

电机绕组嵌线工艺质量控制方法分析

周礼菊

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：电机绕组嵌线工艺作为电机定子制造关键工序，在制造过程中的质量稳定性直接影响绝缘性能与运行可靠性。嵌线过程中易出现导线绝缘层损伤、槽满率不均、定位偏差及工艺一致性不足等问题，在自动化与人工协同条件下尤为明显。构建工艺参数控制、工装定位优化、在线检测与分段质量检验相结合的质量控制体系，引入过程监测与反馈调节机制，并强化线材预处理与嵌线力控制。有效降低绝缘破损率，提高槽满率均匀性与生产一致性，增强质量波动控制能力，提升电机运行稳定性与成品合格率。

【关键词】：电机绕组；嵌线工艺；质量控制；工艺优化；在线检测

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.014

引言

电机制造领域中，绕组嵌线工艺决定定子成形质量与电磁性能表现，是影响整机可靠性的核心工序之一。嵌线过程涉及导线排列、绝缘保护与槽内填充等多环节协同，对工艺参数稳定性与操作精度要求较高。实际生产中易出现绝缘磨损、嵌线偏移及局部应力集中等现象，导致性能波动。通过工装设计优化、参数约束与检测反馈机制构建，可提升过程一致性与成品稳定性，为高性能电机制造提供可靠工艺支撑。

1 嵌线工序质量偏差成因与运行特征剖析

电机绕组嵌线工序在实际生产过程中呈现出多工位协同与高精度嵌装的工艺特征，导线在槽内的排列状态受机械张力、绝缘包覆状态以及嵌线工具运动轨迹共同影响，微小参数波动即可引起局部应力集中与绝缘层微损伤，进而表现为嵌线紧密度不均与槽内填充不稳定现象。在高速嵌线设备运行条件下，导线进入定子槽口时受到瞬时冲击力作用，若张力控制系统响应滞后，容易产生导线回弹或偏移，导致槽楔压紧状态失衡，同时不同批次线材表面涂层摩擦系数差异也会加剧嵌线轨迹偏差，使得局部槽满率出现离散分布。

在工艺执行层面，嵌线模具与定子铁心槽形匹配精度不足时，会造成导线折角应力异常集中，尤其在多层嵌线结构中，内外层导线受力路径差异明显，容易出现绝缘膜擦伤与局部击穿隐患^[1]。设备端伺服控制参数设定不合理，会导致嵌线速度与推进节拍不协调，使导线在槽内堆叠顺序发生紊乱，形成局部空隙或过度压缩区域，影响整体电气间隙均匀性。生产环境因素同样对嵌线质量形成影响，温湿度变化会改变绝缘漆膜柔韧性及摩擦特性，使导线在嵌入过程中滑移阻力发生波动，进而影响定位精度。不同操作节拍下人工辅助干预程度不一致，也会使嵌线过程稳定性下降，表现为同一批次产品槽满率与嵌线密实度存在离散差异。

2 嵌线过程精细化控制与协同优化路径

嵌线过程精细化控制与协同优化是解决电机绕组嵌线质

量波动、提升工艺一致性的核心核心路径，该体系围绕设备运行控制、工装结构优化、材料工艺适配、全系统协同调度四大维度搭建，打破传统单一参数调控的局限性，构建多要素动态耦合的精细化工艺管控模式，适配自动化嵌线与人工辅助嵌线的混合生产场景，有效解决导线绝缘损伤、槽满率不均、嵌线轨迹偏移等核心质量问题。嵌线工艺的核心难点在于导线柔性成形与刚性槽体装配的动态匹配，线材易受张力、摩擦力、机械冲击、环境工况等多因素干扰，任意环节参数失衡都会引发成品质量偏差，因此必须通过多维度协同优化，实现全流程可控、可调、可稳定复刻^[2]。

