变流器典型装配结构螺栓紧固扭矩衰减研究

李逞龙　李　滔
株洲中车时代电气股份有限公司　湖南　株洲　412001

摘　要：针对变流器典型装配结构在服役过程中螺栓紧固扭矩衰减易引发连接失效问题，本文以功率单元、箱体、散热器、母排为研究对象，分析扭矩衰减机理与关键影响因素，通过试验测试与有限元仿真揭示静置、温度、振动条件下的衰减规律，并开展影响因素敏感性排序。研究提出结构优化、装配工艺改进及长效防松组合控制措施，工程应用表明，该方法可有效降低扭矩衰减率，提升连接稳定性与装配一致性，为变流器可靠装配提供技术支撑。

关键词：变流器；装配结构；螺栓连接；扭矩衰减；预紧力控制

引言：风电变流器作为风电电力变换系统核心装备，其装配质量直接影响整机运行安全[1]。螺栓连接是功率传输、结构承载、散热耦合的关键形式，扭矩衰减会导致接触不良、发热、松动甚至失效。目前生产与运维中，扭矩衰减机理不清、控制手段不足、装配一致性差等问题突出。本文围绕典型结构开展机理分析、试验验证与仿真研究，形成系统化控制方案，对提升风电变流器装配可靠性、降低故障率具有重要工程意义。

1 变流器典型装配结构与螺栓紧固基础

1.1 变流器典型装配结构

变流器装配以模块化、高集成度为特征，核心承载与功能界面均采用螺栓刚性连接，直接决定整机电气导通、散热效率及结构强度。功率单元为核心装配体，由IGBT模块、驱动板、支撑电容叠装而成，螺栓承担模块压紧、电气接触与载荷传递作用；箱体采用型材焊接框架，通过螺栓实现侧板、门板、吊耳与框架紧固，保障运输与服役刚度；散热器与功率模块贴合装配，螺栓预紧力需保证界面均匀接触，兼顾热传导与结构约束；母排连接采用大电流铜排叠压装配，螺栓紧固直接影响接触电阻与通流能力。四类结构均为变流器主承载与功能实现部位，是螺栓扭矩衰减重点研究对象。

1.2 螺栓连接紧固原理

螺栓紧固以建立稳定可控预紧力为目标，实现被连接件贴合、夹紧与防松。扭矩—预紧力关系为核心耦合机制，施加扭矩经螺纹副摩擦、支承面摩擦损耗后，转化为螺栓轴向预紧力，形成夹紧力约束被连接件。扭矩输入与预紧力输出呈非线性对应关系，受摩擦系数、螺纹精度、支承面状态影响显著。变流器装配多采用扭矩控制法，通过设定目标扭矩实现预紧力管控，保证连接刚度、密封性能与长期可靠性。紧固过程中，螺栓弹性伸长与被连接件压缩变形共同构成夹紧系统，其力学稳定性直接影响扭矩衰减趋势。

1.3 扭矩衰减定义与评价指标

扭矩衰减指螺栓紧固完成后，在静置、载荷、温度、振动作用下，残余扭矩随时间逐步下降并趋于稳定的现象，本质为夹紧系统应力松弛与接触状态重构导致的预紧力损失。评价指标以残余扭矩、扭矩衰减率为核心，表征衰减程度与稳定性。残余扭矩为规定时间或工况后实测保持扭矩；衰减率为初始扭矩与残余扭矩差值相对初始扭矩的百分比。结合变流器装配要求，建立静置衰减、温度循环衰减、振动衰减三级评价体系，用于判定结构与工艺对扭矩保持能力的影响，为装配优化提供量化依据[2]。

2 扭矩衰减机理及关键影响因素分析

扭矩衰减是螺栓连接系统在预紧后因内部应力重分布、界面状态变化及外部环境作用引发的预紧力与扭矩持续下降行为，其产生机理与影响因素直接决定变流器装配连接的长期稳定性。（1）应力松弛与材料蠕变是主要内在机理，螺栓及被连接件在持续预紧力作用下发生微观塑性变形，造成弹性应力损失，密封垫、绝缘件等非金属部件在压缩状态下出现蠕变与回弹不足，直接导致夹紧力降低并形成扭矩衰减。（2）界面滑移与接触状态重构是装配过程主要诱因，接触面微观不平度、涂层厚度差异、清洁度不足会使紧固后界面逐步压实贴合，螺纹副与支承面摩擦状态改变，使初始建立的扭矩向低水平稳定值过渡。（3）振动激励引发动态松弛，变流器运行中产生的交变振动使连接界面发生微幅相对运动，摩擦阻力下降，预紧力不断耗散。（4）温度循环加剧材料性能变化，高温使材料屈服强度降低、蠕变加快，冷热交替导致热胀冷缩不一致，形成附加应力与界面间隙，加速扭矩衰减。（5）工艺参数影响显著，拧紧方式、扭矩施加精度、复紧时机、润滑状态均会改变摩擦

