

矿热炉电极端部位置的差动式磁场阵列检测系统

侯晓奎^{1,2}, 刘卫玲^{1,2*}, 杨杰雯^{2,3}, 张冉^{2,3}, 常晓明²

¹太原理工大学人工智能学院, 山西 晋中

²太原理工大学晓明研究室, 山西 太原

³太原理工大学电子信息工程学院, 山西 晋中

收稿日期: 2024年10月14日; 录用日期: 2024年12月31日; 发布日期: 2025年2月28日

摘要

针对矿热炉电极端部位置检测精度低及开发过程中的复杂性问题, 本文介绍了一种新型差动式磁场阵列检测系统。该系统通过布置磁场传感阵列, 利用差动信号处理技术, 有效消除了环境干扰和系统噪声, 提高了电极端部位置检测的精度和可靠性。研究首先构建了矿热炉磁场检测模型, 并基于毕奥-萨伐尔定律, 分析了矿热炉的炉外磁场分布。仿真验证了差动式磁场阵列检测方法的有效性。测试结果表明, 该系统能够在恶劣的工业环境中准确检测电极端部位置, 为矿热炉的高效运行提供了有力支持。本研究为矿热炉的工业参数检测和控制提供了新的思路和技术支持。

关键词

矿热炉, 电极端部位置, 差动式, 磁场, 阵列

Differential Magnetic Field Array Detection System for the Electrode Tip Position in Submerged Arc Furnaces

Xiaokui Hou^{1,2}, Weiling Liu^{1,2*}, Jiewen Yang^{2,3}, Ran Zhang^{2,3}, Xiaoming Chang²

¹College of Artificial Intelligence, Taiyuan University of Technology, Jinzhong Shanxi

²Xiao Ming Research Laboratory, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

³College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong Shanxi

Received: Oct. 14th, 2024; accepted: Dec. 31st, 2024; published: Feb. 28th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 侯晓奎, 刘卫玲, 杨杰雯, 张冉, 常晓明. 矿热炉电极端部位置的差动式磁场阵列检测系统[J]. 嵌入式技术与智能系统, 2025, 2(1): 1-12. DOI: 10.12677/etis.2025.21001

Abstract

In response to the low detection accuracy of the electrode tip position and the complexity in the development process for submerged arc furnaces, this paper introduces a novel differential magnetic field array detection system. The system, by deploying a magnetic sensor array and utilizing differential signal processing technology, effectively eliminates environmental interference and system noise, enhancing the accuracy and reliability of electrode tip position detection. The study initially constructs a magnetic field detection model for the submerged arc furnace and analyzes the external magnetic field distribution based on the Biot-Savart law. The effectiveness of the differential magnetic field array detection method is validated by simulations. Test results indicate that the system can accurately detect the electrode tip position in harsh industrial environments, providing strong support for the efficient operation of submerged arc furnaces. This research offers new ideas and technical support for the detection and control of industrial parameters in submerged arc furnaces.

Keywords

Submerged Arc Furnace, Electrode Tip Position, Differential, Magnetic Field, Array

Copyright © 2025 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

矿热炉是冶金领域的关键设备，用于高温加工和反应过程。矿热炉的电极端部位置对于炉内热场分布、能量利用效率以及产品质量有着重要影响[1]。因此，精确检测和控制电极端部位置成为提高矿热炉运行性能的关键。

传统的电极端部位置检测方法[2]-[5]主要依赖于理论推导和间接测量。在恶劣的高温、高电磁环境下，传统方法的可靠性和稳定性受到了较大的挑战[6]-[9]。

为了克服上述不足，近年来，基于磁场检测技术的电极端部位置检测方法[10]-[12]逐渐受到关注。磁场检测技术利用电流通过电极时产生的磁场变化来推断电极位置，具有非接触、高精度和高响应速度等优点。然而，单点磁场传感器在实际应用中容易受到干扰，导致检测精度和稳定性下降[13]。

本研究构建了一种新型的差动磁场阵列检测方案。通过布置多个磁场传感器，利用差动信号处理技术来消除环境干扰和系统噪声，从而提高电极端部位置检测的精度和可靠性。该系统的核心在于利用磁场传感器阵列实时监测电极周围的磁场分布，通过差动信号处理精确计算电极端部位置。本研究旨在为矿热炉电极端部位置检测提供一种新型、高效的解决方案，有望突破传统检测方法的瓶颈，为矿热炉工业参数检测领域提供新的方法和技术支撑。

2. 电极端部位置检测基本理论依据

2.1. 矿热炉磁场检测模型的构建

当强电流通过电极流入炉体时，炉内的电路布局可视为星形和三角形两种不同的拓扑结构[14] [15]。选取三角形回路作为分析对象，根据电磁场的原理，本研究构建了一个简化模型来描述矿热炉的磁场环

