

智能发电厂的架构及特征

刘吉臻¹, 胡勇¹, 曾德良¹, 夏明², 崔青汝²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 中国国电集团公司, 北京市 西城区 100034)

Architecture and Feature of Smart Power Generation

LIU Jizhen¹, HU Yong¹, ZENG Deliang¹, XIA Ming², CUI Qingru²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. China Guodian Corporation, Xicheng District, Beijing 100034, China)

ABSTRACT: With the large-scale development of energy and the transformation of energy structure in China, in order to quickly construct an efficient, clean, low-carbon and recycling green energy production system, realizing smart energy development strategy with deep integration of energy and information. In this paper, based on the analysis of the present situation of power generation enterprises and the exploration of smart power generation in China, the concept of smart power generation was described, and the system structure of smart power generation was proposed. Through the smart management and control platform, smart power generation unified the smart production center and smart management center, and realized the integration of smart device layer, smart control layer, smart production supervision layer and smart management layer. Smart power generation had the functions of smart control, smart safety and smart management, and a production control and management pattern with self-drive, self-learning, self-recovery, self-adaptive and self-organizing characteristics was formed.

KEY WORDS: smart power generation; smart control; smart safety; smart organization

摘要:在我国能源大规模发展和能源结构转型的背景下,为了加快构建高效、清洁、低碳、循环的绿色能源生产体系,实现能源与信息深度融合的智慧能源发展策略,该文在分析我国发电企业现状和智能发电探索道路的基础上,对智能发电概念进行了阐述,并提出智能发电厂的体系结构,通过智能管控一体化平台统一智能生产和智能管理两个中心,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的融合,使发电过程具备智能控制、智能安全、智能

管理等功能,并形成一种具备自趋优、自学习、自恢复、自适应、自组织等特征的智能发电运行控制与管理模式。

关键词: 智能发电; 智能控制; 智能安全; 智能管理

0 引言

作为世界上最大的能源消费国,中国 2016 年的能源消费总量占全球的 23%,净增量占全球的 27%。2014 年,国务院在《能源发展战略行动计划 2014-2020 年》中提出“绿色低碳”的发展战略^[1],到 2020 年和 2030 年非化石能源占一次能源消费比重分别达到 15%和 20%左右。针对我国能源大规模发展和能源结构转型的需求,为了更好地提升能源转换效率,减轻对环境的污染,推进能源供给侧的改革,2016 年 2 月国家发改委发布了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》^[2],明确指出促进能源和信息深度融合,“智能发电”的概念正是在国家能源转型的背景下应运而生。

“智能发电”与“智能电网”、德国“工业 4.0”以及“中国制造 2025”的理念相似,其核心是第四次工业革命大背景下发电技术的转型革命。早在 2001 年美国电力研究协会(electric power research institute, EPRI)率先开展了智能电网研究,其以电网数字化、信息化、自动化和智能化作为典型特征,2003 年美国能源部启动“智能电网”建设项目,并在 2009 年将“智能电网”提升为美国国家战略。此后,欧盟和中国相继开展“智能电网”的研发和推广,促进了电网技术的快速进步和相关产业的快速发展^[3]。2013 年德国联邦政府提出了“工业 4.0”的概念,倡导以高度数字化、网络化、机器自组织为标志的第四次工业革命,旨在提升工业生产的智

基金项目:国家自然科学基金项目(51776065);国家重点研发计划(2017YFB0602105)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51776065); National Key R&D Program of China (2017YFB0602105).

能化水平。2014年,我国相继提出了“中国制造2025”^[4],其内涵指在信息化与工业化深度融合的背景下,应对互联网、大数据、云计算等领域新技术发展,推进重点行业智能转型升级,提高资源利用效率,加快构建高效、清洁、低碳、循环的绿色工业体系,行动纲领明确了10大重点领域,其中新一代信息技术产业、电力装备、节能与新能源汽车等领域与能源行业密切相关^[5]。

现阶段我国在“智能发电”的发展道路上已具备一定的基础。第一,现有电厂在数字化、信息化、自动化等方面达到了较高的水平。第二,网络技术和计算机处理能力得到了极大的提升。第三,我国的发电装备制造水平得到快速发展^[5]。目前,国内各类发电企业均配备了自动控制系统、监控信息系统以及管理信息系统等,但其与智能化生产仍存在较大距离^[5]。“智能发电”是一种多学科交叉的高新技术领域,其并非简单的数字化和信息化,而是在此基础上实现更高级别的应用及人工智能化。

