

直驱电机线圈绕组自动化工装夹具的设计与应用研究

吴宜华

江西汉驱智能科技有限公司 江西 赣州 341100

【摘要】直驱电机因具有高精度、高效率和低噪声等优势，被广泛应用于数控机床、机器人及精密制造领域。针对传统人工绕线效率低、精度不稳定及工装夹具适应性差等问题，设计了一种适用于直驱电机线圈绕组的自动化工装夹具。该夹具结合模块化结构与智能控制，实现线圈绕制过程的自动定位、张力调节与快速更换，提高了绕组一致性和生产效率。通过对夹具结构参数与工艺路径的优化，验证了设计的可行性和稳定性。实验结果表明，该自动化工装夹具在保障线圈几何精度和匝间紧密度的同时，显著提升了生产自动化水平，为直驱电机线圈制造的标准化与智能化提供了有效支撑。

【关键词】直驱电机；线圈绕组；自动化；工装夹具；精度控制

DOI:10.12417/2705-0998.25.19.064

引言

直驱电机以其高动态响应和无传动间隙的特性，已成为高端装备制造领域的重要动力源。线圈绕组作为直驱电机性能的核心决定因素，其成形质量直接影响输出扭矩与运行稳定性。随着自动化制造技术的不断发展，传统依赖人工操作的绕线方式已难以满足精密生产的需求。开发高效率、高精度的自动化工装夹具成为提升电机制造水平的关键环节。本研究从夹具结构设计与控制原理出发，探讨一种能够适应多规格绕组的自动化工装系统，为直驱电机的高质量制造提供技术支撑。

1 直驱电机线圈绕组工艺现状与存在问题

直驱电机作为高精度传动系统的核心执行部件，其线圈绕组工艺直接决定了电机的性能稳定性与能量转换效率。在当前制造过程中，线圈绕制仍以半自动或人工操作为主，工艺过程对操作人员的经验依赖性较强，导致绕组紧密度、层间排列和几何精度难以保持一致。由于线圈截面尺寸较小且导线柔性大，在绕制过程中极易出现松散、重叠或匝间间隙不均的问题，从而影响电磁场分布和散热性能。传统工艺中工装夹具的设计多以固定式结构为主，适应性差、调节困难，在批量化生产中容易造成装配误差与尺寸偏差，无法满足直驱电机高精度和高一致性的制造需求。

随着高端制造装备对性能指标要求的提升，线圈绕组的复杂化趋势愈发明显，绕制形状逐渐从常规圆形转向扁平化、多层次交错和嵌套式结构。这种结构特征使得线圈在绕制过程中对张力控制、导线姿态与绕制轨迹的精确同步提出更高要求。传统夹具在工艺实施中无法实现动态张力调节和自适应定位，导致导线在高速绕制中出现滑移或应力集中现象，严重时甚至造成绝缘层损伤。部分工厂在追求生产速度的过程中忽视了绕组成形的一致性控制，使得不同批次线圈的电感参数存在偏差，影响电机整体的动态响应与扭矩线性度。这一问题在直驱电机等高性能应用领域尤为突出，成为制约产品质量提升的关键环节。

面对精度要求与生产效率并重的现实需求，传统绕线工艺与工装夹具设计暴露出技术瓶颈。当前使用的机械式夹持与定位机构缺乏柔性调节功能，无法针对不同规格或不同绕组结构的线圈实现快速换型与精确定位。同时，绕线机与工装之间缺乏信息交互机制，张力反馈与绕制角度控制仍依赖人工监测与经验调节，导致过程控制滞后、质量稳定性不足。此外，由于线圈材料特性对温度、张力及摩擦系数极为敏感，现有夹具结构在长时间运行中容易出现变形或磨损，进一步降低绕制精度。这些问题共同反映出传统工艺在智能化与自动化方向上的不足，急需一种能够实现高精度定位、智能张力调节与快速装夹的自动化工装夹具，以实现直驱电机线圈制造工艺的革新与优化。

2 自动化工装夹具在直驱电机线圈绕制中的设计思路

直驱电机线圈绕制的自动化工装夹具设计应以提高绕制精度、保证导线张力稳定及实现结构通用性为核心目标。在设计思路上，需充分考虑线圈形状复杂、导线直径细微、绕制节距严格的技术要求，将机械结构与电控系统有机结合，构建高效、可调且智能化的夹具系统。设计中引入模块化理念，使夹具能够根据不同规格的定子槽形及线圈结构灵活调整，通过可更换定位模块、可变形支撑机构和柔性导线导向装置，确保线圈在绕制过程中始终保持稳定几何形态。结构材料选用高强度铝合金与耐磨复合材料，以减轻夹具重量并提高抗振性能，从而满足高速绕线机的动态运行需求。