境, 如图 1 所示。

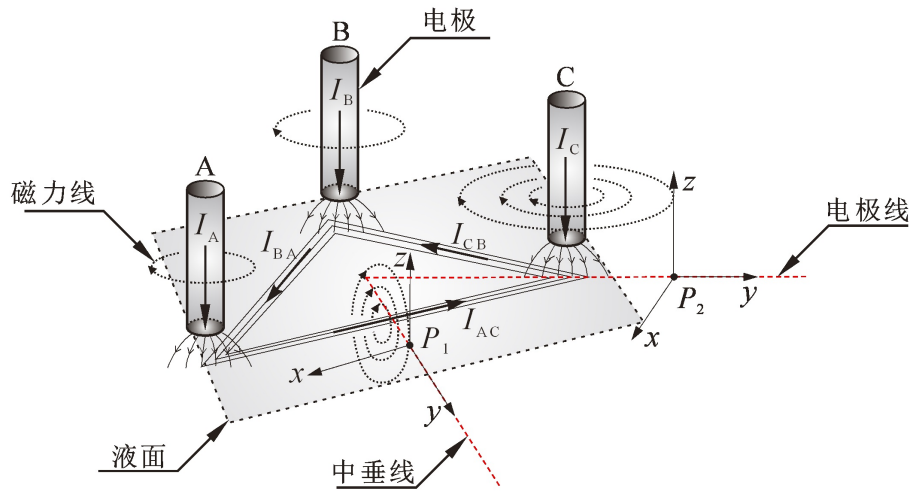


Figure 1. Magnetic field radiation model of SAF
图 1. 矿热炉磁场辐射模型

在图 1 中, I_A 、 I_B 、 I_C 分别表示通过电极的电流, 而 I_{AC} 、 I_{CB} 、 I_{BA} 分别表示熔池中的回路电流。磁场阵列检测系统被布置在炉体外的电极线上, 检测坐标的起始点 o 位于阵列传感器 S_1 下方 10 cm 处。炉外磁场检测方案如图 2 所示。

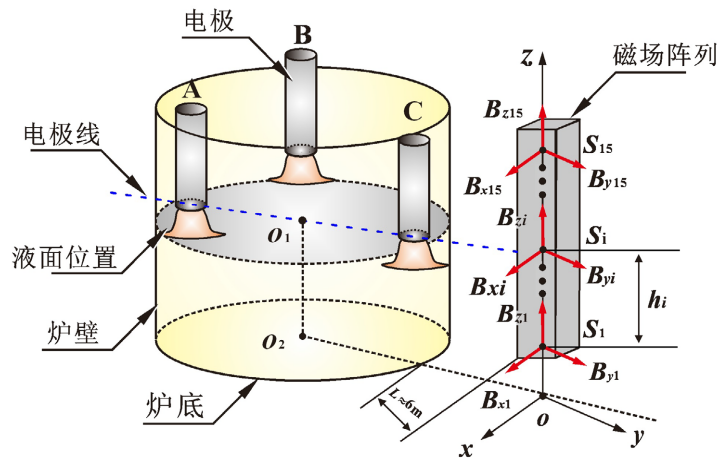


Figure 2. Schematic diagram of magnetic field monitoring outside the furnace
图 2. 炉外磁场监测方案示意图

图 2 中的坐标起始点 o 与同平面的炉体中心点 o_2 之间的连线与电极线平行。为有效地捕捉矿热炉在运行过程中的磁场变化, 阵列的检测范围需覆盖电极的端部位置。

2.2. 用于矿热炉磁场分析的电磁方程

将图 1 中的检测点 P_1 设定为坐标原点 O , 并在 z 轴上选择($S_1, S_2, \dots, S_m, \dots, S_i$)作为监测点。当仅考虑电流 I_{AC} 对磁场的贡献时, 则中垂线上的磁场分布特征如图 3 所示。

依据 Biot-Savart 定律[16], 中垂线上检测点的磁场强度如式(1)所示。

$$\begin{cases} B_{yi} = \frac{\mu_0 I_{AC} L}{2\pi} \frac{h_i}{(a^2 + h_i^2) \sqrt{L^2 + 4(a^2 + h_i^2)}} \\ B_{xi} = 0 \\ B_{zi} = \frac{\mu_0 I_{AC} L}{2\pi} \frac{a}{(a^2 + h_i^2) \sqrt{L^2 + 4(a^2 + h_i^2)}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, h_i : 检测点 S_i 与 P_1 点之间的距离[m],
 a : 从检测点 P_1 至电流 I_{AC} 路径的距离[m]
 μ_0 : 真空磁导率[H/m]

