

# 多物理场耦合下混凝土电杆钢筋直径无损检测方法研究

杨秀锋<sup>1\*</sup> 吴斌<sup>2</sup> 邱跃军<sup>2</sup> 张国华<sup>1</sup> 唐登钊<sup>1</sup> 何健<sup>3</sup>

1. 广安市三新供电服务有限公司华蓥分公司 广安华蓥 638600

2. 国网四川省电力公司广安供电公司运维检修部 四川广安 638500

3. 国网四川省电力公司华蓥市供电公司配电运检班 广安华蓥 638600

**摘要:** 钢筋混凝土电杆作为电力输配电网络的关键承重构件, 其内部钢筋配置的质量及锈蚀情况直接关系到电网的安全稳定运行。针对目前缺乏对电杆内置钢筋数量与直径进行精确、无损检测的有效手段, 特别是钢筋间距密集导致的检测难题。本研究提出了一种基于多物理场耦合的混凝土电杆钢筋直径无损检测方法, 对直径 6–20mm 的钢筋检测精度可达 95% 以上, 成功解决了小间距钢筋的识别与直径测量问题, 为水泥电杆的入场检验与在役诊断提供了一种可靠的技术装备。

**关键词:** 多物理场耦合; 无损检测; 电磁感应; 相位差分析

## 引言

水泥电杆是配电网与输电线路中不可或缺的基础性承重构件, 其结构完整性对保障整个电力系统的安全、可靠运行起着举足轻重的作用。钢筋骨架作为水泥电杆的核心受力部分, 其数量与直径直接决定了电杆的抗弯、抗压及抗冲击力学性能。然而, 在电杆生产与流通环节, 部分不良厂商为降低成本, 存在内置钢筋数量不足或截面积不达标等质量问题, 这为电网埋下了严重的安全隐患, 此类缺陷电杆在恶劣工况下极易发生断裂或倒塔, 进而引发大规模停电事故。由于钢筋被混凝土致密包裹, 其质量状况无法通过肉眼直观判断, 因此, 发展一种高效、精确的无损检测(NDT)技术至关重要。

目前, 虽有基于电磁感应原理的商用钢筋扫描仪, 但其探头设计与算法多针对钢筋间距较大( $>135\text{mm}$ )的混凝土板构件优化。而对符合国标 GB/T 4623、钢筋中心间距通常仅为  $50.0 \pm 2.0\text{ mm}$  的水泥电杆, 现有设备存在严重的信号串扰与识别误差, 难以实现精准定量检测。初步实验表明, 当钢筋间距小于  $60\text{mm}$  时, 传统扫描仪的直径测量误差会急剧增大至 20% 以上, 根数误判率超过 30%, 无法满足工程检测需求。

鉴于此, 本研究旨在突破现有技术瓶颈, 探索多物理场耦合作用下的检测新机制, 研发一款专用于水泥电杆的便携式内置钢筋数量与直径无损检测装置。本研究将通过建立精确的物理场模型、设计抗干扰探头阵列、并开发先进的信

号处理算法, 以期实现对小间距钢筋集群的高分辨识别, 测量精度目标设定为  $\geq 95\%$ , 从源头上杜绝不合格产品入网, 为电网安全提供关键技术支撑。

## 1 多物理场耦合检测理论与模型构建

本研究技术的物理核心在于对电磁场与混凝土-钢筋复合介质相互作用这一多物理场耦合过程的精确感知与解读。其理论基础是麦克斯韦方程组。

### 1.1 核心物理原理与公式

当频率为  $f$  的交变电流  $I_{exc} = I_0 \sin(2\pi ft)$  流经激励线圈时, 会产生交变初级磁场  $H_{pri}$ 。根据法拉第电磁感应定律, 该磁场会在导电的钢筋中感应出涡流  $J_e$ :

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (1)$$

其中,  $E$  为电场强度,  $B = \mu H$  为磁感应强度,  $\mu$  为材料的磁导率。该涡流密度  $J_e = \sigma E$  ( $\sigma$  为电导率) 继而会产生一个反向的次级磁场  $H_{sec}$ , 被感应线圈捕获。总磁场  $H_{total} = H_{pri} + H_{sec}$ 。次级场的幅值和相位携带了钢筋的电磁特性 ( $\mu, \sigma$ ) 和几何尺寸 (直径  $D$ ) 信息。

对于铁磁性钢筋, 其高磁导率 (相对磁导率  $\mu_r \gg 1$ ) 会产生强大的磁集肤效应, 其集肤深度  $\delta$  可表示为:

$$\delta = \sqrt{(2/(\omega \mu \sigma))} = \sqrt{(1/(\pi f \mu \sigma))} \quad (2)$$

