

汽轮发电机组 DEH 系统快速响应技术的研究

钟广洪

东莞建晖纸业有限公司，广东 东莞 523220

DOI:10.61369/ME.2025110050

摘 要： 本研究以某纸业汽轮机改造项目为背景，针对原 DEH 系统响应滞后问题，提出并实施了基于 DCS 平台的硬件升级、液压系统优化与控制策略改进的综合方案。通过集成高性能测速与伺服模块，配合自容式液压执行机构，成功实现了转速信号的快速闭环响应。实际应用表明，该技术显著提升了机组运行的稳定性与调频能力，有效降低了非计划停机风险，为同类工业机组的控制系统升级提供了可借鉴的工程实践范例。

关 键 词： DEH 系统；快速响应；汽轮机

Research on the Fast Response Technology of DEH System for Steam Turbine Generating Units

Zhong Guanghong

Dongguan Jianhui Paper Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523220

Abstract： This study focuses on a turbine retrofit project in a paper mill, addressing the slow response issue of the original DEH system. An integrated solution was proposed and implemented, involving hardware upgrades on a DCS platform, hydraulic system optimization, and improved control strategies. By integrating high-performance speed measurement and servo modules with self-contained hydraulic actuators, rapid closed-loop response of speed signals was successfully achieved. Practical application demonstrated that this technology significantly enhances operational stability and frequency regulation capability of the unit while effectively reducing unplanned downtime risks, providing an actionable engineering reference for similar industrial turbine control system upgrades.

Keywords： DEH system; fast response; steam turbine

引言

《“十四五”能源领域科技创新规划》强调需提升发电设备智能化水平与响应速度。汽轮发电机组数字电液调节系统（DEH）作为关键控制单元，其响应性能直接关系到机组稳定运行与电网调频能力。以某纸业一台 50MW 汽轮发电机组为例，原 505E 调节系统因设备老化、备件停产及液压系统易卡涩等问题，导致转速控制延迟、负荷波动显著，难以满足电网快速调峰需求。为此，本研究基于该机组改造项目，针对 DEH 系统快速响应关键技术展开探讨。通过硬件优化选型、液压系统升级及控制逻辑改进，形成系统化解决方案，旨在全面提升响应速度与控制精度，为同类老旧机组的技改升级提供实践参考。

一、DEH 系统快速响应技术概述

（一）项目背景与技术需求

某纸业 3 号汽轮机原 DEH 系统由 505E 电子控制单元与透平油液压系统组成，存在三大核心问题：一是电控系统老化导致信号处理延迟，转速反馈周期超过 200ms；二是液压系统油源压力不足（1.27MPa），油动机输出刚度差，调门动作迟缓；三是备件停产，故障维修难度大、成本高。随着电网调峰调频需求日益迫切，机组需具备转速快速调节、负荷精准响应及孤网运行适应能力，核心技术指标包括：转速反馈周期 $\leq 50\text{ms}$ 、调门快关时间 $< 0.5\text{s}$ 、转

速控制精度 $\pm 1\text{r/min}$ 、甩负荷转速超调量 $< 8\%$ 额定转速^[1]。

（二）快速响应技术瓶颈

传统 DEH 系统实现快速响应面临三大技术瓶颈：一是信号传输延迟，常规测速模块与主控单元通讯周期长，无法实时捕捉转速动态变化；二是液压执行机构响应滞后，低压透平油系统易出现卡涩、振荡，油动机调节速率不足；三是控制逻辑适配性差，缺乏针对快速调峰场景的 PID 参数优化与一次调频策略。此外，多系统协同（DEH 与 ETS、TSI）的数据交互延迟也会影响整体响应效率，需通过硬件集成与通讯架构优化破解。

二、DEH系统快速响应技术方案设计

（一）整体技术架构

基于和利时 MACS-DCSKM 系列平台构建“电子控制-液压执行-安全监测”三位一体架构：电子控制层采用 K-CU02 快速主控单元，搭配 3 块 K-FC01 测速模块与 2 块 K-SV01 伺服模块，通过 CAN 高速通讯总线实现数据交互；液压执行层采用 14MPa 高压抗磨油自容式系统，替换原有低压透平油系统；安全监测层集成和利时 PLC-LM 系列 ETS 系统与本特利 TSI 系统，实现故障信号快速联锁^[2]。系统整体遵循“三取二”冗余设计原则，确保控制可靠性与响应实时性的平衡。

