

电机端盖组件装配工艺缺陷分析与优化改进方案

周诗函

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：电机端盖组件作为电机结构中的关键承载与密封部件，其装配质量直接影响整机运行稳定性与可靠性。在实际装配过程中，常出现同轴度偏差、密封不良、配合间隙不均及装配效率偏低等问题，导致产品一致性不足。针对上述问题，从工装夹具精度控制、装配工艺流程优化、关键尺寸检测强化及标准化作业规范等方面提出改进措施。通过多环节协同优化，提升装配精度与稳定性，降低不良率，提高生产效率与产品可靠性，实现批量生产一致性提升与装配过程稳定性增强，并进一步优化生产节拍与装配质量控制水平。

【关键词】：电机端盖；装配工艺；缺陷分析；工艺优化；质量控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.075

引言

电机端盖组件在电机结构装配环节中处于关键位置，涉及多部件配合与高精度定位要求，装配过程对尺寸精度与同轴控制具有较高依赖性。装配环节中易出现同轴偏差、密封不良及配合间隙波动等现象，导致一致性控制难度增加并影响批量生产稳定水平。针对装配精度提升与过程控制强化方向，对工装精度、工艺流程及检测环节进行系统化调整，以改善装配质量波动问题。形成工艺优化与质量提升的衔接路径，为后续装配过程稳定控制提供支撑，提升整体一致性水平优化装配约束并强化过程稳定性控制能力。

1 装配偏差来源与质量波动特征解析

电机端盖组件在装配过程中受到结构定位方式与零件加工精度的共同影响，同轴度偏差在壳体与端盖配合区域较为突出，轴承座孔与电机主轴中心线之间易产生微小偏移，进而引起旋转部件运行轨迹不稳定。配合误差主要来源于加工尺寸离散与装配基准差异，局部间隙在压装过程中呈现不均匀分布状态，使得受力传递路径发生偏移。密封位置在压装结合面容易产生贴合不紧密现象，受接触面粗糙度与装配压力波动影响较为明显，导致密封圈受力状态不一致。

定位基准不统一导致各工序之间无法形成一致参考体系，在装配过程中不同工位采用的基准存在偏差，使端盖与机座的相对位置难以保持稳定状态，针对该情况采用基准统一化工装设计，通过增加高精度定位销与限位结构，对关键安装面进行强制约束，使各工序基准保持一致^[1]。装配间隙波动受零件公差叠加影响较为显著，通过对轴承室、端盖外圆及配合孔尺寸进行公差带重构，结合统计公差分析方法优化配合关系，使间隙控制在稳定区间内，同时引入分级选配方式降低尺寸离散带来的影响。

密封性能不稳定主要表现为压装后接触压力分布不均，密封圈局部压缩量不足或过度压缩现象并存，针对该情况调整密封槽结构参数，对槽深与槽宽进行匹配优化，同时在压装设备

中增加位移与压力双重控制模式，使压入力保持线性变化状态。通过对压装速度曲线进行分段控制，降低瞬时冲击对密封结构的影响，使结合面受力更加均匀。不同装配环节的误差来源得到分别约束后，各结构件之间的配合关系趋于稳定状态，装配过程中的尺寸波动范围明显收窄。

2 精度控制与工艺流程协同优化路径

工装夹具是保障电机端盖装配精度的核心基础，工装系统刚性不足、定位结构不合理是引发装配尺寸偏差、质量波动的核心诱因之一。在传统装配模式下，常规夹具多采用简易板式定位、单点支撑结构，材质强度与整体刚性较弱，在批量压装作业过程中，持续承受压装载荷、工件夹具挤压力，极易产生微量弹性形变与局部塑性变形，且长期使用后会出现定位面磨损、基准偏移等问题。尤其在端盖与机座合装、轴承压装的核心工序中，夹具的微小形变会直接导致轴承座孔与预设定位基准产生偏移，造成同轴度误差持续累积，同时引发端盖结合面贴合度不足、配合间隙不均等连锁质量问题，严重制约批量产品装配一致性。为彻底解决该问题，需从夹具材质升级、结构优化、定位方式革新三个维度开展刚性强化与精度优化工作。在材质选型上，摒弃传统普通碳钢材质，采用高强度合金钢并经过调质、淬火双重热处理工艺，大幅提升夹具体本的抗压、抗变形、耐磨损性能，延长工装使用寿命。在结构设计上，优化夹具整体框架结构，在受力集中区域增设加厚支撑板与三角支撑筋板，构建封闭式受力框架，分散压装过程中的集中载荷，从根源降低弹性形变概率。同时革新传统单孔、单点定位模式，采用“双定位销+多点面约束”的精准定位结构，根据端盖安装孔位与贴合面分布规律，合理布置高精度淬火定位销，限定端盖水平、垂直双向位移与旋转自由度，彻底解决定位偏移问题。针对不同批次零件存在的微小尺寸公差差异，在夹具关键接触面增设可微调精密调节机构，可根据工件实测尺寸小幅修正定位位置，实现不同规格、不同批次零件的精准稳定装夹，有效消除夹具变形与定位偏差带来的尺寸漂移问题。

