

电机轴承压装工艺对振动性能的影响分析

黄羽兰

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：电机轴承压装作为转子系统装配关键环节，其装配质量直接影响轴承受力状态与整机振动水平。压装过程中过盈配合、受力偏差与同轴度误差易引起滚动体接触变形与间隙变化，进而诱发振动幅值升高与运行不稳定。针对装配过程参数控制不足导致的振动异常，通过优化过盈量设计、提升压装定位精度、改进润滑与工装约束方式，并结合在线检测与动态校正，使轴承受力分布更均匀，转子运行稳定性提升，振动幅值降低。同时通过对压装力-位移曲线监测，实现装配过程一致性控制，降低离散性影响。

【关键词】：电机轴承；压装工艺；振动性能；过盈配合；装配精度

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.015

引言

电机转子系统运行过程中，轴承作为核心支撑部件，其装配质量直接关系到整机动力学状态。压装工艺在轴承安装环节中承担关键作用，微小的过盈偏差或定位误差均可能改变接触应力分布，引发局部受力不均与结构微变形，进而影响振动响应特性。在高速运转工况下，此类微小偏差会被放大为明显的振动波动，甚至造成运行不稳定现象。装配精度控制不足、压装过程参数波动以及工装约束不合理等因素，使振动问题呈现复杂化特征。围绕压装过程与振动表现之间的内在联系，对关键工艺环节进行优化控制成为提升电机运行质量的重要路径。

1 电机轴承压装工艺现存问题及振动异常表现

电机轴承压装工艺是转子装配的核心工序，工艺执行精度、参数匹配性及工装适配性的偏差，会直接改变轴承内部结构受力状态与配合精度，是诱发电机运行振动超差、稳定性下降的核心装配类诱因。现阶段电机轴承压装生产过程中，工艺管控短板与操作缺陷集中体现在过盈配合参数匹配不合理，该问题普遍存在于批量装配生产中。轴承内圈与转轴轴颈的过盈量缺乏精准化管控，过盈量过大时，轴承内圈会产生塑性挤压变形，迫使轴承滚道发生微量椭圆畸变，改变滚动体与滚道的标准接触姿态，破坏轴承原始设计的游隙参数，使轴承径向工作游隙大幅缩减。而当过盈量偏小时，轴承内圈与轴颈贴合紧密性不足，电机高速运转过程中易产生微量相对滑移，引发配合面微动磨损，持续加剧结构配合松动问题，两种偏差均会直接诱发电机稳态运行振动幅值超标、低频周期性振动波动等异常现象。

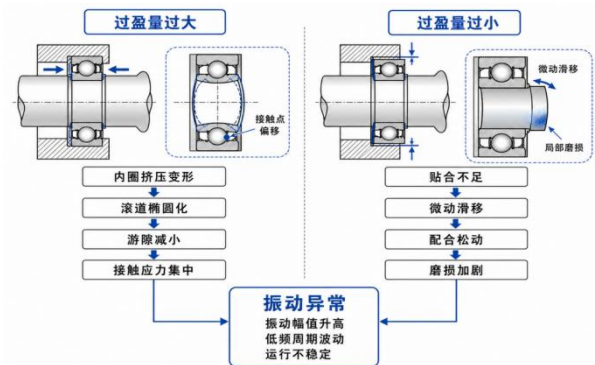


图1 电机轴承压装工艺机理对比示意图

装配同轴度精度失控是压装工艺的突出短板，也是导致电机振动异常的关键因素。在轴承压装过程中，受设备定位偏差、工件装夹偏移影响，轴承内圈压装完成后易出现轴心与转子主轴轴心不同轴的问题，产生径向偏心误差。该几何误差会使轴承圆周方向受力呈现严重不均匀状态，转子旋转时产生周期性离心激振力，随着电机转速提升，偏心激振效应会被持续放大，引发持续性径向振动。同时同轴度偏差会造成轴承单侧滚动体载荷集中，局部接触应力远超设计阈值，滚动体与滚道产生异常摩擦与挤压形变，使电机运行过程中出现高频微振叠加低频抖动的复合振动特征，长期运行下还会加剧轴承磨损，造成振动故障渐进性恶化。

