DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.010

考虑光谱信息干扰的复合绝缘子污秽状态快速检测方法

刘 威[1,2]，于 杰[3]，李晓光[1,2]，李 清[4]，雷泽阳[1,2]
（1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院，乌鲁木齐 830011；2. 新疆输变电设备极端环境运行与检测技术重点实验室，乌鲁木齐 830011；3. 国网新疆电力有限公司和田供电公司，新疆 和田 848000；4. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院，乌鲁木齐 830000）

摘要：以降低污闪故障发生概率，确保电网稳定运行为目的，研究考虑光谱信息干扰的复合绝缘子污秽状态快速检测方法，提升污秽状态快速检测效果。通过光谱仪采集复合绝缘子光谱信息；利用噪声自适应主成分变换算法，变换处理采集的光谱信息，得到有效光谱信息矩阵与干扰信息矩阵；通过正交子空间投影法，依据干扰信息矩阵，建立干扰信息子空间，在干扰信息子空间内投影有效光谱信息，抑制干扰信息，获取光谱信息残差数据；通过主成分分析法，在残差数据内提取复合绝缘子污秽状态光谱信息特征；在层次极限学习机内输入提取的光谱信息特征，输出复合绝缘子污秽状态快速检测结果。实验证明：该方法可有效采集复合绝缘子的光谱信息，并有效提取光谱信息特征，剔除干扰信息；该方法可有效快速检测复合绝缘子状态；在不同污秽面积占总绝缘子面积百分比时，该方法快速检测的相关系数均与1较为接近，即检测精度较高。

关键词：光谱信息干扰；复合绝缘子；污秽状态；快速检测；主成分分析；极限学习机

Rapid Detection Method for Contamination Status of Composite Insulator Considering Spectral Information Interference

LIU Wei[1,2], YU Jie[3], LI Xiaoguang[1,2], LI Qing[4], LEI Zeyang[1,2]
(1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Extreme Environment Operation and Testing Technology for Power Transmission & Transformation Equipment, Urumqi 830011, China; 3. State Grid HETIAN Electric Power Supply Company, Xinjiang Hetian 848000, China; 4. State Grid Xinjiang Electric Power Economic Research Institute, Urumqi 830000, China)

Abstract: To reduce the probability of contamination flashover fault and ensure stable operation of power grid, a rapid detection method for the contamination status of composite insulators considering spectral information interference is studied so to improve the effectiveness of rapid contamination status detection. Spectroscopic information of composite insulators is collected by a spectrometer, a noise-adaptive principal component transformation algorithm is used to transform and process the collected spectroscopic information, thus yielding an effective spectroscopic information matrix and an interference information matrix.By orthogonal subspace projection method, interference information subspace is set up in accordance with the interference information matrix. The effective spectral information is projected in interference information subspace to suppress interference information and obtain residual data of spectral information. Moreover, the spectral information features of the contamination status of composite insulator are extracted from residual data by principal component analysis. In the hierarchical limit learning machine, the extracted spectral information features are input, and the rapid detection results of contamination status of composite insulator are output. The experimental results show that this method can effectively collect the spectral information of composite insulators, extract the spectral information features and eliminate the interference informa-

收稿日期：2026-05-09； 修回日期：2026-07-28

tion. This method can effectively and quickly detect the status of composite insulators.Under different percentages of contaminatino area to the total insulator area，the correlation coefficients of the rapid detection by this method are all close to 1，including high detection accuracy.

Key words: spectral information interference；composite insulator；contamination status；rapid detection；principal component analysis；extreme learning machine

0　引言

复合绝缘子在电网中的用量非常多，属于确保电网稳定运行的关键部分。目前，大气污染严重，导致外绝缘污闪故障发生概率迅速增长[1]，直接影响电网运行稳定性。实时了解复合绝缘子的污秽状态，可帮助工作人员制定合理的清扫周期，降低污闪故障发生概率[2-4]。传统人为检测复合绝缘子污秽状态的方法，经常出现遗漏情况，且人员浪费情况较为严重，为此研究精准、快速的复合绝缘子污秽状态检测方法势在必行，既可以提升检测精度，为污闪防治工作提供参考，还能够节约人力物力[5]。例如，余欧然等人采用近红外高光谱分析法研究绝缘子污层的受潮程度，采集具有不同程度受潮的染污标本的高光谱图像，并对其进行校正处理。分别利用连续投影算法和随机蛙跳算法识别出特征波段，以此作为支持向量机的输入，建立3种污层评估模型。该方法能够有效反映污层受潮程度，实现绝缘子污层受潮程度的非接触检测[6]。刘益岑等人利用图像处理技术，去除复合绝缘子光谱信息与红外图像内的噪声，通过特征提取技术，提取绝缘子光谱信息与红外图像特征，融合提取的两种特征，并依据融合的特征建立绝缘子污秽状态检测模型，完成绝缘子污秽状态检测[7]。该方法的绝缘子污秽状态检测精度高达90%，可为绝缘子污秽程度智能运检提供参考。但这两种方法均未考虑干扰因素对绝缘子污秽状态检测的影响，光谱信息易受环境因素影响，导致光谱信息内存在大量干扰信息，降低检测精度。光谱信息存在冗余性与背景噪声干扰问题[8-10]，为此，在进行绝缘子污秽状态检测时，需解决光谱信息干扰问题，提升检测精度。因此，研究考虑光谱信息干扰的复合绝缘子污秽状态快速检测方法，提升检测效果，为电网稳定运行提供保障。

