

机械装配中螺栓预紧力控制对连接质量影响

侯川江

广东粤水电装备集团有限公司 广东 广州 511458

【摘要】：针对机械装配中螺栓预紧力控制不当引发的连接抗振性下降、塑性变形及受力不均衡问题，剖析了拧紧工具精度不足、摩擦系数波动与装配工艺缺失等核心诱因。通过选用高精度智能拧紧设备、优化接触面摩擦处理工艺并制定标准化作业规程等措施实施系统改进。工程应用表明，该优化方案使航空发动机转子螺栓松动率显著降低，风电机组锚栓预紧力偏差得到有效控制，机床导轨残余预紧力离散性明显改善。精准预紧不仅提升了连接可靠性与疲劳寿命，还保障了设备几何精度、密封完整性及动态响应特性，验证了其对于提升机械设备整体装配品质的关键作用。

【关键词】：螺栓预紧力；连接质量；装配工艺；摩擦系数；智能拧紧

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.001

引言

机械装备的性能与寿命高度依赖于连接副的可靠性，而螺栓预紧力作为维系结构完整性的核心参数，其控制精度直接决定装配质量。当前工业现场普遍存在因预紧力失控导致的松动、塑性损伤及载荷分布失衡等问题，根源在于工具动态误差、界面摩擦波动与工艺规范缺失的多重耦合。随着高端装备对精密装配要求的不断提升，传统经验式拧紧已难以满足一致性需求。深入解析预紧力偏差的形成机制，构建涵盖设备选型、摩擦管理与标准化作业的系统性控制策略，并验证其在典型工程场景中的实效，成为突破装配质量瓶颈、保障装备长期稳定运行的关键路径。

1 螺栓预紧力控制不当引发的连接质量问题

1.1 预紧力偏小导致连接抗振性能下降

螺栓预紧力不足会直接削弱被连接件接触面间的摩擦阻力，使连接副在承受交变载荷或机械振动时丧失自锁能力。当外部激励频率接近系统固有频率时，微小的轴向力波动即可引发螺纹牙侧面的微观滑移，这种滑移累积效应会导致螺母与螺栓之间产生相对转动，进而造成预紧力持续衰减。随着振动循环次数增加，连接间隙逐渐扩大，原本由摩擦力承担的剪切载荷被迫转移至螺栓杆身，诱发附加弯曲应力与应力集中现象^[1]。在长期动态工况下，这种非设计状态下的受力模式不仅加速了螺纹磨损与塑性变形，还可能触发共振放大效应，使局部应力远超材料屈服极限，最终导致连接结构出现不可逆的松脱甚至断裂失效，严重影响整机运行的安全性与可靠性。

1.2 预紧力偏大造成螺栓塑性变形损伤

过大的预紧力会使螺栓轴向拉应力迅速逼近甚至超越材料的屈服强度，导致螺纹根部及光杆过渡区等应力集中部位发生不可逆的塑性伸长。这种永久变形破坏了螺栓原有的弹性储能特性，使其在后续服役过程中无法有效补偿因温度变化或接触面嵌入引起的载荷损失。塑性变形还会改变螺纹牙型的几何精度，降低旋合长度内的载荷分布均匀性，加剧局部微动磨损

与疲劳裂纹萌生风险。材料内部晶格结构因过度拉伸而产生位错堆积与残余应力重分布，显著削弱其抗拉强度与韧性储备。在高预载状态下，螺栓对装配误差和表面粗糙度的敏感性急剧上升，微小的不对中即可引发偏心加载，进一步放大实际应力水平，使连接副在未达到设计寿命前即进入损伤累积阶段，丧失应有的安全裕度与功能完整性。

