

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305060

# 湿式脱硫系统智能化改造架构及关键技术

李瑞连<sup>1</sup>, 曾德良<sup>1</sup>, 刘吉臻<sup>1</sup>, 胡勇<sup>1</sup>, 高耀焯<sup>2</sup>, 平博宇<sup>1</sup>, 谢衍<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 燃煤机组智能化改造是提升机组能效和工业绿色转型的必然选择, 从实际需求和工程视角出发, 对湿式脱硫系统智能化改造的总体框架和关键技术进行设计。首先, 对智能控制系统 (ICS) 网络框架的结构组成进行阐述。其次, 基于 ICS 框架, 设计了信息物理融合模型与先进控制算法相结合的优化控制策略, 并基于直接能量平衡 (DEB) 策略设计吸收塔 pH 值优化控制策略; 同时, 使用信息物理融合优化结果指导分析智能评价系统; 利用数据孪生技术和机理模型结合实现系统智能预警和故障诊断; 统计典型故障, 建立专家系统且结合数据驱动实现及时故障追踪。最后, 采用可视化人机交互系统对脱硫系统指标实时展示, 构建 ICS+数字孪生+机器学习+可视化一体化脱硫系统, 为实现自趋优、自学习、自恢复、自组织、自适应的智慧脱硫系统提供依据。

**[关键词]** 智慧脱硫; ICS; DEB 控制策略; 信息物理融合; 数字孪生; 可视化人机交互

**[引用本文格式]** 李瑞连, 曾德良, 刘吉臻, 等. 湿式脱硫系统智能化改造架构及关键技术[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 74-86.  
LI Ruilian, ZENG Deliang, LIU Jizhen, et al. Intelligent transformation architecture and key technologies of wet flue gas desulfurization system[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 74-86.

## Intelligent transformation architecture and key technologies of wet flue gas desulfurization system

LI Ruilian<sup>1</sup>, ZENG Deliang<sup>1</sup>, LIU Jizhen<sup>1</sup>, HU Yong<sup>1</sup>, GAO Yaokui<sup>2</sup>, PING Boyu<sup>1</sup>, XIE Yan<sup>1</sup>

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The intelligent retrofit of coal-fired power generation units is an inevitable choice for improving energy efficiency and promoting green industrial transformation. Based on practical requirements and engineering perspectives, this article designs the overall framework and key technologies for the intelligent retrofitting of wet flue gas desulfurization systems. First, the structural components of the intelligent control system (ICS) network framework are discussed. Next, based on the ICS framework, an optimized control strategy combining information-physical fusion models and advanced control algorithms is designed, as well as an optimized control strategy for the absorption tower pH value based on the direct energy balance (DEB) approach. Simultaneously, the information-physical fusion optimization results guide the analysis of the intelligent evaluation system. Using data twin technology and mechanism models, intelligent early warning and fault diagnosis for the system are achieved. By analyzing typical faults, an expert system is established, combined with data-driven techniques for real-time fault tracking. Finally, the article points out that a visualization-based human-machine interaction system is used for real-time display of desulfurization system indicators, constructing an integrated desulfurization system that combines ICS, digital twins, machine learning and visualization. This provides a basis for realizing a self-optimizing, self-learning, self-recovering, self-organizing and self-adaptive intelligent desulfurization system.

**Key words:** intelligent desulfurization; ICS; DEB control strategy; information-physical fusion; digital twin; visual human-machine interaction

随着以高度数字化、网络化、机器自组织为标志的第 4 次工业革命的提出<sup>[1]</sup>, 我国政府印发了部

署全面推进实施制造强国的战略文件《中国制造 2025》<sup>[2]</sup>, 旨在推进重点行业智能化转型升级。发电

收稿日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61833011)

Supported by: Major Project of National Natural Science Foundation of China (61833011)

第一作者简介: 李瑞连 (1992), 男, 博士研究生, 主要研究方向为燃煤电站污染物排放控制、优化与建模, lr911007@163.com。

通信作者简介: 胡勇 (1986) 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为火电机组智能发电、控制系统建模及优化, 52702474@ncepu.edu.cn。

行业作为我国战略安全的重要保障,国家能源局于2016年首次将智能发电写入《电力发展“十三五”规划》<sup>[3]</sup>。2021年,国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》指出煤电要向基础保障性和系统调节性电源并重转型<sup>[4]</sup>,以适应国家“碳达峰、碳中和”战略要求。同年,《电力发展“十四五”规划》再次提出要提升电力生产信息化、数字化、智能化水平,指出要推动开展燃煤电厂智能控制技术的研究和应用,提高发电安全运行水平<sup>[5]</sup>。

我国可再生能源发电装机容量已达到世界前列,但在新型电力系统建设过程中燃煤发电依然是保证电力系统稳定运行的主要支撑电源<sup>[6-7]</sup>。现阶段,煤价成本高、环境污染及气候变化等因素的影响,对燃煤机组运行经济性和环保性提出了更高的要求<sup>[8-9]</sup>,使其面临严峻的挑战,因此,燃煤电厂实行“精细管理,精益生产”已成为必然发展趋势。湿式脱硫系统由于其具有脱硫效率高、脱硫原料易得等特点被燃煤电厂广泛应用,但湿式脱硫系统是燃煤电厂用电大户<sup>[10-11]</sup>。国内湿式脱硫系统的自动化程度低,很多设备处于手动操作状态<sup>[12]</sup>。随着燃煤机组负荷的大范围调节,变负荷过程中需频繁进行参数调整、设备启停、自动投退等操作,监盘操作工作量大且重要性高,直接影响电厂的整体经济性。因此,脱硫系统经济运行的调整空间较大,研发面向近零排放的高效低成本智能运行的烟气脱硫系统是非常有必要的,对实现燃煤机组少人/无人干预下连续运行和绿色转型具有重大意义。

脱硫系统智能化运行主要实现系统的智能控制,在2017年,刘吉臻团队已经提出火电机组的智能化应该由智能控制系统(intelligent control system, ICS)和智能服务系统(intelligent service system, ISS)<sup>[13]</sup>组成,从而实现智能设备层、智能控制层、智能生产监管层以及智能管理层之间融合,使发电过程具备智能控制、智能安全等功能<sup>[14]</sup>。截至到目前,已经有很多科研单位和大型企业从不同方面对ICS展开研究,具体研究内容涉及网络框架结构<sup>[15-16]</sup>、功能结构、关键技术等多个方面<sup>[17-19]</sup>。在研发过程中,将各个功能或者关键技术模块化,导致各应用功能相对孤立,关联性弱且具体信息流动过程不明确。随着工业智能化要求的不断提升,燃煤电厂智能化改造应从有没有向好不好发展,同时,应将工业智能化向工业深度智能化方向推动。

本文从湿式脱硫系统的实际应用和需求出发,基于系统现有的设备和分散控制系统(distributed

control system, DCS),提出对部分设备改造的建议。并基于DCS拓展ICS网络,结合机器学习、数据挖掘、数据孪生技术和可视化人机交互,从自主感知、灵活调节、运行优化和智能决策方面设计智能脱硫系统。基于设计的功能模块,从上到下关联脱硫系统各子系统,设计系统功能构架,细化脱硫系统的关键技术,从系统整体出发将ICS+数据孪生+机器学习+可视化深度结合,为实现智慧脱硫的自趋优、自学习、自恢复、自组织、自适应提供依据。

## 1 关键技术及网络架构

ICS平台在目前DCS平台基础上拓展开发,图1为脱硫ICS网络框架。由图1可见,ICS包含了DCS已有的硬件和网络系统,如传统控制器(DPU)、人机交互站(MMI)、I/O通信网络和控制级通信网等。在此基础上,扩展了智能传感器、智能控制器、大数据分析引擎、智能计算引擎、高强度数据交互网络、智慧人机接口等<sup>[20]</sup>。

