

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106720

基于多尺度小波变换和时频图的微波源故障检测

朱娜 毋其海 刘志邦 邓卓 杨彪

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘要: 针对目前大功率微波加热系统的微波源队列只有工作与否的二值检测,为了提高其队列运行的经济性和可靠性,在线实时检测微波源队列的运行状态及变化非常必要。提出一种基于多尺度小波变换和时频图的微波源故障检测方法。首先,根据电场强度的变化情况判断微波源队列是否发生故障。其次计算出残差信号,并根据残差在多尺度下的变化情况完成检测。最后,绘制残差信号的小波时频图,对检测结果进行可视化分析。对微波源的3种故障状态分别进行实例仿真,检测出 $t=80,90,100$ s分别发生3种故障。仿真结果表明,利用连续小波变换的分析方法对微波源队列进行故障检测,可以准确的在线检测出微波源队列中故障微波源的位置以及发生故障的时刻。

关键词: 多尺度小波变换;小波时频图;大功率微波加热系统;微波源队列;故障检测

中图分类号: TN123;TP206.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025;510.4010

Fault detection of microwave source based on multi-scale wavelet transform and time-frequency diagram

Zhu Na Mu Qihai Liu Zhibang Deng Zhuo Yang Biao

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The microwave source queue of high-power microwave heating system have only binary detection of whether there are running or not. Online real-time detection of the working status and changes of the microwave source queue is necessary in order to improve the economy and reliability of its queue. A microwave source fault detection method based on multi-scale wavelet transform and time-frequency diagram is proposed. Firstly, the fault of microwave source queue is judged according to the change of electric field intensity. Secondly, calculate the residual signal, and the detection is completed according to the change of the residual signal at multiple scales. Finally, the wavelet time-frequency spectrum of the residual signal is drawn to obtain the perform visual analysis of the detection results. Three fault states of microwave source are simulated respectively. Three types of faults were detected at $t = 80, 90, 100$ s respectively. Simulation results show the continuous wavelet transform analysis method is used to detect the fault of the microwave source queue, which can accurately detect the fault location and time of microwave source queue online.

Keywords: multi-scale wavelet transform; wavelet time-frequency diagram; high-power microwave heating system; microwave source; fault detection

0 引言

微波加热作为一种高效清洁的加热方式,在多领域都得到广泛地应用,如化工^[1]、冶金^[2]、制药^[3]、材料^[4]等。微波源是微波加热系统中的核心装置,它直接为微波加热系统提供热量源。对微波源进行故障检测,可以减少因故障带来的损失,提高微波加热系统的可靠性和安全性。因此,对微波源的故障检测是有必要的。

在大功率微波加热系统中,可通过电场强度的突变与否来判断微波源队列中是否有微波源发生故障,但是此方

法不能判断出微波源队列中故障微波源的具体位置。目前,微波源的故障检测大多采用二值检测,用二值逻辑的0、1分别表示微波源的两种不同状态,其中0表示关断状态,1表示正常运行。如果微波源处于关断状态,则不能实时地判断出它是处于停运状态还是故障状态。为了解决此工程应用问题,本文开展利用连续小波变换对微波源的运行状态及变化进行在线检测的研究。

基于小波变换的故障诊断方法主要有:1)是利用观测信号频率结构的变化进行故障诊断,通过小波多分辨率分析来检测发生故障后的观测信号的频谱以及某时刻的频

收稿日期:2021-05-18

率分布的变化^[5-7];2)是利用观测信号的奇异性进行故障诊断,对信号进行多尺度连续小波变换,得到各尺度下的小波变换系数,进而可以分析出信号的奇异点^[8-9];3)是利用脉冲响应函数的正交小波变换进行故障诊断,利用小波变换对脉冲响应信号进行分析,可检测出其发生变化的情况,获取变换后的小波系数,与系统正常状态下的小波系数相比较,从而判断系统有无故障发生^[10]。小波变换是一种时频分析方法,在时域和频域具有良好的局部化性质,非常适合非平稳信号的奇异性分析,可进行在线实时检测。