我国在“智能发电”领域中已经开展了相关探索,目前许多专家学者对智能发电提出了不同的见解。科远集团刘国耀认为智慧电厂是数字化电厂结合智能系统后的进一步发展,将以新型传感、物联网、人工智能、虚拟现实为技术支撑,以创新的管理理念、专业化的管控体系、一体化的管理平台为重点,具有数字化、信息化、可视化、智能化等特征,最大限度地实现电厂安全、经济、高效、环保运行;东南大学王培红先生认为智慧电厂由信息化、数字化、智能化等技术支撑,具有感知能力(获取外部信息的能力)、记忆和思维能力(存储信息并有思维产生知识)、学习和自适应能力(学习并运用知识)三类特点;《智能电厂技术发展纲要》指出智能电厂是在广泛采用现代数字信息处理和通信技术的基础上,集成智能传感与执行、智能控制和管理决策等技术,达到安全、高效、环保运行,并与智能电网相互协调。

目前,国内各发电集团均在积极建设智慧电厂,树立样板工程。其中大唐姜堰智慧电厂是全国首家智慧电厂,其智慧电厂模式共包含五大功能:基于“互联网+”的安全生产管理系统、基于大数据分析的运行优化系统、基于专家系统的三维可视化故障诊断系统、三维数字化档案系统和三维可视化智能培训系统。大唐南电电厂其智慧电厂规划了八大功能模块:三维数字档案和可视化立体设备模型、锅炉CT、智能燃烧及智能掺配、智能排放、

汽轮机冷端优化、故障诊断和事故预报、基于“互联网+”的安全生产管理系统、智慧管控中心。国电大渡河公司从水电站建设、生产及运行三个层面分别提出了智慧工程、智能电厂和智能调度,实现设备控制更加自主、生产管理更加智能、风险决策更加智慧。京能集团的高安屯热电首先将互联网技术运用到传统的电力行业,建立了全国第一个数字化热电厂。此外,京能集团旗下的十堰热电厂也正在按智慧电厂标准建设。江苏国信集团正在建设的高邮、仪征燃机智慧电厂以现有的数字化电厂为基础,从智能设备管理、智能运行管理、智能感知安全管理、可视化仿真培训系统四方面展开,以三维可视化、大数据分析、工业机器人等技术为突破口,实现智慧电厂的“电力流、信息流、业务流”一体化融合。神华国华电力公司通过将所属电厂中75类重要设备的全部相关信息集中采集和处理,以实现电厂大数据管理,并将在此基础上构建智慧电厂。

从目前国内智慧电厂的建设和应用情况来看,我国企业在“智能发电”领域中进行了相关探索和尝试,但其应用更多的侧重于智能信息集成展示以及智能管理等层面,而在生产过程中智能化的应用很少,无论是智能信息集成展示还是智能化管理,其最终目标应服务于发电生产过程,提高我国电厂的智能化生产水平,而国内在智慧电厂建设中智能化管理与实时生产之间存在一定的脱节,偏离了智能生产的初衷;其次,我国在“智能发电”领域探索中,缺乏从整体上对“智能发电”进行设计和规划,往往从局部系统进行智能化升级,各系统之间缺乏紧密联系,没有从整体上去解决发电过程智能化的问题,智能发电厂的建设规划仍有待于进一步深入和提升。因此,本文将从智能发电概念阐述开始,提出智能发电厂的整体设计框架,着重阐述智能发电厂需解决的关键科学问题以及智能发电厂所应具备的关键技术和特征。

1 智能发电概念

传统化石能源发电和新能源发电,其仅是能源转换形式不同,在发电过程中首先需要实现能源的高效、清洁、便捷的转换;其次,为了适应我国新能源电力系统面临的能源转型与能源革命,传统化石能源除提升能源转换效率外,仍面临外界环境和工况变化进行灵活生产调度、高比例消纳新能源电力等问题。因此,在“智能发电”过程中,其以发

电生产为核心，协调智能设备层、智能控制层、智能生产监管层以及智能管理层，服务于生产，实现发电过程智能化。

因此，“智能发电”是以自动化、数字化、信息化为基础，综合应用互联网、大数据等资源，充分发挥计算机超强的信息处理能力^[5]，集成统一的一体化数据平台、一体化管控系统、智能传感与执行、智能控制和优化算法、数据挖掘以及精细化管理决策等技术，形成一种具备自趋优、自学习、自恢复、自适应、自组织等特征的智能发电运行控制与管理模式^[5]，以实现安全、高效、环保的运行目标，并具有优秀的外界环境适应能力。

2 智能发电厂架构

2.1 智能发电厂体系结构

智能发电厂是基于“智能发电”概念的一种实现形式。以新一代智能管控一体化系统为核心，全面开拓和整合电厂的实时数据处理及管理决策等业务，覆盖火力发电厂全寿命周期的智能发电厂技术方案，其体系结构如图 1 所示。智能发电厂以统一的管控一体化平台作为支撑，围绕智能生产控制和智能管理两个中心，通过智能控制、智能安全、智能管理三个功能，融合智能设备层、智能控制层、智能生产监管层以及智能管理层，形成一种具备自趋优全程控制、自学习分析诊断、自恢复故障(事故)处理、自适应多目标优化、自组织精细管理等特征的智能发电运行控制与管理模式，最终借助可视化、云计算与服务、移动应用等技术，为发电企业带来更高设备可靠度、更优出力与运行、更低能耗排放、更强外部条件适应性、更少人力需求和更好企业效益。