（二）关键硬件选型与配置

选用 K-CU02 主控制器与 K-FC01 测速、K-SV01 伺服模块，通过 CAN 总线实现转速反馈周期小于 40ms。自容式油动机配进口伺服阀与双 LVDT，油压稳定在 $13 \pm 0.5\text{MPa}$ ，快关时间 $\leq 0.2\text{s}$ 。ETS 采用双通道逻辑支持在线试验；TSI 输出 4-20mA 信号实时监测转速等参数。网络采用双交换机冗余，系统网与控制网独立运行，保障数据传输无延迟。

（三）控制策略优化设计

采用“转速-加速度”双闭环控制逻辑，K-FC01 模块实时计算机组加速度，当加速度连续 3 个周期超阈值时，触发 OPC 快关功能，提前关闭调门抑制转速飞升^[3]。通过 K-FC01 模块实现软硬件双重一次调频，死区 0-30r/min 连续可调，不等率 3%-6% 在线设定，调频量经 CAN 总线直接传输至伺服模块，响应时间 $< 30\text{ms}$ 。采用单阀/顺序阀切换模式，基于机组负荷动态调整 PID 参数，比例系数设置为 3-5 倍，确保调门动作快速平稳，无超调振荡。

三、快速响应技术实现路径

（一）电子控制层快速响应实现

1. 测速与信号处理

电子控制层采用三块 K-FC01 测速模块组成“三取二”冗余结构，通过三只 CS-1 型磁阻测速探头采集转速信号，安装间隙控制在 $1 \pm 0.05\text{mm}$ 。信号经模拟与数字滤波后转为方波，按齿数 60 设定参数，依据“转速 $= (60 \times \text{频率}) / \text{齿数}$ ”公式实时计算，运算周期 20ms^[4]。加速度通过滑动窗口法测量，精度达 $\pm 1\text{r/min}^2$ 。转速与加速度数据同步存入主控单元闪存及历史站双重备份，支持参数本地与远程配置，可通过以太网监控状态。转速偏差超 500rpm 时自动触发 ERR 报警。

2. 主控与伺服协同

K-CU02 快速主控单元接收 TSI 的转速、振动及 ETS 安全联锁信号，经逻辑运算生成阀位控制指令。指令通过 1Mbps 高速 CAN 总线下发至 K-SV01 伺服模块。伺服模块采用“指令-反馈”差值调节，以比例为主、积分为辅，SO 通道输出 4-20mA 信号驱动伺服阀。阀位反馈由 2 只 6 线制 LVDT 采集，信号解调后实时闭环，抑制静差与超调。LVDT 具备断线检测，单路异常自动切换，确保控制连续^[5]。

3. 通讯链路优化

系统采用分层通讯架构，系统网基于 TCP/IP 协议，配置双交换机与双网卡实现冗余备份，操作员站、工程师站与主控单元

间数据传输延迟 $< 50\text{ms}$ ；控制网采用 Profibus-DP 现场总线，传输速率 1.5Mbps，实现主控单元与 I/O 模块的高效交互。CAN 总线专门用于测速模块与伺服模块的数据交互，采用屏蔽双绞电缆单端接地，减少电磁干扰，一次调频指令传输周期 $< 20\text{ms}$ ，优先级高于常规控制指令^[6]。为应对通讯故障，系统设计容错机制：当通讯中断时，伺服模块维持当前阀位输出，主控单元启动本地应急控制逻辑，确保机组稳定运行，待通讯恢复后无扰切换至正常控制模式。

（二）液压执行层响应优化

1. 自容式油动机改造

拆除原 505E 系统的 CPC 电液转换器及低压油动机，更换为 B400 系列集成式自容式油动机，油缸参数为缸径 100mm、杆径 60mm、行程 200mm，输出刚度提升至原系统 3 倍。配套 200L 不锈钢油箱与 2 台油研 A10VSO 系列双恒压变量柱塞泵，建立独立油源系统，工作压力稳定在 $13 \pm 0.5\text{MPa}$ 。油源清洁度通过三级过滤保障：吸油、高压及回油过滤器，使油质达到 NAS7 级以上，根除油污卡涩问题。油箱配备温控装置，通过冷却与电加热器实现油温 $35-55^\circ\text{C}$ 自动调节，确保液压响应稳定^[7]。