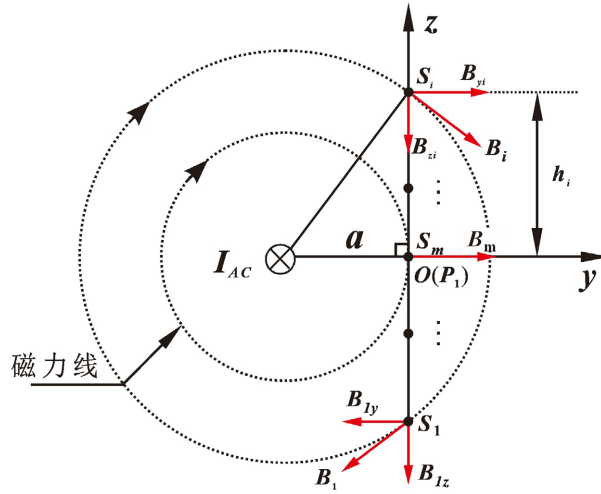
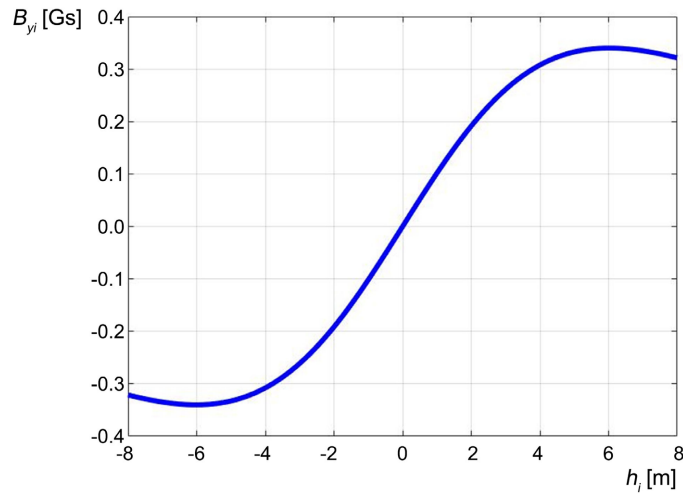


Figure 3. Magnetic field distribution characteristics along the median line
图 3. 中垂线上的磁场分布特征

根据现场情况, 取 $I_{AC} \approx 40$ kA [17], 从检测点 P_1 至电流 I_{AC} 路径的距离 $a \approx 8.5$ m。通过 MATLAB 实现仿真分析, 仿真结果如图 4 所示。



(a)

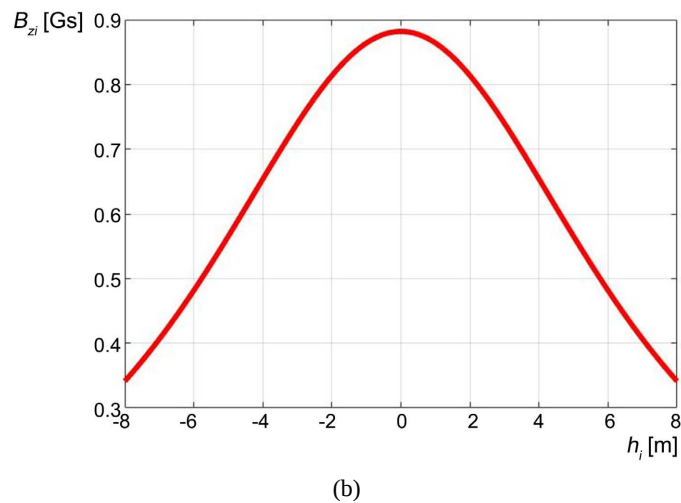


Figure 4. Analysis of simulation results, (a) h_i - B_{yi} curve; (b) h_i - B_{zi} curve
图 4. 仿真结果分析, (a) h_i - B_{yi} 曲线; (b) h_i - B_{zi} 曲线

从图 4 可观察到, 在 h_i 的取值范围为 $-10 \sim 10$ m 之间, 中垂线上某点的磁感应强度 B_{yi} 表现为奇函数特性, 而 B_{zi} 表现为偶函数特性。 h_i - B_{yi} 曲线的零点与 h_i - B_{zi} 曲线的峰值点均对应于矿热炉的电极端部位置。因此, 从该中垂线上的检测点进行观测, B_{yi} 与 B_{zi} 包含了电极端部位置等相关信息。

3. 基于 COMSOL 的仿真验证

3.1. 几何建模

电流通过电极进入炉内, 而电弧在电极顶端与熔池区之间产生[15]。因此, 炉外磁场主要由电极和电弧引起。构建的矿热炉几何模型如图 5 所示。

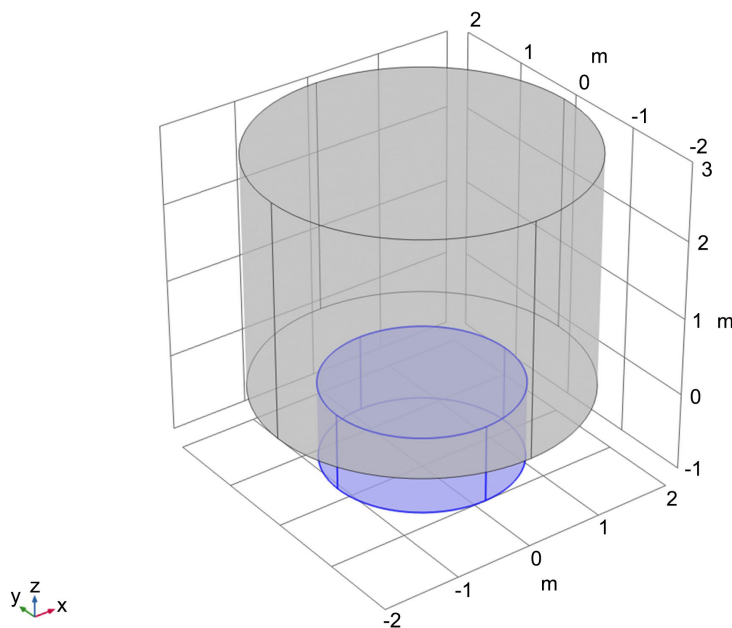


Figure 5. Geometric model of SAF
图 5. 构建的矿热炉几何模型

电极和电弧的几何结构参数取自工业实践中的矿热炉设备，如表 1 中所示。

Table 1. Geometric dimensions of electrodes and arcs
表 1. 电极和电弧的几何结构尺寸

NO.	参数	符号	值
1	电极半径	ri	2 m
2	电极电流	I0	10^5 A
3	电极长度	L	3 m
4	电弧半径	ra	1.2 m
5	电弧长度	La	1 m