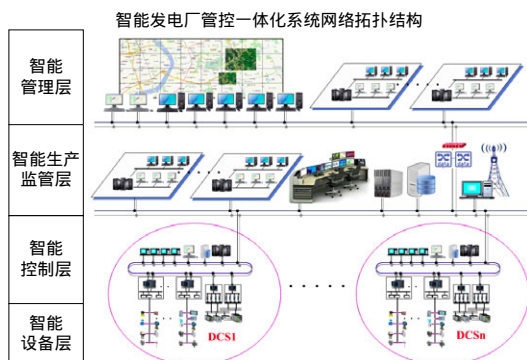


图 1 智能发电厂体系结构

Fig. 1 System structure of smart generation

1) 智能设备层。

智能设备层在电厂传统运行设备层的基础上，采用先进的测量传感技术，对电厂生产过程进行全

方位检测和感知，并将关键状态参数、设备状态信息及环境因素转换为数字信息，对其进行相应的处理和高效传输，为智能控制层及智能管理层提供基础数据支持。

智能设备层中嵌入高精度的机组重要参数软测量信号，包括：锅炉热量^[5]、入炉煤质^[6]、锅炉入炉煤粉流量、烟气含氧量^[7]、汽轮机排汽焓、锅炉蓄能、蒸汽流量等，为智能控制层中的优化控制、在线经济性分析及诊断系统提供重要数据保证。

智能设备层中嵌入现场总线设备和无线通信技术，其不仅可以有效减少现场电缆数量，提高系统信号传输的抗干扰能力和可靠性，而且可以为智能控制层与智能管理层提供海量数据，通过对数据处理实现设备可靠性分析及故障预警，并以智能管理层为基础构建现场总线和智能设备的在线智能管理系统，将被动的管理模型改变为可预测性的管理维护模式。

智能设备层中嵌入先进的测量设备，如采用红外检测设备以热图像形式反映设备的三维温度场信息，可有效的对设备故障进行实时预警及诊断；利用火焰图像频谱分析法，对电厂锅炉煤质进行有效的计算和分析；使用智能机器人，完成一些工作人员无法实现的操作，如对高危区域进行巡检、探伤等。通过先进的检测设备对生产现场进行全方位检测和感知，提高设备运行可靠性，有效提升风险防控水平。

2) 智能控制层。

由于燃煤电厂机组对象特性复杂且需不断适应外界工况的变化，传统 DCS 控制功能已不能满足多样化生产需求，因此在智能控制层中需结合先进控制算法及智能控制策略、多目标优化、数据分析等技术手段，来满足对象多样化的需求。

智能控制层中嵌入更丰富、更先进的实时控制与优化算法模块，包括预测控制、自抗扰控制、内模控制、鲁棒控制、PID 自整定等先进控制算法模块，同时包含多目标寻优算法以及机器深度学习等实时优化算法模块功能。

智能控制层中嵌入更具针对性、实用性的节能优化控制系统解决方案，包括基于精准能量平衡的智能机炉协调控制系统、燃烧优化控制系统、脱硫/脱硝优化控制系统以及适应机组快速变负荷和深度变负荷控制的弹性运行优化控制系统^[8]，同时包含主蒸汽压力定值优化、汽轮机冷端优化、锅炉吹灰优化、制粉系统优化^[9]等节能优化控制算法，

以满足机组快速、经济、环保等多目标柔性优化控制需求。

智能控制层中嵌入机组实时经济性分析与诊断系统,结合智能设备层提供的高可靠、高精度的测量信息,应用锅炉核心计算方程、汽轮机热经济性状态方程、机组性能耗差分析等工程分析方法,实现对电厂设备及系统性能的实时计算,全面、精确、直观的反应当前机组性能指标和能损分布情况,指导机组运行人员进行合理性的调整,达到提高机组运行效率、降低煤耗的目的。

智能控制层中嵌入设备状态监测与智能预警诊断系统,通过对机组设备重要状态参数的劣化分析、基于深度学习的设备状态预警及诊断,实现对机组运行状态及故障的超前预警与故障诊断,为智能管理提供决策支持。

智能控制层中嵌入自启停控制系统,将全程自动控制与顺序控制有机结合,融合设备运行状态监督技术,具备自学习、自校正等能力,可显著增加机组控制系统的自动化水平,最大限度的减少运行人员的操作强度和人员数量,实现减员增效。

3) 智能生产监管层。

智能生产监管层是一个厂级综合生产监管平台,其根据智能控制层提供的节能优化控制系统解决方案、机组经济性分析及诊断结果、设备状态监测与智能预警、自启停控制系统提供用户界面、柔性多目标决策、模型的更新与深度学习、故障自切换与恢复等监督功能;同时向智能管理层提供机组的全面分析诊断报告,为智能管理的决策提供依据。此外,在智能生产监管层中配备厂级负荷优化系统及高级值班员决策支持系统,为机组的高效运行及安全管理维护提供支持。