1　复合绝缘子污秽状态快速检测方法

1.1　复合绝缘子光谱信息干扰抑制

通过光谱仪采集复合绝缘子的光谱信息，利用噪声自适应主成分变换(noise ajusted principal components，NAPC)，变换处理采集的复合绝缘子光谱信息，分离出有效光谱信息与噪声干扰信息[11-13]。

令采集的复合绝缘子光谱信息 $\boldsymbol{X}$ 为 $K\times L$ 维矩阵，其中，光谱信息像元数是 K；波段数是 L；$\boldsymbol{X}$ 的协方差矩阵是 $D(X)=\boldsymbol{\Sigma}$。

设 $\boldsymbol{X}=\boldsymbol{X}'+\boldsymbol{N}$，其中，复合绝缘子有效光谱信息是 $\boldsymbol{X}'$；噪声干扰信息是 $\boldsymbol{N}$。同时 $\boldsymbol{X}'$ 与 $\boldsymbol{N}$ 无关。因此

$$C(\boldsymbol{X})=\boldsymbol{\Sigma}=\boldsymbol{\Sigma}_{X'}+\boldsymbol{\Sigma}_N \tag{1}$$

式(1)中，$\boldsymbol{\Sigma}_{X'}$、$\boldsymbol{\Sigma}_N$ 为 $\boldsymbol{X}'$ 与 $\boldsymbol{N}$ 的协方差矩阵。通过噪声干扰信息方差 $Y_N\{\boldsymbol{N}\}$，和该波段复合绝缘子光谱信息总方差 $Y_X\{\boldsymbol{X}\}$ 的比值，描绘噪声干扰信息比例，即 $\dfrac{Y_N\{\boldsymbol{N}\}}{Y_X\{\boldsymbol{X}\}}$，则信噪比是 $\dfrac{Y_{X'}\{\boldsymbol{X}'\}}{Y_N\{\boldsymbol{N}\}}$。

在复合绝缘子光谱信息能量不变情况下，$\dfrac{Y_N\{\boldsymbol{N}\}}{Y_X\{\boldsymbol{X}\}}$ 与 $\dfrac{Y_X\{\boldsymbol{X}'\}}{Y_N\{\boldsymbol{N}\}}$ 成反比，即令NAPC变换为线性变换，存在

$$Z_i=u_i\boldsymbol{X} \tag{2}$$

式(2)中，Z_i 为线性变换后，第 $i(i=1,2,\cdots,L)$ 个波段的复合绝缘子光谱信息；u_i 为线性变换系数。

令 Z_i 的噪声干扰信息比例，在全部正交于 $Z_j(j=1,2,\cdots,i-1)$ 的成分内最大，且将 u_i 标准化成 $u_i^2\Sigma=1$，那么NAPC变换公式为

$$Z=\boldsymbol{U}\boldsymbol{X} \tag{3}$$

式(3)中，$\boldsymbol{U}=[u_1,u_2,\cdots,u_\tau]$ 为线性变换系数矩阵，τ 为线性变换系数数量。$\boldsymbol{U}$ 属于 $\dfrac{\boldsymbol{\Sigma}_N}{\boldsymbol{\Sigma}}$ 的特征向量矩阵。

因此

$$\frac{\boldsymbol{\Sigma}_N}{\boldsymbol{\Sigma}}\boldsymbol{U}=\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{U} \tag{4}$$

式(4)中，$\boldsymbol{\Lambda}$ 为 $\boldsymbol{U}$ 内的对角线矩阵，即特征值矩阵。

令 $\boldsymbol{\Lambda}$ 内第 i 个元素是特征值 λ_i，那么第 i 个波段的信噪比为

$$R_{\mathrm{SNR}}=\frac{Y_X\{u_i\boldsymbol{X}'\}}{Y_N\{u_i\boldsymbol{N}\}}=\frac{u_i^2\boldsymbol{\Sigma}}{u_i^2\boldsymbol{\Sigma}_N}-1 \tag{5}$$

噪声比例为

$$R_{N_i}=\frac{Y_N\{u_i\boldsymbol{N}\}}{Y_Z\{u_iZ\}}=\frac{u_i^2\boldsymbol{\Sigma}_N}{u_i^2\boldsymbol{\Sigma}} \tag{6}$$