针对线圈绕制过程中的张力控制与导线导向精度，自动化夹具设计需配置闭环张力调节系统和多自由度定位机构。通过伺服电机与力矩传感器的协调控制，实现导线张力的实时反馈与动态补偿，保证绕线过程中导线应力均匀分布，避免因张力波动导致的匝间间隙不均。定位系统采用高精度滚珠丝杆与线性导轨传动，结合视觉检测模块对线圈姿态进行微调，以确保绕制路径与工艺轨迹完全一致。导线导向部件采用陶瓷喷嘴与自润滑滑环结构，可有效减少摩擦与静电积聚，提高导线表面

完整性。为实现多规格线圈的快速更换,夹具设计加入快拆式夹持装置与自动校准模块,使设备在不同产品间切换时无需复杂的人工调整,大幅提升生产节拍与重复定位精度。

在系统集成方面,自动化工装夹具应与绕线机控制系统形成协同运行机制,实现工艺参数的数字化设定与智能监控。通过嵌入式控制单元与总线通信模块,夹具能够与主控系统共享绕线张力、速度、转角等数据,实现过程可视化与工艺自学习功能。设计过程中充分考虑人机工程与维护便利性,在结构布局上预留监测窗口与传感接口,便于在线检测和系统扩展。控制软件采用参数化编程方式,使不同绕组工艺可通过数据输入直接生成运行指令,减少人为干预。整个系统以高稳定性、可重复性和柔性适配性为设计导向,形成从机械结构到智能控制的完整设计思路,为直驱电机线圈绕制的自动化与高精度制造提供技术支撑。

3 基于模块化与精密控制的自动化夹具结构优化

自动化工装夹具的结构优化以模块化设计与精密控制技术为核心,通过对机械结构、传动单元及控制逻辑的协同改进,实现线圈绕制过程的高稳定性与高一致性。在结构层面,采用分区模块化布局,将夹持、导向、张紧和检测等功能单元独立设计,使其既能独立运行又能协同配合。各功能模块之间通过标准化接口连接,保证安装精度和更换便捷性。夹具主体结构采用高刚性框架与多点支撑设计,能够有效抑制高速运行中的振动与位移误差。夹持机构运用双向压紧与自锁定位原理,通过气动与伺服双驱动模式实现线圈的自动装夹与同步校正。模块化结构的应用不仅提升了设备的适配性,也为不同规格线圈的快速换型提供了技术支撑,使生产线具备柔性制造能力。

在精密控制方面,系统引入多传感融合技术与实时控制算法,以确保绕制过程的动态精度。张力控制模块采用闭环反馈控制,通过高灵敏度力矩传感器和数字信号处理单元实现张力实时检测与补偿。导线位置与姿态由高分辨率光学编码器和激光位移传感器监测,以微米级精度修正导线路径。控制系统与执行机构之间通过总线通讯实现高速数据交互,保证响应延时最小化。为了应对绕制过程中因导线弹性或环境温度变化带来的误差波动,系统引入自适应控制算法,根据实时状态调整伺服驱动输出,维持稳定的绕制张力与轨迹精度。精密控制的引入使绕线层间排列更加均匀,匝间压紧力一致,电磁性能更加稳定,为高性能直驱电机的制造提供可靠保障。

在结构优化过程中,还需兼顾散热性能、维护便捷性与制造成本控制。模块化设计使得散热通道能够根据热负载分布进行优化布置,关键部件采用高导热复合材料与风冷结合结构,避免因温升导致的尺寸漂移。为提高维护效率,各模块设计了独立的拆装通道与定位销结构,保证检修过程中装配精度不受影响。通过有限元分析与动态仿真,对夹具的受力状态、振动

模式及热变形进行优化修正,确保结构在长时间高负载运行下仍保持稳定。优化后的自动化夹具具备高精度、高可靠性与高重复性的特点,能够在复杂线圈绕制任务中实现持续的过程控制与质量稳定,为智能制造体系下的直驱电机生产提供先进的装备基础。

4 自动化工装夹具在绕线过程中的控制策略与实施方法

自动化工装夹具在绕线过程中的控制策略以精确同步、实时反馈与智能补偿为核心,通过多维协调控制实现线圈成形质量的稳定可控。系统以伺服电机为驱动核心,配合高精度编码器实现绕线速度与张力控制的闭环调节。控制模块依据线圈几何模型与绕制工艺参数对导线运行轨迹进行实时运算,确保每一匝绕线都在设定路径内稳定成形。为避免导线在高速运动中产生滑移或扭曲,控制系统采用多段速度曲线规划方式,在启动与制动阶段实现加速度渐变,减小机械冲击并提高导线姿态稳定性。张力控制单元通过力矩传感器实时采集导线受力数据,经PID算法调节伺服驱动输出,实现导线张力恒定控制,从而有效防止匝间间隙不均或线圈松弛现象。

