[智慧电厂]

火电厂现有控制系统发展智慧电厂的可行性分析

文/王怀远
江苏国信股份有限公司

随着全球能源结构的变革和技术的进步，火电厂的运营和管理面临着前所未有的挑战与机遇。现有的火电厂控制系统，通常包括监控、调度和自动化等关键组成部分，起着确保电厂安全、高效运行的作用。智慧电厂概念的提出，旨在通过引入先进的信息技术和人工智能，将传统火电厂转型为更加智能、高效和环境友好的未来电厂。对火电厂现有控制系统的组成与功能进行了概述，明确其在现代电力系统中的作用及存在的局限性；随后探讨火电厂在当前阶段对智慧化改造的具体需求，并详细分析从现有控制系统向智慧电厂转型的技术可行性，包括能力升级和智慧化升级的策略及方法。

在当代火电厂运营管理中，控制系统的功能不断扩展和深化，涉及实时监控和故障诊断，也涉及能效优化与环境排放控制。火电厂的控制系统，作为确保电站安全稳定运行的神经中枢，其技术的先进性和可靠性直接关系到火电厂的经济效益和环境影响。随着全球对能源消耗和环境保护要求的提高，传统火电厂面临着越来越严峻的技术和环境挑战，促使火电厂控制系统必须进行技术革新适应智慧电厂的发展需求。智慧电厂概念的提出是为了通过集成创新的信息技术和控制技术，实现电厂运营的最大化效率和最小化环境影响。

火电厂现有控制系统概述

1. 控制系统组成

火电厂的控制系统是确保发电安全、高效和经济运行的关键技术设施，组成复杂且功能多样。系统通常由监控与数据采集系统（SCADA）、分布式控制系统（DCS）和可编程逻辑控制器（PLC）构成，满足不同的自动化和控制需求。SCADA系统负责实时数据采集和设备监控，通过图形界面向操作员展示关键运行数据，从而实现对电厂核心参数的全局监视和操作介入。DCS在此基础上提供更高级的过程控制，通过高度集成的网络架构，使操作员能够精确调控火电厂中的关键变量，如燃料供给量、蒸汽温度和压力等。DCS的控制逻辑通常嵌入其强大的软件平台中，支持复杂的控制策略和算法，优化火力发电过程的稳定性和效率。与此同时，PLC则在自动化控制方面发挥重要作用，处理来自现场的信号，并执行快速逻辑决策，管理电厂中的机械操作如阀门开闭和断路器切换，如图1所示。

2. 功能与限制

现有火电厂控制系统的功能主要体现在对发电过程的稳定控制和运行效率的优化。DCS确保了蒸汽温度和压力的稳定性，控制准确度可达±0.5%的标准偏差，有效提高发电效率。如通过实时调节燃烧器的空燃比，DCS能够优化燃烧效率，降低NOx排放至不超过200 mg/m^{3}的环保标准。此外，SCADA系统通过高度可配置的用户界面，提供对电厂关键运行参数的实时监控，数据采集周期短至

