

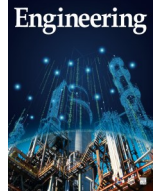


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
AI Energizes Process Manufacturing—Article

## 基于子带瞬时能量谱的铝电解槽电压槽况敏感频域分段方法

曾朝晖<sup>a,b</sup>, 桂卫华<sup>a</sup>, 陈晓方<sup>a,\*</sup>, 谢永芳<sup>a</sup>, 张红亮<sup>c</sup>, 孙玉波<sup>a</sup>

<sup>a</sup> School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China

<sup>b</sup> Key Laboratory of Intelligent Computing & Information Processing, Ministry of Education, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China

<sup>c</sup> School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 12 July 2020

Revised 16 October 2020

Accepted 23 November 2020

Available online 28 July 2021

#### 关键词

子带瞬时能量谱

槽况敏感频段

频域分段

铝液异常波动

铝电解

### 摘要

槽电压是广泛使用且可在线测量的铝电解槽信号,多种电解槽槽况分析和控制用参数由槽电压计算得到。槽电压频域分段是设计获取这些参数的数字滤波器通带的依据。在对槽电压定性分析的基础上,本文提出子带瞬时能量谱(sub-band Instantaneous energy spectrum, SIEP),并用其对多种槽况下槽电压的频域特性进行定量表示,最终给出了槽电压槽况敏感频域分段方法。该频域分段方法将槽电压有效频段划分为低频信号区[0, 0.001] Hz和低频噪声区[0.001, 0.050] Hz;将低频噪声区再细分为[0.001, 0.010] Hz的铝液异常波动频段和[0.01, 0.05] Hz的次低频噪声频段。与基于经验模态分解的瞬时能量谱比较,SIEP能更精细地表示槽电压有效频段内任意频段的能量随时间变化规律。该槽电压频域分段方法对槽况更敏感,可更细致地获取在线槽况信息,为工业电解槽槽况监测和控制决策提供可靠、准确的在线依据。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

槽电压是广泛用于铝电解槽控制系统的可在线连续测量信号。由槽电压解析得到的滤波电压、平滑电压、斜率、针摆和针振是铝电解槽控制系统进行氧化铝浓度控制[1-3]、槽温控制[4]、槽稳定性控制和槽况分析[5-7]必不可少的参数。虽然槽电压是结构简单的时序数据,但包含了丰富的不同频率的槽况信息。这些信息包括:氧化铝浓度等状态信息[8-11];机械动作或人工操作等产生的外界干扰;铝液波动(metal pad rolling, MPR)、系列电流波动(current oscillations, CO)、阳极气体排放、阳极故障等引起的槽噪声[10-12]。这些不同频率的信息叠加在一起,

最终表现为波动形式复杂的槽电压。对应于氧化铝浓度的槽电压低频分量用于计算斜率[2,13-14];与铝液运动相关的槽电压低频噪声用于计算针摆;与阳极问题相关的槽电压高频噪声用于计算针振[15-16]。槽电压频域分段是设计用于分离与这些状态信息、槽噪声和外界干扰等对应信号分量的数字滤波器通带的依据[17]。因此,合适的槽电压频域分段是设计准确获取在线槽况信息数字滤波器的基础,有利于得到更加准确的多种在线参数,能为槽况分析和控制决策提供可靠在线依据。

文献[1,18]依据经验和现场试验给出了滤波算法,滤波器通带的确定随意性较大,影响了以上各参数的准确性。从频域出发的相关研究工作较少,文献[10-11]采用

\* Corresponding author.

E-mail address: [xiaofangchen@csu.edu.cn](mailto:xiaofangchen@csu.edu.cn) (X. Chen).

快速傅里叶变换分别研究了160 kA、350 kA中间点式下料预焙槽的标准化槽电压的频谱,得到与氧化铝浓度、铝液波动和系列电流波动相关的频域分段。基于快速傅里叶变换的频谱分析方法,失去了感兴趣频率成分出现的时间信息,且易产生干扰槽电压频域分段的伪谱峰,进而影响频域分段的准确性。本文将文献[19-20]中基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和Hilbert变换的瞬时能量谱(instantaneous energy spectrum, IEP)称为EMD-IEP或EIEP。EIEP是将信号分解为多个本征模函数(intrinsic mode function, IMF),再计算每个IMF的Hilbert能量谱。虽然EMD可将信号分解成多个高、低频信号分量,但是EMD根据信号本身的局部极大值和极小值确定每个IMF,受信号个性特点影响较大。EIEP对具有共同性质的不同信号的共性表现能力有限,且很难体现指定频段内信号分量的能量变化。槽电压信号十分复杂,特别是在某些异常槽况下,振荡更加频繁。因此,EIEP并不适用于槽电压频域分段研究。

小波变换提供了对复杂非平稳信号的时频分析方法[21]。尺度图是一种在时间-频率平面上直观显示信号能量分布的技术[22-25],将尺度图用于槽电压频域分段的研究较少。本文结合机理知识,利用尺度图,将与信号的频率变化相对应的特点、频率变化发生的时间和引起频率变化的原因,用可视化的方式对多种代表性槽况对应的槽电压能量分布特点进行定性分析;在此基础上,提出了基于Hilbert变换和积分小波变换的子带瞬时能量谱(sub-band instantaneous energy spectrum, SIEP),并用其对槽电压能量分布进行定量表示,得到各槽况的敏感频段;再用槽况敏感频段指导频域分段,最终给出槽电压槽况敏感频域分段方法。

## 2. 多种槽况下标准化槽电压能量分布定性分析

槽电压主要由阳极电压、反电势、电解质电压、阴极电压和外线路电压等组成。其中,阳极电压中对槽电压影响较大的是由气膜电阻所致的过电压 $\pi_{\text{film}}$ 。由实验、热力学计算等可知,槽电压受氧化铝浓度、槽温、极距、电解质组分、阳极气泡和电解时电流密度等多因素影响。这些因素都随着槽况实时变化,且不能实时在线测量。当某种因素成为主导槽电压变化的主要因素时,槽电压变化表现出一些特定形式。因此,从工艺机理的角度,分析不同槽况与槽电压表现形式的对应关系,可为槽电压频域分段提供更加准确的依据。

通常用表观槽电压(阻)而不直接用采样槽电压作为

铝电解槽过程控制解析的主要信号,原因是采样槽电压跟随系列电流变化,而槽电压(阻)在理论上不随系列电流的变化而变化。因此,用表观槽电压(阻)作为主要解析信号能排除系列电流变化所产生的干扰。表观槽电阻 $R_0(k)$ 是由过程控制计算机依据一定的采样频率,用在线和同步采集的采样槽电压(sampling cell voltage, SCV) $U(k)$ 与采样系列电流 $I(k)$ 按照式(1)计算而得。

$$R_0(k) = \frac{U(k) - B}{I(k)} \quad (1)$$

式中, $B$ 为表观反电动势,一般设定为常数。由于电压的单位(mV或V)在工业生产中较直观,因此在大部分实际控制系统中,将槽电阻线性变换为具有相同内涵的“标准化槽电压”(normalized cell voltage, NCV)。 $U_0(k)$ 为 $k$ 时刻的标准化槽电压,则

$$U_0(k) = R_0(k)I_b + B = \frac{U(k) - B}{I(k)}I_b + B \quad (2)$$

式中, $I_b$ 是基准系列电流。

以下用400 kA铝电解槽的采样频率为0.1 Hz(有效频段为[0, 0.05] Hz)的标准化槽电压 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 和 $U_4$ 为例,分析讨论正常槽况(normal cell condition, NCD)、出铝操作后(after metal tapping, AMT)、阳极效应前(prior to anode effect, PAE)和系列电流剧烈波动时的标准化槽电压的时频特性。

