

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407773

# 基于梯度下降法的干变线圈浇注模具参数检测\*

帅岭<sup>1</sup> 徐珠亚<sup>2</sup> 徐淼淼<sup>1</sup> 孙强<sup>1</sup> 陈晓敏<sup>1</sup>

(1. 南通大学信息科学技术学院 南通 226001; 2. 江苏中天伯乐达变压器有限公司 盐城 224001)

**摘要:** 在干式变压器高压线圈的浇注过程中, 内外模具的同心度和垂直度偏差较大, 会导致线圈结构不对称, 影响电气参数一致性, 甚至引发局部过热、电场畸变等问题。为此提出了一种干变线圈模具同心度与垂直度检测及调整算法, 该算法利用高精度激光位移传感器获取模具与三维框架的相对位置, 并通过测得的位置信息计算同心度与垂直度。随后采用梯度下降算法优化计算, 精准求解同心度与垂直度偏差。计算完成后, 单片机生成调节指令, 并通过步进电机驱动推杆调整模具位置, 使其达到所需精度。系统实时显示检测数据, 并结合闭环反馈控制, 提高调整精度和稳定性。此外, 该系统能够自动记录检测数据, 支持多次测量数据的趋势分析, 以优化调整策略。实验结果表明, 该算法运行稳定, 调整精度高, 同心度误差控制在 2 mm 以内, 垂直度误差小于 1.5°。该方法相较于粒子群优化算法与遗传算法计算效率更高, 同心度偏差为 20 mm 的条件下优化时间仅需 11.2 s, 适用于实时检测与在线调整, 可有效提升干变线圈的制造精度和一致性, 并减少人工干预, 提高生产的自动化程度。

**关键词:** 干变线圈; 同心度; 垂直度; 检测与控制

中图分类号: TN98

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.4020

## Parameters detection of dry-type transformer coil casting molds based on the gradient descent method

Shuai Ling<sup>1</sup> Xu Zhuya<sup>2</sup> Xu Miaomiao<sup>1</sup> Sun Qiang<sup>1</sup> Chen Xiaomin<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226001, China;

2. Jiangsu Zhongtian Boleda Transformer Co., Ltd., Yancheng 224001, China)

**Abstract:** During the casting process of the high-voltage coil in dry-type transformers, significant deviations in the concentricity and verticality of the inner and outer molds can lead to an asymmetric coil structure, affecting the consistency of electrical parameters and potentially causing local overheating and electric field distortion. To address this issue, a detection and adjustment algorithm for mold concentricity and verticality in dry-type transformer coils is proposed. The algorithm utilizes high-precision laser displacement sensors to obtain the relative position of the mold within the three-dimensional framework and calculates the concentricity and verticality based on the measured position data. Subsequently, the gradient descent algorithm is employed to optimize the calculation and accurately determine the concentricity and verticality deviations. Upon completing the calculations, a microcontroller generates adjustment commands and drives push rods via stepper motors to precisely adjust the mold position. The system displays real-time detection data and integrates closed-loop feedback control to enhance adjustment accuracy and stability. Additionally, the system can automatically record detection data, supporting trend analysis over multiple measurements to optimize adjustment strategies. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm operates stably and achieves high adjustment precision, maintaining a concentricity error within 2 mm and a verticality error of less than 1.5°. Compared with particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm, this method has higher computational efficiency. Under the condition of a concentricity deviation of 20 mm, the optimization time only takes 11.2 s, which is suitable for real-time detection and online adjustment. It can effectively improve the manufacturing accuracy and consistency of dry variable coils, reduce manual intervention, and improve the automation level of production.

**Keywords:** dry-type transformer coil; concentricity; verticality; detection and control

收稿日期: 2024-08-18 Received Date: 2024-08-18

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62101287)项目资助

## 0 引言

在干变线圈的制造过程中,浇注模具和拼装是两个非常关键的环节,直接影响着线圈的性能和可靠性。其中,同心度和垂直度是两项重要的检测指标,影响着线圈的电气性能和使用寿命<sup>[1]</sup>。因此,在干变线圈浇注模具和拼装的过程中,同心度和垂直度的检测与调控是关键难点之一。

干变线圈同心度指的是线圈的内径和外径之间的偏差,偏差越小,表示线圈的对称度越高,电气性能越好<sup>[2]</sup>。然而,传统的浇注模具拼装技术难以实现对同心度的精确控制,进而导致线圈的电气性能下降。干变线圈垂直度是另一个关键的检测指标,垂直度指的是线圈的轴线与基准面的垂直偏差,偏差越小,表示线圈的轴线越垂直,结构更稳定<sup>[3]</sup>。传统的拼装技术主要依靠人工操作,容易受到人为因素的影响,导致垂直度参数的随机性很大,产品性能参差不齐<sup>[4]</sup>。因此,如何实现拼装过程中垂直度的精确检测和调控则是另一个难点,计算出同心度与垂直度对干变线圈质量评价具有重要意义<sup>[5]</sup>。

