

电机定子绕组嵌线工艺改进与效率提升研究

刘茂飞

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：电机定子绕组嵌线过程中存在作业节拍不均、人工依赖度高及嵌线一致性不足等情况，导致生产效率偏低且质量波动明显。通过对嵌线工装结构优化、工序节拍重组及半自动辅助装置引入，对关键定位与导向方式进行改良，强化标准化作业控制，使嵌线过程连续性提升，操作动作简化，装配偏差降低。改进后整体生产效率显著提高，产品一致性与稳定性同步增强。

【关键词】：定子绕组；嵌线工艺；工装优化；生产效率；工艺改进

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.026

引言

电机制造环节中，定子绕组嵌线属于关键成型工序，其操作精度直接影响电机运行性能。传统嵌线过程多依赖人工经验完成，动作节拍差异明显，嵌线阻力与定位偏差问题频繁出现，导致生产节奏难以稳定维持。在连续生产场景下，工序衔接不顺畅、工装适配性不足等情况进一步放大效率损耗。通过对嵌线路径、工装结构及作业方式进行针对性调整，可在保证嵌线质量一致性的前提下优化操作流程，使关键动作趋于标准化，从而改善整体生产节拍并提升产线运行稳定性。

1 定子绕组嵌线流程基础特征

1.1 绕组结构组成关系

定子绕组由槽内导体、端部连接段及绝缘体系共同构成，结构上呈现多层嵌套与空间交错特征。槽内导体通常按分布式或集中式排布方式进行排列，导线在槽内需保持紧密填充状态以提升槽满率，同时避免局部应力集中。端部连接段在空间上形成复杂弯折路径，对导线延展性与成型一致性提出较高要求。绝缘结构覆盖导体表面及槽壁区域，通过层间隔离实现电气安全边界控制。多材料协同结构使绕组整体在电磁性能与机械稳定性之间形成平衡关系，结构设计需兼顾电流密度分布与热扩散路径优化，使整体绕组在高负荷运行条件下保持稳定电气特性。

1.2 嵌线作业步骤构成

嵌线作业流程由导线预整形、槽口引导、分层嵌入及端部整理等环节构成，各环节之间存在严格的工序衔接关系。导线在进入槽体前需完成几何形态预处理，使其弯曲半径与槽型结构匹配，降低嵌入阻力。槽口引导阶段通过定位装置对导线进入角度进行约束，确保导线沿预定轨迹进入槽内^[1]。分层嵌入过程中需控制导线排列顺序与紧密程度，避免交叉错位影响槽内填充均匀性。端部整理环节对绕组外露部分进行路径调整与应力释放处理，使端部结构保持一致的空间形态。各步骤之间通过连续化节拍控制实现衔接优化，使整体嵌线过程在有限时间内完成稳定闭环。

1.3 关键工装设备配置

嵌线工装体系主要由定子定位装置、导线成型辅助机构及槽口导向组件构成，各部分在空间结构与功能分配上具有明确分工。定子定位装置通过多点约束结构实现定子铁芯轴向与径向固定，确保嵌线过程中结构不发生位移偏差。导线成型辅助机构通过可调节曲面或模具对导线预弯形态进行控制，使导线进入槽体时具备稳定几何形态。槽口导向组件采用渐进式引导结构，对导线进入路径进行逐级约束，降低嵌入过程中的摩擦阻力与局部卡滞现象。整体工装配置强调模块化与可调节性设计，通过结构参数的快速切换适配不同规格定子需求，同时提升装配过程的重复定位精度与作业一致性。

2 嵌线作业效率受限因素识别

2.1 人工操作依赖程度过高

嵌线过程在执行层面对手工操作具有较高依赖性，关键工序如导线整形、入槽控制及端部调整均由人工完成，动作一致性受操作习惯影响明显。不同批次作业中，施力方向与力度控制存在离散差异，导致导线在槽内排列紧密程度不均。人工判断导线位置的方式缺乏实时量化反馈机制，使得微小偏差难以及时修正。长时间连续作业状态下，操作节奏稳定性下降，进一步放大节拍波动。标准化动作缺乏系统约束条件支撑，使工序执行过程难以形成统一路径控制结构，从而降低整体作业稳定性与重复精度。