装配流程体系不完善、工序衔接混乱、生产节拍失衡是导

致装配效率低下、质量波动频繁的重要原因。传统装配工艺未实现模块化划分,端盖预装、轴承清理、密封圈安装、轴承压入、整体合装、尺寸检测等工序杂乱穿插,作业顺序缺乏科学规划,不仅存在大量重复搬运、二次定位、等待闲置等无效作业,还容易因工序交叉干扰引发装配误差。各工位作业内容分配不合理,部分工位作业负荷饱和、工序耗时过长,成为生产瓶颈,而部分工位作业内容简单、设备闲置率高,整体生产节拍不均衡,导致生产线流转不连续,批量生产稳定性极差。同时,频繁的工件转运、重复定位会累计二次装配误差,进一步加剧同轴度偏差、间隙不均等质量缺陷。对此,需基于精益生产理念对整体装配流程进行重构优化,采用模块化工序拆分与流线化布局模式,按照“预处理—预装—精压—合装—检测”的逻辑重新梳理作业流程,将端盖端面清理、密封槽除杂、零件尺寸复检等预处理工序统一集中完成,单独设置预装工位,专职完成密封圈安装、轴承初步对位等基础作业,再通过专用输送设备流转至精压工位、合装工位,实现各工序专业化、连续化作业。同时引入节拍平衡分析法,精准测算各工位单次作业时长、设备启停时间、物料流转时间,识别瓶颈工序,通过拆分复杂作业、优化人员配比、匹配设备效率等方式均衡各工位作业负荷,消除工位等待、闲置等无效时间。优化整体作业动线,缩短物料搬运距离,取消重复装夹定位工序,固定工件装配姿态,避免因多次定位、姿态偏移产生的装配误差。

滞后的检测模式是制约装配质量管控的关键短板,传统生产模式下,电机端盖装配全程以人工目视抽检、成品完工后尺寸检测为主,关键装配工序缺乏实时检测手段,尺寸偏差、装配缺陷无法及时发现,只能在成品检测阶段识别不良品,不仅导致大量返工返修、物料浪费,还无法追溯缺陷产生的工序与原因,无法实现过程质量管控。人工检测存在主观性强、精度低、效率慢等问题,难以精准捕捉微小同轴度偏差、端面跳动误差、密封贴合间隙等细微缺陷,导致不良品流入下道工序,造成误差累积,大幅提升产品报废率。为构建全流程质量管控体系,需彻底革新传统检测模式,建立工序级在线实时检测体系,在轴承压装、端盖合装等关键核心工序部署高精度检测设备,搭载激光位移传感器、机器视觉检测单元、压力位移采集模块等智能化设备,实现装配过程关键参数的动态采集与实时监控。检测系统可全程实时采集装配同轴度、端面跳动量、压装位移、压装压力、轴向间隙等核心质量数据,通过工业以太网将实时数据同步传输至生产控制终端,系统内置超差阈值判定程序,一旦检测数据超出工艺允许区间,立即触发声光报警,并自动锁定设备作业状态,防止不良品持续生产。同时搭建数据追溯与分析模型,对每一台产品的装配检测数据进行独立存储、分类统计,自动分析误差分布规律、缺陷高发工序与参数波动特征,为工艺调整、工装检修、参数优化提供精准数据支撑,实现从“事后检测整改”向“事中监控、事前预防”的质

