先进燃气电厂智能化体系设计与建设

贾建波[1]，王　萌[2]，谭厚章[2]，王顺森[2]
（1.神华国华(北京)燃气热电有限公司，北京　100024；
2.西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室，陕西　西安　710049）

［摘　　要］随着能源发展的清洁化、低碳化、智能化、多元化，电厂的智能化建设已成为趋势。国华北京燃气热电示范工程实现了“一部一室三中心”管理模式，建立了智能设备、智能控制和智能管理三层体系架构。该工程通过全态一键启停、三维可视、实时在线仿真以及现场总线控制系统等技术手段实现了全厂数字化泛在感知；通过搭设一体化平台来整合业务，实现电站数字化、管理信息化；通过对噪音和污染物排放的控制，实现了清洁发电的目标。该燃气热电示范工程节约资源、环境友好、智能环保、节能降耗，对我国智慧电厂发展具有重要的示范意义。

［关　键　词］智慧电厂；数字化；智能化；三维可视；一体化平台
［中图分类号］TK9　［文献标识码］A　［DOI 编号］10.19666/j.rlfd.202009238

［引用本文格式］贾建波，王萌，谭厚章，等. 先进燃气电厂智能化体系设计与建设[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 69-75.　JIA Jianbo, WANG Meng, TAN Houzhang, et al. Design and construction of smart system for advanced gas power plant[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 69-75.

Design and construction of smart system for advanced gas power plant

JIA Jianbo[1], WANG Meng[2], TAN Houzhang[2], WANG Shunsen[2]
(1. Shenhua Guohua (Beijing) Gas Thermal Power Plant Co., Ltd., Beijing 100024, China;
2. MOE Key-Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China)

Abstract: With the energy industry develops towards clean, low-carbon, intelligent and diversified direction, the construction of smart power plants has become a trend. Guohua Beijing Gas Thermal Power Plant demonstration project pioneered the "one-department, one-room, three-center" management model and established a three-layer architecture of smart equipment, smart control, and smart management. This project realizes the digital perception of the whole plant through technical means such as full-state one-key start and stop, three-dimensional holographic visualization, real-time online simulation and fieldbus control system. It realizes the digitalization of power stations and management information through the establishment of an integrated platform to integrate business. Via the control of noise and pollutant emissions, the goal of clean power generation has been achieved. The Guohua Beijing gas-fired thermal power project has important significance for the development of smart power plants in China.
Key words: smart power plant, digitization, intelligence, three-dimensional visualization, integrated platform

以两化融合、互联网+、工业智能化为代表的信息革命为发电企业生产管理的转型升级提供了支撑和契机，能源发展的趋势已呈现清洁化、低碳化、智能化、多元化特征，传统发电行业的运营模式与竞争格局正在逐步向智能化方向转化[1-5]。2016 年国务院发布的《国家创新驱动发展战略纲要》指出，把数字化、网络化、智能化、绿色化作为提升产业竞争力的技术基点。2017 年印发的《新一代人工智能发展规划》进一步明确了人工智能在各行业发展的战略目标。智慧电厂的建设已成为发电企业智能化转型的重要环节。

关于智慧电厂的概念，到目前为止尚无统一公认的标准和定义，部分研究关注电厂的建设过程[6]，部分研究侧重先进智能信息技术在电厂的应用[7-9]，

收 稿 日 期：2020-09-04
基 金 项 目：国家重点研发计划项目(2018YFB0604203)
Supported by:　National Key Research and Development Program (2018YFB0604203)
第一作者简介：贾建波(1972)，男，高级工程师，主要研究方向为热力发电和智慧电厂建设，stephenwgentle@163.com。
通信作者简介：王顺森(1976)，男，博士，副教授，主要研究方向为热力系统集成优化与智慧电厂，sswang@xjtu.edu.cn。
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

还有研究认为智能化应当扩展至整个发电企业以及强调电厂全生命周期的智能化[10-12]。但是对于智慧电厂应当具备的基础特征和期望实现的目标要求，普遍认为，智慧电厂应当具备泛在感知自监控、自适应学习优化、自寻优调整控制、自诊断故障处理和自组织决策支持等一系列特征。以先进智能技术实现精确控制、高效管理、安全保障和节能降耗成为智慧电厂建设的重要目标[13-15]。