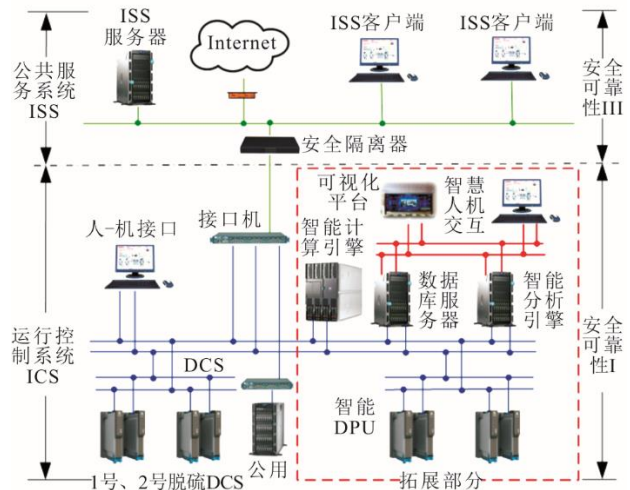


图1 脱硫ICS网络框架

Fig.1 Desulfurization ICS network framework

其中,智能传感器由传统传感器、人机接口、数据处理单元等构成,其功能不仅具有测量功能,还具有数据存储、整定和调整及自测试和诊断等功能。智能控制器采用具有输入/输出接口、通信接口、控制功能模块、显示模块及软件系统的高性能处理器,以便满足复杂过程控制要求;大数据分析引擎和智能计算引擎采用高性能双路或多路处理器、存储设备、网络连接设备以及在平台上运行的数据库等构成;人机交互形式主要是显示器等设备,针对智慧脱硫系统,本文人机交互设备使用可视化人机交互设备。

基于 ICS，借助于智能传感器、大数据分析引擎、智能计算引擎、高强度数据交互网络、智慧人机接口等高性能设备，以安全和经济运行为目标，应用数据挖掘、信息物理融合建模和数字孪生技术等，构建参数互访的智能控制、智能报警、智能决策和智能评价等功能模块，使用智慧人机接口实时关联各智能化模块和可视化人机交互设备，建立从上到下的一体化智慧脱硫系统，实现信息化、自动化、可视化为标准的高度仿人操控的智慧脱硫系统，系统框架如图 2 所示。

## 2 智能控制

信息物理融合建模具有多学科交叉、多层次建模、多尺度建模、多模态建模和多目标优化等特点<sup>[21-22]</sup>。因此，以石灰石物耗费用、设备能耗、排污费用和产出石膏利润，及运行成本最小和利润最大为目标建立脱硫系统不同变量之间的物耗关系、能耗关系，从而建立脱硫系统的机理模型。基于深度学习算法建立脱硫效率预测模型，建立脱硫系统信息物理融合后的模型，利用智能优化算法如多目标粒子群优化算法、多目标遗传算法等智能多目标

寻优算法对脱硫系统在不同工况下进行实时优化计算，得到重要变量的最优运行值。同时，将 APS 自启停功能组与模拟量和开关量控制结合，使用跳步、计时、判断等开关量控制方法，融入预测控制、模糊控制、自适应控制等先进控制算法，实现更加智能、高效、安全、可靠的脱硫控制系统，其智能控制结构如图 3 所示。

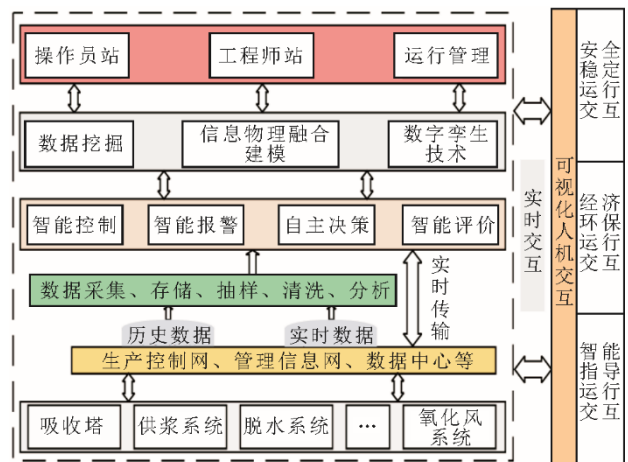


图 2 智慧脱硫系统关键技术框架  
Fig.2 Key technologies framework of intelligent desulfurization system

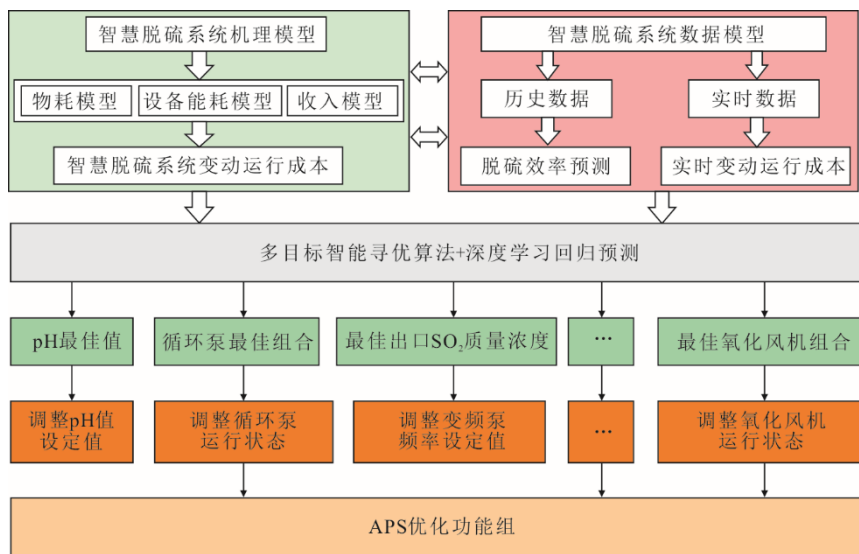


图 3 脱硫系统智能控制结构  
Fig.3 Intelligent control structure of desulfurization system

### 2.1 吸收塔优化控制

锅炉燃烧过程中，煤质的变化、锅炉负荷的波动以及燃烧方式的调整等因素都会导致脱硫系统入口 SO<sub>2</sub> 质量浓度和烟气流量(统称脱硫烟气负荷)发生波动。特别是对于目前主要参与电网调峰的燃煤电厂，锅炉负荷波动较为剧烈，导致脱硫系统出

口 SO<sub>2</sub> 质量浓度超出国家排放标准 (35 mg/m<sup>3</sup>)，这已成为燃煤电厂经常发生的问题。对于脱硫系统，锅炉负荷变化引起的脱硫烟气负荷波动被视为外部扰动。为了克服外部扰动以确保脱硫系统出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度等环保指标稳定且不超标，运行人员需要根据经验调整浆液循环泵的运行台数和供浆

流量。然而，当前的浆液循环泵启动台数策略往往过于保守，操作频繁且运行效果不佳，导致过度脱硫造成电力的巨大浪费。另外，由于供浆流量的惯性特性，其响应时间较长，可能导致吸收塔浆液中的 pH 值波动较大。这种波动直接影响脱硫副产物的品质。针对上述问题，有必要开发更加精确和稳定的控制策略，以提高脱硫系统的运行效率和环保性能。

基于信息物理融合模型，经过优化计算得到的最优运行参数，指导脱硫系统经济运行，主要实现技术目标和控制策略设计如下：

1) 实现少人/无人干预的浆液循环泵经济运行在脱硫系统稳定运行过程中，保证出口 SO<sub>2</sub> 达标情况下，基于信息物理模型优化结果得到浆液循环泵当前运行的最优组合。结合模型优化结果和 APS 优化功能组，在不同工况下实时指导浆液循环泵优化运行，实现浆液循环泵的自动启停、少人/无人干预，达到比人工通过经验手动控制更经济、更可靠的目的。由于脱硫系统在运行过程中运行参数较稳定，浆液循环泵不存在跳泵等情况，且在切换过程严格按照先启后停的 APS 步序，不会对机组 6 kV 配电安全运行产生影响。