4) 智能管理层。

智能管理层中提供自组织的精细化管理解决方案,通过厂级能效对标与考核系统、运行管理系统、智能巡检、精密点检与设备远程管理、设备定期轮换管理、可视化设备润滑智能管理、可视化技术监督智能管理、可视化三维作业指导书及检修培训、缺陷管理、全局成本利润分析与决策、移动应用、远程诊断、三维虚拟电厂与安全管控、三维建档等管理系统,设计基于数据共享的管理一体化平台,实现发电厂的闭环、自组织的精细化管理系统。

因此,从智能发电厂的架构中可以看出,智能发电厂基本功能的实现以智能设备层、智能控制层和智能生产监控层为基础,提升生产运行系统的安

全可靠性和智能化控制水平;智能管理层则侧重于企业信息管理现代化,其在实现智能发电厂基本功能的基础上进行应用扩展和资源优化调度整合,电厂可根据其现状和特点,因地制宜、注重实效,为企业进一步创造经济价值。

2.2 智能发电厂高级应用支撑环境

智能发电厂以智能管控一体化平台为基础,通过开放应用控制器、高级应用服务器和大型实时/历史数据库,使运算复杂的高级应用功能与DCS控制系统紧密结合,为实现智能发电厂的相关功能提供高实时性和高可靠性的技术支撑。

1) 开放应用控制器。

开放应用控制器为智能控制系统、多目标优化系统以及故障诊断系统提供实时和高可靠性的运行环境。应用控制器设计为面向第三方用户的开放控制器,提供模块化编程环境及更复杂的运算支撑,便于高级先进算法通过自编程实现。

2) 高级应用服务器。

高级应用服务器上开发与控制器相似的组态和运行环境以及可靠高效的接口,高级应用模块能够与实时历史数据库进行复杂的数据处理及分析、智能寻优计算等功能扩展,实现机组级和厂级的智能化应用,如流程性能优化、设备状态评价、智能生产调度、高端辅助决策、自组织精细管理等。

3) 实时/历史数据库。

实时/历史数据库系统负责高速采集DCS系统产生的生产数据,并对海量数据进行高效的压缩和存储,为智能DCS平台内各种应用提供高速、长时间跨度的实时/历史数据查询和调用。

3 智能发电关键技术及特征

3.1 智能发电的关键技术

智能发电是一个多学科交叉的研究领域,涉及多方面的基础理论与关键技术。同时,智能发电又有明确的应用场景和技术需求,其技术载体—智能发电厂将不仅是独立的发电单元,同时也是能够即时感知外部信息,与电网、其他发电单元及用户友好互动的智能化个体。

我国电力生产需能够实时响应电网需求,保证电力供给的高可调度性、高安全性,其对电力生产的控制、安全及管理具有较高的要求。在电力生产过程中,由于我国新能源电力快速发展以及用电结构的转变,为了保证电网负荷的供需平衡,我国火电机组需频繁的进行负荷快速调节;同时,为了降

低电力生产过程中的成本，电厂锅炉燃煤往往采用掺烧方式，其煤质煤种多变，因此为实现电厂生产过程的智能化，需保证控制系统具有强外界环境适应性，能够感知外界环境的变化，保证生产过程的可靠性及经济性。其次，为了保证电力供给的安全，需提高电厂各设备运行的可靠性，为实现电厂生产安全智能化，需对其潜在故障及风险进行提前预警及诊断，并及时采取预控措施，避免电力生产事故的发生。再者，由于电力生产是一个庞大的系统工程，并非简单的生产制造过程，电力生产过程中涉及到多个系统之间的协调与配合，因此对电站智能化管理提出更高的要求，提升各系统之间的融合及交互，实现管理上的闭环。

结合我国能源电力的发展需求以及发电企业自身的特点，归纳出以下需要重点关注的科学问题：1) 复杂系统的多目标优化问题，研究复杂系统感知外部环境变化，实现复杂系统的智能决策、多目标优化及分层优化调度；2) 基于大数据和深度学习的电站设备状态监测问题，研究设备状态监测模型，进而通过深度学习算法实现设备故障预警及诊断；3) 基于管控一体化的自组织精细管理问题。

对于我国智能电厂的发展需重点研发的技术领域包含：1) 建模、控制、优化理论与技术；2) 先进检测技术与仪表；3) 工业物联网数据平台及软件；4) 数据分析理论与技术；5) 虚拟现实与可视化技术；6) 系统节能与效率分析；7) 工业控制与信息系统安全；8) 设备状态与故障诊断；9) 智能优化管理系统。