### 2.1. 正常槽况下的标准化槽电压性质分析

对正常槽况下的 $U_1$ 进行时频分析[图1(a)]。在采集 $U_1$ 时,电解槽槽况正常[2,12,14],无任何出铝、换极、抬母线等常规操作,也无边加工等特殊操作,也不包含阳极效应等特殊槽况。图1(b)是有效频段[0, 0.05] Hz内 $U_1$ 的尺度图,图1(c)是放大的[0, 0.015] Hz内 $U_1$ 的尺度图。由图1可知:

(1)在整个有效频段[0, 0.05] Hz内,能量从低频到高频逐渐减少。在频段[0, 0.01] Hz内,能量较密集。

(2)频段[0, 0.001] Hz内有贯穿整个采样时间段的连续能量区。

(3)区别于[0, 0.001] Hz频段内的能量分布特性,频段[0.001, 0.010] Hz内的能量并不是连续贯穿整个时间轴,而是分别聚集在4个不同的局部能量聚集区。

(4)[0.01, 0.05] Hz频段内的能量较少,少于[0, 0.01] Hz频段内的能量,且分布特点明显不同于[0, 0.001] Hz和[0.001, 0.010] Hz频段内的能量分布。

由上述分析可知,在有效频段[0, 0.05] Hz内, $U_1$ 能量主要分布在频段[0, 0.01] Hz内;在有效频段内,频段

[0, 0.001] Hz、[0.001, 0.010] Hz 和 [0.01, 0.05] Hz 分别对应完全不同的能量分布形式。

## 2.2. 其他常见槽况

铝液波动对铝电解生产过程的稳定性和电流效率有重要意义。关于铝液波动机理研究, 不同学者提出了多种理论。重力波理论[26]认为: 外界扰动会产生一个重力波,

在没有磁场时, 重力波的能量逐渐变小, 最终消失; 当存在电磁场时, 电磁力会激发现有重力波, 产生新的重力波, 电磁力和重力波耦合起来最终造成电解质与铝液界面波动。文献[27]描述了水平电流和磁场间扰动与电解质和铝液界面间波动的关系。文献[28-29]中, 作者用浅水模型描述了铝液与电解质熔体的磁流体动力学 (magnetic

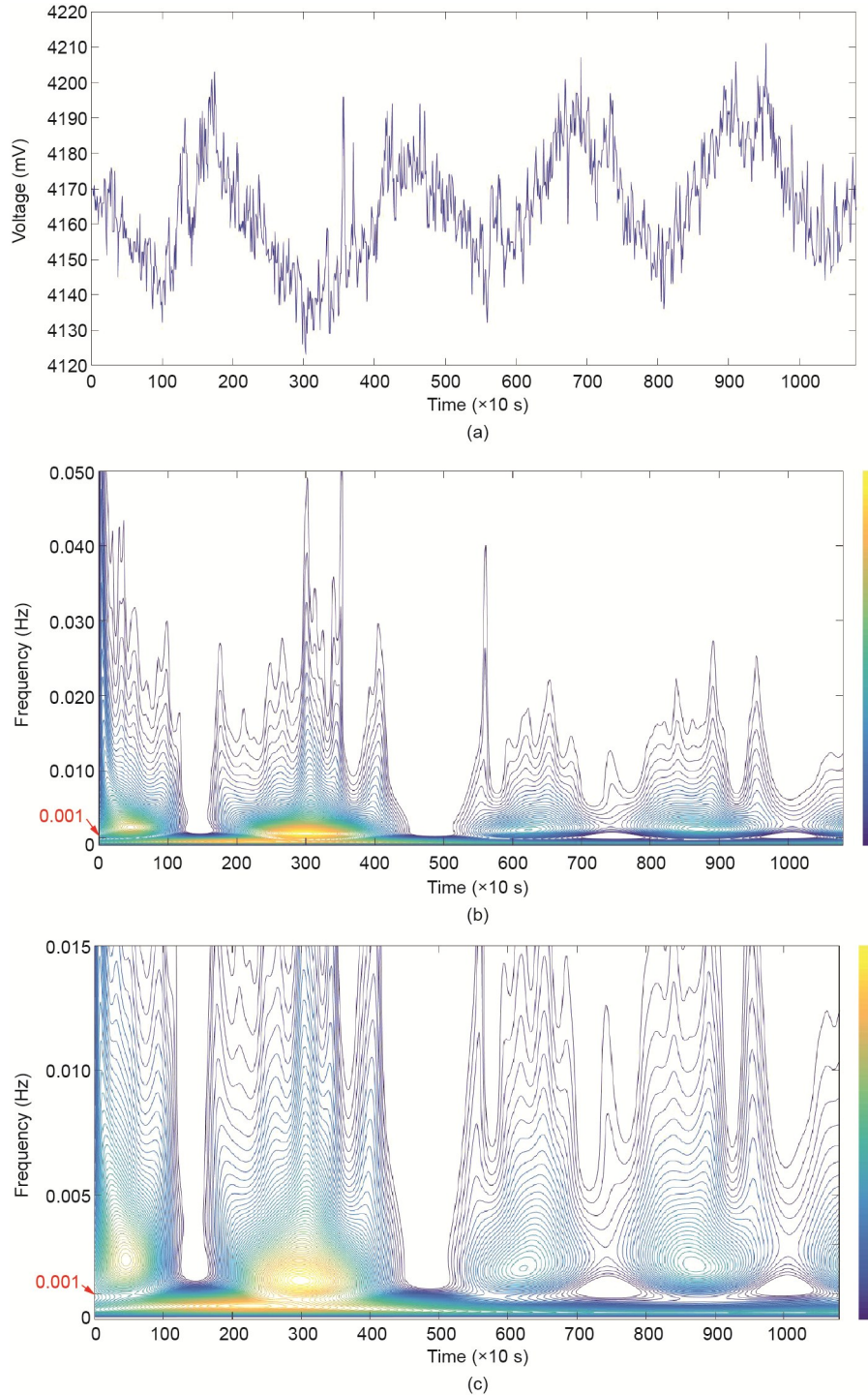


图1. 正常槽况下U1的时频分析。(a) U1; (b) [0, 0.05] Hz内的尺度图; (c) [0, 0.015] Hz内的尺度图。色柱的颜色由深到浅表示能量由低到高。0.001是本文频率分段的关键频率点。

hydro dynamic, MHD) 的不稳定性。根据MHD的不稳定性, 铝液同时受电磁力的推动和流体重力、黏性阻力的反作用。正常情况下, 这两种力达到平衡, 铝液以一定的水平速度和垂直变形在一定范围内波动。

如图2所示, i区域表示炭阳极; ii区域表示电解质和气泡混合区域; iii区域表示电解质层; iv区域表示铝液波动层; v区域表示铝液层; vi区域表示炭阴极。将ii、iii、iv所示区域称为极距(anode-cathode distance, ACD)层。铝液层(v区域)以及炭阴极(vi区域)视为阴极。目前, 工业槽的极距普遍控制在40~50 mm。文献[30]指出: 传统槽中铝液波动的范围为9~15 mm。电解槽内位置不同, 极距不同[31]。因此, 铝液波动引起的极距变化会直接体现在槽电压中。正常情况下, 槽电压在一个很小的范围内波动, 波动幅度通常为15~30 mV [32]。

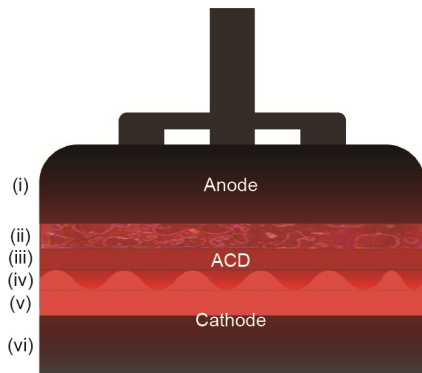


图2. 阳极下极距示意图。(i) 阳极; (ii) 电解质和气泡混合层; (iii) 电解质层; (iv) 铝液-电解质界面波动层; (v) 铝液层; (vi) 炭阴极。

