

基于磁导率锁定放大的高压输电线压接结构内部钢管探测

冯超宇¹, 王 昊¹, 李 海^{2,3*}, 叶 帆³, 袁茂雲³, 王晨希³

¹国网陕西省电力有限公司超高压公司, 陕西 西安

²绍兴杭电集成电路研发有限公司, 浙江 绍兴

³杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年11月12日; 录用日期: 2025年12月25日; 发布日期: 2025年12月31日

摘 要

为解决高压输电线压接结构内部钢管检测中X射线法设备笨重、存在辐射的难题, 本文提出一种基于磁导率锁定放大的无损检测方法。设计了由硅钢铁芯和激励-检测线圈构成的专用磁导率探头, 用于提取内部钢管的磁特性变化; 开发了以正交锁定放大为核心的微弱信号处理电路, 通过开关解调和低通滤波从强噪声背景中提取信号的正交分量, 进而计算幅值与相位。以LGJ-400/35型输电线压接结构为对象的实验表明: 该系统噪声低于50 mVpp, 能清晰识别钢管位置, 定位精度优于10 mm; 所研制的便携系统总重仅2.9 kg, 较传统X射线设备(通常13~40 kg)大幅减轻。本研究为高压输电线压接质量检测提供了一种轻量化、高精度的有效解决方案, 有助于推动线路巡检自动化发展。

关键词

高压输电线, 锁定放大, 磁导率, 压接结构, 无损探伤

Internal Steel Pipe Detection in High-Voltage Transmission Line Compression Joints Based on Permeability Locked-In Amplification

Chaoyu Feng¹, Hao Wang¹, Hai Li^{2,3*}, Fan Ye³, Maoyun Yuan³, Chenxi Wang³

¹Ultra High Voltage Company of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaoxing Hangdian Integrated Circuit Research and Development Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang

³School of Electronics and Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang

Received: November 12, 2025; accepted: December 25, 2025; published: December 31, 2025

*通讯作者。

文章引用: 冯超宇, 王昊, 李海, 叶帆, 袁茂雲, 王晨希. 基于磁导率锁定放大的高压输电线压接结构内部钢管探测[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(1): 93-100. DOI: 10.12677/jsta.2026.141009

Abstract

To address the challenges of heavy equipment and radiation exposure associated with X-ray inspection of internal steel pipes in high-voltage transmission line compression joints, this paper proposes a non-destructive testing method based on permeability locked-in amplification. A specialized permeability probe, consisting of a silicon steel core with excitation and detection coils, was designed to extract magnetic characteristic variations from the internal steel pipe. A weak signal processing circuit, centered on orthogonal lock-in amplification, was developed to extract the quadrature components of the signal from a high-noise background through switching demodulation and low-pass filtering, enabling the calculation of signal amplitude and phase. Experiments conducted on LGJ-400/35 transmission line compression joints demonstrated that the system exhibits noise below 50 mVpp, enables clear identification of the steel pipe location with a positioning accuracy better than 10 mm, and the developed portable system weighs only 2.9 kg, significantly less than traditional X-ray equipment (typically 13~40 kg). This research provides an effective, lightweight, and high-precision solution for quality inspection of high-voltage transmission line compression joints, facilitating the advancement of automated line inspection.

Keywords

High-Voltage Transmission Line, Locked-In Amplification, Permeability, Compression Joint, Non-Destructive Testing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国高压输电网络的快速发展,高压输电线掉线事故时有发生,严重影响电力安全和稳定供应。高压输电线掉线的主要原因是电缆接头故障。钢芯铝绞线(Aluminum Conductor Steel-Reinforced, ACSR)为高压输电线常用线型之一,通过钢管连接内部钢芯,确保了力学性能[1]-[3]。由于高压线路长期暴露于野外,承受温湿度变化、风荷载等多种因素作用,其压接接头易发生松动、脱落等故障。因此,对输电电缆接头内部负责钢芯连接的钢管压接结构进行定期质量检测对保障输电线正常工作有重要意义。然而,钢芯压接结构被包裹在压接铝管内部,无法通过视觉方式直接检测。