2) 实现脱硫系统出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度的快速调节。脱硫过程为典型的化学反应，控制出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度需要克服其大延迟大惯性的特性，通过调节浆液 pH 值来控制出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度的过程相对缓慢。因此，最快速的调节方式是通过启/停浆液循环泵。然而，浆液循环泵启动过程中涉及叶轮反冲、阀门开启等一系列程序，需要一定的时间。在烟气负荷剧烈变化时，且出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度在排放标准值边界运行，将导致 SO<sub>2</sub> 排放超标。为了提升出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度的控制速率，在现有脱硫系统设备基础上，一种直接有效的办法是将当前的浆液循环工频泵升级改造为变频泵。通过信息物理融合经济优化模型实时求解得到最优频率值，实时指导变频泵的运行。将工频泵升级改造为变频泵，频率的变化对喷淋层的喷雾粒径会有一定的影响，但是由于输送管道固有高度 20~30 m，变频器可调节的频率范围非常有限，从外部特性看对脱硫效率的影响很小。因此变频泵的频率变化对脱硫效率的影响可忽略。同时，为增加控制裕量，建议改造 2~3 台。这种改进措施将有助于提高脱硫系统出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度的调节速度，从而优化整个脱硫过程的运行效率和环保性能。

3) 实现少人/无人干预的供浆系统快速精准控制。当前供浆系统自动控制策略相对成熟，控制策略是以 pH 值为主控制对象、供浆流量为副调的串级控制策略，烟气负荷、锅炉负荷作为控制器的前馈调节，使用传统的 PID 控制器进行控制。但是，对于脱硫负荷大幅度变化时，系统的状态已经改变，则将 pH 值作为定值控制已经不适合当前的系统。因此，随着烟气负荷的剧烈变化，吸收塔中的浆液 pH 设定值根据信息物理优化模型的最优值，融合先进控制算法进行实时调整，以适应不同烟气负荷且实现出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度和浆液 pH 最优控制的同时，应更快、更稳、更准地实现控制要求，其具体控制策略如下。

汽包炉协调控制使用了直接能量平衡 (DEB) 控制策略，可保证主蒸汽压力稳定，同时又大大提高了机组负荷快速跟踪的适应性<sup>[23]</sup>。考虑到脱硫系统的工作过程类似于汽包炉协调控制系统的工作过程，借鉴协调控制 DEB 的思想，设计吸收塔 pH 值控制方案。具体方案为：

$$\Delta F = \underbrace{F \frac{\text{pH}_{(\text{sp})}}{\text{pH}_{(\text{pv})}}}_{\text{流量指令}} - \underbrace{\left( F + C' \frac{d\text{pH}_{(\text{pv})}}{dt} \right)}_{\text{流量信号}} \quad (1)$$

式中：pH<sub>(sp)</sub> 为吸收塔浆液 pH 值设定值；pH<sub>(pv)</sub> 为吸收塔浆液 pH 值反馈值；F 为以循环浆液流量表征的烟气负荷工况，t/h；C' 为以循环浆液流量表征的吸收塔活性脱硫能力系数，t/(h·s)。

式(1)可进一步改写为：

$$\Delta F = \underbrace{K \times \text{pH}_0 \frac{\text{pH}_{(\text{sp})}}{\text{pH}_{(\text{pv})}}}_{\text{流量指令}} - \underbrace{\left( K \times \text{pH}_0 + K \times C \frac{d\text{pH}_{(\text{pv})}}{dt} \right)}_{\text{流量信号}} \quad (2)$$

式中：pH<sub>0</sub> 为以浆液 pH 值表征的烟气负荷工况；C 为以浆液 pH 值表征的吸收塔脱硫能力系数，s；K 为额定工况下循环浆液流量与浆液 pH 值间的换算，其计算公式为：

$$K = \frac{F_0}{\text{pH}_{0,0}} \quad (3)$$

式中：F<sub>0</sub> 和 pH<sub>0,0</sub> 分别为额定工况下循环浆液流量与浆液 pH 值。

将式(2)两边分别除以 K 可得：

$$\Delta \text{pH}_0 = \underbrace{\text{pH}_0 \frac{\text{pH}_{(\text{sp})}}{\text{pH}_{(\text{pv})}}}_{\text{流量指令}} - \underbrace{\left( \text{pH}_0 + C \frac{d\text{pH}_{(\text{pv})}}{dt} \right)}_{\text{流量信号}} \quad (4)$$

因此，可以设计基于 DEB 的 pH 值控制策略，

结果如图 4 所示。

## 2.2 排浆系统智能控制

### 2.2.1 吸收塔浆液密度控制

一般燃煤电厂规定脱硫系统吸收塔浆液密度在  $1030\sim 1150\text{ kg/m}^3$ ，在运行过程需要手动开启/停止排浆泵进行控制。为了石膏密度在规定范围，避免考核指标超标，操作非常频繁，甚至会在与临界值相差很大时进行排浆，造成能耗和物耗的浪费。

为了防止石膏排除泵频繁启动，可基于 ICS 设

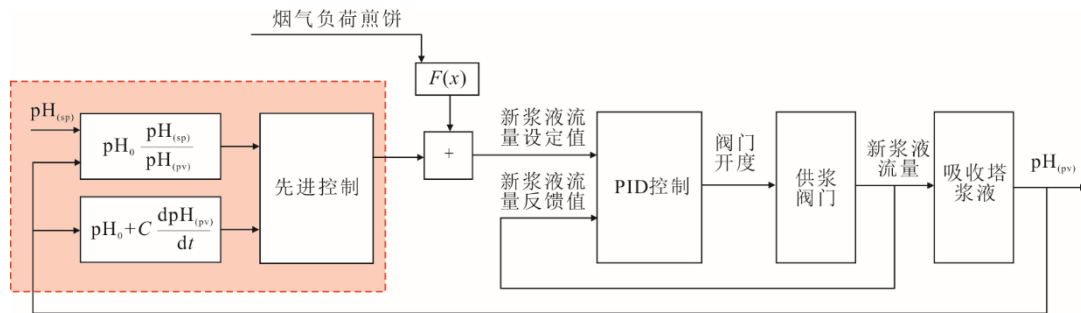


图 4 基于 DEB 的 pH 值控制策略  
Fig.4 pH control strategy based on DEB

### 2.2.2 皮带机转速优化控制

石膏排出泵启动后，浆液经过旋流子一级脱水后流入脱水皮带机进行二级脱水。其皮带机的工作原理是利用真空箱在皮带上形成真空环境，从而吸附皮带上浆液中的水分形成含水率达标的石膏。但是，受皮带机转速和滤饼厚度的影响，现实中石膏的含水率是不稳定的。若皮带机转速过快，则滤饼厚度减小，真空箱真空度降低，导致过脱水甚至石膏浆液流失；若皮带机转速过慢，则滤饼厚度增大，超过一定值后，皮带机脱水效率下降。因此，皮带机转速和滤饼厚度是相互耦合的，并且旋流子启动个数和排浆密度对石膏品质也会产生影响。因此在不同工况设定合适的滤饼厚度，才能确保石膏品质。考虑利用设定值巡航策略实时设定皮带机滤饼设定值，基于排出石膏密度、旋流子开启个数以及皮带机真空度等参数，建立约束优化模型，求解最优真空度情况下的滤饼厚度设定值，实时设定皮带机滤饼厚度，结合先进控制算法提升被控量的响应速率。

## 2.3 氧化风机优化控制

为了提高脱硫效率，一个关键因素是维持吸收塔浆液中氧含量在一个适宜的水平。若氧化风量过高，不仅会增加运行成本，还可能诱发吸收塔浆液起泡，从而引发虚假液位和溢流事故；反之，若氧

计滞环控制策略，设定滞环上、下限自动启、停排浆泵，关联旋流子阀门、脱水皮带机等设备，设计整体机组自启停控制系统（automatic power plant startup and shutdown system, APS）功能组，实现排浆系统整体智能运行。由于浆液密度计需要定期清洗，冲洗过程中应保持吸收塔浆液密度。冲洗结束后，为避免密度计测量失准，应等待冲洗门关闭后，利用延时实测浆液密度。根据实测排浆密度重新确定石膏排除泵的启停。

