

起重施工船舶回转支承结构维护与故障预防

肖燕超 王鹏 王怀刚 冯伟 孟凡月

三峡物资招标管理有限公司 四川 成都 610040

【摘要】：起重施工船舶在海洋工程作业中长期承受复杂载荷和恶劣环境，回转支承结构作为关键承载与传动部件，其运行状态直接影响整船作业安全与效率。针对回转支承在实际使用过程中易出现的磨损、润滑失效、疲劳损伤及安装偏差等问题，结合船舶作业工况特点，对其结构特性、受力机理及典型故障形式进行分析。通过研究科学的维护管理方法与故障预防策略，提出以状态监测、规范保养和风险控制为核心的维护思路，为降低故障发生率、延长使用寿命提供技术依据，对提升起重施工船舶运行安全性具有现实意义。

【关键词】：起重施工船舶；回转支承；结构维护；故障预防；状态监测

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.083

1 起重施工船舶回转支承结构的工程应用特征

起重施工船舶回转支承结构是实现上部回转装置平稳运行和精准定位的核心部件，其工程应用具有承载能力大、结构集成度高和工作环境复杂等显著特征。在海洋工程作业中，该结构不仅需要承受起重臂及吊载产生的轴向力、径向力和倾覆力矩，还要在频繁启停和变载工况下保持稳定的回转性能，对结构强度和刚度提出了较高要求。回转支承通常采用大型滚道与滚动体组合形式，其设计需兼顾承载性能与空间布置条件，以满足船舶整体结构布局的限制。如国内首次国产化的尺寸最大的某2000T起重机三排圆柱组合式回转支承，作为全国首次在船舶上应用的最大规格回转支承，通过三列滚动体的线接触设计，实现了极强的综合承载能力，同时具备工作可靠性高、维护便利、运转灵活的优势，充分适配海洋工程高负荷作业需求。在实际工程应用中，起重施工船舶作业时间长、连续性强，回转支承结构往往处于长期高负荷运行状态。受船舶姿态变化、海况波动及吊装工况差异的影响，回转支承内部载荷分布呈现明显的不均匀特征，局部接触应力和边缘效应较为突出。这种复杂受力状态使得回转支承在运行过程中易产生滚道磨损、滚动体疲劳及局部塑性变形等问题，对结构可靠性构成潜在威胁^[1]。同时，起重施工船舶多在海洋环境中作业，空气湿度大、盐雾腐蚀严重，回转支承结构长期暴露于不利环境条件之下。润滑系统受海水侵蚀、杂质混入等因素影响，其有效性和稳定性难以长期保持，进一步加剧了摩擦副的磨损程度。加之回转支承结构体积大、安装位置特殊，日常检查和维护作业存在一定难度，使其工程应用呈现出维护周期长、状态识别不直观的特点。

从系统角度看，回转支承结构与回转驱动装置、制动系统及船体主体结构之间具有高度耦合关系，其运行状态直接决定

回转系统的稳定性、响应特性和作业精度。回转支承承载与传动性能的变化，会通过驱动和制动环节放大为回转阻力波动、运行振动增强等问题，影响设备操控的平稳性与定位可靠性。当回转支承性能持续退化时，整船回转系统的协调性将受到破坏，起重作业安全性和作业效率随之下降。因而，准确把握回转支承在工程应用中的功能定位、受力特征及其对海洋环境的适应能力，是构建科学维护体系和实施故障预防策略的重要前提。

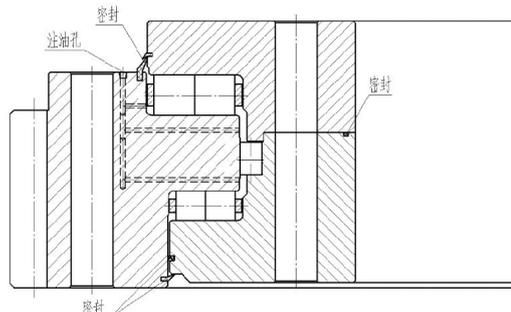


图1 回转轴承示意图

2 复杂作业条件下回转支承结构运行状态分析

复杂作业条件下，起重施工船舶回转支承结构的运行状态呈现出明显的工况敏感性与非线性特征，核心表现为载荷谱宽、瞬态冲击多、接触状态变化频繁。吊装作业过程中，吊载质量、幅度变化与回转半径调整会导致轴向载荷、径向载荷及倾覆力矩的组合持续波动，回转支承滚道—滚动体接触区的应力水平随之动态迁移。船舶在浪涌、横摇、纵摇条件下产生的姿态变化会引入附加载荷，使回转支承的受力中心偏移，局部滚动体载荷集中现象更为突出，接触应力呈现不均匀分布并伴随周期性峰值。