通过分析式(5)、(6)可知，计算 u_i 的问题，可变成计算广义特征值 λ_i 的问题，即

$$\sum_N u_i=\lambda_i\sum u_i \tag{7}$$

求解式(7)便可获取 λ_i，依据 λ_i 计算 Z_i 的信噪比为

$$R_{\mathrm{SNR}_i}=\frac{1}{\lambda_i}-1 \tag{8}$$

设置一个信噪比阈值 ε，选择 R_{SNR_i} 超过 ε 的NAPC波段的复合绝缘子光谱信息，这些波段内包含的有效复合绝缘子光谱信息较多，噪声干扰信息较少[14]，完成有效复合绝缘子光谱信息与噪声干扰信息的分离，得到复合绝缘子有效光谱信息的NAPC变换矩阵 $\boldsymbol{X}'$，以及噪声干扰信息的NAPC变换矩阵 $\boldsymbol{N}$。

利用 $\boldsymbol{N}$ 建立复合绝缘子有效光谱信息的正交投影算子 Q 为

$$Q=I-\gamma\boldsymbol{N}\left(\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\right)^{-1}\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

式(9)中：γ 为噪声干扰信息的NAPC变换矩阵的丰度；T为转置符号。

利用 Q 建立一个噪声干扰信息的子空间，在该子空间内抑制大部分的复合绝缘子光谱信息内的噪声干扰信息[15-17]。将 $\boldsymbol{X}'$ 投影至噪声干扰信息子空间内，获取光谱信息的残差数据 $\boldsymbol{G}$ 为

$$\boldsymbol{G}=Q\cdot\boldsymbol{X}'=\left[I-\gamma\boldsymbol{N}\left(\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\right)^{-1}\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\right]\cdot\boldsymbol{X}' \tag{10}$$

1.2 复合绝缘子污秽状态光谱信息特征提取

通过主成分分析法在 G 内提取复合绝缘子污秽状态的光谱信息特征，具体步骤如下。

步骤1，将复合绝缘子光谱信息的残差数据，以行的方式[18-20]，构建成矩阵 $\boldsymbol{G}=\left[g_1,g_2,\cdots,g_\eta\right]$，其中残差数据数量是 η；零均值化处理 $\boldsymbol{G}$ 内的各行，公式为

$$\hat{\boldsymbol{G}}=\boldsymbol{G}-\bar{\boldsymbol{G}} \tag{11}$$

式(11)中：$\bar{\boldsymbol{G}}$ 为 $\boldsymbol{G}$ 的均值矩阵；$\hat{\boldsymbol{G}}$ 为零均值化处理后的复合绝缘子光谱信息的残差数据矩阵。

步骤2，求解 $\hat{\boldsymbol{G}}$ 的协方差矩阵 $\hat{\boldsymbol{C}}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{G}}=\hat{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{G}} \tag{12}$$

步骤3，特征分解 $\hat{\boldsymbol{G}}$，获取的对角矩阵 $\hat{\boldsymbol{\Lambda}}$ 与特征矩阵 $\boldsymbol{V}$，其中，$\hat{\boldsymbol{\Lambda}}=\mathrm{diag}\left[\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_\eta\right]$；第 i' 个残差数据内，复合绝缘子污秽状态的光谱信息特征值是 $\theta_{i'}$；$\boldsymbol{V}=\left[\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,\cdots,\boldsymbol{v}_\eta\right]$；复合绝缘子污秽状态的光谱信息特征向量是 $\boldsymbol{v}_{i'}$。

步骤4，选择前 k 个主成分，得到复合绝缘子污秽状态的光谱信息特征向量的主成分 $\tilde{G}$ 为

$$\tilde{\boldsymbol{G}}=\boldsymbol{V}_k^{\mathrm{T}}\hat{G}r \tag{13}$$

式(13)中，r 为常数。

上述步骤中 $\tilde{G}$ 为提取的复合绝缘子污秽状态光谱信息的主要特征信息，$\tilde{G}$ 为 $\hat{G}$ 在新的基中的映射，新的基为前 k 个特征向量矩阵 $\boldsymbol{V}_k^{\mathrm{T}}$。利用累积贡献率 ρ 确定主成分数量，公式为

$$\rho=\frac{\theta_{i'}}{r\sum_{i=1}^{\eta}\theta_{i'}} \tag{14}$$

ρ 为第 i' 个主成分内包含信息，在全部复合绝缘子光谱信息中的占比[21-23]。

1.3 基于层次极限学习机的复合绝缘子污秽状态检测

令1.2小节提取的复合绝缘子污秽状态光谱信息特征是 $\tilde{G}=\left[\tilde{g}_1,\tilde{g}_2,\cdots,\tilde{g}_k\right]$，与 $\tilde{G}$ 相应的输出标签是 $H=\left[h_1,h_2,\cdots,h_k\right]$；通过 $\tilde{G}$ 与 H 组成复合绝缘子污秽状态检测的训练样本 $\left\{\tilde{G},H\right\}=\left\{\tilde{g}_l,h_l\right\}_{l=1}^{k}$，其中，$\tilde{g}_l$ 为第 l 个复合绝缘子污秽状态特征光谱信息；h_l 为第 l 个复合绝缘子污秽状态特征光谱信息对应的输出标签；k 为训练样本数量，$l=1,2,\cdots,k$。