1.3 预紧力离散引发构件受力不均衡

同一连接副中各螺栓预紧力存在显著偏差时，被连接件接触面压力分布呈现非均匀状态，导致刚度矩阵发生局部畸变（见图1）。高预紧力区域承受超额压缩变形，而低预紧力区域则因夹紧不足产生微小间隙或滑移趋势，使外加载荷无法按设计比例传递。这种不均衡迫使部分螺栓提前进入高应力工作状态，加速其疲劳损伤进程，同时邻近螺栓因分担载荷减少而未能充分发挥承载效能。在动态工况下，受力不均还会激发连接界面的非线性响应，引发振动模态偏移与能量耗散异常，进一步放大个别螺栓的交变应力幅值。法兰或盖板类构件在偏心压紧作用下可能发生翘曲变形，破坏密封完整性并诱发泄漏。预紧力离散程度越大，系统对制造公差、表面状态及装配顺序的敏感性越强，最终导致整体连接性能偏离理论预期，形成隐性失效源。

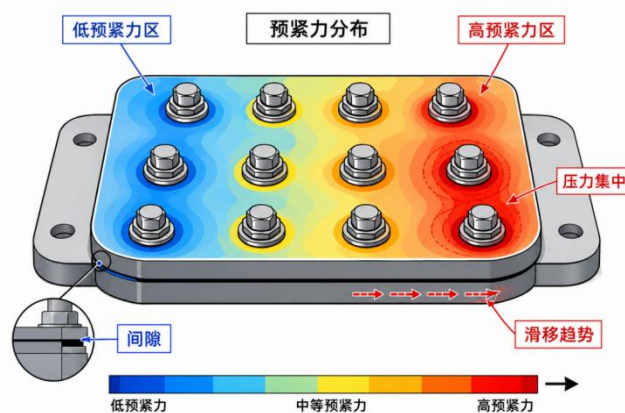


图1 预紧力离散引发构件受力不均衡示意图

2 螺栓预紧力控制精度偏差的主要诱因

2.1 拧紧工具精度不足造成控制误差

拧紧工具静态标定精度仅为理想实验室性能参数,实际装配动态工况会明显放大有误差。气动工具受供气压力与流量波动影响,扭矩输出非线性突出,即便配置精密调压阀,瞬时负载变化仍会引发转速波动,干扰最终紧固效果^[2]。电动拧紧轴减速齿轮存在啮合间隙与摩擦损耗,长期运行产生磨损后传动效率逐步降低,同等电流对应的实际扭矩会持续偏离初始校准标准。高精度传感器存在采样频次局限,控制算法响应存在延迟,高速拧紧阶段易出现扭矩过冲或紧固不足。不同工具存在制造公差偏差,统一设定参数下各工位预紧力离散程度超出工艺范围,无法有效保障螺栓连接副装配一致性。

2.2 摩擦系数波动影响预紧力稳定性

螺栓连接副里螺纹面与支撑面的摩擦状态,直接把控扭矩转化为轴向预紧力的实际效率,摩擦系数受各类变量共同作用,整体表现出极强的不稳定性。磷化、镀锌、达克罗等不同表面处理工艺,涂层厚度偏差与表面微观结构区别,会拉大同批次构件摩擦性能的差异区间。润滑介质品类、涂抹均匀程度以及使用老化情况,都会进一步放大数值波动,油脂用量失衡都会造成摩擦系数偏离标准设计参数。反复拧紧作业会让接触面产生塑性形变与磨粒损耗,表面粗糙度随之改变,动态摩擦系数持续变动,无法实现精准调控补偿。外界温湿度波动还会改变润滑膜黏稠度,催生表层氧化物质,持续干扰摩擦界面结构。多重因素相互叠加影响,致使同等扭矩作用下实际夹紧力偏差显著,大幅降低螺栓连接结构稳定性,也难以精准预判构件疲劳使用年限。

2.3 装配工艺缺失导致施工不规范

标准化作业指导书的缺位或内容模糊使操作人员缺乏明确的拧紧顺序、分步加载策略及终拧判定依据,极易引发多螺栓连接副间载荷分配失衡与弹性交互损失。专用工装夹具选型不当或未定期校验,造成定位基准偏移与夹紧姿态失稳,间接改变力矩传递路径并引入附加弯矩。扭矩工具未按周期进行计量溯源与功能验证,其示值误差与重复性偏差长期累积而未被识别纠正。现场环境管控措施缺失,如粉尘侵入螺纹副、油污污染支撑面或温度骤变未作补偿调整,均会干扰预设工艺参数的有效执行。培训体系不健全致使人员对预紧原理解浅薄,仅凭经验主观判断拧紧状态,忽视工艺文件中关于转角法、屈服点法等精密控制手段的具体要求,最终使理论设计意图在实际装配环节严重失真。