系数与应力分布，直接影响衰减幅度与稳定时间。

3 扭矩衰减试验与仿真验证

3.1 试验方案

试验围绕变流器典型装配结构开展，试件选取功率单元压紧结构、母排连接结构、散热器贴合结构三类工程常用装配形式，螺栓规格覆盖 M6～M12 高强度连接副，被连接件包含铝合金板材、铜排、绝缘垫片、导热硅脂界面等实际装配材料。（1）试件加工严格遵循车间装配工艺，表面处理、涂层厚度、清洁度、润滑状态与量产装配一致，保证试验条件贴近工程实际。（2）工况设置包含静置衰减、温度循环、振动载荷三类典型服役条件，静置衰减采用室温常态放置，温度循环区间设定 -40℃～125℃，振动载荷依据风电设备运行环境设置频率与加速度等级，复紧工艺、扭矩等级、拧紧方式作为变量纳入对比。（3）测试系统采用高精度扭矩扳手、静态扭矩传感器、数据采集模块组成，实时记录初始紧固扭矩、放置不同时长后残余扭矩、环境载荷下扭矩变化曲线，采样点覆盖0h、1h、24h、72h、168h 关键节点。（4）试验流程执行装配→初拧→终拧→标记→复测→环境加载→数据提取→分析计算，全过程控制拧紧速度、角度、顺序，减少人为操作误差。

3.2 试验结果与衰减规律分析

试验数据表明，变流器螺栓连接扭矩衰减呈现明显阶段性特征，衰减速率随时间逐步放缓并最终趋于稳定。（1）静置衰减表现为紧固后24h内衰减最快，占总衰减量60%以上，主要由界面压实、微滑移、应力重分布导致，72h后进入低衰减稳定段。（2）不同结构衰减差异显著，含绝缘垫、密封件、软质界面的装配结构衰减率更高，刚性金属贴合结构扭矩保持能力更强，母排与功率模块部位衰减量大于箱体框架结构。（3）温度循环会显著加剧衰减，高低温交变使材料膨胀量不匹配，界面间隙增大，摩擦状态改变，相同时间内扭矩损失较常温静置提升明显。（4）振动载荷下衰减呈现持续小幅下降趋势，交变激励造成连接副微松动，预紧力不断耗散，无防松结构试件衰减幅度明显高于带防松结构试件。（5）拧紧工艺影响突出，扭矩-转角法控制精度优于纯扭矩法，施加润滑脂可降低摩擦离散性，合理复紧能够有效补偿早期衰减，提升扭矩保持稳定性。

3.3 有限元仿真建模与对比验证

基于有限元分析软件。建立变流器典型装配结构有限元模型，实现扭矩衰减过程模拟与试验对标。（1）建模采用真实零件尺寸，保留螺栓、螺母、被连接件、垫片、绝缘层装配关系，材料参数输入弹性模量、泊松比、高温屈服强度、蠕变本构，贴近实际材料力学特性。（2）接触设置包含螺纹接触、支承面接触、界面压紧接触，定义摩擦系数与切向行为，预紧力采用螺栓载荷施加，实现扭矩与预紧力转换。（3）仿真内容覆盖静态预紧、应力松弛、界面压缩变形、温度位移耦合、振动响应计算，输出应力分布、夹紧力变化、接触面滑移量、残余预紧力时序结果。（4）对比验证显示，仿真得到的扭矩衰减趋势、衰减速率、稳定时间与试验数据一致性良好，早期衰减阶段误差控制在工程允许范围，模型可有效反映结构、材料、工艺对衰减的影响规律。（5）通过仿真可快速复现试验难以覆盖的极端工况，为机理判断与方案优化提供定量支撑[3]。

3.4 影响因素敏感性分析

以扭矩衰减率为评价指标，对主要影响因素开展敏感性分析，确定控制优先级。（1）界面材料敏感性最高，非金属垫片、软质导热层压缩蠕变特性是造成大幅衰减的首要因素，刚度越低、压缩率越大，衰减越显著。（2）摩擦系数敏感性次之，螺纹与支承面摩擦离散性直接影响扭矩—预紧力转化稳定性，摩擦波动越大，初始衰减越剧烈。（3）温度与振动为环境敏感因素，温度改变材料强度与蠕变速率，振动降低摩擦防松效果，两者共同作用使衰减风险提升。（4）螺栓规格与结构刚度敏感性中等，螺栓强度等级、长度、被连接件厚度、支撑面面积影响系统整体刚度，刚度越高应力松弛越小。（5）装配工艺敏感性表现为：拧紧方法 > 复紧时机 > 扭矩精度 > 拧紧顺序，合理工艺能够有效降低早期衰减，提升连接一致性。敏感性结果为工程上优先优化界面、控制摩擦、规范工艺提供依据。

4 扭矩衰减控制措施

4.1 结构优化设计

结构优化是抑制扭矩衰减的基础手段，通过提升连接系统刚度、改善界面受力状态、优化部件匹配关系，从源头降低应力松弛与界面滑移幅度[4]，实现扭矩长效保持。（1）提高连接刚度，针对功率单元、母排、散热器等关键装配部位，增加被连接件局部厚度与加强筋结构，减小悬臂长度与支撑跨距，降低承载后的变形量；选用高刚性支撑面，避免软质层过厚压缩导致的预紧力快速损失，使螺栓夹紧力更多作用于有效贴合区域，减少弹性变形损耗。（2）改善接触状态，对模块接触面、母排叠合面、箱体结合面提高平面度与粗糙度控制精度，消除装配间隙与局部高点；采用定位销、止口结构实现被连接件精准限位，降低紧固与运行过程中的相对滑移趋势；优化涂层厚度与喷涂均匀性，避免涂层挤压