目前,对于干变线圈同心度与垂直度的检测,国内外研究在技术发展上取得了显著的进展。研究者们提出了多种方法来提高检测的精度和自动化水平,然而,这些方法在实际应用中仍然面临一些挑战。苏煜<sup>[6]</sup>提出了一种高精度自动点云配准方案,利用改进的区域生长分割算法提取具有显著特征的点和面元,并在配准阶段采用模拟退火机制进行优化,从而实现了点云的高精度配准。该方法在精度和适用范围方面表现优异,能够应用于多种复杂场景。然而,由于算法的计算复杂度较高,在处理大量数据时容易导致运算速度下降,影响实时性<sup>[7]</sup>。因此,在需要快速响应的工业生产中,应用这一方法可能会受到限制。彭卫平等<sup>[8]</sup>提出的高山风电场风机塔筒垂直度检测方法,通过地面三维激光扫描仪获取风机塔筒的点云数据,并利用空间几何约束进行精确计算。这一方法在垂直度检测中表现出色,具有高精度和稳定性的优点,能够应对风电场复杂的环境条件。然而,由于该方法依赖于高精度的激光扫描设备,导致成本较高,并且对操作环境的要求也较为苛刻。因此,这种方法在更广泛的工业场景中推广应用存在一定的难度。张登永等<sup>[9]</sup>针对汽车发动机曲轴孔镗削加工同轴度超差及能效低下的问题,提出了一种考虑同轴度的节能优化方法。该方法基于有限元法和支持向量机回归算法建立同轴度预测模型,并结合能耗特性分析,构建了以比能和最大同轴度值为优化目标的工艺参数模型。然而,该方法的优化效果受限于建模精度,且多目标优化算法的计算复杂度较高,在实际应用中仍需进一步改进以提高计算效率和适

应性。

综上所述,尽管国内外研究在同心度与垂直度检测领域取得了显著进展,尤其在自动化和精度提升方面表现突出,但现有方法在实际应用中仍面临诸多挑战,包括高昂的设备成本、较高的系统复杂度,以及在不同应用场景下的适应性不足等问题<sup>[10]</sup>。针对这些不足,本文提出了一种基于梯度下降法的同心度与垂直度检测方法,旨在解决干变线圈模具拼装中的检测难题。该方法利用梯度下降算法的高效优化能力,在提高检测精度的同时,显著降低了系统的实现成本。通过引入自动化调节机制<sup>[11]</sup>,该方法不仅能够实现更高的自动化程度,还能够更短的时间内完成检测和调整,从而提高了生产效率。此外,该方法的硬件需求相对较低,适应性强,能够在多种工业场景中广泛应用,具有良好的实用性和推广前景。本文所提出的检测方法在解决现有技术瓶颈的同时,为干变线圈模具拼装的同心度与垂直度检测提供了更加经济、高效的解决方案<sup>[12]</sup>。

## 1 干变线圈模具参数检测系统设计

### 1.1 检测系统模型

本文设计的干变线圈模具参数检测系统的空间模型如图 1 所示,可以看出激光位移传感器在检测系统中的布阵方式。图 1 中红点表示激光位移传感器的具体位置,检测系统共布置了 12 个传感器,从上到下分别标记为  $d_{\text{bottom}}^1$  到  $d_{\text{top}}^{12}$ 。这些传感器分布在检测系统的顶部和底部,并且围绕待测物体的四周,用于测量模具相对于检测框架的距离,以确保能够精确测量物体的同心度与垂直度。

### 1.2 参数检测与调整过程

图 2 和 3 所示为检测系统的俯视图,阐述了内外模具同心度修正的原理,6 个红点为检测系统底部的激光位移传感器,虚线为调整前的位置,实线为调整后的位置,电机控制模块根据传感器提供的数据  $d_1 \sim d_6$ ,对干变线圈内外模具分别进行位置修正,依次将内外模具调整至中心位置。

如图 4 所示,本文用偏差角  $\theta$  来衡量干变线圈模具的垂直度,角度  $\theta$  的计算需要使用到位于同一垂线上的两个传感器所采集到的位移数据  $d_{\text{top}}$  和  $d_{\text{bottom}}$ ,以及上下两个传感器的高度差  $h$ 。