当受到外界干扰或内部环境发生某些变化时, 铝液界面到阳极底掌的距离会随着铝液界面的异常波动而出现较大变化, 造成液面不稳定, 平衡被打破。此时, 槽电压也会出现特殊形式的波动。由于铝电解槽是一个高温、高腐蚀性的封闭体系, 很难直接观察和测定铝液异常波动(metal pad abnormal rolling, MPAR), 通常根据生产经验和电解槽发生的其他异常现象进行推测。因此, 为更好地设计能从正常化槽电压中分离出与铝液异常波动相关的信号分量的数字滤波器, 用于槽况分析, 有必要研究铝液异常波动所涉及的槽电压频段。

### 2.2.1. 阳极效应前的正常化槽电压性质分析

Haupin等[33]通过研究发现, 阳极气泡层的平均厚度为5 mm, 瞬时厚度可达20 mm, 由气膜电阻增加导致的额外压降为150~350 mV。另外, 气泡在阳极底部的滑移、侧部的上升运动, 以及在阳极边缘的脱离都能引起电解质/铝液熔体的波动。文献[34]报道了阳极的润湿性会对气

泡的上升行为起到不可忽视的作用。在润湿性较差的阳极上, 气泡全程附着在阳极侧壁, 始终存在气-液-固三相接触面。因此, 阳极效应前, 将要发生阳极效应的炭阳极与电解质之间的润湿性变差, 其气膜电阻大于润湿性较好的阳极, 导致电流重新分配。阳极电流分布不均引起水平电流增加, 导致“电-磁-流”连环变化, 使得熔体波动加剧。Li等[35]用阳极导杆等距压降测试观测到阳极效应前铝液波动波幅增大, 波动能量明显加大。因此, 阳极效应前, 出现由铝液异常波动引起的极距异常变化, 加之气膜电阻的增加, 共同导致了正常化槽电压能量异常变化。

正常化槽电压 $U_2$ 如图3(a)所示,  $U_2$ 的尺度图如图3(b)所示。在该段正常化槽电压 $U_2$ 后发生了60 s的闪烁阳极效应。由图3(b)可知, 在0.01 Hz以下频段,  $U_2$ 的能量分布与 $U_1$ 基本类似。不同的是在0.01 Hz以下频段内, 后两个能量聚集区的能量明显高于前两个能量聚集区。越接近阳极效应的发生, 电解槽内熔体波动加剧, 这体现在 $U_2$ 的尺度图中对应时段的能量也随之增强。

### 2.2.2. 出铝操作后的正常化槽电压性质分析

图4是正常化槽电压 $U_3$ 及其尺度图。由图4可得到与 $U_1$ 和 $U_2$ 基本相同的结论, 不同的是随着时间的推移, 在频段[0.001, 0.010] Hz内的4个能量聚集区域的能量逐渐减弱。正好与出铝操作引起的铝液异常波动随着时间的推移, 逐渐减弱现象对应[36]。对大量其他出铝操作后的正常化槽电压进行时频分析, 可得到类似结论。因此, 可以推断: ①正常化槽电压中包含了出铝操作及其引起的铝液异常波动信息; ②这些铝液异常波动信息主要包含在[0.001, 0.010] Hz频段内; ③随着出铝操作完成后的时间推移, 铝液波动渐渐平缓, 这体现为尺度图中能量聚集区的能量逐渐减弱。

### 2.2.3. 系列电流剧烈波动时的正常化槽电压性质分析

图5是采样系列电流 $I_4$ 、正常化槽电压 $U_4$ 、采样槽电压 $U_4'$ 及其尺度图, 图中标签(X:)表示横坐标值。图5(a)为 $U_4$ 对应的采样系列电流 $I_4$ ; 在图5(b)中, 红色曲线是 $U_4$ , 黄色曲线是 $U_4$ 对应的采样槽电压 $U_4'$ ; 图5(c)是采样槽电压 $U_4'$ 的尺度图; 图5(d)是正常化槽电压 $U_4$ 的尺度图。由图5(d)可知, 在频段[0, 0.001] Hz和[0.001, 0.010] Hz内, 可得到与 $U_1$ 、 $U_2$ 和 $U_3$ 类似的结论。 $U_4$ 在[0.01, 0.05] Hz内的能量分布明显不同于 $U_4'$ 、 $U_1$ 、 $U_2$ 和 $U_3$ , 具体分析如下:

(1) 图5(b)中,  $U_4'$ 波动明显强于 $U_4$ , 特别是在系列电流 $I_4$  [图5(a)]明显波动的时段。图5(c)、(d)

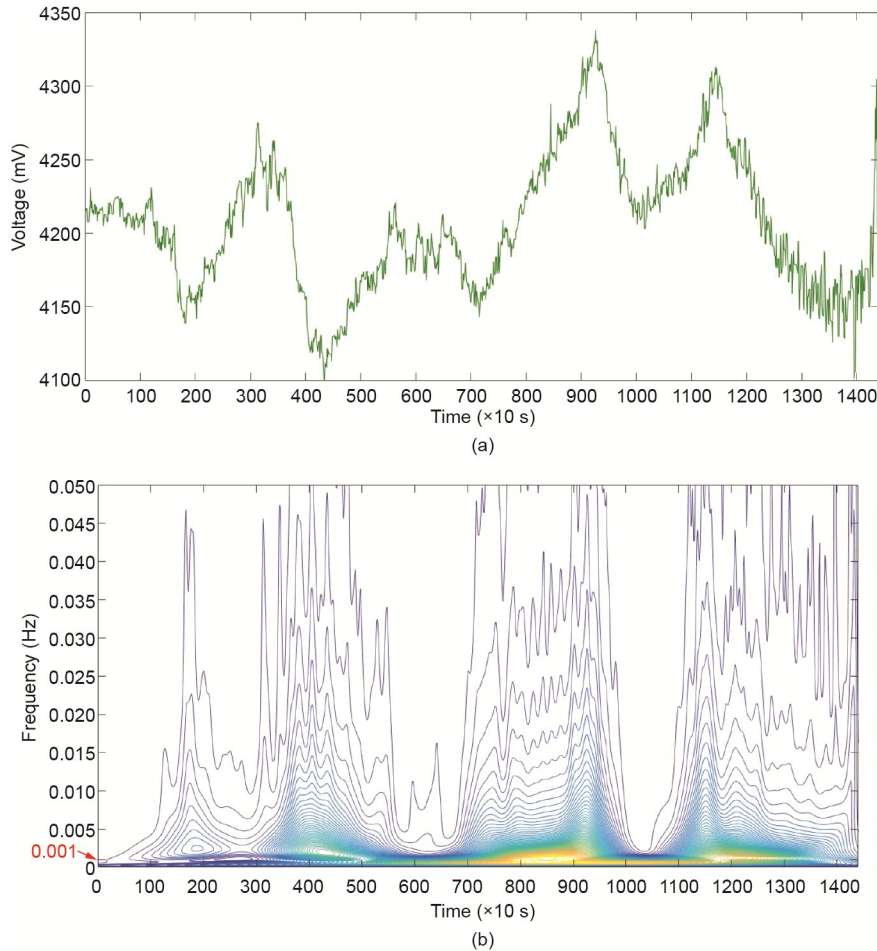


图3. 阳极效应前U2的时频分析。(a) U2; (b) U2的尺度图。色柱的颜色由深到浅表示能量由低到高。0.001是本文频率分段的关键频率点。

显示, 在2000~2500 s、4000~4500 s和5000~6500 s系列电流波动剧烈的时段, U4'的能量分布明显多于U4的能量分布。这说明使用式(2)可以有效去除槽电流波动对槽电压的影响。

