

# 基于 IPOA-VMD 与改进小波阈值的 视频电磁泄漏信号处理方法

刘鑫强, 李凯, 王嘉龙, 王晋哲, 杨光, 潘晋孝

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 计算机显示设备无意发射的电磁波中包含着有价值的信息, 但其在传播过程中极易受噪声干扰, 进而严重影响泄漏信息的恢复效果; 为此, 提出一种改进鹈鹕优化变分模态分解结合小波阈值去噪的视频电磁泄漏信号预处理方法, 以此来抑制噪声干扰的影响; 该方法通过改进 POA 算法优化 VMD 的模态数和惩罚因子, 对分解出的模态分量进行余弦相似度分析以筛选有效成分, 并采用改进的小波阈值算法对所选模态做进一步降噪处理; 仿真结果表明, 该方法在信噪比、均方根误差和相关系数等指标上均优于 POA-VMD 重构及 POA-VMD-小波阈值方法; 在实际泄漏信号实验中, 多组数据处理结果显示所提方法平均噪声抑制比达到 18.492 4 dB, 较对比方法分别提升了 2.956 7 dB、1.268 5 dB, 并进行图像重建实验验证了所提方法可以提升电磁泄漏信息的还原效果。

**关键词:** 电磁泄漏; VGA; 鹈鹕优化算法 (POA); 变分模态分解 (VMD); 小波阈值

## Video EM Leakage Signal Processing Method Based on IPOA-VMD and Improved Wavelet Threshold

LIU Xinqiang, LI Kai, WANG Jialong, WANG Jinzhe, YANG Guang, PAN Jinxiao

(State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The electromagnetic (EM) wave unintentionally emitted by computer display devices contains valuable information, which are highly susceptible to noise during its propagation, thus affecting the recovery of leaked data. Therefore, an improved pelican optimization variational mode decomposition method combined with wavelet threshold denoising is proposed for preprocessing video EM leakage signals, which aims to suppress the impact of noise interference. This method improves a pelican optimization algorithm (POA) to optimize the modal number and penalty factor of variational mode decomposition (VMD), analyzes cosine similarity on the decomposed modal components to screen out effective components, and utilizes an enhanced wavelet threshold algorithm to further denoise the selected modes. Simulation results show the proposed method outperforms the POA-VMD reconstruction and POA-VMD-wavelet methods in signal-to-noise ratio, root mean square error, and correlation coefficient. In actual signal leakage tests, the results on multiple sets of data indicate that the proposed method reaches an average noise suppression ratio of 18.492 4 dB, representing improvements of 2.956 7 dB and 1.268 5 dB over the comparison methods respectively. The image reconstruction experiments confirm that the method can enhance the restoration effect of EM leakage information.

**Keywords:** EM leakage; Video Graphics Array (VGA); POA; VMD; wavelet threshold

收稿日期:2025-12-01; 修回日期:2026-01-05。

基金项目:中央引导地方科技发展资金(YDZJSX2024D032);山西重点研发计划项目(202402010101002);山西省专利转化计划项目(202405013);山西省科技成果转化引导专项(202304021301028)。

作者简介:刘鑫强(2002-),男,硕士研究生。

通讯作者:李凯(1979-),男,博士,教授。

引用格式:刘鑫强,李凯,王嘉龙,等.基于 IPOA-VMD 与改进小波阈值的视频电磁泄漏信号处理方法[J].计算机测量与控制,2026,34(4):232-241.

## 0 引言

计算机显示设备辐射的电磁波是信息泄漏的主要来源<sup>[1]</sup>。显示设备在工作过程中,其显示屏<sup>[2]</sup>、视频线缆<sup>[3]</sup>和接口<sup>[4]</sup>不可避免地会发射电磁波,这其中包含着有价值的信息,然而,计算机视频泄漏信号常常会受到多种因素的干扰<sup>[5-7]</sup>。因此,为提高信号的质量和准确性,有必要对电磁泄漏信号进行预处理<sup>[8-10]</sup>。

为抑制信号中的噪声干扰,国内外学者对信号降噪做了大量研究,提出了不同的降噪方法。常用有小波变换<sup>[11]</sup>、奇异谱分析(SSA, singular spectrum analysis)<sup>[12]</sup>、经验模态分解(EMD, empirical mode decomposition)<sup>[13]</sup>、变分模态分解(VMD, variational mode decomposition)<sup>[14]</sup>等。小波变换可以将非平稳信号分离为不同尺度的小波分量,但由于预定义的小波基,不具备自适应能力<sup>[15]</sup>。SSA 独立于信号模型,并且具有不受噪声频谱分布影响的特点,能够达到自适应降噪的效果,但主分量选择的问题会限制该方法的便携性和精度<sup>[16]</sup>。EMD 可自适应分解信号为多个本征模态函数,但分解过程存在模态混叠,致使信号特征频率与噪声分离不充分<sup>[17]</sup>。VMD 将信号分解成不同频率占优的子信号,进而分析信号,有效解决了模态混叠问题,但分解层数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$  的值需要预先设定,且  $K$  与  $\alpha$  对分解效果有很大影响,此外,分解后的本征模态函数(IMF, intrinsic mode function)可能包含噪声、谐波残余或无效分量,需通过人工经验筛选有效模态<sup>[18]</sup>。针对 VMD 算法的优化与 IMF 的筛选,学者们做了许多研究,文献 [19] 提出了一种广义 VMD 去噪方法,虽然能根据需要实现频带划分,但 VMD 参数的选取依赖经验。文献 [20] 通过鹈鹕优化算法(POA, pelican optimization algorithm)优化 VMD 的参数,以最小包络熵作为评价指标,获取最佳惩罚因子和分解层数,但存在容易陷入局部最优的局限。文献 [21] 设计了一种 VMD 与小波变换相结合的降噪方法,通过二次去噪提升噪声抑制效果,但由于小波采用的是软阈值去噪,容易导致信号幅值失真。文献 [22] 通过 VMD 结合互信息对模态分量进行判别,使信号与噪声分离更加准确,但互信息计算复杂度高,对计算资源需求较大。在上述研究中,虽然各位学者利用各种方法对信号处理方法进行了深入研究,但在实际应用中,对 VMD 参数选择的优化方法以及在小波阈值去噪处理方面存在参数优化不足、收敛速度慢、软硬阈值函数不够平滑和连续等问题,导致降噪效果难以满足需求。

为了解决上述问题,本文提出一种改进鹈鹕优化 VMD 结合自适应奇异谱分析的电磁泄漏信号降噪方法,基于 POA 算法进行初始化方式、惯性权重与收敛

因子的改进,通过改进 POA 算法优化 VMD 的分解模态个数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$ ,并基于余弦相似度对模态分量进行筛选,利用改进的小波阈值去噪对筛选出的 IMF 进行二次降噪。通过仿真和实例验证了该方法能够抑制电磁泄漏信号中的噪声干扰,具有良好的降噪效果。