## 2 基于梯度下降法的检测系统算法设计

### 2.1 同心度优化算法设计

本文利用 MATLAB 进行了干变线圈内外模具同心

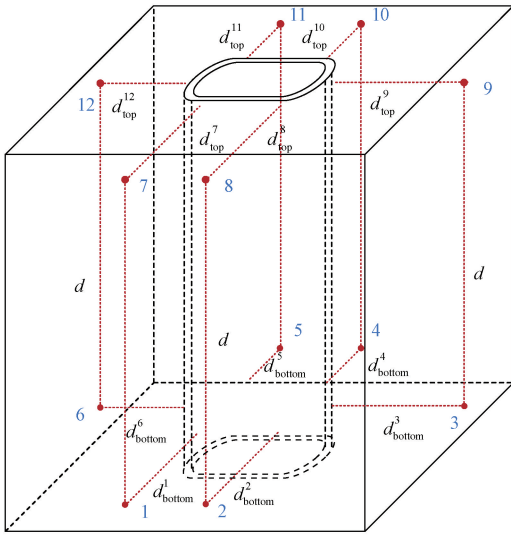


图 1 检测系统空间模型

Fig. 1 Spatial model of the detection system

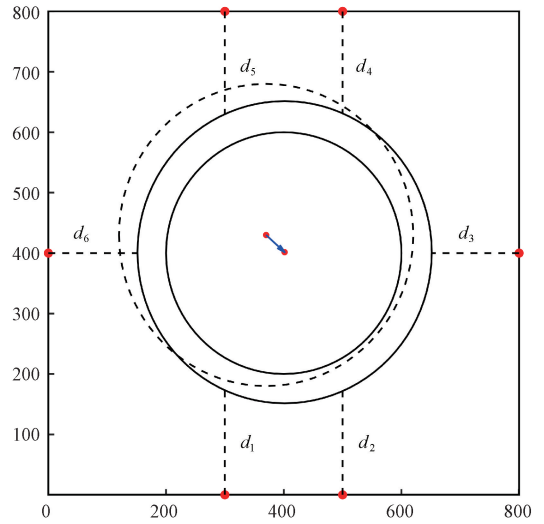


图 3 外模具同心度修正示意图

Fig. 3 Outer mold concentricity correction diagram

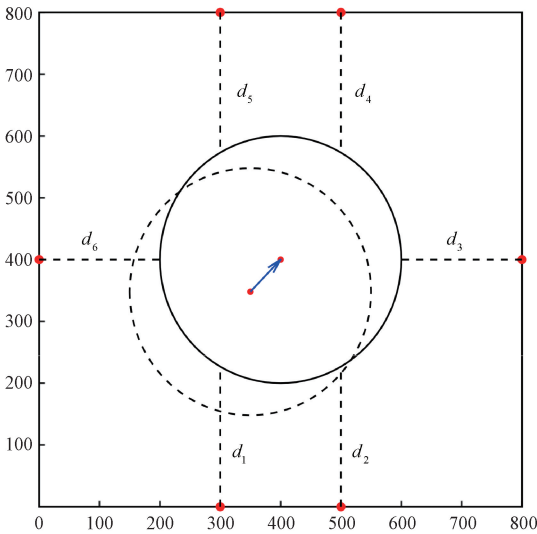


图 2 内模具同心度修正示意图

Fig. 2 Inner mold concentricity correction diagram

度的数学模型分析。为了便于计算,将坐标系的原点设置在底面的左下角,并设定 6 个激光位移传感器的具体坐标分别为 \$(300, 0)\$、\$(500, 0)\$、\$(800, 400)\$、\$(500, 800)\$、\$(300, 800)\$、\$(0, 400)\$。这些传感器的坐标覆盖了整个测量区域,从而能够全面获取内外模具的几何位置信息。根据激光位移传感器所采集的距离信息 \$d\_1 \sim d\_6\$ 均已知,本文利用最小二乘法<sup>[13]</sup>对于干变线圈内外模具的圆心坐标进行计算,再将解得的内外模具圆心坐标进行距离计算,两者间的距离即为同心度。

假设内模具的圆心坐标为 \$(x\_{c1}, y\_{c1})\$, 并且已知的 6 个方向的传感器测得的距离为 \$d\_1 \sim d\_6\$, 内模具的半径 \$r=\$

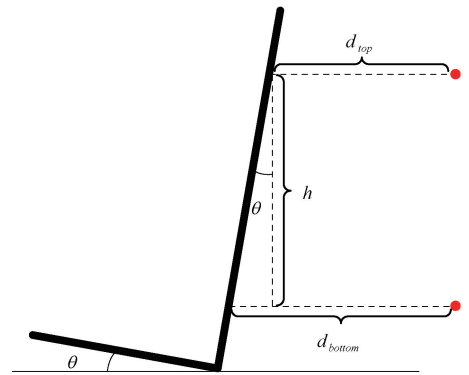


图 4 垂直度计算示意图

Fig. 4 Illustration of verticality calculation

200 mm。对于每个传感器,可以建立一个方程:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(300 - x_{c1})^2 + (0 - (y_{c1} - r))^2} \\ d_2 = \sqrt{(500 - x_{c1})^2 + (0 - (y_{c1} - r))^2} \\ d_3 = \sqrt{((x_{c1} + r) - 800)^2 + (400 - y_{c1})^2} \\ d_4 = \sqrt{(500 - x_{c1})^2 + ((y_{c1} + r) - 800)^2} \\ d_5 = \sqrt{(300 - x_{c1})^2 + ((y_{c1} + r) - 800)^2} \\ d_6 = \sqrt{((x_{c1} - r) - 0)^2 + (400 - y_{c1})^2} \end{cases} \quad (1)$$

再利用最小二乘法求解,目标是 minimized 这些方程的误差平方和。

$$f(x_{c1}, y_{c1}) = \sum_{i=1}^6 (\sqrt{(x_i - x_{c1})^2 + (y_i - y_{c1} - r_i)^2} - d_i)^2 \quad (2)$$

利用最分别对 \$x\_{c1}\$ 和 \$y\_{c1}\$ 求导,并设导数为 0,构建非

线性方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x_{c1}} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y_{c1}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

这两个方程组的解就是圆心的坐标。由于方程是非线性的,可以使用梯度下降法<sup>[14]</sup>进行求解。首先计算梯度:

$$\nabla f(x_{c1}, y_{c1}) = \left( \frac{\partial f}{\partial x_{c1}}, \frac{\partial f}{\partial y_{c1}} \right) \quad (4)$$

再更新坐标:

$$\begin{cases} x_{c1}^{k+1} = x_{c1}^k - \alpha \frac{\partial f}{\partial x_{c1}} \Big|_{(x_{c1}^k, y_{c1}^k)} \\ y_{c1}^{k+1} = y_{c1}^k - \alpha \frac{\partial f}{\partial y_{c1}} \Big|_{(x_{c1}^k, y_{c1}^k)} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  是步长,迭代直到收敛,即梯度值足够小。

通过以上步骤,可以精确地计算出内模具的圆心坐标  $(x_{c1}, y_{c1})$  与外模具的圆心坐标。

最后,同心度  $C$  表示为内外模具圆心坐标的距离,运用两点距离公式进行计算:

$$C = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2} \quad (6)$$

### 2.2 垂直度解算算法设计

首先,定义误差函数,用于评估圆柱体轴线模型与测量点的差异。误差函数可以定义为测量点到拟合轴线的距离的平方和。

设拟合的轴线模型为  $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + t\vec{v}$ , 其中  $\vec{r}_0$  是轴线上的一点,  $\vec{v}$  是轴线的方向向量。误差函数可以定义为:

$$E = \sum_{i=1}^{12} \|\vec{p}_i - (\vec{r}_0 + t_i\vec{v})\|^2 \quad (7)$$

式中:  $\vec{p}_i$  是第  $i$  个表面点;  $t_i$  是参数,使得  $\vec{r}_0 + t_i\vec{v}$  是轴线上距离表面点最近的点。

