基于改进EMD算法在氧化锌避雷器泄漏电流中的去噪研究

陈宏铭

（中冶赛迪电气技术有限公司，重庆 400010）

摘要：经验模态分解（Empirical Mode Decomposition，EMD）是一种数据驱动的自适应信号分解方法，在数据特征提取中被广泛应用。针对 EMD 自身存在的模态混叠、端点效应等问题，提出了一种将改进的经验模态分解法对金属氧化物避雷器（Metal Oxide Arresters, MOA）的泄漏电流信号进行去噪处理。对 MOA 含噪声的泄漏电流信号采取固有模态函数（Intrinsic Mode Functions，IMF）分解，通过计算各层 IMF 分量和原始信号间的相关系数，获取信号和噪声主导的 IMF 分量的分界点。通过重构有用信号的改进模态算法实现 MOA 泄漏电流的去噪处理。结合信噪比、均方根误差和波形相似系数等评价指标对去噪效果进行评估，通过算例结果验证改进方法在 MOA 信号处理方面的有效性。

关键词：改进经验模态分解法；金属氧化物避雷器；泄漏电流；去噪

Research on noise removal in leakage current of zinc oxide surge arrester based on improved modal method

CHEN Hongming

（China Metallurgical CCID Electric Technology Co. Ltd., Chongqing 400010, China）

Abstract: Empirical Mode Decomposition (EMD) is a data-driven adaptive signal decomposition method, which is widely used in data feature extraction.Aiming at the problems of modal aliasing and end effect in EMD itself, this An improved empirical mode decomposition method to denoise the leakage current signal of metal oxide arresters (MOA) is proposed.The noise-containing leakage current signal of the MOA is decomposed by intrinsic mode functions (IMF), and the demarcation point between the signal and the noise-dominated IMF component is obtained by calculating the correlation coefficient between the IMF components of each layer and the original signal.The de-noising of MOA leakage current is realized by an improved modal algorithm that reconstructs the useful signal. Combined with the evaluation indicators such as signal-to-noise ratio, root mean square error, waveform similarity coefficient, etc., the denoising effect is evaluated, and the effectiveness of the improved method in MOA signal processing is verified by the results of an example.

Key words: improved empirical mode decomposition; metal oxide arresters; leakage current; de-nosing

0 引言

MOA作为限制电网雷击过电压、操作过电压的重要设备，在电网中广泛应用并获得良好效果。而在高压配电网络中，MOA会受现场运行环境、过电压冲击和长期泄漏电流等因素影响引起性能下降，严重时可能存在爆炸的风险[1-3]。因此，对其进

行性能监测，对电力系统的健康运行有重要意义。

目前对电网设备的故障监测主要有离线、在线两种方式。通过在线监测的方式能够降低离线监测中所投入的大量人力、物力和停电的风险。随着在线监测技术的不断发展，对MOA性能老化的在线监测具备可操作性[4]。文献[5]对MOA泄漏电流中所含的噪声干扰进行详细分析，并结合小波去噪法对数据进行去噪处理。文献[6-7]利用自适应模态分解法和模态相关法确立各固有模态函数与信号间的相关性，利用相关性系数对泄漏电流信号进行去噪，降低去噪误差。

综上，本文提出了一种改进的经验模态分解法，对MOA的泄漏电流信号进行去噪处理，对MOA含噪声的泄漏电流信号采取IMF分解，通过计算各层IMF分量和原始信号间的相关系数，获取信号和噪声主导的IMF分量的分界点。通过重构有用信号的改进模态算法实现MOA泄漏电流的去噪处理。结合信噪比、均方根误差和波形相似系数等评价指标对去噪效果进行评估，最后通过算例分析结果验证本文所提方法的合理性。