## 1 计算机视频电磁泄漏分析

### 1.1 视频传输信号组成

VGA (Video Graphics Array) 传输信号是一种复合信号,包含控制扫描时序的同步信号以及定义像素颜色的 RGB 信号<sup>[23]</sup>。在视频信号机制里,水平同步信号调控行像素扫描频率,垂直同步信号确定帧图像刷新频率,RGB 信号经三并行通道传输红、绿、蓝三原色信息以定像素色彩。三者均由时钟脉冲信号调制,可视为脉冲幅度信号。设视频帧尺寸为  $\gamma_1 \times \gamma_2$ ,各信号分量频率依式 (1) 计算:

$$f_p = \gamma_1 f_h = \gamma_1 \gamma_2 f_v \quad (1)$$

式中,  $f_p$  为 RGB 信号的频率(通常称为点频),  $f_h$  为水平同步信号的频率(简称行频),  $f_v$  为垂直同步信号的频率(简称场频)。根据式 (1) 能够得出,行频与点频的比值对应于单帧图像每行所包含的像素数量,而场频与行频的比值则对应每帧图像包含的像素行数。即水平与垂直同步信号不仅调控屏幕的刷新频率,同时也共同决定了所显示视频画面的尺寸。

### 1.2 泄漏途径分析

电磁泄漏主要涵盖传导泄漏与辐射泄漏两类途径<sup>[24]</sup>。本文围绕计算机显示系统的辐射泄漏开展研究,其辐射泄漏主要包括传输通道电磁辐射与显示设备电磁辐射,传输通道辐射细分为 VGA 线缆和 VGA 插槽辐射<sup>[25]</sup>。需指出的是,LCD 显示组件所泄漏的信号一般为不同像素行的混叠信号,其信噪比处于较低水平,难以成为优质的辐射泄漏源。因此,在实际操作中优先选择从传输通道截获视频信号的电磁泄漏。

当视频信号经线缆传输时,信号电压的跳变,即上升沿与下降沿,会引发电磁辐射现象。此时,借助由天线等接收设备构建的电磁截获系统,能够对这种辐射信号实施接收与存储操作,进而达成视频信息的非接触式采集。

根据电磁场基本理论,VGA 线缆的辐射场本质上源于时变电流,辐射信号可解释为传输信号经微分运算的结果。则线缆传输信号与辐射信号的关系可由式 (2) 所示:

$$U = \beta \frac{dU_0}{dt} \quad (2)$$

式中,  $U$  为电磁泄漏信号,  $U_0$  为线缆传输信号,  $\beta$  为一环境常量。

### 1.3 含噪电磁泄漏信号模型

在复杂的电磁环境中，接收天线截获的计算机视频电磁泄漏信号  $f(t)$  是目标辐射信号与多源噪声的叠加。为了更准确地描述信号特性，构建如下的数学模型：

$$f(t) = U(t) + n_g(t) + n_l(t) + n_e(t) \quad (3)$$

式中， $U(t)$  为实测视频泄漏信号，本质上其是由 VGA 视频流中的红、绿、蓝三原色模拟信号以及同步信号，在经线缆传输过程中因电流急剧变化而产生的辐射场分量  $U_d(t)$  和  $U_s(t)$  共同组成， $n_g(t)$  为存在的随机噪声， $n_l(t)$  为低频趋势项， $n_e(t)$  为外部环境干扰。

## 2 视频电磁泄漏信号处理方法

### 2.1 改进的鹌鹑优化算法

POA 算法是一种模拟鹌鹑觅食行为的元启发式优化算法，主要包含初始化、移向猎物（全局探索）和掠过水面（局部开发）共 3 个阶段。该算法通过在解空间内进行随机探索与精细搜索的迭代平衡，最终收敛于全局最优解。本文利用 POA 算法自适应获取 VMD 的关键参数模态数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$ ，以提升信号分解的准确性。

为了提高算法的收敛性和稳定性，本文在 POA 算法的基础上，对其初始化方式、搜索步长调节因子、收敛因子做出以下改进。

#### 1) Kent 混沌初始化：

原始 POA 采用随机方式初始化种群，易导致个体分布不均，进而引发算法早熟收敛、搜索效率低下等问题。为解决该问题，本文引入 Kent 混沌映射替换原初始化方法，Kent 映射具有良好的遍历性和均匀分布特性，且计算简便，能够以极低的计算成本改善初始种群质量，增强算法跳出局部最优的能力，从而保证全局寻优的有效性。其定义为：

$$x_{i+1} = \begin{cases} x_i/a, & 0 < x_n \leq a \\ (1-x_i)/(1-a), & a < x_n < 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中， $x_n$  为当前值， $a \in (0, 1)$  为控制参数，在本文中为 0.4，以确保系统处于强混沌状态。

#### 2) 搜索步长调节因子：

原始 POA 在全局探索阶段采用固定步长机制，难以兼顾迭代初期的全局遍历需求与后期的局部精细搜索，容易导致算法早熟收敛或在最优解附近振荡。为此，本文引入基于 Sigmoid 曲线的动态调节因子，赋予步长自适应调整能力，该因子在迭代前期维持较大步长以跳出局部极值，后期自动减小步长以提升收敛精度，从而实现了探索与开发策略在时间维度上的动态平衡。其公式如下：

$$\omega_t = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / (1 + e^{6t/T-0.7}) \quad (5)$$

式中， $\omega_t$  的取值区间为  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ ，其中  $\omega_{\min} = 0.25$ ， $\omega_{\max} = 0.95$ ， $t$  是当前迭代次数， $T$  是最大迭代次数。

#### 3) 非线性收敛因子：

在掠过水面阶段，原算法采用线性递减的邻域半径，导致搜索策略单一，易陷入局部最优。为此，本文引入分段式非线性收敛因子，通过动态调整邻域范围，增强算法跳出局部极值的能力并提升收敛精度。其公式如下：

$$C(t) = \begin{cases} (1 - 2t/T)^{1.8} & t \leq 0.5T \\ 0.2 \times (1 - (t - 0.5T)/0.5T)^{2.5} & t > 0.5T \end{cases} \quad (6)$$

改进后掠过水面阶段的收敛因子进行非线性衰减。在第一阶段，衰减相对缓慢，为算法进行全局探索提供了时间；第二阶段，引入重置机制，收敛因子从 0 跳变为 0.2，有助于逃离局部最优，且高指数确保在后期迅速收敛到 0，提高局部搜索精度。此外系数 0.2 限制了第二阶段的扰动范围，避免过度振荡，提高了算法稳定性。

为准确评估 VMD 分解的质量，本文选取包络熵作为适应度函数对参数  $K$  与  $\alpha$  进行寻优，包络熵能够有效表征信号的稀疏性与规律性，较小的熵值意味着信号中有序成分更丰富、噪声干扰更少。以此为优化目标，能够有效抑制模态混叠现象，确保分解分量具有更优的物理解释性。

