

基于精密磁性部件的自动充退磁系统研究

肖伟东, 于亚云, 冀雨, 张宇菲

(北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要 精密磁性部件作为航空航天、高端装备制造等领域的核心部件, 其磁性能直接决定了高精尖产品的精度和可靠性。然而, 传统人工充退磁的方式存在精度低、一致性差、生产效率低下和对工人依赖性高等问题。本文基于脉冲充磁原理、分段式退磁技术与全流程自动化控制理念, 研发了一套集自动上料、精准充退磁、360° 全周磁性能检测于一体的集成系统。该系统采用强-弱双退磁线圈设计, 适配矫顽力不同的磁性能材料, 结合 6 轴协作机械臂与视频识别技术, 实现了取料、充退磁、磁场检测的全流程自动化操作, 满足精密磁性部件的高精度处理需求, 旨在为提升生产效率与产品一致性提供借鉴, 进而为高端磁性部件制造提供技术参考。

关键词 精密磁性部件; 自动充退磁; 360° 全周磁性能检测; 强-弱双退磁线圈

中图分类号: TH16; V24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.001

0 引言

在现代制造业向高精度、智能化转型的背景下, 精密磁性部件^[1]的应用场景日益广泛, 从航空航天领域的姿态控制系统到高端医疗设备的驱动机构, 从精密仪器的传感组件到新能源汽车的核心电机, 其磁性能直接影响整个系统的运行精度、稳定性与使用寿命。精密磁性部件需具备精确可控的磁场强度、均匀的磁场分布及稳定的磁导率特性, 而充退磁工艺是决定这些性能指标的关键环节。传统充退磁^[2]过程多依赖人工操作, 通过手动调节磁场参数导致来完成部件的充退磁过程, 由于精密磁性部件的矫顽力存在差异, 且人工手动调节磁场参数误差较大, 导致批量产品的磁性能离散度较高, 产品合格率低; 充磁、退磁和检测分散在多套独立设备中, 工序衔接效率低, 单工件处理周期时间长, 生产效率低下; 磁场检测多为单点抽样, 无法全面反映 360° 环形磁场分布, 易遗漏局部磁性能缺陷。针对以上问题, 传统充退磁工艺已无法满足现代生产需求。因此, 设计研发一套集高精度和自动化于一体的自动充退磁系统, 实现充退磁参数的精准匹配、过程的全面实时监测与自动调节, 对于提升精密磁性部件的制造质量和降低生产成本有重要意义。

1 自动充退磁系统总体设计

1.1 系统功能需求与技术指标

针对传统设备的手动调控、功能单一、精度不足、兼容性差等问题, 自动充退磁系统可自动识别工件序

列号, 实现工件的自动上料、充退磁、360° 全周磁场检测和下料等, 全程无需人工干预, 可实时动态检测磁场强度等参数, 记录与分析处理数据, 支持数据导出与追溯, 具备过流、过温、过压保护等功能, 满足不同类型、不同规格精密磁性部件的自动充退磁工艺需求。其技术指标包括: (1) 充磁场强: 4 T; (2) 退磁精度: $\pm 1\%$; (3) 测量精度: $\pm 0.5\%$; (4) 重复测量精度: $\pm 0.8\%$ 。

1.2 系统总体设计

整个系统分为 7 个功能区域 (如图 1 所示), 包括: A 区 (6 轴协作机械臂)、B 区 (充磁区域)、C 区 (强退磁区域)、D 区 (弱退磁区域)、E 区 (视频识别区域)、F 区 (360° 全周磁场检测区域) 和 H 区 (临时周转区域)。核心组成主要包括机械执行系统、磁场发生系统、检测系统和控制系统, 各系统间通过工业总线实现数据交互与协同工作。

1.3 工作流程

该系统工作流程分为 6 个核心工序, 各工序间互不影响, 可独立设定参数并完成单步工序, 适配不同规格型号和不同应用的产品:

1. 初始化: 系统启动后, 进行硬件自检和参数的初始化, 确保各功能区域正常工作。

2. 自动上料与识别: 6 轴机械臂从送料盘抓取部件, 移送至 E 区, 通过视频识别装置完成工件有无判断、序列号识别与参数检测, 确保工件装配精度。

作者简介: 肖伟东 (1992-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 惯性器件研发。

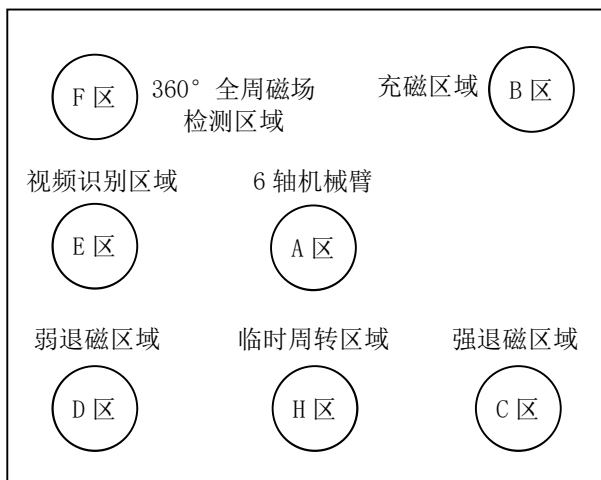


图1 系统工作示意图

3. 饱和和充磁：机械臂将工件移送至B区的充磁线圈，通过丝杠模组下压定位，确保工件位置不变，按照设定参数进行高压放电饱和和充磁，同时检测系统实时监测磁感应强度，确保达到饱和和充磁状态，充磁的磁场强度可达4.0 T。