本文利用小波分析对大功率微波加热系统微波源队列的状态问题进行研究。首先,判断微波源队列是否发生故障;其次,应用多尺度小波变换极值点残差的故障检测方法对微波源队列进行循环检测,检测出故障微波源的位置,并引入小波时频图对故障检测结果进行可视化分析;最后,针对微波源可能发生的3种故障状态进行仿真验证,仿真结果表明所提方法能准确检测出微波源队列中故障微波源的位置以及发生故障的时刻。

1 小波变换简介

1.1 连续小波变换的定义

定义1:对 $f(t) \in L^2(R)$, 信号 $f(t)$ 的连续小波变换为:

$$Wf(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中:符号 $\langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle$ 表示内积; $\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为由基本小波 $\psi(t)$ 生成的连续小波; a 为伸缩因子; b 为平移因子;且 $a \in R, b \in R, a \neq 0$ 。当小波变换用于边沿检测时,式(1)中的内积往往被解释为卷积,直接用卷积来定义小波变换如下。

定义2:信号 $f(t)$ 的卷积型连续小波变换为:

$$Wf(s,t) = f * \psi_s(t) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{t-x}{s}\right) dx \quad (2)$$

简记为 $Wf_s(t) = f(t) * \psi_s(t)$, 其中, $*$ 表示卷积; s 为尺度参数; $\psi_s(t) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{t}{s}\right)$ 是基本小波 $\psi(t)$ 在尺度上的伸缩, $s \neq 0$, 且 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ 。

1.2 利用连续小波变换进行信号检测的基本原理

选设 $\theta(t)$ 是平滑函数,且二阶可导。记 $\psi^1(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$, $\psi^2(t) = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}$, 令 $\theta_s(t) = \frac{1}{s} \theta\left(\frac{t}{s}\right)$, 则对于信号 $f(t) \in L^2(R)$, 其小波变换为:

$$W^1 f(s,t) = f * \psi_s^1(t) = s \frac{d}{dt} (f * \theta_s)(t) \quad (3)$$

$$W^2 f(s,t) = f * \psi_s^2(t) = s^2 \frac{d^2}{dt^2} (f * \theta_s)(t)$$

由式(3)可知,当尺度 s 固定时, $W^1 f(s,t)$ 的极值和 $W^2 f(s,t)$ 的过零点是 $f * \theta_s(t)$ 的拐点。从而可以用小波变换的极值来检测信号的边沿。

2 基于小波分析的微波源队列故障检测

2.1 微波源队列故障的判断

在大功率微波加热系统中,普遍采用多个磁控管作为微波源队列提供热量源。通过电场强度的变化情况来判断微波源队列是否发生故障。利用有限元数值分析软件 COMSOL 来仿真电场强度的变化,如图1、2所示。图1(a)所示为4个微波源正常工作的位置分布图,图1(b)为其对应的电场强度分布;图2(a)所示为3个微波源正常工作的位置分布图,图2(b)为其对应的电场强度分布。由图1和2可知,微波源发生故障后,电场强度发生了变化。