目前最常用的输电线路压接质量检测方法是 X 射线检测法[4]-[6],但 X 射线检测装置由射线机与成像板两部分组成,导致其难以小型化且不利于携带。当前,探伤工作仍需操作人员乘坐单线飞车进入档距,人工操作设备。此外, X 射线探伤仪的辐射危害及巨大的体力消耗,给作业带来了显著的安全风险和不确定性,易导致人身事故发生,登塔作业人员也产生抵触。因此,如何研发体积小、易操作的检测设备,成为需要解决的关键问题之一。

2010 年, Pinto 等开发了一款高压输电线路检测巡线机器人[7],能够在 500 KV 环境下利用漏磁方法检测钢芯断丝缺陷;2016 年,南京航空航天大学程衍伟针对 LGJ-400/35 型输电线,采用了漏磁检测方法,选择了磁导率较低的不锈钢作为钢压接套管材料,有效地对输电线接头处的钢芯拉伸缺陷损伤进行了检测[8];2023 年, Brahim 等采用磁通门传感器精确检测导体内钢芯及连接接头的损伤,实验结果验证了其对于钢芯断丝和腐蚀损伤的准确检测能力[9]。以上研究有效解决了 X 光检测存在的辐射安全和设备笨

重问题，但其检测精度仍有限，难以有效获取被高磁导率钢管包裹的内部钢芯的详细信息[10] [11]。

为此，本文提出了一种将磁导率探测与锁定放大电路结合的内部钢结构探测方法，利用不同材料、不同厚度、不同损伤程度的结构对于交流磁场的导通能力不同，分析高压输电线压接结构内部情况[12]。由于锁定放大技术能够有效抑制频带外的各类高、低频噪声，从而实现微弱信号的可靠提取，使得探测结果更加准确、可靠[13]。

2. 高压输电线压接结构模型

搭接式钢芯铝绞线压接结构如图 1(a)所示。其核心由两部分构成：其一，内部钢管通过压接方式连接两根导线的钢芯，负责承受机械拉力；其二，外部铝管压接导线外围的铝绞线，主要承担导电功能[14] [15]。

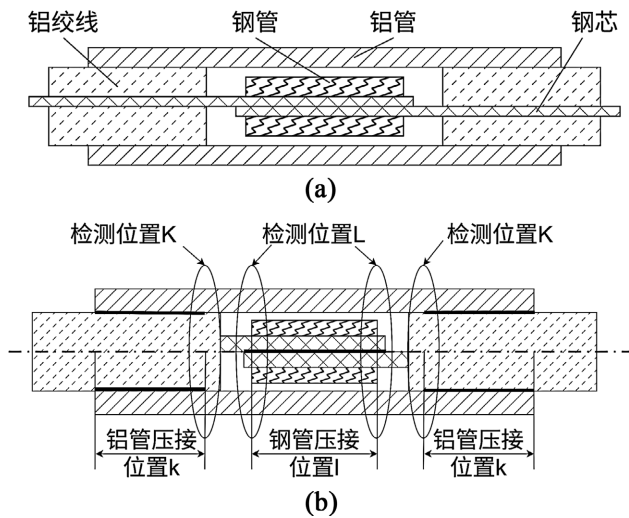


Figure 1. Compression joint form and location of lap-spliced ACSR cable
图 1. 搭接式钢芯铝绞线压接结构形式及压接位置

如图 1(b)所示，铝管的压接位置为 K 与 L，而内部钢管的压接位置为 k 与 l。本研究聚焦于对内部钢管位置 L 的探测。然而，外部铝管因其尺寸(直径与厚度均较大)及其与钢管之间存在间隙，会对电磁信号产生严重的屏蔽与衰减效应。因此，要探测钢管内部的细微状态，关键在于实现对穿透铝管后极度微弱信号的高信噪比采集与放大[16] [17]。

