

基于低功耗涡流仪的锆管检测系统

刘伟达¹, 周昊, 葛玖浩²

(南京航空航天大学, 南京 211106)

摘要: 本文基于电磁感应原理设计了一套低功耗涡流仪的锆管检测系统。利用解析法建立了锆管多层结构涡流测厚解析模型, 并且验证运用该模型进行探头优化。测试结果表明, 该系统功耗为 2.5W 满足低功耗要求, 同时探头性能提升超过 50%并能精确测量锆管氧化层厚度, 保证核电站安全。

关键词: 低功耗涡流仪; 锆管; 解析法; 探头优化; 氧化层厚度

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.401

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

核反应堆是目前最常用的核能发电设施, 其中锆管是核燃料元件的重要组成部分。在核反应堆的长期运行过程中, 随着时间的推移, 锆管外部的氧化层会不断增厚, 但过厚的氧化层会导致管壁脆化, 进而增加管材开裂的风险, 对核电站的安全运行带来潜在的威胁。近年来, 随着涡流检测技术的不断发展, 及其自身的非接触式, 精确度高, 可靠性好等优势, 被广泛应用于金属表面缺陷及氧化层厚度测量, 因此应用涡流探头能够满足锆管检测系统的需要。

1.2 应用价值

减少能耗并长时间精确测量锆管氧化层厚度, 保证核电站安全运行。

2 创新点与优势

①满足锆管安全监测系统对低功耗涡流仪的需求, 并实现了设备的小型化。

②开发了一个人机交互界面, 用于控制激励信号的参数、数据采集和处理、缺陷图像的生成等功能。

③推导出锆管多层结构涡流测厚解析模型, 并应用此模型分析线圈不同参数对检测信号的影响, 进而对涡流探头的尺寸进行优化, 提高了涡流探头对氧化层厚度的检测灵敏度。

¹第一作者信息: 刘伟达, 男, 研究生, 电磁无损检测技术, liuweida@nuaa.edu.cn

²通讯作者信息: 葛玖浩, 男, 讲师, 电磁无损检测技术, gejiuhao@nuaa.edu.cn

3 实现方案简介

3.1 设计原理

涡流检测技术是一种应用电磁感应原理的检测方法。当线圈通过交变电信号时，由电磁感应原理可得，变化的电场会产生变化的磁场，因此当检测线圈靠近被测导体时，导体内会感应出涡流，而涡流的存在会产生与原磁场方向相反的磁场，抵消部分原磁场，改变检测线圈的电阻和电感致使阻抗发生变化。此时检测线圈的阻抗变化就可得到导体的厚度等几何尺寸以及电导率等电磁参数。

3.2 设计方法

在设计涡流监测系统时，为了确保每个模块的功能和性能能够独立地满足需求，本系统采用模块化设计，将系统划分为单独的模块并独立进行测试和优化。逐步设计和验证单独模块，以此确保每个模块的独立工作和互相协调。

首先结合国内外便携式涡流仪器功能参数与国标手册要求，分析涡流检测仪器性能指标，确定硬件电路的设计要求。其次，根据便携式仪器低功耗设计需求，设计以单片机（MSP430）为核心的控制电路；以 DDS 为核心的激励信号产生电路；以正交锁相为原理的检波电路。

对于探头优化设计部分，运用解析法建立铝管多层结构涡流解析模型，并对比有限元方法所建立结果验证铝管多层结构模型的正确性，应用此模型分析线圈内径和外径等不同几何参数对涡流探头的铝管氧化层厚度检测灵敏度的影响，优化检测线圈几何尺寸，制作涡流探头并进行实验验证。

最终，将这三部分与另外设计完成的探头、放大模块组合成为完整的涡流检测仪器。此外，还设计了一款人机交互界面用于实时监测，呈现波形进而分析数据。

3.3 实验验证过程

通过搭建硬件实验平台，对硬件系统的各个模块进行了分别测试：对控制电路和激励信号产生电路进行激励生成测试、对放大模块进行放大功能测试、对检波电路进行检波功能测试、对探头部分针对铝管尺寸和多层结构进行研究并优化探头性能。组合完成后，使用完整仪器对深度为 5mm、3mm 和 1mm 的裂纹进行了裂纹缺陷检测和对氧化层厚度为 1mm, 3mm, 6mm 的铝管进行了厚度检测，检测精度达到了预期的水平，功耗为 2.5W 在低功耗的要求范围之内。