基于DCS-TSI协同优化的发电厂热控系统改造实践

张洪凯
大唐临清热电有限公司　山东 聊城　252600

摘　要　针对大型火电机组既有汽轮机监视仪表（turbine supervisory instrument，TSI）系统硬件老化严重、板卡备件断供、新旧版本协议兼容性差、与机组分散控制系统（distributed control system，DCS）通信带宽受限、保护逻辑容错能力不足等问题，实施基于DCS-TSI协同优化的热控系统升级改造。工程实践表明：改造后系统信号传输时延由850 ms压缩至20 ms以内，大幅增强测量通道线性度和抗干扰能力，消除单点故障引发的非计划停机风险，为同类机组汽轮机热控保护系统的自主化改造、兼容性升级提供工程模式。

关键词　DCS-TSI协同优化；发电厂热控系统；改造；实践

Practical Retrofit of a Power Plant Thermal Control System Based on DCS-TSI Collaborative Optimization

Zhang Hongkai
Datang Linqing Thermal Power Co., Ltd., Liaocheng 252600, Shandong Province, China

Abstract　In response to the problems of severe hardware aging in the existing turbine supervisory instrument (TSI) systems of large thermal power units, discontinuation of spare parts for boards and cards, poor protocol compatibility between old and new versions, limited communication bandwidth between TSI and the unit's distributed control system (DCS), and insufficient fault tolerance of protection logic, an upgrading and retrofit of the thermal control system based on DCS-TSI collaborative optimization was implemented. Engineering practice shows that after the retrofit, the signal transmission delay of the system was reduced from 850 ms to less than 20 ms, the linearity and anti-interference capability of the measurement channels were significantly enhanced, the risk of unplanned shutdowns caused by single-point failures was eliminated, and an engineering model was provided for the independent retrofit and compatibility upgrade of turbine thermal control and protection systems of similar units.

Key words　DCS-TSI Collaborative Optimization; Power Plant Thermal Control System; Retrofit; Practice

汽轮发电机组作为火力发电厂能量转换的核心动力总成，其高速旋转轴系的机械运行状态直接关系到整套发电机组的本质安全。然而，我国部分在役大型超临界机组投运时间较长，原装配置的早期版本TSI机架（如早期的Bently 3300或3500系统）面临元器件深度老化、通道零漂严重、备品备件停产停供等现实瓶颈。在热控升级改造过程中，全盘更替不仅施工周期长、改造成本高昂，而且新旧测点传感器探头、延伸电缆、前置器的阻抗匹配存在严重的电气兼容性壁垒；同时，老旧TSI和主机DCS之间主要依靠硬接线4～20 mA模拟量、低速串口总线交互，数据传输频宽窄、分辨率低，DCS无法获取高频动态波形数据，难以开展轴心轨迹和频谱深度融合诊断。为此，本文以某660 MW超临界机组检修为契机，深入研究TSI系统新旧软硬件版本兼容拓扑，实施DCS-TSI一体化协同架构改造、动态测试试验，实现保护逻辑深度重塑、状态精准监视。

1　既有发电厂热控系统

1.1　系统架构

改造前机组TSI系统采用早期模块化机架集中布置于汽机热控电子间，通过前置放大器接收就地电涡流传感器、速度传感器的毫伏级高频交流信号。机架内部各监测通道卡件独立完成信号解调、滤波、幅值检波，并将转换的0～10 V或4～20 mA标准模拟量信号经长距离屏蔽电缆送至主机DCS的模拟量输入（analog input，AI）模件；超限跳闸接点则通过中间继电器硬接线并入紧急跳闸系统（emergency trip system，ETS）跳闸回路。此外，机架配置单路RS485通信卡，采用低波特率Modbus RTU协议向DCS网关单向上传静态标量数据。此种架构下，TSI系统与DCS处于离散解耦状态，DCS操作员站仅能显示稳态振动通频值，缺失1X、2X等特征谐波相位、原生高频交流波形信息，使得热控运行人员在轴系工况突变时无法开展

