

大型风力发电机主轴轴承装配工艺探讨

李金非

江苏中车电机有限公司 江苏 盐城 224000

摘要：随着我国风电装机容量突破5亿千瓦，大型化、高可靠性风电机组的发展对核心部件装配工艺提出了严苛要求。主轴轴承作为主传动链的核心承力部件，其装配质量直接决定了机组全生命周期内的运行稳定性与可靠性。本文探讨了8MW级大型风力发电机主轴轴承的装配工艺，重点分析了清洁控制、热装工艺、润滑脂加注和压盖安装等关键环节。通过系统性工艺创新，实现了装配质量的全面提升，为风电规模化开发提供了可靠技术保障。

关键词：轴承热装；清洁度控制；润滑脂加注；轴承压盖安装

引言：随着全球能源结构向低碳化转型，风力发电已成为可再生能源发展的核心支柱。截至2024年，我国风电累计装机容量突破5亿千瓦，单机容量向8MW及以上等级快速迭代。在此背景下，风力发电机组的可靠性面临严峻挑战，其中主轴轴承作为主传动链的核心承力部件，其装配质量直接决定机组全生命周期内的运行稳定性。然而，大型化、高载荷的工况对主轴轴承装配工艺提出了更高要求：一是装配过程中的微粒污染（如硬质颗粒残留）会导致接触应力集中，实测表明每平方厘米存在3颗以上颗粒可使轴承疲劳寿命降低60%^[2]；二是高过盈配合（如 $\phi 2000\text{mm}$ 轴承过盈量近1mm）需精准控温与快速装配，传统工艺易因温度不均或装配延迟引发卡滞^[1]；三是润滑脂加注的洁净度与均匀性直接影响润滑膜形成，若颗粒物超标或分布不均，将加剧轴承早期失效风险^[2]。

现有研究虽对轴承热装、润滑技术等环节进行了探索，但在系统性工艺创新方面仍存在不足。例如，传统清洁控制依赖单一吹扫，难以满足ISO 4406 14/11级高洁净度要求；热装工艺多采用油浴或烘炉加热，效率低且环保性差；润滑脂加注缺乏定量分阶段控制，易导致润滑膜厚度不均。针对上述问题，本文以8MW级海上风电机组主轴轴承为对象，提出涵盖清洁控制、中频感应加热、智能注脂及压盖预紧的全流程装配工艺优化方案。通过三级净化实现装配面微粒残留量降低80%；采用中频感应加热技术（控温精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）将热装时间压缩至10分钟以内；结合双级过滤模块（ $10\mu\text{m}+5\mu\text{m}$ ）与定量分阶段注脂，确保润滑脂颗粒浓度满足要求。研究结果可为大型风电主轴轴承的高效、高精度装配提供理论依据与技术支持，助力“双碳”目标下风电规模化开发的可靠推进。

1 主轴轴承装配过程清洁度控制

零部件清洁对主轴轴承装配质量具有决定性影响。灰

尘颗粒进入滚道后，会加速滚动体与滚道的接触疲劳失效，使轴承寿命缩短70%以上。微粒残留（ $> 5\mu\text{m}$ ）会导致轴承滚道应力集中，实测数据显示，每平方厘米存在3颗以上硬质颗粒可使接触疲劳寿命下降60%。装配前对主轴、轴承座装配面、轴承室及加脂孔测温孔的深度清洁，是消除潜在故障隐患的必要前提。清洁作业需遵循三级净化标准：首先采用高压气枪清除可见异物，特别注意对轴承室注油/排油孔、测温孔、倒角等易积存杂质的部位进行定向吹扫。再用酒精或专用清洁剂擦拭配合面，最后使用无毛絮布进行表面干燥。

作业环境控制是主轴轴承清洁装配的核心保障。车间里应设有独立隔离的轴承装配场地，如无法保证，作业区域也需要远离厂房门口（避免扬尘污染）和容易产生污染物的工艺环节（如喷砂、喷漆等）。轴承装配过程中使用的工装、吊索具、螺栓等应定期维护、保证清洁，避免在装配时有杂质脱落掉入轴承或轴承室内。

2 轴承热装方法及关键控制要求

轴承套圈与主轴及轴承座均为过盈配合，且通常情况下轴承内径与轴的配合更紧密，以 $\phi 2000\text{mm}$ 轴承为例，内径与轴的过盈量近1mm。轴承装配时，普遍采用热装法。以轴承内圈安装为例，热装法原理是通过轴承内圈均匀加热，使其膨胀量超过轴颈与内圈的过盈量后进行套装。按加热方法，一般可分为介质加热、辐射加热、感应加热等。其中，目前普遍采用的是中频感应加热技术。

中频感应加热是一种利用电磁感应原理实现金属材料快速加热的技术，其工作频率范围通常在1kHz-10kHz之间，通过交变电流在工件内部产生涡流效应和磁滞效应，使金属自身发热。相较于其他加热方法，中频感应加热具有以下核心优势：一是高效节能，能量通过电磁场直接作用于工件，热效率可达60%-80%（传统电阻炉