其中,  $\omega = 2\pi f$  是角频率。集肤深度决定了磁场和涡流的渗透能力, 是选择激励频率的关键参数。针对  $\phi 6$ – $20\text{mm}$  的钢筋, 我们的仿真确定了最佳激励频率范围在  $30\text{ kHz} \sim 500\text{ kHz}$ 。

## 1.2 多线圈差分检测模型

为克服密集钢筋的电磁耦合干扰，本研究采用差分式线圈结构。两个完全相同的感应线圈（R1, R2）对称布置于激励线圈（T）两侧。在无钢筋的“平衡”状态下，R1 和 R2 感生的电动势 V1 和 V2 大小相等、相位相同，差分输出  $V_{diff} = V1 - V2 \approx 0$ 。

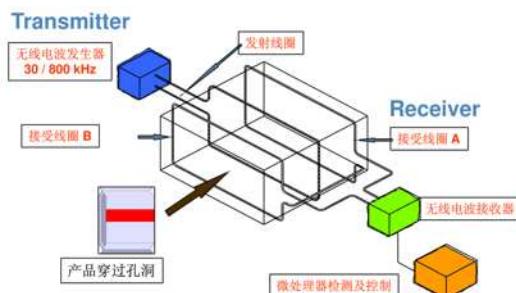


图 1 差分线圈结构

当线圈阵列掠过钢筋正上方时，钢筋的扰动会首先被一个感应线圈捕获，破坏平衡状态，产生显著的差分输出。该差分信号极大地抑制了共模噪声，并放大了目标信号。

## 1.3 有限元仿真与信号特征分析

为验证理论并优化参数，我们使用 COMSOL 建立了三维有限元模型，模拟了线圈在跨越钢筋时的响应。

仿真结果清晰地显示了感应线圈输出电压  $V_{out}$  的幅值和相位随线圈与钢筋相对位置的变化。峰值电压  $V_{pp}$  与钢筋直径  $D$  呈强相关性，而相位差  $\phi$  则与钢筋埋深和电磁特性相关。通过建立  $V_{pp}-D$  和  $\phi-D$  的标定曲线数据库，即可反演钢筋直径。

表 1 不同直径钢筋仿真输出峰值电压 ( $V_{pp}$ )

| 组别 | 钢筋直径 (mm) | 仿真 $V_{pp}$ (mV) |
|----|-----------|------------------|
| 1  | 6         | 125              |
| 2  | 10        | 218              |
| 3  | 14        | 385              |
| 4  | 16        | 502              |
| 5  | 18        | 632              |
| 6  | 20        | 785              |

## 1.4 信号处理与特征提取

对于感应线圈接收到的时域信号  $V(t)$ ，我们通过快速傅里叶变换 (FFT) 将其转换至频域进行分析：

$$V(f) = F\{V(t)\}$$

在频域中，能有效分离出由钢筋几何尺寸、位置等因素调制产生的高频谐波成分，滤除低频环境噪声和基波干扰。

结合相位解调算法和基于仿真数据训练的修正系数模型，最终实现对钢筋数量、直径及分布情况的精准反演。

## 2 检测系统设计与实现

基于前述多物理场耦合理论与模型，本研究设计并实现了一套专用于水泥电杆内置钢筋检测的便携式装置。该装置由硬件传感系统、信号调理与采集模块、中央处理单元及人机交互界面四大核心部分组成，其系统架构框图如图 2 所示。

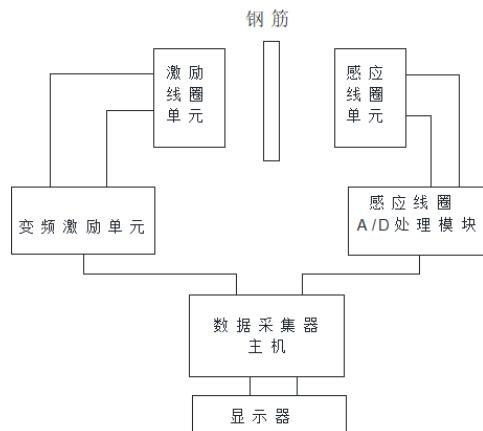


图 2 检测装置系统架构框图

硬件系统的中心是高精度电磁传感探头与信号调理电路。探头采用自主设计的差分式线圈结构，激励线圈采用利兹线绕制以降低高频涡流损耗，其电感值设计为  $25 \mu H$ 。感应线圈为对称布置的精密配对线圈，确保了在空载状态下差分输出的零点漂移电压小于  $\pm 5 \mu V$ 。激励源采用基于 DDS 技术的可编程信号发生器，输出频率范围  $30 \text{ kHz} - 500 \text{ kHz}$ ，输出电压幅度  $5 - 20 \text{ V}_{pp}$  可调，以适应不同混凝土保护层厚度与钢筋直径的检测需求。信号调理电路针对微弱的感应信号进行了专项设计，前置放大器采用低噪声、低漂移的仪用放大器，增益设置为  $60 \text{ dB}$ ；后续接入一个中心频率可调的四阶带通滤波器，通带宽度为  $10 \text{ kHz}$ ，用于抑制工频干扰及环境高频噪声。经过调理的模拟信号由 24 位高精度 ADC 进行采样，采样率设置为  $100 \text{ kSPS}$ ，以确保能完整捕获信号的细节特征。