3.2. 不同视角下的磁通密度模

对矿热炉中电极和电弧产生的磁场进行了二维轴对称分析，图 6 中展示了电极和电弧的二维轴对称分量中的磁通密度模分布。

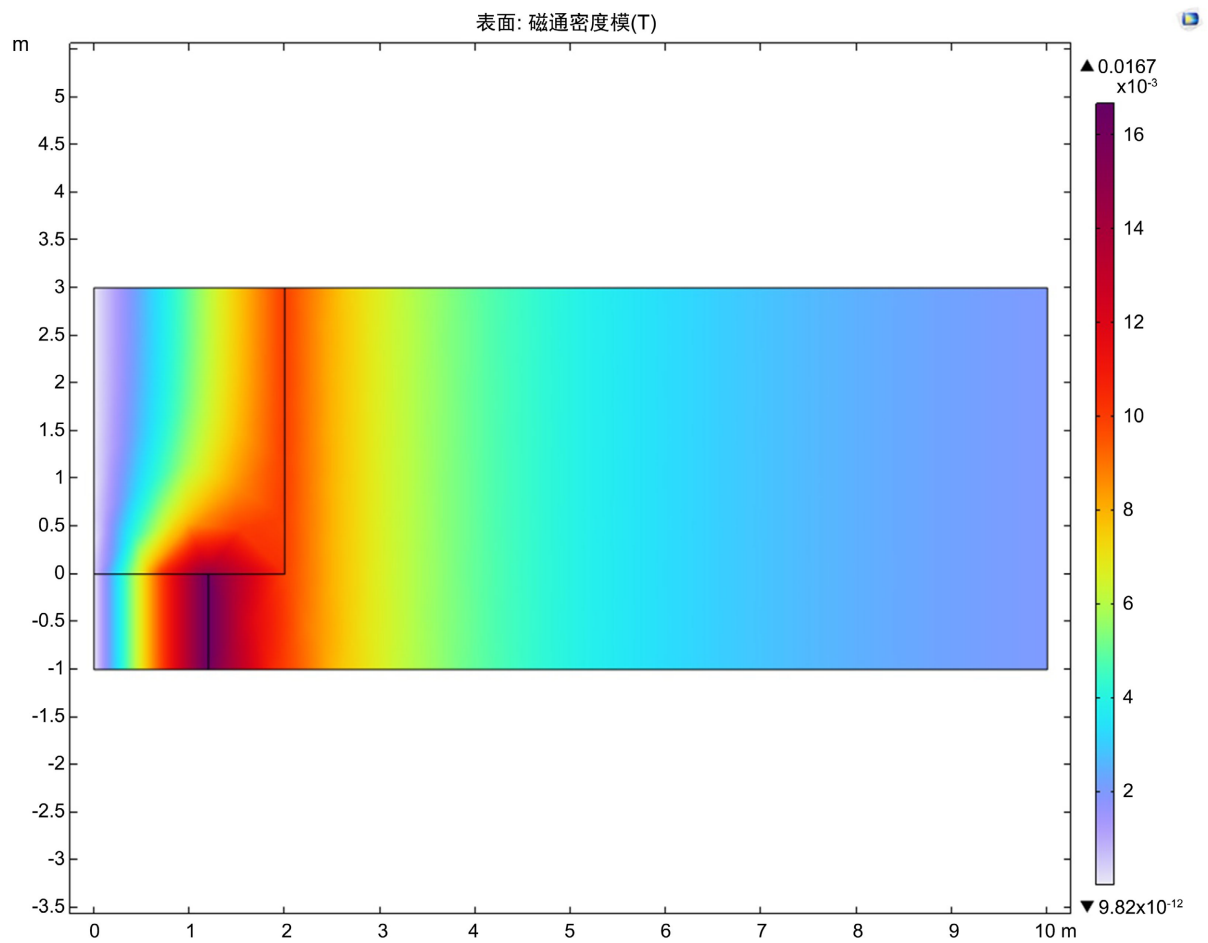


Figure 6. Magnetic flux density magnitude in two-dimensional axisymmetric components
图 6. 二维轴对称分量中的磁通密度模

图 6 中磁通密度模在二维轴对称分量中的分布呈现出明显的非均匀性。沿 x 轴或 y 轴, 磁通密度模仅取决于距导体的径向距离。沿 z 轴, 磁通密度模值从电极向电弧方向逐渐变化。在电极区域, 磁通密度模的值相对较低, 而在电弧区域则显著增加。磁通密度模的峰值出现在电极和电弧区域的边缘。

