文章编号:1004-0609(2010)05-0999-07

不同槽况下 160 kA 铝电解槽阳极电流的频谱分析

李贺松¹, 殷小宝¹, 韦隆和¹, 黄涌波², 唐 3^{2} , 单 4^{1}

(1. 中南大学 能源科学与工程学院,长沙 410083;
 2. 中铝公司 广西分公司电解厂,百色 531400)

摘 要:以采集的 160 kA 铝电解槽阳极的电流信号为基础,利用 Yule-Walker 方法的功率谱估计对其进行分析, 提取不同槽况的频谱特征,并将分析结果与 HHT(Hilbert-Huang transform)的边际谱分析结果进行对比。结果表明: 基于 Yule-Walker 方法的功率谱估计分析结果能较好地区分正常糟、冷槽及阴极破损槽,并得到正常糟、冷槽及 阴极破损槽功率谱曲线主谱峰的频率范围分别为 0.003~0.018、0.023~0.027、0.027~0.031 Hz;对于不同槽况下的 阳极电流信号,HHT 的边际谱的主谱峰与 Yule-Walker 方法的功率谱曲线的主谱峰位置一致,表明功率谱估计分 析结果的可靠性。

关键词:铝电解槽;160 kA 铝电解槽;槽况;阳极电流;功率谱估计;Yule-Walker 方法;边际谱中图分类号:TF821;TP391 文献标志码:A

Spectral analysis of anode current for 160 kA aluminum reduction cells in different states

LI He-song¹, YIN Xiao-bao¹, WEI Long-he¹, HUANG Yong-bo², TANG Qian², SHAN Feng¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Aluminum Electrolytic Plants, Guangxi Branch of China Aluminum Co., Baise 531400, China)

Abstract: Yule-Walker method was applied to analyzing the power spectrum of anode current signals collected from 160 kA aluminum reduction cells and to extracting the spectral characteristics in different operation states, and then the power spectrum was further compared with the marginal spectrum resulting from HHT(Hilbert-Huang transform). The results show that the power spectrum based on Yule-Walker method is able to distinguish the normal cell, the cold cell and the cell with local failure of cathode surface, and their frequency ranges are recognized to be 0.003–0.018, 0.023–0.027 and 0.027–0.031 Hz, respectively. For the anode current signals from different cell states, the main peak at the power spectrum curve has the same location as that at the marginal spectrum curve, showing the good reliability of Yule-Walker method for the power spectrum estimation of the anode current signals.

Key words: aluminum reduction cell; 160 kA aluminum reduction cell; cell state; anode current; power spectral estimation; Yule-Walker method; marginal spectrum

铝电解槽是一个复杂的多变量体系,可以直接在 线采集的信息较少,同时又受到人为经验的影响,人 工的诊断方法很难对电解槽工作状态做出及时的判 断。为此,找出能准确诊断铝电解槽工作状态的方法, 对铝电解槽的控制有十分重要的意义^[1]。在铝电解的 生产过程中,槽电压是控制铝电解槽生产的重要参数, 通过槽电压在线波动曲线可直观地发现电解槽的状况,并且电压信号可以在线连续采集;槽电阻信号也 是能够在线获得的反映槽况的信号。国内不少学者以 槽电压和槽电阻为研究对象^[2-4],进行频谱分析,得

收稿日期:2009-07-28;修订日期:2009-12-21

通信作者:李贺松,副教授,博士;电话:13787163153;E-mail:yxb.10010301@yahoo.com.cn

出槽电阻频率为 0.002~0.04 Hz,为正确判断铝电解槽 的运行状态、提取故障槽况的典型特征提供了依据。 国外有学者对电压波动信号进行较详细的分类^[5-6],利 用低通滤波处理,分离出槽电压信号的一些特征。但 国内外学者更多的是从不同层面区分故障槽况的特 征,并没有对其进行精细的量化分析,研究成果较难 应用于现场的槽况诊断。

在此,本文作者以某铝厂160 kA 系列预焙阳极铝 电解槽为研究对象,采用功率谱估计的方法,结合 HHT(Hilbert-Huang transform),对正常槽、冷槽及阴 极破损槽的阳极电流信号进行分析。在分析信号的选 取上,以电解槽的每块阳极电流信号为基础,与以往 选取的电解槽全局信号(槽电压与槽电阻)不同;并且 所采集的阳极电流信号比槽电压或槽电阻能更好地反 映电解槽的运行状况,对电解槽的噪音反应更加灵敏, 其分析结果可以更好地为电解槽的在线诊断提供依 据,确保电解槽平稳、高效地运行。