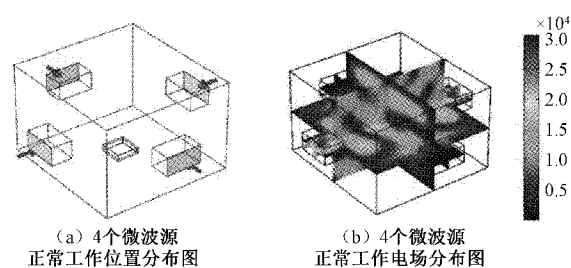


图1 4个微波源正常工作及对应的电场分布图

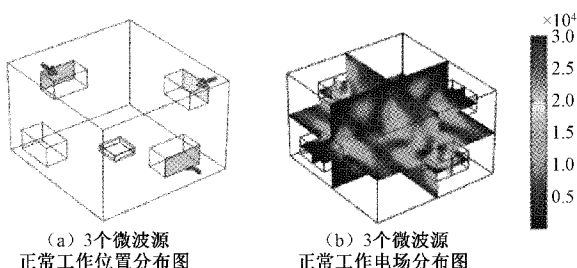


图2 3个微波源正常工作及对应的电场分布图

影响电场强度分布的因素很多,比如微波源的位置、腔体的形状和几何尺寸、加热物料温度的升高等,考虑到微波加热设备制成后,其微波源的位置、腔体形状及几何尺寸都是固定不变的,且加热物料温度升高对电场强度的影响是一个渐变的过程,而微波源的变化对电场强度的影响是一个突变的过程,本文应用多尺度小波变换极值点残差和小波时频图获取该突变信息,实现微波源队列故障的检测。引入温度变化系数 COV 来分析微波源故障对电场强度的影响,其表达式如下^[11]:

$$COV = \sqrt{\frac{\sum_n (T_i - T_a)^2}{n(T_a - T_0)}} \quad (4)$$

式中: n 为温度测量点总数; T_i 为所选测量点温度; T_a 为所选区域平均温度; T_0 为初始平均温度。选取不同工况下

物料上、下截面以及中心截面的温度变化来进行分析,所取各截面分别如图 3(a)~(c)所示。并以各截面 COV 值的

平均值作为评价指标,不同工况下温度变化系数 COV 值如表 1 所示。

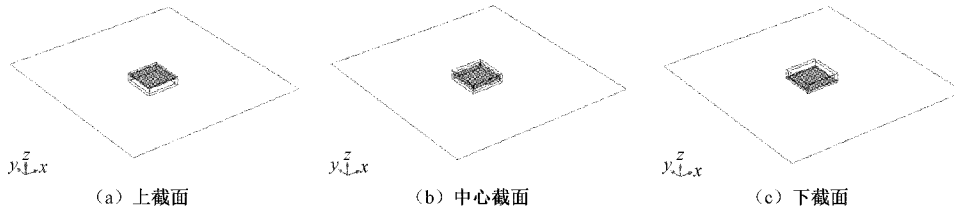


图 3 上截面、中心截面、下截面

表 1 温度变化系数 COV

截面	工况		
	4 个微波源 正常工作 (加热 10 s)	3 个微波源正常 工作,1 个微波源 故障(加热 10 s)	4 个微波源 正常工作 (加热 20 s)
上截面	0.563 3	0.815 1	0.509 8
中心截面	0.543 6	0.708 9	0.539 6
下截面	0.553 3	0.589 4	0.546 6
截面平均值	0.553 4	0.704 5	0.532 0

由表 1 可知,加热物料温度升高所导致的 COV 值变化较小,微波源故障引起的 COV 值变化较大。当 COV 值变化很大时,可判断出微波源队列发生了故障,但是不能判断微波源队列发生故障的具体位置,进而采用多尺度小波变换的极值点残差对微波源队列进行循环检测,准确检测出故障微波源的位置。

2.2 微波源故障检测

1) 微波源的数学模型

微波源系统控制的动态结构^[12]如图 4 所示。其中 $C_1(s)$ 为励磁环节, C_2 为阳极电流环节的增益, R 为阳极取样电阻, $A(s)$ 是积分与比例环节,为 $A_1 + \frac{A_2}{s}$ 。

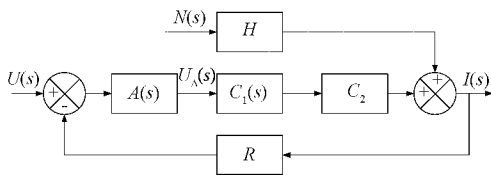


图 4 微波源系统的动态结构

输出信号 $I(s)$ 对输入信号 $U(s)$ 的传递函数为:

$$G(s) = \frac{C_1 C_2 A_1 s + C_1 C_2 A_2}{\tau s^2 + (C_1 C_2 A_1 R + 1)s + C_1 C_2 A_2 R} \quad (5)$$