基于包络熵的适应度函数如式 (7) 所示：

$$F = \min \left[ - \sum_{i=1}^K p_i \ln(p_i) \right] \quad (7)$$

$p_i$  为各个模态包络的归一化能量：

$$p_i = \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N [u_i^2(n) + \hat{u}_i^2(n)]}{\sum_{j=1}^K \sum_{n=1}^N [u_j^2(n) + \hat{u}_j^2(n)]} \right\} \quad (8)$$

其中： $u_i(n)$  为第  $i$  个模态的磁场模值数据， $\hat{u}_i(n)$  为  $u_i(n)$  的希尔伯特变换， $K$  为分解的模态数， $N$  为信号长度。

为验证改进后 POA 算法的优越性，通过对比原 POA 算法与改进 POA 算法，分析二者在实测电磁泄漏信号数据支撑下优化 VMD 过程的适应度曲线变化趋势，结果如图 1 所示。

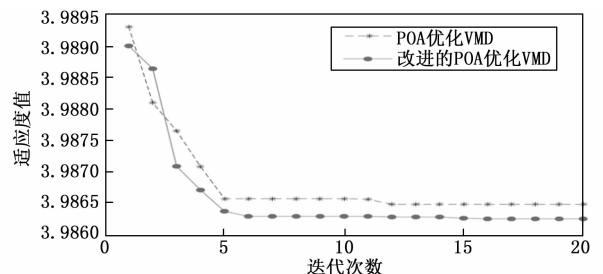


图 1 改进前后适应度曲线

改进 POA 算法通过多策略协同显著提升了寻优性能, 动态调节因子在迭代初期维持较大步长以增强全局探索, 非线性收敛因子利用重置机制在中期有效协助跳出局部极值, 并在后期确保高精度的局部开发, 结合 Kent 混沌初始化, 该算法在收敛速度、避免早熟收敛及求解精度方面均优于原始 POA, 验证了改进策略的有效性。

## 2.2 变分模态分解

VMD 是基于变分原理的自适应信号处理方法, 核心是将原始信号  $f(t)$  分解为  $K$  个特定中心频率的 IMF, 且所有 IMF 估计带宽之和最小<sup>[26]</sup>。本文采用 VMD 处理截获的电磁泄漏信号, 将其分解为  $K$  个 IMF, 以实现多尺度特征分离。具体过程如下。

1) 构建约束变分模型:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\partial_t$  为梯度运算,  $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$  和  $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$  分别为各个 IMF 及其中心频率。

2) 在求解过程中, 引入拉格朗日算子  $\lambda(t)$  和二次惩罚因子  $\alpha$ , 利用交替方向乘子迭代算法, 求得最优解:

$$\begin{cases} \hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i < k} \hat{u}_i^{n+1}(\omega) - \sum_{i > k} \hat{u}_i^{n+1}(\omega) + \hat{\lambda}(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \\ \omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega} \\ \hat{\lambda}^{n+1}(\omega) = \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau[\hat{f}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{u}_k^{n+1}(\omega)] \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $n$  为迭代次数;  $\omega$  为频率域变量;  $\tau$  为更新参数。

## 2.3 余弦相似度

针对 VMD 分解后有效模式的筛选问题, 本文采用余弦相似度作为判别准则。利用其对幅值不敏感且侧重波形趋势匹配的特性, 精准量化模态分量与原始信号的相似性, 从而自动剔除冗余噪声, 提取包含电磁泄漏信息的关键模态。令离散化的原始电磁泄漏信号表示为  $F = [f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_N)]^T$ , 其对应的第  $i$  个 VMD 分量为  $IMF_i = [imf_i(t_1), imf_i(t_2), \dots, imf_i(t_N)]^T$ , 其中  $N$  为采样点数。则余弦相似度  $CS_i$  的计算公式为:

$$CS_i = \frac{F \cdot IMF_i}{\|F\| \cdot \|IMF_i\|} = \frac{\sum_{j=1}^N F_j \cdot imf_i(t_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N F_j^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N [imf_i(t_j)]^2}} \quad (11)$$

余弦相似度通过量化向量方向差异来评估相关性, 其值位于  $(0, 1]$  区间时表示正相关, 且越接近 1, 相关性越高。

## 2.4 改进的小波阈值去噪

尽管经余弦相似度筛选提取了主导模态, 但其中仍伴有残留噪声。为此, 本文引入小波阈值进行二次降噪。利用小波变换的多尺度聚焦特性, 该方法能够基于系数幅值差异, 有效将集中于高频的小幅值噪声与大幅值有效信号分离, 从而实现非平稳电磁泄漏信号的精细化处理<sup>[27]</sup>。小波系数  $W_j$  由有效信号  $S_j$  和噪声  $N_j$  两部分构成, 即:

$$W_j = S_j + N_j \quad (12)$$

小波阈值处理的方法有硬阈值和软阈值, 其表达式分别如下。

硬阈值的函数表达式为:

$$W = \begin{cases} \omega, & |\omega| > \lambda \\ 0, & |\omega| \leq \lambda \end{cases} \quad (13)$$

软阈值的函数表达式为:

$$W = \begin{cases} \text{sgn}(\omega) \cdot (|\omega| - \lambda), & |\omega| > \lambda \\ 0, & |\omega| \leq \lambda \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\omega$  为原始信号分解所得小波系数,  $\lambda$  为阈值, 由式 (13)、(14) 可知, 硬阈值在阈值  $\lambda$  处不连续, 软阈值虽在阈值  $\lambda$  处连续, 但在  $W$  和  $\omega$  存在恒定偏差, 依然会对去噪效果产生一定影响<sup>[18]</sup>。针对上述问题, 本文提出式 (15) 所示的改进阈值函数, 该设计旨在利用函数的连续性来抑制硬阈值的伪吉布斯效应, 并利用渐进无偏性克服软阈值的收缩误差, 从而更精准地保留信号特征。其曲线变化如图 2 所示。

$$W = \begin{cases} \text{sign}(\omega) \cdot [|\omega| - a\lambda \cdot \exp(-b|\omega| - \lambda)] & |\omega| \geq \lambda \\ \text{sign}(\omega) \cdot c \cdot |\omega|^d & |\omega| < \lambda \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $b, d$  为可调参数,  $a = \frac{d-1}{d+\lambda \cdot b}, c =$

$$\frac{1 + \lambda \cdot b}{\lambda^{d-1}(d + \lambda \cdot b)}。$$

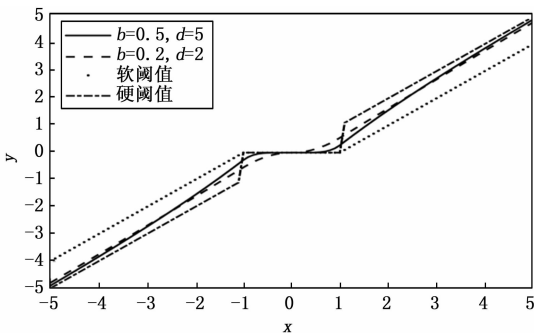


图 2 改进小波阈值函数示意图

2.4.1 改进小波阈值函数理论分析

为了验证本文改进阈值函数的性能，对其进行数学分析：

1) 连续性分析。当  $|\omega| \rightarrow \lambda^+$  时：

$$\lim_{|\omega| \rightarrow \lambda^+} W = \text{sign}(\omega) \cdot \lambda(1 - a) = \text{sign}(\omega) \cdot \frac{1 + \lambda b}{d + \lambda b} \quad (16)$$