1　MOA泄漏电流去噪分析

MOA避雷器的简化等效模型如图1所示，其可等效为1个电容与1个非线性电阻组合的并联模型[8]，流过避雷器泄漏电流包含阻性电流、容性电流，其中阻性电流占比为5%～20%，剩余为容性电流部分。

$$i = i_C + i_R \tag{1}$$

$$i_C = u/[1/(2\pi fC)] \tag{2}$$

$$i_R = \tan u / k \tag{3}$$

式中，i_C、i_R分别为容性、阻性电流；u为施加于模型两端的测试电压；k为反映避雷器的特征参数。

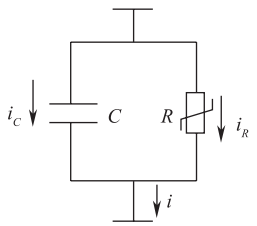


图 1　MOA 等效模型图

Fig. 1 MOA equivalent model diagram

正常状态下电网电压信号由下式给出

$$U_2 = \sin(100\pi t + \frac{\pi}{8}) \tag{4}$$

如果在上述信号中加入随机噪声，则可以仿真模拟出电网中MOA老化前后的信号波形，如图2、图3所示。

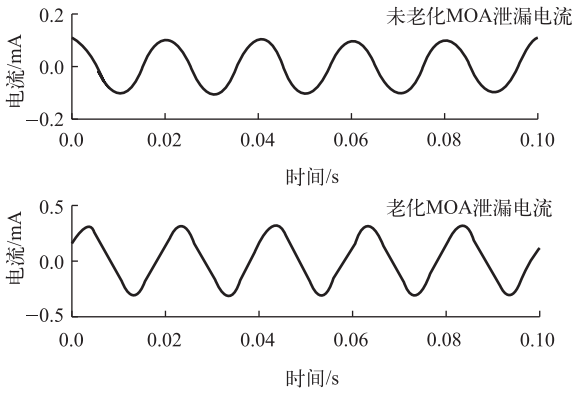


图 2　MOA 老化前后的泄漏电流仿真波形（无干扰）

Fig. 2 Simulation waveform of leakage current before and after MOA aging (without interference)

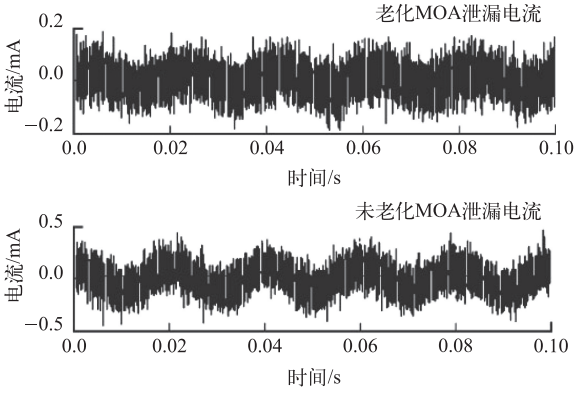


图 3　MOA 老化前后的泄漏电流仿真波形（有干扰）

Fig. 3 Simulation waveform of leakage current before/after MOA aging (with interference)

图2为无噪声干扰的MOA老化前后的泄漏电流波形，通常在正常状态下，MOA泄漏电流主要以容性电流为主，其波形可近似为正弦波形，但老化后的MOA泄漏电流阻性电流占比增加，波形呈现出线性趋势变化且严重畸变，此外其电流幅值明显增大。图3反映了含随机噪声的MOA老化前后的泄漏电流波形。由于受噪声信号干扰的影响，很难主观辨识出MOA老化前后的泄漏电流。因此，采取合适的算法进行降噪处理，对

发掘MOA老化后泄漏电流特征以及准确分析其特征具有重要意义。

2 EMD去噪原理

EMD去噪方法分为3个步骤：①基于经验模态分解法的固有模态函数分解；②求取信号与噪声模态的分界点；③对真实信号进行重构。EMD作为振动模式下信息提取的筛选过程，其核心思路是利用3次样条函数对数据极值点进行拟合，找出数据平衡位置。

2.1 EMD原理

依据文献[9]所述，利用HHT变换对MOA的泄漏电流信号进行经验模态分解（EMD），从而求取IMF。

对于既定的信号$x(t)$，提取信号的局部极值，并利用3次样条函数对信号的上包络线$x_{max}(t)$、下包络线$x_{min}(t)$进行拟合。求取上、下包络线的均值拟合出一条均值曲线，设定$m_1(t)=[x_{max}(t)]/2$，于是第一组件值$h_1(t)$解析式为

$$h_1(t)=x(t)-m_1(t) \tag{5}$$

假定$h(t)$满足IMF计算条件，则把$h_1(t)$作为IMF_1。若不满足计算条件，则将$h_1(t)$视作原始信号，重复上述过程并确定出新的包络线均值。经n次筛选操作后，得到的$h_n(t)$为第1阶IMF分量，即

$$x(t)=\mathrm{IMF}_1+R_1(t) \tag{6}$$

式中，$R_1(t)$为除去IMF_1分量后的剩余项，如果为非单调序列或常值序列条件时，则将$R_1(t)$当作初始信号重复上述过程，筛选得到余下的 IMF，直至余项$r(t)$为单调序列。