3 提升螺栓预紧力控制效果的优化措施

3.1 选用高精度装配拧紧作业设备

采用具备闭环反馈与多阶段控制策略的智能电动或液压拧紧系统,能够实时监测扭矩与转角参数并动态调整输出,有

效克服传统工具因响应滞后或过载保护不足造成的预紧力偏差。高精度设备内置高分辨率传感器与专用控制算法,可在拧紧过程中自动识别屈服点、贴合点等关键状态,实现从自由旋入到最终紧固的全程精准调控。设备需定期通过标准测力仪进行校准验证,确保其测量与控制单元长期处于标称精度范围内,避免因元器件老化或环境温漂引入系统误差。配套使用经标定合格的套筒、延长杆及反力臂等附件,减少传动链中的间隙与弹性变形对扭矩传递的干扰。在复杂工况下,选择具备抗电磁干扰、温度补偿及数据追溯功能的机型,可进一步提升装配过程的可重复性与结果可信度,为连接质量提供坚实硬件基础。

3.2 优化接触面摩擦处理工艺手段

通过精确控制被连接件表面粗糙度、平整度及清洁度,可显著降低摩擦系数的离散性,使相同扭矩下产生的轴向预紧力更具一致性。采用喷丸、磷化、达克罗或专用润滑涂层等表面处理技术,不仅能调节界面摩擦特性,还能防止装配过程中因微动磨损或氧化膜破裂导致摩擦状态突变。在关键连接部位施加经验证的装配润滑剂,并确保涂覆均匀、无遗漏、无污染,有助于减少螺纹副与支承面间的摩擦波动,提升扭矩-预紧力转换效率。对重复使用的接触面实施再处理工艺,如重新研磨、清洗或补涂防护层,避免历史损伤或残留物干扰当前装配状态^[3]。所有摩擦处理工序均需纳入工艺文件并设定过程检验节点,确保处理效果满足设计要求且批次间稳定可控,从而为预紧力精确传递提供可靠界面条件。

3.3 制定标准化螺栓装配作业规程

依据连接结构特性与工况要求,明确每颗螺栓的拧紧顺序、分步加载策略及最终目标扭矩或转角值,并将其固化为可执行的工艺卡片或数字化作业指导书。针对不同规格、材质及表面处理状态的螺栓,分别设定专用工具选型、校准周期及操作手法规范,避免因工具不匹配或操作随意性引入额外误差。将润滑剂涂抹位置、用量及等待时间等细节纳入规程,确保摩擦条件在每次装配中高度复现。对多螺栓法兰或盖板类连接,规定对称交叉、逐级递增的拧紧路径,防止局部过载或密封面偏斜。规程中还需包含异常处置流程,如扭矩未达标、滑牙或重复拧紧时的判定标准与补救措施。所有操作步骤应配套可视化图示或视频演示,降低理解偏差,并通过定期审核与现场验证持续更新内容,使作业规程始终与实际装配状态和技术要求保持同步适配。

4 预紧力优化工艺的实际应用成效分析

4.1 机械螺栓连接可靠性能有效提升

在航空发动机转子装配中,通过引入基于 TRIZ 理论的螺栓预紧力控制方案,攻关团队在螺栓上布置微应变片同步测量扭矩与转角角度,发现转角达到临界值后可线性反映内部预紧

力状态,据此制定了精确角度补偿工艺,并规范了润滑脂的品种、用量与涂抹均匀性。经过多轮工艺验证,转子装配后扭矩复验合格率大幅提升,扭矩丢失现象得到有效遏制,螺栓松动率降低 28.3%。在风电领域,某 6.25MW 机组基础锚栓采用智能螺栓实时监测轴力数据,发现液压拉伸后预紧力与设计值 716kN 存在最大 28% 的偏差,通过轴力数据现场指导重新张拉,将偏差率降至 10% 以内,超差数量下降 100%,过程能力指数 CPK 达到 1.67。在机床导轨装配中,基于螺栓交互刚度模型优化装配工艺后,残余预紧力离散性显著降低,一致性得到有效提升。