极限学习机内共包含3层[24]，分别是输入层 ψ_1、隐层 ψ_2、输出层 ψ_3；ω 为 ψ_1 与 ψ_2 间节点连接权重；w 为 ψ_2 与 ψ_3 间节点连接权重。

复合绝缘子污秽状态检测的极限学习机数学模型为

$$h_l=\sum_{o=1}^{O}\sum_{l=1}^{k}w_o f\left(\omega_o\cdot\tilde{g}_l+b_o\right) \tag{15}$$

式(15)中：O 为 ψ_2 的节点数量，$o=1,2,\cdots,O$；b_o 为第 o 个节点的偏置；$f(\cdot)$ 为激活函数；h_l 为第 l 个输入样本的输出结果，即复合绝缘子污秽状态检测结果。

$f(\cdot)$ 可零误差近似 $f(\cdot)$ 个训练样本，则有

$$\boldsymbol{S}W=H \tag{16}$$

式(16)中：$W=\left(w_1,w_2,\cdots,w_O\right)$；$\boldsymbol{S}$ 为 ψ_2 的输出矩阵。$\boldsymbol{S}$ 的表达式为

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}f\left(\omega_1\cdot\tilde{g}_1+b_1\right) & f\left(\omega_2\cdot\tilde{g}_1+b_2\right)\cdots & f\left(\omega_O\cdot\tilde{g}_1+b_O\right)\\ f\left(\omega_1\cdot\tilde{g}_2+b_1\right) & f\left(\omega_2\cdot\tilde{g}_2+b_2\right)\cdots & f\left(\omega_O\cdot\tilde{g}_2+b_O\right)\\ \vdots & & \\ f\left(\omega_1\cdot\tilde{g}_k+b_1\right) & f\left(\omega_2\cdot\tilde{g}_k+b_2\right)\cdots & f\left(\omega_O\cdot\tilde{g}_k+b_O\right)\end{bmatrix}_{O\times k} \tag{17}$$

$\boldsymbol{S}$ 的第 o 列代表输入 $\tilde{g}_1,\tilde{g}_2,\cdots,\tilde{g}_k$ 的第 o 个隐层节点的输出。

通过最小化 $\min\|SW-H\|^2$，计算 ψ_2 与 ψ_3 间的权重 W 的最佳解 $\hat{W}$。

在 $f(\cdot)$ 无限可微情况下，任意初始化 ω_o 与 b_o，最佳解可通过式(18)计算获取

$$\hat{W}=S^{+}H \tag{18}$$

式(18)中，S^{+} 为 S 的Moore-Penrose广义逆。

将最佳的 $\hat{w}_o$ 代入式(15)，可获取复合绝缘子污秽状态检测结果。

层次极限学习机内包含两部分，分别是无监督特征学习，以及层次极限学习机监督检测。无监督特征学习的优化模型为

$$\min\left\{\|SW-H\|^2+\left\|W'_1\right\|\right\} \tag{19}$$

通过快速迭代收缩阈值算法，求解式(19)，获取 W'_1 的解，以 W'_1 为层次极限学习机内1层与2层间的权重，以1层获取的复合绝缘子特征光谱信息的特征表示 p_1 为2层的输入[25]，以此类推，完成监督特征学习后，可获取最终的复合绝缘子特征光谱信息的特征表示 $\{p_1,p_2,\cdots,p_\xi\}$。在极限学习机内输入 $\{p_1,p_2,\cdots,p_\xi\}$，展开监督特征检测，获取最终的复合绝缘子污秽状态检测结果。

复合绝缘子污秽状态检测的具体步骤如下。

步骤1，采集复合绝缘子光谱信息。

步骤2，通过NAPC变换对采集的光谱信息实施变换，得到得到复合绝缘子有效光谱信息的NAPC变换矩阵 X'，以及噪声干扰信息的NAPC变换矩阵 U。

步骤3，利用 U 建立正交空间投影算子 Q，依据构造噪声干扰信息的子空间，在该子空间内投影 X'，在该子空间抑制复合绝缘子光谱信息的干扰信息，令有效复合绝缘子光谱信息变得突出，获取光谱信息的残差数据。

步骤4，通过主成分分析法，在残差数据内，提取复合绝缘子污秽状态光谱信息特征，经过重构后，得到复合绝缘子污秽状态特征光谱信息，最大程度地消除干扰信息。

步骤5，在层次极限学习机内，输入复合绝缘子污秽状态特征光谱信息，输出复合绝缘子污秽状态检测结果。

2　实验分析

以某电力公司的FXBW4-10/70型复合绝缘子为实验对象，通过氯化钠模拟复合绝缘子污秽的等值盐密，共包含4个等级的污秽状态，污秽状态4个等级的等值盐密见表1。

表1　复合绝缘子污秽状态4个等级的等值盐密

Table 1　Equivalent salt density of four levels in pollution state of composite insulators