采用的磁控管为 CK-612 型磁控管,其电磁电流为 4 A。与磁控管有关的参数为确定值, $C_1 C_2 \approx 4$, $R = 5.1 \Omega$; 比例系数 A_1 和积分系数 A_2 由实验决定,取值为 $A_1 = 0.1$, $A_2 = 2$, 则:

$$G(s) = \frac{0.4s + 8}{s^2 + 3.04s + 4.08} \quad (6)$$

2) 基于多尺度小波变换极值点残差的故障检测

被检测对象微波源是单输入单输出的线性系统,即:

$$I(s) = G(s)U(s) + \Delta G(s)U(s) + E(s) \quad (7)$$

式中: $\Delta G(s)$ 为由故障造成的系统参数的变化; $E(s)$ 是平稳随机噪声。该系统中,假定微波源输入信号 $U(t)$ 的突变和故障是在不同时间发生的;而且传递函数 $G(s)$ 不存在位于原点的极点和零点,发生故障时 $\Delta G(0) \neq 0$ 。

在微波源系统中,当没有发生故障时, $Wf_s I(t) \approx K \cdot Wf_s U(t)$ 在较大的尺度 s 下成立^[13]。其中, $K = G(\omega_{s0})$, ω_{s0} 是 $\psi_s(\omega)$ 的中心频率。用 $J = \min_K \sum_t [Wf_s I(t) - K Wf_s U(t)]^2$ 的最小二乘解来代替 K 。

$$\hat{k} = \frac{\sum_t Wf_s I(t) Wf_s U(t)}{\sum_t [Wf_s U(t)]^2} \quad (8)$$

$$r(t) = Wf_s I(t) - \hat{k} Wf_s U(t) \quad (9)$$

式中: \hat{k} 由式(8)给出,它是微波源正常运行时的测量数据计算出来的。

多尺度小波变换故障检测算法如算法 1 所示。

算法 1 多尺度小波变换故障检测算法

输入: $U(t), I(t), s = 1, 2, 3, \dots$ 。

输出: 系统运行状况

1. 计算 $U(t)$ 和 $I(t)$ 在多尺度下的小波变换 $Wf_s U(t)$ 和 $Wf_s I(t), s = 1, 2, 3, \dots$ 。
2. 找到 $Wf_s U(t)$ 和 $Wf_s I(t)$ 的极值点(均值突变点),假定 $Wf_s U(t)$ 中每个极值点的幅值和时间构成的序列分别为 ep_U_k 和 $t(ep_U_k)$, 而 $Wf_s I(t)$ 中每个极值点的幅值和时间构成的序列分别为 ep_I_k 和 $t(ep_I_k), k = 1, 2, 3, \dots$ 。
3. 计算函数序列 $r(k) = ep_I_k - \hat{k} ep_U_k, k = 1, 2, 3, \dots$ 。
4. 得到 $r(k)$ 后,根据 $r(k)$ 在多尺度下的变化情况检测系统是否发生故障, $t(ep_I_k)$ 所对应的时刻为系统发生故障的时刻。

2.3 故障检测结果可视化分析

引入小波时频图对残差信号 $r(t)$ 进行可视化分析。小波变换时频图反映了信号各对应时刻及频率的强度和分布,能充分反映信号的特征^[14]。由于小波变换是将时域

信号变换为尺度域,因此需通过式(10)获得信号尺度对应的频率分布,从而绘制信号的频率—时间—幅度图,即小波时频图。

$$F_a = \frac{F_c f_s}{a} \quad (10)$$

式中: F_c 为小波的中心频率; f_s 为信号的采样频率; F_a 为与尺度 a 对应的实际频率。将残差信号 $r(t)$ 变换生成时频图的算法如算法 2 所示^[15]。

算法 2 生成时频图算法

输入:残差信号 $r(t)$

输出:小波时频图

1. 根据式(10)将尺度 a 转化为实际频率 F_a 。
2. 使转换频率序列为等差序列,尺度序列必须为 $c/\text{totalscal}, \dots, c/(\text{totalscal} - 1), c/4, c/2, c$ 。其中, totalscal 为对信号进行小波变换时所用尺度序列的长度(本文设定为 256), c 为常数。
3. 由式(10)可知,尺度 $c/\text{totalscal}$ 所对应的实际频率为 $f_s/2$, 得到 $c = 2 \times F_c \times \text{totalscal}$ 。
4. 将 $c = 2 \times F_c \times \text{totalscal}$ 代入 $c/\text{totalscal}, \dots, c/(\text{totalscal} - 1), c/4, c/2, c$ 可得所需的尺度序列。
5. 确定小波基和尺度后,由式(1)求出小波系数 $Wf(a, b)$, 再结合实际频率 F_a 和时间序列 t , 即可绘制小波时频图。