3.2 智能发电特征及解决方案

智能发电厂通过智能管控一体化平台，实现对智能设备层、智能控制层、智能生产监管层以及智能管理层之间的相互交叉及融合，形成一种具备自趋优全程控制、自学习分析诊断、自恢复故障(事故)处理、自适应多目标优化、自组织精细管理五大特征的智能发电运行控制与管理模式，其具体功能及解决方案如下所述。

1) 自趋优全程控制。

自趋优全程控制设计目标是保证机组在不同负荷工况下，控制系统均能克服对象自身非线性特性以及外界因素变化的影响，使被控对象处于优化控制状态。因此，自趋优全程控制设计中采用基于对象模型的先进控制方法，针对被控对象的特性建立全工况非线性动态模型，并基于机组实时/历史数据实现对模型的定期维护和在线更新；进而，结合

被控对象的特点设计基于模型预测的先进控制算法和相应的智能控制补偿策略，实现被控对象的全程优化控制^[10-12]。

自趋优全程优化控制以智能协调优化控制系统为例。传统的燃煤发电机组一般是通过机炉协调控制完成电网调度的自动发电控制，机炉协调控制系统的基本任务是协调锅炉和汽轮机两者之间的能量供需平衡，实现机组负荷和主蒸汽压力的协调控制。但由于锅炉具有较大延迟和惯性，而汽轮机则具有较快的响应特性，传统的机炉协调控制系统很难实现两者之间的平衡与匹配；其次，由于被控对象在全工况范围内具有较强的非线性特性，传统的PID控制器难以保证机组全工况范围内的调节性能；再者，由于负荷指令和煤质煤种等外界因素多变，传统的机炉协调控制系统缺乏对外界环境的快速适应能力，造成控制品质恶化。因此，依据自趋优全程优化控制设计思路，智能协调控制系统的结构如图 2 所示。

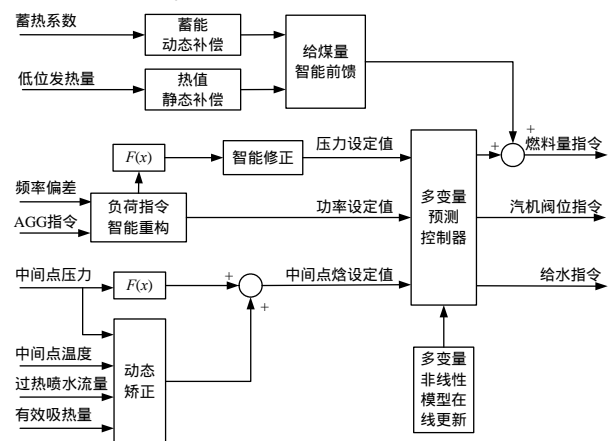


图 2 智能协调控制系统

Fig. 2 Smart coordinate control system

图 2 所示的智能协调控制系统针对超(超)临界燃煤火电发电机组，在智能协调控制系统设计中，为了更好的协调锅炉和汽轮机两者之间的特性，实现锅炉、汽机以及给水之间的解耦控制，采用 3 输入 3 输出的多变量预测控制器作为核心控制器；在预测模型中采用模型在线更新机制，提升控制系统在全工况范围的调节品质；为了克服煤质煤种等因素以及锅炉自身惯性的影响，构建锅炉入炉煤低位发热量和锅炉蓄热系数关键状态参数，实现对燃煤热值的静态校正和锅炉蓄能的动态补充，进一步提升锅炉侧的控制品质和抗扰能力。

2) 自学习分析诊断。

自学习分析诊断设计目标是充分挖掘和利用机组大量的历史数据资源，通过对海量历史数据的

挖掘利用和深度学习^[13-14],结合对象的输入/输出关系建立系统模型,进而利用对象模型根据一定的调整规则进行故障模拟和自弈,获取具有海量数据的故障专家库;通过实际运行数据与模型运行数据和故障历史专家库之间的比对,实现对系统或设备故障的提前预警及诊断^[15-16]。

自学习分析诊断以制粉系统故障预警及诊断为例,其系统结构如图3所示。在设备故障预警和诊断中,如果从机组的海量历史数据中挑选出故障数据作为样本并进行学习如同海底捞针,而在机组的海量历史数据中绝大部分为正常运行数据,因此在系统设计中首先根据系统中输入、输出及相关状态变量之间的关联,通过对海量历史数据的深度学习建立系统的数学模型,并基于实时运行数据对模型可信度进行评价,实现模型的在线更新;根据对象数学模型,采取模型自弈的学习模式,通过对关键输入参数及状态变量的有序调整,对系统典型故障进行激发和模拟,获取机组大量的故障历史专家库;利用自弈获取的海量故障数据,通过深度学习神经网络对故障数据进行深度学习和训练,提升系统故障诊断的准确率;进而根据阈值评价体系,对机组实际运行数据与机组故障模型之间的比对,实现对设备故障的提前预警和诊断。