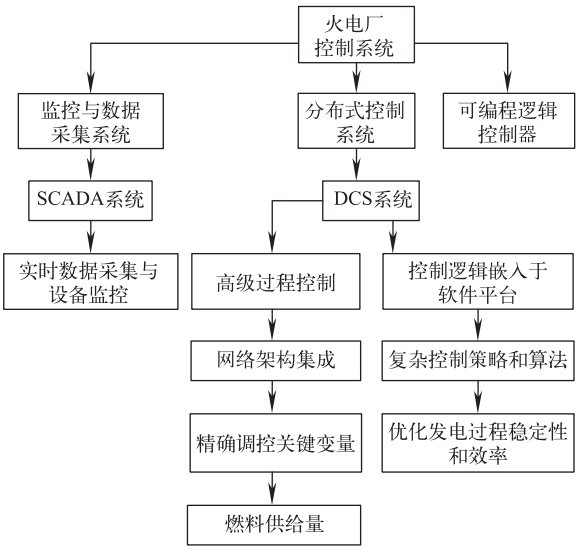

图1　控制系统组成

1 s，使得操作员能够及时响应各种操作场景。PLC则处理机械控制任务，如阀门操作和电气隔离，响应时间通常在毫秒级别，保证了系统的即时反应和机械安全。

现阶段火电厂现有控制系统的需求

在现阶段火电厂控制系统面临多方面的更新和改进需求，主要集中在提高系统的数据处理能力、增强网络安全、提升自动化水平及实现环境监测和控制优化。数据处理能力是当前火电厂控制系统急需强化的领域。随着传感器技术的发展，现场数据采集量显著增加，现代火电厂每天可以生成超过1 TB的运行数据，这些数据需要实时处理和分析，优化运行参数和预防系统故障。然而，传统的分布式控制系统的数据处理架构无法有效支持如此高频率的数据更新，数据更新周期通常为2～5 s，对于实现毫秒级的实时控制是不够的。控制系统的网络通信需要保障数据的完整性和机密性，面对越来越复杂的网络安全威胁，传统控制系统通常只有基础的物理隔离和简单的密码保护，满足不了现代网络安全要求。控制系统的数据传输未广泛实行加密措施，使得关键运营数据容易受到拦截和篡改的风险。

现有控制系统向智慧电厂转型的可行性分析

1. 分析能力的改进

在火电厂现有控制系统向智慧电厂的转型中，分析能力的改进是关键一环。特别是在数据处理与决策制定的实时性与准确性方面，可以通过引入高级的数据分析算法——如卡尔曼滤波（Kalman Filter）——显著提升系统性能。卡尔曼滤波是一种高效的递归滤波器，专门用于含有随机噪声的动态系统中，估算过程中的变量状态。基本形式可以表示为两个主要步骤：预测和更新。

定义状态估计方程为

$$\hat{x}_{k|k-1} = A_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \tag{1}$$

式中，$\hat{x}_{k|k-1}$是在时间k的状态预测，依赖于前一时间$k-1$的估计$\hat{x}_{k-1|k-1}$；A_k是状态转移矩阵，表明系统状态如何从前一状态转移到当前状态；B_k是控制输入矩阵；u_k是控制输入。

此预测阶段是系统如何从已知的上一状态推导出下一状态的关键，对于火电厂来说，能够用于预测设备性能及可能出现的故障，提前做好调整措施。

更新方程为

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(y_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}) \tag{2}$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \tag{3}$$

式中，$\hat{x}_{k|k}$是考虑了测量y_k后的状态估计；K_k是卡尔曼增益，决定了测量误差与预测误差的权重；H_k是观测矩阵，将预测状态映射到测量空间；$P_{k|k-1}$是预测状态的协方差，R_k是测量噪声协方差。

更新过程是对初始预测的修正，增加了系统对实际观测的适应性，对于火电厂控制系统来说，可以利用这一过程实时调整控制策略，优化运行效率，减少能耗及排放。

卡尔曼滤波器的运用可以大幅提升火电厂控制系统在处理噪声数据时的鲁棒性，系统能够更加精确地跟踪设备状态和性能变化。通过实时地处理和反馈数据，卡尔曼滤波器有助于实现更加精细的控制和预测，实现智慧电厂的目标。因此，在现有的火电厂控制系统中引入此类先进的算法，可以显著提升系统的整体性能和智能化水平。

2. 智慧化的融入

在分析火电厂现有控制系统向智慧电厂转型的可行性中，特别是智慧化的融入部分，本文提出利用卡尔曼滤波器进行实时监测和优化调整。卡尔曼滤波是一种有效的预测-校正方法，适用于含有随机噪声的动态系统，优化系统性能和准确度。