污秽等级	等值盐密/(mg·cm^{-2})
1	0.04~0.07
2	0.07~0.11
3	0.11~0.26
4	0.26~0.36

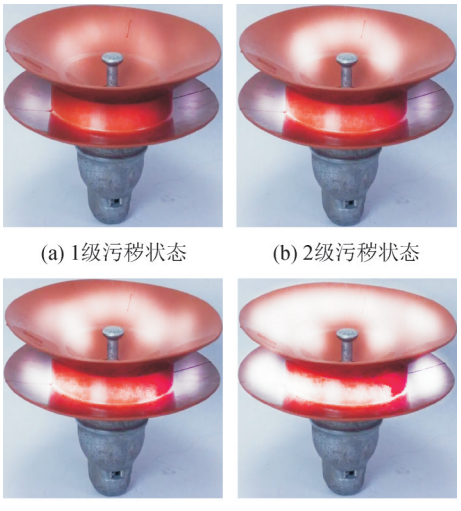
将S185光谱仪安装在三脚架上，镜头与复合绝缘子间的距离是130 cm，角度为向下50°，光源对称分布在复合绝缘子两侧，在成像区域中，采集复合绝缘子光谱信息。S185光谱仪的参数见表2。

表2　S185光谱仪的参数

Table 2　Parameters of S185 spectrometer

参数名	参数值
光谱范围/nm	500~1 000
分辨率/nm	2.9
像素	1 212×1 040

在该电力公司内随机选择4个污秽等级的复合绝缘子，数量均为1个，随机选择的4个污秽等级的复合绝缘子见图1。



(a) 1级污秽状态　(b) 2级污秽状态

(c) 3级污秽状态　(d) 4级污秽状态

图1　4个污秽等级的复合绝缘子

Fig. 1　Composite insulators with four pollution levels

由图1(a)-(d)可知，复合绝缘子得到污秽面积越大，污秽等级越高。

利用文中方法采集这4个污秽等级复合绝缘子的光谱信息，采集结果见图2。

分析图2可知，文中方法可有效采集复合绝缘子的光谱信息，4个污秽等级的复合绝缘子光谱信息，整体变化趋势大致相同，反射率均随波长的延长而增长，但局部细节信息存在较为显著的差距。实验证明：文中方法具备复合绝缘子光谱信息采集

的有效性。

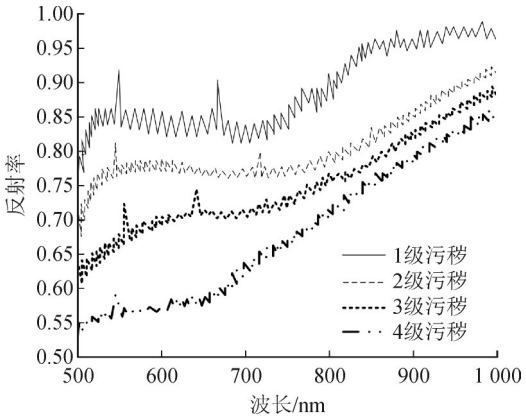


图2 光谱信息采集结果

Fig. 2 Spectral information acquisition results

利用文中方法抑制干扰信息，提取复合绝缘子污秽状态光谱信息特征，文中方法是依据累积贡献率，提取光谱信息特征，当主成分累积贡献率超过98%时，说明该主成分内的光谱信息，可代表全部光谱信息，各主成分的累积贡献率见图3。

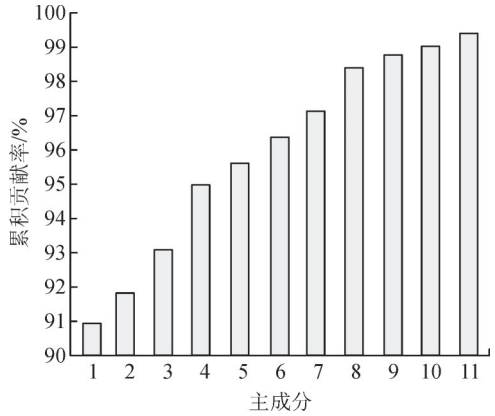


图3 各主成分的累积贡献率

Fig. 3 Cumulative contribution rate of each principal component

分析图3可知，当主成分为8时，对应的累积贡献率超过了98%，说明该主成分内包含的光谱信息，可代表全部的复合绝缘子光谱信息，因此，前8个主成分内的光谱信息，即抑制干扰信息后，提取的复合绝缘子光谱信息特征。实验证明：文中方法可有效提取复合绝缘子光谱信息特征，抑制干扰信息，剔除冗余信息。

在该电力公司内随机选择50个复合绝缘子，利用文中方法对这50个复合绝缘子进行污秽状态快速检测，污秽状态检测结果见图4。

分析图4可知，文中方法可有效快速检测复合绝缘子污秽状态，且大部分污秽状态快速检测结果，与实际结果均相同，仅有极少数的复合绝缘子污秽状态快速检测结果，与实际结果不符。实验证明：文中方法具备较优的复合绝缘子污秽状态快速检测效果。