2.2 工序节拍衔接不均衡

嵌线各分段工序在时间分配上呈现不均衡状态，预处理阶段与嵌入阶段之间存在等待间隙，导致整体节拍链条断续。导线成型、定位对齐与入槽执行之间缺乏同步化控制机制，使部分环节形成瓶颈积压。不同工位之间信息传递主要依赖人工确认方式，节拍调整滞后性较强，无法实现动态匹配^[2]。局部工序负荷集中现象明显，导致部分操作节点超负荷运行，而其他节点处于低负载状态。节拍分配缺乏统一节奏规划，使整体生产难以形成连续流动状态，影响单位时间内嵌线完成数量。

2.3 定位导向精度不足

嵌线过程中定位与导向系统对导线进入轨迹控制能力有

限,槽口引导结构对导线中心线约束不足,容易产生偏移进入情况。定子槽体与导线之间的配合间隙控制精度不足,使导线在进入阶段存在微小摆动空间。导向装置在长期使用过程中存在磨损效应,导致几何基准逐渐偏离设计状态,进一步降低定位一致性。缺乏实时校正机构使偏差无法在嵌入过程中动态修正,累积误差在后续工序中逐步放大。导向路径设计缺乏分级约束结构,使导线进入过程依赖单一引导点控制,整体稳定性不足,影响嵌线排列均匀性与结构一致性。

3 嵌线流程优化路径设计

3.1 嵌线工装结构改良设计

嵌线工装结构优化以模块化重构与多自由度调节为核心方向,通过对定子固定、导线成型及槽口辅助结构进行一体化布局调整,使各功能单元之间形成协同支撑关系。定子夹持机构采用多点柔性约束结构,在保证刚性定位的基础上引入微调补偿能力,以适应不同尺寸定子的装配需求。导线成型模块通过曲面导向轨迹优化,使导线在进入槽体前完成连续弯曲过渡,减少应力突变区域。槽口辅助结构采用分级导入通道设计,使导线进入过程由粗引导逐步过渡至精定位状态,降低局部摩擦集中现象。整体工装框架通过轻量化材料与高刚性支撑结构结合方式提升稳定性,同时在关键受力节点设置可更换耐磨组件,使设备在长期运行中保持几何精度一致性,适应高频次嵌线作业需求。

3.2 作业节拍重新匹配调整

嵌线作业节拍优化以流程再分配与动态负载均衡为核心,通过对各工序时间占比进行重新划分,实现连续化作业结构构建。导线预处理、定位调整及嵌入执行环节在时间维度上进行解耦重组,使各阶段形成并行与串行结合的执行模式。关键工序节点引入缓冲调节区间,用于吸收前后工序波动带来的节拍偏移,从而减少等待时间积累。工序之间通过标准化节拍单元进行统一约束,使各作业动作按照固定时间基准运行,降低人为节奏差异影响^[3]。负载分布通过任务拆分方式实现均衡配置,使高强度操作环节与辅助操作环节形成交替运行结构,避免局部瓶颈集中。整体节拍体系在逻辑上形成闭环控制结构,使嵌线过程由离散操作模式转变为连续流动执行状态,提高单位时间内工序完成密度。

3.3 导向定位系统强化设计

导向定位系统优化以多级约束与动态校正机制为核心,通过对导线进入路径进行分段控制,实现高精度轨迹引导。入口导向结构采用渐进式收缩通道设计,使导线在初始阶段获得宽容度较高的引导空间,随后逐步进入高精度约束区域。中间导向单元引入自适应调节结构,可根据导线直径及刚性变化进行微量位置补偿,使导线中心线始终保持在预定路径范围内。末端定位区域采用高刚性限位结构,对导线最终入槽位置进行锁

