

桁架式变压器铁心叠片机双孔定位系统研究

刘晶 张经销

(中节能西安启源机电装备有限公司, 西安 710018)

摘要 为满足大型变压器铁心离线自动叠装的生产需求, 本文对桁架式变压器铁心叠片机双孔定位系统展开研究, 引入视觉定位技术并进行数据验证。通过搭建实际架构并结合相应的控制理论与算法, 对桁架式变压器铁心叠片机双孔定位系统的性能、精度、稳定性及可靠性进行分析与评估。基于实际应用场景的实验数据和分析结果表明, 该系统具备可行性。

关键词: 桁架式; 叠片机; 双孔定位系统; 变压器铁心

Research on the double hole positioning system of the truss type transformer core lamination machine

LIU Jing ZHANG Jingxiao

(CECEP Xi'an Qiyuan Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd, Xi'an 710018)

Abstract To meet the production demand for offline automatic stacking of large transformer cores, this paper researches on the feasibility of the double hole positioning system of the truss type transformer core laminating machine, introduces visual positioning technology and conducts data verification. In the paper, by means of building an actual architecture and combining corresponding control theories and algorithms, the performance, precision, stability and reliability of the system are analyzed and evaluated. The experimental data and analysis results based on practical application scenarios indicate that the system is feasible.

Keywords: truss type; lamination machine; double hole positioning system; transformer iron core

0 引言

变压器铁心的品质和性能直接决定变压器的运行效率、稳定性和可靠性。变压器铁心的叠装是一项既繁琐又精细的工作。目前, 桁架式变压器叠片机作为铁心离线叠装机已成为一种趋势^[1], 1 000kV·A 以下变压器铁心的离线自动叠装装备已逐步发展成熟, 但对于 1 000kV·A 及以上的变压器铁心, 仍然以传统人工叠装为主, 不但效率低, 而且产品质量无法保证。文献[2-4]针对变压器硅钢片的堆叠精度及工艺孔对铁心损耗进行了分析, 桁架式变压器叠片机定位系统的精度和响应速度成为制约铁心叠装质量和生产效率的关键因素。双孔定位系统融合了先进的控制技术、视觉检测手段及智能化算法, 有望在大型变压器铁心制造中实现突破性进展。

1 桁架式变压器铁心叠片机原理

1.1 工作原理

桁架式变压器铁心叠片机通过两套视觉系统分别进行粗定位和精定位, 确定变压器铁心硅钢片料堆最上层片料的位置, 引导三轴桁架式智能叠片机吸盘抓取片料并堆叠为符合工艺规则的变压器铁心, 主要步骤如下:

1) 硬件搭建。主要由粗定位大视野视觉系统、精定位小视野视觉系统及三轴桁架式智能叠片机组成。

2) 通过大视野视觉相机进行粗定位拍照。由“直线查找”“夹角查找”“图形拟合”等边缘拟合算法确定料堆位置及角度, 并将位置信息反馈给可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 系统。

3) 通过小视野相机进行精定位 (双孔定位)。

由“圆查找”“BLOB (binary large object) 分析”等算法分别确定两个圆孔的位置, 并将位置信息反馈给 PLC。PLC 以确保抓取动作的准确性和稳定性为原则, 结合两个圆孔的相对位置及预先设定的标准位置参数, 计算出智能叠片机的抓取位置坐标。

4) PLC 根据视觉引导的抓取位置, 控制三轴智能叠片机构执行抓取动作。

桁架式变压器铁心叠片机双孔定位系统俯视图如图 1 所示。

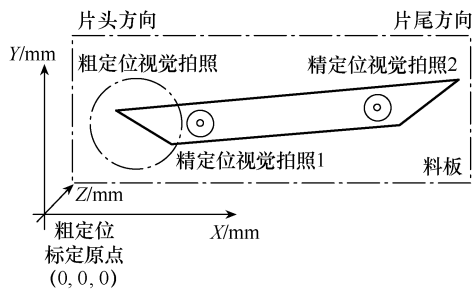


图 1 桁架式变压器铁心叠片机双孔定位系统俯视图

1.2 视觉子系统要求

视觉子系统配合桁架式机械手完成硅钢片料的抓取定位工作。

1) 视觉定位的精度要求

粗定位: 由一个置于桁架中心位置的摄像头完成对料堆的检测, 检测精度要求不大于 $\pm 2.5\text{mm}$ 。粗定位只需要合适的相机, 采用边缘查找、图形拟合算法即可实现, 技术难度较小, 因此本文不做详细阐述。