回转支承运行状态可从力学响应、运动特性与润滑摩擦状态三个维度进行综合判别。力学响应方面,滚动体与滚道的赫兹接触应力、滚道表面剪应力以及支承环结构的应变响应是关键指标,长期高应力叠加会加速滚道疲劳点蚀与剥落的形成^[2]。运动特性方面,回转驱动扭矩与回转阻力的波动能够反映内部摩擦与接触状态变化,当滚道出现局部损伤或滚动体圆度误差增大时,回转阻力会表现出周期性脉动,低速回转时尤为明显,容易伴随爬行与微振现象。润滑摩擦状态方面,润滑膜厚度与黏附磨损倾向决定摩擦副的磨损速率,海上环境中润滑脂受水分乳化或杂质污染后,边界润滑占比上升,摩擦系数增大,导致温升与磨粒磨损加剧。在复杂工况的影响下,回转支承结构的状态退化往往具有隐蔽性和累积性。早期退化多表现为润滑性能下降、滚道表面微观疲劳裂纹萌生与轻微磨损,外部症状不明显,但可通过振动信号的高频成分、冲击脉冲特征以及回转驱动电流的细微异常加以识别。随着损伤扩展,滚道点蚀逐渐发展为剥落区,滚动体载荷分配进一步失衡,引发更强的振动与噪声,回转扭矩出现显著波动,局部温升增大,甚至产生金属屑污染润滑介质的恶性循环。若叠加安装面不平度、螺栓预紧力衰减或齿圈啮合偏差等因素,回转支承环的变形会放大接触边缘效应,导致承载能力下降并增加失效风险。基于上述运行状态特征的系统分析,有助于明确关键监测量与典型异常模式,为后续风险识别与预防性维护策略构建提供依据。

3 回转支承结构维护管理中存在的关键风险

回转支承结构在起重施工船舶长期服役过程中,其维护管理环节面临多种潜在风险,这些风险往往源于结构复杂性、运行工况多变以及管理方式滞后等因素的叠加影响。由于回转支承承担多向复合载荷,其内部损伤演化具有渐进性特征,而常规维护多以时间周期或经验判断为依据,难以及时反映真实运行状态,导致隐蔽性缺陷在较长时间内未被有效识别,增加了突发性失效的可能性。在维护管理实践中,润滑管理失效是回转支承结构面临的突出风险之一。润滑脂选型不合理、补脂周期设置不科学以及润滑通道堵塞等问题,会直接削弱滚动体与滚道之间的润滑膜完整性,使摩擦副长期处于边界润滑甚至干摩擦状态。例如某2000T起重机电回转支承明确要求使用2号极压锂基润滑脂,出厂时已注脂但安装后使用前需再次通过各列润滑孔加注30L~50L,后续每工作50~100小时需补脂至密封唇溢出新鲜润滑脂,若未按此规范操作,将直接导致润滑失效,加剧磨损。润滑不足不仅加剧磨损速率,还会导致接触区温升异常,促使材料疲劳性能下降,从而缩短回转支承的有效服役周期。此外,润滑介质在海洋环境中易受到水分侵入和颗粒污染,若缺乏针对性的检测与更换机制,润滑劣化问题将持续累积并放大结构风险^[3]。安装与连接部位管理不到位同样构成重要风险因素。回转支承结构通常通过高强度螺栓与船体基础及上部结构连接,预紧力水平直接关系到载荷传递路径和结构刚