同理可得， $|\omega| \rightarrow \lambda^-$  时， $\lim_{|\omega| \rightarrow \lambda^-} W = \text{sign}(\omega) \cdot \frac{1 + \lambda b}{d + \lambda b}$ 。

由此可知，改进阈值函数在  $\pm \lambda$  处具有连续性，能够解决硬阈值函数在阈值点处产生间断的缺陷。

2) 渐进性和偏差性。当  $|\omega| \rightarrow \infty$  时：

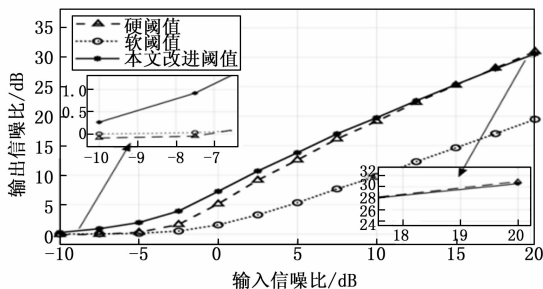
$$\lim_{|\omega| \rightarrow \infty} \left( \frac{W}{\omega} \right) = 1 \quad (17)$$

$$\lim_{|\omega| \rightarrow \infty} (W - \omega) = 0 \quad (18)$$

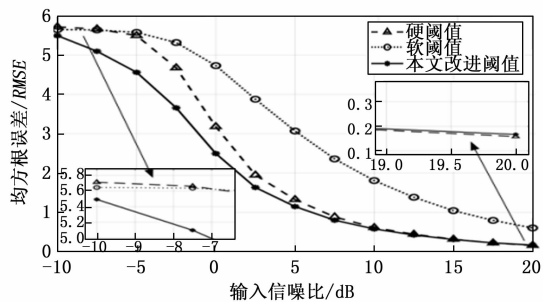
由式 (17) 和式 (18) 可知， $W$  的渐近线为  $\omega$ ，即改进阈值函数在趋近于无穷时逼近硬阈值函数，克服了软阈值函数的恒定偏差问题，有效降低了信号重构失真。

2.4.2 改进小波阈值函数实验分析

为了验证本文提出的改进小波阈值函数的优越性及其在不同噪声环境下的适应性，进行了不同阈值函数的仿真对比实验。实验选取正弦信号作为基准信号，通过添加不同强度的加性高斯白噪声，模拟输入信噪比从  $-10 \sim 20$  dB 的变化过程，并采用 sym4 小波基进行 4 层分解，分别应用硬阈值、软阈值及本文改进阈值函数进行去噪处理，并重复 50 次实验以消除随机性。实验结果如图 3 所示。



(a) 不同阈值函数去噪信噪比对比



(b) 不同阈值函数去噪 RMSE 对比

图 3 不同阈值函数的适应性分析

由图 3 (a) 所示的实验结果可以看出，本文所提

出的改进阈值函数在整个测试范围内均表现出较高的输出信噪比。在低信噪比条件下，该函数的去噪性能明显优于传统的软阈值与硬阈值方法，体现出更有效的噪声抑制能力，而在高信噪比条件下，改进函数凭借其渐近无偏的特性，能够最大程度的对信号幅值进行恢复，从而克服了软阈值函数因存在恒定偏差而产生的性能限制。由图 3 (b) 给出的均方根误差结果可知，在低信噪比条件下，改进阈值函数的 RMSE 值显著低于硬阈值方法，说明本文方法能够有效抑制由噪声引起的伪吉布斯现象，而在高信噪比条件下，其 RMSE 明显低于软阈值方法，这表明改进后的函数在信号幅度保持方面具有更好的保真度与恢复精度。

2.5 本文信号处理方法

针对电磁泄漏信号非平稳、多分量耦合特性，本文提出基于 IPOA-VMD 联合改进小波阈值的降噪方法，以最小包络熵为适应度准则，通过 IPOA 搜寻 VMD 最佳参数  $(K, \alpha)$ ，基于该参数对电磁泄漏信号 VMD 去噪，得到  $K$  个 IMF 分量后，用余弦相似度识别筛选，将信号主导分量经改进小波阈值二次去噪，最终重构信号，完成降噪，其方法流程如图 4 所示。

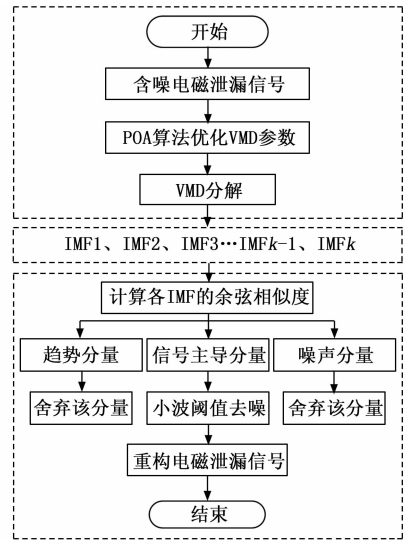


图 4 本文信号处理方法流程

计算机视频电磁泄漏信号降噪具体过程如下。

- 1) 确定 VMD 参数优化范围及 IPOA 参数，包括  $K$  和  $\alpha$  范围及优化算法的种群规模和最大迭代次数。
- 2) Kent 混沌初始化鸚鵡种群后，对每一代鸚鵡种群，执行以下循环：对每个鸚鵡个体，执行 VMD 分解，并计算其包络熵值；鸚鵡个体向当前种群中最优个体的方向移动，进行全局探索；鸚鵡于当前位置周边开展局部精细搜索，以寻更优解；比对新、旧位置包络熵值，更新个体历史最优解与种群全局最优解。
- 3) 当达到预设的最大迭代次数时，算法输出在整