对于每个表面点  $\vec{p}_i$ ,最近点参数  $t_i$  为:

$$t_i = \frac{(\vec{p}_i - \vec{r}_0) \cdot \vec{v}}{\vec{v} \cdot \vec{v}} \quad (8)$$

随后对参数进行更新,使用梯度下降算法,更新  $\vec{r}_0$  和  $\vec{v}$  来最小化误差函数,计算误差函数  $E$  对  $\vec{r}_0$  和  $\vec{v}$  的梯度为:

$$\nabla_{\vec{r}_0} E = -2 \sum_{i=1}^{12} (\vec{p}_i - (\vec{r}_0 + t_i\vec{v})) \quad (9)$$

$$\nabla_{\vec{v}} E = -2 \sum_{i=1}^{12} (\vec{p}_i - (\vec{r}_0 + t_i\vec{v})) t_i \quad (10)$$

再对参数进行更新:

$$\vec{r}_0 = \vec{r}_0 - \alpha \nabla_{\vec{r}_0} E \quad (11)$$

$$\vec{v} = \vec{v} - \alpha \nabla_{\vec{v}} E \quad (12)$$

式中:  $\alpha$  是学习率。为了保持方向向量  $\vec{v}$  的单位长度,在每次更新后对其进行归一化:

$$\vec{v} = \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|} \quad (13)$$

重复上述更新步骤,在拟合完成后,计算轴线方向向量与水平底面法向量  $(0,0,1)$  之间的夹角  $\theta$  为:

$$\cos\theta = \frac{\vec{v} \cdot (0,0,1)}{\|\vec{v}\|} \quad (14)$$

垂直度即为:

$$\theta = \left| \arccos\left(\frac{\vec{v} \cdot (0,0,1)}{\|\vec{v}\|}\right) \right| \quad (15)$$

### 2.3 梯度下降法适用性分析

梯度下降法作为一种局部优化算法,其收敛性与初始偏差范围密切相关。为确保算法在干变线圈模具调整中的有效性,需明确其适用范围。通过理论计算与仿真分析,得出如下结论。

#### 1) 同心度调整误差范围

仿真针对初始同心度偏差分别为 10、20、30、40 和 50 mm 进行了对比分析,分析了梯度下降法的收敛性。结果表明,当初始同心度偏差 < 30 mm 时,算法在 10 次迭代内可稳定收敛至目标精度(误差  $\leq 2$  mm),如图 5 所示。然而,当偏差增大至 40 或 50 mm 时,标准步长下的收敛速度显著降低,甚至可能陷入局部最优,导致调整效果不佳。因此,为了确保较大偏差情况下的有效收敛,需要适当增大步长  $\alpha$  或优化传感器布局,以提升全局收敛性和调整精度。

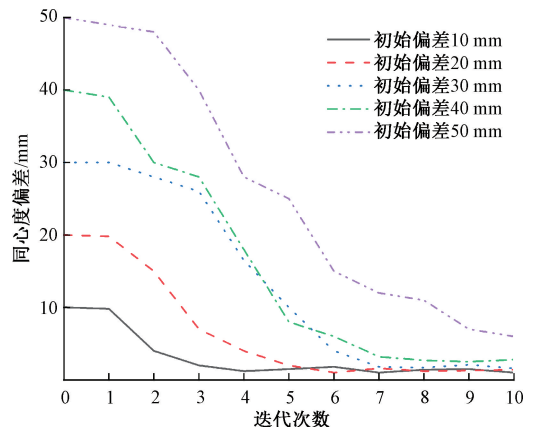


图 5 同心度偏差优化过程

Fig. 5 Optimization process of concentricity deviation

#### 2) 垂直度解算误差范围

在本文系统中,垂直度无法直接调节,但可通过梯度



下降法进行解算,以精确评估偏差并指导调整策略。仿真结果表明,垂直度偏差的解算收敛性与轴线方向向量的初始角度密切相关。如图 6 所示,当初始垂直度偏差 $<15^\circ$ 时,梯度下降法可将解算误差收敛至 $\leq 1.5^\circ$ ,满足检测精度要求。然而,当初始偏差超过 $15^\circ$ 时,解算误差显著上升,可能需要优化步长设置或传感器布置,以提高解算精度并减少局部收敛问题。

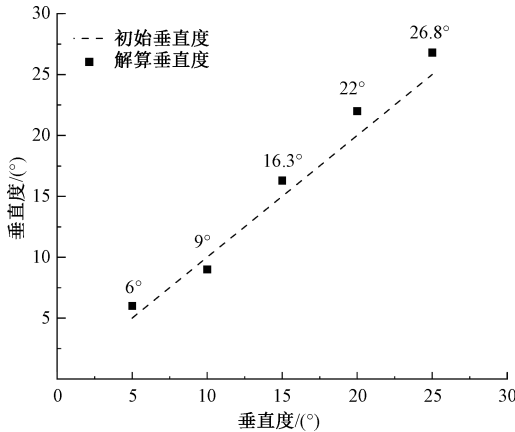


图 6 垂直度解算偏差示意图

Fig. 6 Diagram of deviation in verticality calculation

### 3 检测系统平台软硬件设计

干变线圈模具检测系统硬件组成如图 7 所示,包括位移传感器模块、数据处理模块、数据通信模块、电机控制模块、显示面板、电源管理模块。

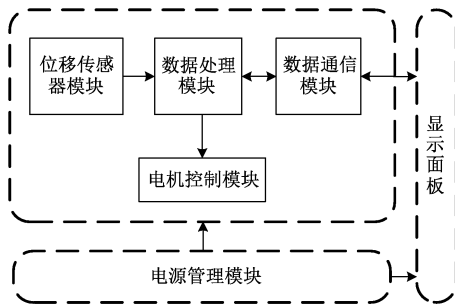


图 7 硬件结构框图

Fig. 7 Hardware structure block diagram

#### 3.1 位移传感器模块

激光位移传感器是利用激光技术进行测量的传感器,由激光器、激光检测器和测量电路组成。激光传感器是新型测量仪表。能够精确测量非接触被测物体的位置、位移等变化。近年来,激光位移传感器在提取线段特征方面取得了显著进展,为其应用提供了技术支撑<sup>[15]</sup>。