3. 磁导率探头设计

为提高对高压输电线压接结构内部钢管的检测能力，本研究设计了如图 2(a)所示的磁导率探头[15]。探头主要由 C 型硅钢铁芯、激励线圈与检测线圈构成。激励线圈绕制于铁芯的中央，通入交变电流以产生激励磁场；检测线圈则绕制于铁芯一侧的极靴上，用于感应被测构件中的磁场变化。激励线圈采用 200 匝、直径 0.2 mm 的漆包线；检测线圈采用 2000 匝、直径 0.07 mm 的漆包线，以提升感应电压幅度。

探头铁芯采用 DW360_50 型号硅钢片，该材料具有高饱和磁通密度(约 1.74 T)和低铁损特性，能满足激励与信号检测的需求。如图 2(b)所示，该探头的 C 型结构，能够便捷地安装于高压输电线压接结构外部。这种结构使得铁芯极靴能够紧密贴合铝管表面，形成闭合磁路，从而保证了激励磁场与检测信号与被测钢管之间的高效耦合，能有效提取其磁性能变化。此外，探头铁芯的转角处均采用圆角设计，以抑制锐角部位的磁场集中效应，确保磁场分布的均匀性。

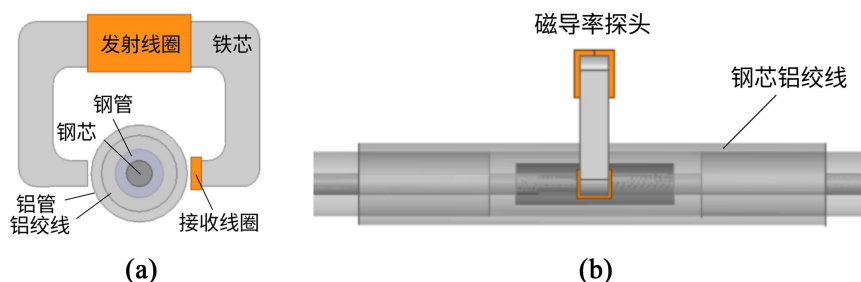


Figure 2. Schematic diagram of the permeability probe and its installation: (a) Cross-sectional view; (b) Side view
图 2. 磁导率探头及其安装情况示意图: (a) 截面图; (b) 侧视图

4. 基于锁定放大的微弱信号处理电路

鉴于待测信号极其微弱，且现场存在强烈的工频噪声干扰，本研究采用了正交锁定放大技术，其系统原理框图如图 3 所示。系统以型号为 nRF52810 的蓝牙 SOC 作为主控制器，通过 SPI 接口控制两片型号为 AD9850 的直接数字频率合成器(DDS)，以产生频率为 10 Hz、幅度为 1 V_{pp} 的四路正弦参考信号，其相位分别为 0°、90°、180°和 270°。这四路正弦信号随后经由电压比较器转换为同相位的方波信号。