通过上述分解过程后，原始信号$x(t)$计算公式为

$$x(t)=\sum_{i=1}^{n}\mathrm{IMF}_i(t)+r(t) \tag{7}$$

式中，$IMF_i(t)$为第i个IMF分量；$r(t)$为余项。

综上可知，EMD法具备模型训练过程中的滤波功能，训练后的信号将会被分解成不同时间尺度下对应的IMF分量。其后通过选择合理的IMF分量进行信号堆叠，以实现信号重构和滤波[10]。

2.2 信号和噪声模态确定

经EMD后，获取的IMF分量中包含真实信号和噪声信号，因此需筛选出IMF分量中的真实信号进行重构，避免信号重构误差。

利用模态相关法进行IMF信号去噪操作，计算出各IMF分量信号同原始信号间的相关系数，进而优化出正常信号、噪声信号间的分交界限。另外，为了获得更高的信噪比增益，本文可使用相关系数中的分选准则对IMF信号进行筛选并完成降噪处理。

根据文献[10]，各模态函数IMF分量与原始信号的相关系数定义为

$$R[x(t_i),\mathrm{IMF}_j(t_i)]=\frac{\mathrm{cov}[x(t_i),\mathrm{IMF}_j(t_i)]}{\sqrt{\mathrm{cov}\,x(t_i)}\sqrt{\mathrm{IMF}_j(t_i)}} \tag{8}$$

式中，$\mathrm{cov}x(t_i)$为协方差。

噪声IMF分量与真实信号的IMF分量的分界点通过下式给出

$$k=f_L[R(x(t_i),\mathrm{IMF}_j(t_i))]+1 \tag{9}$$

式中，f_L为第一个局部极小值。

结合式（9）确定分界点后，根据式（7）得到去噪后波形为

$$x'(t)=\sum_{i=k}^{n}\mathrm{IMF}_j(t_i)+r(t) \tag{10}$$

上述分选准则即为模态相关法分选准则。有关模态分选准则的合理性的数学证明可以参见文献[10]。

3 EMD算法的改进

3.1 基于皮尔逊相关系数对噪声IMF的筛选

结合文献[11]所述原理，皮尔逊相关系数可充分反映两个变量之间相关程度的统计量，其定义式为

$$\mathrm{PCC}=\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})]^2[\sum_{i=1}^{N}(y_i-\bar{y})^2]}} \tag{11}$$

式中，x_i为MOA的泄漏电流原始信号$x(t)$；y_i为各分量信号IMF_i；$\bar{x}$、$\bar{y}$分别为x_i、y_i的平均值；N为数据长度；PCC值范围为[－1,1]，|PCC|值表

示关联强度。PCC值的评估标准[12]见下表。

表　PCC 值评估标准

Tab. PCC value evaluation criteria

|PCC| 值	释义
0.00 ～ 0.19	极弱关联
0.20 ～ 0.39	弱关联
0.40 ～ 0.69	中度关联
0.70 ～ 0.89	强关联
0.90 ～ 1.00	极强关联

经EMD后，获得的IMF分量依次是按照高频至低频布置的，而高频对应的第1个IMF_1分量包含的噪声和对应的PCC值最大，且着随其阶数的增加而逐步减小。因此，对各IMF分量和原始信号的PCC值进行计算，并找到对应的分界点j，确保降噪后前j阶分量的PCC值保持稳定在合理范围内，通过此准则可找出第1个分界点j之前的所有阶为IMF噪声。

