

# 火电厂DCS系统硬件冗余设计与故障诊断专家系统开发

王旬

国能河北衡水发电有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17164

**[摘要]** 本文聚焦火电厂DCS系统,阐述其核心理论与技术基础,涵盖控制理论、架构、通信协议等。分析硬件冗余设计需求,设计关键硬件冗余架构,并探讨冗余容错技术。开发故障诊断专家系统,构建知识体系,设计推理机与诊断算法,实现数据采集预处理、核心诊断交互及系统集成等功能模块。该系统可提升火电厂DCS运行可靠性与故障诊断效率,保障机组安全稳定运行。

**[关键词]** 火电厂DCS; 硬件冗余设计; 故障诊断; 专家系统

**中图分类号:** TM621.6 **文献标识码:** A

## Hardware Redundancy Design and Fault Diagnosis Expert System Development for DCS in Thermal Power Plants

Xun Wang

CHN Energy Hebei Hengfeng Power Generation Co., Ltd.

**[Abstract]** This study focuses on the Distributed Control System (DCS) in thermal power plants, elaborating on its core theoretical and technical foundations, including control theory, architecture, and communication protocols. The demand for hardware redundancy design is analyzed, key hardware redundancy architectures are designed, and redundancy fault-tolerant technologies are explored. A fault diagnosis expert system is developed, constructing a knowledge system and designing inference engines and diagnostic algorithms to achieve functional modules such as data acquisition and preprocessing, core diagnostic interaction, and system integration. This system enhances the operational reliability and fault diagnosis efficiency of DCS in thermal power plants, ensuring the safe and stable operation of generating units.

**[Key words]** Thermal Power Plant DCS; Hardware Redundancy Design; Fault Diagnosis; Expert System

### 引言

火电厂DCS系统作为机组运行的核心控制平台,其可靠性与故障诊断能力直接影响能源生产的安全与效率。传统DCS系统在面对复杂工况与硬件故障时,存在诊断效率低、依赖人工经验等问题。本文围绕火电厂DCS系统,深入探讨硬件冗余设计与故障诊断专家系统开发,旨在通过冗余架构提升系统容错能力,借助专家系统实现故障的精准诊断与高效处理,为火电厂安全稳定运行提供技术支撑。

### 1 DCS火电厂DCS系统核心理论与技术基础

火电厂DCS系统(分布式控制系统)的核心理论基于“分散控制、集中管理”理念,将复杂工艺过程分解为多个独立控制回路,通过分布式智能控制器实现局部优化,同时利用高速通信网络集成全局数据,形成集中监视与协调决策体系。其技术基础涵盖控制理论、计算机技术、通信协议及系统架构四大领域。在控制理论层面,DCS以经典PID控制为核心,结合现代控制算法实现多变量解耦、状态反馈及预测控制<sup>[1]</sup>。例如,锅炉燃烧优化通过

串级PID调节风煤比,汽轮机转速控制采用状态反馈抑制负荷扰动,而模型预测控制(MPC)则用于协调机组负荷与环保指标。系统架构采用分层设计,现场控制站(DPU)执行实时闭环控制,操作员站(OPU)提供人机交互界面,工程师站(ENG)支持组态编程,历史站(HSU)存储运行数据,各层通过冗余工业以太网实现毫秒级数据交换。通信协议方面,DCS支持OPC UA、IEC 61850等国际标准,兼容Modbus、Profibus等工业总线,确保与SIS、MIS等系统的无缝集成。硬件层面,控制器、I/O模块、电源及网络均采用冗余配置,结合容错设计提升系统可用性。

### 2 DCS火电厂DCS系统硬件冗余设计

#### 2.1 DCS硬件冗余设计需求分析

火电厂DCS系统硬件冗余设计需求源于机组运行的高可靠性要求,火电厂作为能源生产核心设施,机组停机将造成巨大经济损失,甚至影响电网稳定,因此硬件必须具备故障容错能力。从运行场景分析,现场环境存在电磁干扰、电压波动、设备老化等风险,单一硬件故障可能导致控制中断,引发锅炉熄火、汽轮机

跳闸等严重事故。核心需求包括关键硬件故障时的无缝切换,切换时间需控制在毫秒级,确保控制逻辑不中断;冗余硬件需与主硬件保持数据同步,避免切换后参数偏差;同时需降低冗余设计的成本冗余,在保障可靠性的前提下优化硬件配置<sup>[2]</sup>。从设备维度看,控制器、电源模块、通信模块、I/O模块是冗余设计的重点,这些设备直接影响系统核心功能。另外,冗余设计还需满足运维需求,具备故障硬件在线更换功能,无需停机即可完成维护,进一步提升机组运行连续性,为火电厂安全稳定运行提供硬件保障。