压装受力不均衡与工装约束体系不完善，进一步加剧了电机振动异常问题。常规压装作业中，多采用单一轴向施压模式，压装力作用中心与轴承几何中心存在偏移，易造成轴承内圈端面受力不均，引发压装过程中的偏载挤压，导致轴承内圈歪斜、滚道局部形变。同时部分生产工装缺乏精准定位与限位结构，工装刚性不足、适配性较差，无法实现轴承压装过程的平稳约束，压装阶段产生的微小装配应力会残留在轴承与转子结构内部。电机运行时，残余装配应力持续释放，扰动转子系统动力学平衡，引发无规律振动波动，导致电机运行转速稳定性下降，振动离散性偏差大幅增加，批量产品振动性能一致性难以保障。

压装过程动态质控体系缺失，是振动异常问题频发且无法根治的核心管理问题。现阶段多数装配工序仅依靠固定工艺参数作业，未建立压装力-位移曲线实时监测机制，无法精准识别压装过程中的局部卡顿、受力突变、位移偏差等隐性装配缺陷。装配过程的工艺离散性无法得到有效管控，各类微小装配误差持续累积，最终转化为转子系统运行振动故障。同时压装后缺乏轴承应力、同轴度、游隙的动态检测校正环节，不合格装配状态流入成品环节，使电机在带载运行工况下，各类装配缺陷被工况载荷放大，表现为振动幅值超标、运行异响、转速波动等典型异常现象，严重影响电机整机运行可靠性与使用寿命。

2 压装配合状态与振动响应关联机制

电机轴承压装配合状态是决定转子支撑系统刚度特性与动力学响应的核心因素，配合界面的装配精度与受力状态直接调控轴承接触载荷分布与弹性变形协同特性。轴承与轴颈的过盈配合量并非单一装配参数，其数值波动会直接改变轴承内外圈基体的弹性挤压程度，重构轴承整体接触刚度矩阵。当过盈量处于非标准区间时，轴承滚道区域会产生差异化弹性形变，形成局部刚度突变与应力集中区域，打破轴承圆周方向刚度均匀分布的设计状态。转子高速运转过程中，滚动体沿滚道做循环公转与自转运动，刚度分布不均会导致滚动体与滚道的接触载荷传递路径持续动态偏移，产生微观滑移、接触挤压形变不均等现象，形成持续性周期性力学扰动源。该扰动会直接造成转子支撑系统等效刚度发生非线性偏移，引发系统固有频率微量漂移，最终改变电机振动响应的频域分布规律，出现特征频率偏移、频带拓宽等振动特性变化。

轴承压装工序产生的径向偏载、轴向预紧偏差等装配缺陷，会引发转子轴心径向微量偏移，造成转子几何回转中心与质量惯性中心出现位置偏差，形成固有装配残余不平衡力矩。在电机高速运行工况下，转子旋转产生的离心力会持续放大残余不平衡效应，使转子系统承受周期性交变激振载荷，直观表现为整机振动时域幅值显著提升、频域谐波分量叠加增强，振动畸变程度随转速提升呈正相关增长。同时，压装同轴度偏差、内圈歪斜等问题会改变轴承标准接触角参数，破坏多组滚动体载荷均匀分配机制，造成单侧滚动体过载、另一侧载荷不足的非对称承载状态，大幅加剧轴承接触力学特性的非线性特征，诱发非线性受迫振动与参数振动。

压装配合异常引发的接触刚度非均匀分布，会同步改变轴承系统的阻尼特性与能量耗散机制。正常装配状态下轴承振动能量可通过滚动体接触摩擦、弹性形变实现均匀耗散，而配合偏差会导致系统阻尼呈现区域差异化，振动能量耗散路径紊乱偏移，整机振动衰减速率大幅降低。电机两端轴承若存在差异化压装误差，会形成多位置、多频次耦合振动激励源，不同振动信号相互叠加耦合，使整机振动呈现宽频带强化、特征峰值异常抬升的复杂振动形态。长期连续运行过程中，持续的力学