化风量过低，吸收塔浆液中的氧化反应不充分，导致脱硫系统生成半水石膏和二水石膏的混合晶体，易引发设备和管道堵塞，进而降低脱硫效率。

氧化空气利用率（即理论所需空气量与实际输入氧化空气量之比）和氧硫比（氧化  $1\text{ mol SO}_2$  所需输入  $\text{O}_2$  的摩尔数）是 2 个衡量氧化效果的指标，理论上氧化空气利用率为 33.3%，氧硫比为 1.5。然而，这 2 个指标并无可靠的测量点，在实际运行过程中，根据运行人员经验或者现场试验进行节能优化，判断需要启动的氧化风机台数。

为了实现氧化风系统的智能运行，增设风流量等相关测量点，利用入口  $\text{SO}_2$  质量浓度、吸收塔含氧量及氧化空气利用率等参数构建氧化风系统信息物理融合优化模型。基于模型实时计算结果，对氧化风机运行台数进行实时调整。

## 2.4 除雾器冲洗水控制

脱硫系统除雾器安装在吸收塔顶部的喷淋层之上，主要用于分离塔中气体夹带的液滴，减少物料损耗和吸收塔后方设备的腐蚀。为避免除雾器堵塞需要定期冲洗，冲洗后的液体落入吸收塔浆液箱。冲洗频次太高，会导致浆液箱出现溢流的情况。基于此，应该合理设计冲洗频次。

烟气温度是影响吸收塔浆液箱蒸发量的主要影响因素。因此选择烟气温度、浆液箱液位反馈、

除雾器差压作为输入变量,拟合冲洗频次相关的模拟量,将该模拟量作为等待时间,然后通过这个等待时间计算得到冲洗频次,关联浆液箱液位差,若液位差变化大,则开启多层冲洗子组。同时,应开启不同层子组进行定期冲洗,并兼顾下层冲洗子组频次高于上层冲洗子组。

### 2.5 全程无断点 APS 功能组

在燃煤电厂中,设备的动态特性具有高度复杂性,而启动/停止过程受到诸多因素的影响且存在较大安全风险。针对大型设备的启动/停止操作,采用 APS 技术进行实现。APS 技术的基本原理是根据系统的启动顺序合理地设计断点,结合运行人员的操作来实现系统的启动和停止。

随着电厂智能化改造的推进,整合 APS 技术和常规智能控制技术的火电机组智能控制系统已成为智能电站建设的重要组成部分。然而,在当前燃煤电厂的脱硫系统中,由于其自动化水平较低,许多设备仍处于手动控制状态。因此,大量设备在启动/停止过程中并未设计 APS 功能模块。尽管部分设备已经配备了 APS 技术,但仅有部分功能可以实际使用。

为了在设备自动化升级改造的基础上进一步实现系统智能运行,脱硫系统的整体设计应充分考虑 APS 系统的应用。基于专家知识库和运行规程,对系统化整为零模块化设计,基于面向对象理念分布式设计子系统和设备的 APS 功能,合理布局断点和容错机制。采用断点级+功能组方式设计设备和子系统的一键启动/停止功能,使断点既相互联系,又相互独立,只要条件满足,各个断点均可独立执行的特点,进一步深化到工艺子系统级。结合智能控制和自主决策需求,对设备和系统进行智能化重构,以建立脱硫系统智能控制和 APS 结合的全程无断点的一体化智能体系。

## 3 智能报警

在生产过程中,报警系统对于预防参数异常变化导致运行故障具有重要意义。该系统通过声音、光线等方式提醒运行人员关注系统运行状态,并及时干预生产过程参数。然而,在脱硫系统中,由于需要监测的参数众多,以及内部和外部干扰、锅炉工况变化和设备启停等因素的影响,报警信号频繁出现,给操作人员监控带来了巨大负担,并严重影响对报警扰动源的及时准确辨识,若采取措施不

当,可能导致事故的发生和扩大。

当前脱硫系统中的 DCS 报警功能较为简单,仅设定参数上下限,并将越限信息被动显示,缺乏主动分析和诊断功能。随着人工智能的发展以及数字孪生技术的出现<sup>[24-25]</sup>,工业过程中的系统运行将变得更加智能化。因此,利用数字孪生技术构建脱硫系统中各子系统的孪生体同时建立各设备数据驱动模型,结合专家知识库建立一个预警-诊断-根源分析的 3 层智能状态监测与故障诊断体系(图 5),将智能报警转化为系统安全运行的主动支撑。关联可视化系统,可使系统运行状态一目了然,减轻了操作人员的工作负担。

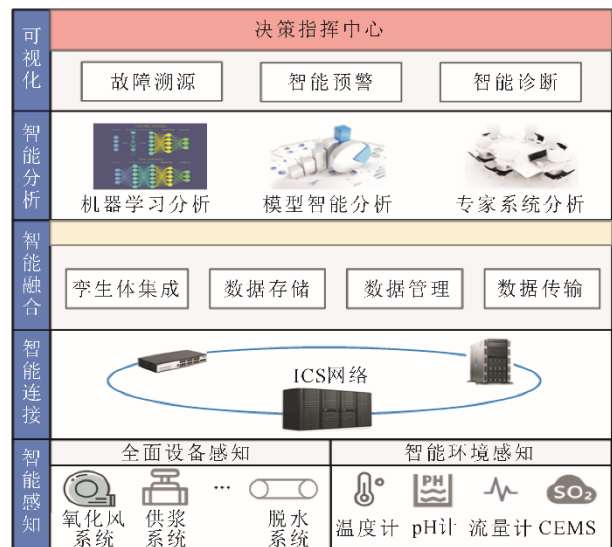


图 5 数据孪生-智能报警系统  
Fig.5 Data twin-intelligent alarm system

### 3.1 滋扰报警抑制

滋扰报警是工业控制系统中的一个常见问题,该报警并不一定意味着系统出现故障,但可能会干扰操作人员的正常操作,影响系统安全运行<sup>[26]</sup>。滋扰报警的产生主要有几个原因<sup>[27]</sup>: 1) 由于实际过程参数关联导致系统运行过程中,出现不正常状态时,故障源可能向相关环节传播,引发多处报警; 2) 系统受到随机扰动,导致过程变量在报警限值附近振荡; 3) 系统设计报警限值时参数设计不合理,使得运行参数重复出现报警。

可根据工业标准 ISA-18.2 计算滋扰报警指数。通过滋扰报警指数将 1 min 内超过 3 次的报警情况确认为滋扰报警信号。可采取以下几种方法消除滋扰报警引起的虚假信号: 1) 通过设置滤波器和延迟时间,使得短时间内的突发波动不会立即触发报警; 2) 考虑多个相关过程变量的联合情况,降低单

一变量在报警限值附近振荡时产生滋扰报警的可能性；3) 通过对历史数据进行统计分析，可以找出报警限值的合理范围，避免不合理的报警限值导致滋扰报警。

### 3.2 智能预警

基于数字孪生技术的子系统孪生模型，与可视化人机交互系统相结合，实现子系统和设备的孪生体与运行人员实时交互，使运行人员能够清晰、实时地监测各子系统的运行状态。为了实现这一目标，首先对历史数据进行深入分析，利用深度学习建立各系统运行参数与设备的模型，参数和设备状态阈值采用动态标定方法，实时监测设备参数是否处于正常范围内，从而准确捕捉设备运行参数的异常变化。当设备参数偏离正常范围时，运行人员可以准确定位发生预警的设备，并及时向相关人员发出预警信号。

此外，通过数字孪生技术和可视化系统的结合实现了对大部分系统工艺参数及设备状态参数的全覆盖预警。这能够自动监测和提前预警大量需要监视的重要参数劣化情况，从而防止事故的进一步扩大。同时，能够快速定位存在异常的部位和参数，实现高可靠性的参数异常监测与脱硫设备故障预警。

### 3.3 故障诊断

数据驱动的智能诊断方法具有较低的建模复杂性、较强的信息挖掘能力以及较高的故障识别精度，而基于数字孪生技术的机理模型驱动诊断方法则具有较强的可解释性和较低的对故障样本的依赖性。通过结合这 2 种方法的优势，采用数据-模型混合驱动建模技术可实现高效、高准确性的智能故障诊断。