流动造成应力重分布。（3）合理部件选型，根据载荷等级与空间约束匹配螺栓强度等级，优先选用调质处理高强度螺栓；针对压缩蠕变风险，选用低蠕变、高回弹率绝缘垫片与密封材料，替代易压缩失效软质材料；在大电流、高热负荷部位采用一体化或半一体化结构，减少多层界面叠加带来的衰减叠加效应。通过结构优化，可使连接系统在静置、温度、振动条件下的应力稳定性显著提升，为扭矩保持提供结构保障。

4.2 装配工艺优化

装配工艺直接决定扭矩—预紧力转化精度与初始稳定性，通过规范拧紧方法、复紧策略、扭矩设定与过程控制，可有效降低早期衰减并提升批次一致性。（1）优化拧紧方法，在关键承载部位由传统扭矩控制法升级为扭矩—转角法，先施加预拧紧扭矩，再按设定角度完成终拧，降低摩擦系数波动影响，提高预紧力控制精度；采用分步均匀拧紧与对角拧紧顺序，避免单点过拧导致的局部变形与界面偏载；严格控制拧紧速度与工具精度，使用定扭矩电动扳手，保证扭矩输出稳定可控。（2）制定科学复紧策略，基于试验得出的衰减规律，将复紧节点设定在初始快速衰减阶段完成后，一般为紧固后10～24h，消除界面压实、微滑移带来的扭矩损失；针对温度与振动工况，增加复紧频次或采用二次复紧制度，使连接进入长期稳定区间；复紧扭矩按初始扭矩的90%～100%执行，避免过拧造成螺纹损伤。（3）完善扭矩规范体系，根据结构类型、材料、界面状态建立分级扭矩标准，区分功率部件、结构部件、散热器部件扭矩值；明确润滑要求，对螺纹副与支承面统一润滑处理，稳定摩擦系数；建立扭矩校验制度，定期校准拧紧工具与检测设备，确保装配过程可控可追溯。工艺优化可显著降低离散型衰减，使装配扭矩稳定性满足批量生产要求。

4.3 防松与长效紧固方案

结合变流器服役环境特点，采用机械防松、结构防松与摩擦防松组合方案，提升连接在振动、温度循环下的抗松弛能力。（1）机械防松方案，在关键连接部位使用对顶螺母、全金属锁紧螺母、嵌件锁紧螺母，利用螺纹结构变形提供锁紧力，防止松动导致扭矩下降；采用弹簧垫圈、波浪垫圈、碟形垫圈提供持续弹性补偿，抵消材料压缩与松弛造成的间隙变化；对高安全等级部位使用开口销、止动垫片、锁紧片实现机械锁死，彻底限制螺纹副相对转动。（2）摩擦防松方案，选用耐温、耐老化螺纹锁紧胶，按工艺要求涂胶固化，提高螺纹副摩擦保持力；在支承面增加防滑齿垫或微凸面结构，提高界面摩擦系数，抑制微滑移。（3）长效紧固设计，对长期难以维护部位采用预涂胶螺栓、自锁紧固件，降低现场装配复杂度；采用大垫圈扩宽支撑面积，降低接触面压应力，减缓材料蠕变；针对功率模块等热敏感部位，采用低热膨胀系数匹配设计，减小热胀冷缩引起的预紧力波动。多方案组合应用可实现全生命周期防松，满足风电变流器长期免维护运行需求[5]。

结束语：本文系统研究了变流器典型装配结构螺栓紧固扭矩衰减特性，明确了应力松弛、界面滑移、环境激励及工艺参数对衰减的作用规律，建立了试验与仿真结合的评价方法。通过结构优化、拧紧与复紧工艺改进、多维度防松设计，实现扭矩衰减有效抑制。研究成果已应用于实际装配过程，显著提升连接可靠性与产品质量。后续可进一步针对新材料界面与复杂工况开展长期老化研究，完善全生命周期紧固控制体系。

参考文献

[1]陈怀, 陈亚楠, 李籽圆, 等. 基于YOLOv11的风电机组主轴螺栓状态智能监测系统[J]. 控制与信息技术, 2025(1): 27-32.

[2]杨雷.法兰螺栓定扭矩紧固技术规范与泄漏控制工程实践研究[J].流程工业,2026,(7):40-45.

[3]李渊，周思阳，杨科骏，姜金磊。动车组关键部件安装螺栓扭矩衰减规律研究[J].铁道机车车辆,2025,45(S1):23-29.

[4]李祯平, 李华. 基于FKM标准的高压电器箱随机振动疲劳研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 104-111.

[5]罗鑫伟,谭秋平.黄明亮.等.螺栓拧紧工艺设计及扭矩稳定性研究[J].轨道交通材料.2025,4(03):57-62.