4.2 螺栓连接结构使用寿命延长

精准稳定的预紧力可有效抑制交变载荷下螺纹副间的微动磨损与应力幅值波动,从而显著延缓疲劳裂纹萌生^[4]。通过优化预紧力分布均匀性,避免局部过载导致的塑性变形或欠载引发的松动滑移,使连接界面始终处于弹性协调状态。合理匹配螺栓与被连接件的刚度比,降低螺栓承受的动态载荷分量,减轻其循环应力损伤。在腐蚀环境中,充足且均匀的夹紧力能维持密封完整性,阻止介质侵入螺纹啮合区,减缓电化学腐蚀与氢脆风险。定期监测预紧力衰减趋势并及时补拧,可补偿因蠕变、松弛或温度变化引起的载荷损失,防止连接性能退化累积。选用抗疲劳性能优异的螺栓材料与表面处理工艺,结合精确的预紧控制,形成多重防护屏障,使连接结构在设计寿命期内保持功能稳定与结构完整。

4.3 机械设备整体装配品质提升

螺栓预紧力的精确调控直接决定了机械设备各功能模块间的几何精度保持能力与动态响应特性。在精密传动系统装配过程中,均匀的夹紧力分布可有效补偿结合面微观形貌差异,避免因局部应力集中导致的箱体变形或轴承座孔失圆,进而保障齿轮啮合间隙与轴系同轴度处于设计公差带内。对于承受交变载荷的运动副连接,稳定的预紧状态通过维持界面摩擦阻力来抑制微动磨损与疲劳裂纹萌生,延长关键部件服役寿命。在密封腔体与管路系统中,合理的压紧力使弹性密封元件产生持续且均匀的压缩变形,形成可靠的密封屏障,防止介质泄漏引发的性能衰减或环境污染^[5]。多螺栓组采用分步交叉拧紧工艺配合实时扭矩转角监控,确保所有紧固件同步达到目标夹紧水平,消除装配顺序引起的载荷偏载现象,为整机振动噪声控制、热变形协调及长期运行稳定性奠定坚实的力学基础。

5 结语

螺栓预紧力控制是机械装配质量的关键,其把控精度直接影响连接结构可靠性与设备整体性能。预紧力出现偏差,易造成连接件松脱、塑性变形、受力不均等故障,偏差主要源于工装精度不足、接触面摩擦变化及装配工艺不规范。采用高精度智能拧紧装置,优化摩擦处理方式,落实标准化装配流程,能够有效稳定预紧力控制效果。实际应用表明,精准预紧可减少结构松动,提升构件疲劳使用寿命,保证设备传动、密封及动态运行品质。后续可深挖预紧力作用机理,融合传感监测、数字孪生与自适应控制技术,推动装配模式由经验操作转向数据化精密管控,助力高端装备制造提质升级。

参考文献:

- [1] 陈笋,周宇鹏,谢洪虎,等.核电厂主设备支承锚固螺栓预紧力确定方法研究[J].核动力工程,2025,46(05):148-151.
- [2] 林嘉诚.航空发动机装配过程中螺栓连接拧紧工艺优化研究[J].机械管理开发,2025,40(07):197-198+201.
- [3] 孟祥昊,于坤鹏,王志海.随机振动中预紧力对螺栓载荷的影响研究[J].机械工程与自动化,2025,54(03):1-4+8.
- [4] 王稳,罗宇航,李时华.叶片载荷与螺栓预紧力对应关系分析与研究[J].中国设备工程,2025,(02):138-140.
- [5] 刘宁,安鲁陵,许文豪,等.偏差对螺栓连接拧紧力矩-预紧力关系的影响[J].机械设计与研究,2024,40(04):249-255+260.