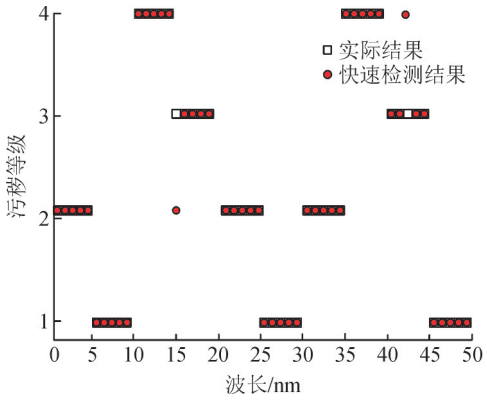


图4 污秽状态检测结果

Fig. 4 Detection results of contamination state

通过相关系数衡量文中方法的复合绝缘子污秽状态快速检测精度，相关系数越接近1，则快速检测结果与实际结果间的相关性越高，即精度越高，分析不同污秽面积占总绝缘子面积百分比时，文中方法污秽状态快速检测的相关系数，分析结果见图5。

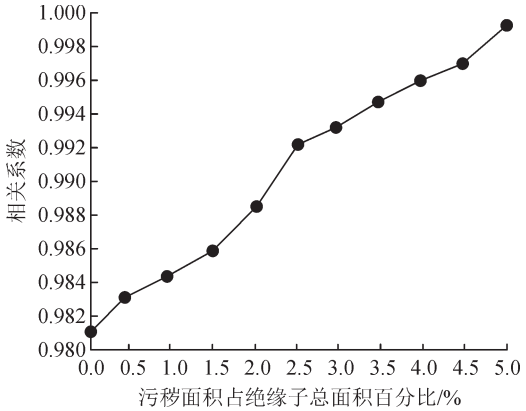


图5 相关系数分析结果

Fig. 5 Analysis results of correlation coefficients

分析图5可知，污秽面积占总绝缘子面积百分比不断提升，相关系数也随之提升，说明文中方法快速检测复合绝缘子污秽状态的精度也随之提升，在不同污秽面积占总绝缘子面积百分比时，文中方法快速检测的相关系数均与1较为接近，说明不同污秽面积占总绝缘子面积百分比时，文中方法污秽状态快速检测的精度均较高。

3 结语

为了降低污闪故障发生概率，提升污秽状态快速检测效果，以保证电网的稳定运行，文中在考虑光谱信息干扰的前提下，研究复合绝缘子污秽状态快速检测方法。以某电力公司的FXBW4-10/70型复合绝缘子为实验对象，使用文中方法采集不同污

秽等级复合绝缘子的光谱信息，证实了文中方法信息采集的有效性。对污秽状态检测，实验结果表明，文中方法能够精准快速地检测出污秽状态，能够帮助工作人员及时了解绝缘子污秽状态，并加以清理，避免出现污闪故障，确保电网稳定运行。

参考文献：

[1] 袁文泽，何　聪，蔡　鋆，等. GIS盆式绝缘子表面污秽模态分析检测方法研究[J]. 西安交通大学学报，2021，55(2)：100-111.
Yuan Wenze，He Cong，Cai Yun，et al. A detection method of surface pollution of GIS basin insulator using modal analysis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University，2021，55(2)：100-111.

[2] 谢　静，肖　韩，刘志坚，等.基于多模态改进残差网络的输电线路绝缘子覆冰类型识别方法[J]. 电力系统保护与控制，2026，54(1)：130-142.
Xie Jing，Xiao Han，Liu Zhijian，et al.A multimodal enhanced ResNet-based method for identifying icing type on transmission line insulators[J]. Power System Protection and Control，2026，54(1)：130-142.

[3] 尹向雷，解永芳，屈少鹏，等. 基于动态蛇形卷积和非跨步卷积的绝缘子缺陷检测[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(20)：177-187.
Yin Xianglei，Xie Yongfang，Qu Shaopeng，et al.Insulator defect detection based on dynamic snake convolution and space-to-depth convolution[J]. Power System Protection and Control，2024，52(20)：177-187.

[4] 徐德智，崔俊杰，袁　冬，等.基于高光谱技术的绝缘子污秽等级检测[J]. 电网与清洁能源，2025，41(8)：40-45.
Xu Dezhi，Cui Junjie，Yuan Dong，et al.Insulation contamination grade detection based on hyperspectral technology[J]. Power System and Clean Energy，2025，41(8)：40-45.

[5] 刘　悦，黄新波，刘天娇.基于深度学习的架空输电线路绝缘子缺陷检测方法研究综述[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(3)：167-177.
Liu Yue，Huang Xinbo，Liu Tianjao.Overview on defect detection methods of insulator for overhead transmission lines based on deep learning[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2024，45(3)：167-177.