因此在设计中选用深圳博亿精科科技有限公司生产的 BL-200NZ 型号传感器。该传感器能够检测 120 ~

280 mm 范围内的被测物体,工作电压为 10 V,测量精度为 0.2 mm,输出信号为 RS485,满足设计使用需求。

#### 3.2 数据处理模块

干变线圈模具检测系统的数据处理模块选用 STM32F429IGT6 作为核心的主控芯片。该芯片是由意法半导体公司生产的一款高性能芯片<sup>[16]</sup>,工作电压为 3.3 V,内核为 Arm Cortex-M4,并且具有丰富的外设资源,主频最高达 180 MHz,能够满足系统设计的需求。主控芯片与各模块的连接示意图如图 8 所示。

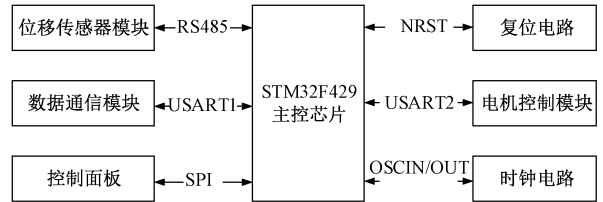


图 8 主控芯片连接示意图

Fig. 8 Main control chip connection diagram

时钟电路由 25 MHz 的晶振和两个 22 pF 的电容器构成,通过引脚 OSCIN 和 OSCOUT 与芯片连接。复位电路通过 NRST 引脚和 STM32 芯片连接,由复位按键、上拉电阻和 100 nF 的电容器组成。位移传感器模块采用 RS485 协议和主控芯片通信,负责实时采集距离信息;数据通信模块与主控芯片的通信方式为 USART1,其波特率为 115 200;显示面板通过 SPI 协议和主控芯片通信,负责实时显示位移传感器采集的数据以及计算得的同心度与垂直度信息;电机控制模块负责根据计算得的同心度信息,对内外模具位置进行调整,与主控芯片的通信方式为 USART2。

#### 3.3 电机控制模块

考虑到电机推杆的设备成本安装和维护成本相对较低,并且操作简单,易于安装和调试,同时具有较高的精度和重复性<sup>[17]</sup>,能够实现精确的位置控制和同心度纠正,故模块采用 42 式步进电机推杆。

当检测到同心度偏差时,检测系统会迅速调整推杆的位置和角度,以纠正偏差,确保内外模具的轴线始终对齐。这一过程通过高精度传感器和先进的控制算法实现,保证了内外模具在复杂操作条件下仍能保持高精度对中。在设计中,结合边框尺寸,激光位移传感器量程,模具直径与重量,对其进行了数学建模,最终选取了行程 200 mm 的电动推杆,控制精度达到 0.1 mm,推力达到 500 N,能够完美完成项目需求。

#### 3.4 显示面板

干式变压器线圈模具检测系统的显示面板采用分辨率为 800 × 480 的液晶显示屏 (liquid crystal display,

LCD)。该屏幕显示清晰,确保操作人员能够从不同角度轻松读取信息。检测系统集成 12 个高精度激光位移传感器,这些传感器实时采集线圈模具各个关键点的距离信息。通过高效的数据处理算法,系统能够即时计算并显示线圈模具的同心度和垂直度,从而帮助检测和校正潜在的问题。同时,检测系统会对数据进行记录,可以对过去的检测数据进行分析与绘图,便于观察线圈产品的质量变化趋势。

### 3.5 电源管理模块

电源管理模块负责为整个检测系统供电,主要组成部分为开关电源和稳压电路<sup>[18]</sup>,其中电压转换电路负责将 24 V 电压分别转为 12、5、3.3 V,为系统的所有模块供电。电路设计中选用的稳压芯片为 TPS5430DDAR,该芯片的特点是可以设置外围电路的电阻、电容和电感的大小<sup>[19]</sup>,把电压调整至各个模块所需的值,在一定程度上降低了硬件电路的开发难度。

### 3.6 检测系统工作流程

模具参数检测流程如图 9 所示,模具参数检测的工作流程首先对内模具进行测量和数据采集,获取内模具的圆心坐标和距离<sup>[20]</sup>等关键参数。这些数据通过最小二乘法<sup>[21]</sup>计算和分析后,结果会在 LCD 屏幕上显示出来。接着,系统自动判断内模具的同心度是否满足要求。如果不满足要求,会通过电机推杆进行调整,之后再次测量和计算,直到内模具的参数符合要求为止。内模具检测完成后,系统会自动切换到外模具的检测,激光位移传感器再次进行数据采集和分析,检测流程与内模具相同。最终,当内外模具的所有参数都符合设定标准时,整个检测流程完成。

## 4 系统测试

首先,搭建整体框架,用于放置内外模具。接着,安装激光传感器和其他模块,通电后,激光传感器测量同心度和垂直度,结果显示在 LCD 屏幕上。在完成检测系统的软硬件设计后,对位移检测模块、主控电路测试、电机控制模块进行调试,如图 10 所示。