精定位: 由两个分别置于桁架两端的摄像头完成对片料孔位的检测, 检测精度要求不大于 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

2) 视觉定位的检测范围要求

粗定位: 一次拍摄, 覆盖片料的整个宽度范围, 约 1m; 覆盖片料的长度范围, 约 0.8m; 片料实际长度约 0.5m。

精定位: 一次拍摄, 覆盖 100mm 的原型视觉区域。

3) 视觉子系统需要具备位置标定、料堆外形拟合位置输出、片料位置拟合输出等功能, 还需要具备与 PLC 系统进行 Socket 通信, 实现拍照控制及拟合图形数据传输的功能。

1.3 桁架式主体结构

1) 高强度桁架主体结构

结合材料的本构关系 $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ (其中 σ 为应力, ε 为应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, T 为温度), 采用有限元分析法^[5-6]进行优化设计, 确保在重载和高速运动

时的结构稳定性。

建立模型: 在 X、Y、Z 桁架式三轴结构方面, 按实际桁架杆件的连接方式和几何尺寸构建模型, 如在 X 轴方向的桁架杆件长度、Y 轴和 Z 轴交叉处节点的构造等进行描绘。根据桁架材料 (型材) 定义弹性模量等参数, 在 X、Y、Z 三轴交汇的关键节点及应力集中的杆件区域细化网格。

设置边界与载荷: 边界条件根据桁架式三轴的安装情况设定, 在桁架一端 X 轴方向固定, 另一端在 Z 轴方向有一定的滑动约束。载荷方面, 考虑重载情况, 在 Y 轴某位置施加集中力, 同时考虑高速运动时在 X、Z 轴产生的惯性力, 将这些力准确地施加到相应的桁架节点或杆件上。

分析评估: 静态分析时, 查看 X、Y、Z 三轴受力时桁架杆件的应力、应变是否超过许用值。动态分析时, 通过模态分析了解桁架在三轴运动下的振动特性, 避免在高速运动时由于共振导致结构不稳定。

优化设计: 将 X、Y、Z 桁架式三轴中关键杆件的横截面积、桁架节点的连接尺寸等设为设计变量。以最小化桁架在重载和高速运动下的最大应力或最大变形为优化目标, 对 X、Y、Z 三轴相关参数进行迭代优化, 提高桁架结构在复杂工况下的稳定性。

2) 智能叠片执行机构

智能叠片执行机构具备多自由度姿态调整能力, 其运动学方程可表示为

$$\theta_X = g_1(q_1, q_2, \dots, q_m, v_1, v_2, \dots, v_m, t) \quad (1)$$

$$\theta_Y = g_2(q_1, q_2, \dots, q_m, v_1, v_2, \dots, v_m, t) \quad (2)$$

$$\theta_Z = g_3(q_1, q_2, \dots, q_m, v_1, v_2, \dots, v_m, t) \quad (3)$$

式中: θ_X 、 θ_Y 、 θ_Z 为执行机构在三个方向上的旋转角度; g_1 、 g_2 、 g_3 为函数名; q_1, q_2, \dots, q_m 为各旋转轴的位移量; v_1, v_2, \dots, v_m 为各旋转轴的速度; m 为与执行机构旋转轴相关的变量数量; t 为时间。

2 双孔定位系统的关键技术与工作原理

2.1 关键技术

1) 视觉定位与标定技术

采用机器视觉算法对铁心叠片的特征进行提取和识别, 以实现高精度的视觉定位。通过精确的标定方法消除相机镜头畸变、安装误差等因素的影响, 提高定位精度。例如, 利用“九点标定法”建立相机的内参和外参模型, 从而实现从图像坐标到世界坐标的准确转换。

视觉定位精度可表示为

$$\delta_p = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2} \quad (4)$$

式中： δ_p 为视觉定位精度； δ_x 、 δ_y 、 δ_z 分别为在X、Y、Z方向上的定位误差。

标定误差模型为

$$E_{\text{CAL}} = \sum_{i=1}^n \|m_i - M(K, R, T, p_i)\|^2 \quad (5)$$

式中： E_{CAL} 为标定误差； m_i 为图像中的特征点坐标； $M(\cdot)$ 为投影函数； K 为相机内参； R 、 T 分别为相机的旋转和平移矩阵； p_i 为对应的世界坐标； n 为用于标定的特征点数量。