(2) 比较图1(b)和图5(d)可知, U4在[0.01, 0.05] Hz内的能量分布明显多于U1。

(3) 图5(a)、(b)和(d)中的标签显示, 系列电流波动剧烈的时段对应的正常化槽电压值并没有明显波动, 但是在尺度图中仍有能量存在, 且这些能量主要分布在[0.01, 0.05] Hz频段内。

由上述分析可知, 式(2)可以在时域内有效去除系列电流剧烈波动时对正常化槽电压的影响, 但是由此引入的噪声在频域内产生的能量仍然存在。由此可以推断, 系列电流剧烈波动引入的噪声对应频段为[0.01, 0.05] Hz。这与文献[12]的结论基本一致。

### 2.3. 正常化槽电压性质定性分析总结

由以上对正常化槽电压U1、U2、U3和U4的性质分析可知:

(1) 正常化槽电压的能量在[0, 0.001] Hz、[0.001, 0.010] Hz和[0.01, 0.05] Hz三个频段内有明显不同的分布性质。

(2) 正常化槽电压在频段[0.001, 0.010] Hz内的能量分布规律符合阳极效应、出铝操作引起的铝液异常波动规律。因此, 可以初步推断正常化槽电压在[0.001, 0.010] Hz频段内的信号分量与铝液异常波动相关。

(3) 正常化槽电压在频段[0.01, 0.05] Hz内的能量异常发生的时间与系列电流异常波动时间一致。由此可知, 正常化槽电压在[0.01, 0.05] Hz频段内的信号分量与系列电流的剧烈波动相关。

## 3. 基于SIEP的正常化槽电压能量变化定量表示

在第2节, 结合机理知识和尺度图对多种槽况下的正常化槽电压的能量分布进行定性分析。根据能量分布特点的显著不同, 将正常化槽电压的有效频段初步分成[0, 0.001] Hz、[0.001, 0.010] Hz和[0.01, 0.05] Hz三个子频段。

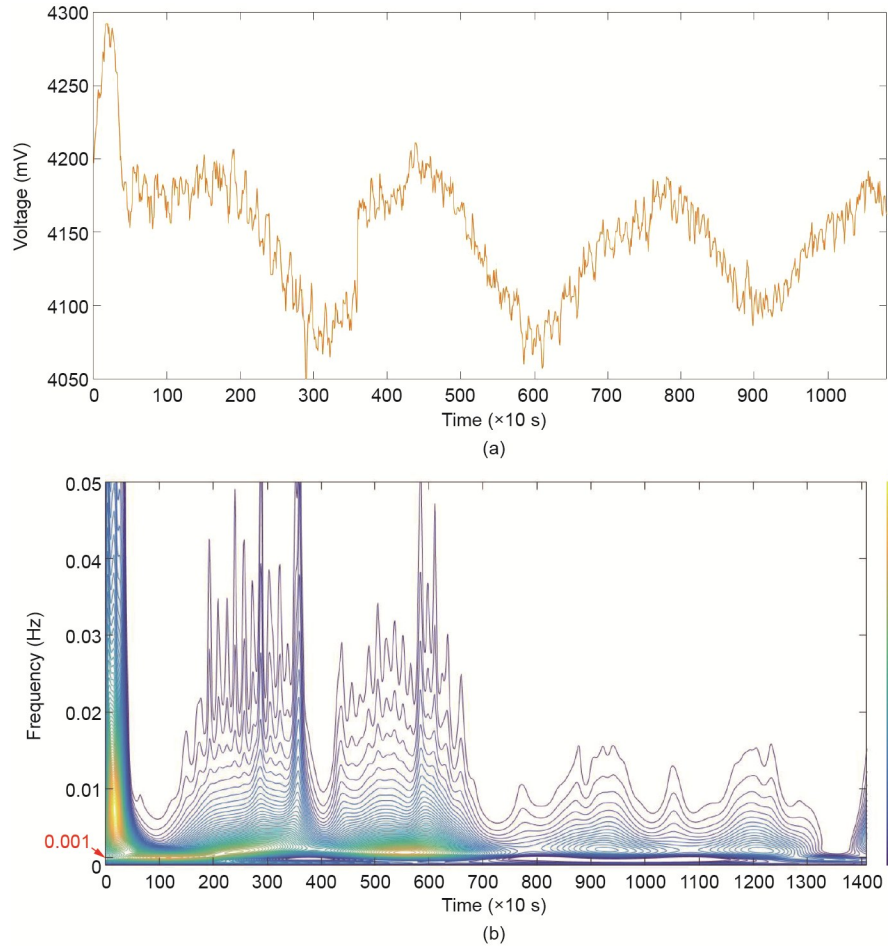


图4. 出铝后U3的时频分析。(a) U3; (b) U3的尺度图。色柱的颜色由深到浅表示能量由低到高。0.001是本文频率分段的关键频率点。

为了更好地分析正常化槽电压在各子频段内的能量分布与铝液波动、系列电流剧烈波动的关系，本节定义了SIEP，并用其对正常化槽电压U1、U2、U3和U4在各子频段内的能量进行定量表示。

### 3.1. SIEP的定义

设非平稳信号 $g(x)$ 的希尔伯特变换 $h_g(x)$ 的积分小波变换为 $W_g(b,a)=|a|^{-\frac{1}{2}}\int h_g(x)\cdot\overline{\psi(\frac{x-b}{a})}\cdot dx$ ，其中 $a,b,x\in\mathbb{R}$ ， $\mathbb{R}$ 为实数集； $\psi\in L^2(\mathbb{R})$ ，其中 $L^2(\cdot)$ 为平方可积函数，且 $\psi$ 满足 $2\pi\int|\xi|^{-1}|\hat{\psi}(\xi)|^2d\xi<\infty$ （ $\hat{\psi}$ 为 $\psi$ 的傅里叶变换， $\xi$ 为频率）。定义在频段 $[\omega_1,\omega_2]$ 内的SIEP  $P_{g|\omega_1}^{\omega_2}(t)$ 为：

$$P_{g|\omega_1}^{\omega_2}(t)=\int_{\omega_1}^{\omega_2}|W_g(t,f)|^2\cdot df \quad (3)$$

式中， $t$ 为时间变量； $f$ 为频率变量。

由以上定义可知，SIEP  $P_{g|\omega_1}^{\omega_2}(t)$ 为 $h_g(x)$ 的积分小波变换在频段 $[\omega_1,\omega_2]$ 内能量的时间边缘分布。SIEP表征了在指定频段内的能量随时间变化规律。

在EMD结束后，时间序列 $g(t)$ 被分解成 $n$ 个本征模函数IMF和一个残差分量 $r_n$ ，则 $g(t)$ 可表示为 $g(t)=\sum_{i=1}^nc_i(t,f_i)+r_n(t)$ ， $f_i\in[\omega_{i,1},\omega_{i,1}]$ ， $i=1,\dots,n$ 。其中， $n$ 为IMF的个数， $c_i$ 为第 $i$ 个IMF， $r_n$ 为残差[20]。设 $H_{i,g}(t)$ 为 $g(t)$ 的第 $i$ 个IMF  $c_i$ 的Hilbert瞬时能量谱[20]，则第 $i$ 个IMF  $c_i$ 的Hilbert瞬时能量谱EIEP为 $E_{i,g}(t)=H_{i,g}^2(t)$ 。