脱硫系统关键运行设备或系统建立故障诊断模型。如对于浆液循环泵和供浆泵等关键设备，一方面利用振动分析技术提取震动特征信息，同时基于大数据分析和机器学习算法从设备运行参数中提取高维状态特征并进行特征级融合。然后分别建立深度学习模型和震动故障诊断模型，通过决策系统实现故障准确诊断。

对于核心子系统，建立典型故障下参数动态变化的映射关系。通过运用“模型自弈”技术，解决故障样本不足的问题，进而基于深度学习算法实现子系统状态准确识别与诊断。将故障诊断关联系统孪生体，以便运行人员实时监测设备的故障及故障处理情况。结合数据驱动与数字孪生的智能故障诊

断方法，旨在提高故障诊断的效率和准确性，也对关键运行设备和核心子系统的故障诊断具有重要的理论和实际应用价值。

### 3.4 故障溯源

智能状态监控和故障诊断系统的关键任务不仅包括设备运行状态的预警和故障识别，还需深入分析故障的根源，为设备维护和检修提供可靠的决策依据。针对脱硫系统中吸收塔起泡、工艺水管管压力低、皮带机真空度异常、石灰石浆液密度低及循环泵出力下降等典型故障，提出了一种基于知识图谱的故障分析方法，并建立了故障溯源机制，具体如图 6 所示。

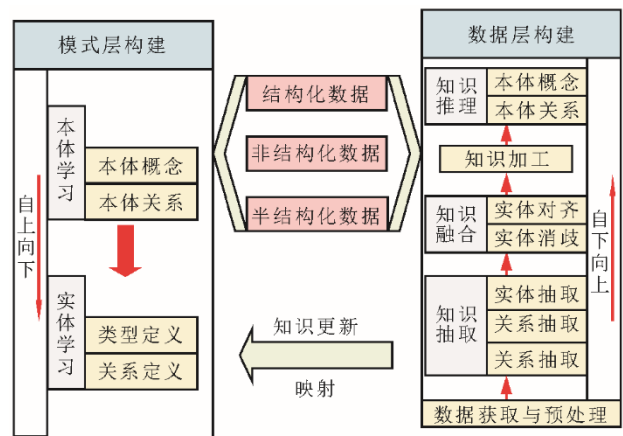


图 6 基于知识图谱的故障溯源分析  
Fig.6 Fault traceability analysis based on knowledge graph

首先，将专家知识、运行规程、设备手册、检修经验、历史消缺记录、运行参数等结构化、半结构化以及非结构化的多源异构数据进行知识分类和存储，有助于整合并组织分散的知识资源，为后续构建知识图谱提供基础的同时为故障溯源提供统一的框架；然后，采用自上向下的原则构建知识图谱模式层，抽象故障本体，根据数据结构化的差异，定义数据源中的知识实体、类型和关系，建立知识图谱的组织架构；最后，采用自下向上的方式构建数据分析层，研究故障实体、关系及所属间的知识提取、知识融合以及知识加工关键算法，同时，建立基于分布式表示和神经网络的混合知识推理模型对知识图谱进行改进、更新和补充，最终形成完备的设备运维知识图谱，为设备维护和检修决策提供智能化建议。

## 4 智能决策

利用人工智能技术和设备运行的热力学模型

建立设备故障诊断预测模型,对设备的运行时间周期进行评估,以确保设备在达到预期寿命的前提下实现高效运行。利用这些预测和评估结果,考虑设备性能、寿命和能耗等多方面因素的基础上,制定设备启停智能决策方案和故障容错机制,实现设备故障预测或运行时间周期达标时基于最优的启停策略,自主决策设备的启停工作,确保系统的安全经济运行。

#### 4.1 智能容错控制

图7为智能容错控制系统。

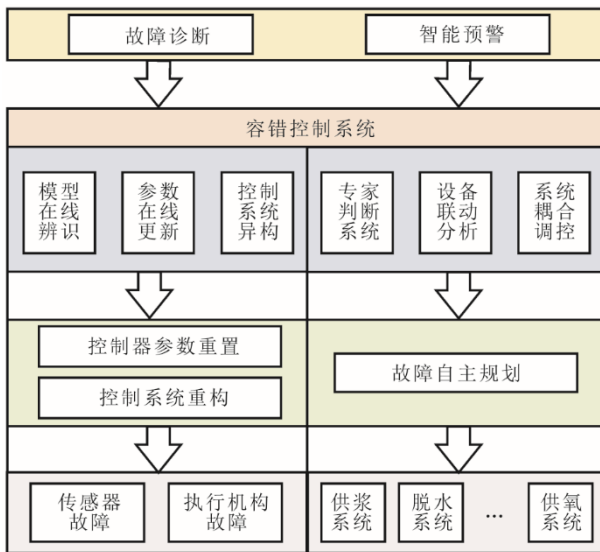


图7 智能容错控制系统

Fig.7 Intelligent fault-tolerant control system

为提高故障诊断系统的自主性能,关联故障诊断和故障预警模块,对传感器失准和执行机构故障,采用观测器状态估计值对控制参数进行重构,并结合参数自适应技术与滑模控制策略设计容错控制器,实现设备发生故障时保持系统的稳定运行。此外,设计设备间的联动触发条件和联动机制,根据专家系统的指导,对各子系统设备的运行方式进行耦合调控,以便在最短时间内清除故障。当子系统发生典型故障时,设备间的联动保护策略确保系统的安全性,实现了全工况故障的自主规划处理。

#### 4.2 设备智能切换

当前的脱硫系统主要依赖运行人员判断设备的启停切换,这会使设备之间存在运行时数偏差导致判断不及时,进而影响设备的服役寿命。因此,合理设计设备的智能定期切换尤为重要。

对所有在役电动泵,一般采用运行异常优先切换原则。以设备运行参数和累计运行时间为基础,

建立设备磨损或热应力损伤当量的在线计算模型,实现易磨损、易损伤设备的科学自动定期轮换。具体技术要求包括:设备磨损或热应力损伤当量计算的相对准确率应达到80%以上;根据损伤当量和运行时间,实现易磨损设备的定期轮换,以确保设备长周期稳定运行,减少非停次数,提高设备可用率在10%以上。具体设备包括石灰石供浆泵、石膏排出泵、氧化风机、工艺水泵、工业水泵、磨机再循环泵、过滤水泵、吸收塔地坑泵、滤布冲洗水泵和真空皮带机等。

由于脱硫系统中各子系统并非连续运行,根据运行时间和运行方式将设备划分为长周期运行设备、短周期运行设备和间歇运行设备。综合考虑设备性能、寿命和能耗及执行任务的时长制定最优的轮换时间。然而,在间歇运行设备的实际运行过程中,可能会遇到一些临界问题。如设备在运行时间累积到轮换时间的5%时就完成本次任务,或者在本次任务未结束时距离轮换时间结束不足5%。为了避免频繁启停设备对设备寿命和能耗的负面影响,提出了优化策略:在设备即将切换时,根据关联参数预测本次任务完成所需时间,若预测时间低于设备切换时间的5%,则不进行设备切换,直至任务结束。此外,在本次任务结束后,若设备运行时间剩余不足5%,则在设备停止时清零累计运行时间,下次任务开始时,启动另一台设备以确保系统的稳定运行。

## 5 智能评价

在燃煤机组大范围变负荷运行背景下,脱硫负荷变化范围越来越大,建立一套全面的评价体系至关重要。它能实时衡量设备的运行状态和经济性,有助于深入了解和优化脱硫系统在变负荷运行条件下的性能表现,从而全面识别和分析影响因素。提升智能化改造的综合评价和系统评估的客观性,在一定程度上有助于推动设备改造和技术更新,成为脱硫系统智能安全运行的关键环节。在评价体系的设计过程中,除考虑脱硫效率和能耗等传统指标外,还应从设备健康状况和环保经济性能等多角度进行考虑,对脱硫系统的灵活性和智能程度进行量化分析。