2.4 基于小波的大功率微波加热系统微波源的故障检测算法

首先,根据电场强度的变化情况判断微波源队列是否发生故障;其次,使用算法 1 对微波源队列进行循环故障检测,根据残差信号 $r(t)$ 在多尺度下的变化情况检测出故障微波源的位置和发生故障的时刻;最后,使用算法 2 绘制残差信号 $r(t)$ 的小波时频图,获取特征信息,对检测结果进行可视化分析。基于小波的大功率微波加热系统微波源的故障检测算法如算法 3 所示。

算法 3 基于小波分析的大功率微波加热系统微波源的故障检测算法

输入: $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3 > 0, COV$

输出:微波源队列发生故障的位置及时间

1. 根据电场强度的变化情况判断微波源队列是否发生故障,判断

if $|COV(k)| > \epsilon_1, |COV(k) - COV(k-1)| > \epsilon_3$:
转步骤 2

else:停止

2. 使用算法 1 对微波源队列进行循环故障检测,根据残差信号 $r(t)$ 在多尺度下的变化情况检测出故障微波源的位置和发生故障的时刻。

3. 使用算法 2 绘制残差信号 $r(t)$ 的小波时频图,获取特征信息,对检测结果进行可视化分析。

4. 判断

if $|COV(k)| > \epsilon_1, |COV(k) - COV(k-1)| / |COV(k)| < \epsilon_2$, and

$|COV(k)| \leq \epsilon_1, |COV(k) - COV(k-1)| / < \epsilon_3$:
等候循环时间

else:转步骤 2

3 仿真结果与分析

为了验证本文提出的故障检测算法,对微波源可能发生的 3 种故障类型进行实例仿真。在实验过程中,所采用的计算机操作系统为 Windows10, 64 位,计算机的硬件环境为 Intel Core i7-6700 CPU 3.41 GHz, 4.00 GB RAM, 仿真实验软件为 MATLAB R2016a。

假定微波源在 $t = 80, 90, 100$ s 分别发生如下 3 种故障。

故障 1(阴极损坏):阴极寿命的提前终了。

故障 2(阳极损坏):由于阳极散热严重不足导致阳极端面局部烧毁或严重变形,此外阳极块两端的隔膜带的变形造成相互短接,或隔膜带与阳极的短接导致谐振系统的变态或消失,致使磁控管无法正常起振。

故障 3(能量输出器即天线的损坏):磁控管工作在雷基图不恰当的相位区中造成高频输出电流过大,产生天线烧断、输出端陶瓷炸裂或天线帽局部烧毁等现象。

发生故障 1 时,阳极电压 $U(t)$ 和阳极电流 $I(t)$ 如图 5 所示,输入信号 $U(t)$ 的均值在 $t = 50$ s 时由 6 242 V 突变为 6 073 V。发生故障 1 时,各尺度下相对应残差 $r(t)$ 的极值如图 6 所示。由图 6 可看出, $r(t)$ 在各尺度下 $t = 80$ s 附近都出现了较大的极值,而且这些极值的大小并没有随着尺度的增大而衰减,其他位置的极值都随着尺度的增大迅速衰减并趋于 0。由此,可判断出在 $t = 80$ s 时微波源发生故障 1。