其中，0°相位的正弦波作为功率放大器的输入，经放大后驱动探头的激励线圈，产生交变激励磁场。

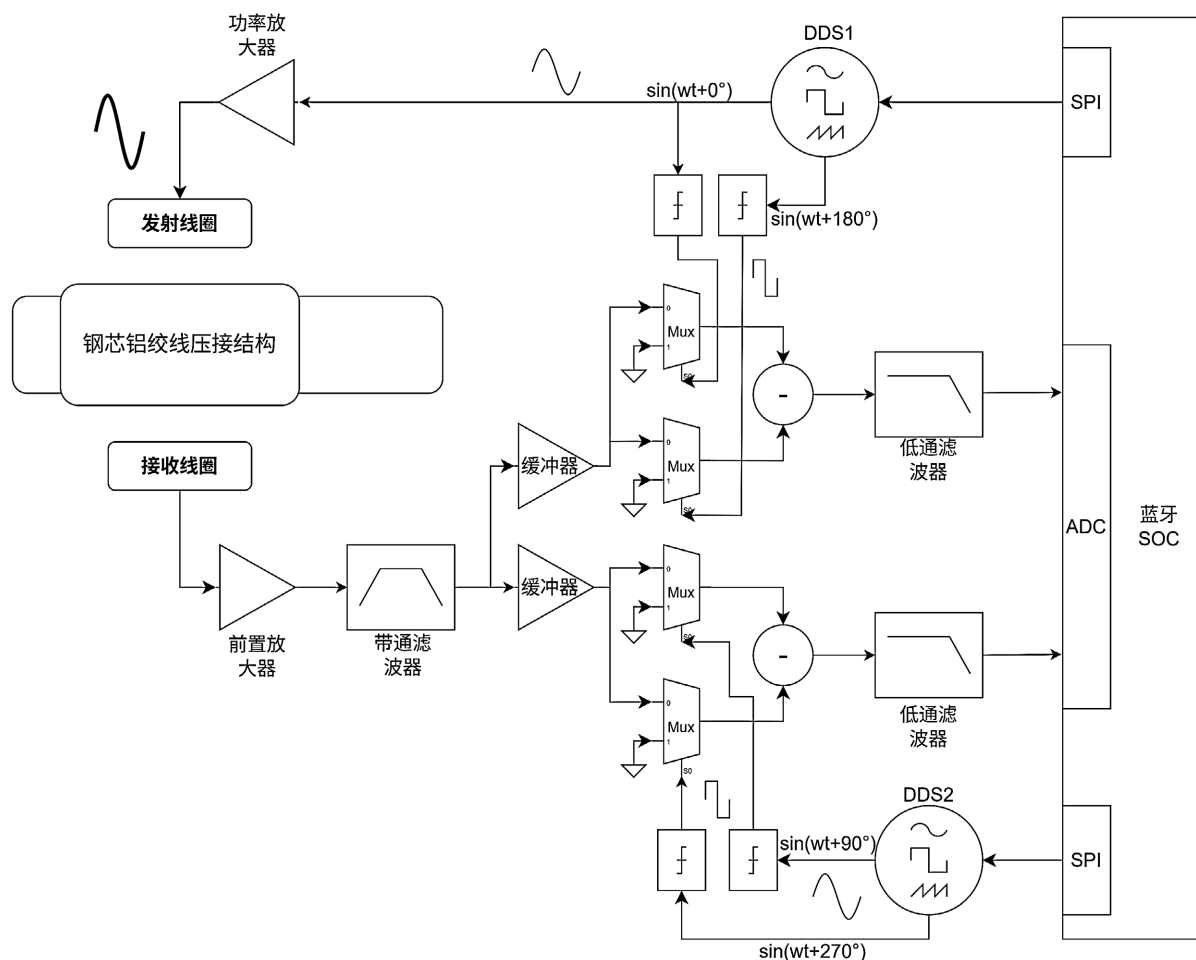


Figure 3. Block diagram of the steel core compression detection circuit for ACSR based on lock-in amplification structure
图 3. 基于锁定放大结构的钢芯铝绞线钢芯压接情况探测电路原理框图

接收线圈感应的电压信号首先由前置放大器放大 100 倍,再经带通滤波器抑制带外噪声(下限截止频率 1.2 Hz, 上限截止频率 17 Hz), 最后通过两个缓冲器被分为两路完全相同的信号, 用于后续的正交解调。每一路信号同时送入两个模拟开关, 分别与 0° 与 180° 以及 90° 与 270° 的方波参考信号进行相干解调。每路解调后的两个信号经过减法器合并为一路解调后信号, 随后由二阶有源低通滤波器滤除高频载波及其谐波(滤波器截止频率为 2 Hz), 最终得到两路低频电压信号。由于解调参考信号的相位正交, 这两路输出即为信号的同相分量(X)和正交分量(Y)。基于 X 和 Y 分量, 即可计算出被测信号的幅度($R = \sqrt{X^2 + Y^2}$)和相位($\theta = \arctan(Y/X)$)。