### 2.2 DCS关键硬件冗余架构设计

关键硬件冗余架构设计采用“主备热备”模式,针对不同硬件类型制定差异化架构。控制器采用双机热备架构,两台控制器同时运行相同控制逻辑,通过专用同步链路实时同步数据,主控制器负责接收现场数据并输出控制指令,备控制器实时监测主控制器状态,当主控制器出现故障时,备控制器在50毫秒内自动接管控制功能,确保控制不中断。电源模块采用N+1冗余架构,根据系统总功率配置多台电源模块,正常运行时多台模块均分负荷,当其中一台故障时,剩余模块自动分担负载,保障系统供电稳定,电源切换采用无扰切换技术,避免电压波动影响设备运行。通信模块采用双网冗余架构,构建独立的A、B两个通信网络,所有节点同时接入双网,正常运行时双网并行传输数据,当其中一网故障时,系统自动切换至另一网,确保数据传输连续性。I/O模块采用通道级冗余架构,关键模拟量输入输出通道配置双冗余通道,通道间实时对比数据,当检测到通道故障时,自动切换至备用通道,同时发出故障报警,保障现场数据采集与控制指令执行的可靠性。

### 2.3 DCS冗余容错关键技术

冗余容错关键技术涵盖故障检测、数据同步、无扰切换三大核心技术。故障检测技术采用硬件自检与软件诊断相结合的方式,硬件层面通过内置检测电路实时监测控制器、电源、通信模块的电压、电流、温度等参数,软件层面通过周期巡检、心跳信号监测等机制,对硬件运行状态及数据传输完整性进行诊断,当检测到参数超出阈值或心跳信号丢失时,立即触发故障报警并标记故障设备。数据同步技术针对不同硬件采用差异化方案,控制器通过共享内存或高速串行总线实现控制逻辑、中间变量等数据的实时同步,确保主备控制器状态一致;I/O模块通过通道间数据校验机制,保障主备通道采集数据的一致性,同步延迟控制在微秒级。无扰切换技术是冗余容错的核心,控制器切换时采用“先同步后切换”原则,备控制器确认与主控制器数据一致后再接管控制权限,避免切换过程中控制指令突变;电源切换通过二极管或接触器实现无缝切换,确保供电电压稳定;通信切换采用链路检测与自动重连技术,切换过程不影响数据传输完整性。容错技术还包括故障隔离机制,通过硬件隔离电路避免故障设备对其他模块造成影响,为冗余切换争取时间,提升系统整体容错能力。

## 3 DCS火电厂DCS故障诊断专家系统开发

### 3.1 DCS专家系统需求与总体架构

火电厂DCS故障诊断专家系统需求基于解决传统故障排查效率低、依赖人工经验的痛点,核心需求包括实时故障监测、精准诊断定位、故障原因分析及处理建议推送,同时需适配DCS系统多模块、多参数的复杂场景,具备与现有DCS系统的兼容性 & 可扩展性。系统需实现对控制器、通信网络、I/O模块等关键硬件及控制逻辑、参数配置等软件层面的全面监测,故障诊断准确率需达到90%以上,诊断响应时间不超过10秒。总体架构采用“分层模块化”设计,分为数据层、知识层、推理层和应用层。数据层负责采集DCS系统运行参数、设备状态信号及故障报警信息,通过数据预处理模块完成降噪、标准化处理;知识层构建故障诊断知识库,存储专家经验、故障案例及诊断规则;推理层作为核心层,采用正向推理与反向推理相结合的推理机制,调用知识库数据进行故障诊断;应用层提供人机交互界面,展示诊断结果、故障处理流程及历史诊断记录,支持运行人员查询与操作。各层级通过标准化接口通信,确保数据传输顺畅,系统整体具备高实时性与可靠性<sup>[3]</sup>。

### 3.2 DCS故障诊断知识体系构建

火电厂DCS故障诊断知识体系构建以专家经验为核心,结合故障案例分析与理论研究,形成多维度、结构化的知识架构,涵盖知识获取、知识表示、知识存储及知识更新四大环节。知识获取采用人工访谈与数据挖掘相结合的方式,通过与电厂运维专家、DCS系统工程师深度沟通,梳理常见故障类型、故障现象及处理方法;同时采集近五年DCS系统故障案例数据,通过数据挖掘技术提取故障特征与关联规则。知识表示采用产生式规则与框架表示法相结合的方式,产生式规则以“IF-THEN”形式描述故障现象与原因的对应关系,如“IF DCS控制器通信灯闪烁且数据传输中断, THEN 通信模块故障”;框架表示法用于描述故障案例的完整信息,包括故障发生时间、工况参数、处理过程及结果。知识存储采用关系型数据库与知识库管理系统结合的模式,关系型数据库存储结构化故障数据,知识库管理系统实现知识的分类存储与索引,支持快速查询。知识更新机制通过定期收集新故障案例、专家经验反馈及系统运行数据,采用机器学习算法优化知识规则,确保知识体系的时效性与准确性,提升诊断系统的适应性。

