

# 基于涡流检测的混凝土电杆内部钢筋锈蚀状态定量评估研究

吴章勤\* 张宇 王兴文 殷成生 杨鹏

云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南昆明 650000

**摘要:** 混凝土电杆作为配电网关键基础设施, 其内部钢筋锈蚀是引发结构性能退化甚至倒杆事故的主要诱因。传统检测方法难以实现锈蚀状态的无损定量评估。本研究提出一种基于涡流检测技术的混凝土电杆内部钢筋锈蚀定量评估方法, 旨在开发一套集高精度传感、智能信号处理与定量模型于一体的软硬件系统。结果表明, 该系统能够有效穿透混凝土保护层, 实现对钢筋锈蚀截面损失率的非破损定量评估, 为配网电杆的状态检修与寿命预测提供了一种全新的精准化技术手段, 具有重要的工程应用价值。

**关键词:** 混凝土电杆; 钢筋锈蚀; 涡流检测; 状态检修; 配电网运维

## 1 绪论

混凝土电杆因其优异的力学性能和经济性, 在配网中广泛部署。然而, 长期户外服役导致内部钢筋易发生电化学锈蚀, 引发混凝土开裂和钢筋截面损失, 严重影响结构安全<sup>[1-2]</sup>。当前主要依赖人工目视、锤击听音等方法, 主观性强且无法定量评估内部锈蚀<sup>[3-5]</sup>。因此, 发展一种无损、快速、定量的钢筋锈蚀评估技术与装备, 是实现配网状态检修转型的迫切需求。

涡流检测基于电磁感应原理, 为实现该目标提供了可能途径<sup>[6,7]</sup>。当激励线圈靠近钢筋时, 锈蚀引起的电磁特性变化会调制线圈阻抗信号。然而, 实际应用中面临多重挑战: 信号受到提离效应、边缘与端部效应、材料特性差异等多重干扰因素的耦合影响, 核心在于建立从复杂信号到锈蚀程度的鲁棒映射关系。

其次, 电杆的圆柱曲面结构和内部钢筋的非平面排布, 使得标准平面检测模型失效, 探头设计需特殊优化。为剥离干扰、提取与锈蚀强相关的特征, 必须构建精确的物理模型与智能的信号解译算法。本研究的核心任务即是攻克这些挑战, 通过多物理场建模、特征频点优选及人工智能算法, 构建一个抗干扰的定量评估模型。涡流检测的基础阻抗关系式如下:

$$Z=R+j\omega L=F(\sigma, \mu_r, f, d, \Phi, h, \delta)$$

式中,  $Z$  为线圈复阻抗,  $R$  为电阻分量,  $L$  为电感分量,  $j$  为虚数单位,  $\omega$  为角频率,  $\sigma$  为钢筋电导率,  $\mu_r$  为相对磁导率,  $f$  为激励频率,  $d$  为保护层厚度,  $\Phi$  为钢筋直径,

$h$  为提离距离,  $\delta$  为锈蚀截面损失率。此式定性表达了阻抗是所有变量的多元非线性函数。

## 2 涡流检测定量评估的理论基础与关键技术

### 2.1 混凝土中钢筋锈蚀的电磁学表征机理

钢筋锈蚀本质是铁基体的电化学溶解, 其宏观电磁学效应可表征为两个方面: 一是导体有效截面积的几何性缩减, 记为截面损失率  $\delta=(A_0-A_c)/A_0$ , 其中  $A_0$ 、 $A_c$  分别为原始与当前截面积; 二是锈蚀产物 ( $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ 、 $Fe_3O_4$  等) 与钢材迥异的电导率  $\sigma$  与相对磁导率  $\mu_r$  而导致在锈蚀区域形成的电磁特性突变层。该复合效应改变了交变电磁场在钢筋中的涡流分布密度与趋肤深度。根据麦克斯韦方程组, 在准静态近似下, 导体内涡流场的控制方程可简化为扩散方程:

$$\nabla^2 H=j\omega \mu \sigma H$$

其中,  $H$  为磁场强度,  $\omega$  为角频率,  $\mu$  为磁导率。锈蚀导致的  $\sigma$ 、 $\mu_r$  局部变化以及边界条件的改变, 将扰动该电磁场的解, 最终调制检测线圈的复阻抗  $Z=R+j\omega L$ 。