3.3. 磁通密度模随径向坐标的变化

对矿热炉中磁通密度模随径向坐标的变化情况进行分析, 在电极和电弧相交面上分别沿 x 轴和 y 轴采样, 磁通密度模随径向坐标的分布特征如图 7 所示。

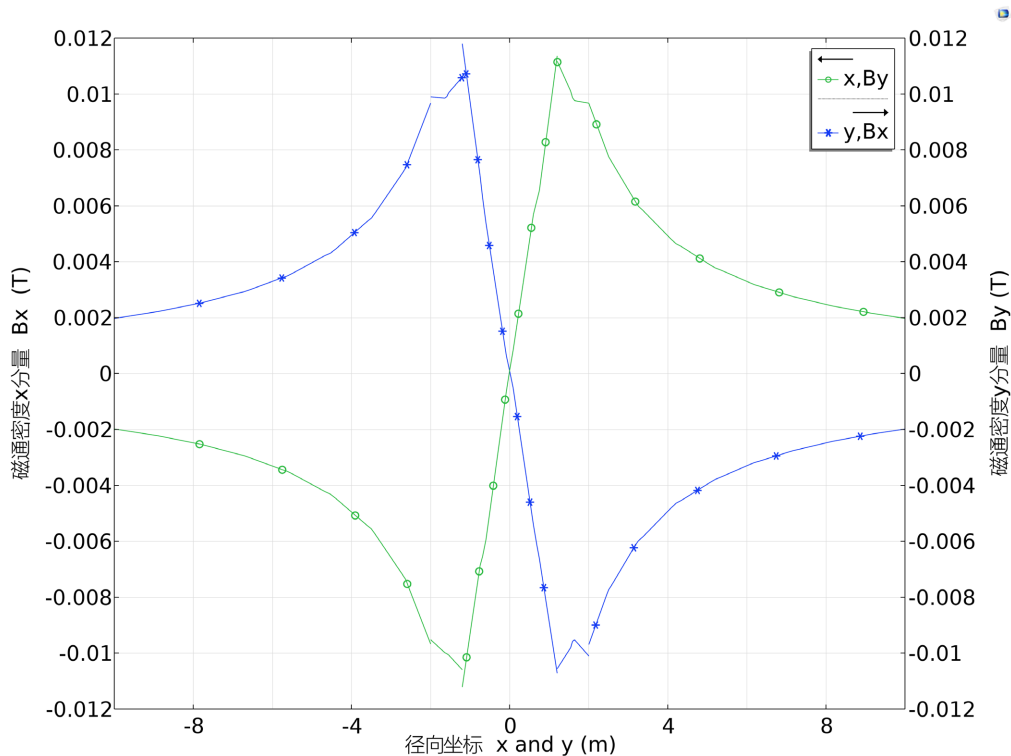


Figure 7. Variation of magnetic flux density magnitude with radial coordinate

图 7. 磁通密度模随径向坐标的变化曲线

由图 7 可以看出:

(1) $x-B_y$ 曲线与 $y-B_x$ 曲线呈现出近似对称的分布模式。

(2) 当径向距离小于电弧时, 磁通密度模成上升趋势; 在电极和电弧相交面上, 磁通密度模最大值出现在电极半径与电弧半径之间; 之后, 磁通密度模随径向距离减小。

3.4. 磁通密度模随 z 轴坐标的变化

为模拟炉外磁场沿 z 轴的分布特性, 设磁场阵列距离炉壁 2.5 m 处, 沿 z 轴方向采样, 磁通密度模沿 z 轴的变化趋势如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 磁通密度模随着 z 的增大呈上升趋势, 在电弧与电极的相交面处, 达到最大值, 再往电极之上, 基本没有太大变化。电弧与电极的相交面处正对应于电极端部位置, 因此, 根据炉外磁场在电弧区和电极区的磁场分布, 采用三维电磁传感器采集数据, 进一步提取特征值, 有望实现矿热炉电极端部位置的在线无损检测。