3.2　基于自相关函数筛选有用信号IMF

利用自相关函数的特性确定第2个分界点k，即混叠IMF和信号IMF的分界，从而筛选出信号主导的IMF。自相关函数为

$$R_X(t_1,t_2)=E(x(t_1),x(t_2)) \tag{12}$$

式中，$x(t)$为各阶IMF分量。

利用噪声统计的相关特性，通过自相关函数对含有随机噪声的数据序列进行解析，推导出在零点处该函数值最大，其余点的函数值将迅速衰减至0，表现出弱相关性；而对主导信号的数据进行序列，在零点处可获得最大的自相关函数值，但其余点的函数值缓慢下降至0，且下降过程中呈现出一定变化规律，为强相关性。因此，结合该特性确定出第2个分界点k，依次对IMF分量的筛选。

$$y(t)=\sum_{i=1}^{j}\mathrm{IMF}_i+\sum_{i=j+1}^{k}\mathrm{IMF}_i+\sum_{i=k+1}^{N}\mathrm{IMF}_i+r(t) \tag{13}$$

式中，IMF_1～IMF_j为噪声分量；IMF_{j+1}～IMF_k为混叠分量；IMF_{k+1}～IMF_n为信号分量；$r(t)$为余项。

3.3　仿真泄漏电流的降噪分析

对MOA老化前后的信号状态进行模拟分析，将泄漏电流信号进行改进EMD，获得各层级的IMF分量信号，如图4所示。

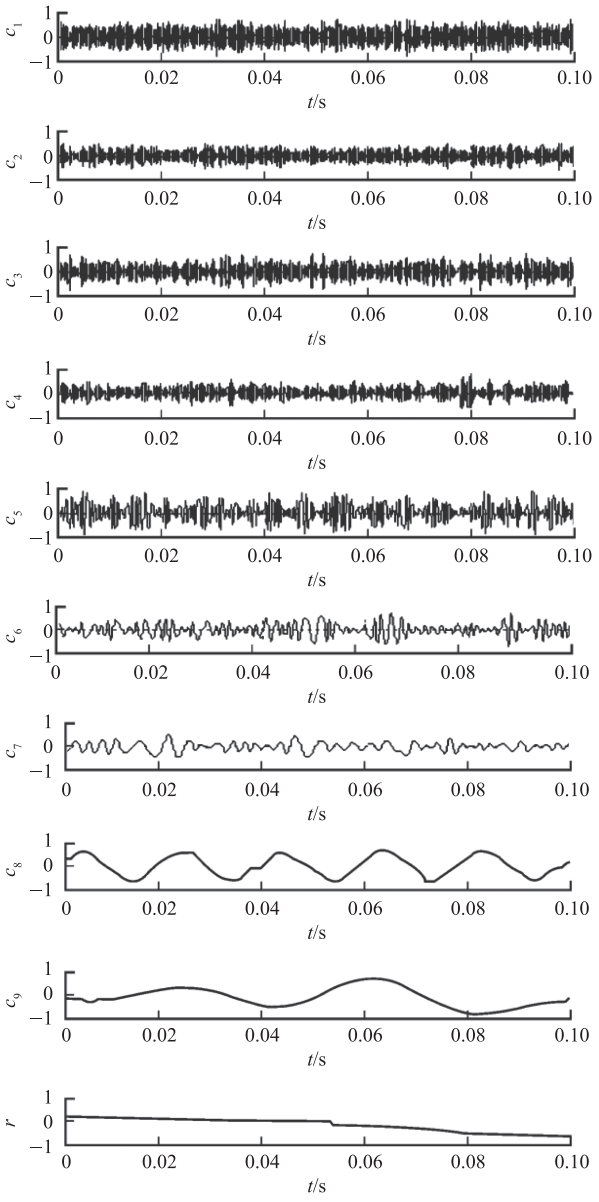


图 4　MOA 老化后的泄漏电流 IMF 分量

Fig. 4 IMF component of the leakage current after MOA aging

由图4可知，分解得到的IMF分量，其频率呈由高至低的变化趋势，其中前几层的IMF分量具有较高的频率状态，可定位为噪声干扰信号，但仅凭对上述趋势的观察，将高频信号和低频信号间的分层定义为噪声和信号的分界点，这无疑增加了信号重构的误差风险。另外，考虑到分解信号本身存在奇异点，该定义的原则也促进了过度降噪而使数据失真，因此需探讨科学合理的算法，对噪声和有用信号的分界点进行精确分析。