因此, 锈蚀的定量评估问题, 在理论上可转化为从被干扰的阻抗测量值  $Z_{meas}$  中, 反演求解出表征锈蚀程度的关键参数  $\delta$ 。

### 2.2 面向电杆检测的干扰因素解耦理论与关键技术

实际检测信号是目标信号与多种干扰信号的强耦合, 可建模为:

$$Z_{meas}(f)=Z_{ref} \cdot \Gamma_{lift}(f, h) \cdot \Gamma_{cover}(f, d, \varepsilon) \cdot \Gamma_{corr}(f, \delta, \sigma, \mu_c)+N(f)$$

其中,  $Z_{ref}$  为参考阻抗;  $\Gamma_{lift}$ 、 $\Gamma_{cover}$ 、 $\Gamma_{corr}$  分别

表征提高效应、混凝土保护层（介电常数  $\epsilon$ ）效应和目标锈蚀效应的传递函数； $N(f)$  为噪声。单一频率点信息不足以解耦多重效应。本研究采用扫频方式获取宽频带阻抗谱，并从中提取多维特征，如谐振频率偏移量  $\Delta f_r$ 、特定频段相位角斜率  $k_\phi$ 、归一化阻抗轨迹的椭圆拟合参数等，构建高维特征向量  $F=[f_1, f_2, \dots, f_n]^T$ 。

### 3 混凝土电杆钢筋锈蚀定量评估系统设计与实现

设计并实现了一套便携式多频涡流检测系统，集信号激励、采集、处理与智能分析于一体，旨在实现复杂现场环境下钢筋锈蚀的自动化定量评估。系统采用模块化架构，由硬件采集与软件分析子系统组成。

#### 3.1 硬件系统设计

硬件以抗干扰、宽频带、便携为目标，负责生成激励、采集高质量响应信号及位置信息。

##### (1) 曲面自适应差分探头

采用柔性电路板设计，探头包含一个居中激励线圈和两侧对称分布的接收线圈，构成一发两收差分结构。扫查时，均匀锈蚀或基体影响产生共模信号，而局部点蚀等缺陷产生差分信号，有效抑制提高波动与温度漂移等干扰，并增强对局部锈蚀的灵敏度。聚酰亚胺薄膜基材确保探头贴合电杆曲面，保持耦合稳定。

##### (2) 多频阻抗分析模块

基于直接数字频率合成器（DDS）与正交解调技术实现宽频阻抗测量。DDS 生成纯净正弦激励信号，经功放驱动激励线圈；接收信号经过放大滤波后，分别与同相（I）和正交（Q）参考信号混频并滤波，直接获取响应信号的实部与虚部电压。扫频测量后可计算归一化复阻抗。

$$Z_n(f) = V_{out}(f) / V_{ref}(f) = R_n(f) + jX_n(f)$$

其中， $V_{ref}(f)$  为空载时的基线电压。该模块支持 10kHz 至 2MHz 的扫频测量，频率分辨率达 1Hz，为提取丰富的频散特征奠定了基础。

#### 3.2 软件与定量评估模型构建

从每个测点的阻抗谱中，系统自动提取四大类共 42 个初始特征，构成特征向量  $F$ ：

(1) 幅频 / 相频特征：如谐振频率  $f_r$ 、-3dB 带宽 BW、品质因数  $Q=f_r/BW$ 、特定频点相位角  $\phi(f)$ 。

(2) 轨迹几何特征：在阻抗平面图上，拟合阻抗轨迹椭圆的长短轴比、离心率、面积。

(3) 统计特征：阻抗实部 / 虚部在频带内的均值、方差、偏度、峰度。

(4) 时频域特征：对  $Z_n(f)$  进行小波变换，提取特定尺度下的小波系数能量。

为去除冗余、提高模型效率与泛化能力，采用最大相关最小冗余（mRMR）算法进行特征选择。通过求解公式优化问题，筛选出与锈蚀率  $\delta$  相关性最大而彼此间冗余性最小的最优特征子集  $F_s$ ，通常将维度降至 8 个。