在设备动态控制与速度张力协同优化方面，针对嵌线全过程导线张力波动、瞬态冲击损伤、轨迹偏移等核心问题，搭建闭环张力自适应调节系统。传统嵌线设备多采用固定张力参数设置，无法适配线材嵌装过程中的阻力变化，导线入槽、槽内推进、末端收束各阶段受力差异较大，易出现张力过大拉损绝缘层、张力过小导致线材松散堆叠的问题。对此，可依托高精度张力传感器、伺服驱动系统与 PLC 运动控制器搭建实时调控体系，传感器全程采集线材张力数据，毫秒级反馈至控制系统，伺服电机根据实时阻力动态调节送线速度，实现导线送进节拍与定子槽口接收节奏的精准同步，彻底消除线材回弹、偏移、松弛等缺陷。同时采用分段式速度规划算法，针对性适配不同嵌线工况：导线入槽阶段降低运行加速度，缓冲槽口对线材的瞬时冲击力，避免漆膜擦伤；槽内直线推进阶段保持匀速稳定运行，保障线材排列规整、无错位挤压；尾端收束阶段缓慢减速、平稳卸力，杜绝末端线材翘起、应力堆积问题。通过精细化速度与张力匹配控制，最大限度降低机械动态载荷对绝缘结构的破坏，保障单根导线嵌装质量的稳定性。

在工装结构优化与机械精度适配方面，聚焦设备工装、定子铁心与绕组线材之间的匹配误差、结构干涉及应力集中等核心问题，通过结构改良、仿真优化与常态化精度校准，全面提升工装系统的适配性与稳定性，从机械结构层面抑制嵌线质量缺陷。嵌线针具、导向机构及槽楔压装模具作为直接接触漆包

线的核心工装部件,其几何精度、结构柔性及装配精度直接决定线材入槽轨迹、排列状态与槽内压实效果,是影响绕组嵌线一致性的关键机械要素。传统嵌线设备多采用刚性导向结构,容错性较低,针对线径公差、铁心槽形微小加工误差适配性较差,极易造成线材单边摩擦、局部挤压、漆膜磨损等隐性缺陷。为此,优化设计多自由度浮动补偿导向结构,可根据实际线径偏差及铁心槽形误差进行自适应微量调整,使不同规格漆包线始终保持标准入槽轨迹,有效规避偏磨、挤压变形等问题。针对多层绕组嵌装难度大、层间易错位的工艺痛点,在绕组层间增设专用绝缘隔离导向片,精准约束内外层导线的堆叠走向,避免导线交叉挤压、层间偏移与局部空隙过大等现象,显著提升槽内填充均匀性与绕组结构规整度。同时引入有限元仿真技术,对高速嵌线工况下的工装受力形变、设备机架振动及结构位移进行模拟分析,针对性优化工装固定结构与设备刚性布局,将动态运行机械变形量控制在微米级,有效解决设备振动、结构微变形引发的嵌线偏移、压实度不均等问题。

在材料适配与工艺参数动态调节方面,立足漆包线、槽绝缘材料的物性批次差异与环境适应性特征,建立材料特性与工艺参数双向联动的动态匹配调控机制,从物料适配层面消除批次性质量波动,解决传统固定工艺参数无法适配材料差异的行业痛点。实际生产过程中,不同冶炼、生产批次的漆包线存在固有物性偏差,具体体现在漆膜厚度均匀性、表面摩擦系数、线材柔韧性及抗拉强度等关键指标上,同时车间温湿度的动态变化会进一步改变绝缘材料的力学性能,大幅加剧嵌线工艺不稳定性。其中低温工况下漆包漆膜脆性显著提升,嵌线弯折、挤压过程中极易出现微裂纹、局部开裂等绝缘缺陷;高温高湿环境下线材表面吸附水汽,摩擦阻力大幅增加,线材滑移不畅,易出现嵌线卡顿、排列错乱、压实不均等质量问题。

针对上述问题,首先优化线材前置预处理工艺,对漆包线表面开展标准化均匀润滑处理,严格把控润滑介质涂抹厚度、均匀度与附着稳定性,有效弱化不同批次线材的表面摩擦系数离散度,让线材在高速嵌线滑移过程中受力均匀、滑动顺畅,保证全线生产线材滑移状态高度统一。其次搭建嵌线压力、定子槽型尺寸、槽绝缘厚度三位一体的动态映射模型,摒弃传统单一固定压装参数的管控模式,可根据不同规格定子铁心的槽深、槽宽以及绝缘纸实际厚度,智能匹配最优压装力度与压实行程,精准规避压力过大造成的绝缘层压溃、漆膜破损,以及压力过小引发的槽内空隙残留、绕组密实度不足等问题^[3]。