### 3.3 DCS推理机与诊断算法设计

推理机作为故障诊断专家系统的核心,采用正向推理与反向推理协同的推理机制,结合多种诊断算法提升诊断精准度。正向推理从故障现象出发,依据知识库中的产生式规则逐步推导故障原因,适用于故障现象明确的场景,推理过程中通过冲突消解策略处理多规则匹配问题,采用优先级排序法选择最可能的诊断结果。反向推理从假设的故障原因出发,验证该原因是否能导致当前故障现象,适用于故障现象复杂、可能存在多故障叠加的场景,通过回溯机制逐步排除不合理假设。诊断算法采用基于规则的诊断算法与机器学习算法相结合的方案,基于规则的算法利用已构建的知识规则快速匹配故障,保障诊断效率;机器学习

习算法采用BP神经网络与支持向量机(SVM)结合的模型,通过训练故障样本数据,学习故障特征与原因的非线性映射关系,用于处理规则库中未涵盖的新型故障。算法实现过程中,首先对预处理后的故障数据进行特征提取,选取故障发生时的关键参数变化率、阈值偏差等作为特征向量,输入至诊断模型;通过模型融合策略整合规则推理与机器学习的诊断结果,采用加权投票法确定最终诊断结论,同时输出故障置信度,为运行人员提供参考,提升诊断结果的可靠性。

#### 4 DCS专家系统功能模块开发与实现

##### 4.1 DCS数据采集与预处理模块

数据采集与预处理模块是专家系统基础,负责获取并处理DCS运行数据,保障诊断准确性。采集采用多接口适配设计,通过OPC、以太网、串口等方式,接入控制器状态、I/O数据、网络流量、报警信号等,按数据重要性分级设置采集频率,关键参数100ms/次,普通参数1s/次。采集数据含模拟量、数字量、开关量及事件数据。预处理分步骤进行,先用 $3\sigma$ 准则剔除异常数据,再用线性插值法填补缺失值,接着标准化处理消除量级差异,最后用小波变换降噪。处理后的数据存入实时与历史数据库,前者供推理机实时调用,后者用于案例分析与算法训练。模块还具备数据质量监测功能,异常率超5%时报警,保障数据可靠。

##### 4.2 DCS核心诊断与交互模块

核心诊断与交互模块是专家系统核心,集成故障诊断与交互功能。核心诊断以推理机为核心,接收预处理数据,先模式识别提取故障特征,与知识库匹配初步诊断,再结合正反向推理定位根源,调用历史案例库提升准确性。诊断结果含类型、位置、原因、等级及置信度。系统自动生成处理方案,推送至操作员站。交互模块设计人性化,图形化界面展示系统拓扑,不同颜色标记设备状态,点击可查看详情;支持语音报警严重故障;提供处理记录功能,自动更新知识库;具备远程交互,运维专家可登录指导;支持自定义诊断规则,提升适应性。

##### 4.3 DCS系统集成与接口设计

系统集成与接口设计实现专家系统与火电厂DCS等辅助系统无缝融合,保障数据交互与功能协同。采用“松耦合”架构,不影响现有DCS系统稳定运行,通过标准化接口共享数据、联动功能,集成范围涵盖DCS、SIS、设备管理及视频监控系统。与DCS系统集成采用OPC UA协议,实现数据采集、报警推送及辅助控制指令输出;与SIS系统通过数据库接口上传故障诊断等数据,助力机组经济性分析与运行优化;与设备管理系统集成关联故障信息与设备台账,为制定维护计划提供依据;与视频监控系统通过API接口,故障时自动调取画面辅助判断<sup>[4]</sup>。接口设计标准化、模块化,封装通信协议,兼容性与扩展性强,采用加密、认证等安全措施,实时性达毫秒级,确保系统运行效率。

#### 5 结束语

火电厂DCS系统硬件冗余设计与故障诊断专家系统的开发,有效提升了系统的可靠性与故障处理能力。硬件冗余架构保障了关键设备故障时的无缝切换,冗余容错技术确保了系统稳定运行。专家系统通过构建知识体系、设计推理算法,实现了故障的精准诊断与处理建议推送。未来,随着技术发展,系统将进一步优化,为火电厂智能化运行与管理提供更强大的支持,推动能源行业的高质量发展。

#### [参考文献]

- [1]马凯凯.DCS火电厂DCS系统通信延迟问题及其解决方案[J].DCS通信电源技术,2025,42(18):179-181.
- [2]王伟.DCS浅谈火电厂DCS系统的接地[J].DCS机械管理开发,2022,37(5):304-306.
- [3]古栖铭,杨军.DCS火电厂DCS系统安全防护实践[J].DCS工程技术,2022(24):192-194.
- [4]周新超.DCS火电厂DCS系统常见故障及处理对策[J].DCS数字化用户,2025(31):25-27.