[6] 余欧然，郭裕钧，张血琴，等. 基于近红外高光谱的绝缘子污层受潮程度检测[J]. 电瓷避雷器，2022(6)：197-203.
Yu Ouran，Guo Yujun，Zhang Xueqin，et al. Moisture detection of insulator pollution layer based on near-infrared hyperspectral imaging[J]. Insulators and Surge Arresters，2022(6)：197-203.

[7] 刘益岑，杨　琳，王杨宁，等. 基于高光谱与红外技术融合的绝缘子污秽程度检测方法[J]. 电工电能新技术，2022，41(3)：55-62.
Liu Yicen，Yang Lin，Wang Yangning，et al. Method of insulator pollution degree detection method based on fusion of hyperspectral and infrared technology[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy，2022，41(3)：55-62.

[8] 缪　金，秦　军，陈峻宇，等.基于高光谱成像的复合绝缘子表面污秽成分识别方法[J]. 浙江电力，2025，44(1)：124-132.
Miao Jin，Qin Jun，Chen Junyu，et al.A method for identifying surface contamination components of composite insulators based on hyperspectral imaging[J]. Zhejiang Electric Power，2025，44(1)：124-132.

[9] 唐静宜，唐　波，金广厚，等. 试验回路参数对污染条件下绝缘子电气特性的影响研究[J]. 高压电器，2021，57(5)：93-100.
Tang Jingyi，Tang Bo，Jin Guanghou，et al. The influence of experimental circuit parameters on insulator electrical characteristics under polluted conditions[J]. High Voltage Apparatus，2021，57(5)：93-100.

[10] 芦肇基，沈艳霞，谭永强. 基于多结构融合WGAN的模糊绝缘子图像复原方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(22)：166-175.
Lu Zhaoji，Shen Yanxia，Tan Yongqiang.A WGAN blur insulator image restoration method based on multi-structure fusion[J]. Power System Protection and Control，2024，52(22)：166-175.

[11] 唐志国，李　阳. 太赫兹反射成像技术在复合绝缘子硅橡胶内部缺陷检测中的评述[J]. 绝缘材料，2022，55(7)：10-16.
Tang Zhiguo，Li Yang. Application review of terahertz reflectance imaging technique for detection of internal defects in silicone rubber for composite insulators[J]. Insulating Materials，2022，55(7)：10-16.

[12] 何　宁，史旺旺. 电力巡检中绝缘子缺失故障检测的图像处理方法研究[J]. 现代电子技术，2022，45(23)：45-48.
He Ning，Shi Wangwang.Image processing method for insulator missing failure detection in power inspection[J]. Modern Electronics Technique，2022，45(23)：45-48.

[13] 李　磊，李英娜，赵振刚. 基于改进YOLOv4的中小型绝缘子检测[J]. 电视技术，2022，46(3)：74-82.
Li Lei，Li Yingna，Zhao Zhengang. Detection of small and medium-sized insulators based on improved YOLOv4 algorithm[J]. Video Engineering，2022，46(3)：74-82.

[14] 王思华，王军军，赵　磊，等. 污秽成分对复合绝缘子表面电场的影响[J]. 中国电力，2021，54(7)：149-157.
Wang Sihua，Wang Junjun，Zhao Lei，et al. Influence of pollution components on surface electric field of composite insulators[J]. Electric Power，2021，54(7)：149-157.

[15] 王立宪，马宏忠，戴　锋. 基于改进SVD-EMD的绝缘子泄漏电流去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报，2022，36(1)：166-173.
Wang Lixian，Ma Hongzhong，Dai Feng. Improved singular value and empirical mode decomposition algorithm on leakage current denoising[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2022，36(1)：166-173.

[16] 张嘉伟，叶子帆，王　倩，等. 基于F-P光纤泄漏电流传感器的绝缘子状态监测[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2915-2923.
Zhang Jiawei，Ye Zifan，Wang Qian，et al. Insulator condition monitoring based on F-P optical fiber leakage current sensor[J]. High Voltage Engineering，2022，48(8)：2915-2923.

[17] 黄新宇，张　洋，王黎明，等. 基于Mask-RCNN算法的复合绝缘子串红外图像分割与温度读取[J]. 高压电器，2021，57(9)：87-94.
Huang Xinyu，Zhang Yang，Wang Liming，et al. Infrared image segmentation and temperature reading of composite insulator strings based on Mask-RCNN algorithm[J]. High Voltage

Apparatus,2021,57(9):87-94.

[18] 刘 悦,黄新波. 基于YOLOv4和改进分水岭算法的绝缘子爆裂检测定位研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(7):51-57.
Liu Yue, Huang Xinbo. Research on insulator burst fault identification based on YOLOv4 and improved watershed algorithm [J]. Power System and Clean Energy,2021,37(7):51-57.

[19] 耿江海,孔迤萱,刘云鹏,等. 基于高光谱成像技术的复合绝缘子表面污秽状态检测实验平台设计[J]. 实验技术与管理,2022,39(3):176-181.
Geng Jianghai, Kong Yixuan, Liu Yunpeng, et al. Experimental platform design of composite insulator surface contamination detection based on hyperspectral imaging technology[J]. Experimental Technology and Management,2022,39(3):176-181.