扰动会不断累积装配应力与结构形变误差，持续破坏转子系统动力学平衡稳定性，最终使电机振动响应呈现无规律持续性波动，严重降低电机运行平稳性与结构服役寿命。

3 压装误差源抑制与工艺调控路径

电机轴承压装误差源抑制与工艺调控路径主要集中在装配精度控制与界面接触状态稳定性调节两个层面，其核心在于通过系统性工艺优化削弱装配误差向振动响应传递的放大效应。在工程实际中，过盈量波动、同轴度偏移以及摩擦状态不稳定是引发轴承运行异常的关键因素，这些因素共同作用于接触刚度分布、载荷传递路径以及润滑膜形成质量，使转子系统在动态工况下产生复杂的振动耦合效应。针对误差源形成机理，需要从几何配合、装配轨迹以及界面摩擦行为三个维度进行协同控制，以降低结构偏差对动力学性能的影响。

电机轴承压装过程中过盈量控制不稳定的核心诱因，为零部件加工尺寸离散性与多工序加工误差累积效应，在轴承内圈与转轴轴颈的过盈配合界面中，该类误差会直接造成配合间隙与干涉量无序波动，引发接触压力全域分布不均问题。配合区域局部位置会出现径向应力高度集中现象，迫使轴承内圈与滚道产生超标的非规则弹性变形，偏离产品设计形变参数，直接破坏轴承原始刚度特性与滚动体配合精度。针对该类工艺缺陷，可在工艺体系中搭建分级过盈设计模型，通过对轴承内孔尺寸、转轴轴径尺寸、压装工装套筒尺寸开展全维度尺寸链闭环控制，实现过盈量的分段精准调控与区间阈值约束，将装配干涉量稳定控制在工艺允许区间内。同时引入统计公差分析技术，对零部件加工误差开展概率分布建模分析，摒弃传统单一固定过盈值的管控模式，实现过盈配合参数的区间动态优化控制，有效削弱加工离散性带来的装配偏差。压装作业阶段同步依托力-位移实时监测曲线，精准捕捉压装过程中的载荷异常突变点位，及时预警过载压装工况，从工艺源头规避结构挤压损伤与轴承接触刚度突变问题，保障压装装配质量的稳定性与一致性。

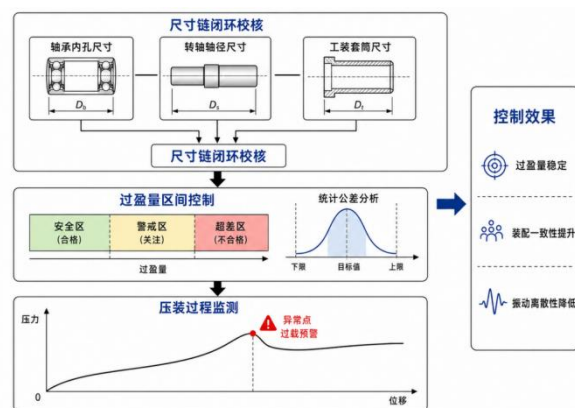


图2 工艺闭环控制图

电机轴承压装过程中的同轴度偏差,主要由压装设备导向精度不足、工装定位基准偏移及装夹累积误差共同引发,装配过程中易出现轴承轴线相对主轴理论轴线的偏移现象,造成转子实际旋转中心持续漂移,最终诱发转子偏心及质量不平衡力学效应。该类几何装配缺陷具备显著的工况放大特性,在电机低速运行时振动影响较为微弱,进入高速运转工况后偏心激励效应会急剧加剧,大幅提升整机振动幅值,并使振动信号谐波成分复杂化,严重干扰转子系统动态平衡状态。为有效抑制同轴度装配误差,工艺体系中可引入高精度导向工装结构,依托多级导向套与锥面自定心机构构建闭环几何约束链,严格限定轴承压装运动轨迹,保证压装全过程轴向位移的一致性与稳定性^[2]。通过加装弹性补偿式自校正定位装置,依靠可控弹性形变吸收微米级装配偏差,实现轴心位置的自适应纠偏复位。