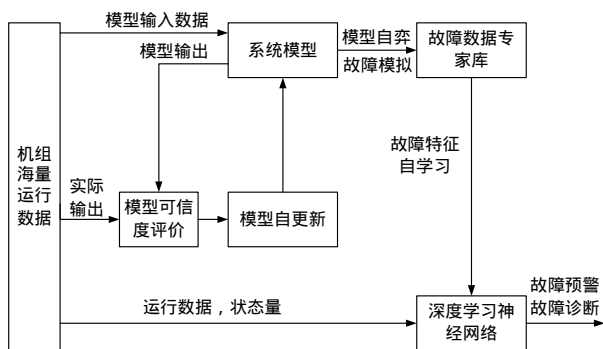


图3 制粉系统故障预警及诊断

Fig. 3 Fault prognosis and diagnosis of pulverizing system

3) 自恢复故障处理。

自恢复故障处理设计目标是当传感器、执行机构或元部件发生故障时,利用控制系统的容错处理能力,使系统本身仍处于闭环稳定,并具有较理想的控制性能,保证系统能够正常运行。当系统存在一个或多个参数发生偏离,导致控制系统性能恶化并且超过设计时可接受的合理范围时,则认为系统处于故障状态,因此常以系统偏差是否显著偏离设计值作为故障判断的界定点。当系统参数出现偏离时,如果控制系统的性能仍然满足预期的要求,则可以认为控制系统仍处于正常工作状态,因此可以

说系统故障与系统预期的控制性能指标严格相关。

自恢复故障处理以容错控制系统为核心,当执行器、传感器等元部件发生故障,仍然能够保证系统稳定的闭环控制^[17-18]。容错控制的分析方法很多,可分为被动容错控制和主动容错控制,被动容错控制在系统设计时则需考虑对象的不确定性,使控制系统具有鲁棒功能;主动容错控制则在故障发生后,通过控制器参数调整和优化,或改变控制系统结构和控制方式,从而达到容错控制的目的。因此,无论是主动容错控制还是被动容错控制,在控制系统设计时均需考虑模型不确定性与外界扰动的影响,使控制系统具备一定的鲁棒性。

自恢复故障处理除了通过容错控制保证系统的稳定性外,在机组APS自启停控制应用中,当遇到故障节点导致顺序控制无法进行时,需根据机组当前状态对设备安全阈值等指标进行详细分析,重新修订启动参数边界及安全阈值,保证顺序控制的顺利执行。

4) 自适应多目标优化。

自适应多目标优化的设计目标是为了满足机组多样化的性能需求,当外界环境因素发生变化时,系统可以根据优化目标函数的选择,进行在线寻优获取最佳运行参数或控制量,保证机组或系统处于最优的运行状态^[19-20]。自适应多目标优化系统可以应用于燃煤发电机组的众多控制领域及运行参数优化中,比如在机炉协调控制系统优化中需要根据外界负荷及煤质煤种的变化,对机组快速性指标、稳定性指标以及经济性指标进行权衡;在锅炉燃烧优化控制中,需对锅炉经济性指标、快速响应指标以及污染物排放指标进行选择;在主蒸汽压力优化中,则需要对机组运行经济性和快速响应特性进行权衡。

在自适应多目标优化设计中以锅炉燃烧优化系统为例,其系统结构如图4所示。锅炉燃烧系统自适应多目标优化中,首先需获取对象的优化模型,由于锅炉燃烧过程复杂,很难通过机理分析获取对象的解析模型,因此在优化模型建立时首先考虑基于数据的数值模拟模型;第二,优化目标及约束函数的选择,由于锅炉燃烧系统复杂,任意参数的调整都会影响锅炉燃烧的经济性、污染物排放以及锅炉的快速响应特性等,因此在优化目标及约束函数选择中,需根据外界环境因素以及自身运行状况,针对不同优化目标构建相应的适应度函数及约束条件;第三,多目标多约束优化算法的选择,

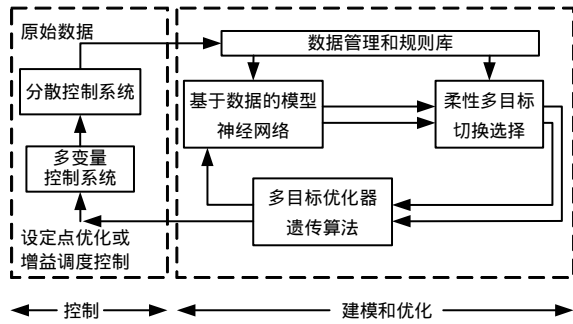


图 4 锅炉燃烧优化控制系统

Fig. 4 Boiler combustion optimization control system

由于锅炉燃烧优化调整涉及较多的输入变量、约束条件以及多重目标函数，其寻优空间较大，影响因子较多，因此在多目标多约束寻优问题求解中选择遗传算法或者粒子群算法等人工智能求解方法，提高获取最优解的概率。