度分布。在长期振动和交变载荷作用下,螺栓预紧力可能发生衰减,连接刚度下降,导致回转支承环产生附加变形,滚道接触区域向边缘集中。若维护过程中未能对螺栓状态进行有效监测与复核,局部超载和应力集中问题将进一步恶化,增加结构疲劳裂纹扩展和断裂风险。维护信息获取不充分是制约回转支承结构安全运行的重要风险因素。受结构封闭性强、安装位置受限等条件影响,传统检查方式难以直接获取内部磨损、疲劳损伤及润滑状态等关键信息,维护决策往往依赖外观观察或运行经验判断,缺乏客观数据支撑,容易造成风险识别偏差。状态监测技术应用不足,使振动、温升、回转阻力等能够反映结构运行状态的关键参数未能持续、系统地采集与分析,早期异常难以及时发现。在复杂工况和多种不利因素共同作用下,回转支承结构可能在缺乏明显外部征兆的情况下发生性能快速衰减甚至失效,显著增加起重施工船舶作业过程中的安全风险,对设备稳定运行和作业连续性构成潜在威胁。

4 基于故障机理的回转支承维护与预防策略

基于故障机理开展回转支承结构的维护与预防工作,需要将失效模式与运行特征相结合,构建具有针对性的技术体系。回转支承常见故障包括滚道疲劳剥落、滚动体磨损失圆、润滑失效以及连接部位松动等,其本质均与接触应力集中、润滑条件恶化及结构刚度变化密切相关。围绕这些机理展开维护策略设计,有助于实现从被动修复向主动预防的转变,提高结构运行可靠性。在维护策略制定中,应强化基于状态的维护理念,通过多参数监测手段对回转支承运行状态进行动态评估。以某2000T起重机电回转支承磨损监测为例,通过在回转轴承外圈臂架铰点正下方居中及尾部正后方设置4个相隔90°的测量点,安装磨损间隙检测基准板并做好洋冲标记,使用深度游标卡尺按规定臂架角度和回转位置量取数据,与基准值的绝对值差值即为滚道磨损量,当磨损量达到预警值时缩短检测周期并通知厂家分析,这种精准监测方式可有效识别早期磨损故障。振动信号、回转驱动扭矩、轴向与径向位移以及局部温升等参数能够反映内部接触状态和摩擦特性变化,对早期疲劳损伤和润滑退化具有较高敏感性。通过对这些数据进行趋势分析与特征提取,可实现对异常状态的提前识别,为维护决策提供量化依据,避免仅依赖固定周期检修带来的维护盲区^[4]。润滑管理应围绕故障机理进行精细化控制。根据回转支承承载水平、转速特性及环境条件,合理选择具有抗水性和抗磨性能的润滑脂,并对补脂量与补脂间隔进行动态调整。结合运行数据评估润滑状态变化,能够有效防止因润滑不足或过量引发的摩擦异常和温升问题。同时,应加强对润滑通道畅通性的检查,防止因堵塞造成局部润滑失效,降低磨粒磨损和表面疲劳的发生概率。针对连接与安装相关故障机理,维护策略应注重结构整体刚度与载荷传递路径的稳定性。通过定期检测螺栓预紧力、基础平面度及支承环变形情况,可及时发现连接刚度退化问题,防止滚道

边缘效应扩大。必要时结合运行状态评估结果,对预紧力进行再分配或调整安装精度,以改善载荷分布状态,降低局部应力集中风险。在故障预防层面,应将运行工况管理纳入维护体系,通过优化作业参数、避免长时间超载和频繁冲击工况,减缓结构疲劳损伤积累。将故障机理分析与状态监测、润滑控制和结构管理相结合,能够形成系统化的维护与预防策略,为回转支承结构的安全稳定运行提供技术保障。

5 维护与故障预防措施的工程应用效果分析

维护与故障预防措施在起重施工船舶回转支承结构中的工程应用效果,可通过运行稳定性、结构损伤演化速度及维护成本变化等多个维度进行综合评估。在实施基于状态监测与故障机理分析的维护策略后,回转支承运行参数的波动幅度得到明显控制,回转驱动扭矩曲线趋于平稳,异常峰值出现频率显著降低,表明内部接触状态和载荷分布得到有效改善。运行过程中低速回转阶段的爬行与振动现象减弱,回转系统的整体协调性和操控精度随之提升。从结构损伤控制效果来看,针对润滑、连接与工况管理等关键环节采取预防性措施后,滚道表面疲劳损伤的发展速率得到抑制。滚动体与滚道之间的接触应力分布更加均匀,点蚀和剥落缺陷的扩展周期明显延长,润滑介质中金属磨屑含量保持在较低水平,反映出摩擦副磨损状态趋于稳定。结构监测数据表明,局部温升和高频振动成分出现的时间间隔被拉长,结构从早期异常向严重损伤转化的风险显著降低^[5]。在维护管理层面,工程应用效果体现在维护决策科学性的提升。通过对运行数据的持续采集与分析,维护计划由传统的定期检修模式逐步转向以状态评估为依据的动态调整方式,减少了不必要的拆检和停机时间。维护资源配置更加合理,关键部位检查和处理的针对性增强,避免了因维护滞后或过度维护造成的运行风险和资源浪费。工程应用实践表明,系统化故障预防措施的实施能够显著提升回转支承结构的整体服役可靠性。通过持续的状态监测与针对性维护,回转系统在长周期运行过程中保持较为稳定的力学与运动性能,异常波动得到有效控制,突发性故障发生概率明显降低,作业连续性和安全裕度随之提升。维护管理方式由以往依赖经验判断逐步转向以运行数据和状态评估为依据,维护人员对设备运行状态的认知更加准确,风险识别及时性和应急处置的有效性同步增强。随着维护与故障预防措施在工程实践中的不断完善和长期应用,回转支承结构的损伤演化速率得到控制,整体使用寿命得以延