润滑与摩擦状态不稳定对压装过程的影响主要体现在界面剪切阻力波动与接触温升变化方面,摩擦系数的非稳定性会直接影响压装载荷传递平滑性,导致轴承滚动体受力出现间歇性突变。在实际工况中,润滑剂分布不均会形成局部干摩擦区域,使材料表面发生微观黏着磨损,进而改变接触表面粗糙度与摩擦特性。针对该问题,通过优化润滑介质黏度等级与表面润湿性能,构建均匀涂布工艺体系,使润滑膜厚度在压装界面保持稳定分布。同时采用恒阻力压装控制方式,通过伺服液压系统对压入力进行闭环调节,使压装过程保持连续平稳推进状态,避免冲击载荷对轴承结构造成瞬态冲击。此外结合温度与摩擦力实时监测,对润滑状态进行动态反馈调节,使界面摩擦行为维持在稳定区间,从而降低装配离散性对后续振动性能的影响。

4 运行稳定性验证与振动表现评估

电机轴承压装工艺优化后的运行稳定性验证与振动表现评估主要依托振动信号采集系统与频谱分析方法,对转子系统动态响应特征进行多维度对比分析。在测试阶段,通过在轴承

座布置加速度传感器与位移传感器,实现对振动信号时域与频域数据的同步采集,并结合FFT快速傅里叶变换对信号进行分解处理,使不同频段振动能量分布得以量化呈现。优化前后数据对比显示,低频主振幅峰值出现明显下降趋势,同时高频随机振动成分强度减弱,表明轴承接触刚度波动得到有效抑制,转子系统等效刚度矩阵趋于稳定状态。

在振动响应特征分析过程中,转速阶次分析结果显示,原本存在的倍频干扰成分在优化后显著衰减,尤其是2X与3X阶次振动峰值降低较为明显,这一变化与轴承过盈配合均匀性提升以及同轴度误差减小密切相关^[3]。时域波形呈现出周期性波动减弱特征,峰峰值离散程度明显收敛,说明转子质量偏心引起的不平衡激励得到削弱。结合包络谱分析结果,高频冲击信号密度降低,滚动体与滚道之间的微冲击现象明显减少,轴承运行状态由非稳定接触逐步转变为稳定滚动接触模式。

在系统运行稳定性评价层面,通过振动均方根值与峭度系数进行综合判断,优化后的振动RMS指标呈下降趋势,信号峭度分布趋于平滑状态,异常冲击事件发生频率降低。轴向与径向振动耦合程度减弱,说明轴承受力路径更加均衡,载荷传递更加连续。转子动力学模型对比分析结果表明,系统阻尼特性得到改善,能量衰减速率提升,使振动响应在稳态运行区间内保持较低波动水平。多工况测试结果一致表明,压装工艺优化对振动抑制效果具有稳定重复性表现。

5 结语

电机轴承压装工艺优化后,振动信号在时域与频域表现出明显收敛特征,幅值波动幅度下降,高频异常成分衰减显著,接触刚度分布趋于均衡状态,转子系统动态响应稳定性提升。压装误差源得到有效约束后,轴承受力路径更加连续,振动能量在各频段分布趋于平缓,运行过程中冲击信号密度明显降低,整体振动水平维持在较低区间。

参考文献:

- [1] 邹超杰.机车车辆轮轴压装工艺力学分析[D].大连理工大学,2025.
- [2] 张兴健.基于声纹识别的港口设备电机轴承故障诊断方法的研究[D].燕山大学,2025.
- [3] 王春辉.基于图神经网络的电机轴承故障诊断研究[D].石家庄铁道大学,2025.