基于各子系统的信息物理融合优化模型,通过多目标优化算法实时在线求解关键参数的最优值,作为参数的最优目标值,以实现多个子系统之间参

数的最优匹配。为了确保评价系统适应不同工况,根据专家经验和系统历史运行工况设定标准值,进一步设计标准值偏差裕量,以适应不同工况的需求,从而确定标准值的极大值和极小值。同时,依据现场工作人员的运行经验和运行规程,设定安全极大值和安全极小值,以确保系统在各种工况下的安全运行。综上所述,通过考虑模型优化、专家经验、系统历史运行工况和现场工作人员的运行经验,智能评价系统能够在各种工况下保证系统的稳定性和安全性,具体设计流程如图 8 所示。

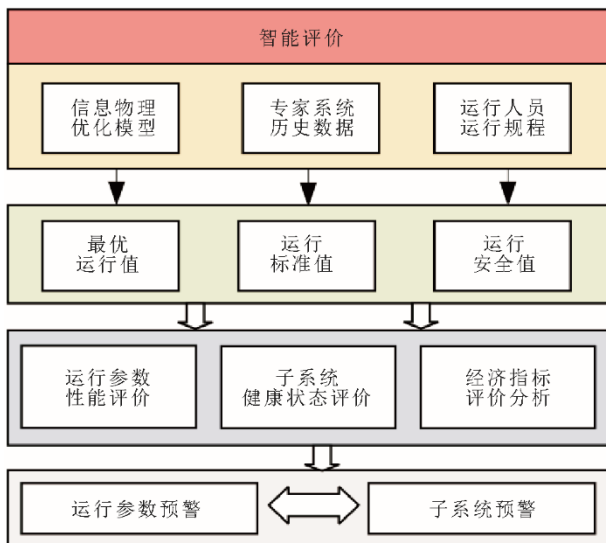


图 8 智能评价系统设计流程  
Fig.8 Design flow of intelligent evaluation system

### 5.1 运行参数性能评价

智能评分系统的评分规则应综合考虑 2 个方面: 1) 关注参数对脱硫系统或子系统安全运行的影响; 2) 关注参数对脱硫系统或子系统经济性的影响。根据安全优先、生产次要的管理理念, 将对系统安全影响较大的参数定义为一级参数, 其余参数定义为二级参数。

在参数评价指标计算过程中, 对于一级指标, 应着重考虑安全得分, 可以规定安全满分为 80 分, 经济运行优化满分为 20 分。而对于二级指标, 应在安全得分与经济运行优化得分之间平衡, 可规定安全满分为 60 分, 经济运行优化满分为 40 分。根据标准值和安全值区间、标准值和最优值区间, 分别划分安全运行区域和优化运行区域。以这 2 个区域的长度作为基准, 实时计算实际值与标准值以及实际值与最优值的差异。因此, 可以实时计算出在不同区域运行时的权重。规定实际值在安全运行区域

运行时, 优化得分为 0 分; 若实际值在优化运行区域时, 安全得分为满分。

按照设备的运行情况将设备划分为连续运行设备和间歇运行设备, 对于连续运行设备评分系统实时更新, 对于间歇运行设备, 选择 0~1 分段考虑。当系统运行时, 则系统参数实时参与子系统评分; 若设备处于停机状态, 则参与评分的系统退出, 以免影响后续系统评分。对于一些需要定期校正或者是定期清洗的测量设备, 如浆液 pH 计等设备, 在定期清洗过程中, 保持当前评分值, 开发趋势判断模块, 通过模块判断其参与实时评分的延时长。

### 5.2 子系统健康状态评价

为了降低运行人员在监盘过程中面临大量运行数据观测负担, 基于当前设备运行值对子系统健康状态进行综合评分, 旨在全面评估子系统的健康状况, 从而帮助运行人员快速了解系统运行状态并及时采取相应措施。子系统健康状态评价从 2 个方面出发: 1) 从子系统各参数运行状态进行评价; 2) 评估主要设备的控制回路品质以及执行机构的跟踪能力, 以反映子系统在实际运行中的性能表现。

依据子系统各参数运行状态的评价指标得分, 对每个指标进行加权, 以反映其在子系统整体健康状况中的相对重要性, 根据不同参数的重要性, 可以调整加权系数, 避免重要参数评分在最终系统评分中被淹没。将各指标的加权评分汇总后除以总权重, 得到子系统的综合健康评分。评分越高, 子系统的健康状况越好; 评分越低, 健康状况越差。

对控制回路的品质评价时, 从动态和稳态 2 个方面对控制回路性能指标进行评价。在动态过程中, 建立受控对象的动态模型, 并考虑现场实用性, 以适应不同的工况。在控制回路设定值发生变化时, 基于最小方差准则配置理想控制器, 以获得理论最优反馈值。动态控制回路性能指标可通过计算理论最优反馈值与实际反馈值之间的偏差来衡量。结合实际运行情况, 合理确定最大偏差值。动态过程的评分使用权值方法, 权值计算公式为  $1 - \text{实际偏差} / \text{最大偏差}$ , 设定满分为 100 分。如果实际偏差大于最大偏差, 则评分为 0, 设备停止状态下, 不计入总评分。在稳态过程中, 通过计算设定值和反馈值之间的 ITAE 或 IAS, 对稳态控制性能进行评价, 评分规则参照动态过程的评分规则。

执行器跟踪能力评估, 关键在于防止执行器长期卡滞, 影响系统的正常运行。以供浆母管阀门为

例，构建供浆母管阀门与供浆流量之间的动态模型。在被控量发生变化时，可得到阀门开度理论值。规定阀门理论开度与实际开度偏差的最大允许值，设定满分 100 分，权值计算公式为  $1 - \text{实际偏差} / \text{最大偏差}$ 。如果实际偏差大于最大偏差，则评分为 0，设备停止状态下，不计入总评分。

以上评价结果将与智能预警共同决定子系统的整体健康状况。实际监控过程中，可通过故障监测界面以及设备健康度评价界面，实现对重要设备多界面监视。为运行人员提供直观、有效的监测手段，实时了解子系统的健康状况，迅速判断控制回路品质和执行机构是否出现卡塞等故障，实现对潜在问题的预警并及时处理，有助于提高系统稳定性和安全性。

### 5.3 经济指标分析

工业过程的经济指标主要涉及技术经济性指标与效益经济性指标。因此，对脱硫系统的经济性指标分析应从运行收益、运行成本、达标补偿、环保达标率以及设备年利用小时数等多方面进行评估。通过对影响脱硫系统经济性的各项指标进行评估，可得到全负荷工况下的实时能耗与物耗数据。

运行收益的呈现主要面向管理层。通过实时累计日收益，以便在运行负荷变化下及时发现问题并调整运行策略，进一步以周、月、季度和年为周期分析，考虑时价因素，并从石膏产物收益、电厂补贴收益及环保达标补贴收益 3 方面进行计算。运行

成本的核心在于实时在线计算脱硫过程中能耗及物耗。能耗包括脱硫系统的厂用电率以及脱除单位 SO<sub>2</sub> 的电耗。物耗主要涉及脱硫剂的消耗以及脱除单位 SO<sub>2</sub> 的脱硫剂消耗量，脱硫剂消耗量以石灰石干粉为计算对象，考虑到石灰石浆液磨制是非连续动作，因此采用日、周、月、年等时间单位进行累计计算，并结合吸收塔入口 SO<sub>2</sub> 负荷进行分析。最后依据历史数据库，构建专家系统，确定不同工况下的标准能耗和物耗，实时监测并评价实际运行的厂用电率和标准脱除单位 SO<sub>2</sub> 电耗等指标。