定控制,减少回弹与偏移现象。系统内部设置反馈检测单元,对导线运行轨迹进行实时监测,并通过机械补偿机构对偏差进行动态修正。整体导向体系通过分级控制与闭环调节相结合方式,提高嵌线路径稳定性,使导线在复杂空间运动过程中保持一致进入状态,增强槽内排列均匀性与结构一致性。

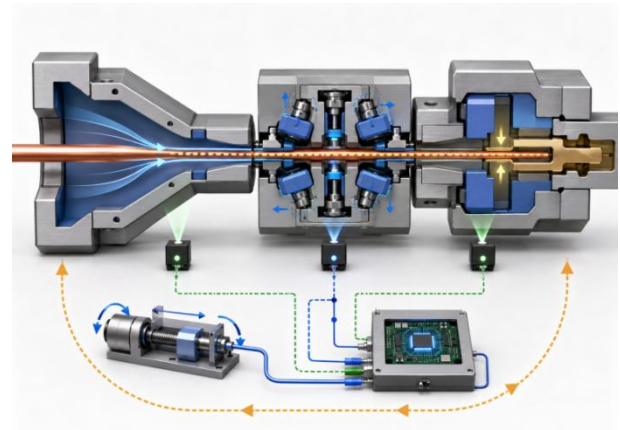


图1 多级闭环导向定位系统示意图

4 效率提升执行方案细化

4.1 半自动辅助装置应用方式

半自动辅助装置的应用以机械协同替代重复性人工动作作为核心路径,通过动力驱动单元与定位控制单元的组合,实现嵌线关键环节的连续化执行。导线输送环节采用恒速驱动结构,使导线进入槽口过程保持稳定张力输出,减少因手动牵引造成的波动。嵌入阶段引入分段推进机构,通过可控推送行程实现导线逐层进入定子槽体,使导线排列过程具有可预测运动轨迹。端部处理单元设置自适应压紧结构,对绕组外露部分进行均匀整形,避免局部应力集中。装置整体控制系统通过参数化设定方式实现不同规格定子的快速切换,使设备具备柔性适配能力。机械执行与人工辅助操作形成分层协同结构,使高强度重复动作由设备承担,关键判断节点保留人工确认接口,从而提升整体作业连续性与稳定性。

4.2 标准动作作业规范制定

标准动作作业规范构建以动作分解与参数固化为核心,通过对嵌线全过程进行微动作拆解,实现操作路径的统一化表达。导线预处理阶段对弯曲角度、张力范围及长度控制设定明确参数区间,使导线初始状态具备一致性基础。入槽操作阶段对手部动作轨迹、施力方向及推进速度进行标准限定,使导线进入过程保持稳定路径控制^[4]。嵌入完成阶段对压实顺序与排列方式进行结构化定义,使槽内导线分布形成均匀排列状态。规范体系通过动作时间窗设定方式对各步骤执行节奏进行统一约束,使操作过程具备可量化执行标准。配合可视化指导模块与反馈提示机制,使操作过程偏差能够在执行阶段即时识别并修正,从而减少不确定性因素对作业质量的影响,提高整体

一致性与重复精度。

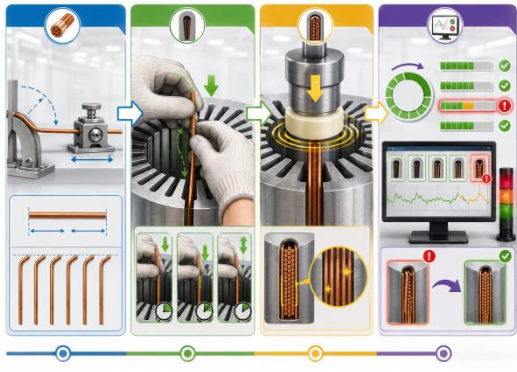


图2 嵌线工艺动作分解与控制规范

4.3 在线检测协同控制机制

在线检测协同控制机制以实时数据采集与动态反馈调节为核心,通过多维度传感单元对嵌线全过程进行持续监测。槽内填充状态通过结构感知装置获取分布信息,实现导线排列密度与位置偏差的实时识别。导线张力与运动轨迹通过检测模块进行连续采样,使导线进入状态保持可追溯数据记录。系统控制单元基于检测结果进行动态参数调整,对推进速度、夹持力度及导向角度进行微调修正,使嵌线过程始终维持在稳定控制区间。数据处理模块通过多点信息融合方式降低单一信号误差影响,提高判断准确性。检测与执行系统之间形成闭环控制结构,使偏差在产生初期即被修正,避免累积放大。整体机制通过数字化监控与机械执行协同运行,实现嵌线过程的高精度控制与稳定运行。