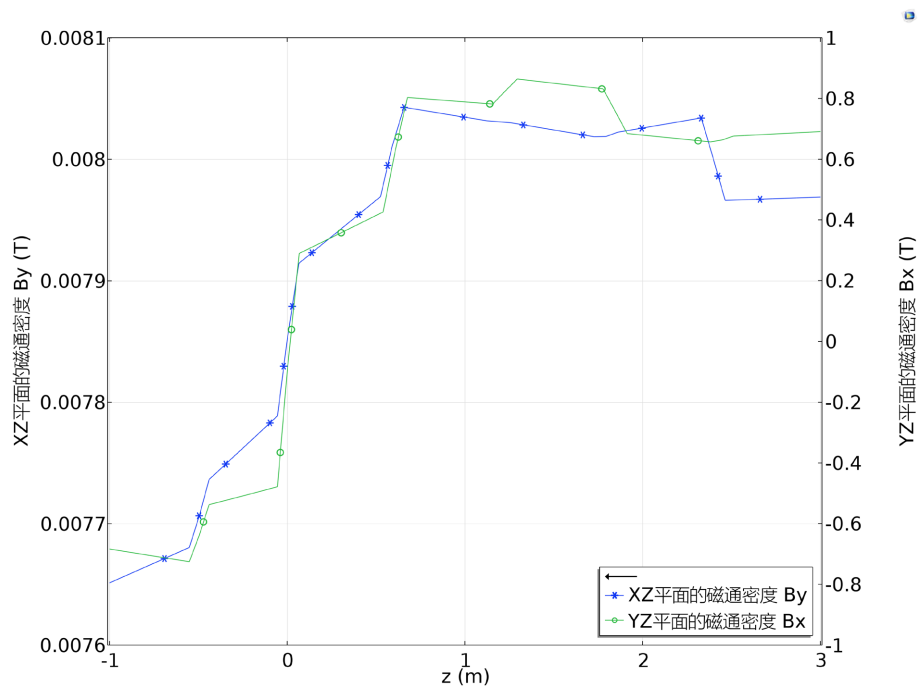


Figure 8. Variation of magnetic flux density magnitude along the z-Axis
图 8. 磁通密度模沿 z 轴坐标的变化

4. 系统构建与实验验证

4.1. 差动式矿热炉磁场阵列的结构设计

设计的差动式磁场阵列由差动阵列模块、信号处理板、电源、无线模块构成，差动阵列模块的结构如图 9 所示。



Figure 9. Differential magnetic field array module
图 9. 差动式磁场阵列模块

图 9 中线圈间距为 5 cm。线圈共分 2 组：上层线圈组和下层线圈组，每组 10 个线圈，差动阵列探头结构设计如图 10 所示。

由图 10 可知，上下两组线圈按顺序依次进行差动，上层线圈组的位置不变，下层线圈组的位置可灵活调整，因此，两差动线圈的间距 Δd 是可变的。

4.2. 检测系统架构

将 RF 模块、MCU 和 Raspberry Pi 统称为“数据采集端”。因此，磁场阵列检测系统由阵列传感器、数据采集端与 PC 机组成，如图 11 所示。

M_MCU 作为系统主控制单元, 定时向阵列传感器发送指令以收集数据, 并将收集到的数据发送至 Raspberry Pi。然后, Raspberry Pi 将数据保存至云数据库, PC 机实时从云数据库中获取数据, 并在 LabVIEW 平台下对数据进行分析 and 存储。

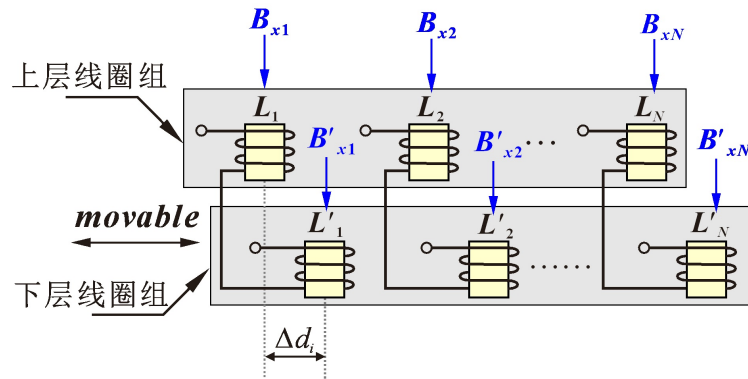


Figure 10. Structural design of differential array probe
图 10. 差动阵列探头结构设计

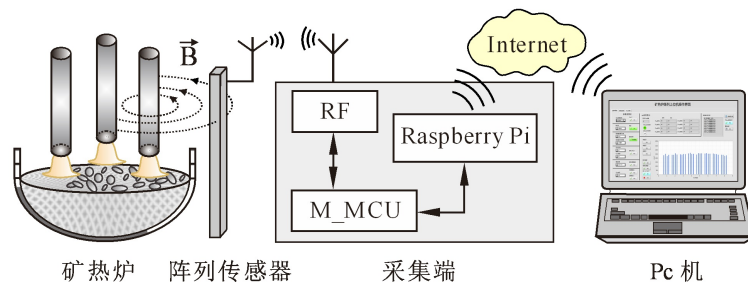


Figure 11. Architecture of the SAF electrode tip position detection system
图 11. 矿热炉电极端部位置检测系统架构

差动阵列探头安装完成后, 对差动式磁场阵列进行系统性调试, 调试场景如图 12 所示。

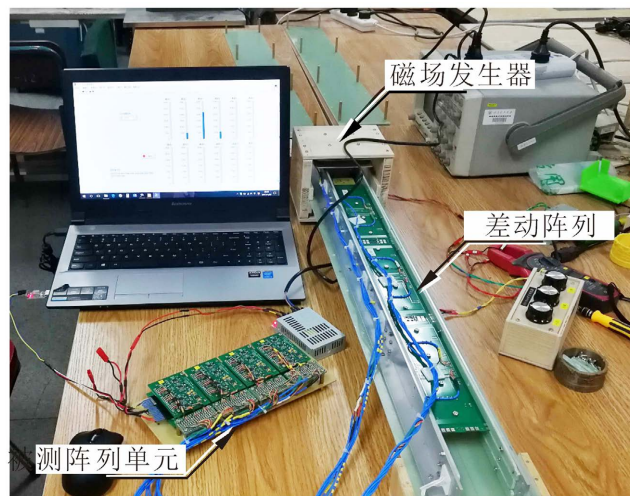


Figure 12. Magnetic field array calibration scenario
图 12. 磁场阵列调试场景

图 12 展示的差动式磁场阵列包含 10 个独立通道，对每个通道的灵敏度进行了测定，并进行了一致性检验。

4.3. 现场验证

本研究在银川市某冶金企业硅锰铁合金矿热炉(33,000 KVA)进行了现场测试。经过综合分析和实验验证，测试点被选在电极线上，距离炉体 1 米处。现场的测试场景如图 13 所示。