技术经济指标主要包括 SO<sub>2</sub> 脱除可靠性指标和 SO<sub>2</sub> 平均小时脱除效率。污染物脱除可靠性指标通过统计周、月、季度和年度出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度超标总时长，以便发现潜在的控制策略问题并及时调整和优化。根据 2018 年实施的《中华人民共和国环境保护税法》规定，SO<sub>2</sub> 的环保税额受其排放质量浓度小时均值和排放污染物当量 2 个因素影响，提高脱硫效率将有助于降低 SO<sub>2</sub> 排污费。因此，综合考虑脱硫系统运行成本，关注脱硫效率与环保税额之间的平衡，有助于在保证环保指标的前提下，实现脱硫系统经济运行。通过对技术经济指标的分析，可以确保脱硫系统在满足环保要求的同时，实现经济性与技术性的平衡，为企业降低成本、提高经济效益提供有力支持。

## 6 智慧人机交互

图 9 为智能人机交互系统。

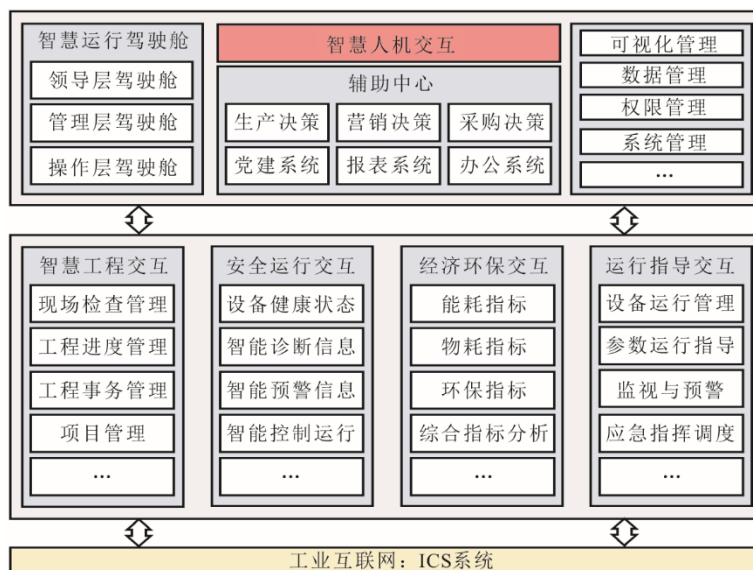


图 9 智能人机交互系统  
Fig.9 Intelligent human-machine interaction system

智慧人机交互系统具备诸多功能,如可视化管 理、数据管理、权限管理、系统管理和账号管理等, 具有领导层、管理层及操作员权限功能。同时,整 合智能控制、智能报警、数字孪生技术、智能评价 和运行指导等模块,智慧人机交互系统可实时交互 系统智能运行状态,完整展现智慧脱硫关键技术体 系和管理体系,全面颠覆传统管控模式,将电厂原 有以计划检修为主、状态检修为辅的管控模式变革 为以状态检修为主、计划检修为辅的先进理念。该 系统可实现更高效的设备管理,通过创造丰富视觉 效果,为“及时发现、快速处理”提供便利,提升 脱硫系统运行效率,推动火电厂采用更先进管理理 念和技术手段。

### 6.1 智慧工程交互

对于巡检、点检任务进行规范化策划管理,对 需完成任务、任务查询、任务预览、任务完成进度 等所有需在本轮运行计划周期中执行的任务制作 记录台账,根据任务计划自主推送并提醒相关运行 人员;对于设备健康状态以及巡检工作状态进行汇 总、统计,针对各专业岗位发现的异常项、未检项、 漏检项以及正常项等数据及时统一至系统平台,显 示当前已完成以及未完成项,列入工程事务管理或 者项目管理,实现人机协同管理体系。

### 6.2 安全运行交互

关联故障预警和智能控制模块,对智能控制最 优运行策略、智能预警、智能诊断的推送信息及关 联预警和报警功能,设置专工二次确定权限。紧密 结合人机优势,对当前工况的判断和关键设备状态 的评估、预警、设备异常做出准确的判断,提升系 统运行的稳定性。

### 6.3 经济环保交互

关联智能评价模块,实时计算能耗、物耗指标 及环保性指标,构建污染物性能指标。根据污染物 参数的波动幅度、运行人员容忍度以及短板原理, 设置报警阈值。当某个参数超过预设阈值时,自动 触发报警提醒运行人员关注。对  $\text{SO}_2$  的质量浓度、 平均小时脱除率、脱除  $\text{SO}_2$  的稳定度和经济性进行 综合分析,及时发现运行策略的不足。

### 6.4 运行指导交互

根据烟气流量、 $\text{SO}_2$  入口质量浓度、烟气温度 和石灰石浆液密度,将历史工况模糊化为多种工 况。然后,根据运行参数判断脱硫系统当前工况,

并分别计算该工况下的经济性、环保性和综合指 标。其中,经济性指标采用能耗、物耗指标,环保 性指标采用  $\text{SO}_2$  脱除率,综合性指标则是对经济 性和环保性指标的加权考虑。最后,根据当前工况 和历史最优工况以及信息物理优化模型实时求解得 到的综合性指标进行比较。基于安全优先的原则, 综合分析历史工况寻优和模型寻优所得到的优化 参数,对当前所处的工况及其重要参数进行指导, 提供更为科学合理的运行建议,实现系统的安全经 济运行。同时,内置设备运行状况、应急指挥调度、 监视与预警等功能,防止现场出现事故并且出现事 故后对现场进行第一时间指导意见,避免事态进一 步扩张。

## 7 经济效益

对脱硫系统智能化改造后,可从用电成本、物 料成本、设备维修和人工成本方面提升系统的经济 效益。基于脱硫系统所建立的优化模型,利用智能 优化算法进行实时优化运行参数,指导浆液 pH 值、 浆液循环泵和氧化风机等参数处于最优运行状态, 某机组运行工况处于 230~250 MW 时,运行 24 h 可 节省电耗成本 1 412.33 元,1 年的运行成本可节省 51 万元之余<sup>[28]</sup>。智能化改造后,对于设备故障可实 现及时发现、及时处理,避免造成设备的故障扩大损 坏,可降低设备的年维修费用。改造后的脱硫系统实 现了智慧人机交互系统,运行人员可以集中监视运 行参数和设备运行状态,可减少运行人员数量和适 当的检修人员。以福建某电厂为例,脱硫系统每班 运行监盘人员 4 名,检修人员共 21 人,五班三倒,则 可减少 1 名运行监盘人员和 1 名检修人员,按每月工 酬 5 000 元计算,每月可节省人员成本 1 万元,1 年 共节省费用 36 万元。因此,智能化改造后的年综合 节省成本超过 87 万元。

## 8 结 论

本文针对《电力发展“十四五”规划》提出电 力生产信息化、数字化、智能化水平的明确目标, 考虑燃煤发电机组是我国新型电力系统建设中的 主要支撑能源,并基于脱硫系统自动化程度低且是 实现燃煤电厂环保节能关键辅助系统,提出湿式脱 硫系统智能化改造架构及关键技术。

1) 基于系统目前脱硫系统 DCS 网络框架,进 行拓展 ICS 网络进行智能化改造网络结构,根据智

能化应用功能对算力、算法的要求,增设智能传感器、大数据分析引擎、智能计算引擎、高强度数据交互网络、智慧人机接口等高性能设备,以满足关键参数精确测量、深度学习算法、智能控制算法、数据挖掘和分析、海量数据的高速交互需求。

2) 基于 ICS 网络框架,根据智能化改造目标需求,以智能控制、智能报警、智能决策、智能评价和智慧交互模块构建智慧脱硫系统基本框架。针对不同模块具体功能,利用先进控制策略、信息物理融合、数字孪生技术、深度学习算法、可视化技术等先进技术,构建了 ICS+机器学习+数字孪生+可视化为一体的智慧脱硫系统。