系统搭建完成后,将代码烧录至单片机,通过串口调试助手观察发送的串口初始化数据,波特率调整为 115 200,success 为初始化成功。

在垂直度检测时,系统要求误差在 1.5° 以内。测试中准备了 3 个不同角度的垫块(5°、10°、15°),通过梯度下降算法对位移传感器实时采集的数据进行计算,并与设定值比较,得到的垂直度误差均在 1.5° 以内,符合系统要求。垂直度检测数据结果如表 1 所示。

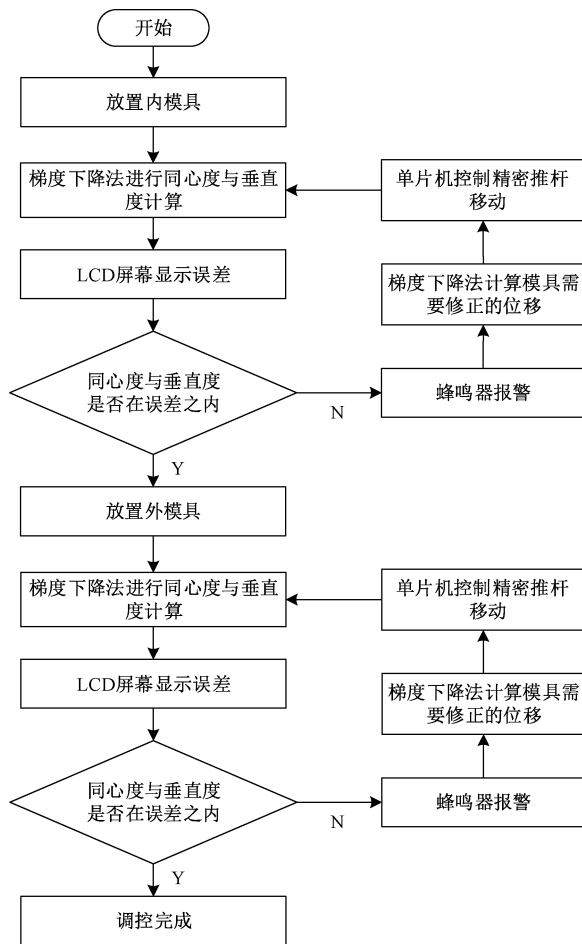


图 9 模具参数检测流程

Fig. 9 Flowchart of mold parameter detection

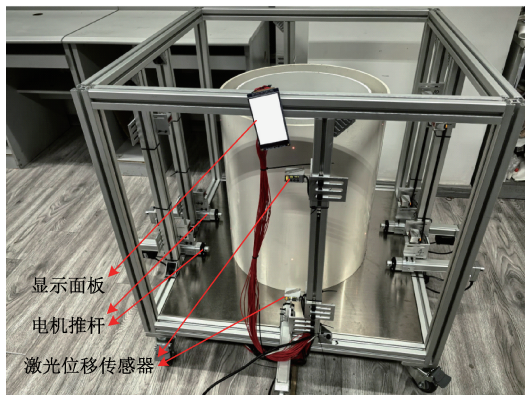


图 10 现场测试图

Fig. 10 Onsite test diagram

表 1 垂直度检测结果

Table 1 Verticality measurement results

实验序号	设置值/(°)	测量值/(°)	误差/(°)
1	5.0	5.8	0.8
2	10.0	11.0	1.0
3	15.0	16.4	1.4

同样,在同心度检测中,误差要求在 2 mm 以内。本文进行了 3 次实验,以提高实验的公平性和准确性。通过梯度下降算法解算内、外模具同心度,并控制推杆调整内外模具位置,最终结果显示内外模具的圆心距离均在 2 mm 以内,符合系统要求。数据如表 2 所示。

表 2 同心度检测结果

Table 2 Concentricity measurement results

实验序号	同心度误差/mm
1	1.3
2	1.8
3	1.6

系统通过梯度下降算法检测到内外模具位置偏离中心时,会通过电机推杆对内外模具进行快速调整,确保内外模具的轴线对齐。图 11 和 12 所示为通过串口调试助手导出的底部 6 个位移传感器数据。

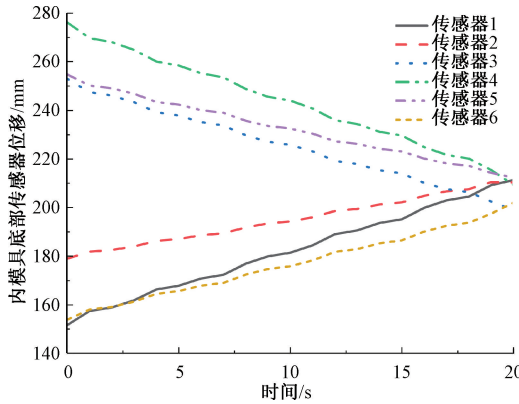


图 11 内模具底部传感器位移变化曲线

Fig. 11 Inner mold bottom sensor displacement curve

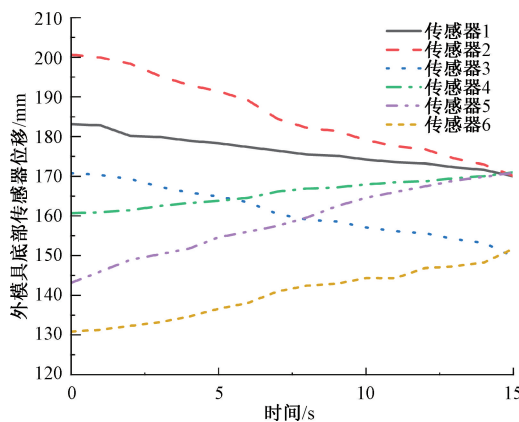


图 12 外模具底部传感器位移变化曲线

Fig. 12 Outer mold bottom sensor displacement curve

图 13 所示为同心度随时间变化的曲线。通过传感器数据计算出内外模具的圆心坐标,随着步进电机推杆的不断调整,同心度误差逐渐减小,最终  $\leq 2$  mm。