定义火电厂的系统状态为x_k，其中k表示第k个

采样时间点。系统状态的预测模型表示为

$$x_{k|k-1}=F_{k-1}x_{k-1|k-1}+B_{k-1}u_{k-1} \tag{4}$$

式中，F_{k-1}是状态转移矩阵，描述了由前一状态到当前状态的理论演变；B_{k-1}是控制输入矩阵，u_{k-1}是外部控制输入。

式（4）描述了在没有考虑系统误差和外部扰动的理想情况下，系统状态的预测值。

系统的实际测量值z_k与理论预测值之间存在误差，可以用观测模型来描述

$$z_k=H_kx_{k|k-1}+v_k \tag{5}$$

式中，H_k是观测矩阵，v_k表示测量噪声。

式（5）用于校正预测模型，提高预测的准确性。

为了整合预测和测量结果，使用卡尔曼增益K_k进行权衡，计算出最优的状态估计

$$K_k=P_{k|k-1}H_k^T(H_kP_{k|k-1}H_k^T+R_k)^{-1} \tag{6}$$

$$x_{k|k}=x_{k|k-1}+K_k(z_k-H_kx_{k|k-1}) \tag{7}$$

式中，$P_{k|k-1}$是预测状态协方差，R_k是测量噪声协方差，$x_{k|k}$是更新后的状态估计。

通过这种方式，卡尔曼滤波器不断更新系统状态的估计，适应实际观测值。

卡尔曼滤波器的核心在于能够有效融合过去的信息和当前的测量结果，以最小化估计误差。通过实时监测关键参数并快速调整控制策略，可以显著提高火电厂的运行效率和安全性。智慧电厂的控制系统可以通过此算法实现对系统动态的实时反馈和调整，优化发电过程，减少能源浪费，增强系统的适应能力和故障预防机制。

卡尔曼滤波器的引入为火电厂控制系统的智慧化融入提供一种数学上严谨和技术上可行的解决方案。优化数据处理流程，增强系统对复杂环境变化的响应能力，是向智慧电厂转型的关键技术之一。

技术测试

设计实验测试支持向量机（SVM）算法在火电厂控制系统优化中的功能，本研究采用实测数据集，数据直接来源于合作的火电厂。通过与该电厂的合作关系，获得了一批详细的运行数据，包括温度、压力、流量和效率参数，确保数据的实时性和实际应用相关性。此数据集的选取确保实验结果的实用性和针对性，有助于评估SVM算法在真实工业环境中的表现。每条数据在结构上包括多个关键的运行参数，每条数据包含设备的运行温度、压力、流量和效率指标。这些参数反映设备的即时运行状态，涉及整个发电过程的效率和安全性。通过综合数据的实时监控和分析，支持向量机模型预测并调整运行参数，优化火电厂的整体性能，降低能耗，减少环境影响。测试数据见表1。

表1　测试数据

序号	准确率（%）	精确度（%）	召回率（%）	F1得分（%）	响应时间/ms
1	95.23	94.57	93.65	94.11	200.32
2	96.14	95.68	94.56	95.12	195.24
3	97.05	96.79	95.47	96.13	190.45
4	95.96	94.84	93.73	94.28	198.55
5	96.87	95.99	94.88	95.43	193.67

从表1看出，支持向量机模型在各个指标上表现出较高的一致性和稳定性。特别是准确率和F1得分均维持在95%以上，显示了模型对火电厂运行数据的高效处理能力。响应时间在所有测试中保持在200 ms以下，证明了模型的实时处理能力。此外，高水平的精确度和召回率显示了模型对正类样本的识别准确全面，使其在预测和调节火电厂运行状态中非常有效。结果表明，支持向量机模型适合用于优化火电厂控制系统，为火电厂向智慧电厂的转型提供了可靠的技术支持。

结束语

综上所述，现有火电厂控制系统向智慧电厂转型，是技术创新的需求，更是应对环境和市场挑战的必然选择。通过分析现有控制系统的功能与限制，结合智慧电厂的技术要求和实际案例，为转型过程中的技术选择和策略制定提供理论依据和实践指导，有助于推动火电厂在安全、环保、经济和技术等多方面的持续改进和创新，最终实现传统能源产业的转型升级。EA

（收稿日期：2024-04-30）