2) PLC和伺服控制技术

PLC作为系统的控制核心，负责整个叠片机的逻辑控制和顺序动作的调度。通过编写控制程序实现对各个运动轴的协调控制，确保叠片过程的准确性和稳定性。

伺服系统采用高性能的交流伺服电动机和驱动器，能够提供精确的位置、速度和力矩控制，控制精度可达到 μm 级，响应速度在 ms 级以下。

采用基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的伺服控制算法，通过预测系统未来的状态优化控制输出，提高系统的动态性能和抗干扰能力。

2.2 工作原理

通过测量两个圆孔的位置，计算片子的中心位置，通过中心位置引导桁架伺服机构进行抓取。由于Z方向不变，且由伺服系统精准控制，因此误差可以忽略不计。

片子中心位置坐标为

$$P = \left(\frac{X_2 - X_1}{2} + X_1, \frac{Y_2 - Y_1}{2} + Y_1 \right) \quad (6)$$

式中： P 为片子中心坐标； (X_1, Y_1) 为在桁架坐标系内左圆孔中心坐标； (X_2, Y_2) 为右圆孔中心坐标。

由于中心位置的偏差不好直接判断，可通过测量两个圆孔中心间距长度来间接判断实际测量误差。

$$\Delta L = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (7)$$

式中， ΔL 为两个圆孔的中心间距。

由于实验中 X_2 与 X_1 的差值约为500mm， Y_2 与 Y_1 的差值约为 $\pm 5\text{mm}$ ，由式(7)计算可得片长误差

约为中心位置定位误差的2倍。因此，只需要测量出片长误差即可推算出定位误差。

2.3 测量过程

1) 首先拍摄空间中9个坐标已知的点，确定相机的内参(如焦距、像素尺寸等)和外参(相机在世界坐标系中的位置和姿态)，通过九点标定法将相机像素距离转换为物理距离。九点标定法坐标转换结果见表1。

表1 九点标定法坐标转换结果

参数	精定位1	精定位2
模块状态	1	1
标定物理坐标 X/mm	4.65	4.68
标定物理坐标 Y/mm	5.29	5.18
标定物理角度/(°)	1.380 198	1.410 021
单像素精度/mm	0.025 100 54	0.024 805 31

2) 通过边缘捕捉算法对片子的左侧圆孔进行拍摄，将相机坐标系拟合到桁架坐标系，计算出圆心到标定原点的实际物理距离。

3) 将桁架沿X正方向移动500mm，再通过边缘捕捉算法拍摄右侧圆孔，将相机坐标系拟合到桁架坐标系，计算出圆心到标定原点的实际物理距离。

4) 圆心距计算坐标系如图2所示，通过式(8)计算两孔圆心间距。

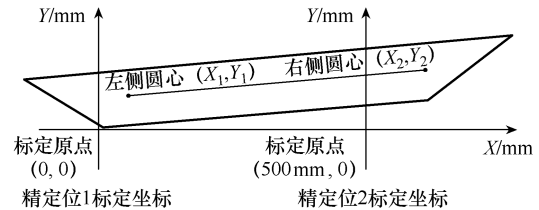


图2 圆心距计算坐标系

$$S = \sqrt{(500 + X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (8)$$

式中， S 为双孔圆心距。

2.4 融合技术

1) PLC控制系统

PLC控制系统可实现对整个叠片机的逻辑控制与顺序动作的精准调度，通过结合三轴控制能够根据当前各部件的运行参数及预设的运动规则，对系统未来的状态进行预测。在这一过程中，基于对各轴运动数据的实时采集与分析，依据编程算法和数学模型，PLC能够推断后续的动作趋势与系统状态变化。

在叠片机生产实验中, PLC 控制系统实时监控三轴的位置、速度等关键参数。当叠片机开始运行时, PLC 根据当前叠片的位置及预设的叠片顺序和速度要求, 预测下一个叠片动作时三轴应处的位置。在实际运行过程中, 各部件严格按照 PLC 控制系统的调度协同工作, 在规定的时间内高效且精准地完成叠片任务。通过这种方式, 可以确保叠片机各部件的协同工作及可行性。

2) 伺服驱动系统

伺服驱动系统采用高性能的交流伺服电动机与配套的驱动器, 以及先进的 EtherCAT 通信技术和编码器反馈机制。通过 EtherCAT 通信的高速数据传输特性, 实现系统各组件之间快速、稳定的信息交互。编码器可以实时反馈电动机的运行状态信息, 基于此, 系统能够对电动机的位置、速度和力矩进行极为精确的控制, 从而满足在高速运行状态下依然保持高精度运动的需求^[7-8]。