为了将本文提出的SIEP与EIEP进行比较，附录中图S1给出了正常化槽电压U1~U4的每个IMF对应EIEP  $E_{i,U1}(t)$ 、 $E_{i,U2}(t)$ 、 $E_{i,U3}(t)$ 和 $E_{i,U4}(t)$ 。由图S1可知，对于 $E_{i,U1}(t)$ 和 $E_{i,U3}(t)$ ， $i=1,\dots,7$ ；对于 $E_{i,U2}(t)$ 和 $E_{i,U4}(t)$ ， $i=1,\dots,8$ 。

### 3.2. [0.001, 0.010] Hz内的SIEP

图6(a)是正常槽况U1、阳极效应前U2和出铝操作后U3在[0.001, 0.010] Hz内的SIEP  $P_{U1|0.001}^{0.010}(t)$  (NCD, 蓝色曲线)、 $P_{U2|0.001}^{0.010}(t)$  (PAE, 绿色曲线)和 $P_{U3|0.001}^{0.010}(t)$  (AMT, 黄色曲线)。由图6(a)可知：

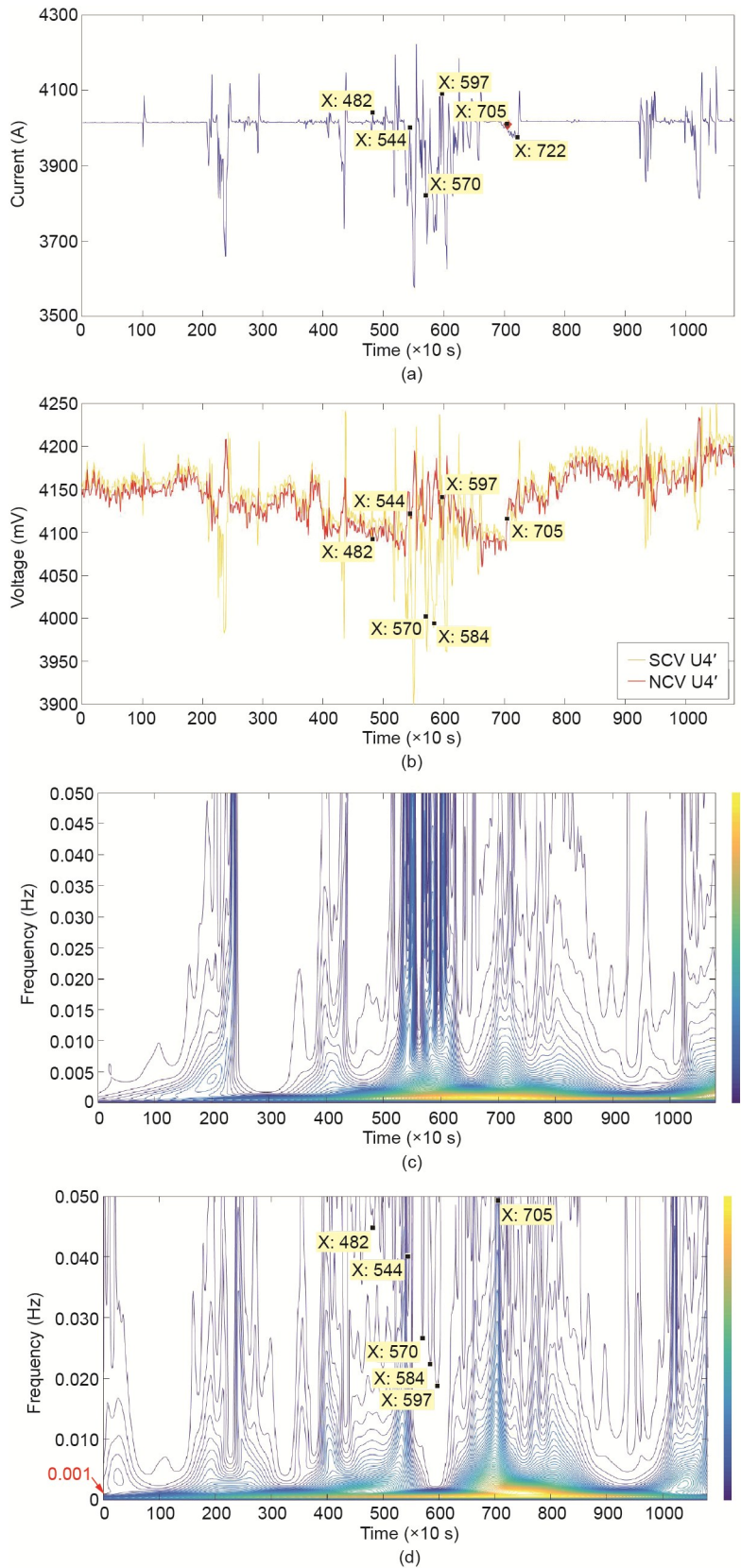


图5. 系列电流波动剧烈时的U4。(a) 系列电流I4；(b) U4和U4'；(c) U4'的尺度图；(d) U4的尺度图。色柱的颜色由深到浅表示能量由低到高。0.001是本文频率分段的关键频率点。

(1) 槽况正常时,  $P_{U1_{0.001}^{0.010}}(t)$  变化平缓。

(2) 随着临近阳极效应的发生,  $P_{U2_{0.001}^{0.010}}(t)$  逐渐变大。这与阳极效应前铝液波动逐渐剧烈的现象对应。

(3) 随出铝操作完成后的时间推移,  $P_{U3_{0.001}^{0.010}}(t)$  逐渐减小。这与由出铝操作引起的铝液波动随着时间的推移逐渐平缓的现象对应。

(4)  $P_{U2_{0.001}^{0.010}}(t)$  和  $P_{U3_{0.001}^{0.010}}(t)$  明显大于  $P_{U1_{0.001}^{0.010}}(t)$ , 且随着铝液波动剧烈程度变化, 即  $P_{U2_{0.001}^{0.010}}(t)$  由与  $P_{U1_{0.001}^{0.010}}(t)$  相当而逐渐变大;  $P_{U3_{0.001}^{0.010}}(t)$  由明显大于  $P_{U1_{0.001}^{0.010}}(t)$  而逐渐变小, 直到接近  $P_{U1_{0.001}^{0.010}}(t)$ 。

因此, 可以推断正常化槽电压在  $[0.001, 0.010]$  Hz 频

段内的能量变化与铝液异常波动相关, 即对铝液异常波动敏感的正常化槽电压频段在  $[0.001, 0.010]$  Hz 内。

附录图 S1 (b) 是阳极效应前正常化槽电压 U2 的 EIEP, 它们是通过 EMD 后得到的按从高频到低频排序的各 IMF 的 Hilbert 瞬时能量谱。由附录图 S1 (b) 可知: ① U2 的第 5 个本征模函数 IMF5 的 Hilbert 瞬时能量谱 EIEP5  $E_{5,U2}(t)$  与图 6 (a) 中  $P_{U2_{0.001}^{0.010}}(t)$  最相似, 均有较明显的三个波峰且出现时段相当; ② U2 的第 4 个本征模函数 IMF4 的 Hilbert 瞬时能量谱 EIEP4  $E_{4,U2}(t)$  最明显的两个波峰位置与图 6 (a) 中  $P_{U2_{0.001}^{0.010}}(t)$  的前两个波峰位置相当。据此推测, EMD 将阳极效应前的异常能量分解到与 IMF4 和 IMF5 对应的两个频段。因此, 将 IMF4 和 IMF5 两个频段的 Hilbert