个优化过程中找到的全局最优参数组合  $(K, \alpha)$ 。

4) 将所得最优参数代入 VMD, 分解原始电磁泄漏信号  $f(t)$  得  $K$  个 IMF, 依余弦相似度筛选出信号主导分量。

5) 采用改进小波阈值算法对信号主导分量进行处理, 得到降噪后的主导分量。

6) 将降噪处理后的主导分量进行重构, 最终得到降噪信号。

### 3 模拟电磁泄漏信号降噪实验

#### 3.1 仿真信号

为验证本文所提降噪算法的有效性, 设计了信号仿真实验。如式 (19) 所示, 采用  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$  来构建原始信号, 而后引入低频趋势分量  $y_4$  和信噪比为 10 dB 的高斯白噪声, 共同构成用于测试的含噪仿真信号。

$$\begin{cases} f_1(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + y_4(t) + n(t) \\ y_1(t) = (1 + 2x) \cdot \sin(800\pi t + \pi/4) \\ y_2(t) = \sin(200\pi t + \pi/4) \\ y_3(t) = \sin(400\pi t + \pi/5) \\ y_4(t) = 0.5 \cdot \sin(20\pi t) \end{cases} \quad (19)$$

此外, 考虑到实际电磁泄漏信号往往伴随基线漂移等非平稳干扰及频率波动特征, 为全面考核算法在复杂环境下的信号提取能力, 本文进一步构建了包含线性趋势干扰与频率调制 (FM) 特征的复合仿真信号  $f_2(t)$ , 其表达式如下:

$$\begin{cases} f_2(t) = 0.5t + z_1(t) + y_4(t) + n(t) \\ z_1(t) = 1.5\sin(60\pi t + 2\cos(10\pi t)) \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $0.5t$  为模拟基线漂移的线性趋势项,  $z_1(t)$  为原始信号。

#### 3.2 降噪性能指标

为更好地对比降噪效果, 该方法将与 POA-VMD (方法 1)、POA-VMD-小波阈值去噪 (方法 2)、本文算法进行对比。通过计算降噪前后的信噪比、均方根误差、相关系数进行定量分析。

$$SNR = 10\ln\left(\frac{\sum_{i=1}^N f^2}{\sum_{i=1}^N (f - f')^2}\right) \quad (21)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N |f - f'|^2 / N} \quad (22)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (f - \bar{f})(f' - \bar{f}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f - \bar{f})^2 \sum_{i=1}^n (f' - \bar{f}')^2}} \quad (23)$$

式中,  $f$  为原始信号,  $f'$  为降噪后的信号,  $\bar{f}$  为原始信号的平均值,  $\bar{f}'$  为降噪后信号的平均值,  $N$  为采样点个数。

#### 3.3 仿真信号降噪结果

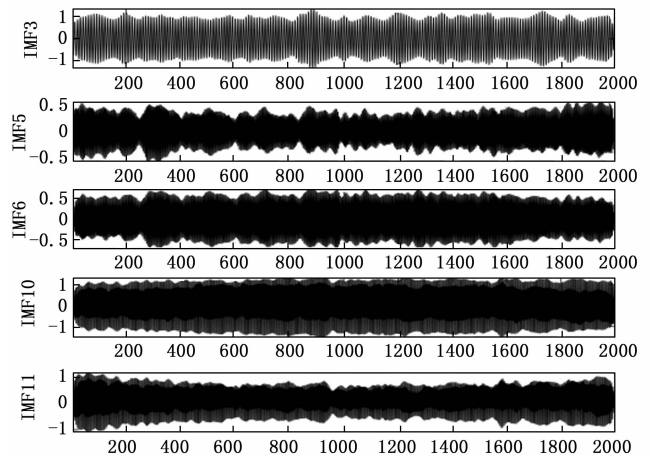
本文采用 IPOA 对 VMD 算法的  $K$  和  $\alpha$  进行优化, 其

中种群规模为 30、最大迭代次数为 20,  $K \in [3, 15]$ ,  $\alpha \in [100, 5\ 000]$ , 得到最优参数  $K=12$ 、 $\alpha=3\ 399$ , 代入 VMD 后, 仿真信号  $f_1(t)$  被分解为 12 个 IMF 分量。

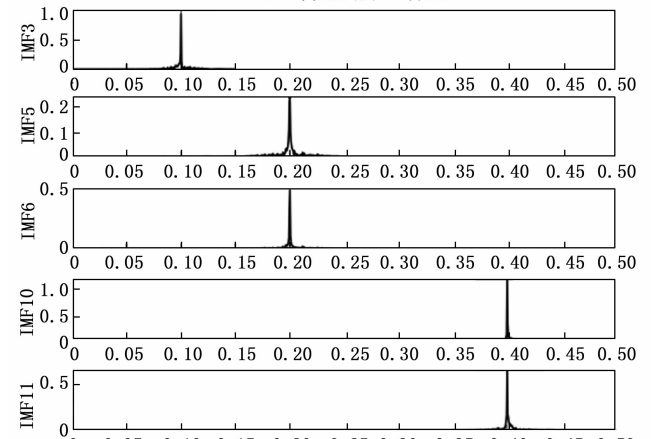
各 IMF 分量经余弦相似度计算与归一化处理, 结果如表 1 所示。计算得余弦相似度的均值为 30.62%, 以此作为阈值, 低于该值的 IMF 判定为噪声分量。其中, IMF1 为低频趋势分量, 最终筛选出的信号主导 IMF 为 IMF3、IMF5、IMF6、IMF10 和 IMF11, 如图 5 所示。

表 1 各 IMF 的余弦相似度

IMF	余弦相似度/%	IMF	余弦相似度/%
1	25.27	7	1.19
2	1.44	8	1.53
3	50.40	9	1.97
4	0.73	10	100
5	38.62	11	98.07
6	48.18	12	0



(a) 筛选出的 IMF 分量



(b) 筛选出 IMF 的频谱

图 5 筛选出的 IMF 分量及其频谱

采用改进小波阈值滤除信号主导分量的残留噪声, 得到仿真信号  $f_1(t)$  去噪前后时域与频谱对比如图 6

所示。可以看出低频趋势分量和 高斯白噪声都已被滤除，且波形失真率很低。

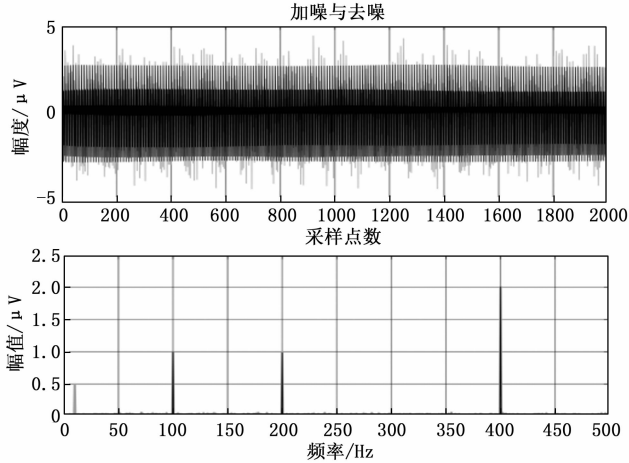


图 6 仿真信号  $f_1(t)$  去噪前后时域和频谱

为证明本文算法的可靠性，本文进行了重复性实验，分别向仿真信号  $f_1(t)$  中加入不同信噪比的噪声，并使用方法 1、方法 2 及本文算法进行处理，并利用式 (21) ~ (23) 计算各个方法不同信噪比条件下的 SNR、RMSE 和 CC，以此作为定量评价依据，具体结果见表 2。