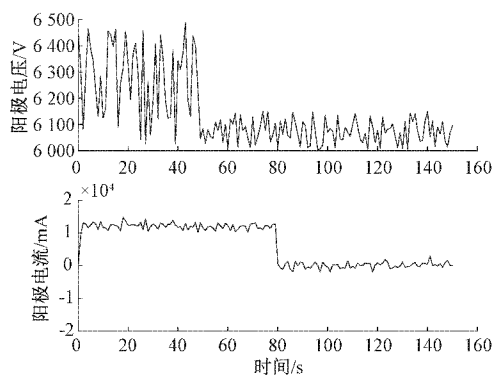


图 5 故障 1 的 $U(t)$ 和 $I(t)$

发生故障 2 时, $U(t)$ 和 $I(t)$ 如图 7 所示,输入信号 $U(t)$ 的均值在 $t = 80$ s 时由 6 261 V 突变为 6 097 V。发生故障 2 时,各尺度下残差 $r(t)$ 的极值如图 8 所示。由图 8 可看出, $r(t)$ 在 $t = 90$ s 时微波源发生故障 2。

发生故障 3 时, $U(t)$ 和 $I(t)$ 如图 9 所示,输入信号

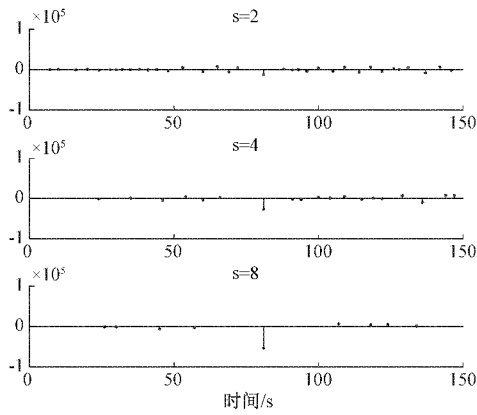


图 6 故障 1 多尺度下 $r(t)$ 的极值图

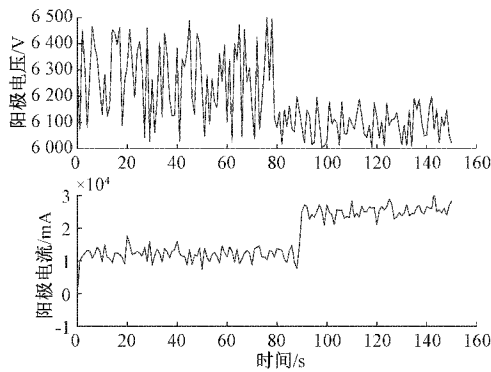


图 7 故障 2 的 $U(t)$ 和 $I(t)$

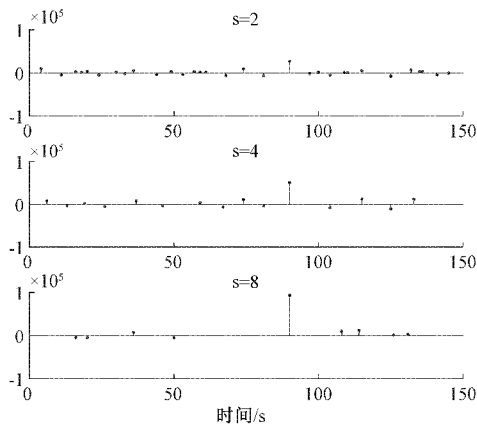
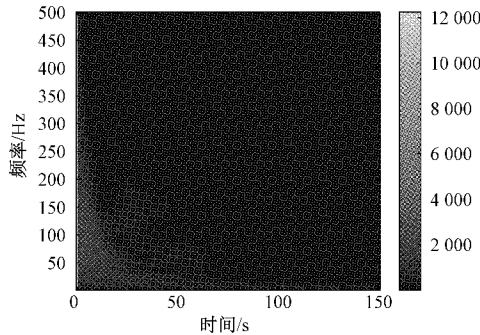


图 8 故障 2 多尺度下 $r(t)$ 的极值图



(a) 微波源正常运行时 $r(t)$ 小波时频图

$U(t)$ 的均值在 $t=80$ s 时由 6 241 V 突变为 6 456 V。发生故障 3 时,各尺度下残差 $r(t)$ 的极值如图 10 所示。由图 10 可判断出在 $t=100$ s 时微波源发生故障 3。在图 10 中,尺度 8 下,残差 $r(t)$ 极值图上 $t=100$ s 时刻的极值点有所偏移,是由于较大尺度下,小波函数 $\psi_s(t)$ 的时间窗较大而导致检测时会有一定的延迟。