4. 分级退磁：根据材料类型自动切换退磁模式，矫顽力较高的磁性材料（钕钴永磁体^[3]）移送至C区的强退磁线圈，采用阶梯式逼近放电退磁（退磁率和退磁范围可自主设定调节）；矫顽力较低的磁性材料（铝镍钴永磁体^[4]）移送至D区弱退磁线圈，采用线性精准退磁，动态调节磁场参数，同时检测系统实时监测磁感应强度，确保退磁后磁场强度满足使用要求。

5. 360°全周磁场检测：机械臂将工件移送至F区，定位卡盘带动工件旋转360°，霍尔探头沿Z轴精准定位，采集工件磁气隙360°全周的磁场强度数据，生成直角坐标与极坐标曲线。

6. 下料与分选：机械臂将符合要求的部件送至合格品区，不合格品送至返修区，同时记录检测数据，自动生成生产报表，支持数据的溯源。

1.4 核心模块设计

1.4.1 机械执行系统

机械执行系统以6轴协作机械臂为核心，搭配多工位定位工装与丝杠驱动机构，可实现工件的精准抓取、移送与定位。6轴协作机械臂选用负载5 kg、重复定位精度 ± 0.02 mm的工业机械臂，末端配备弹性夹爪与真空吸附复合装置，适配不同尺寸的工件，可实现多工位间的快速切换与精准对接；各系统的定位工装根据工件的尺寸和需求特殊定制，检测工位配备X/Y/Z三维微调平台，调节精度0.001 mm，确保探头与工件气隙的精准对齐；充退磁与检测工位均采用高

精密滚珠丝杠，行程500 mm，运动速度0~5 mm/s可调，重复定位精度0.01 mm，满足工件压紧与探头定位的高精度要求。

1.4.2 磁场发生系统

磁场发生系统是产生充退磁磁场的核心模块，包括充磁系统、退磁系统和冷却系统。当输入电压220 V时，通过可调直流高压电源将电容组充电至1 500 V，放电开关导通后产生瞬时大电流，此电流脉冲在线圈内产生一个强大的磁场，该磁场使置于线圈中的磁性材料永久磁化。冷却系统主要采用水冷+风冷复合冷却方式，充退磁线圈内置水冷通道来控制线圈温度，设备内部配备轴流风机，实现空气循环散热，避免环境温度升高影响检测精度和工作效率。

在充磁过程中，线圈内径40 mm，磁场强度可达4.0 T，充磁磁场深度 ≥ 50 mm；储能电容容量6 000 μ F，耐压2 000 V，充电时长3~6 s，满足饱和充磁的能量需求；在强退磁过程中，由于磁性材料矫顽力较高，电压调节范围在150~1 500 V，磁场强度可达2.5 T，采用阶梯式间歇逼近退磁算法，通过5次左右试探放电，逐步逼近目标退磁率；在弱退磁过程中，由于磁性材料矫顽力较低，电压调节范围30~500 V，磁场强度为1 000 Gs，采用线性退磁算法，退磁精度约为 $\pm 1\%$ ；在整个退磁过程中，双阵列霍尔探头会实时采集工件的磁场数据，并与初始磁场参数对比计算退磁率和退磁范围，形成闭环控制，避免过度退磁或退磁不足等问题。

1.4.3 检测系统

检测系统包括视频识别系统和360°全周磁场检测^[5]系统，视频识别装置采用高清工业相机与高精度OCR识别算法相结合分方式，来实现工件序列号的识别和有无的判断，识别准确率达99.9%，同时配备多个接触式传感器，测量精度为1 μ m，可测量工件的平面度，避免装配干涉；360°全周磁场检测系统采用微型霍尔探头，检测量程0~1.0 T，测量精度0.001 mT，测量过程中旋转电机伺服系统带动工件360°旋转一周，采样点数为3 600个，确保磁场数据的全面采集；控制系统实时绘制磁场强度的直角坐标曲线（随旋转角度的变化趋势）与极坐标曲线（环形分布），自动计算最大值、最小值和平均值等磁场参数，检测结果自动保存并关联工件的序列号。