表 2 信号  $f_1(t)$  在不同信噪比下去噪后指标对比

降噪方法	评价指标	信噪比/dB		
		10	5	0
方法 1	SNR	17.425 4	14.427 5	9.065 2
	RMSE	0.233 0	0.329 0	0.610 0
	CC	0.991 0	0.982 3	0.942 6
方法 2	SNR	23.322 3	20.235 8	14.694 7
	RMSE	0.118 2	0.168 6	0.319 0
	CC	0.997 7	0.995 3	0.983 5
本文算法	SNR	28.285 9	24.813 9	18.134 7
	RMSE	0.066 7	0.099 5	0.214 7
	CC	0.999 3	0.998 4	0.992 3

如表 2 所示，将经本文算法与方法 1、方法 2 进行对比可知，在不同噪声强度的测试环境下，本文算法均展现出优越的去噪性能，其去噪后信号的 SNR 更高、RMSE 更低、CC 值更高，验证了其综合性能的优越性。在输入信噪比为 10 dB 的较高信噪比条件下，本文算法取得的 SNR、RMSE 和 CC 分别为 28.285 9 dB、0.066 7 和 0.999 3，表现优异。在输入信噪比低至 0 dB 时，与方法 1 相比，本文算法的 SNR 提升 10.860 5 dB，RMSE 降低 0.166 3，CC 提高 0.008 3；与方法 2 相比，SNR 提升 4.963 6 dB，RMSE 降低 0.051 5，CC 提高 0.001 6。

为了更全面地验证算法的鲁棒性和适应性，本文对前述构建的仿真信号  $f_2(t)$  进行了同样的降噪测试，在输入信噪比分别为 0、5 和 10 dB 的条件下，所得结果如表 3 所示。

表 3 信号  $f_2(t)$  不同信噪比下去噪后指标对比

降噪方法	评价指标	信噪比/dB		
		10	5	0
方法 1	SNR	15.623 9	13.546 9	12.303 4
	RMSE	0.175 5	0.223 0	0.257 3
	CC	0.987 1	0.977 8	0.970 2
方法 2	SNR	18.012 3	15.051 0	14.200 6
	RMSE	0.133 3	0.187 5	0.206 8
	CC	0.992 1	0.994 4	0.980 8
本文算法	SNR	19.290 2	17.599 1	15.807 4
	RMSE	0.115 1	0.139 8	0.171 9
	CC	0.994 3	0.991 3	0.986 8

由表 3 数据可见，即便面对成分复杂的非平稳信号  $f_2(t)$ ，本文算法在 0 dB 低信噪比环境下仍能输出信噪比提升至 15 dB 以上，且相关系数保持在 0.98 以上，并随着输入信噪比的提高，降噪效果进一步提升。这表明本文提出的 IPOA-VMD-WT 算法能够有效分离趋势项并保留调频特征，对信号形式的变化具有良好的适应性。

#### 4 视频电磁泄漏信号降噪实验

##### 4.1 电磁泄漏信号截获

为验证本文方法在实际电磁泄漏信号的去噪效果，搭建如图 7 所示的计算机视频电磁泄漏信号截获平台。该平台采用工作频段为 0~650 MHz 的棒状天线接收信号，选用 NI-PXIe 采集系统进行数字化，最高采样率达 5 GS/s，确保了信号的精确捕获。

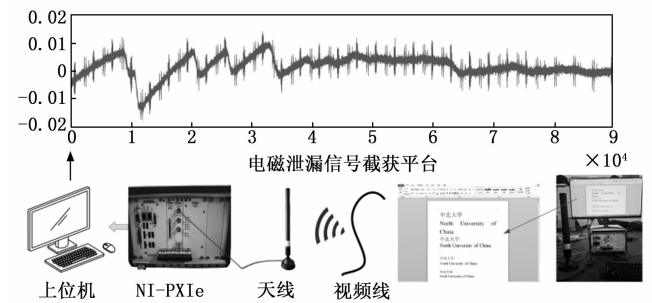


图 7 电磁泄漏信号截获平台

实验在无屏蔽室内进行，将显示屏设置为 1 280 × 1 024@75Hz 模式，利用上述平台截获电磁泄漏信号，其中天线距显示系统 3 m，所截获的信号中包含目标泄漏信号、环境背景噪声及设备固有噪声等多种成分。

##### 4.2 实际信号处理

为验证本文算法在实际信号上的处理效果，从采集

的原始电磁泄漏信号中截取部分数据进行分析。通过 IPOA 对 VMD 参数进行优化, 得到最优组合  $K=11, \alpha=4\ 004$ , 将其代入 VMD 处理后, 信号被分解为 11 个 IMF 分量, 利用余弦相似度归一化方法筛选出信号主导分量 IMF2、IMF3、IMF4、IMF10, 并采用改进的小波阈值算法对其进行二次降噪, 最终处理结果如图 8 所示。

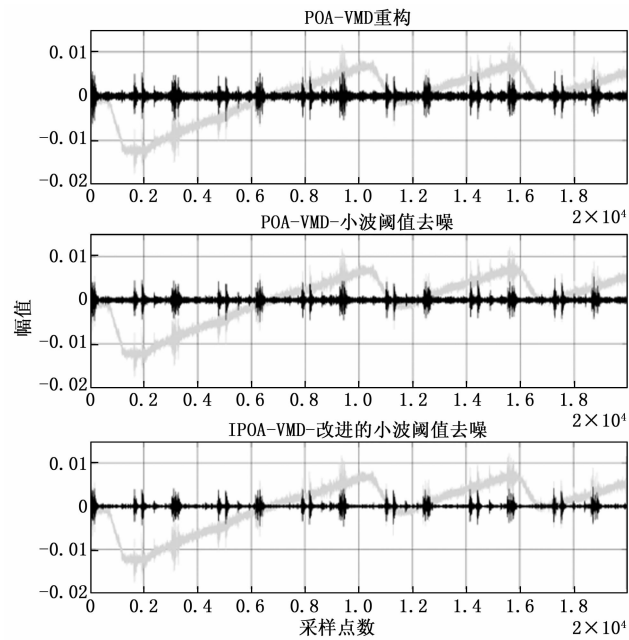


图 8 不同去噪方法滤后信号对比

为比较不同方法的降噪性能, 将同一段信号分别使用方法 1 与方法 2 进行处理, 其结果也如图 8 所示。从图中可以清晰看出, 相较于 POA-VMD 重构与 POA-VMD-小波阈值去噪, IPOA-VMD-改进小波阈值去噪后的信号波形更为平滑, 毛刺现象显著减少, 噪声抑制能力更强, 同时能够更好地保留有效信号的振幅特征。