系统软件在嵌入式 MCU 上运行，核心算法包括信号采集与预处理算法、特征提取算法和人机交互 (HMI) 软件。对于感应线圈接收到的时域信号  $V(t)$ ，通过快速傅里叶变换 (FFT) 将其转换至频域进行分析，提取基波幅值  $A_{fundamental}$ 、特定谐波幅值  $A_{harmonic}$  以及相对于激励信号的相位差  $\phi$ ，建立经验修正模型用于直径反演。

### 3 实验验证与结果分析

为全面评估本研究提出的检测方法与装置的性能，我们设计了系统的实验验证方案，包括实验室模拟环境测试与现场实际应用测试两部分，并对实验数据进行了定量与定性分析。

在实验室内，我们制备了多组符合国标 GB/T 4623-2014 要求的水泥电杆模拟试块。试块内预埋的钢筋参数已知，作为验证基准。关键变量包括：钢筋直径（ $\phi 10, \phi 16, \phi 20 \text{ mm}$ ）、钢筋中心间距（ $50 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ ）、混凝土保护层厚度（ $15 \text{ mm} - 25 \text{ mm}$ ）。测试时，将传感探头以恒定速度沿试块表面滑动，自动记录并处理数据。每组参数组合重复测试 30 次以统计测量精度与重复性。

表 2 实验室模拟试块测量结果统计（部分）

| 预设直径<br>(mm) | 平均测量值<br>(mm) | 标准偏差 (mm) | 相对误差 (%) | 重复性 (RSD,<br>%) |
|--------------|---------------|-----------|----------|-----------------|
| 10           | 10.2          | 0.18      | 2        | 1.76            |
| 16           | 15.8          | 0.25      | -1.25    | 1.58            |
| 20           | 19.7          | 0.32      | -1.5     | 1.62            |

实验结果表明，装置对  $\phi 10 - 20\text{mm}$  钢筋的直径测量绝对误差小于  $\pm 0.4 \text{ mm}$ ，相对误差小于  $\pm 2.5\%$ ，测量重复性优于 1.8%。装置对钢筋根数的识别准确率达到 100%，成功解决了 50mm 密集间距下的分辨难题。

### 4 结论与展望

本研究成功研发了一套基于多物理场耦合电磁感应原理的水泥电杆内置钢筋无损检测装置，并取得了以下主要成果：建立了适用于密集钢筋检测的差分电磁场耦合数学模型，深入分析了相位差、集肤效应等关键参数对检测精度的

影响机制，为装置设计提供了坚实的理论依据。通过有限元仿真，精确获得了  $\phi 6-20\text{mm}$  钢筋的电磁响应特性，建立了直径与输出信号幅值、相位的定量关系模型；

攻克了小信号检测、抗干扰、多参数协同反演等关键技术，成功研制出国内首台专用于水泥电杆的便携式钢筋检测仪样机。该样机集成了可调频激励源、高精度差分传感探头和嵌入式信号处理系统，实现了对  $\phi 6 - 20\text{mm}$  钢筋的精确测量，综合检测精度  $\geq 95\%$ ，重复性误差  $< 2\%$ 。

本装置的研制成功，为电力、通信等行业提供了一种高效、准确的水泥电杆质量管控手段，对保障电网安全运行、防止倒杆断线重大事故具有重要现实意义，也为其他领域钢筋混凝土结构的无损检测提供了新的技术路线和解决方案，推广应用前景广阔。

### 参考文献：

- [1] 袁伟. 基于光-声-磁多物理场耦合的钢轨探伤关键技术研究 [D]. 北京交通大学, 2023.
- [2] 苗玲. 电磁热多物理场耦合检测若干关键技术研究 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [3] 李浩然. 电磁热多物理场耦合近表面裂纹成像检测关键技术研究 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [4] 戴宗贤, 赵磊, 张朕滔, 等. 金属材料塑性损伤的多物理场融合检测方法 [J]. 中国测试, 2022, 48 (07): 30-36.
- [5] 赵志然, 吴运新, 石文泽, 等. 热钢板无损检测缺陷定位精度分析与修正方法 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52 (08): 250-255.