智慧电厂的建设是一项复杂庞大的系统工程，现在依然处于讨论与探索阶段[16-17]。2013 年国家能源集团国华电力公司开始进行智慧电厂示范工程——北京燃气热电厂建设，并于 2015 年 8 月建成投产。该电厂是国内首个智慧电厂示范项目，总体达到国际领先水平，具有重要示范意义和推广价值。电厂拥有 1 套 F 级二拖一燃气蒸汽联合循环机组，容量 950 MW，供热面积约 1 300 万 m²，是北京市清洁供热体系四大热电中心之一[18]。

本文以北京燃气热电示范工程项目为对象，从智能管理模式、数字化泛在感知实现、一体化平台智能提升以及绿色和谐的环保技术等几个方面对其进行探讨，为我国电厂智能化发展提供实践管理经验。

1 智能管理模式

随着中国经济增速减慢和结构调整，电力需求增长放缓，同时智能电站正成为产业内技术变革的新趋势。传统发电企业专业划分过细、用人偏多、智能化程度不高，导致整体效率较低，阻碍了企业发展。为了应对电力生产的新状况和未来发展趋势，发电企业必须变革原有的管理模式。

1.1 组织转型

北京燃气热电厂通过数字化、信息化技术，将研究、分析、诊断等业务转入后台并强化应用，形成以行政部、主控室、分析诊断中心、成本利润中心、安全消防保卫中心为主体的“一部一室三中心”管理模式（图 1），全厂定员仅 30 人。该模式实现了对电站核心生产运营业务的管控，由外部单位如设备承包商、国华研究院、北京热电分公司和其他单位来辅助进行核心业务执行和非核心业务整体运营的业务管理模式。其关键是精简高效，全面打通流程体系，集约优质资源，实现电站智能化运营。除了 5 个实体部门外，利用数据的远程交互、业务的互联互通，设置了燃气轮机技术研究中心和数据共享中心 2 个虚拟中心。

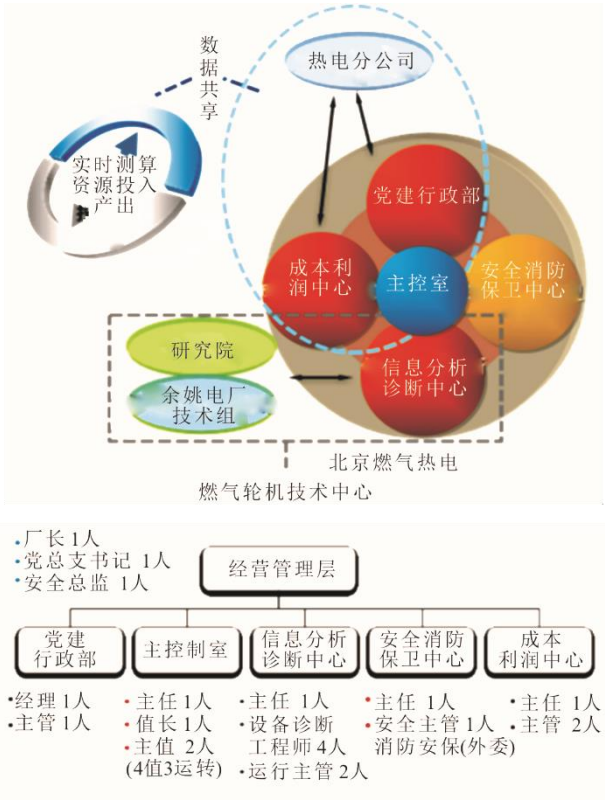


图 1 “一部一室三中心”组织机构

Fig.1 The organizational innovation of “one-department, one-room, three-center”

电厂业务管控，根据运行管理、设备管理、安健环管理和职能管理 4 项一级业务，分成核心生产业务和管理支撑业务。其中，核心生产业务由电厂直接负责，管理支撑业务则按照社会化程度和管控程度的高低，分别委派给企业内部单位和外单位（图 2）。电厂需围绕关键业务，充分统筹公司内外部资源，持续优化体制机制，平衡电厂业务的聚焦与分离，通过业务专业化、服务共享化、运维社会化推动各项业务的高效开展。