因无法获取纯净的计算机视频电磁泄漏信号, 难以计算 SNR、RMSE 和 CC 等评价指标, 故用噪声抑制比 (NRR) 评估降噪效果, 其计算公式为:

$$NRR = 10(\lg\sigma_1^2 - \lg\sigma_2^2) \quad (24)$$

式中,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  表示降噪前后的方差, NRR 反映降噪后信号的凸显程度, NRR 越大, 降噪效果越好。

为全面评估算法在实际复杂环境中的鲁棒性与稳定性, 本文进行了多场景下的重复性实验。在无屏蔽室环境下, 分别在截获距离为 1、2、3 m 的位置各采集多组数据, 并从中随机截取九段电磁泄漏信号作为测试样本, 每段长度为 10 000 个数据点, 然后分别采用方法 1、方法 2 以及本文算法对不同距离下的样本进行处理, 通过计算各方法在 9 次独立实验中的 NRR 平均值, 得到如表 4 所示的对比结果。

表 4 不同截获距离下各方法的 NRR 对比 dB

截获距离/m	方法 1	方法 2	本文算法
1	16.824 5	18.336 2	20.053 8
2	16.203 1	17.985 4	19.282 1
3	15.535 7	17.223 9	18.492 4

如表 4 所示, 随着截获距离从 1 m 增加至 3 m, 信号在空间传播中的衰减导致接收端信噪比降低, 各方法的 NRR 值均呈下降趋势。然而, 在所有测试距离下, 本文提出的算法均取得了最高的 NRR 值。当截获距离为 3 m 时, 本文算法的 NRR 值为 18.492 4 dB, 相较于方法 1 和方法 2 分别提升了 2.956 7 dB 和 1.268 5 dB, 以上分析表明本文算法不仅在近距离下能保持极高的噪声抑制水平, 在距离增加导致信号减弱的情况下, 依然表现出优于对比方法的稳定性。

### 4.3 视频电磁泄漏信息重构

为了验证本文所提出算法具备抑制噪声干扰的能力, 以及在提升计算机视频电磁泄漏信息还原效果方面的有效性, 本文开展了视频图像还原实验。图像重构过程基于 VGA 视频信号的栅格扫描原理, 根据 VESA 标准中 1 280×1 024@75 Hz 显示模式行频参数及截获系统的采样率, 确定单行图像对应的采样点数  $N_{line}$ , 以  $N_{line}$  为步长将去噪后的一维信号序列进行截取与堆叠, 构建大小为  $M \times N_{line}$  的二维矩阵 (其中  $M$  为垂直分辨率), 最后, 对矩阵元素的幅值进行归一化处理, 并采用反向映射技术, 即  $P_{out} = 255 - P_{in} \times 255$  (其中  $P_{in}$  为归一化后的幅值), 将高幅值跳变信号映射为黑色像素, 低幅值背景映射为白色像素, 从而恢复出白底黑字的二维图像。截取的重建图像部分内容如图 9 所示。

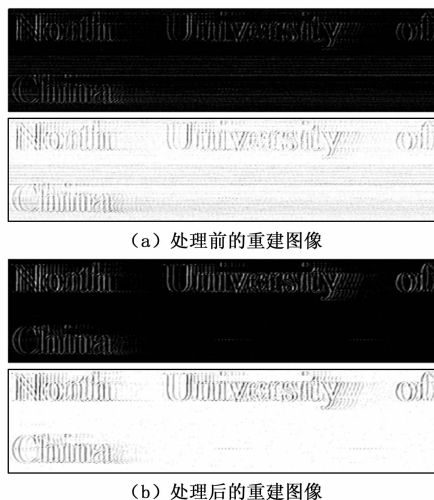


图 9 本文算法处理前后截取的重建图像部分内容

如图 9 (a) 所示, 图中存在着许多条纹干扰和孤立噪声点, 这使得视频图像清晰度不高, 图像内文字的

可读性弱。从图 9 (b) 可以明显看出, 本文算法有效地消除了条纹干扰与孤立噪声点, 提升了电磁泄漏信息的还原效果, 可作为计算机显示设备电磁泄漏信号预处理的有效方法。

#### 4.4 还原图像的评价与分析

为进一步客观量化本文算法对电磁泄漏还原图像的恢复效果, 考虑到实际截获实验中缺乏理想的无噪参考图像, 本文选取了准信噪比 (QSNR)、信息熵、平均梯度以及无参考图像质量评估指标 BRISQUE 和 PIQE 进行评价。各指标定义如下:

QSNR 用于在无信噪比的情况下估算图像的信噪比, 其公式为:

$$QSNR = 10 \lg \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D(i, j)}{m \times n} \right)^2}{\frac{1}{m \times n} \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( D(i, j) - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D(i, j)}{m \times n} \right)^2} \quad (25)$$

式中,  $D(i, j)$  表示图像中第  $i$  行第  $j$  列的像素值,  $m$ 、 $n$  分别表示图像像素点的行数和列数, QSNR 越大, 表明噪声抑制的越彻底。

信息熵用于衡量图像包含的平均信息量, 其公式为:

$$H = - \sum_{l=0}^{255} p(l) \log_2 p(l) \quad (26)$$

式中,  $p(l)$  为灰度值  $l$  在图像中出现的概率。在本次实验中, 随着杂乱无章的随机噪声被去除, 图像的熵值会变小。

平均梯度反映图像微小细节反差变化的速率, 表征图像的清晰度。计算公式如下:

$$G = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2}{2}} \quad (27)$$

式中,  $\Delta I_x$  和  $\Delta I_y$  分别表示像素在水平和垂直方向上的灰度差分。

此外, 本文还引入了 BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator) 和 PIQE (Perception Based Image Quality Evaluator)。这两种指标基于自然场景统计特性, 通过量化图像在空间域的失真程度来模拟人眼感知质量, 得分越低代表图像的主观视觉效果越好。处理前后图像的量化评估结果如表 5 所示。

表 5 处理前后图像量化评估

指标	处理前重建图像	处理后重建图像
QSNR/dB	22.65	26.39
信息熵	3.041	2.920
平均梯度	7.637 3	5.916
BRISQUE	44.66	43.39
PIQE	73.57	50.00

