

汽轮机监测仪表检修技术与可靠性分析

姜凤林

华电章丘发电有限公司 山东 济南 250200

摘要: 汽轮机监测仪表对汽轮机的安全稳定运行起着决定性作用,是降低生产成本和维护费用的重要途径。本文先明确其核心类型与功能定位,阐述全流程标准化检修技术体系,包括检修前准备、离线/在线检修、回装调试与验收;接着梳理典型故障模式,分析多维度故障诱因;然后开展仪表全维度可靠性分析,涉及评价指标、薄弱环节、工况差异、检修质量影响四个维度;最后提出针对性可靠性提升措施,如检修工艺管控、环境保护、全生命周期运维等,为汽轮机运维现场仪表全流程管理提供技术支撑,助力提升机组运行安全性与稳定性。

关键词: 汽轮机;监测仪表;检修技术;可靠性分析

引言: 汽轮机监测仪表是一种监测汽轮机运行参数的多路监控系统,用于全面、连续监测汽轮机组转子、汽缸、轴承等部件的重要机械量运行参数,提供显示、记录、报警和保护等信号,还可以提供用于故障诊断的各种测量数据^[1]。对于整个机组而言,维持汽轮机转速、轴向位移、差胀、轴振、瓦振及偏心等工作参数在正常范围之内是保证汽轮机安全运行的必要条件,因为上述参数超标,可能造成汽轮机飞车、断叶片、大轴弯曲、通流部分动静摩擦等恶性事故的发生。本文提出可靠性提升管控措施,为汽轮机运维现场仪表全流程管理提供技术支撑。

1 汽轮机监测仪表的核心类型与功能定位

汽轮机监测仪表按功能分状态监测、热力参数监测、安全保护三大核心类型,各类协同构成全维度监测与保护体系。状态监测类以 TSI 为核心,保障转子与汽缸运行安全,反映转动部件状态^[2]。振动监测仪表用传感器采振动特征,量程 0-500 μm 、精度 $\pm 0.5\% \text{FS}$;轴向位移和胀差监测仪表防动静部件碰磨;转速与键相监测仪表提供基准信号,量程 0-6000r/min、精度 $\pm 1 \text{r/min}$;缸胀监测仪表用传感器测膨胀量。热力参数监测仪表采集核心节点参数,为调控、分析与预警提供数据。高温高压用热电偶、中低温用铂热电阻测温度,压力测点用变送器接入 DCS,流量用差压式流量计,液位用变送器,精度符合规范。安全保护类是 ETS 核心,决定保护功能可靠性。开关量仪表触发保护定值,精度 $\pm 1\% \text{FS}$;超速保护监测仪表提供三路转速信号,三取二触发遮断;电磁阀接收信号泄油关汽门,实现停机与保护控制^[3]。

2 汽轮机监测仪表标准化检修技术体系

汽轮机监测仪表标准化检修技术体系是保障仪表测量精度、性能完好与长周期稳定运行的核心支撑,需遵循行业规范,构建覆盖全流程的标准化作业体系,确保操作合规、质量可控。检修前,要做好标准化准备工作,编制专项检修作业指导书与技术文件,核对核心参数,准备合格工器具与标准仪器,落实安全措施,梳理台账与故障数据并制定防范措施。机组停机时,核心监测仪表离线检修与校验是保障精度的关键,要按不同仪表功能特性执行标准化流程,如 TSI 系统状态监测仪表进行性能检测、校准等;热力参数类仪表进行传感器检测、密封性测试与全量程校准;安全保护类仪表围绕动作定值校验等开展检修校验。机组不停机时,在线检修与故障处置要落实安全措施,用信号比对等方法定位故障点,对非保护类热力参数仪表在线更换检修,处理信号波动等故障。检修完成后,回装、调试与验收是收尾关键,要执行标准化验收流程,回装控制核心工艺参数,回装后进行回路测试与试验,最后完成三级验收,核对记录、整理资料、更新台账,形成检修闭环管理^[4]。

3 汽轮机监测仪表故障模式与核心诱因分析

结合汽轮机运维现场故障统计数据,汽轮机监测仪表故障模式有明确规律,可分四大类,各类故障发生占比与风险特征清晰。测量失准类最常见,占仪表总故障超 45%,多为零点漂移等,仪表有信号但数据不真实,易致人员误判;信号中断类约占 30%,多为信号无输出等,会使监测与保护功能失效;保护误动/拒动类约占 15%,属高风险故障,多为开关量仪表定值漂移等,易造成机组非计划停机或设备损坏;机械损坏类约占 10%,多为探头磨损等,常造成仪表永久性