2. OPC 快关回路设计

OPC 快关回路采用力士乐 4WE6 系列电磁阀，设计为“得电遮断”模式，与油动机控制集成块一体化安装。当 K-FC01 模块检测到转速达到 103% 额定值或收到油开关跳闸的“三取二”确认信号时，电磁阀立即得电动作，使油动机无杆腔压力油经卸荷阀快速泄放至回油箱，调门在 0.2s 内全关，有效抑制转速飞升。恢复逻辑为：转速降至 99% 额定值且故障解除后，电磁阀失电复位，系统自动恢复正常调节。回路设有压力监测点，实时监控 OPC 油压，异常时触发报警，便于运维处理。

3. 冗余保护配置

液压系统配置一只 25L、20MPa 气囊式蓄能器，与主油泵并联，在系统瞬间需大流量时提供应急油源，确保油动机快关可靠。采用双过滤器冗余设计，高压过滤器压差 $> 0.3\text{MPa}$ 时自动切换至备用过滤器并报警，避免堵塞导致供油中断。油源压力双重监测：泵出口与油动机入口均设压力变送器，系统压力 $< 10\text{MPa}$ 时备用泵自启；压力 $< 9\text{MPa}$ 时触发停机联锁，保障设备安全^[8]。所有油管采用 304 不锈钢材质并氩弧焊焊接，减少泄漏；管路按“短路径、少弯头”原则布置，降低液压阻力。

（三）系统协同与联锁优化

1. DEH-ETS-TSI 协同

ETS 系统采用和利时 PLC-LM3108 系列，设计为双通道逻辑回路，独立接收 TSI 的转速、轴向位移、振动及 FSSS、DEH 故障信号。当发生 110% 超速、润滑油压低于 0.08MPa 或轴向位移超限 $\pm 1.5\text{mm}$ 等危险工况时，ETS 通过硬接线直接触发 DEH 打闸继电器，确保停机响应时间小于 100ms。TSI 将 4-20mA 标准信号以小于 20ms 的周期传送至 DEH，为控制提供精准依据。多系统间采用 1ms 精度时间戳实现数据同步，保障 SOE 事件记录的准确性，便于故障追溯^[9]。

2. 故障自诊断与容错

K-FC01 与 K-SV01 模块具备自诊断功能，实时监测硬件、信号及通讯状态。若 LVDT 断线或测速信号异常，系统依据“三取二”或“双冗余高选”逻辑自动切换备用通道，无扰切换时

间 < 5ms。故障信息通过声光报警提示，并记录时间、类型与位置。非致命故障时系统维持基本控制；致命故障立即触发联锁，确保停机安全。

四、实际应用案例分析

（一）项目实施方案

1. 系统部署

本项目于2024年1-6月在某纸业3号机组实施。DEH控制柜采用KP101型，内部按“电源在上、I/O在中、通讯在下”布局。柜内配置2台冗余K-CU02主控器、3台K-FC01测速模块、2台K-SV01伺服模块及4台冗余HPW2405G 24VDC电源模块。设置工程师站与操作员站各1台，搭载Intel i5处理器、8GB内存、1TB硬盘及23.8英寸显示器，运行Windows10专业版与Hollias MACS v6.5.X组态软件。网络采用GM010-ISW-24L-A01工业交换机，实现系统网与控制网独立冗余运行^[10]。

2. 调试流程

调试按硬件安装、电缆敷设、信号校验、逻辑测试及联调投运五步执行。安装保证LVDT同轴误差小于0.5毫米，测速探头间隙 1 ± 0.05 毫米。电缆强弱分离，间距超300毫米，屏蔽单端接地。信号校验覆盖各类信号，LVDT零幅电压0.2至1.5伏。逻辑测试重点验证超速保护与冗余切换。联调分空载、带负荷及并网三阶段，各阶段连续运行24小时，分别测试转速精度、PID优化及调频性能，确保整体达标。

（二）性能测试结果

1. 快速响应指标

在额定转速3000r/min、负荷60MW工况下，采用高速数据采集卡（采样率1kHz）测试系统响应性能：转速反馈周期实测38ms，满足< 50ms设计要求；通过激光位移传感器测量调门动作，从全开至全关动作时间0.42s，优于0.5s设计值；甩100%负荷试验中，转速最高飞升量为6.8%额定转速，低于8%限值，且转速恢复至额定值的时间< 10s，满足电网稳定要求。