与此同时,系统增设高精度环境温度湿度补偿控制模块,实时采集生产现场环境数据,动态迭代修正嵌线运行速度、线材张力、槽楔压装压力等核心工艺参数,精准抵消温湿度变化对材料力学性能与滑移特性的负面影响。通过材料预处理、参数动态匹配、环境智能补偿的多重管控,有效弱化物料批次、工况环境带来的工艺偏差,全面实现全季节、多批次绕组嵌线生

产的工艺稳定性与质量一致性。

在系统级全流程协同优化方面,依托数字化监测与智能调度技术,可实现多工序、多设备的一体化协同管控,构建全覆盖、可反馈、可迭代的闭环工艺优化体系,从系统层面根除传统嵌线工艺碎片化管控带来的质量波动问题。电机绕组嵌线成品质量并非由单一嵌线工序独立决定,而是受绕组预成型、线材输送、自动嵌线、槽楔压装、端部整形修整等前后关联工序的协同精度共同制约,各工序衔接间隙大、节拍不匹配、参数不统一,极易造成线材二次松弛、嵌线位置偏移、绕组结构微变形等隐性质量缺陷,大幅降低批次生产一致性。为此,工艺优化过程中需搭建统一的数字化工艺节拍管控平台,打通送线设备、嵌线主机、压槽装置、整形设备之间的数据链路,实现各工序设备的数据互通与同步联动,让绕组预成型、精准嵌线、槽内压实、端部整形形成一体化连续作业链路,有效减少工序间断、设备待机、人工转接带来的工艺扰动,从流程层面规避线材回弹松散、排列错位、结构变形等常见问题。

同时,在生产线关键节点布设多维度数据采集模块,全程实时采集嵌线动态张力曲线、设备运行速度、压装位移行程、槽内填充密实度等核心工艺数据,实现嵌线全过程数字化动态溯源。依托大数据分析工艺预判模型,对生产过程中的张力突变、嵌线轨迹偏移、局部压实不均、速度波动等异常工况进行实时识别、智能分析,自动触发参数微调与工况修正指令,实现问题前置预警、过程动态纠偏,避免微小工艺误差累积形成批量质量问题。针对车间多工位并行生产的作业模式,通过平台负载均衡调度与全工位节拍同步控制,统一各生产工位的工艺参数、操作规范与运行节奏,最大程度消除人工操作干预差异、设备个体运行偏差、工位环境差异带来的成品质量离散性。通过设备运行、工装精度、物料特性、生产环境、工序衔接的多维协同优化,系统性解决传统人工嵌线与半自动嵌线存在的随机性、偶然性质量缺陷,在保障高效生产节拍的前提下,显著提升定子绕组嵌装精度、绝缘结构完整性与槽满率均匀性,为成品电机电磁性能稳定、运行安全可靠奠定坚实的工艺基础。

3 嵌线质量稳定提升与成品一致性保障机制

电机绕组嵌线成品的批次一致性与运行稳定性,是高性能电机批量生产的核心考核指标,也是规避电机运行发热、绝缘击穿、电磁噪音超标、绕组电阻失衡等故障的关键保障。相较于传统人工抽检、事后整改的被动质控模式,现代化嵌线工艺需搭建全流程、数字化、闭环式的质量稳定提升与一致性保障机制,依托全过程质量数据闭环管理体系,在稳定生产节拍的基础上,通过多维度参数融合、分层检测校验、智能参数调节、全链路追溯管控,全方位抑制工艺质量波动,彻底解决人工操作随机性、设备工况漂移、物料批次差异带来的成品离散性问题,实现嵌线质量从“事后补救”向“事前预防、事中调控”的转

变。绕组嵌线成形过程对工艺参数高度敏感,导线张力细微波动、槽内压实度不均、绝缘层微小损伤,都会累积形成成品性能偏差,因此必须依托数字化传感与智能检测技术,构建全工序动态监测体系,为成品一致性管控提供精准数据支撑。

为实现嵌线状态的实时可控,本工艺体系引入在线视觉识别与电气性能预判融合模型,打破传统单一物理检测的局限性。在嵌线全过程中,通过高精度张力传感器、位移检测模块、高速工业相机组成多维度感知系统,实时采集线材张力变化曲线、嵌线推进位移、导线入槽轨迹、槽内堆叠状态等核心数据,完成嵌线工艺的数字化动态映射。系统可实时比对标准工艺模型参数,快速识别导线偏移、局部堆叠、张力异常、线材翘起等微小偏差,一旦监测到超标工况,立即触发控制系统修正指令,动态调整嵌线速度、张力与推进力度,在缺陷萌芽阶段完成整改,有效避免微小工艺偏差累积为结构性质量问题。