3) 机器视觉系统

文献[9]提出基于双目视觉定位的机械臂智能抓取控制方法, 但该方法只针对机械臂且只进行了仿真建模。文献[10]介绍了基于机器视觉的高压断路器机械特性测量方法, 该方法只针对断路器进行了图像匹配。本文的测试及方法均为实物测试和实际参数, 通过工业相机和图像处理算法, 利用“直线查找”“圆查找”“边缘查找”“BLOB 分析”等算法对铁心叠片的形状和特征进行实时检测与识别; 通过“位置修正”“高精度特征测量”“点点测量”“位置修正”等算法为双孔定位系统提供准确的初始位置信息和实时反馈; 通过“标定转换”“单位转换”“变量计算”将像素距离转换成实际物理距离; 通过“数据转换”将视觉检测信息和控制信号利用 Socket 通信与 PLC 进行交互, 确保控制的实时性和数据的准确性。硅钢片堆料圆孔视觉检测如图 3 所示, 最上层硅钢片圆孔边缘稳定捕捉照片如图 4 所示。

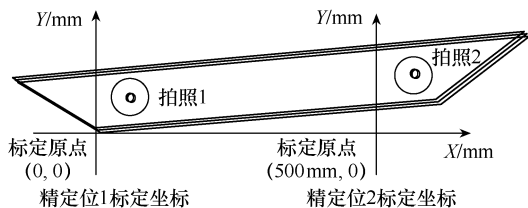


图 3 硅钢片堆料圆孔视觉检测

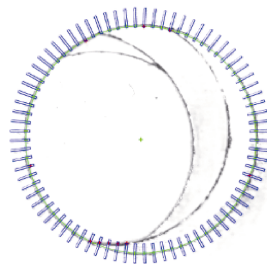


图 4 最上层硅钢片圆孔边缘稳定捕捉照片

2.5 实测结果

1) 对孔间距为 499.75mm 的硅钢片进行测量, 当硅钢片在同一位置时, 仅移动相机重复定位, 多次测量的精度均在 0.1mm 以内。静态下圆心距实验数据如图 5 所示。

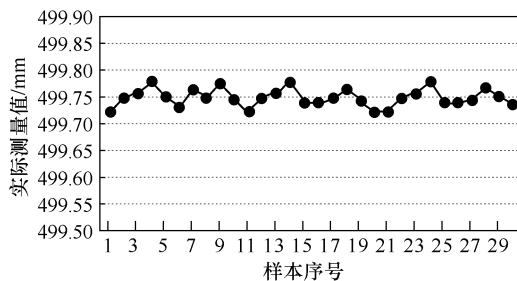


图 5 静态下圆心距实验数据

2) 对孔间距为 499.7mm 的硅钢片进行测量, 模拟实际应用情况。在视野范围内任意移动硅钢片, 测量精度在 0.3mm 以内。动态下圆心距实验数据如图 6 所示。

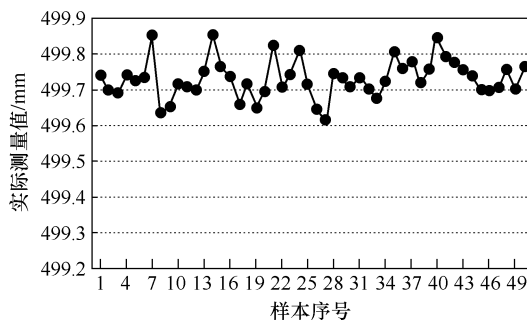


图 6 动态下圆心距实验数据

3 结论

本文介绍了桁架式变压器铁心叠片机双孔定位系统的工作原理并进行了测试, 研究表明通过精确的数学建模和定位控制算法, 以及融合 PLC、伺服驱动和机器视觉等关键技术, 该系统能够实现对硅钢片两孔中心距的测量精度在 0.3mm 以内, 即长度测量精度为 $\pm 0.15\text{mm}$ 。由于长度测量误差为圆孔定

位精度的2倍,因此抓取定位精度约为 $\pm 0.075\text{mm}$,在理想的实验环境下,满足 $\pm 0.1\text{mm}$ 的应用设计要求。所以,桁架式变压器铁心叠片机双孔定位系统具有技术可行性。本文的算法和论证可为大型变压器铁心智能叠片机的制造提供技术参考。