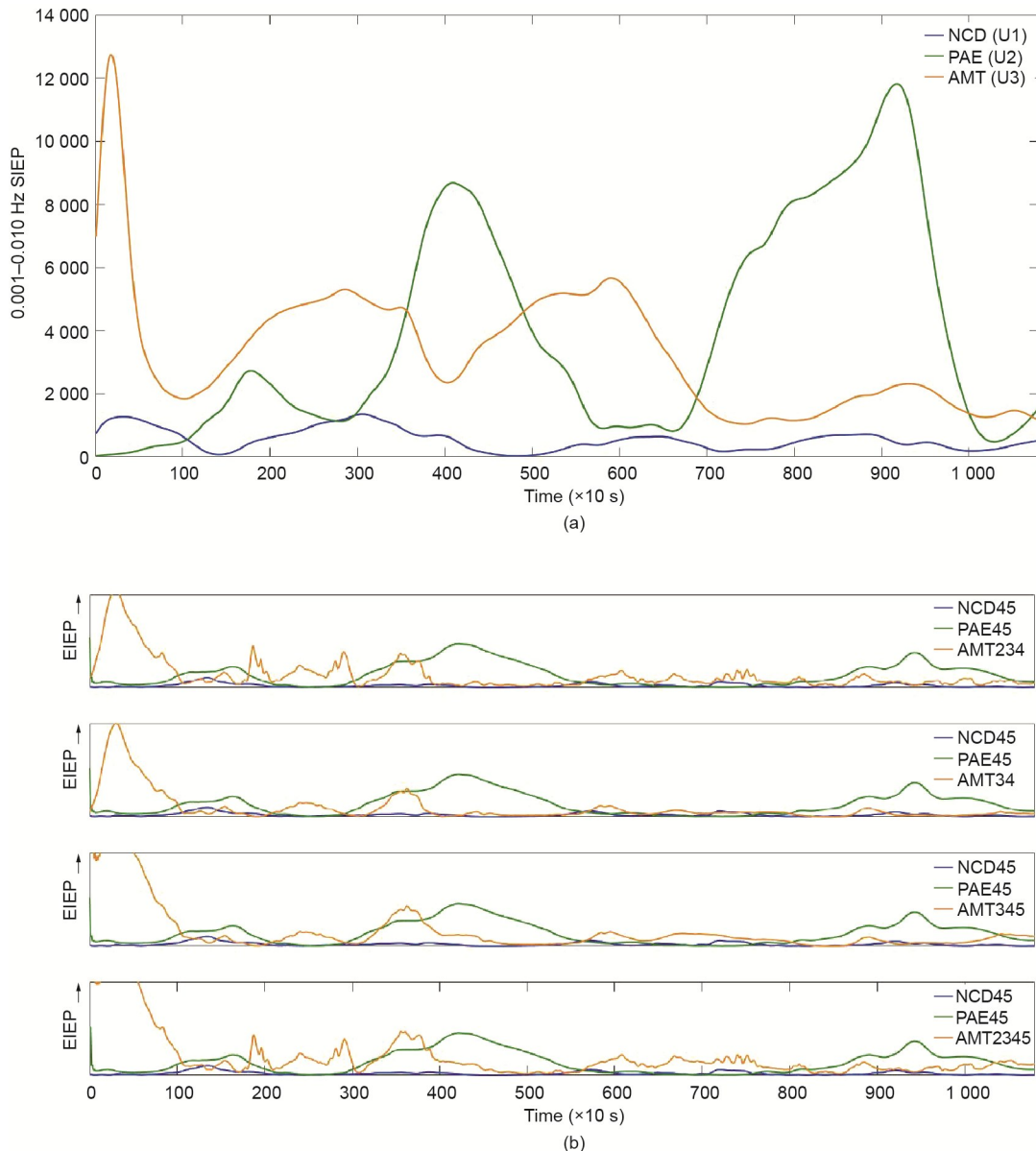


图 6. U1、U2 和 U3 在  $[0.001, 0.010]$  Hz 内的 SIEP 与 EIEP。(a) 在  $[0.001, 0.010]$  Hz 内的 SIEP; (b) EIEP。



瞬时能量谱 EIEP4 和 EIEP5 相加, 得到图 6 (b) 中的 PAE45, 即  $PAE45(t) = E_{4,U2}(t) + E_{5,U2}(t)$ 。为了比较, 图 6 (b) 还显示了与正常槽况下 U1 对应的 NCD45, 其中,  $NCD45(t) = E_{4,U1}(t) + E_{5,U1}(t)$ 。对比图 6 (a)、(b) 中的绿色曲线可知: EIEP 基本可表示正常化槽电压中 U2 的能量峰值, 但是并不能体现阳极效应前因铝液异常波动加剧而导致能量逐渐变强的现象。

由附录图 S1 (c) 可知:

(1) U3 的第 4 个本征模函数 IMF4 的 EIEP4  $E_{4,U3}(t)$  与图 6 (a) 中  $P_{U3|_{0.001}^{0.010}}(t)$  (AMT) 的最明显的波峰出现位置相当。

(2) U3 的第 3 个本征模函数 IMF3 的 EIEP3  $E_{3,U3}(t)$  在整个采样时段都有较明显波峰, 其中时段 1000~4000 s 的波峰与图 6 (a) 中  $P_{U3|_{0.001}^{0.010}}(t)$  第 2 个波峰出现位置相当, 时段 5000~7000 s 的波峰与图 6 (a) 中  $P_{U3|_{0.001}^{0.010}}(t)$  第 3 个波峰出现位置相当, 时段 9000 s 附近的波峰与图 6 (a) 中  $P_{U3|_{0.001}^{0.010}}(t)$  第 4 个波峰出现位置相当。

(3) U3 的第 2 个本征模函数 IMF2 的 EIEP2  $E_{2,U3}(t)$  在时段 1500~3000 s 也有明显波峰, 该时段包含在图 6 (a) 中  $P_{U3|_{0.001}^{0.010}}(t)$  第 2 个波峰出现时段内。

(4) U3 的第 5 个本征模函数 IMF5 的 EIEP5  $E_{5,U3}(t)$  在最开始采样时也有明显波峰, 对应了图 6 (a) 中  $P_{U3|_{0.001}^{0.010}}(t)$  第 1 个波峰出现位置。

因此, 可以初步推测, EMD 将出铝操作后因铝液异常波动导致的异常能量分解到与 IMF2、IMF3、IMF4 和 IMF5 对应的 4 个频段。因此, 本文以  $E_{3,U3}(t) + E_{4,U3}(t)$  为基准, 分别加上  $E_{2,U3}(t)$ 、 $E_{5,U3}(t)$  得到图 6 (b) 中的 AMT234、AMT34、AMT345 和 AMT2345, 其中

$$AMT234 = E_{2,U3}(t) + E_{3,U3}(t) + E_{4,U3}(t) \quad (4)$$

$$AMT34 = E_{3,U3}(t) + E_{4,U3}(t) \quad (5)$$

$$AMT345 = E_{3,U3}(t) + E_{4,U3}(t) + E_{5,U3}(t) \quad (6)$$

$$AMT2345 = E_{2,U3}(t) + E_{3,U3}(t) + E_{4,U3}(t) + E_{5,U3}(t) \quad (7)$$

图 6 (b) 中黄色曲线显示: ① AMT34 表示的 EIEP 在采样时间点 4000 s 前波动较明显; ② AMT345 表示的 EIEP 在采样时间点 5000 s 后波动较 AMT34 明显; ③ AMT2345 与 AMT345 波动明显的位置基本一致, 只是比 AMT345 包含了更多细节。对比图 6 (a) 和 (b) 中的黄色曲线可知: EIEP 表示了 U3 的能量波动, 但是并没有体现出铝操作后因铝液异常波动逐渐减弱而导致能量逐渐变弱的现象。

本小节以阳极效应前 U2 和出铝操作后 U3 为例, 分析比较了 SIEP 与 EIEP 对铝液异常波动引起的正常化槽电压能量变化的表示效果。与 EIEP 比较, 本文提出的 SIEP 能表示指定频段 [0.001, 0.010] Hz 内的能量变化, 能精细地表示因铝液异常波动引起的正常化槽电压能量的异常变化。由 SIEP 定量表示的正常化槽电压能量变化规律可知, 铝液异常波动的敏感频段为 [0.001, 0.010] Hz。