损坏。这些故障核心诱因具多维度、关联性特征,可归纳为五大类,相互影响引发故障。恶劣现场运行环境是首要诱因,高温、高振动等会加速元件老化;安装与检修工艺缺陷是核心人为因素,约 60% 仪表故障与此相关;元器件自然老化与性能劣化是固有诱因,影响仪表稳定性;系统与回路电磁干扰会引发信号波动等问题;运维管理不到位是管理层面诱因,会放大故障风险,导致故障频发^[5]。

4 汽轮机监测仪表全维度可靠性分析

4.1 可靠性评价核心指标

结合电力行业热工技术监督规程与汽轮机运行管理要求,用 6 项核心量化指标评价汽轮机监测仪表可靠性,各指标均有明确行业规范要求。一是平均无故障工作时间(MTBF),即仪表两次相邻故障间平均工作时间,是衡量连续运行可靠性的核心指标,汽轮机核心监测仪表 MTBF 应不低于 25000h,安全保护类仪表应不低于 40000h。二是平均修复时间(MTTR),指仪表故障后从定位到修复完成、恢复正常运行平均时间,是衡量故障处置能力与可维护性的核心指标,汽轮机监测仪表 MTTR 应不超过 2h,保护类仪表应不超过 1h。三是测量准确率,为仪表测量值与实际值偏差在允许误差范围内的测点数量占总测点数量的比例,是衡量测量精度可靠性的核心指标,汽轮机监测仪表测量准确率应不低于 99%,核心保护类测点应达 100%。四是保护动作正确率,指保护系统在异常工况下正确动作次数与总动作次数的比例,是衡量安全保护类仪表可靠性的核心指标,汽轮机热工保护动作正确率应达 100%,不允许拒动、误动。五是可靠度,指仪表在规定条件和时间内完成规定功能的概率,汽轮机核心监测仪表年可靠度应不低于 99.9%,安全保护类仪表应不低于 99.99%。六是故障率,指仪表单位时间内发生故障的概率,通常用故障次数/千台·h 表示,汽轮机监测仪表故障率应不高于 0.05 次/千台·h,保护类仪表应不高于 0.01 次/千台·h。

4.2 基于故障模式的可靠性薄弱环节分析

结合汽轮机监测仪表故障统计与现场运维经验,基于故障模式的可靠性薄弱环节分四大类,明确可靠性管控核心方向。一是 TSI 系统,故障集中于涡流探头安装与振动致松动、磨损(35%)、前置器高温老化与电源模块故障(30%)、接地不良致电磁干扰(25%)等。二是热力参数监测仪表,故障集中于高温高压下热电偶、热电阻感温元件劣化(40%)、腐蚀性介质与高静压下压力变送器膜片腐蚀、损坏(25%)、导压管堵塞致测量失准(20%)等。三是安全保护类仪表,故障集中于

机械开关定值漂移致触点氧化、卡涩(45%)、电磁阀线圈老化致动作失效(30%)、回路接触不良致保护误动(15%)等。四是回路与系统,故障集中于电缆绝缘老化致回路断线、短路(40%)、接地混乱致电磁干扰(35%)、DCS 系统卡件通道故障(15%)等。

4.3 不同运行工况下的可靠性特性分析

汽轮机在不同运行工况下,仪表运行环境、受力状态、工作负荷及可靠性特性差异显著。一是机组启停工况,蒸汽参数变化剧烈,仪表承受热冲击与交变应力,故障率是稳定运行工况的 3 倍以上,且对可靠性要求极高。二是机组稳定满负荷运行工况,热力参数与运行状态稳定,故障率低,但长期运行加速元器件老化,故障以元器件老化、测量失准为主(超 70%)。三是机组变负荷调峰工况,参数频繁波动,仪表传感器元件承受交变载荷,故障率是稳定运行工况的 2 倍以上,故障以测量失准、信号波动为主。四是机组异常工况,参数变化剧烈、冲击载荷大,对仪表响应速度与可靠性要求高,冲击易致探头损坏等问题,是可靠性管控高风险工况。

4.4 检修质量对可靠性的影响权重分析

检修质量是决定汽轮机监测仪表运行可靠性的核心人为因素,不同检修环节的质量缺陷对仪表可靠性的影响权重差异显著。一是安装与回装工艺缺陷,影响权重 40%,如 TSI 探头安装间隙不合格等工艺缺陷会导致仪表故障,是管控核心靶点。二是校准与校验操作不规范,影响权重 25%,如标准仪器精度不足等问题会引发测量误差与保护误动/拒动。三是安全措施与隔离不到位,影响权重 15%,易导致检修中保护误动、仪表传感器损坏。四是检修后验收与调试不到位,影响权重 12%,会导致仪表投运后存在回路故障、保护逻辑错误。五是检修记录与台账更新不规范,影响权重 8%,导致无法追溯仪表状态与性能变化,引发故障重复发生。