最终, 蓝牙 SOC 内置的两路 ADC 分别对 X 和 Y 信号进行采样, 并通过蓝牙将数据无线传输至上位机(平板电脑), 完成整个数据采集与传输过程。

5. 实验测试结果

为验证所提方法的有效性, 本研究以国网陕西省电力有限公司超高压公司提供的 LGJ-400/35 型高压输电线压接结构为对象开展实验。实验采用的 LGJ-400/35 型标准搭接式压接结构实物如图 4 所示, 其主要结构尺寸如下:

铝接续管: 外径 45 mm; 压接区长度(左右各) 215 mm; 非压接区长度 155 mm。

钢接续管: 外径 22 mm; 长度 100 mm。

图中定义了关键检测点: a、d 为铝管端点, b、c 为铝管压接边界, e、f 为内部钢管端点。

基于前述设计, 制作了磁导率探头(图 5(a))与锁定放大信号处理电路板(图 5(b))。在此基础上, 搭建

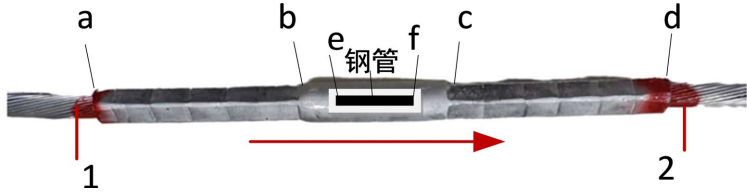


Figure 4. Physical image of a lap-spliced compression joint for high-voltage transmission lines
图 4. 高压输电线搭接式压接结构实物图

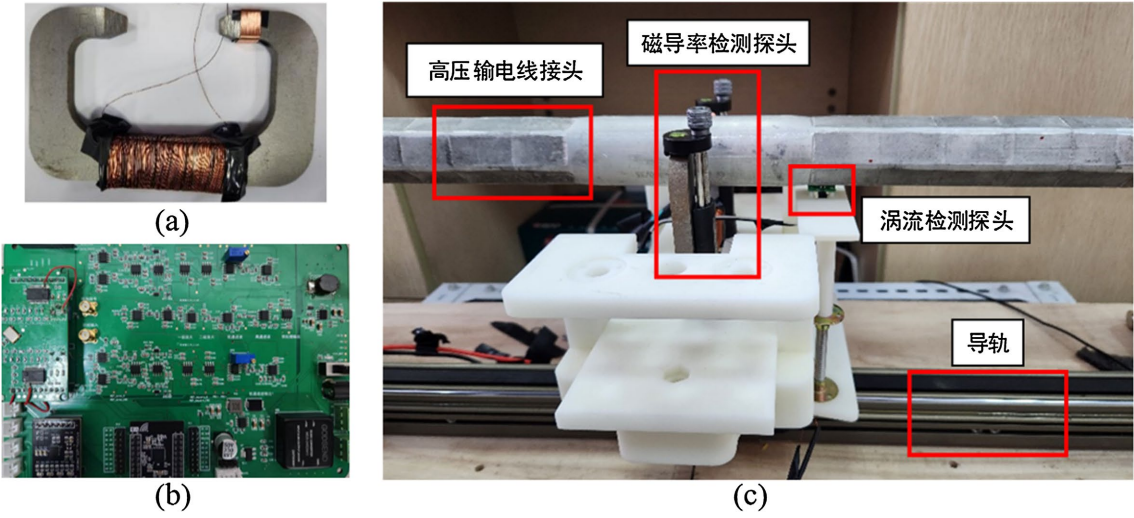


Figure 5. Physical images of the system test experimental platform: (a) Permeability detection probe; (b) Acquisition circuit; (c) Experimental platform
图 5. 系统测试实验平台实物图: (a) 磁导率检测探头; (b) 采集电路; (c) 实验平台

