物理意义没有频谱分析所得的物理意义那么直观。另外, 从算法的简易程度以及所需的时间来看, 频谱分析的算法要比小波包分析的算法简单得多, 耗时也要短得多。在硬件投入上, 使用频谱分析进行槽况诊断的系统比使用小波包分析进行槽况诊断的系统节约成本, 在大规模的工业应用中, 这将是一个巨大的优势。

表 1 槽况与电压波动能量特征向量参数对应表

Table 1 Working conditions and characteristic vectors parameters of voltage fluctuation

槽况	$E_{30}$	$E_{31}$	$E_{32}$	$E_{33}$	$E_{34}$	$E_{35}$	$E_{36}$	$E_{37}$
正常	75.299	0.044	0.031	0.040	0.027	0.027	0.027	0.030
碳渣槽	80.043	0.236	0.057	0.087	0.040	0.038	0.041	0.036
铝液波动	74.976	0.072	0.032	0.047	0.023	0.024	0.026	0.027

## 6 结 论

a. 采用 Yule-Walker 法, Covariance 法, 修正 Covariance 法及 Burg 法等 4 种 AR 谱参数估计法得到趋于一致的 PSD 结果。

b. 每一种槽况都对应着一定的特征谱峰, 正常槽只有 1 个尖锐的特征谱峰(0.03~0.04 Hz), 与此类槽阳极下熔融氧化铝的涌动频率对应。

c. 故障槽具有 2 个特征谱峰(1 个主峰和 1 个次峰): 碳渣槽的主峰与阳极下熔融氧化铝的涌动对应, 次峰对应着阳极下悬浮碳渣的涌动频率; 铝液波动槽的主峰为铝液波动的特征峰(0.02 Hz 左右), 次峰对应着阳极下熔融氧化铝涌动的特征峰。

d. 傅里叶分析与小波包分析相比具有算法简单, 耗时少, 得到的结果物理意义明确等优点, 在铝电解槽在线诊断系统工业大规模推广中具有一定优势。

### 参考文献:

- [1] 王绍鹏, 马松堂. 280 kA 电解槽针振初探[J]. 轻金属, 2002(12): 31-34.  
WANG Shao-peng, MA Song-tang. Preliminary discussion on cell noise of 280 kA pots[J]. Light Metals, 2002(12): 31-34.
- [2] 黄晓明. 200 kA 预焙铝电解槽电压摆的早期预防与处理[J]. 轻金属, 2003(5): 23-26.  
HUANG Xiao-ming. Early prevention and treatment of voltage fluctuation of 200 kA pre baked anode pot[J]. Light Metals, 2003(5): 23-26.
- [3] 孙志宏, 任万益, 李祥祺, 等. SY190 系列预焙阳极铝电解槽电压波动信息的应用实践[J]. 轻金属, 2005(7): 32-35.  
SUN Zhi-hong, REN Wan-yi, LI Xiang-qi, et al. The practical of application using the cells' voltage fluctuation information in the SY190 pre-baked cells[J]. Light Metals, 2005(7): 32-35.
- [4] 李贺松, 殷小宝, 周萍, 等. 铝电解槽极距在线可视化系统的开发与应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(5): 96-103.  
LI He-song, YIN Xiao-bao, ZHOU Ping, et al. Development and application of real time online visual system of anode-cathode-distance for aluminum reduction cells[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(5): 96-103.
- [5] 丁蕾, 曾水平, 曾铮. 350 kA 铝电解槽槽电阻信号的频谱分析[J]. 仪器仪表与检测技术, 2005, 24(12): 68-70.  
DING Lei, ZENG Shui-ping, ZENG Zheng. Spectral analysis of cell resistance signals in 350kA aluminum reduction cells[J]. Instrumentation and Measurement, 2005, 24(12): 68-70.
- [6] 李劫, 丁凤其, 李民军, 等. 预焙铝电解槽阳极效应的智能预报方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2001, 32(1): 32-35.  
LI Jie, DING Fen-qi, LI Min-jun, et al. Intelligent anode effect prediction method for pre-baked anode aluminum reduction cells[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2001, 32(1): 32-35.
- [7] XUE Ji-lai, Harald A. Bubble behavior-cell voltage oscillation during aluminium electrolysis and the effects of sound and ultrasound[C]//Light Metals. Pennsylvania, 1995: 265-271.
- [8] Laszlo I K, Poncsak, S. Effect of the bubble growth mechanism on the spectrum voltage fluctuation in the reduction cell[C]//Light Metals. Pennsylvania, 2002: 217-223.
- [9] Banta L, DAI Cong-xia, Biedler P. Noise classification in the aluminum reduction process[C]//Light Metals. Pennsylvania, 2003: 431-435.
- [10] Banta L, Biedler P, DAI Cong-xia. Decomposition of Voltage Signals[C]//Light Metals. Pennsylvania, 2002: 365-370.
- [11] 冯乃祥. 铝电解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
FENG Nai-xiang. Aluminum electrolysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [12] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
HU Guang-shu. Digital signal processing: Theory, algorithm and accomplishment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [13] 单保录, 李燕萍. 槽电压振动解析[J]. 世界有色金属, 2001(11): 33-35.  
SHAN Bao-lu, LI Yan-ping. Analysis of cell voltage vibration[J]. World Nonferrous Metals, 2001(11): 33-35.
- [14] 李贺松. 大型铝电解非稳态非均一模型及关键极节能技术研究[D]. 长沙: 中南大学能源科学与工程学院, 2005.  
LI He-song. Research for aluminum reduction cells on unsteady heterogeneous models and technology of energy saving by key anode[D]. Changsha: School of Energy Science and Engineering, Central South University, 2005.
- [15] LI He-song, MEI Chi, ZHOU Nai-jun. Diagnosis of working conditions of an aluminum reduction cell based on wavelet packets and fuzzy neural network [J]. Chemical Engineering and Processing, 2006, 45(12): 1074-1080.