5 汽轮机监测仪表可靠性提升全流程管控措施

5.1 检修工艺标准化与精细化管控

检修工艺标准化是提升仪表可靠性的核心基础,需构建全检修流程标准化管控体系。一是建立全品类仪表标准化检修作业指导书,针对不同仪表编制专项指导书,明确操作步骤,确保检修有章可循。二是强化检修人员技能培训与资质管理,建立培训考核体系,定期培训,核心仪表检修专人持证上岗。三是严格标准仪器与工器具计量管控,建立全生命周期台账,标准仪器定期检定,禁使用不合格仪器。四是落实检修全过程质量验收制度,实行三级验收,重点环节旁站验收,确保检修

质量。

5.2 运行环境适应性优化与防护

针对汽轮机现场恶劣运行环境开展优化与防护,降低环境影响。一是高温防护,给仪表和前置器加隔热罩,对电子设备散热;二是高振动防护,优化安装支架设计,用防松螺母,仪表与管路柔性连接;三是恶劣环境防护,选高防护等级仪表,密封接线盒,接触腐蚀性介质的仪表用耐腐蚀材质;四是电磁干扰防护,优化电缆敷设路径,用屏蔽电缆,严重干扰回路加隔离器。

5.3 全生命周期运维管理体系构建

构建覆盖仪表全生命周期的运维管理体系,实现全流程管控。一是建立数字化台账,记录仪表信息,实现状态可追溯、可管控。二是优化校验与维护周期,根据仪表情况制定差异化周期。安全保护类、核心状态监测仪表在机组大修时全面校验与检修,小修时进行性能检查与零点校准;一般热力参数仪表可适当延校验周期,但不超行业规范最大允许周期,严禁超期未检、带病运行。同时,强化备品备件质量管控,建立全流程管控体系,选用合格产品,入库前检验,核心仪表与易损件保持合理库存。此外,推行状态监测与预测性运维,建立巡检与监测制度,运行人员每日巡检,热工人员定期核对分析,对有问题仪表提前制定检修计划,利用窗口期检修更换,降低故障发生率。

5.4 保护系统可靠性冗余与容错设计

针对汽轮机安全保护系统高可靠性要求,优化冗余与容错设计。重要保护参数采用三重冗余测量配置,保护逻辑三取二;电源系统双路冗余设计,自动切换且时间不超 5ms;信号回路隔离设计,加装隔离器,开关量信号回路用继电器隔离;定期开展保护传动试验,检修后全面试验,运行期间在线试验。

5.5 故障闭环管理与持续优化

建立故障闭环管理体系,实现事前预防、事中控制、事后改进。建立 FRACAS 系统,故障后填写报告,分析原因,制定措施并跟踪验证;定期开展故障统计与趋势分析,针对性优化;建立运维经验反馈与持续改进机制,收集案例经验,优化制度,组织交流分析,提升人员能力与意识,完善管控体系。

结语

综上所述,汽轮机监测仪表是保障汽轮机安全稳定运行的关键单元,其检修质量和可靠性关乎机组运维安全与经济效益。本文围绕仪表检修技术与可靠性分析,明确功能定位和标准化检修流程,梳理典型故障及诱因,开展全维度可靠性分析并提出提升措施,形成完整技术体系。研究成果可用于汽轮机运维现场,为仪表全生命周期管理提供实践指导,提升机组运行安全性与稳定性,也为同类设备监测仪表检修与可靠性提升提供参考。

参考文献

- [1] 李博. 汽轮机调速系统检修中电液调节技术的优化研究 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2026(2):075-077.
- [2] 关淳,赵发林,薛海亮,郭魁俊,马义良,李宇峰. 汽轮机叶片监测系统功能可靠性试验研究 [J]. 汽轮机技术,2025,67(6):426-430.
- [3] 马来祥. 汽轮机轴瓦常见故障与检修技术研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A,2026(1):109-112.
- [4] 李新. 汽轮机振动故障监测及工业性分析研究 [J]. 工程与技术应用,2026,2(1):28-30.
- [5] 成宝祥.NB-IoT 通信技术在智慧电厂汽轮机振动监测中的应用 [J]. 通信电源技术,2026,43(2):209-211.