了自动化扫描检测实验平台(图 5(c)), 其主要由待测压接结构、磁导率探头、主控电路板、匀速导轨及步进电机驱动系统构成。另设一涡流检测探头用于同步定位铝管压痕位置, 以辅助数据分析。磁导率探头安装于导轨上, 其励磁极靴位于输电线径向两侧, 以确保磁场高效耦合。扫描时, 步进电机驱动滑台带动探头沿压接结构以 10 mm/s 的速度匀速移动, 实现全覆盖检测。

在激励线圈施加 8 Vpp、10 Hz 交流信号的条件下, 检测线圈的响应信号经锁定放大电路处理后, 得到同相分量(X)与正交分量(Y)。压接管中心 ± 250 mm 范围内的 X 、 Y 分量输出分别如图 6(a)、图 6(b)所示。在无钢管影响的远端区域, 输出信号波动幅度(峰峰值)小于 50 mV, 该残余噪声主要源于导轨电机运行引入的机械振动。结果表明, 锁定放大电路有效抑制了工频及其他背景噪声, 为后续分析提供了高质量的信号基础。

根据 X 与 Y 分量计算得到的信号幅值与相位谱, 分别绘制于图 7(a)与图 7(b)。可见, 在对应内部钢管(长度 100 mm)的区域, 信号幅值出现明显峰值, 这是因为钢管的高磁导率导致该处磁通集中, 从而使检测线圈的感应信号增强。采用基于梯度变化率的阈值判定法, 将平滑滤波后的幅值谱梯度变化最大的

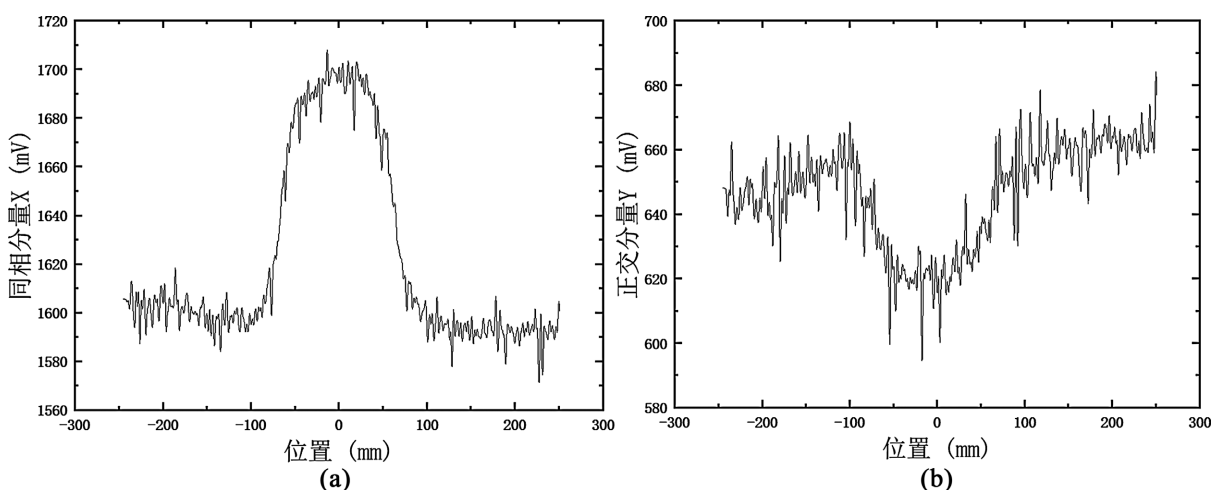


Figure 6. Dual-channel quadrature output results from the signal processing circuit: (a) In-phase output; (b) Quadrature output
图 6. 信号处理电路两路正交输出结果: (a) 同相输出; (b) 正交输出