1 阳极电流信号的获取和分析方法

1.1 阳极电流信号的计算

采用等距压降法可以求得阳极电流,在线采集阳极组等距压降数据的同时测定该组阳极导杆的温度, 并采取电阻温度系数去修正阳极组的电流^[7]。阳极电流的计算公式为

$$I = \frac{V}{\rho_0 (1 + \beta t) L/S} \tag{1}$$

式中:I为阳极电流;V为导杆的等距压降; ρ_0 为0 时铝的电阻率; β 为电阻率温度系数;t为导杆温度, 导杆温度在一个换极周期内是不断变化的^[8];L为导 杆等距压降长度;S为导杆截面积。

1.2 数据获取及槽况选取

针对某铝厂160 kA系列预焙阳极铝电解槽,现场 多通道实时采集正常槽A槽的全槽24块阳极电流信号 的一个换极周期的数据;同时结合现场实际情况,选 取典型故障槽B槽和C槽,多通道实时采集阳极电流数 据进行对比。为了保证结果的重复性和可靠性,对典 型故障槽进行3次数据采集。采样频率为1 Hz,频率范 围为0~0.5 Hz。

根据工作人员提供的槽况信息及电解槽运行数据 对比可以得出:

1) A槽。在采集数据期间,效应次数少,运行正

常而稳定,可认为A槽是正常槽。

2) B槽。在采集数据期间,一个换极周期的电解 质的温度平均值为935 。由于电解质温度低,氧化 铝溶解度的降低形成沉淀导致伸腿过长,可认为是冷 槽。

3) C槽。在采集数据期间,铝液中铁含量从0.331% (质量分数)递增到1.336%,阴极压降为650 mV。铝液 中铁含量过高,阴极压降过高,可认为是阴极破损槽。 现场正常槽的指标:电解温度为945 左右;铝液中 铁含量 < 0.12%;新槽的阴极压降为300~320 mV、 1年槽的为360 mV、2年槽的为380~400 mV、3年槽的 为400 mV。

1.3 AR 模型谱估计的 Yule-Walker 方法

功率谱估计方法可分成经典谱估计法与现代谱估 计法。经过比较不同的功率谱估计方法,选用 AR 模 型谱估计的 Yule-Walker 方法对阳极电流信号进行分 析^[9]。

AR 模型称为自回归模型,它是一个全极点的模型,可用差分方程来表示:

$$x(n) = -\sum_{r=1}^{p} a_r x(n-r) + u(n)$$
(2)

式中:*u*(*n*)为白噪声序列; *p*为AR模型的阶数; *a*_{*r*}为AR模型的参数,其中*r*=1, 2, …。

由差分方程(2)可以得到 AR 模型的转移函数形式:

$$P(z) = \frac{1}{1 + \sum_{r=1}^{p} a_r z^{-r}}$$
(3)

从而可得到 AR 模型功率谱估计的计算公式:

$$\hat{P}(k) = \frac{\sigma^2}{\left|1 + \sum_{r=1}^{p} a_r W_N^{-kr}\right|^2}$$
(4)

式中: σ^2 为白噪音序列的方差。

由此可以看出,要进行功率谱估计,必须求得AR 模型的参数 a_r 和 σ^2 。参数 a_r 和 σ^2 可由下面的 Yule-Walker 方程求得:

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_{X}(0) & \hat{R}_{X}(-1) & \cdots & \hat{R}_{X}(-p) \\ \hat{R}_{X}(1) & \hat{R}_{X}(0) & \cdots & \hat{R}_{X}\{-(p-1)\} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \hat{R}_{X}(p) & \hat{R}_{X}(p-1) & \cdots & \hat{R}_{X}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_{1} \\ \vdots \\ a_{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^{2} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$
(5)

值得注意的是,AR模型的阶次p的选择直接影响

到AR谱估计的质量, p选得太低,反映不出谱峰; p 选得过大,可能会产生虚假峰值^[10]。一个经验法则^[11] 是,AR模型的阶次p应选在[*N*/3,*N*/2](*N*为数据观察长 度),这样可以得到高分辨率的功率谱估计,也不会出 现太多的虚假谱峰。本文作者在实验中所选AR模型阶 次均利用该法则和在实践中所得到的结果多次比较后 选定,具有一定的准确性。