量管控模式转变,从源头降低装配不良率。

工艺参数标准化缺失、管控方式粗放是造成装配质量批次波动、人为差异过大的核心因素。目前多数生产线未建立统一的量化工艺标准,压装压力、压装速度、保压时间、定位夹紧力、装配对位精度等关键工艺参数仅依靠操作人员经验调节,无明确参数区间与执行规范。不同操作人员的作业习惯、操作熟练度存在差异,即使同一工位、同一批次产品,装配参数也存在较大波动,极易出现压力过大导致端盖变形、密封圈破损,或压力不足导致贴合不紧密、密封失效、间隙超差等质量问题,直接造成批量产品装配一致性差。此外,不同型号电机端盖装配无标准化参数适配体系,换产时参数调试随意性强,进一步加剧生产波动。针对上述问题,需构建数字化、标准化的工艺参数管控体系,基于大量试验数据与生产经验,建立“压力—位移—时间”三维一体化工艺控制模型,对轴承压装、端盖合装核心工序进行分段参数管控,将装配过程分为快速趋近、慢速对位、稳压压装、保压定型四个阶段,分别设定各阶段的压装速度、压力阈值、位移区间、保压时长,明确参数上下限,杜绝参数随意调整。同时引入全自动数字化控制系统,替代传统人工手动调节模式,实现工艺参数的闭环自动调节,设备可根据实时装配状态、工件微小尺寸差异自动微调作业参数,保证每一次装配作业的参数一致性。搭建产品工艺参数数据库,分类录入不同型号、不同规格电机端盖的最优装配参数,形成标准化参数配方,换产时直接调用对应参数模板,无需重复调试。同时将参数标准嵌入工位作业指导系统,配套工装防错设计,杜绝人为操作偏差,彻底消除人为因素带来的质量波动,实现全批次、多型号产品装配质量的稳定可控^[2]。

3 装配质量稳定提升与过程控制强化措施

批量生产过程中的质量随机波动是电机端盖装配工艺管控的核心难点,其本质是多维度、多工序微小误差叠加后的综合体现,主要集中于同轴度超差、端面跳动超标、配合间隙离散、密封性能不稳定等质量问题。在传统粗放式生产管控模式下,质量检测以成品抽检为主,缺乏全过程数据监控手段,使得尺寸偏差呈现无规律的随机分布特征,不同生产批次、不同时段产出的产品质量一致性较差,严重影响电机整机装配精度与运行可靠性。为从根源抑制质量波动,需搭建全覆盖、多维度的装配过程数据采集与智能监控体系,依托工业传感器网络、PLC控制系统与上位机数据平台,实现装配全流程关键质量参数的实时采集、存储与分析。系统可连续动态监测压装全过程压力曲线、轴向位移变化、端盖旋转跳动偏差、定位夹紧精度等核心数据,打破传统人工检测数据滞后、采样稀疏、精度不足的弊端。同时引入统计过程控制(SPC)技术,通过计算工序能力指数、绘制控制图与直方图,精准识别数据波动规律,区分设备固有波动、工艺异常波动与人为操作波动,对超出控制区间的异常数据实时预警,实现质量异常的早发现、早

干预、早整改,有效降低批量不良品产生概率,持续提升工序加工与装配稳定性^[3]。

人为操作差异与作业标准落地不到位是导致装配一致性差的核心人为因素。现阶段生产线无精细化、量化的标准作业规范,现有工艺文件内容笼统、可操作性弱,仅规定基础装配流程,未对关键动作、操作力度、作业时序、对位标准进行明确界定。不同操作人员的作业经验、操作习惯、熟练程度存在明显差异,在端盖夹持力度、基准定位顺序、压装启停节奏、密封圈安装方式等关键操作环节执行标准不统一,导致同一工位产出产品的装配状态差异较大,大幅增加产品尺寸离散度与质量缺陷率。为彻底统一作业行为、消除人为变量,需对原有装配工艺文件进行结构化、精细化重构,将整体装配流程拆解为若干独立的标准化作业单元,细化每一步操作的动作规范、作业时序、质量标准与禁忌要求,对夹持压力、对位偏差、压装速度等关键指标进行精准量化,杜绝模糊化、经验化操作。同时引入工位可视化作业指导系统,摒弃传统纸质工艺文件,在各装配工位配置智能显示屏,实时展示对应产品的装配步骤、参数标准、操作示意图与质量判定要求,实现作业标准可视化、统一化、常态化落地。与此同时,配套优化工装防错结构设计,通过定位限位、防呆结构杜绝装夹错位、装配方向错误、参数误调等问题,从制度、设备、操作三个层面形成闭环管控,全面缩小人为操作偏差,保障批量装配一致性。