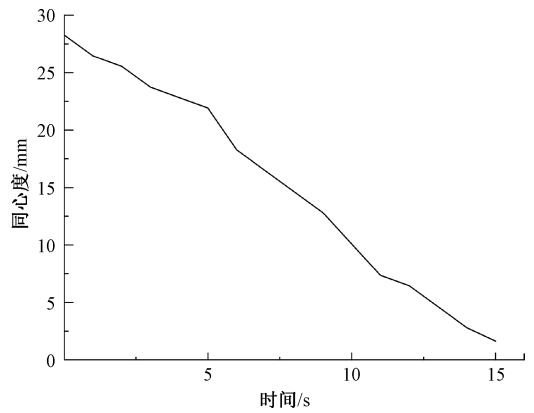


图 13 同心度变化曲线

Fig. 13 Concentricity variation curve

图 14 所示为垂直度的变化曲线。通过传感器数据计算得出同一立柱的垂直度(虚线)和其正对面立柱传感器的计算结果(实线),验证了系统的垂直度调整效果。

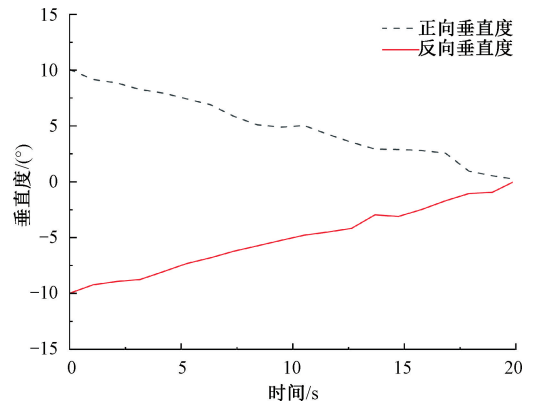


图 14 垂直度变化曲线

Fig. 14 Verticality variation curve

为验证梯度下降法的优势,选取粒子群优化算法与遗传算法作为对比方法。3 种算法在同一实验平台上运行,初始参数设置一致(同心度偏差 20 mm,垂直度偏差  $8^\circ$ ),实验结果如表 3 所示。

表 3 优化算法性能对比

Table 3 Comparison of optimization algorithm performance

算法	调整时间/s	垂直度误差/(°)	同心度误差/mm
梯度下降法	11.2	1.2	1.8
粒子群优化算法 <sup>[22]</sup>	15.3	1.6	2.0
遗传算法 <sup>[23]</sup>	25.6	1.8	2.5

在 3 个优化算法的比较中,梯度下降法在同心度的调整时间方面表现最为出色,显著优于遗传算法和粒子群优化算法,特别是在同心度的调整上,其调整时间较遗

传算法缩短了约 56%。尽管粒子群优化算法的调整时间介于梯度下降法和遗传算法之间,仍明显快于遗传算法,展现出较好的折中性能。在垂直度误差方面,梯度下降法在最终垂直度误差上表现更为优越,误差为  $1.2^\circ$ ,略优于粒子群优化算法( $1.6^\circ$ )和遗传算法( $1.8^\circ$ )。同样,梯度下降法在最终同心度误差方面也较低,为 1.8 mm,相比遗传算法的 2.5 mm 和粒子群优化算法的 2.0 mm,显示出更精确的调整能力。总的来说,梯度下降法的速度和精度都达到了最优,适合需要快速响应和较高精度的应用场景。

## 5 结 论

本文设计了一种基于梯度下降算法的干变线圈模具检测系统,并成功实现了高精度的同心度与垂直度优化。实验表明,该方法在同心度偏差  $\leq 30$  mm、垂直度偏差  $\leq 15^\circ$  的范围内具有高效收敛性,能够将同心度检测误差控制在 2 mm 以内,垂直度误差控制在  $1.5^\circ$  以内。此外,与遗传算法和粒子群优化算法相比,梯度下降法在计算效率和调整精度方面均展现出明显优势,尤其是在计算时间上,仅需 11.2 s,适用于实时调整。此外,检测系统硬件平台集成了嵌入式单片机、位移传感器模块、数据处理模块、电机控制模块和实时显示单元,确保了系统的高效性、稳定性和精确性。研究不仅提升了干变线圈模具拼装过程的自动化水平和控制精度,还具有结构紧凑、操作简便、成本低等优势,适用于干变线圈检测领域。整体而言,该方法能够显著改善干变线圈的结构和电气性能,为干变线圈模具的高效自动化调整提供了可靠的技术支持,具有广泛的工程应用前景。