5) 自组织精细管理。

智能发电是提升电力生产过程安全、高效、环保性能的综合解决方案，其有效实施需要多领域合作、多技术协同。智能发电的实现离不开强有力的信息系统和管理平台，也需要有完善的管理规范作为支撑。自组织精细管理的设计目标一方面增强管理系统的自组织能力，能够实现管理层面中的闭环管控处理，通过闭环管控提升事件处理效率，避免管理上的疏漏；另一方面增强管理系统的精细化能力，以“互联网+”为核心实现专业化和信息化的融合，通过可视化三维指导、移动应用、远程诊断、三维虚拟电厂与安全管控、三维建档等管理系统，通过管理数据与生产数据之间的相互融合，提升电厂精细化管理水平。

自组织精细化管理以设备缺陷管理系统为例，其系统结构如图 5 所示。在设备缺陷管理系统中，结合大数据处理平台及故障诊断系统模块，建立分级预警管控模型，制定决策知识库，进行设备与系统的检修维护，实现检修管理系统的自我感知、自动预判和自主管理目标。

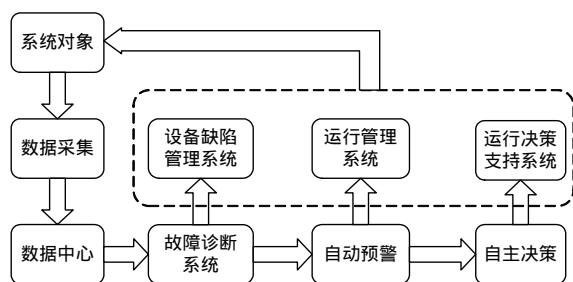


图 5 设备缺陷管理系统模型

Fig. 5 Model of equipment defect management system

4 结论

智能发电厂的精髓在于发电生产过程中的智能化，其通过智能生产控制中心与智能管理中心相结合的智能管控一体化平台，实现生产控制智能化、生产安全智能化以及生产管理智能化三大功能，其覆盖发电企业的生产维护、经营管理等各个方面，更好的实现节能高效、降低排放、灵活调节、少人值守、智能监视、信息安全、精细管理、安全管控等需求。

参考文献

- [1] 国务院办公厅 . 能源发展战略行动计划(2014-2020 年)[EB/OL] . [2014-11-19] . http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm .
General Office of the State Council . Energy development strategy action plan (2014-2020)[EB/OL] . [2014-11-19] . http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm(in Chinese) .
- [2] 国家能源局 . 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL] . [2016-02-29] . http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm .
National Energy Administration . Guiding opinions on promoting the development of smart energy with internet plus[EB/OL] . [2016-02-29] . http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm(in Chinese) .
- [3] 张东霞 , 姚良忠 , 马文媛 . 中外智能电网发展战略[J] . 中国电机工程学报, 2013, 33(31) : 1-14 .
Zhang Dongxia , Yao Liangzhong , Ma Wenyan . Development strategies of smart grid in China and abroad[J] . Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31) : 1-14(in Chinese) .
- [4] 国务院办公厅 . 中国制造 2025[EB/OL] . [2015-05-19] . http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm .
General Office of the State Council . China manufacture [EB/OL] . [2015-05-19] . http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm(in Chinese) .
- [5] 刘吉臻 . 智能发电：第四次工业革命的大趋势[N] . 中国能源报, 2016-07-25 .
Liu Jizhen . Smart Generation : The general trend of the fourth industrial revolution[N] . China Energy News , 2016-07-25(in Chinese) .
- [6] Zhao Z , Zeng D L , Hu Y , et al . Soft sensing of coal quality[J] . Thermal Science, 2015, 19(1) : 231-242 .
- [7] 湛腾西 , 郭观七 . 电厂烟气含氧量的智能混合预测方法 [J] . 仪器仪表学报, 2010, 31(8) : 1826-1833 .
Zhan Tengxi , Guo Guanqi . Intelligent hybrid prediction method of the flue gas oxygen content in power plant