从表 5 的数据可以看出, 经本文算法处理, 图像的 QSNR 值由 22.65 提高到了 26.39, 这表明图像中的噪声能量得到有效抑制; 信息熵由 3.041 降低至 2.920, 表明原始图像中的雪花噪声减少, 信息表达更加有序; 在人眼感知质量方面, PIQE 得分从 73.57 下降至 50.00, BRISQUE 指标也有所降低, 这与人眼观察到的文字可读性增强相吻合; 此外, 平均梯度的数值从 7.637 3 降低至 5.916, 这种变化是因为本文算法去除了图像中由强噪声形成的密集伪边缘和孤立噪点, 使得图像背景更加平滑, 而非破坏了文字本身的边缘信息。以上分析表明, 本文提出的算法在抑制噪声的同时, 有效提升了重构图像的质量。

#### 5 结束语

在室内环境中, 从计算机视频系统截获的电磁泄漏信号, 常常会伴随着复杂的噪声干扰。这种干扰不仅严重降低了重建图像的质量, 还导致视频泄漏信号的检测性能下降。针对该问题, 本文提出了一种基于 IPOA-VMD 与改进小波阈值的自适应降噪方法。该方法利用引入 Kent 映射与非线性收敛因子的改进鸚鵡算法, 实现了 VMD 关键参数的自适应寻优, 并结合余弦相似度筛选与改进阈值函数, 有效地解决了传统方法在参数选择上的盲目性及去噪不彻底的问题。仿真与实测实验结果表明, 相较于传统 POA-VMD 及小波去噪方法, 本文算法在不同信噪比及截获距离下均展现出更优的鲁棒性, 其在有效抑制背景噪声的同时, 显著提升了信噪比和噪声抑制比。图像重建实验中, QSNR、信息熵及平均梯度等量化指标均显著改善, 有效提升了电磁泄漏信息的还原质量与可读性, 验证了所提方法的有效性。尽管本文方法在降噪上表现良好, 但复杂的迭代寻优过程在一定程度上增加了计算耗时。未来的研究工作将致力于算法的轻量化设计以满足实时处理需求, 并进一步探索深度学习技术在多场景、动态电磁泄漏检测与还原中的应用。

#### 参考文献:

[1] KAJI S, FUJIMOTO D, KINUGAWA M, et al. Echo TEMPEST: EM information leakage induced by IEMI for electronic devices [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65 (3): 655 - 666.

[2] PRZYBYSZ A, GRZESIAK K, KUBIAK I. Electromagnetic safety of remote communication devices-videoconference [J]. Symmetry, 2021, 13 (2): 323.

[3] 裴林聪, 张游杰, 马通边, 等. 基于深度学习的计算机显示器电磁信息泄漏识别 [J]. 计算机系统应用, 2021, 30 (8): 150 - 156.

- [4] LEE E, CHOI D H, NAM T, et al. Complete coherent demodulation and recovery of spread spectrum clocking-based electromagnetic information leakage: theory and demonstration [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2025, 20: 3804–3818.
- [5] KITAZAWA T, HAYASHI Y. Evaluation of impact of differential transfer efficiency of EM leakage on screen reconstruction against high-resolution displays [C] //2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe, Krakow, 2023: 1–6.
- [6] LEE H S, CHOI D H, SIM K, et al. Information recovery using electromagnetic emanations from display devices under realistic environment [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, 61 (4): 1098–1106.
- [7] PENG Y H, ZHANG J, MAO J, et al. A signal-denoising method for electromagnetic leakage from USB keyboards [J]. *Electronics*, 2023, 12 (17): 3647.
- [8] KITAZAWA T, ARAI K, KIM Y, et al. A novel remote visualization of screen images against high-resolution display with divided screens focusing on the difference of transfer function of multiple emanations [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64 (6): 1941–1948.
- [9] SUN D G, SHI J, WEI D, et al. Method for detecting text information leakage in electromagnetic radiation from a computer display [J]. *IET Information Security*, 2016, 10: 413–417.
- [10] LEE H S, YOON J G, SIM K H. Study for possibility of information leakage from digital video display interface [C] // 2016 URSI Asia-Pacific Radioscience Conference, Kunming, 2016: 1102–1103.
- [11] LEE H S, YOON J G, SIM K H. Analysis of information leakage from display devices with LCD [C] // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, Kunming, 2016: 1277–1280.
- [12] SAITO S, KAIDA D, HATTORI K, et al. Signal discrimination of ULF electromagnetic data with using singular spectrum analysis—an attempt to detect train noise [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11 (7): 1863–1874.
- [13] HUANG H P, WEI S Y, CHAO H H, et al. An investigation study on mode mixing separation in empirical mode decomposition [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 100684–100691.
- [14] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62 (3): 531–544.
- [15] ALAM A, MUKUL M K, THAKURA P. Wavelet transform-based EMI noise mitigation in power converter topologies [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58 (5): 1662–1673.
- [16] LUAN H, YU X, WANG Y, et al. Research on denoising method of grounded electrical source airborne transient electromagnetic data based on singular spectrum analysis [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12 (19): 10116.
- [17] ZHAN L, LI C. A comparative study of empirical mode decomposition-based filtering for impact signal [J]. *Entropy*, 2017, 19 (1): 13.
- [18] ZHOU H, WANG Z, WU R, et al. Jamming recognition algorithm based on variational mode decomposition [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23 (15): 17341–17349.
- [19] GUO Y, ZHANG Z. Generalized variational mode decomposition: a multiscale and fixed frequency decomposition algorithm [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1–13.
- [20] 孙姿姣, 周湘贞, 李松洋. 鸹鹇算法参数优化 VMD 联合 SVDS 的电机轴承故障诊断 [J]. *机械设计*, 2025, 42 (4): 150–155.
- [21] HAO Y. Research on acceleration signal denoising of press slide based on variational mode decomposition and wavelet transform [C] //2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP), 2023: 887–890.
- [22] NI L, GU W, ZHOU T, et al. Leak aperture recognition of natural gas pipeline based on variational mode decomposition and mutual information [J]. *Measurement*, 2025, 242: 116017.
- [23] 孙宇良, 李凯, 田平怡, 等. 基于小波分析与帧间交错图像融合算法的电磁泄漏信息还原方法 [J]. *计算机测量与控制*, 2025, 33 (3): 259–266.
- [24] CHOI D H, LEE E, NAM T, et al. Recent trends in image information recovery using leaked electromagnetic wave from electronic equipment [J]. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2022, 11 (3): 77–83.
- [25] MEULEMEESTER P D, SCHEERS B, VANDENBOSCH G A. A quantitative approach to eavesdrop video display systems exploiting multiple electromagnetic leakage channels [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 63 (3): 663–672.
- [26] 魏安凯, 王娜, 丁军航, 等. 基于优化 SSA-VMD 的滚动轴承故障信号降噪方法 [J]. *电子设计工程*, 2024, 32 (16): 64–68.
- [27] 郭颖, 杨理践, 唐滕达. Wavelet-VMD 融合算法在管道泄漏检测的研究与应用 [J]. *电子设计工程*, 2022, 30 (15): 70–75.