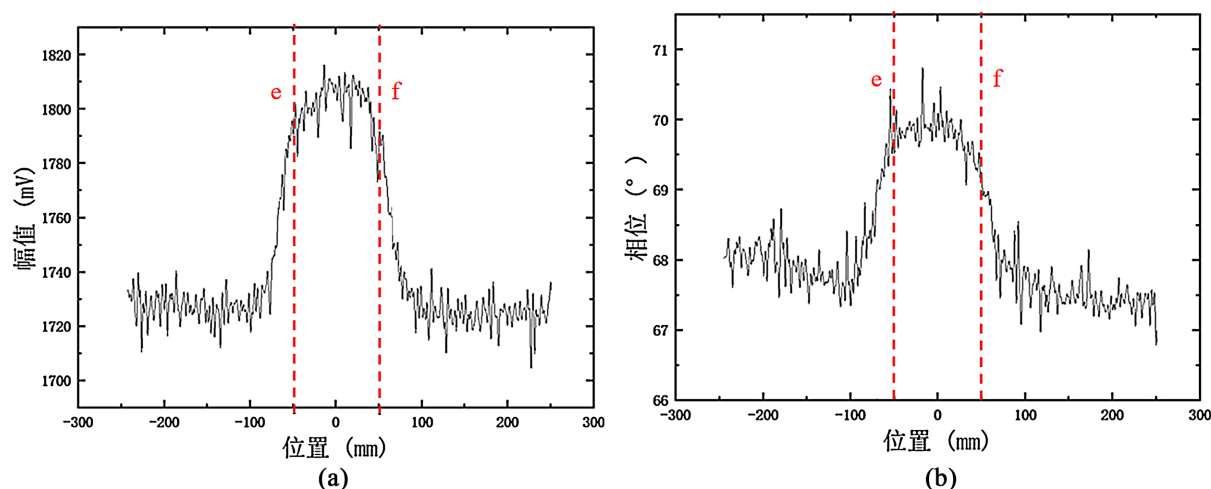


Figure 7. Scanning data diagram from permeability detection on an ACSR compression joint: (a) Amplitude; (b) Phase
图 7. 钢芯铝绞线压接结构磁导率检测扫描数据图: (a) 幅值; (b) 相位

点所对应的位置, 定义为钢管端点 e 和 f (参见图 4)。经多次测量统计, 钢管端点定位误差小于 10 mm。该误差主要来源于磁导率探头的物理厚度(空间分辨率限制)以及钢管端部压接处钢芯形态的不规则性对磁场的扰动。通过图 7(b)中的相位信号曲线, 可以看到在对应内部钢管的区域, 信号相位从约 68°跳变为约 70°, 这是由于铁磁材料钢管的存在提升了感性耦合程度, 相位和幅度信号两相印证, 使测试结果可靠性进一步提升。

为评估工程应用潜力, 本研究进一步考虑了基于该方法的便携式系统实现, 系统由 12 V、3000 mAh 锂电池(0.2 kg)供电, 采用编码器(0.5 kg)代替导轨获取位置信息, 采用树脂材料制作支撑结构(1.5 kg)。再算上电路系统(0.3 kg)、磁导率探头(0.4 kg), 便携式系统总重 2.9 kg。作为对比, 传统 X 射线检测设备(含射线机与成像板)重量通常在 13 kg 至 40 kg 之间, 为本系统的 4.5 至 13.8 倍。若计入防护服等附加装备, 其总重优势将更为显著。这充分证明了本系统在便携性方面的巨大提升。

6. 结论

为替代现有笨重且有辐射的 X 光检测方法, 本文提出并实现了一种基于磁导率锁定放大技术的高压输电线压接结构内部钢管无损探测方法。本研究完成了磁导率探头、以正交锁定放大为核心的信号处理电路的设计与实现, 并搭建了完整的自动化实验平台。基于 LGJ-400/35 型高压输电线搭接式压接接头的实验结果表明, 该方法能够成功定位内部钢管, 其端点定位精度优于 10 mm。据此研制的便携式原型系统总重低于 2.9 kg, 相较于传统 X 光设备(通常 13~40 kg)实现了数量级上的减重, 极大地提升了现场操作的便捷性与安全性。从测试数据上看, 当前数据受机械振动的影响较大, 后续研究应进一步优化探头与被测输电线的安装结构, 抑制探头在输电线直径方向上的运动。