参考文献

- [1] 李彦虎,赵丹,闫超虎,等. 变压器硅钢片智能化物流线的规划与设计研究[J]. 变压器, 2022, 59(8): 8-11.
 - [2] 王兵,陈益萍,徐华生,等. 变压器铁心及夹件接地电流在线监测装置[J]. 电气技术, 2023, 24(6): 69-73, 78.
 - [3] 赵小军,张佳伟,王浩名,等. 电-磁-机耦合视域下考虑气隙影响的变压器铁心振动特性精细化模拟方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4257-4269.
 - [4] 窦润田,李永建,张献,等. 受工艺孔影响的变压器铁心损耗计算与分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 2909-2923.
 - [5] 张日,季晴. 基于有限元仿真的多边形空心电动机轴强度分析[J]. 电气技术, 2024, 25(8): 47-52.
 - [6] 郑东方,陈亮. 基于有限元方法的山地输电杆塔接地特性分析[J]. 电气技术, 2024, 25(8): 53-57.
 - [7] 刘思诺,武志涛. 基于改进经验模态分解的直线电机伺服系统迭代学习控制[J]. 电气技术, 2024, 25(4): 32-37.
 - [8] 倪启南,杨明,李云嵩,等. 全闭环伺服驱动系统位置控制通信延时补偿技术[J]. 电工技术学报, 2022, 37(10): 2513-2522.
 - [9] 陈晗彬. 基于双目视觉定位的机械臂智能抓取控制研究[J]. 机电工程技术, 2023, 52(12): 115-119.
 - [10] 刘亚魁,李红运,林天然,等. 基于机器视觉的高压断路器机械特性测量方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(增刊 1): 222-230.
-
- 收稿日期: 2024-10-11
修回日期: 2024-10-22
- 作者简介
刘 晶(1987—),男,陕西西安人,本科,工程师,主要从事电工装备及智能产线的设计研发工作。
-
- (上接第79页)
- 电力与能源, 2020, 41(4): 425-430.
- [2] 吴刚,陈江雨,曹漾,等. 配电网供电指挥服务智能辅助系统研究及应用[J]. 电气技术, 2021, 22(12): 46-52.
 - [3] 贾经冬,张敏南,赵祥,等. 接诉即办智能派单业务调度算法研究[J]. 计算机科学, 2023, 50(增刊 2): 949-955.
 - [4] 陈铭远. 基于决策树算法的采集故障研判体系[J]. 通信电源技术, 2023, 40(9): 246-248.
 - [5] 田倩南,李杰,李昆鹏,等. 基于多因素分析的机场任务指派建模与仿真[J]. 运筹与管理, 2024, 33(2): 1-8.
 - [6] 侯健敏,徐志豪,余威杰,等. 基于灰色-前景改进优劣解距离法的多气候区建筑三联供系统多准则评估[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2659-2670.
 - [7] 董章,李思尧,陈雅旒,等. 基于组合赋权的电缆风险评估可视化[J]. 电气技术, 2023, 24(6): 57-63.
 - [8] 陈晨,闫向阳,齐桓若,等. 基于 FAHP-改进 CRITIC 组合赋权的屋顶光伏接入配网评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 97-108.
 - [9] 林洪洲,粘凯昕,郑峰,等. 考虑区间型指标的电压暂降综合评估方法[J]. 电气技术, 2024, 25(6): 47-55.
 - [10] 卢兆军,谢红涛,郝泉. 基于数据挖掘的新旧动能转换成效监测体系研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(2): 169-172.
 - [11] 周才杰,汪玉洁,李凯铨,等. 基于灰色关联度分析-长短期记忆神经网络的锂离子电池健康状态估计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 6065-6073.
 - [12] 张健,王凯悦. 考虑电压稳定性的含分布式电源配电网多目标无功优化[J]. 电气技术, 2020, 21(3): 64-69.
 - [13] 张嘉岷,李显忠,张福州,等. 基于模糊综合评价模型的电能表运维技术研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(9): 65-70.
 - [14] 陈祉如,郭亮,杜艳,等. 基于改进层次分析法的电能计量系统综合评价[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(6): 167-175.
-
- 收稿日期: 2024-09-24
修回日期: 2024-10-09
- 作者简介
王鹏鹏(1992—),男,河南省太康县人,硕士,工程师,主要从事电力运维系统研发相关工作。