在姿态与位置控制方面,系统引入视觉识别与位移传感技术,对绕制过程中导线的空间位置与角度进行高频检测与修正。通过图像处理算法实时识别导线偏移量,并驱动微调机构进行动态校正,保证绕制层次的排列一致性。控制策略中加入自学习模型,对历史工艺参数与误差数据进行分析,根据不同线径、导线材料及绕制速度自动调整控制参数,实现过程优化。为提升系统稳定性与响应速度,控制系统采用分布式架构,各功能模块通过工业总线进行数据交换,张力、位置与速度控制实现并行运算,显著提升系统的实时性与协调性。

在实施方法上,自动化夹具通过参数化设定与程序化控制实现工艺自动切换。操作界面允许输入线圈规格、绕制层数、张力范围及速度曲线等工艺数据,系统自动生成执行指令。为确保操作安全与精度可靠,控制软件设置多级监控机制,对电机转速、夹具夹持状态及导线张力进行全程监测,一旦出现偏差立即触发保护机制并记录工艺数据。该控制策略的实施不仅实现了绕制过程的高精度控制与稳定输出,也为复杂线圈结构的自动化生产提供了可扩展的技术路径,使直驱电机线圈制造迈向更高水平的智能化与精密化。

5 自动化工装夹具应用效果验证与性能提升分析

自动化工装夹具在直驱电机线圈绕制中的应用验证过程中,通过对多种结构形式与不同工艺参数的综合测试,验证了系统在精度控制与生产稳定性方面的显著优势。经长时间运行试验发现,自动化夹具在高速绕制工况下仍能保持稳定的导线张力与匝间间距,线圈成形紧密度明显优于传统人工绕制。导线在绕制过程中的姿态变化得到有效抑制,层间错位与匝间松

弛的现象大幅减少。模块化结构设计使夹具在更换线圈规格时具备较强的通用性与自适应性，极大地缩短了调试周期。结构部件的耐磨与抗振性能确保了设备在连续生产中的稳定运行，夹具系统整体表现出高重复定位精度与优良的运行一致性，为批量化生产提供了可靠支撑。

在性能提升分析中，自动化工装夹具的控制系统发挥了关键作用。闭环张力控制策略与自适应反馈算法的结合，使导线受力保持恒定，避免了线径变化与绝缘层受损问题。姿态控制模块通过实时视觉检测与多轴协调驱动，确保绕线路径的动态精度与层间平整度。系统在运行中通过持续的数据采集与算法优化，使工艺参数实现自我修正，从而在复杂绕组结构下仍能维持稳定的几何一致性。控制系统的分布式协同机制提高了运算效率，降低了信号延迟，保证绕制速度与位置精度的同步匹配。经过多轮工艺迭代优化，系统在应对高密度、多层次线圈时展现出优越的协调控制能力，有效提升了绕制过程的可控性与成品一致性。

从制造应用角度分析，自动化工装夹具的引入显著改善了生产效率与产品质量。自动定位与智能张力调节的组合减少了

人工干预，实现了连续化与标准化生产流程。操作人员通过人机界面即可完成工艺设定与监控，系统具备异常自诊断与误差报警功能，确保生产过程安全可控。结构优化后的夹具在散热与防振方面表现出良好性能，使其适用于长时间高负荷生产环境。该系统在应用过程中实现了工艺参数可追溯与质量可量化，促进了线圈绕制向数字化与智能化方向转变。通过对整体性能的验证与对关键技术的提升，自动化工装夹具为直驱电机线圈制造过程的精密化、稳定化与高效化提供了坚实的技术基础，展现了在先进制造装备领域的广阔应用前景。

6 结语

自动化工装夹具在直驱电机线圈绕制中的研究与应用充分体现了智能制造技术与精密机械设计的融合。该系统以模块化结构和精密控制为核心，显著提升了线圈成形精度与生产效率，改善了传统工艺中张力波动与几何误差难以控制的问题。通过结构优化与控制策略的协同创新，构建了适应多规格、高要求线圈制造的智能化生产平台，为直驱电机产业的高质量发展提供了重要技术支撑。

参考文献：

- [1] 王建国.直驱电机在精密传动系统中的应用研究[J].电机与控制学报,2020,24(3):15-21.
- [2] 刘志强.自动化绕线设备控制系统的设计与优化[J].机械设计与制造工程,2021,50(5):87-92.
- [3] 陈立峰.基于模块化结构的工装夹具设计研究[J].制造技术与机床,2022,9(2):44-49.
- [4] 张宏伟.直驱电机线圈绕组工艺及其精度控制分析[J].电气技术应用,2022,41(6):73-78.
- [5] 李晓东.智能制造背景下自动化装夹系统的研究[J].中国机械工程,2021,32(12):105-111.