- [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1826-1833(in Chinese).
- [8] Hu Y, Zeng D L, Liu J Z, et al. Dynamic model for controller design of condensate throttling systems[J]. ISA Transactions, 2015, 58: 622-628.
- [9] Zeng D L, Hu Y, Gao S, et al. Modelling and control of pulverizing system considering coal moisture[J]. Energy, 2015, 80: 55-63.
- [10] 刘向杰, 孔小兵. 电力工业复杂系统模型预测控制—现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 79-85. Liu Xiangjie, Kong Xiaobing. Present situation and prospect of model predictive control application in complex power industrial process [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 79-85(in Chinese).
- [11] 陈彦桥, 刘吉臻, 谭文, 等. 模糊多模型控制及其对500MW单元机组协调控制系统的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 199-203. Chen Yanqiao, Liu Jizhen, Tan Wen, et al. A fuzzy multi-model control and simulation of coordinated control system for 500mw boiler-turbine unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 199-203(in Chinese).
- [12] 程亮. 基于内模自适应的单元机组协调控制系统分析及研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2011. Cheng Liang. Analysis and research on coordinated control system of boiler-turbine unit based on internal model adaptive control algorithm[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2011(in Chinese).
- [13] Guo X J, Chen L, Shen C Q. Hierarchical adaptive deep convolution neural network and its application to bearing fault diagnosis[J]. Measurement, 2016, 93: 490-502.
- [14] Duan Y J, Lv Y S, Liu Y L, et al. An efficient realization of deep learning for traffic data imputation [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 168-181.
- [15] Agrawal V, Panigrahi B K, Subbarao P M V. Review of control and fault diagnosis methods applied to coal mills[J]. Journal of Process Control, 2015, 32: 138-153.
- [16] Guo S, Wang J H, Wei J L, et al. A new model-based approach for power plant Tube-ball mill condition monitoring and fault detection[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 10-19.
- [17] 周东华, Ding X. 容错控制理论及其应用[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 788-797. Zhou Donghua, Ding X. Theory and applications of fault tolerant control[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(6): 788-797(in Chinese).
- [18] 李俊岭, 杨光红. 自适应容错控制的发展与展望[J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 1921-1926. Li Junling, Yang Guanghong. Development and prospect of adaptive fault-tolerant control[J]. Control and Decision, 2014, 29(11): 1921-1926(in Chinese).
- [19] 赵亮, 睢刚, 吕剑虹. 一种改进的遗传多目标优化算法及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 96-102. Zhao Liang, Ju Gang, Lü Jianhong. An improved genetic algorithm in multi-objective optimization and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 96-102(in Chinese).
- [20] 甘敏, 彭辉, 王勇. 多目标优化与自适应惩罚的混合约束优化进化算法[J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 378-382. Gan Min, Peng Hui, Wang Yong. Multiobjective optimization and adaptive penalty function based constrained optimization evolutionary algorithm [J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 378-382 (in Chinese).



刘吉臻

收稿日期: 2017-07-26。

作者简介:

刘吉臻(1951), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统建模与控制、工业过程测控理论与技术, ljz@ncepu.edu.cn。

(实习编辑 朱腾翌)

Architecture and Feature of Smart Power Generation

LIU Jizhen¹, HU Yong¹, ZENG Deliang¹, XIA Min², CUI Qingru²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources(North China Electric Power University); 2. China Guodian Corporation)

KEY WORDS: smart power generation; smart control; smart safety; smart organization

With the large-scale development of energy and the transformation of energy structure in China, in order to quickly construct an efficient, clean, low-carbon and recycling green energy production system, realize smart energy development strategy with deep integration of energy and information, this paper, based on the analysis of the present situation of power generation enterprises, the exploration of smart power generation in China, and the characteristics of electric power production in China, analyzes the problems in the current field of smart power generation. According to the analysis, the concept of smart power generation is described, and the system structure of smart power generation is proposed. What's more, the key scientific issues and key technology in the smart power generation field are analyzed.

The basis of "smart power generation" is automation, digitalization and information. By applying the Internet, big data and other resources, utilizing computer powerful information processing capabilities, using some advanced technology, such as unified integrated data platform, technology roadmap of management and control integration, smart sensing and smart execution, smart control and optimization algorithms, data mining and fine management decision-making, a new operation control and

management mode with the characteristics of self-driving, self-learning, self-recovery, self-adaptive and self-organization is formed. This new mode can achieve the unit safe, efficient and environmentally friendly operation, and has excellent ability to adapt to changes in the external environment.

As for the structure of the smart power generation in Fig.1, through the smart management and control platform, the smart production center and smart management center can be unified, and the integration of smart device layer, smart control layer, smart production supervision layer and smart management layer can be realized. At last, smart power generation has the functions of smart control, smart safety and smart management.

According to the characteristics of electric power production in China, the main scientific technical problems and key research fields in the field of smart power generation are analyzed and summarized. And specific functions and solutions are described.

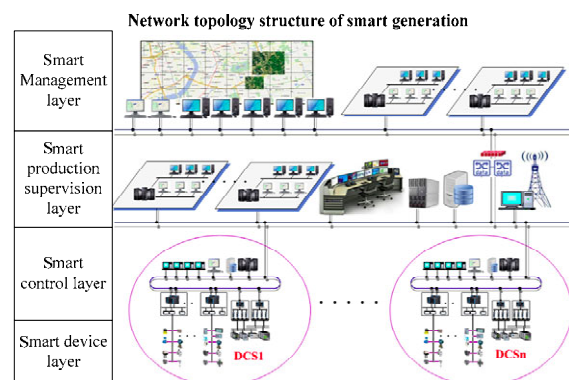


Fig.1 System structure of smart generation