瞬态频谱诊断和故障预警（如图1所示）。

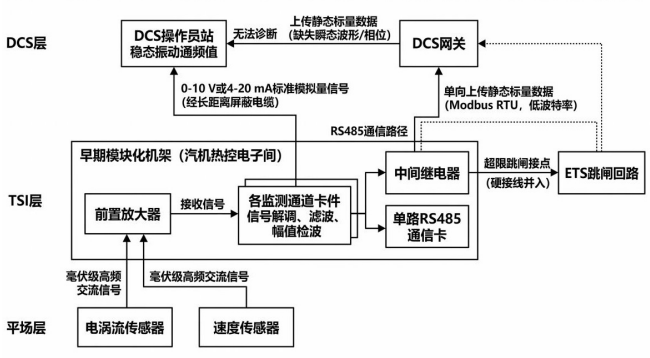


图1 系统架构图

1.2 保护联锁与信号处理缺陷

在长期服役过程中，既有系统暴露出诸多严重威胁机组安全稳定运行的热控缺陷：①单点故障拒动和误动风险并存。部分轴向位移、轴承振动保护仍采用早期“一取一”或机架内部硬件“二取二”跳闸逻辑，继电器触点极易受机械振动或电磁火花干扰发生误闭合，已多次引发虚假超限报警[1]；②信号调理漂移与通道衰减。前置器电子元件老化导致线性量程漂移，探头间隙电压测量偏差最高达0.85 V，直接恶化轴振测量的绝对精度；③电磁兼容（electromagnetic compatibility，EMC）抑制能力不足。发电机励磁系统及变频设备产生的高次谐波在长距离硬接线电缆屏蔽层诱发感应共模电压，导致振动信号叠加工频谐波毛刺，掩盖了转子真实机械扰动；④事件顺序记录（sequence of events，SOE）时钟无法统一。由于TSI独立机架时钟无法和DCS时钟源实现毫秒级高精度对时，在跳闸事故复盘时难以精确定位首出跳闸原因[2]。

1.3 新旧系统迭代中的兼容性矛盾

在推进TSI系统国产化自主升级时，须克服多重兼容性技术障碍。一方面，就地安装的电涡流探头（如3300系列5 mm、8 mm探头）的灵敏度特性曲线、谐振频率、系统供电阻抗和新型智能监测卡件（如升级版3500系统或国产新一代智能TSI模块）之间存在非线性偏差，若未校准即直接混用，将引发高达15%以上的测量非线性误差；另一方面，新机架采用高速双冗余以太网传输控制协议（transmission control protocol，TCP）/网际协议（internet protocol，IP），而旧版DCS控制器接口协议栈有限，对高并发突发数据流的缓冲区吞吐能力不足，极易造成数据丢包、通信假死。因此，构建兼顾就地一次测点复用、机架信号高精度调理和DCS冗余高速交互的协同优化方案成为改造成功的决定性前提[3]。

2 基于DCS-TSI协同优化的发电厂热控系统改造实践

2.1 硬件机架升级与新旧系统兼容性拓扑构建

改造方案采用全新一代高可靠性智能TSI机架替换退役老旧机架，电源模块采用交流220 V与直流110 V双路冗余供电。针对就地一次元件的利旧兼容需求，开发了多通道动态阻抗自适应调理电路，系统支持对原有探头灵敏度（如7.87 mV/μm与3.94 mV/μm）的软件动态重构与非线性折线多点多项式补偿，免除了解体更换汽轮机内部埋入式探头的高额工期成本。机架内部各监测模块均配置独立高速数字信号处理器（digital signal processor，DSP），将原始信号采样率提升至20 kHz以上，同步输出4～20 mA过程量、原始Buffered高频交流信号、双冗余Modbus TCP工业以太网数据流，构筑全冗余无扰切换的硬件承载底座[4]。

2.2 DCS-TSI深度协同与多通道容错保护逻辑重塑

为彻底根除单一测点或通道故障引发的机组非计划停机，将原本固化于TSI硬件继电器内的保护判据全部迁移并重塑至DCS冗余控制器内，建立“前端双重自检+后端多重容错”的协同判定机制：①测点品质自诊断、坏质量剥离逻辑。DCS实时接收TSI上传的探头间隙电压（正常范围一般在－2.0～－18.0 V之间）。当检测到探头断线、短路、电缆破损、间隙电压严重超限时，DCS在5 ms内自动判定该通道为“坏质量”并封锁该通道参和保护跳闸计算，同时触发一级声光报警，防止传感器物理损坏引发停机；②轴向位移、胀差三取二（2oo3）容错表决。主轴轴向位移测量采用三支互为120°分布或正交冗余的电涡流传感器，在DCS内部组态真值三取二投票矩阵。当且仅当任意两通道均超限且间隙电压正常时输出跳闸指令；若其中一通道故障，逻辑自适应降级为“二取二”运行，兼顾保护可靠性和安全性；③轴承振动组合逻辑优化。针对瓦轴振（X向与Y向），引入振动幅值突变量抑制算法及“同向双侧超限+轴位移辅助判据”，消除雷击电磁脉冲、瞬态机械扰动带来的虚假超标[5]。

2.3 高速总线通信与多维动态监测人机交互集成

改造后打通了TSI和DCS之间的全双工百兆冗余以太网高速通信隧道。DCS操作员站不仅能实时刷新稳态热控参数，还全面集成了旋转机械动态分析软件。热控值班员无须前往就地机柜，即可在DCS监控画面实时调阅汽轮机全转速区间的波德图、极坐标图、轴心轨迹图、三维瀑布谱图[6]。结合高精度网络时间协议（network time protocol，NTP），实现TSI机架和DCS主时钟源的绝对时间同步，时间偏差控制在1 ms以内[7]。一旦触发振动越限或联锁保护动作，系统以毫秒级记录动作前