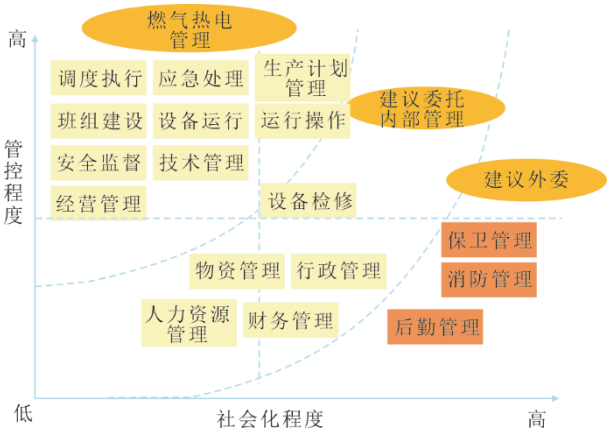


图 2 电厂业务管控

Fig.2 The task management of power plant

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2 经营模式

将财务、经营等管理支撑业务纳入成本利润中心统一管控，仅设 3 名员工，主要业务如下。

1）实时经营预测分析

运用实时业务数据与经营模型模拟数据进行收入成本利润预测、盈亏平衡点分析、边际贡献分析。主要关注影响指标（包含发电量、售热量、气价、固定成本等）、结果指标（包含电力收入、燃料费、利润总额等）和决策指标（包含售电单位边际贡献、盈亏平衡发电量等），实时展示指标变化，以实现辅助生产经营计划制定，调整生产经营策略，为改进经营绩效提供依据。

2）财务日清日结

实行收入与成本的“日清日结”管理，实时获取燃料、能耗、厂用电等成本数据，而针对固定成本，采用成本按时间分摊的方法，从财务预算报表中，取得各个成本项的预算值，在分析页面上“实时”计算“已发生”的成本金额，实现电厂成本的日清日结。自动报表系统每日自动核算各类财务报表，同时对异常情况及时分析。

3）大数据支撑管理

充分发挥信息技术支撑作用，打通财务业务壁垒，从燃气实时计量到文印用纸数量，全部实现高效数据支撑，在使用便捷的前提下实现高效精准管理，减少浪费。

1.3 制度保障

在实现减员增效目标的同时，为确保“一部一室三中心”管控模式的落地实施，需要具备流程梳理保障、指标设计保障、制度制定保障、岗位手册保障 4 个方面保障条件（图 3）。总体上把握指标设计，保证业务流程的完整联接，确保各业务间的高效协同，细化岗位工作。