1.4.4 控制系统

控制系统^[6]以MCU为核心，搭配触摸屏与人机交互界面，实现了全流程自动化控制与数据管理，自动控制程序包含有序控制程序、电容分级充电子程序、

磁性检测子程序、RS485/CAN 接口程序和过压过流保护等。软件功能包括工艺管理、运动控制、数据处理等核心模块，工艺管理模块支持用户自定义设定退磁率、充磁电压等参数；运动控制模块可实现机械臂、丝杠、旋转电机的协同动作；数据处理模块存储充磁电压和磁场强度等重要参数，支持按序列号查询历史记录；控制算法采用电压—磁场反馈的双闭环控制算法，充磁阶段通过电压反馈调节储能电容电压，确保饱和充磁，退磁阶段通过磁场反馈动态调整放电参数，提升退磁精度和退磁效率。

2 自动充退磁系统关键技术点与创新

2.1 分级退磁技术

针对不同矫顽力的磁性材料，采用强—弱双退磁线圈和差异化算法相结合的分级退磁技术，对于矫顽力较高的钕钴材料永磁体，退磁过程是非线性的，采用强退磁线圈与阶梯式间歇逼近的算法，通过多次小幅度放电逐步调整磁场强度，避免一次性的强磁场导致过度退磁或退磁不足等问题；对于矫顽力较低的铝镍钴材料永磁体，退磁过程是线性的，采用弱退磁线圈与线性退磁算法，精准控制退磁的磁场强度和衰减速率，该技术解决了传统退磁模式单一、适配性差等问题，实现了不同磁性材料的高精度退磁。

2.2 360° 全周磁场检测

传统气隙的检测多为单点或多点抽样测量，难以反映气隙磁场的分布均匀性。本系统采用旋转采样与高密度数据采集技术相结合的方式，实现了 360° 全周磁场检测。旋转电机伺服系统带动工件匀速旋转，旋转角度的精度为 0.1° ，确保采样点均匀分布，霍尔探头^[7]沿 Z 轴精准定位，采样步距 0.1° ，单工件采样点数 3 600 个，全面覆盖环形气隙，为参数的处理计算提供更加全面的数据。

2.3 全流程自动化

通过 6 轴机械臂与多工位协同控制，实现从上料、充磁、退磁、测量和下料的全流程无人化操作，减少人工干预导致的误差，单工件全流程处理周期不超过 3 分钟，实现了各工序间的高效衔接，有效提高了工作效率。

3 自动充退磁系统性能测试

本文对自动充退磁系统进行了设计和构建，如图 2 所示。自动充退磁系统满足指标要求，分别取 20 个钕钴和铝镍钴磁性材料的精密部件进行充退磁和检测等全流程操作，部件合格率 100%，单件整体流程时间平

均约 2.5 min，降低了生产成本，实现了全流程自动化操作，大大提高了生产效率。

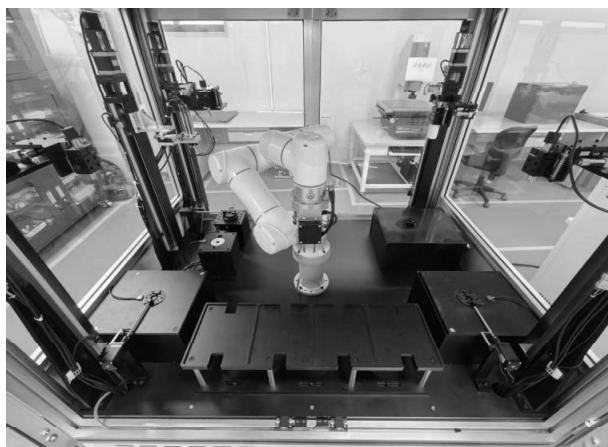


图 2 自动充退磁系统图

4 结束语

本文研发的精密磁性部件自动充退磁系统，采用充磁线圈与双退磁线圈的差异化设计，结合闭环控制算法，实现了不同磁性材料的精准充退磁；360° 全周磁场检测技术实现了环形磁场的全面采集，为磁性能的一致性提供可靠保障；6 轴机械臂与多工位协同控制实现了全流程自动化，单工件处理周期约 2.5 min，大大提高了生产效率。未来可进一步优化控制算法，实现工艺参数的智能优化与预测，提升磁性能的调控精度，同时针对异形复杂的精密部件引入机器视觉定位技术，以提升异形工件的定位精度与检测覆盖率。

参考文献：

- [1] 白冰,李村,史阳,等.小量程高标度因数石英谐振加速度计研究[J].导航与控制,2025,24(Z1):65-72.
- [2] 魏彬,丁文晖,陈定定,等.基于 CMC 芯片的充退磁控制器设计[J].仪器仪表标准化与计量,2024(05):21-23,45.
- [3] 董创辉,刘雷,王思迪,等.烧结 2:17 型钕钴永磁材料力学性能研究进展[J].稀土,2025,46(03):39-50.
- [4] 刘悦卿,赵江涛,王凤青,等.铝镍钴永磁材料的研究进展[J].材料导报,2024,38(23):116-125.
- [5] 彭程远.磁性材料磁场检测成像系统关键技术研究[D].深圳:深圳大学,2023.
- [6] 卢浩.磁场调制型双馈无刷混合励磁电机控制系统研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [7] 周萍.特斯拉计探头自动精准定位和校准系统[J].上海计量测试,2020,47(01):37-38.