120 s至动作后60 s的全通道原始动态数据流，实现跳闸首出原因的精准回溯、无盲区追忆[8]。

3 调试试验验证与运行效能评估

3.1 静态回路校验与动态升速测试

在机组大修启动前，对改造后的TSI-DCS系统开展严格的静态功能校验和整机动态试验：①静态间隙电压线性度校准。利用高精度微米级千分尺静态校验台，全行程静态标定现场16套电涡流传感器。在新机架参数重构与多项式补偿算法支撑下，传感器在0.5 mm至2.5 mm标准线性量程范围内的灵敏度偏差由改造前的8.2%大幅降低至0.65%，输出线性相关系数达0.999 2；②动态模拟信号注入试验。利用低频信号发生器向TSI通道输入正弦交流扰动，验证DCS侧2oo3逻辑在单通道断线、单通道越限、双通道同时越限等12组极端边界工况下的逻辑响应，保护正确动作率达到100%，动作执行时间均小于15 ms；③整机冲转及超速试验。在汽轮机冲转由0平稳升速至3 000 r/min及超速试验（3 300 r/min）全过程中，系统完整捕获过临界转速时的共振峰值、相位滞后角，动态频谱及振动矢量数据和高精度便携式振动分析仪比对误差在1.0 μm以内。

3.2 改造前后关键运行指标对比

机组并网投运后，跟踪统计系统连续运行180 d的关键热控性能数据。对比改造前同期运行记录，各项指标如表1所示。

表1 TSI系统改造前后关键性能及热控指标对比

评估测试指标	改造前原系统	改造后协同系统
DCS 数据交互刷新时延（ms）	850	18.5
探头间隙电压线性误差（%）	8.2	0.65
保护逻辑运算及跳闸响应（ms）	120	22
通道年均零点漂移率（%）	3.85	0.2
系统单点虚假报警频次（次 / 年）	14	0
SOE 时钟对时同步偏差（ms）	＞ 1 000	＜ 1.0
年均故障处理与维护工时（h）	160	24

3.3 运行效能与防误动分析

深入分析表1数据可知，改造后DCS-TSI协同系统在时效性、精准度、抗干扰能力上取得显著突破：首先，通信时延由850.0 ms断崖式压缩至18.5 ms，使得DCS能够实时追踪轴系的毫秒级瞬态突变，彻底消除由于总线拥塞引起的信号滞后；其次，间隙电压线性误差压降至0.65%，通道年均零漂由3.85%降至0.20%，保证振动和位移微米级物理量测量的绝对真实性；最后，通过引入测点品质位自诊断和2oo3逻辑重组，在长达半年的高负荷运行、深度调峰调频过程中，系统实现“单点故障不误动、越限保护不拒动、异常扰动自屏蔽”，年虚假误报警由14次降至零，有效杜绝因热控测量回路故障导致的非计划停机事故。

4 结束语

本文针对大型超临界机组汽轮机TSI系统硬件老化、新旧版本兼容受阻及保护逻辑容错能力不足等典型问题，实施了基于DCS-TSI协同优化的热控系统改造实践，主要结论如下：新旧测点电气兼容性大幅提升。通过开发动态阻抗自适应调理电路和非线性多项式校准算法，实现了就地早期探头、新型智能TSI机架的无缝匹配，测量线性误差严格收敛至0.65%以内。控制与保护逻辑实现本质安全。将跳闸判据迁移至DCS平台并构建2oo3容错表决与信号品质闭锁机制，将跳闸动作时延缩短至22.0 ms，消除了误动与拒动隐患。状态监测和瞬态诊断深度融合。依托高速以太网打通全域数据链路，实现了汽轮机轴系动态波形、频谱特征在DCS操作员站的实时呈现和高精度SOE对齐，显著增强机组在深度调峰工况下的热控防护韧性。

参考文献

[1]李树强.火力发电厂热能动力系统优化与节能改造研究[J].科技与创新,2025(21):144-146.

[2]颜葙涛.火力发电厂热工自动控制系统冗余设计技术与应用研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(9):266-268.

[3]梁浩.火力发电厂热控仪表取样管路电伴热装置优化改造研究[J].工程技术与质量管理,2026,2(9):109-111.

[4]解耕宇.火力发电厂脱硝电加热器控制回路技术改造[J].电力设备管理,2026(11):240-242.

[5]史翔宇,张永刚,贾新强,等.火力发电厂斗轮机系统数字化改造与效能提升分析[J].通讯世界,2025,32(5):121-123.

[6]李利文.双碳目标下火电厂中央空调系统节能改造研究——以广东某发电厂为例[J].制冷,2026,45(3):82-85.

[7]谭磊,黄丹青,朱华夏,等.基于DC/DC隔离技术与切换装置的热控直流冗余电源系统优化与实践[J].重庆电力高等专科学校学报,2025,30(2):1-5.

[8]王力,姚澎,张磊,等.基于前馈控制优化和PID变参数改造的热电AGC优化控制研究[J].节能技术,2024,42(5):475-480.

（本文编辑 曹 阳）