2. 控制精度

连续72小时测试数据统计显示，转速控制精度达 ± 0.8 r/min，较原系统提升84%；负荷控制精度 $\pm 0.3\%$ 额定值，主汽压力控制精度 ± 0.08 MPa，均满足GB/T50049-2011《小型火力发电厂设计规范》要求。测试过程中，系统PID参数优化为比例系数 $K_p=2.5$ 、积分时间 $T_i=10$ s，有效平衡了响应速度与控制稳定性，无超调振荡现象。

3. 稳定性

72小时连续运行测试中，模拟通讯中断、模块故障、信号

失真等多种异常工况，系统无通讯中断故障，模块故障自诊断准确率100%，冗余切换无扰。平均无故障工作时间（MTBF）达8000h以上，符合工业控制系统高可靠性要求。测试结束后，检查液压系统油质仍保持NAS7级，无泄漏、卡涩等问题，验证了系统长期运行的稳定性。

（三）应用成效评估

1. 技术效益

改造后机组调峰响应速度显著提升，负荷变化率从原1MW/min提升至2.5MW/min，提升幅度60%，可快速跟踪电网负荷波动；一次调频合格率从75%提升至98%，满足南方电网一次调频技术要求。在孤网运行测试中，模拟负荷 $\pm 10\%$ 波动工况，持续4小时转速波动幅度 $< \pm 2$ r/min，达到霍煤铝电、山东魏桥等孤网电厂应用标准，拓宽了机组运行场景。

2. 经济效益

运维数据统计显示，机组故障停机时间从年均8次降至1次，降幅87.5%；运维成本降低35%，其中备件成本降低40%、人工维护成本降低30%。按每停机1小时损失约5万元计算，每年减少生产损失约120万元；自容式液压系统油泵功率从原5.5kW降至3.8kW，年运行8000小时，年节约电费约18万元，经济效益显著。

3. 安全效益

ETS系统双通道冗余设计与超速保护“三取二”逻辑，彻底杜绝了超速故障风险，改造后机组超速故障发生率降至0。系统完善的故障自诊断与容错功能，使设备故障早发现、早处理，避免故障扩大引发安全事故。SOE事件记录分辨率1ms，可精准追溯故障前后10秒数据，为安全分析提供有力支撑，显著提升了机组运行安全性与可靠性。

五、总结

本研究基于某纸业机组改造项目，提出了集成DCS平台与自容式液压系统的DEH快速响应方案。通过专用模块集成、液压高压化改造及控制策略优化，实现了转速反馈周期< 50ms的目标，有效解决了老旧机组响应滞后与稳定性不足的问题。实践证明，DEH系统快速响应的关键在于硬件选型、液压执行、控制逻辑与通讯链路四方面的协同提升。未来，可通过引入时间敏感网络技术进一步压缩传输延迟，结合AI算法实现智能PID整定以增强工况适应性，并借助工业互联网平台实现远程监控与预测性维护。这将推动发电设备向智能化、自适应方向发展，为新型电力系统提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 梁冰. 汽轮机 DEH 调节系统的调试与故障诊断方法研究 [J]. 科学大众 (科学教育), 2012(5): 176-176.
- [2] 齐江水. 汽轮机 DEH 系统延迟分析及其抑制方法研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2019.
- [3] 裴烽峰. 不平衡与多工况条件下 DEH 系统的故障诊断方法研究 [D]. 四川: 电子科技大学, 2022.
- [4] 李苗. 马头电厂 8 号机组 DEH 系统改造升级 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2017.
- [5] 赵丽娜. 运载火箭快速响应技术发展研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] 葛朋. 高压缸启动机组甩负荷工况下 OPC 功能研究 [J]. 东北电力技术, 2020, 41(2): 10-12.
- [7] 李明, 李雄伟, 张天宇. 新型高效汽轮机 DEH 控制系统的国产化应用 [J]. 自动化博览, 2022, 39(12): 58-61.
- [8] 沈勤华. 集成控制系统在热电厂汽轮发电机组中的运用 [J]. 电子技术与软件工程, 2018, (16): 228-228.
- [9] 王兴刚, 程小亮, 张凡, 等. 发电功率快速扰动时船用蒸汽动力系统动态特性试验研究 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(S1): 92-98.
- [10] 黄文婧. 600MW 汽轮机 DEH 调节系统故障诊断研究 [J]. 通讯世界, 2014, 20(6): 102-103.