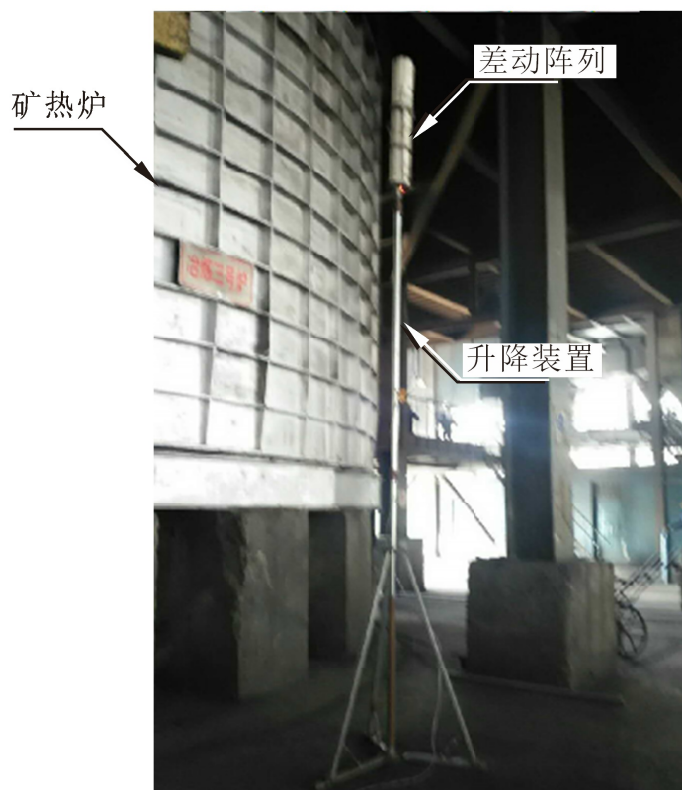


Figure 13. Field testing scenario of SAF
图 13. 矿热炉实地测试场景

图 13 中的矿热炉炉体高度为 5.6 m，以电极的上端作为参考点 O 。测试过程中，阵列传感器在垂直方向上移动，其移动范围从电极顶端开始向下延伸，覆盖电极的端部位置。

4.4. 测试结果分析

实验结果表明，当采样间距设定为 10 cm，且系统内两个线圈间的距离保持在 3 cm 时，获得的采样数据最为精确。此外，在 1.6 m~2.7 m 的区间内，电极端部位置特征值表现突出。通过对多个采样点求平均值，可得到重复测试的稳定结果，如图 14 所示。

从图 14 可知：移动阵列前和移动阵列后的峰值点分别在 2.065 m 和 2.165 m 处，两曲线的交点横坐标为 2.1 m。据此，笔者推断矿热炉的电极端部位置大约在 2.1 m 处。