综上，利用改进的EMD算法对图4中含噪声干扰的MOA的泄漏电流进行相关系数计算，获得相关系数变化曲线如图5所示。

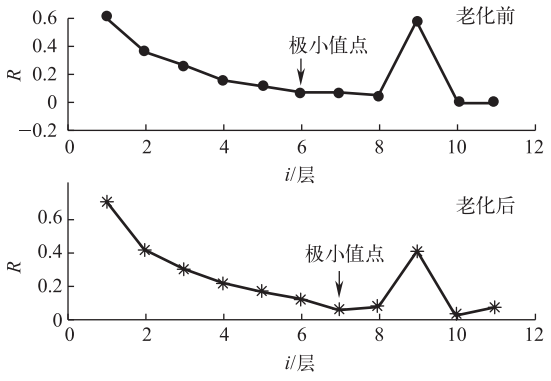


图 5　MOA 老化前后的泄漏电流模态分界点

Fig. 5 The leakage current modal demarcation point before and after MOA aging

由图5可知，经相关系数计算后，得出第一极小值点为第6层的IMF分量。MOA老化前的IMF噪声分量部分和信号分量部分的分界点k选为7，即第1~6层IMF分量以噪声信号为主，第7层以后的IMF分量以信号分量为主，该部分适用于信号重构。同理，当MOA老化后，第一极小值点将后移（第7层），噪声与信号模态的分界点k选为8。

3.4　MOA泄漏电流仿真信号去噪结果评价

为了客观评价模态相关法在MOA泄漏电流中应用的有效性，引入信噪比（SNR）和均方误差（MSE）这两个参数作为评价指标。

$$\mathrm{SNR}=10\log\left[\sum_{k=1}^{N}y_k^2/\sum_{k=1}^{N}(\bar{y}-y_k)^2\right] \tag{14}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(y_k-\bar{y})^2} \tag{15}$$

$$\mathrm{NCC}=\left(\sum_{k=1}^{N}y_k\,\bar{y}_k\right)/\sqrt{\left(\sum_{k=1}^{N}y_k^2\right)\left(\sum_{k=1}^{N}\bar{y}_k^{\,2}\right)} \tag{16}$$

式中，y、$\bar{y}$分别为无噪声的原始信号和去噪后的信号；N为信号长度。

4　MOA泄漏电流实测信号去噪结果分析

为验证本文的方法对MOA泄漏电流实测信号降噪的有效性，通过对某变电站内安装的MOA采集在线监测装置的数据，获得MOA在正常、老化状态下的泄漏电流信号，如图6所示。结合本文所提的方法进行降噪处理，所得结果如图7所示。

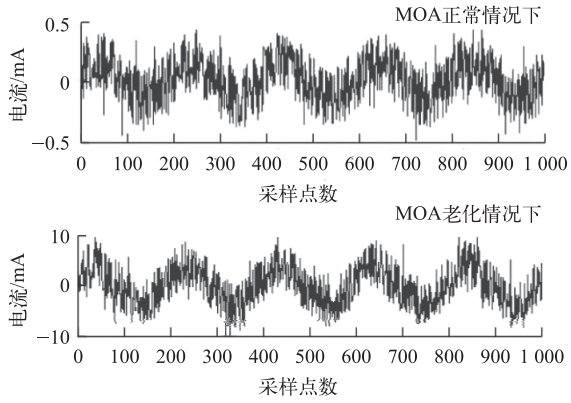


图 6　MOA 泄漏电流实测信号结果

Fig. 6 MOA leakage current measured signal results

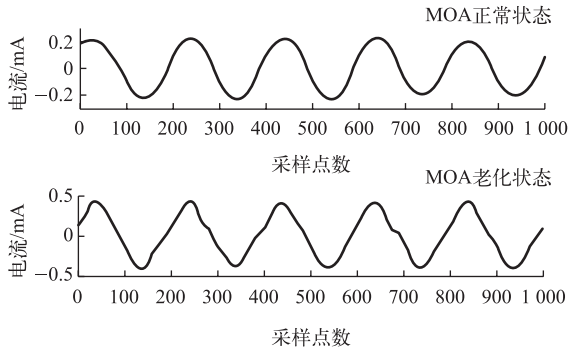


图 7　MOA 泄漏电流实测信号去噪结果

Fig. 7 The result of signal denoising of the measured signal of the MOA leakage current