2 阳极电流信号的时域和频域分析

2.1 阳极电流信号的时域分析

根据上述3种槽况即正常槽槽况、冷槽槽况和阴极 破损槽槽况,选取4类典型的样本信号。所选取的每种 阳极电流信号的波形代表铝电解槽全槽的24块阳极此 时间段内典型的波形,即可代表此时间段内电解槽的 状态,分别为正常槽的阳极电流稳定信号、正常槽的 阳极电流波动信号、冷槽的阳极电流波动信号、阴极 破损槽的阳极电流波动信号。其中,正常槽的阳极电 流稳定信号与正常槽的阳极电流波动信号均是正常槽 况下的电流信号。所选的样本信号均在系列电流恒定 及排除人为干扰的情况下得到的,避免了人为因素对 阳极电流的频谱分析造成的影响。

4 类典型样本信号的阳极电流波形分别如图 1~4 所示。图 1 和图 2 所示的正常槽阳极电流信号的波形 振幅明显比冷槽与阴极破损槽的小,都属于正常波动 情况,不会对电解槽产生危害;图 1、图 2 和图 3 所 示的波形周期不明显,但图 3 的波幅很大,容易对 电解槽产生危害;图 4 所示的波形的振幅大、周期清 晰,说明波动的能量很大,这种情况对电解槽的危害 比较大。



图 1 A 槽某阳极的电流稳定信号时域图

Fig.1 Change of stable current signal for some anode with time at Cell A



图 2 A 槽某阳极的电流波动信号时域图

Fig.2 Change of current wave signal for some anode with time at Cell A



图 3 B 槽某阳极的电流波动信号时域图

Fig.3 Change of current wave signal for some anode with time at Cell B



图 4 C 槽某阳极的电流波动信号时域图

Fig.4 Change of current wave signal for some anode with time at Cell C

2.2 阳极电流信号的频域分析

基于Yule-Walker方法的功率谱曲线如图5~8所示,所分析信号依次为图1~4所示的阳极电流信号。



图5 A槽某阳极的电流稳定信号的功率谱曲线

Fig.5 Power spectrum curve of stable current signal for some anode at Cell A





Fig.6 Power spectrum curve of current wave signal for some anode at Cell A

从图5~8所示的正常槽和故障槽的频谱分析结果 可以发现:

1) 4组阳极的电流信号的功率谱曲线中都只存在 一个清晰的尖锐主谱峰,并且故障槽(B槽和C槽)的阳 极电流信号存在频率值明显大于正常槽(A槽)的阳极 电流信号的主谱峰对应的频率值;从图5~8中提取出 的阳极电流信号功率谱曲线的主谱峰的频率值也可以 得出,分别为0.0033、0.015、0.024、0.028 Hz。

2) 主谱峰对应阳极电流信号的主频率,反映了引起电解槽的阳极电流波动的主要原因。图6~8中的主频率分别源于正常状态下铝液波动、伸腿过长、阴极



图7 B槽某阳极的电流波动信号的功率谱曲线

Fig.7 Power spectrum curve of current wave signal for some anode at Cell B



图 8 C 槽某阳极的电流波动信号功率谱曲线

Fig.8 Power spectrum curve of current wave signal for some anode at Cell C

破损引起的阳极电流波动,其对应的阳极电流的波动 周期分别为67、42、35 s。正常槽也存在磁流体运动, 属于正常情况,不会对电解槽造成危害,故障槽则会 产生危害。对比正常槽况的阳极电流的波动周期则可 看出伸腿过长和阴极破损状态下的阳极电流波动对电 解槽的危害程度。

3) 从主谱峰频值的大小可看出,其结果也在 0.002~0.04 Hz的范围内,与其他学者^[2]研究得到的槽 电阻频段在0.002~0.04 Hz的范围内的结果比较吻合。 从图5~8也可得出在0.05 Hz以上没有明显峰值,故障 槽的主频值为0.024、0.028 Hz,与其他学者的研究结 果^[4]槽电阻在0.1 Hz以上没有明显峰值以及异常槽主 频存在于0.02~0.04 Hz比较吻合。不同之处在于,所分 析的信号、研究的具体槽型及系列电流不同,频率的 第20卷第5期

范围稍有区别。但阳极的电流信号同样能反应出槽电 阻信号及槽电压信号的频率变化。

由以上可知,铝电解槽的不同故障会引起阳极电 流波形振幅和频率的不同变化,呈现出不同的特征, 则可进一步提取该特征来诊断电解槽的槽况。

2.3 3种槽况下阳极电流信号的频率范围

通过对3种槽况下阳极电流的功率谱估计分析,得 出3种槽况下阳极电流信号主谱峰的频值不相同。为了 进一步提取信息及验证这一结果,以600组数据为一周 期分段,对其他多个时段的样本数据进行功率谱估计。 结果表明:每种槽况下功率谱曲线的主谱峰在不同时 段内对应的频率范围是一定的,得出如表1所列出的3 种槽况的频率范围。其中正常槽况的频率范围为 0.003~0.018 Hz,分阳极电流稳定和波动2种情况。