生产效率偏低、工序节拍失衡是制约生产线产能与稳定性提升的重要瓶颈,传统装配生产线布局零散、工序衔接无序,存在大量工序等待、物料闲置、重复搬运、设备空转等无效作业问题。各工位作业负荷分配极不均衡,部分核心工序作业内容繁琐、耗时较长,成为生产线瓶颈工序,制约整体生产节拍;而辅助工位作业量少、设备利用率低,造成生产资源浪费,整体生产线无法实现连续流水线化生产,不仅降低日产量,还会因工件长时间静置、二次周转引发装配定位偏差,间接影响装配质量。针对该问题,基于精益生产流线化理念对车间工序布局进行全面重构,打破原有分散式工位布局,将端盖预处理、密封圈预装、轴承压装、端盖合装、间隙检测等核心工序进行集中整合、流线化排布,缩短物料转运距离,消除跨工位无效搬

运。同时引入半自动压装设备与机械辅助定位机构,替代传统纯人工装配模式,实现人工辅助上料、设备精准定位与压装的协同作业,大幅降低人工劳动强度,提升装配速度与定位精度。在节拍管控层面,采用瓶颈工序优先平衡策略,精准测算各工位标准作业工时,通过拆分复杂工序、优化人员配置、增设辅助工位、标准化作业动作等方式,均衡各工位作业负荷,消除工位等待空转现象,提升物料流转连续性与生产节拍稳定性,在保障装配质量的前提下,显著提升整体生产效率与设备利用率。

电机端盖装配属于多工序串联式生产模式,各工序误差具备显著的累积放大效应,前期微小定位偏差、压装误差、配合间隙偏差,会随着工序流转逐步叠加放大,最终导致整机同轴度超标、端面跳动过大、配合间隙不均匀等核心质量缺陷,是批量产品精度不稳定的关键隐性因素。传统工艺管控仅关注最终成品精度,忽略工序间误差传递与累积规律,缺乏针对性的误差补偿与修正机制,无法从过程层面削减误差影响。为解决工序误差累积问题,需建立科学化的误差分配与动态补偿模型,通过大数据统计与数学建模方式,精准分析各装配工序的误差来源、误差范围与传递规律,明确各工位的误差允许阈值,实现误差分级管控。在端盖定位、轴承压装、整机合装等关键工序增设误差修正环节,根据前期工序检测的偏差数据,在设备控制系统中预设动态补偿量。同时搭载实时数据反馈算法,系统可根据在线检测设备采集的同轴度、位移、间隙等实时数据,自动微调压装位置、定位基准与压装参数,对工序偏差进行实时修正、分段抵消,从误差传递路径上逐层削减偏差累积效应。通过该管控方式,可有效约束多工序串联带来的精度衰减问题,让每一道工序的装配精度处于可控区间,全面提升电机端盖组件装配的整体精度稳定性与批量生产可靠性。

4 结语

电机端盖装配过程的质量稳定性与工艺控制水平紧密关联,数据化监控体系与标准化作业规范协同作用,使过程偏差得到有效约束。关键工序节拍优化与自动化辅助装配提升运行连续性,误差补偿机制增强尺寸控制精度,生产过程呈现更强一致性与可控性。

参考文献:

- [1] 罗颖飞,罗云丽.电机端盖自动化生产线数字孪生仿真技术研究[J].自动化应用,2025,66(10):162-164.
- [2] 王新荣,一种基于图像识别的电机端盖尺寸测量装置.山西省,山西电机制造有限公司,2024-07-09.
- [3] 曹锦松.电机端盖表面缺陷视觉检测装备关键技术研究[D].浙江师范大学,2024.