### 3.3. [0.01,0.05] Hz 内的 SIEP

图 7 (a) 是正常槽况与系列电流剧烈波动时的正常化槽电压、采样槽电压的 [0.01, 0.05] Hz SIEP 比较。图 6 (a) 中蓝色曲线 NCD 是正常槽况时 U1 在 [0.01, 0.05] Hz 内的 SIEP  $P_{U1|_{0.001}^{0.005}}(t)$ , 红色曲线 CO-N 是系列电流剧烈波动时的正常化槽电压 U4 在 [0.01, 0.05] Hz 内的 SIEP  $P_{U4|_{0.001}^{0.005}}(t)$ , 黄色曲线 CO-S 是系列电流剧烈波动时的采样槽电压 U4' 在 [0.01, 0.05] Hz 内的 SIEP  $P_{U4'|_{0.001}^{0.005}}(t)$ 。由图 5 (a) 和图 7 (a) 可知:

(1) 在系列电流波动剧烈的采样时段 2000~2500 s、4000~4500 s、5000~6500 s, 采样槽电压的 SIEP  $P_{U4'|_{0.001}^{0.005}}(t)$  也波动剧烈。

(2) 在上述系列电流波动剧烈的采样时段, 正常化槽电压的 SIEP  $P_{U4|_{0.001}^{0.005}}(t)$  波动明显小于  $P_{U4'|_{0.001}^{0.005}}(t)$ , 但仍有明显波峰, 这说明式 (2) 可部分消除系列电流波动所产生的干扰。

(3) 正常槽况时的  $P_{U1|_{0.001}^{0.005}}(t)$  在整个观察时间内, 变化均较平缓, 并没有明显波动。

因此, 可以得到, 系列电流剧烈波动引入的正常化槽电压的能量异常主要体现在 0.01 Hz 以上频段, 即与系列电流剧烈波动相关的正常化槽电压敏感频段在 [0.01, 0.05] Hz 内, 这与文献 [12,17] 中结论基本一致。

由附录图 S1 (d) 可知, 仅 U4 的第 4 个本征模函数 IMF4 的 Hilbert 瞬时能量谱 EIEP4  $E_{4,U4}(t)$  在采样时段 4000~4500 s 附近有明显波峰, 这与图 5 (a) 中采样槽电压在采样时段 4000~4500 s 附近的波动位置相同。第 2 个和第 3 个本征模函数 IMF2 和 IMF3 的 EIEP2  $E_{2,U4}(t)$  和 EIEP3  $E_{3,U4}(t)$  在采样时段 2000~2500 s 和 5000~6500 s 附近有明显波峰, 这与图 5 (a) 中采样槽电压在采样时段 2000~2500 s 和 5000~6500 s 附近的波动位置相同。因此, 本文以  $E_{4,U4}(t)$  为基准, 分别加上  $E_{2,U4}(t)$ 、 $E_{3,U4}(t)$  得到图 7 (b) 中的 CO-N234、CO-N24 和 CO-N34, 其中

$$CO-N234 = E_{2,U4}(t) + E_{3,U4}(t) + E_{4,U4}(t) \quad (8)$$



图7. 系列电流剧烈波动时[0.01, 0.05] Hz SIEP与EIEP的比较。(a) 在[0.01, 0.05] Hz内的SIEP；(b) U4的EIEP。CO-N: 系列电流剧烈波动时的正常化槽电压；CO-S: 系列电流剧烈波动时的采样槽电压。

$$\text{CO-N24} = E_{2,U4}(t) + E_{4,U4}(t) \quad (9)$$

$$\text{CO-N34} = E_{3,U4}(t) + E_{4,U4}(t) \quad (10)$$

为了与正常槽况时的EIEP进行比较, 图7 (b) 还显示了NCD234、NCD24、NCD35, 其中

$$\text{NCD234} = E_{2,U1}(t) + E_{3,U1}(t) + E_{4,U1}(t) \quad (11)$$

$$\text{NCD24} = E_{2,U1}(t) + E_{4,U1}(t) \quad (12)$$

$$\text{NCD34} = E_{3,U1}(t) + E_{4,U1}(t) \quad (13)$$

对比图7 (a) 和 (b) 可知, 基于EMD的Hilbert瞬时能量谱EIEP也体现了正常化槽电压U4中的由系列电流剧烈波动引入的能量异常, 但是本文提出的SIEP所示的能量异常所涉及的采样时段更精细, 且本文的SIEP可以给出指定频段[0.01, 0.05] Hz内能量的变化。

### 3.4. 正常化槽电压能量变化定量表示总结

根据SIEP对指定频段内能量变化的分析结果, 将正常化槽电压的频率范围分成对槽况敏感的以下三个子频段:

- (1) [0, 0.001] Hz为低频区, 与氧化铝浓度相关[14,17]。
- (2) [0.001, 0.010] Hz频段内的槽电压信号与铝液异常波动相关。
- (3) [0.01, 0.05] Hz频段内的槽电压信号与系列电流异常波动相关, 为次低频噪声区。

低频噪声与针摆相关。本文依据该频段内槽电压能量分布的特点, 将低频噪声区进一步细分为[0.001, 0.010] Hz

的铝液异常波动频段和[0.01, 0.05] Hz的次低频噪声频段。本文的低频区为[0, 0.001] Hz, 而文献[17]中的低频区为[0, 0.002] Hz, 本文的低频区更窄, 更有利于低频信号的提取。本文研究为获取在线槽况信息的数字滤波器设计提供了合理通带, 可为槽况分析和控制决策提供可靠的在线依据。

由SIEP的定量表示可知, 正常化槽电压不同频段内信号分量的能量变化具有特定的工艺语义, 可以代表特定槽况信息。当某频段内的SIEP出现异常时, 则可表示该频段对应的槽况出现异常。另外, 由于SIEP可在线获取, 且不同槽况下的SIEP有显著特点, 可将SIEP作为智能算法[37–38]的特征值用于在线槽况识别, 为控制决策提供在线依据。SIEP是来源于正常化槽电压的深度知识, 可以以概念或属性的形式参与铝电解知识图谱的构建[37, 39], 这对从知识图谱中挖掘隐含的槽况信息有很大的帮助。

## 4. 结论

本文结合机理知识和尺度图对多种代表性槽况下的正常化槽电压进行定性分析, 用提出的SIEP定量表示了隐含在正常化槽电压各频段内的能量变化。SIEP可表征能量在指定频段内随时间变化的规律, 即体现了信号在指定频段内的时域能量变化。与基于EMD和Hilbert变换的瞬时能量谱EIEP相比, SIEP能更精细地提取正常化槽电压有效频段内任意指定频段的能量。

本研究是流程工业知识自动化[37,39–40]中知识获取、知识表示工作的一部分。SIEP具有工艺语义, 且可在线获取, 可为大数据驱动的知识推理[37,41]等工作提供具有工艺语义的在线数据支持。

## 致谢

感谢国家自然科学基金项目(61988101、61773405和61751312)的资助。

## Compliance with ethics guidelines

Zhaohui Zeng, Weihua Gui, Xiaofang Chen, Yongfang Xie, Hongliang Zhang, and Yubo Sun declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.11.012>.