仅30%-40%)^[1]，且无需预热介质，大幅缩短加热时间；二是精准可控，采用闭环温度传感器与微处理器结合，可精确调节加热温度（误差±2℃以内）^[4]，避免局部过烧或材料相变失效；三是环保与自动化兼容，对比火焰加热或油浴加热，中频技术无废气排放和油污污染，且易于集成到智能生产线，支持远程控制和数据追溯^[2]。

轴承热装时需严格遵循精准控温、快速准确装配、可靠负压三大核心要求。在温度控制上，需根据过盈量准确计算并确定轴承加热温度，目前通常控制在90-120℃区间，严禁超过120℃（避免超过轴承材料回火温度）。轴承加热过程，需均布安装多点高精度温度传感器（靠近感应加热面位置）对轴承实时监控和反馈调节，使温度按照预定的曲线上升，达到设置温度后进行保温。

轴承加热温度计算公式如下：

$$T = \frac{\Delta d + \delta}{\alpha d_0} + T_0$$

其中， Δd 为过盈量， δ 为安全裕度， α 为线膨胀系数， d_0 为室温直径， T_0 为环境温度。以 $\phi 1800\text{mm}$ 主轴为例， Δd 过盈量为1mm， δ 取经验值为0.6mm， T_0 为30℃，查《机械设计手册》确定轴承钢的线膨胀系数 α 为 $13.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ - $14.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[4]，为方便计算， α 取中间值 $13.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 计算轴承加热温度 $T = \frac{(1+0.6)}{13.9 \times 10^{-6} \times 1800} + 30 = 94^\circ\text{C}$ ，实际作业时考虑安全余量，加热温度一般设置为110℃。

轴承快速准确装配是指在中频感应加热完成后，通过标准化流程实现轴承高效、零误差安装的核心工艺，其关键在于清洁调平预处理、精准定位与自动化协同。具体流程为：轴承加热前，通过调平吊具预调整轴承水平度（倾角 $< 0.2\text{mm/m}$ ）；轴承加热过程，预先使用无纺布及专用清洁剂对轴颈表面及轴承室进行清洁，去除毛刺、异物及残留微粒（清洁度需达到ISO 4406 14/11级）；轴承加热至目标温度（如 $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ）后，采用预调平吊具将轴承吊起，立即使用轴承擦拭纸清洁轴承装配面，确保无杂质（油脂或残留微粒等）残留。转运轴承至主轴正上方，定位阶段需借助导正工装，辅助校准轴承与轴颈的同轴度（偏差 $\leq 0.05\text{mm}$ ），缩短对中；装配时，以恒定速度（6-10mm/s）匀速下降，在轴承初始接触轴颈阶段（约下落前5%-10%行程），轻微旋转轴承确认无卡阻，然后匀速降落到位。该工艺通过清洁-调平-吊运-安装的全流程闭环控制，经过实际作业验证，可以将大型/高过盈风电轴承装配时间压缩至 $\leq 10\text{min}$ ，杜绝因装配时间过长，造成轴承安装过程卡滞。

轴承可靠负压技术的核心在于通过轴向压力抑制冷

却回弹，确保过盈配合的稳定性。该技术要求轴承热装后立即通过机械或液压工装施加持续压力，贯穿整个冷却周期，以抵消金属收缩引起的回弹力，使轴承与轴肩始终紧密贴合。以8MW主轴为例，轴承端面与轴肩间隙要求：待轴承与主轴恢复到环温后，松掉负压装置，用塞尺检查轴承端面与轴肩轴向间隙，要求整圈间隙 $\leq 0.05\text{mm}$ 。测量间隙时，塞尺塞进去的长度大于轴肩理论接触长度的1/3，视为有间隙，反之视为无间隙。工艺实现上分为两类：机械式负压采用螺纹锁紧工装压板或杠杆夹具，通过预紧力固定轴承，成本低但调节精度有限；液压式负压则通过液压缸动态控制压力，搭配高精度压力传感器和闭环调节，实时补偿压力波动。关键控制环节包括：1）压力全程维持，液压系统通过蓄能器补偿油路泄漏，控制压力衰减，机械式在冷却初期需定期人工复紧；2）贴合度实时监测，采用位移传感器或间隙塞尺检测轴承端面与轴肩间隙，超差即进行补压。3）通过数据积累后，可以适当缩短负压时间以提高生产效率。

3 轴承润滑脂加注关键控制要求

轴承润滑脂加注是在主轴轴承装配过程中向轴承腔体及接触面精准填充专用油脂的核心工艺，其核心作用在于构建厚度80-120 μm 的连续润滑膜，为轴承运行建立基础保护。轴承加脂应严格遵循以下原则：

定量分阶段加脂通过智能化设备与工艺设计实现加脂量精准控制。采用自动定量注脂系统（精度 $\pm 1\%$ ），首先在轴承滚道、滚子与保持架间隙及密封槽等关键部位实施矢量注脂，约占总脂量的40%；装配完成后，通过6-8个径向/轴向注脂孔注入总脂量剩余的60%，利用液压驱动系统以0.5-1rpm低速旋转轴承10-15周，使油脂在离心力作用下均匀分布至滚柱接触区。