由图7可知，利用改进EMD算法对MOA实测的泄漏电流进行降噪处理后，其实测信号的波形将更加平滑，同未掺杂噪声的仿真波形拟合的误差最小。此外，和其他降噪方法（如小波降噪法、EMD法）相比，改进EMD算法除能继承EMD算法自适应分解的优势外，还能大幅提高模型的训练效率。此外，考虑到EMD算法本身的模态混叠、端点效应等缺陷，改进算法中考虑了皮尔逊相关系数并进行相应处理后，所得结果能客观实际反映降噪后的信号结果。

不同方法下MOA泄露电流去噪结果如图8所示。

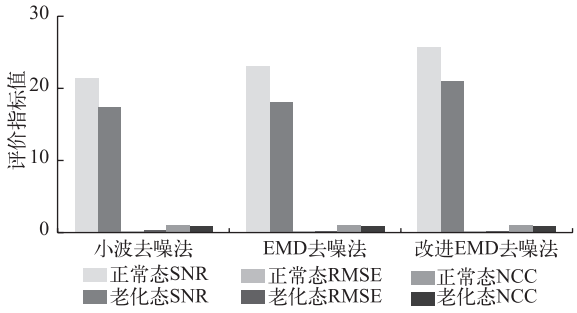


图 8　不同方法下 MOA 泄漏电流去噪结果

Fig. 8 MOA leakage current denoising results under different methods

由图8可知，本文所用的改进EMD降噪方法所获得的效果最优，降噪后对其信噪比指标、均方根误差指标和波形相似系数指标进行评价，均获得了理想的效果。因此，利用本文改进EMD降噪方法能很好地去除MOA泄漏电流信号中的噪声部分，并能清晰地辨识MOA是否老化。

5　结束语

本文在继承EMD算法基础上，提出了一种改进的EMD算法，对MOA避雷器的泄漏电流信号进行降噪处理，并通过皮尔逊相关系数准则和噪声统计特性将信号分解的IMF进行分类处理，从而提升信号的区分度，利用改进EMD算法提取IMF分量并重构信号，其大幅增加信噪比指标。同小波阈值去噪法、经典EMD法相比，改进的EMD降噪方法能很好地去除MOA泄漏电流信号中的噪声部分，并能清晰地辨识MOA是否老化。另外，改进EMD算法在处理MOA泄漏电流方面更具自适应性。

参考文献

[1] 刘琦，赵军，张利华，等．直流氧化锌压敏电阻老化过程的研究[J]．电瓷避雷器，2014(1)：75-78．

[2] 徐乐，杨仲江，游志远，等．氧化锌压敏电阻劣化前后动态特性研究[J]．电瓷避雷器，2014(4)：132-138．

[3] 李祥超，陈则煌，周中山，等．限压型电涌保护器在不同条件下劣化性能的分析[J]．电器与能效管理技术，2014(14)：12-17．

[4] NETO E T W，DA COSTA E G，MAIA M J A．Artificial neural networks used for ZnO arresters diagnosis[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2009，24(3)：1390-1395．

[5] 董莉娜，胡可，王微波，等．小波消噪在10 kV金属氧化物避雷器在线检测中的应用[J]．高电压技术，2014，40(3)：891-896．

[6] 陈凤林．一种新的基于 EMD 模态相关的信号去噪方法[J]．西华大学学报(自然科学版)，2009，28(6)：20-24．

[7] 孙伟峰，彭玉华，许建华．基于EMD的激光超声信号去噪方法[J]．山东大学学报(工学版)，2008，38(5)：121-126．

[8] 罗彩建．考虑谐波电压影响的金属氧化物避雷器在线监测算法研究[J]．电瓷避雷器，2016(3)：53-57．

[9] HUANG N E，SHEN Z，LONG S R，et al．The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C]//Proceedings of the Royal Society of London A：Mathematical，Physical and Engineering Sciences．The Royal Society，1998，454(1971)：903-995．

[10] FLANDRIN P，RILLING G，GONCALVES P．Empirical mode decomposition as a filter bank [J]．Signal Processing Letters，IEEE，2004，11(2)：112-114．

[11] 安华，王国锋，王喆，等．基于深度学习理论的刀具状态监测及剩余寿命预测方法[J]．电子测量与仪器学报，2019，33(9)：64-70．

作者简介

陈宏铭（1988—），男，本科，工程师，研究方向为电力系统及电气一次设计。

（收稿日期：2022-08-28）