#### 3.3 支持向量回归（SVR）模型

定量评估的核心是一个非线性回归模型。本研究采用基于径向基函数（RBF）核的 SVR 模型，因其在小样本、非线性问题上表现优异。给定训练样本集  $(x_i, y_i) | i = 1, \dots, n$ ，其中  $x_i$  为筛选后的特征向量， $y_i$  为真实截面损失率，SVR 通过求解以下优化问题来寻找最优回归函数  $f(x) = w^T \phi(x) + b$ ：

$$\begin{aligned} \min w, b, \xi_i, \xi_i^* \quad & (1/2) \|w\|^2 + C \sum_i \xi_i + \xi_i^* \\ \text{s.t.} \quad & y_i - w^T \phi(x_i) - b \leq \epsilon + \xi_i \\ & w^T \phi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ & \xi_i, \xi_i^* \geq 0, i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

其中， $\phi(x)$  为核函数映射， $C$  为惩罚参数， $\epsilon$  定义不敏感损失带， $\xi_i, \xi_i^*$  为松弛变量。通过网格搜索与交叉验证确定最优超参数  $C$ 、 $\epsilon$  和 RBF 核宽度  $\gamma$ 。训练完成的模型封装入软件，用于现场数据的实时预测。

### 4 实验验证与结果分析

#### 4.1 实验设计

##### 4.1.1 试件制备

制作了 20 根钢筋混凝土模拟试件（直径 150mm，长度 1200mm），主筋为直径 16mm 的 HRB400 钢筋。通过通电加速锈蚀法精确控制锈蚀程度。将钢筋作为阳极，置于一定浓度的 NaCl 溶液中，通过恒定电流控制锈蚀时间，以获得目标截面损失率（ $\delta = 0\%, 3\%, 5\%, 8\%, 12\%, 15\%, 20\%$ ）。锈蚀完成后，封装于设计强度的混凝土保护层中，保护层厚度分为 30mm 和 40mm 两组，以检验系统对保护层厚度变化的鲁棒性。最终，通过破样取样，采用清秤称重法测定每根钢筋的实际质量损失，换算为真实的平均截面损失率  $\delta_{true}$ ，作为模型训练与验证的标准。

#### 4.2 结果与分析

##### 4.2.1 特征选择结果

应用 mRMR 算法从 42 个初始特征中筛选出 5 个最优特征，构成最终输入向量  $F_s$ ，包括：谐振频率偏移量  $\Delta f_r$ 、500kHz 处相位角  $\phi_{500k}$ 、阻抗轨迹椭圆面积  $A_{ellipse}$ 、小波能

量熵  $E_{we}$  以及 100kHz 处归一化电阻  $R_{n100k}$ 。这些特征分别从频率、相位、几何、时频和电阻维度综合表征了锈蚀引起的电磁响应变化。

#### 4.2.2 定量评估模型性能

在独立测试集上的评估结果如图 1 和表 1 所示。SVR 模型的预测值  $\delta_{pred}$  与真实值  $\delta_{true}$  表现出高度一致性。

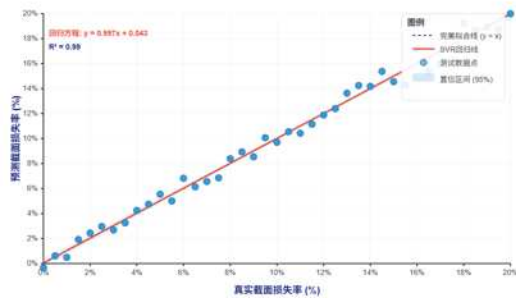


图 1 SVR 模型预测值与真实值散点拟合图

图表展示了支持向量回归 (SVR) 模型在预测混凝土电杆钢筋锈蚀截面损失率方面的性能。横坐标为真实截面损失率 (%), 通过破坏性试验 (清锈称重法) 获得; 纵坐标为模型预测值 (%), 基于涡流检测数据通过 SVR 模型计算得出。决定系数  $R^2=0.96$  表明模型能够解释 96% 的数据变异。