3) 对智慧脱硫系统功能模块结合实际系统进行梳理,具体介绍功能模块的使用以及关键技术的实现方法,对指导燃煤电厂脱硫系统智能化改造建设具有较大的参考意义。

#### [参考文献]

- [1] 樊鹏. 第四次工业革命带给世界的深刻变革[J]. 人民论坛, 2021(增刊 1): 41-45.  
FAN Peng. The profound transformation brought to the world by the Fourth Industrial Revolution[J]. People's Tribune, 2021(Suppl.1): 41-45.
- [2] 逮东, 池毅. 《中国制造 2025》与企业转型升级研究[J]. 产业经济研究, 2019(5): 77-88.  
LU Dong, CHI Yi. Research on "China manufacturing 2025" and enterprise transformation and upgrading[J]. Industrial Economics Research, 2019(5): 77-88.
- [3] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.  
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [4] 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-24) [2023-01-02]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content\\_5649731.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm).  
Circular of the state council on printing and issuing the action plan for carbon dioxide peaking before 2030[EB/OL]. (2021-10-24) [2023-01-02]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content\\_5649731.htm](https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm).
- [5] 阮前途, 陈赞, 潘智俊. 新型电力系统对实现沿海城市双碳目标贡献的探讨[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 11-18.  
RUAN Qiantu, CHEN Yun, PAN Zhijun. Discussion on contributions of novel power system to achieving carbon emission peak and carbon neutrality of coastal city[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 11-18.
- [6] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 28-51.  
HUANG Yuhuan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development

- of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(Suppl.1): 28-51.
- [7] 张光明. 热电联产机组灵活运行特性分析与控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022: 1.  
ZHANG Guangming. Research on flexible operation characteristics and control of combined heat and power units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022: 1.
- [8] 闫浩思, 赵文杰. 基于改进核极限学习机和集成算法的脱硫出口 SO<sub>2</sub> 浓度预测[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-9. (2023-01-03) [2023-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220922.1342.002.html>.  
YAN Haosi, ZHAO Wenjie. Prediction of SO<sub>2</sub> concentration at desulfurization outlet based on improved kernel extreme learning machine and integrated algorithm[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition): 1-9. (2023-01-03) [2023-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220922.1342.002.html>.
- [9] 刘一诺. 工业燃煤锅炉 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 超低排放系统建模与经济优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 1.  
LIU Yinu. System modeling and economic optimization of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> ultra-low emission system for industrial coal-fired boilers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 1.
- [10] 金秀章, 刘岳, 赵文杰, 等. 基于 mRMR 和 MA-RELM 的火电厂出口 SO<sub>2</sub> 质量浓度预测[J]. 动力工程学报, 2022, 42(7): 664-670.  
JIN Xiuzhang, LIU Yue, ZHAO Wenjie, et al. Prediction of SO<sub>2</sub> mass concentration at outlet of the thermal power plant based on mRMR and MA-RELM[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(7): 664-670.
- [11] ZHANG H F, GAO M M, LIU C, et al. Dynamic prediction of in-situ SO<sub>2</sub> emission and operation optimization of combined desulfurization system of 300 MW CFB boiler[J]. Fuel, 2022, 324: 124421.
- [12] LI R L, ZENG D L, LI T T, et al. Real-time prediction of SO<sub>2</sub> emission concentration under wide range of variable loads by convolution-LSTMVE-transformer[J]. Energy, 2023, 269: 126781.
- [13] 刘吉臻, 胡勇, 曾德良, 等. 智能发电厂的架构及特征[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6463-6470.  
LIU Jizhen, HU Yong, ZENG Deliang, et al. Architecture and feature of smart power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6463-6470.
- [14] 高耀岩, 王林, 高海东, 等. 火电厂智能控制系统体系架构及关键技术[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 166-174.  
GAO Yaokui, WANG Lin, GAO Haidong, et al. Architecture and key technology of intelligent control system in thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 166-174.
- [15] 郭亦文, 耿林霄, 胡勇, 等. 大数据智能控制一体化平台及其体系架构[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 22-27.  
GUO Yiwen, GENG Linxiao, HU Yong, et al. Big data intelligent control integration platform and its architecture[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 22-27.
- [16] 刘吉臻, 李云鹭, 宋子秋, 等. 灵活智能燃煤发电技术及评价体系[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 993-1004.  
LIU Jizhen, LI Yunzhi, SONG Ziqiu. Flexible and

- intelligent coal-fired power generation technology and its evaluation system[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(11): 993-1004.
- [17] 杨宏强, 孙瑜, 杜伟. 燃煤火电厂智能 DCS 的功能设计与应用[J]. *热力发电*, 2020, 49(3): 100-106.  
YANG Hongqiang, SUN Yu, DU Wei. Function design and application exploration of intelligent DCS for coal-fired power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(3): 100-106.
- [18] 刘吉臻, 王庆华, 房方, 等. 数据驱动下的智能发电系统应用架构及关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12): 3578-3587.  
LIU Jizhen, WANG Qinghua, FANG Fang, et al. Data-driven-based application and technologies of smart power generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(12): 3578-3587.
- [19] 崔青汝, 朱子凡. 智能发电运行控制技术[J]. *热力发电*, 2019, 48(9): 28-33.  
CUI Qingru, ZHU Zifan. Operation control technology for intelligent power generation[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(9): 28-33.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 智能传感器 第 1 部分: 总则: GB/T 33905.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 18.  
The State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Intelligent sensor—part 1: general rules: GB/T 33905.1—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 18.
- [21] 杨义, 杨苹, 李壮壮, 等. 基于信息物理融合的微能源网统一调控架构及优化运行[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 34-41.  
YANG Yi, YANG Ping, LI Zhuangzhuang, et al. Architecture and optimal operation of unified dispatch and control of micro-energy grid based on cyber-physical fusion[J]. *Automation of Electric Systems*, 2023, 47(4): 34-41.
- [22] 李承周, 王宁玲, 高舒潭, 等. 基于信息物理融合的间接空冷机组冷端系统运行优化[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(5): 1771-1783.  
LI Chengzhou, WANG Ningling, GAO Shutan, et al. CPS-based operation optimization study of indirect air-cooling unit cold end system under summer conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(5): 1771-1783.
- [23] 曾德良, 高耀岩, 胡勇, 等. 基于阶梯式广义预测控制的汽包炉机组协调系统优化控制[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(16): 4819-4826.  
ZENG Deliang, GAO Yaokui, HU Yong, et al. Optimized control of the drum boiler power plant's coordination system based on stair-like generalized predictive control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(16): 4819-4826.
- [24] 朱观宏. 基于孪生模型和数据驱动的柴油机冷却系统故障诊断算法[D]. 天津: 天津大学, 2020: 1.  
ZHU Guan hong. Fault diagnosis algorithm of diesel engine cooling system based on digital twin model and data driven[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020: 1.
- [25] 胡阳, 王蔚然, 房方, 等. 风电机组运行动态数字孪生建模及半物理仿真[J/OL]. *系统仿真学报*: 1-12. (2023-01-03) [2023-07-11]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1307>.  
HU Yang, WANG Weiran, FANG Fang, et al. Dynamic digital twin modelling and semi-physical simulation of wind turbine operation[J/OL]. *Journal of System Simulation*, 1-12. (2023-01-03) [2023-07-11]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1307>.
- [26] 彭超龙, 巩忠领, 邹牛羊. 燃气 SCADA 系统报警泛滥抑制措施应用研究[J]. *石油化工自动化*, 2021, 57(6): 84-87.  
PENG Chaolong, GONG Zhongling, ZOU Niuyang. Research on the application of measures to suppress the proliferation of alarms in gas SCADA systems[J]. *Automation in Petro-Chemical Industry*, 2021, 57(6): 84-87.
- [27] 王佳, 李宏光. 过程参数干扰报警的一类自适应管理策略[J]. *化工学报*, 2015, 66(10): 4085-4091.  
WANG Jia, LI Hongguang. A class of adaptive management strategies of nuisance alarms associated with industrial process parameters[J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(10): 4085-4091.
- [28] 肖祥武, 李志金, 舒畅, 等. 基于信息物理融合和 XGBoost-MPGA 算法的燃煤电厂脱硫系统运行优化[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5202-5212.  
XIAO Xiangwu, LI Zhijin, SHU Chang, et al. Operation optimization of flue gas desulfurization system in coal-fired power plant based on cyber-physical fusion and XGBoost-MPGA algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5202-5212.

(责任编辑 杜亚勤)