[20] 李 静,杨小娟,刘树鑫,等. 污秽覆冰绝缘子动态闪络特性分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(22):9378-9383.
Li Jing, Yang Xiaojuan, Liu Shuxin, et al. Analysis of dynamic flashover characteristics of polluted iced insulators[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(22):9378-9383.

[21] 王远东,史文江,杨忠毅,等. 典型不溶污秽染污绝缘子在不同环境湿度下的吸水和闪络特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(5):92-97.
Wang Yuandong, Shi Wenjiang, Yang Zhongyi, et al. Moisture absorption and flashover properties of insulators polluted with typical non-soluble contaminates in various environment humidity [J]. Insulating Materials,2021,54(5):92-97.

[22] 汪 晓,万 能,宁 彦,等. 绝缘子清洗无人机的抗干扰跟踪控制[J]. 自动化与仪器仪表,2021(10):101-110.
Wang Xiao, Wan Neng, Ning Yan, et al. Anti-interference tracking and control of insulator cleaning drone[J]. Automation and Instrumentation,2021(10):101-110.

[23] 金 光. 基于纹理频谱的电气化铁路绝缘子劣损状态检测[J]. 自动化与仪器仪表,2021(6):22-30.
Jin Guang. Detection of deterioration status of electrified railway insulators based on texture spectrum[J]. Automation and Instrumentation,2021(6):22-30.

[24] 张 达,刘付琪,陈 昊. 基于泄漏电流吸引子相图的绝缘子污秽状态检测方法:CN202111384641. 8[P].2024-03-26.
Zhang Da, Liu Fuqi, Chen Hao. Detection method for insulator pollution state based on leakage current attractor phase diagram: CN202111384641. 8[P]. 2024-03-26.

[25] 马御棠,杨 坤,李谦慧,等. 基于高光谱成像技术的500 kV运行绝缘子污秽识别及可视化研究[J]. 云南电力技术,2021,49(1):14-19.
Ma Yutang, Yang Kun, Li Qianhui, et al. Research on recognition and visualization of 500 kV AC insulator contamination based on hyperspectral imaging technology[J]. Yunnan Electric Power, 2021,49(1):14-19.

刘 威(1988—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为输变电设备防污闪技术、复合外绝缘检测及故障诊断技术(通信作者)(E-mail:964563936@qq.com)。

于 杰(2001—),男,本科,助理工程师,主要研究方向为输变电设备智能运检新技术。

李晓光(1983—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为高电压外绝缘技术及电缆运检技术。

李 清(1989—),女,硕士,工程师,主要研究方向为输变电工程设计及运检新技术。

雷泽阳(1997—),男,本科,助理工程师,主要研究方向为复合绝缘子检测及老化评估。

(上接第51页)

[18] 韩 露,程 珩,励文艳,等. VMD模糊熵和SVM在柱塞泵故障诊断中的应用[J]. 机械设计与制造,2023,389(7):110-115.
Han Lu, Cheng Hang, Li Wenyan, et al.Application of VMD fuzzy entropy and SVM in plunger pump fault diagnosis[J]. Machinery Design & Manufacture,2023,389(7):110-115.

[19] 程红伟,陶俊勇,陈 循,等. 偏斜非高斯随机振动信号幅值概率密度函数研究[J]. 振动与冲击,2014,33(12):121-125.
Cheng Hongwei, Tao Junyong, Chen Xun, et al.Amplitude probability density function for skewed non - gaussian random vibration signals based on gaussian - mixture model[J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(12):121-125.

[20] 刘会兰,许文杰,赵书涛,等. 面向高压断路器故障分类的电流—振动信号类聚几何敏感特征优选方法[J]. 电工技术学报,2023,38(1):26-36.
Liu Huilan, Xu Wenjie, Zhao Shutao, et al. Optimization method of clustering geometric sensitive features of current vibration signals for fault classification of high voltage circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(1):26-36.

[21] 许 洁. 基于典型相关分析的特征提取与应用[D]. 无锡:江南大学,2018.
Xu Jie.Feature extracion and application based on canonical correlation analysis[D]. Wuxi:Jiangnan University,2018.

[22] 毕立恒,朱彦齐. 基于分群粒子群算法的平面度误差评定研究[J]. 计量学报,2019,40(6):980-985.
Bi Liheng, Zhu Yanqi.Flatness error evaluation based on grouped particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019,40(6):980-985.

黄伟杰(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力设备故障诊断与电寿命预测(E-mail:huangweijie0813@163.com)。

刘会兰(1986—),女,博士,高级实验师,主要研究方向为电力设备故障诊断、智能电器监测技术及分布式电源并网技术(通信作者)(E-mail:liuhuilan111@163.com)。

赵书涛(1967—),男,教授,博士,主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断(E-mail:shutaozhao@163.com)。