参考文献:

- [1] 陈浩,蒋金刚,胡军臣,等.一种新型船舶分段建造肋板拉入工装及施工方法[J].船舶标准化工程师,2026,59(01):44-47+56.
- [2] 张冠.搭载海上石油平台和风电项目施工人员船舶的安全监管[J].世界海运,2025,48(11):39-42.
- [3] 杜宇,王凯.基于两种波浪数据的施工船舶可作业预报对比[J].船海工程,2024,53(02):132-136.
- [4] 肖聪.疏浚吹填施工船舶防台安全措施分析[J].珠江水运,2025,(20):62-64.
- [5] 王立波.浅谈埋岛海域工程配套施工船舶的应用与管理[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2020,(04):9-10.

长,为起重施工船舶安全、高效、稳定运行提供了坚实保障。

6 起重施工船舶回转支承结构技术发展趋势

随着海洋工程作业向大型化和高复杂度方向发展,起重施工船舶回转支承结构的技术发展逐步呈现出高承载能力、高可靠性与智能化并行推进的趋势。在结构设计层面,回转支承正朝着高强度材料应用和结构优化方向演进,通过改进滚道截面形式、优化滚动体排列方式以及提升整体刚度水平,以适应更大起重能力和更复杂载荷组合条件下的长期服役需求。有限元分析与多体动力学仿真技术的深入应用,使结构受力预测更加精细,为设计阶段的可靠性提升提供了技术支撑。在运行保障技术方面,回转支承结构逐步融入数字化与智能化管理体系。基于传感技术的状态感知手段不断完善,振动、温度、载荷和位移等关键参数实现多源融合采集,为结构健康评估提供连续数据基础。通过建立运行状态模型和退化规律分析方法,可实现对关键部位损伤演化趋势的预测,推动维护模式由事后检修向预测性维护转变。这种以数据驱动为核心的管理方式,有助于降低突发性失效风险,提升系统运行安全裕度。润滑与防护技术的发展同样对回转支承结构性能提升具有重要意义。新型高性能润滑材料在抗水性、抗磨性和稳定性方面不断改进,使润滑系统在恶劣海洋环境中的适应能力增强。密封结构设计趋于精细化,通过提高密封可靠性和防护等级,减少水分和杂质侵入,为滚动副提供更加稳定的工作环境。这类技术进步能够有效延缓磨损和腐蚀过程,改善回转支承的长期运行状态。在系统协同层面,回转支承结构的发展正逐步与整船回转系统及作业控制系统实现深度融合。通过对回转驱动参数、作业工况和结构状态的协同调控,可在运行过程中主动规避不利载荷组合,优化载荷传递路径,降低结构疲劳累积速率。未来,回转支承结构技术将更加注重设计、运行与维护的全寿命周期协同管理,以实现起重施工船舶安全性、可靠性和经济性综合提升。

7 结语

围绕起重施工船舶回转支承结构的工程应用特点与运行特性,对其在复杂作业条件下的状态变化、维护管理风险及故障预防路径进行了系统分析。通过结合故障机理提出针对性的维护与预防策略,并对工程应用效果进行探讨,表明科学的维护管理对提升结构可靠性和运行安全具有重要作用。在此基础上,对相关技术发展趋势进行了展望,为回转支承结构的长期安全运行和管理优化提供了参考。