更新阵列的布局，将阵列采样点的起始位置调整至 1.7 m，采样间距保持 0.1 m 不变，现场实测曲线如图 15 所示。

图 15 所示的测试曲线在 $l_i = 2.1$ m 处达到峰值点，表明矿热炉电极的端部位置位于该峰值点。

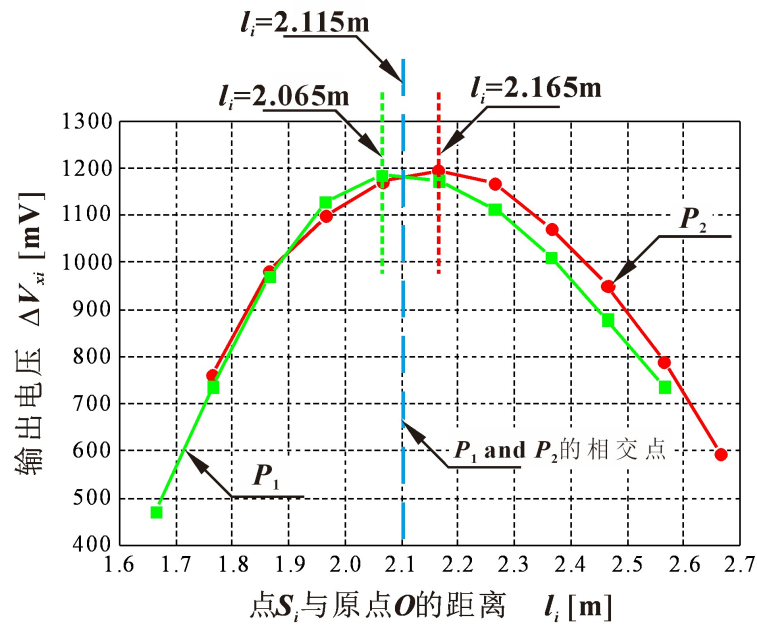


Figure 14. Comparison of curves before and after adjustment of array position

图 14. 阵列位置调整前后的曲线对比

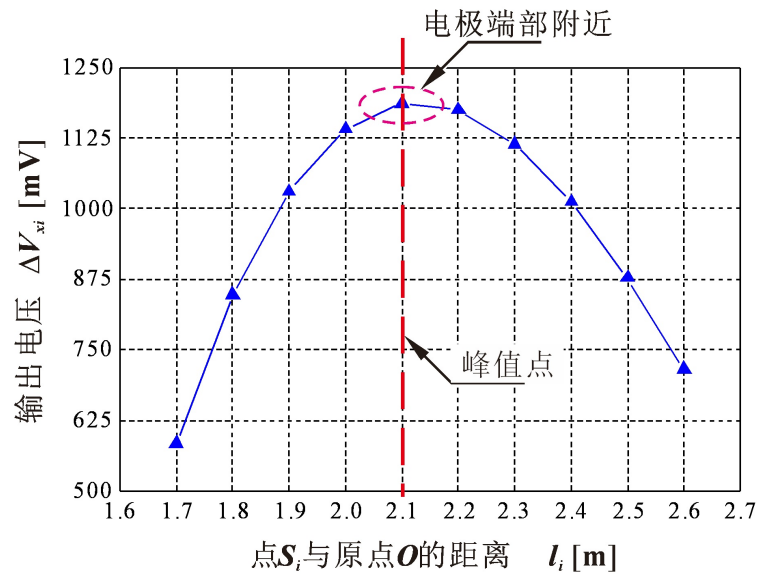


Figure 15. Analysis of field measurement curves for the SAF

图 15. 矿热炉现场实测曲线分析

5. 结论

本研究开发了一种差动式磁场阵列检测系统，经过理论探讨、仿真实验和实地验证，证明了该系统在矿热炉电极端部位置检测中的有效性和准确性。结果表明，该系统能够在实际工业环境中准确检测电极端部位置，为矿热炉的高效运行提供了有力支持。研究为矿热炉电极端部位置检测提供了一种新型、高效的解决方案，有望突破传统检测方法的瓶颈，为矿热炉工业参数检测和矿热炉控制领域提供技术支撑。

致 谢

本研究得到了山西省自然科学基金(202103021223067)的支持。

参考文献

- [1] 邓睿. 矿热炉电极调节系统设计与控制算法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2024.
- [2] Mulholland, A.C., Brereton-Stiles, P.J. and Hockaday, C.J. (2009) The Effectiveness of Current Control of Submerged Arc Furnace Electrode Penetration in Selected Scenarios. *SIAMM-Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, **109**, 601-607.
- [3] 康世民. 矿热炉电路分析与操作电阻的应用[J]. 铁合金, 2019, 50(1): 38-42.
- [4] 森正浩. 锰铁电炉电极埋入深度推测方法[J]. 铁合金, 1995(2): 57-59.
- [5] 吴俭民, 王庆贤, 徐志奇. 矿热炉电极工作长度监测系统的研究与实现[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 41(2): 181-184.
- [6] 唐春霞, 阳春华, 李沛. 硅锰铁合金埋弧炉三相电极位置建模研究[J]. 长沙民政职业技术学院学报, 2013, 20(3): 123-184.
- [7] 赵锦程. 矿热炉内部场数值模拟与电极控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [8] 白羽, 王琪, 孟凡荣. 矿热炉电极的非接触式在线检测系统[J]. 长春工业大学学院(自然科学版), 2012, 33(4): 383-386.
- [9] 史凯凯. 矿热炉电极长度测量装置设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [10] 刘卫玲. 矿热炉冶炼关键参数的电磁法检测机理研究及其产品化的实现[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [11] 周潼, 王莉, 牛群峰. 矿热炉电磁场仿真与电极位置检测方法研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 206-212.
- [12] Liu, W. and Chang, X. (2016) A Non-Contact Detection Method for Smelting in Submerged Arc Furnace Based on Magnetic Field Radiation. *Journal of Magnetism*, **21**, 204-208. <https://doi.org/10.4283/jmag.2016.21.2.204>
- [13] Liu, W., Han, X., Yang, L. and Chang, X. (2016) Array Sensing Using Electromagnetic Method for Detection of Smelting in Submerged Arc Furnaces. *Journal of Magnetism*, **21**, 322-329. <https://doi.org/10.4283/jmag.2016.21.3.322>
- [14] 肖谦衡. 矿热炉的炉内电路与操作电阻[J]. 铁合金, 1982(1): 11-17.
- [15] 张南生. 硅铁炉内电热分布的概念[J]. 铁合金, 1986(6): 1-7.
- [16] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学(上) [M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 352-354.
- [17] 王子坤, 李拓文, 李宝宽. 矿热炉内镍铁还原过程电流密度分布与温度场的有限元分析[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(3): 177-217.