## References

- [1] Blatch GI, Taylor MP, Fyfe M, inventors; Comalco Aluminum Ltd., assignee. Process for controlling aluminum smelting cells. United States Patent US 5089093. 1992 Feb 18.
- [2] Simakov DA, Gusev AO, Bakin KB, inventors; United Company RUSAL Engineering and Technology LLC., assignee. Method for controlling an alumina feed to electrolytic cells for producing aluminum. United States Patent US 10472725. 2019 Nov 12.
- [3] Schneller MC. In Situ alumina feed control. JOM 2009;61(11):26–9.
- [4] Schneller M, inventor; Aluminum production process control. United States Patent US 8052859. 2011 Nov 8.
- [5] Zhou K, Lin Z, Yu D, Cao B, Wang ZQ, Guo S. Cell resistance slope combined with LVQ neural network for prediction of anode effect. In: Proceedings of 2015 Sixth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP); 2015 Nov 26–28; Wuhan, China; 2016. New York City: IEEE; 2016. p. 47–51.
- [6] Meghlaoui A, inventor; Dubai Aluminium Company Limited., assignee. Intelligent process control using predictive and pattern recognition techniques. United States Patent US 6609119. 2003 Aug 19.
- [7] Thonstad J, Utigard TA, Vogt H. On the anode effect in aluminum electrolysis. In: Bearne G, Dupuis M, Tarcy G, editors. Essential readings in light metals. Cham: Springer. 2016. p.131–8.
- [8] Haurpin WE. Polarization in an aluminum reduction cell. J Electrochem Soc 1956;103(3):174–8.
- [9] Bearne GP. The development of aluminum reduction cell process control. JOM 1999;51(5):16–22.
- [10] Banta L, Dai C, Biedler P. Noise classification in the aluminum reduction process. In: Bearne G, Dupuis M, Tarcy G, editors. Essential readings in light metals. Cham: Springer. 2016. p.812–6.
- [11] Ding L, Zeng SP, Zeng Z. Spectral analysis of cell resistance signals in 350 kA aluminum reduction cells. Tech Autom Appl 2005;24(12):68–77. Chinese.
- [12] Xiao J, Li J, Yang JH, Zou Z, Ye SL. Effect of line current fluctuation on process control of aluminium electrolysis. Mining Metall Eng 1999;19(3):44–6. Chinese.
- [13] Bonny P, Gerphagnon JL, Laboure G, Keinborg M, Homsy P, Langon B, inventors; Pechiney, assignee. Process and apparatus for accurately controlling the rate of introduction and the content of alumina in an igneous electrolysis tank in the production of aluminium. United States Patent US 4431491. 1984 Feb 14.
- [14] Zeng Z, Gui W, Chen X, Xie Y, Wu R. A mechanism knowledge-driven method for identifying the pseudo dissolution hysteresis coefficient in the industrial aluminium electrolysis process. Control Eng Pract 2020;102:104533.
- [15] Homsy P, Peyneau JM, Reverdy M. Overview of process control in reduction cells and potlines. In: Bearne G, Dupuis M, Tarcy G, editors. Essential readings in light metals. Cham: Springer. 2016. p.739–46.
- [16] Verdenik A. Analysis and visualization of aluminum reduction cell noise based on wavelet transform. In: Williams E, editor. Light metals 2016. Cham: Springer International Publishing. 2016. p.403–8.
- [17] Li J, Liu Y, Huang Y, Wang H. Studies on the modelling of control signal filtering and noise analysis for the aluminium electrolytic process. J Cent South Inst Min Metall 1993;24(3): 318–25. Chinese.
- [18] Dupuis M. Cell voltage noise removal and cell voltage (or resistance) slope calculation. IFAC Proc Vol 2007;40(11):490–2.
- [19] Li M, Cui Y, Yang J, Hao D. An adaptive multi-domain fusion feature extraction with method HHT and CSSD. Acta Electron Sin 2013;41(12):2479–86. Chinese.
- [20] Huang NE, Shen Z, Long SR. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum. Annu Rev Fluid Mech 1999;31(1):417–57.
- [21] Mallat S. A wavelet tour of signal processing. 3rd ed. San Diego: Academic Press. 2008. p.11–4.
- [22] Cohen L. Time-frequency distributions—a review. Proc IEEE 1989; 77(7):

- 941–81.
- [23] Qian S, Chen D. Joint time-frequency analysis. *IEEE Signal Process Mag* 1999; 16(2):52–67.
- [24] Hess-Nielsen N, Wickerhauser NMV. Wavelets and time – frequency analysis. *Proc IEEE* 1996;84(4):523–40.
- [25] Bolós VJ, Benítez R. The wavelet scalogram in the study of time series. In: Casas E, Martínez V, editors. *Advances in differential equations and applications*. Cham: Springer International Publishing; 2014. p.147–54.
- [26] Tomasson GG, Melville WK. Geostrophic adjustment in a channel: nonlinear and dispersive effects. *J Fluid Mech* 1992;241: 23–57.
- [27] Urata N. Wave mode coupling and instability in the internal wave in aluminum reduction cells. In: Bearne G, Dupuis M, Tarcy G, editors. *Essential readings in light metals*. Cham: Springer; 2016. p.373–8.
- [28] Chiampi M, Repetto M, Chechurin V, Kalimov A, Leboucher L. Magnetic modeling and magneto-hydro-dynamic simulation of an aluminum production electrolytic cell. *Compel Int J Comp Math Electr Electron Eng* 1999; 18(3): 528–38.
- [29] Xu Y, Li J, Zhang H, Lai Y. MHD calculation for aluminium electrolysis based on nonlinear shallow water model. *Chin J Nonferrous Met* 2011;21(1):191–7. Chinese.
- [30] Wang Z, Feng N, Peng J, Wang Y, Qi X. Study of surface oscillation of liquid aluminum in 168 kA aluminum reduction cells with a new type of cathode design. In: Johnson JA, editor. *Light metals 2010*; Seattle: The Minerals, Metals & Materials Society; 2010. p. 485–8.
- [31] Wang Y, Tie J, Tu G, Sun , Zhao R, Zhang Z. Effect of gas bubble on cell voltage oscillations based on equivalent circuit simulation in aluminum electrolysis cell. *Trans Nonferrous Met Soc China* 2015;25(1):335–44.
- [32] Shen X. The mechanism of voltage fluctuation in aluminum reduction cell and its precautions. *Light Met* 2008;9:31–5. Chinese.
- [33] Haupin WE. A scanning reference electrode for voltage contours in aluminum smelting cells. *JOM* 1971;23(10):46–9.
- [34] Zhao ZB. [High temperature experimental study and numerical simulation of bubble dynamics in aluminum electrolytic process] [dissertation]. Shenyang: Northeastern University School of Metallurgy; 2016. Chinese.
- [35] Li J, Tu G, Qi X, Mao J, Lu D, Feng N. Real-time monitoring and analysis on fluctuation state of liquid aluminum in 300 kA and 400 kA aluminum reduction cell. *Light Met* 2012;2:30–9. Chinese.
- [36] Yang Z. [Causes and treatment measures of voltage pendulum in 300 kA aluminum electrolytic cell]. *Technol Enterp* 2012;20: 289–91. Chinese.
- [37] Mao S, Wang B, Tang Y, Qian F. Opportunities and challenges of artificial intelligence for green manufacturing in the process industry. *Engineering* 2019; 5(6):995–1002.
- [38] Chen H, Jiang B, Lu N. An improved incipient fault detection method based on Kullback–Leibler divergence. *ISA Trans* 2018;79:127–36.
- [39] Gui W, Chen X, Yang C, Xie Y. Knowledge automation and its industrial application. *Sci Sin Inform* 2016;46(8):1016–34. Chinese.
- [40] Cai T. Industrial process control systems: research status and development direction. *Sci Sin Inform* 2016;46(8):1003–15. Chinese.
- [41] Chen H, Jiang B, Ding SX, Lu N, Chen W. Probability-relevant incipient fault detection and diagnosis methodology with applications to electric drive systems. *IEEE Trans Control Syst Technol* 2019;27(6):2766–73.