正确选用油脂牌号直接决定润滑系统可靠性。依据图纸/设计规范输入，选用正确牌号油脂。例如：5MW陆上机组选用Mobil SHC 460 WT等PAO基合成油脂^[3]，8MW海上机组则采用Klüberplex BEM 41等耐盐雾腐蚀配方油脂^[3]。不同品牌油脂加注切换时需使用丙酮彻底清洗接触工具，避免稠化剂体系互溶导致的胶体结构破坏。

需要对油脂洁净度进行全过程管控。从存储环节开始，油脂需保存在专用密封储罐中，保持环境干燥，远离热源及冷源，避免阳光直射及长时间暴露于空气中，以减少氧化风险。注脂设备每日使用前需进行清洁维护，确保残留颗粒物符合ISO 4406 16/14/11标准；注脂过程中配置双级过滤模块，通过10 μm 不锈钢滤网与5 μm 陶瓷滤芯的阶梯过滤，定期检测监控颗粒浓度，并在注脂完成后采用磁性密封塞封闭注油孔，防止外部污染物侵入。

4 轴承压盖安装

轴承压盖安装是轴承装配过程中保障运行精度与寿命的核心工序，是在轴承冷却至环境温度（室温 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）后，通过压盖与轴承座形成过盈配合，从而精确控制轴承游隙并优化载荷分布。以下从压盖公差控制与紧固工艺两方面展开说明：

4.1 压盖尺寸公差控制：从理论到实践的精细化管控。

压盖作为轴承轴向预紧力的直接传递部件，其几何精度直接影响装配后轴承游隙的均匀性及长期稳定性。

1) 止口轴向高度公差（0, +0.015mm），该公差带设计基于轴承预压紧量的补偿需求。以圆锥滚子轴承为例，压盖高度需根据轴承组预压紧量进行补偿设计，是构建稳定负游隙的核心控制项点。安装前需精确测量（全周8点检测）并记录压盖止口尺寸，确保偏差不超过公差上下限。2) 端面平面度（ $\leq 0.01\text{mm}/100\text{mm}$ ），压盖端面作为与轴承座接触的应力传递面，其平面度超差会直接导致螺栓预紧力分布不均。例如，若平面度达到 $0.03\text{mm}/100\text{mm}$ ，在螺栓紧固时局部接触区域应力可能超限，引发压盖变形甚至轴承滚道偏磨。工艺上需通过磨削加工与蓝丹着色检测，确保接触面着色覆盖率 $\geq 85\%$ 。

4.2 十字交叉力矩分级紧固：应力均布与游隙优化的协同控制

螺栓紧固工艺的科学设计可显著降低装配应力集中，其核心在于分阶段释放变形能并引导应力均匀扩散，轴承压盖螺栓紧固需采用“十字交叉分级渐进式”工艺。在使用电动扳手完成初始预紧后，换用液压扭矩扳手按“50%-75%-100%”三阶段施加最终预紧力。首阶段以50%目标扭矩（如设计扭矩 $1000\text{N}\cdot\text{m}$ ，则首阶段为 $500\text{N}\cdot\text{m}$ ）完成初步定位，消除压盖与轴承座的微观间隙；第二阶段加载至75%扭矩（ $750\text{N}\cdot\text{m}$ ），

使接触面塑性变形趋于稳定；最终阶段施加100%扭矩（ $1000\text{N}\cdot\text{m}$ ），通过塑性变形与弹性变形的平衡实现持久预紧。每阶段严格遵循“对角优先、周向递进”原则，避免单侧应力累积。此外，在每阶段力矩紧固完成后，需以0.5-1rpm低速旋转轴承8-10周，利用滚动体与滚道的相对运动使压盖应力分布均匀化。工程实践表明，该工艺可消除85%以上的装配应力集中，并提升轴承游隙均匀性^[3]。

结语

本研究通过系统性工艺创新实现了大型风电主轴轴承装配质量的全面提升。在清洁控制方面，通过三级清洁净化标准与独立装配环境管控，显著提升轴承装配过程清洁度。针对大型轴承过盈配合，采用中频感应加热技术，结合精准定位与匀速装配工艺，将热装时间压缩至 $\leq 10\text{min}$ ，避免装配卡滞。润滑脂加注通过定量分阶段注脂级洁净度管控，可靠构建连续润滑膜。压盖安装则通过尺寸公差控制与十字交叉分级紧固，消除装配应力集中。该工艺方法运用能够保证大型风力发电机轴承可靠装配质量，为“双碳”目标下风电规模化开发提供可靠技术保障。

参考文献

- [1] 王维, 张建民. 轴承热装加热温度及工频加热法探讨[J]. 纺织器材, 2020, 47(z1): 11-15.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 风力发电机组装配和安装规范: GB/T 19568-2017.
- [3] 席瑞萍. 大型风电机组主轴轴承压紧工艺探讨[J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(3): 116-117.
- [4] 成大先, 王德夫, 韩学铨, 等. 机械设计手册（第5版）[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.