在质量检测体系搭建上,采用分层式递进检测结构,构建“初检控缺陷、中检控精度、终检控性能”的逐级约束机制,实现嵌线质量全维度量化管控。初级入槽检测聚焦工序源头质量,以高频次图像采样与智能算法识别为核心,针对导线入槽过程中的绝缘层磨损、漆膜破损、局部挤压划痕、应力集中痕迹等微观缺陷进行精准捕捉,通过图像边缘轮廓提取、像素比对、缺陷特征匹配技术,识别微米级工艺瑕疵,杜绝带缺陷线材进入后续工序,从源头降低绝缘故障风险。中间槽体检测依托激光扫描与三维点云重构技术,对定子槽内导线填充结构进行全方位建模,精准量化槽满率分布、局部空隙率、导线压实均匀性等核心指标,直观排查局部疏松、过度压实、堆叠紊乱等问题,确保每一个定子槽的填充状态均符合工艺标准,保障绕组电磁结构的均匀一致性。末端成品检测实现结构质量与电气性能的联动校验,通过绕组直流电阻测试、绝缘电阻检测、相间平衡性测试,精准判定绕组电气性能稳定性,将槽内填充精度、导线排列规整度等结构指标,与绝缘性能、导电性能等电性能指标深度绑定,实现质量检测的全面化、精准化,杜绝结构合格但性能超差的隐性质量问题。

为适配不同物料、不同工况的生产需求,体系搭建数据驱

动的工艺参数自适应调节机制,解决物料批次差异与设备工况漂移引发的质量波动。依托生产历史海量工艺数据,构建嵌线工艺参数回归模型,梳理线材线径、漆膜厚度、材质硬度与嵌线速度、推进压力、张力阈值的关联规律,系统可根据不同批次线材的物料参数,自动匹配最优工艺控制区间,实现物料与工艺的精准适配^[1]。同时在设备控制系统中引入模糊逻辑调节算法,针对设备长期运行产生的微小机械扰动、张力漂移、节拍偏差进行平滑处理,弱化工况突变对嵌线质量的影响。针对多规格定子切换生产的场景,专门设置工艺缓冲过渡区间,通过渐进式参数调整模式,避免参数骤变导致的导线挤压、轨迹偏移、绝缘损伤等问题,保障不同规格产品生产过程的工艺稳定性,大幅提升生产线柔性生产能力与成品一致性。

在落地执行与长效管控层面,建立全链路追溯与设备精度保障机制,夯实成品批次稳定性基础。搭建生产单元协同追溯系统,将每台定子嵌线过程的关键工艺参数、实时监测数据、各阶段检测结果进行绑定存储,形成唯一质量追溯档案,实现质量问题可定位、可溯源、可整改,为工艺迭代优化提供数据支撑。同时将设备维护校准与工艺稳定性评价深度结合,制定周期性精度校准方案,定期检测嵌线针具磨损量、导向机构配合间隙、压装模块运行精度等核心参数,及时修整或更换损耗部件,确保设备机械精度始终处于受控标准区间。针对多工位并行生产模式,通过统一节拍同步控制与负载均衡调度技术,平衡各工位的生产负荷与工艺参数,消除工位间操作差异、设备差异、等待时间差异带来的质量偏差,让同一批次、不同工位产出的成品质量趋于一致,有效收敛批次离散性,全面提升电机绕组嵌线工艺的稳定性、一致性与可靠性。

4 结语

电机绕组嵌线工艺在多环节协同控制与参数约束条件下呈现出稳定性提升趋势,质量一致性依托检测反馈与过程调节形成闭环结构,嵌线精度与绝缘完整性得到同步强化,成品批次间离散性明显收敛,工艺输出稳定性增强,设备运行与材料匹配效率同步改善。

参考文献:

- [1] 黄娜,程剑,汤黎明.湿绕组电机核主泵飞轮假想裂纹扩展分析[J].上海大中型电机,2025,(3):1-4.
- [2] 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.
- [3] 才家刚.交流电机绕组绕线、嵌线和接线工艺[M].机械工业出版社:2023.