

# 风机塔筒焊缝缺陷检测机器人

王钰珏<sup>1</sup>, 李昌浩<sup>2</sup>, 许钟奇<sup>2</sup>, 刘秀成<sup>1</sup>, 吴斌<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学信息学部 北京 100124;

2. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124)

Email: wangyujue@bjut.edu.cn

**摘要:** 焊缝是风机塔筒的力学性能薄弱区域, 在复杂载荷和大气腐蚀等多因素作用下, 易形成焊缝区域腐蚀和裂纹等缺陷, 严重威胁塔筒结构健康状态, 是在役风机塔筒运行中的重大安全隐患。本文发展了适用于工程现场、能够检出复杂几何形貌焊缝中多类型缺陷的检测方法和技术, 为风机塔筒焊缝缺陷无损、快速检测提供了科学手段, 并研发了专用检测机器人, 为工程应用提供了技术支撑。

**关键词:** 风机塔筒焊缝; 漏磁检测; 检测机器人。

## 1、研究背景

风能是一种可再生的清洁能源, 我国风能资源储量丰富, 风能资源开发利用潜力巨大, 截至2023年6月底, 我国风电装机容量位居全球第一。风机塔筒是风力发电机组的重要组成部分, 对保证风力发电机组的正常运行起着至关重要的作用。风机塔筒主要通过卷板焊接成筒, 再由多筒分段焊接而成, 塔筒焊缝是塔筒的力学性能薄弱区域, 在复杂载荷和大气腐蚀等多因素作用下, 易形成焊缝区域腐蚀和裂纹等缺陷, 严重威胁塔筒结构健康状态, 是在役风机塔筒运行中重大的安全隐患。

风力发电机塔筒直径一般在4~6米, 高度可达百米以上, 如何对风机塔筒焊缝区域缺陷检测一直是塔筒运行维护中的工程技术难题之一。表面采用富锌环氧底漆等进行防锈处理, 基于视觉的检测方法难以应用。超声法虽然具有良好的定量能力, 但需要使用耦合剂。涡流法由于其穿透深度有限, 只能有效地检测表面缺陷, 并且需要复杂的激励和解调电路。磁性检测方法由于其方便、高效、受涂层干扰最小和低功耗而被证明特别适合于检测风机塔筒焊缝缺陷。

## 2、研究内容

### (1) 漏磁与磁扰动复合检测仪器

根据漏磁与磁扰动原理设计了漏磁与磁扰动一体化传感器(见图1)。传感器包括轭铁、永磁体、极靴、柔性印刷电路、支路磁轭和传感器封装壳。为满足空间扫查分辨率2.0mm的需求, 磁敏元件采用错位排布的方式排列。为满足漏磁和磁扰动信号的采集需求, 定制化研制了多通道采集电

路及相应调理电路。AD7606 将从传感器采集到的模拟信号转换为数字信号，STM32 通过 FMC 接口读取四片 AD7606 转换完的数据，再通过高速 USB 接口将转换完的数据传输给上位机，在上位机进行数据显示的实时显示和记录。

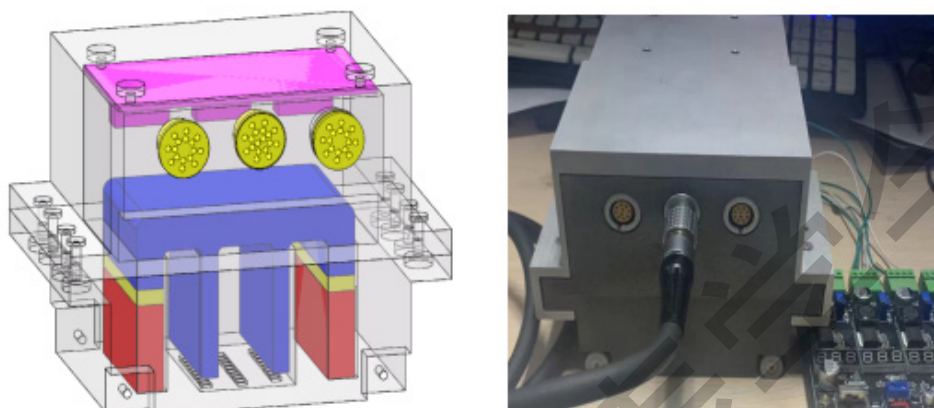


图 1 漏磁与磁扰动一体化传感器

## (2) 风机塔筒攀爬机器人

风电塔筒爬壁检测机器人(见图2)由机器人底盘、激光跟踪、检测上装和电控系统四部分组成，激光跟踪安装于机器人底盘的头部，检测上装安装于机器人底盘的腹部，电控系统分为两块分别安装于机器人底盘的颈部和尾部。



图 2 风机塔筒焊缝缺陷检测机器人

检测机器人采用永磁吸附、三轮布置的形式：两组主动轮差速驱动，一组全向轮从动支撑，通过差速实现机器人的转向。同时两主动轮与机架通过铰接的形式连接固定，使机器人对曲面具有很好的适应性，能够适应直径 2 米以上的塔筒，满足现场的检测需要。

激光轮廓仪通过发射可视激光，通过镜头检测出凸起位置与设置位置作对比，进一步分析焊缝偏离激光的位置，作为线性数据输出，从而在机器人系统中起到检测装置。机器人具有手动跟

踪焊缝和自动跟踪焊缝模式，在自动模式下，机器人开启焊缝自动跟踪系统，在使用该系统时能够实现机器人自动跟踪焊缝进行检测。

### 3、结论

焊缝是风机塔筒的力学性能薄弱区域，在复杂载荷和大气腐蚀等多因素作用下，易形成焊缝区域腐蚀和裂纹等缺陷，严重威胁塔筒结构健康状态，是在役风机塔筒运行中的重大安全隐患。本文发展了适用于工程现场、能够检出复杂几何形貌焊缝中多类型缺陷的检测方法和技术，为风机塔筒焊缝缺陷无损、快速检测提供了科学手段，并研发了专用检测机器人，为工程应用提供了技术支撑。为实现攀爬检测机器人的小型化，创新性地提出了轻巧型的磁扰动与高灵敏度漏磁检测一体化传感器。为提高仪器对缺陷的检测能力，开发了具有低噪声的检测电路以及信号的硬件调理电路。面向阵列式磁敏元件，开发了多通道磁信号检测及采集电路。设计了基于磁轮的塔筒攀爬机器人运动结构，开发了电机驱动控制模块及算法，开发了机器人专用供电模块和无线传输与控制模块。集成多通道磁检测仪器、光学摄像头、编码测距等传感器，开发了塔筒焊缝缺陷检测专用机器人，研究了塔筒焊缝的自动定位和跟踪扫查方法，测试了机器人的无线控制、攀爬运动特性等指标。

#### 参考文献

- [1] Shen Y., Wang Y., Wu B., et al. A Novel Sensor Based on the Composite Mechanism of Magnetic Flux Leakage and Magnetic Field Disturbance for Comprehensive Inspection of Defects with Varying Angles and Widths[J]. NDT & E International, 2024, 145:103131.
- [2] Wu B, Wang YJ, Liu XC, et al. A novel TMR-based MFL sensor for steel wire rope inspection using the orthogonal test method[J]. Smart Mater Struct 2015, 24(7):075007.
- [3] Sun YH, Kang YH, Qiu C, et al. A new NDT method based on permanent magnetic field perturbation[J]. NDT & E International, 2011, 44(1):1-7.