5 优化实施后的运行表现

5.1 单件作业时间变化对比

嵌线流程优化后,单件作业时间结构发生明显重构,主要体现在导线预处理、入槽执行及端部整理三个关键阶段的时间压缩。预处理环节通过半自动成型装置介入,使导线弯曲与张力调整过程实现连续化控制,减少多次手动修正带来的时间损耗。入槽阶段依托分级导向结构与推进机构协同运行,使导线进入路径更加顺畅,减少卡滞与回退操作,使有效作业时间占

比提升。端部整理过程通过标准化压紧机构完成统一处理,避免重复校正步骤。整体时间分布由离散型操作结构向连续流式结构转变,工序之间等待间隔显著缩短,单位产品加工周期呈现稳定下降趋势,时间波动范围收敛明显。

5.2 产品不良比例变化情况

优化措施实施后,产品不良比例呈现结构性下降趋势,不良类型主要集中于槽内排布不均、绝缘层局部损伤及端部形态偏差等方面。导向定位系统精度提升使导线进入轨迹稳定性增强,槽内排列均匀性得到改善,减少交叉与挤压现象。在线检测机制对嵌线过程进行实时监控,使局部异常状态能够在形成初期被识别并修正,降低缺陷累积概率^[9]。工装结构优化后受力分布更加均匀,使绝缘层受压不均问题得到控制。标准化作业规范对操作动作进行约束,使人为操作差异显著减少。不良产生路径被分段截断,缺陷从源头控制到过程干预形成连续治理链条,使整体质量稳定性显著提升。

5.3 产线运行稳定程度提升

产线运行稳定性提升体现在节拍一致性增强、设备协同效率提高及工序衔接顺畅度改善等多个维度。节拍系统通过重新匹配与动态平衡机制,使各工序运行节奏趋于统一,避免局部拥堵或空转现象。半自动辅助装置与人工操作形成分层协同结构,使设备负载分布更加均衡,减少因人为波动导致的运行中断。导向与检测系统的闭环控制机制使异常状态响应速度加快,运行偏差能够快速修正,降低系统震荡幅度。工装结构模块化设计提升换型效率,使不同规格生产切换过程更加平滑。整体运行过程由间歇性推进转变为连续稳定输出状态,产线波动范围明显收敛,设备利用率与连续作业能力同步提升。

6 结语

电机定子绕组嵌线工艺优化与效率提升在工装结构重构、节拍控制优化及导向系统强化等方面形成协同改进路径,作业连续性与过程稳定性得到同步增强,嵌线质量波动范围明显收敛,生产节奏更加均衡,整体制造效率与一致性水平显著提高,为后续高精度电机批量化生产提供稳定工艺基础。

参考文献:

- [1] 陈丹.同步发电机定子绕组短路故障暂态特性仿真研究[D].南昌大学,2025.
- [2] 沈鹏,柏沁,郭连恒,等.高海拔冲击式大型水轮发电机定子绕组防晕性能研究[J].发电设备,2025,39(6):355-361.
- [3] 徐世武,李强,李忠田.HXD3B 型机车牵引电动机定子绕组烧损故障的分析与改进[J].电气应用,2025,44(10):23-27.
- [4] 曹改兰,适用于自动嵌线的电机不等匝绕组的嵌线工艺.山西省,山西电机制造有限公司,2023-12-22.
- [5] 周锦添.管状电机细长孔定子嵌线工艺研究[J].工程技术研究,2023,8(23):122-124.