表 1: 模型性能定量评价指标

评价指标	数值	说明
决定系数 ( $R^2$ )	0.96	接近 1 表明模型解释力强
均方根误差 (RMSE)	1.28%	绝对误差的衡量
平均绝对误差 (MAE)	0.95%	预测误差的平均水平
平均相对误差 (MRE)	7.8%	考量量级的相对误差

分析表明, 当截面损失率  $\delta < 15\%$  时, 模型预测精度极高 ( $MAE < 1\%$ ); 当  $\delta > 15\%$  时, 由于锈蚀严重导致信号非线性饱和, 误差略有增大, 但 MRE 仍控制在 12% 以内。对比不同保护层厚度的试件, 模型预测误差无显著差异, 证明所提取的特征及模型对保护层厚度变化具有一定的鲁棒性。

#### 5 成果总结

本研究针对配网混凝土电杆内部钢筋锈蚀量化评估难题, 提出并实现了一套基于多频涡流检测与机器学习融合的定量评估软硬件系统。通过理论分析、硬件研发、算法构建与实验验证, 取得以下主要结论:

建立了电杆曲面板壳结构的涡流检测理论框架。通过

轴对称有限元模型, 揭示了保护层厚度、钢筋直径与锈蚀损伤等多参数对检测线圈阻抗的耦合调制机制, 明确了宽频阻抗谱在特征丰富性与解耦能力上的优势, 为硬件设计与特征工程奠定基础。

研制了高精度、抗干扰的专用检测软硬件系统。硬件方面, 设计了曲面自适应差分探头与宽频阻抗分析模块, 有效抑制了提离效应等干扰; 软件方面, 开发了集成信号处理与智能分析算法的平台, 实现了从原始信号到定量结果的自动解译。

构建了基于特征融合与支持向量回归的鲁棒定量评估模型。提出了从宽频阻抗谱中提取时-频-统计-几何多维特征的方法, 并利用 mRMR 算法筛选出对锈蚀敏感、对干扰鲁棒的特征子集。基于此训练的 SVR 模型, 实现了从电磁特征到钢筋截面损失率的准确映射, 在独立测试中表现出高精度与强泛化能力。

#### 参考文献:

- [1] 吴超, 毕雨田, 陶佳. 钢筋混凝土结构锈蚀开裂损伤机理及滞回性能研究 [J]. 安阳工学院学报, 2025,24(06):87-92+99.
- [2] 高清洋, 李美奇, 杨之良, 等. 内部钢筋锈蚀作用下混凝土结构破坏过程研究 [J]. 水运工程, 2025,(11):47-51.
- [3] 唐博文, 汪伟, 朱海威, 等. 海洋环境下混凝土开裂前后钢筋锈蚀产物的微观和力学性能对比分析 [J]. 水运工程, 2025,(07):43-50+74.
- [4] 陈开丽. 混凝土结构中钢筋锈蚀影响因素及其检测 [J]. 科学技术创新, 2025,(14):166-169.
- [5] 吴洁琼, 张子建, 金浏, 等. 试验方法对锈蚀钢筋混凝土黏结性能影响的数值模拟研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025,57(06):70-83.
- [6] 张东利, 武美先. 基于复合磁场激励的深层多类型缺陷涡流检测方法研究 [J/OL]. 中国测试, 1-10[2025-12-17]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1714.TB.20251210.1641.008>.
- [7] 李严. 无损检测技术在石油钻采设备关键零部件检测中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025,45(22):45-47.