致 谢

作者衷心感谢国网陕西省电力有限公司科技项目对本研究工作提供的资助与支持。

基金项目

国网陕西省电力有限公司科技项目(项目编号: 5226JX240001)。

参考文献

- [1] 戴雨志, 牛雨欣, 张亢. 输电线路断线原因分析及防范措施[J]. 机械与电子控制工程, 2023, 5(9): 101-103.
- [2] Zeng, Z., Lv, J., Qu, S. and Shao, H. (2023) Simulation Analysis of Crimping Process of Strain Clamp-ACSR System. 2023 3rd International Conference on Intelligent Power and Systems (ICIPS), Shenzhen, 20-22 October 2023, 245-249. <https://doi.org/10.1109/icips59254.2023.10404168>
- [3] 惠宝军, 傅明利, 刘通, 等. 110 kV 及以上电力电缆系统故障统计分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(12): 44-50+67.
- [4] 杨梅芳. 基于磁导率检测技术的铁磁试件检测试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [5] Levin, A.A., Narykova, M.V., Lihachev, A.I., Kardashev, B.K., Kadomtsev, A.G., Prasolov, N.D., *et al.* (2022) Comparison of Structural, Microstructural, Elastic, and Microplastic Properties of the AAAC (A50) and ACSR (AC50/8) Cables after Various Operation Periods in Power Transmission Lines. *Crystals*, **12**, Article 1267. <https://doi.org/10.3390/cryst12091267>
- [6] Gao, Y., Song, G., Li, S., Zhen, F., Chen, D. and Song, A. (2020) LineSpyX: A Power Line Inspection Robot Based on Digital Radiography. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **5**, 4759-4765. <https://doi.org/10.1109/lra.2020.3003772>
- [7] Pinto, A.V., Sebrao, M.Z., Lourenco, C.R.S., *et al.* (2010) Remote Detection of Internal Corrosion in Conductor Cables of Power Transmission Lines. 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal, 5-7 October 2010, 1-6. <https://doi.org/10.1109/carpi.2010.5624453>
- [8] 程衍伟. 基于 ARM 的输电线电磁无损检测系统开发[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [9] Brahim, Y.I., Bellemare, J., Rousseau, G., *et al.* (2023) Ultrasensitive Lightweight Magnetic Probe for Non-Destructive

Inspection of High-Voltage Overhead Lines. *NDT & E International*, **134**, Article ID: 102781.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102781>

- [10] 彭放, 刘甜甜, 苏江文, 等. 基于 X 射线无损探伤的输电线路耐张线夹缺陷检测[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(4): 264-270.
- [11] 王浩洋, 余快, 龚景阳, 等. 输电线路耐张导线金具压接质量检测方法现状与展望[J]. 电气技术, 2023, 24(4): 1-8.
- [12] 邱公喆, 康宜华, 程偲, 等. 连续油管分层缺陷磁导率扰动电磁检测方法 with 检测系统[J]. 焊管, 2023, 46(5): 36-43.
- [13] 朱艳生, 高勇, 吕乙松, 等. 微弱信号检测的锁相放大电路仿真[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2023, 35(1): 20-25.
- [14] 邓明亮. 架空输电线路耐张管压接缺陷分析与质量检查[J]. 湖南电力, 2018, 38(3): 34-37.
- [15] 陈家慧, 王方强, 兰贵天, 等. 耐张线夹防滑槽漏压的失效分析与机理研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(12): 146-150+155.
- [16] Ou, Z., Shu, Z., He, T., Xu, C., Cen, J. and Han, Z. (2024) A Weak Bias-Magnetized Dynamic Permeability Testing Method for Detecting and Distinguishing Inner and Outer Diameter Defects in Gas Pipelines. *NDT & E International*, **151**, Article ID: 103284. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103284>
- [17] Zhang, Y., Hu, D., Chen, J. and Yin, L. (2023) Research on Non-Destructive Testing of Stress in Ferromagnetic Components Based on Metal Magnetic Memory and the Barkhausen Effect. *NDT & E International*, **138**, Article ID: 102881. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102881>