对于以上3种槽况分析得到的结果,选取分析的阳 极电流信号皆取自同一时间段内,并且该时间段内存 在12块或者以上阳极的电流信号以相近的频率波动, 其频谱的主谱峰位置接近,即该阳极电流的状态能代 表电解槽此时的状态。由此则可通过阳极电流信号的 频谱特征及主谱峰频值所在范围来确定出槽况,为现 场诊断提供可靠的依据。

表1 不同铝电解槽况下阳极电流信号的频率范围

Table 1Frequency ranges of anode current signals ofaluminum reduction cells in different states

Cell state		<i>f</i> /Hz
Normal	Stable	0.003-0.01
	Wave	0.01-0.018
Cold		0.023-0.027
Destruction of cathode surface		0.027-0.031

3 功率谱估计与 HHT 分析结果的比较

3.1 HHT 及边际谱分析

阳极电流信号属于非平稳信号,而 FFT 及功率谱 估计更合适于对平稳信号的分析,为确保分析结果的 可靠性,需对图 1~4 所示的阳极电流信号的功率谱估 计结果作出对比分析。

EMD(Empirical mode decomposition)方法和与之 相应的 Hilbert 谱统称为 Hilbert-Huang 变换^[12], 它采 用 EMD 方法将信号分解为若干个 IMF(Intrinsic mode function)分量,然后对每个 IMF 分量进行 Hilbert 变换 得到瞬时频率和瞬时幅值,从而得到信号的 Hilbert 谱。Hilbert 谱表示信号完整的时间—频率分布^[13-14], 是一种新的具有自适应的时频分析方法,可得到极高 的时频分辨率,具有良好的时频聚集性,非常适合对 非平稳、非线性信号进行分析^[15]。由此可知,HHT 适 合于非平稳信号的处理,故选择 HHT 作为对比分析 的方法。

HHT 的边际谱如图 9~12 所示,所分析信号依次 为图 1~4 所示的阳极电流信号。从图 9~12 可以看出: HHT 的边际谱对噪音信号的分辨率高于图 5~8 所示的 根据功率谱估计的分辨率。

3.2 2种方法对比的分析结果

对比图 1~4 所示的阳极电流信号的功率谱估计曲 线(见图 5~8)与 HHT 的边际谱曲线(见图 9~12),可以 得到以下结果。





Fig.9 Marginal spectrum of stable current signal for some anode at Cell A



图 10 A 槽某阳极的电流波动信号的边际谱

Fig.10 Marginal spectrum of current wave signal for some anode at Cell A



图 11 B 槽某阳极的电流波动信号的边际谱

Fig.11 Marginal spectrum of current wave signal for some anode at Cell B





Fig.12 Marginal spectrum of current wave signal for some anode at Cell C

 1)不论是功率谱估计还是 HHT 的边际谱,得到 频谱分析的结果都只有一个清晰的尖锐主谱峰,并且 主谱峰的位置一致,说明2种方法都反映出了信号的 主频。表明功率谱估计能较好地处理阳极电流信号, 能体现出阳极电流信号的波动特征。

2) 在 0~0.01 Hz, HHT 的边际谱对噪音信号的分 辨率更高,对噪音信号的反应更灵敏。从图 9~12 可 观察到在此频率段存在明显的谱峰,并且位置比较固 定,一般认为是氧化铝浓度变化和极距的调整引起的 低频信号,说明 HHT 的边际谱更加合理地反应出噪 音的存在,为电解槽噪音的细化分析提供了方法。

3) HHT 存在自身的缺陷。HHT 是建立在经验基础之上的分解,没有充分的数学基础;并且由于分解过程的自适应性,使得对噪音敏感^[16-17]。

4 结论

 用功率谱估计的Yule-Walker方法能较好地对 阳极电流信号进行分析 /类阳极的电流信号的功率谱 曲线都在不同频率处对应一个尖锐主谱峰,区分了不 同的槽况(正常槽、冷槽、破损槽),并得到3种槽况下 主谱峰的频率范围,为铝电解槽的诊断提供了依据, 有利于铝电解槽在线诊断系统在工程实际应用中的 推广。

2) 对比 2 种信号处理方法, 谱分析结果都只有一 个尖锐主谱峰,并且位置一致,说明功率谱的估计结 果的可靠性。针对阳极电流信号,功率谱估计存在噪 音分辨率低的不足,但可以很好地分析主谱峰的存在 和提取,而 HHT 则有自身缺陷。