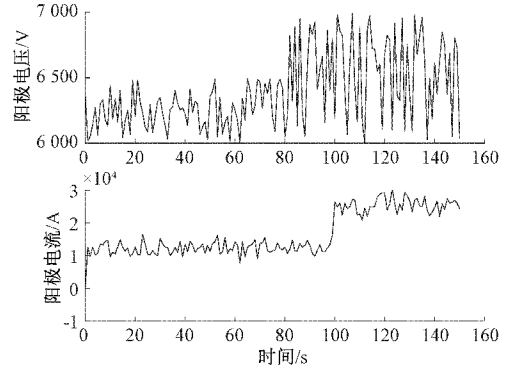


图 9 故障 3 的 $U(t)$ 和 $I(t)$

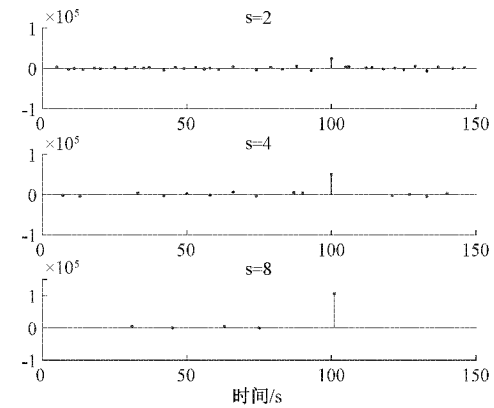
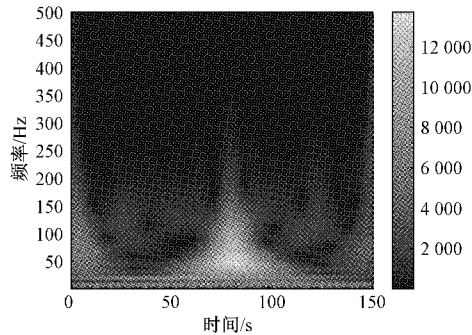
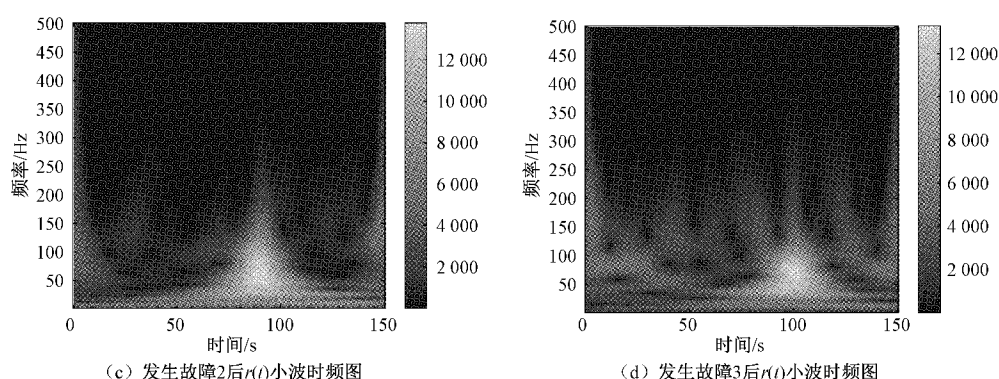


图 10 故障 3 多尺度下 $r(t)$ 的极值图

绘制 $r(t)$ 的连续小波变换时频图,并分析不同故障类型下 $r(t)$ 的小波时频图特性。微波源正常运行时 $r(t)$ 的小波时频图,如图 11(a)所示。发生故障 1 后, $r(t)$ 的小波时频图如图 11(b)所示;图 11(b)在 $t=80$ s 时, $r(t)$ 信号出现剧烈变化且幅值最大,此时,幅值最大的时刻为发生故障 1 的时刻;发生故障 2 后, $r(t)$ 的小波时频图如图 11(c)所示,图 11(c)在 $t=90$ s 时微波源发生故障 2;发生故障 3