## 参考文献

- [ 1 ] 周扬,王龙,来永斌. 基于最优投影圆锥底面的罐口位姿测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1): 50-58.  
ZHOU Y, WANG L, LAI Y B. Measurement method of the tanker mouth pose based on optimal projection cone bottom surface [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 50-58.
- [ 2 ] GAO C, LI E, ZHANG Y, et al. Permittivity measurement of the dielectric material at the off-axis position in a cylindrical cavity[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(3): 1711-1722.
- [ 3 ] 张国澎,郑钰麒,郑征,等. 含混合储能直流微电网混合势函数建模及稳定性分析[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4): 38-48.  
ZHANG G P, ZHENG Y Q, ZHENG ZH, et al. Hybrid potential function modeling and stability analysis of DC microgrid with hybrid energy storage [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(4): 38-48.
- [ 4 ] 杨长虎,袁东,张健,等. 基于偏振特征与强度信息融合的工件目标检测[J]. 电子测量技术, 2023, 46(24): 188-196.  
YANG CH H, YUAN D, ZHANG J, et al. Workpiece target detection based on fusion of polarization features and intensity information [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(24): 188-196.
- [ 5 ] ERDOGAN M, EKER M. A comparative analysis of partial discharge in 13 combined insulation structures of 11 materials used in cast-resin dry-type transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(6): 2330-2339.
- [ 6 ] 苏煜. 基于特定形状精密部件的数字化自动装配与评估[D]. 北京:北方工业大学, 2024.  
SU Y. Digital automated assembly and assessment of precision components based on specific shapes [D]. Beijing:North China University of Technology, 2024.
- [ 7 ] ARANI A, HU P, ZHU Y. UAV-assisted space-air-ground integrated networks: A technical review of recent learning algorithms[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2024, 5: 1004-1023.
- [ 8 ] 彭卫平,谭建伟,游晋卿,等. 一种高山风电场风机塔筒垂直度精细化检测方法[J]. 测绘工程, 2024, 33(4): 39-44.  
PENG W P, TAN J W, YOU J Q, et al. A fine detection method for verticality of wind turbine towers in high mountain wind farms [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2024, 33(4): 39-44.
- [ 9 ] 张登永,李聪波,吴少卿,等. 考虑同轴度的汽车发动机曲轴孔镗削工艺参数节能优化[J/OL]. 中国机械工程, 1-10[2025-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20241030.1147.010.html>.  
ZHANG D Y, LI C B, WU SH Q, et al. Processing parameter energy-saving optimization for boring of automobile engine crankshaft hole considering coaxial degree [J/OL]. China Mechanical Engineering, 1-10 [2025-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20241030.1147.010.html>.
- [ 10 ] 汤华,易茜. 球铰连接车用制动缸活塞偏磨的控制技术[J]. 机械设计与制造, 2025(4): 299-304.  
TANG H, YI Q. Control technology for eccentric wear of brake cylinder piston in vehicle with ball joint connection[J]. Machinery Design & Manufacture, 2025(4): 299-304.



- [11] HUANG S J, LI T S, LI W H, et al. Modular on-road AGV wireless charging systems via interoperable power adjustment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 5918-5928.
- [12] CHEN Y, YANG Q, ZHANG C, et al. Thermal network model of high-power dry-type transformer coupled with electromagnetic loss [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(11): 1-5.
- [13] 李宏达, 王耀霆, 胡琪昊, 等. 偏最小二乘法在激光诱导击穿光谱定量分析中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2024, 16: 25-29.
- LI H D, XANG Y T, HU Q H, et al. Application of partial least squares method to quantitative analysis of laser-induced breakdown spectra [J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2024, 16: 25-29.
- [14] ZHANG M, LIU X, LIU J. Convergence analysis of a continuous-time distributed gradient descent algorithm[J]. IEEE Control Systems Letters, 2021, 5(4): 1339-1344.
- [15] 邱德亮, 匡兵, 黄春德, 等. 改进的激光雷达线段特征提取方法[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(8): 129-132.
- QIU D X, KUANG B, HUANG CH D, et al. Improved method for line segment feature extracting of LiDAR[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(8): 129-132.
- [16] ROJAS D, BARRETT J. A novel 3-D embedded module for displacement measurement in metal structures [J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2017, 7(11): 1765-1773.
- [17] 严莉, 龚国强. 基于 STM32L 的 GPRS+GSM+蓝牙实时上传系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(10): 56-59.
- YAN L, GONG G Q. A fine detection method for verticality of wind turbine towers in high mountain wind farms [J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2020, 20(10): 56-59.
- [18] JIANG D, YU W, WANG J, et al. A speed disturbance control method based on sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor [J]. IEEE Access, 2019, 7: 82424-82433.
- [19] 杨继森, 庾万章, 张静, 等. 基于多频磁场耦合的平面二维位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2024, 44(2): 201-213.
- YANG J S, TUO W ZH, ZHANG J, et al. Planar two-dimensional displacement sensor based on multi-frequency magnetic field coupling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 44(2): 201-213.
- [20] SAFARPOUR A, DEHNAVI F, SABERI M, et al. Speed-power improvement in high-voltage switches employed in multielectrode arrays[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 69(7): 3139-3143.
- [21] XI Y, LU T, KANG X, et al. Structure-adaptive oriented object detection network for remote sensing images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 1-13.
- [22] 陈洪芳, 吴欢, 王子帅, 等. 基于改进粒子群算法的三坐标测量机最佳测量区域评价方法. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 197-205.
- CHEN H F, WU H, WANG Z SH, et al. An evaluation method for optimal measurement region of coordinate measuring machines based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 197-205.
- [23] 王昊, 李晖, 宋端正, 等. 面向云-雾计算系统中的遗传算法任务调度研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 40-51.
- WANG H, LI H, SONG D ZH, et al. Research on genetic algorithm task scheduling in cloud-fog oriented computing systems[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(8): 40-51.

### 作者简介



帅岭, 2018 年于金陵科技学院获得学士学位, 现为南通大学硕士研究生, 主要研究方向为信号处理和组合导航。

E-mail: 2330310028@stmail.ntu.edu.cn

**Shuai Ling** received his B. Sc. degree from Jinling Institute of Technology in 2022.

Now he is a M. Sc. candidate at Nantong University. His main research interests include signal processing and integrated navigation.



徐淼淼(通信作者), 2019 年于南京理工大学获得博士学位, 现为南通大学副教授, 主要研究方向为空间信息获取与处理。

E-mail: txxumiao@ntu.edu.cn

**Xu Miaomiao** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing

University of Science and Technology in 2019. Now he is an associate professor at Nantong University. His main research interests include acquisition and processing of spatial information.