3) 从正常槽、冷槽和阴极破损槽的主谱峰的频率 范围可发现,在正常槽与冷槽之间存在一较大的频率 段 0.018~0.023 Hz。这是由于实验条件的限制,不能 在一个铝厂同时采集到更多的槽况信息,可能在这个 频率段内存在其他槽况,例如热槽、槽底结壳槽,多 槽况耦合槽等。

4) 对比其他学者得出的槽电阻和系列电流的主频段分别为 0.002~0.04 Hz 和 0.05~0.018 Hz 的结果, 阳极电流信号的主频段为 0.003~0.031 Hz。从主频段的范围可以看出:阳极电流的结果与槽电阻的结果比较吻合,但更精细,与系列电流则不在同一主频段。

REFERENCES

- 李春艳,曾水平. 铝电解槽阳极工作状态故障诊断系统研究
 [J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(7): 49-51.
 LI Chun-yan, ZENG Shui-ping. Research on fault diagnosis system for the operating mode of the anode of the aluminum reduction cell[J]. Techniques of Automation and Applications, 2004, 23(7): 49-51.
- [2] 丁 蕾, 曾水平, 曾 铮. 350 kA铝电解槽槽电阻信号的频谱 分析[J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(12): 68-70.
 DING Lei, ZENG Shui-ping, ZENG Zheng. Spectral analysis of cell resistance signals in 350 kA aluminum reduction cells[J].
 Techniques of Automation and Applications, 2005, 24(12): 68-70.
- [3] 唐 骞, 周孑民, 单 峰, 李贺松, 蒋科进, 郭 洁. 320 kA
 系列预焙铝电解槽电压波动的频谱解析[J]. 中南大学学报:
 自然科学版, 2009, 40(2): 299-304.
 TANG Qian, ZHOU Jie-min, SHAN Feng, LI He-song, JIANG

Ke-jin, GUO Jie. Spectral analysis of cell voltage fluctuation in 320 kA pre-baked aluminum reduction cells[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(2): 299–304.

[4] 曾水平,丁 蕾,李晋宏.基于槽电阻频谱分析的铝电解槽
 槽况诊断[J].中南大学学报:自然科学版,2007,38(1):
 768-771.

ZENG Shui-ping, DING Lei, LI Jin-hong. Determination of cell states for aluminum electrolysis based on spectrum analysis of cell resistances[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(1): 768–771.

- [5] LARRY B, DAI Cong-xia, PHILIP B. Noise classification in the aluminum reduction process[J]. Light Metals, 2003: 431–435.
- [6] LARRY B, PHILIP B, DAI Cong-xia. Decomposition of aluminum cell voltage signals[J]. Light Metals, 2002: 365–370.
- [7] 孙建国. 铝电解槽阳极电流分布特征及设计上的思考[J]. 轻 金属, 2007(3): 29-31.

SUN Jian-guo. Anode current distribution feature cell and its design[J]. Light Metals, 2007(3): 29-31.

- [8] 李贺松. 大型预焙铝电解非稳态、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.
- [9] 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,1997:201-204.
 HU Guang-shu. Digital signal processing: Theory, algorithm and accomplishment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 201-204.
- [10] 秦树人,季 忠,尹爱军. 工程信号处理[M]. 北京: 高等教 育出版社, 2008: 101-104.
 QIN Shu-ren, JI Zhong, YIN Ai-jun. Engineering signal

processing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 101-104.

- [11] 飞思科技产品研发中心. MATLAB7 辅助信号处理技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 319-321.
 Fecit Science and Technology R & D Center. MATLAB7 auxiliary signal processing technology and application[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2005: 319-321.
- [12] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. AIP Conf Proc, 1998, 454: 903–995.
- [13] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1999, 31: 417–457.
- [14] LEISK G, HSU N, HUANG N E. Application of the Hilbert-Huang Transform to machine tool condition/health monitoring[J]. AIP Conf Proc, 2002, 615(1): 1711–1718.
- [15] 谭善文. 多分辨希尔伯特-黄(Hilbert-Huang)变换方法的研究
 [D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
 TAN Shan-wen. The research of Hilbert-Huang transform based on multi-resolution analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [16] 廖庆斌,李舜酩,覃小攀. 车辆振动信号的特征提取方法比较[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(4): 910-914.
 LIAO Qing-bing, LI Shun-ming, QIN Xiao-pan. Comparison of feature extraction methods of vehicle vibration signal[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(4): 910-914.
- [17] 李舜酩,李香莲.振动信号的现代分析技术与应用[M].北京: 国防工业出版,2008:217-220.

LI Shun-ming, LI Xiang-lian. Modern analysis techniques and application of vibration signals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 217–220.

(编辑 杨 华)