(b) 发生故障 1 后 $r(t)$ 小波时频图

图11 不同情况下残差信号 $r(t)$ 的小波时频图

后, $r(t)$ 的小波时频图如图 11(d) 所示, 图 11(d) 在 $t=100$ s 时微波源发生故障 3。从图 11 的小波时频图可知, 微波源发生故障后残差信号 $r(t)$ 的时频图分布不同, 表现出一定的差异性。绘制残差信号 $r(t)$ 的小波时频图, 可以更直观地判断出微波源是否发生故障。相对于常用的二值检测方法, 本文方法可以在线实时检测, 具有可靠性和经济性。

4 结 论

本文提出一种基于小波分析的大功率微波加热系统微波源阵列的故障检测方法。使用温度变化系数 COV 表征电场强度的变化; 应用多尺度小波变换极值点残差的故障检测方法对微波源阵列进行循环检测, 引入小波时频图对检测结果进行可视化分析。对微波源的 3 种故障状态分别进行了实例仿真, 仿真结果表明, 本文所提方法具有良好的检测效果, 对微波源阵列进行循环检测, 可以检测出故障微波源的具体位置, 根据不同故障下残差信号 $r(t)$ 各尺度下的变化情况检测出发生故障的时刻。残差信号 $r(t)$ 的小波时频图, 可以更直观地判断出微波源是否发生故障。本文不足之处在于只针对微波源的单个故障进行检测, 如何对发生多故障的情况进行检测, 仍需进一步研究。

参考文献

- [1] SAROJINIA T, ASHLEY A, AMOOLYA L, et al. Microwave plasma-enhanced and microwave heated chemical reactions[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2020, 40(1): 1-23.
- [2] YANG B, PENG J H, GUO S H, et al. Acid-pickling plates and strips speed control system by microwave heating based on self-adaptive fuzzy PID algorithm[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(8): 2179-2186.
- [3] ZHAO X F, ODELIUS K, RAJARAO G K, et al. Microwave carbonized cellulose for trace pharmaceutical adsorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 346: 557-566.
- [4] ZUBAIR M, FERRARI R, ALAGHA O, et al. Microwave foaming of materials: An emerging field[J]. Polymers, 2020, 12(11): 2073-4360.

- [5] 王奇, 李妍红. 基于多分辨率分析与相关检测的海底电缆分布式故障检测[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 68-72.
- [6] 陆文高, 苏振华, 齐晶, 等. 基于小波变换的卫星故障诊断方法[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(2): 30-33.
- [7] 郭伟超, 赵怀山, 李成, 等. 基于小波包能量谱与主成分分析的轴承故障特征增强诊断方法[J]. 兵工学报, 2019, 40(11): 2370-2377.
- [8] 王江萍, 王星. 基于小波奇异值分析的管道泄漏特征提取研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(2): 91-97.
- [9] 胡叶林, 代斌, 宋晓. 基于小波包和 AFSA-SVM 的电机故障诊断[J]. 电子测量技术, 2021, 44(2): 48-55.
- [10] XUE T, ZHONG M, DING S X, et al. Stationary wavelet transform aided design of parity space vectors for fault detection in LDTV systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2018, 12(7): 857-864.
- [11] GEEDIPALLI S S R, RAKESH V, DATTA A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens[J]. Food Eng, 2007, 82: 359-368.
- [12] 杨彪. 大功率微波加热系统热性能数值模拟及智能控制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [13] 叶昊, 王桂增, 方崇智. 小波变换在故障检测中的应用[J]. 自动化学报, 1997, 23(6): 736-741.
- [14] 钱国超, 赵仲勇, 邹德旭, 等. 基于连续小波变换的变压器绕组变形故障类型检测[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 2016-2023.
- [15] 鄢仁武, 林穿, 高硕勋, 等. 基于小波时频图和卷积神经网络的断路器故障诊断分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10): 198-205.

作者简介

朱娜, 硕士研究生, 主要研究方向为多物理场耦合软测量及数值计算。

E-mail: 2298139593@qq.com

杨彪(通信作者), 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂过程的优化和控制、多智能体的协调输出与分布式协同控制、微波能等新能源的优化与评估、多物理场耦合软测量及数值计算等。

E-mail: ybiaocn@163.com