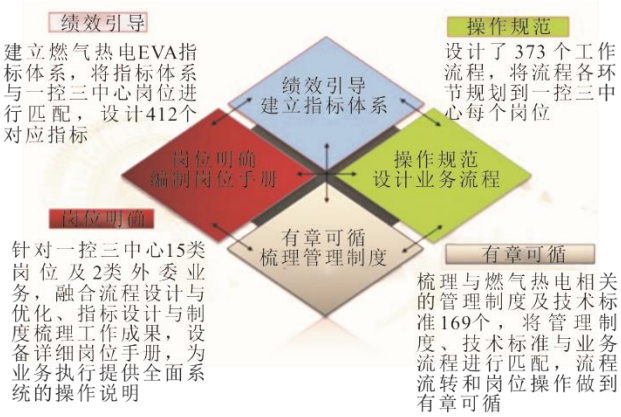


图 3 制度保障条件

Fig.3 The system guarantee conditions

2 数字化泛在感知实现

生产全过程的数字化表达是智慧电厂的基础，北京燃气热电厂智慧电厂体系架构如图 4 所示。

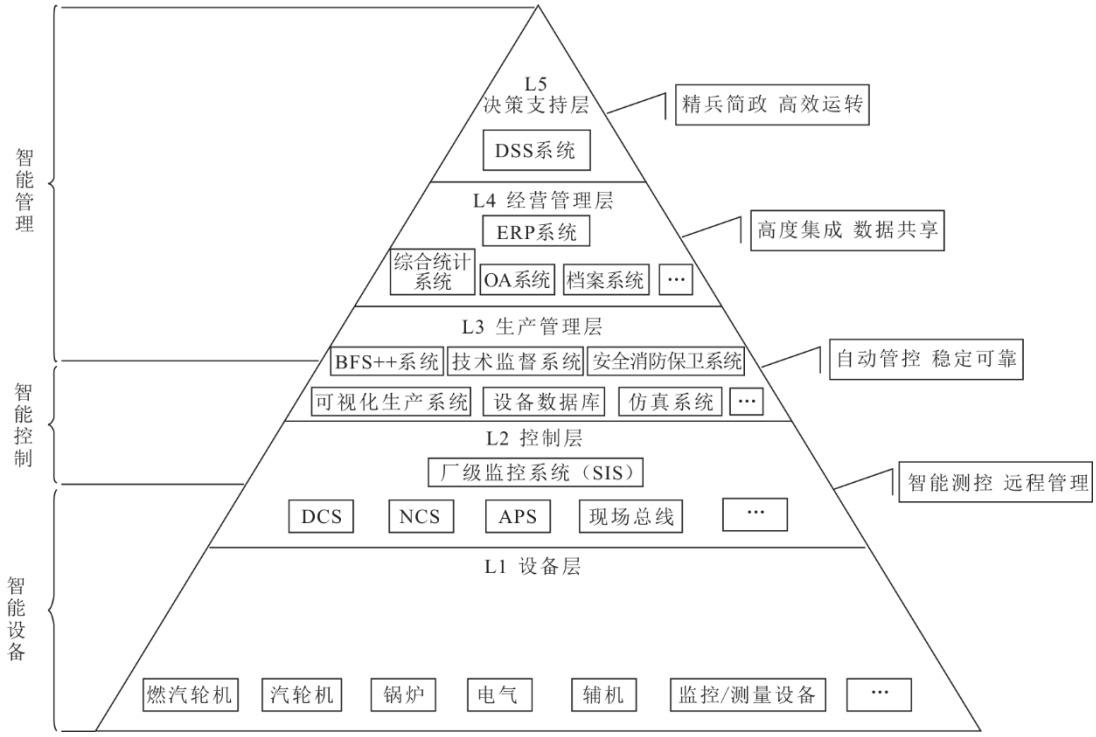


图 4 智慧电厂体系架构

Fig.4 The architecture of smart power plant

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 4 可见，该体系架构自下而上分为设备层、控制层、生产执行层、经营管理层和决策支持层 5 层。各层逐步递进、逐层依托，提升机组自动控制水平，实现生产过程数字化表达，满足数据集成互联互通，构建信息化管理体系。

对智慧电厂架构进一步简化，建立智能设备、智能控制和智能管理三层次体系。自主研发，深化应用，实现全生产过程的数字化泛在感知。

2.1 电站冷热态、全过程、全设备的“一键启停”

电站冷热态、全过程、全设备的“一键启停”称为全态一键启停。机组自启停控制系统（APS）是“一键启停”的基础，覆盖了从启动锅炉点火、燃机启动并网、联合循环启动、汽轮机并网等机组冷热态控制全过程的全部设备，具有自动化程度高、控制范围广、安全性高、智能性强、可分段操作的特点。系统能够自动依据机组启停运行特性、设备运行状态、异常故障级别和工艺过程参数做出判断，考虑当前机组运行情况，向各设备或系统发出顺控指令。

为实现机组“一键启停”，充分考虑 APS 对设备自动化的需求，增加锅炉中压汽包注水管路和凝汽器循环水侧排空检测，在开式水系统排空点设置电磁阀，优化轴封疏水暖管系统、凝结水系统、余热锅炉阀门和汽轮机本体疏水一次阀门，显著减少人工干预和就地操作，实现了锅炉注水全程自动。

2.2 通过三维建模实现电站的全方位可视化

通过先进的可视化建模，实现了包括地下设施、锅炉外管、燃气轮机等全厂设备的三维可视，在实体电站竣工交付的同时，移交整合了工程文件、工程模型、工程数据及电站相关资料的三维模型，实现了全电站的数字化移交。在生产运行中持续积累数据、汇总资料，形成涵盖全电站各类设施全生命周期的标准化“三维字典”，实现设备信息的集中规范管理。

建立设备分析诊断体系，集成电站设备全生命周期的信息，建立可视化的设备数据库，利用重点监视画面、三维拆解、性能计算、故障预警等手段，强化设备信息的集成共享和设备隐患的实时监控（收集整理 58 类，600 余项设备信息，18 787 条设备台账）。以实时数据自学习为基础，建立每台设备个性化的经验模型及实时数据的状态矩阵，利用最小相似性原理，对历史参数进行多变量智能分析，及时暴露设备故障的早期裂化征兆，实现全设备故障预警。

基于三维可视化与地理信息系统技术，把分散的火灾报警、视频监控、门禁控制、周界防护进行融合、集成，研发了智能电站三维消防安保平台，实现系统间一点触发、全面联动，提升了电站安防业务快速响应能力。

此外，设备运行实时参数与三维模型相关联，通过可视化平台，用户可以对复杂的生产设备自由拆解、组合，极大地便利了设备检修和员工培训。

2.3 基于真实生产操作的在线仿真平台

针对电厂分散控制系统（DCS）和燃气轮机控制系统（TCS）的设备及其操作，通过双虚拟包激励型仿真技术接入全部实时数据，使用模糊向量对现场各管路管道阻力、阀门操作对热力参数影响等进行计算，自动矫正仿真模型。建立热力模型共 197 个，初始化机组系统 156 个，对数百个预置业务流程、工况进行高精度、多样化的仿真模拟，为设备测试、流程校验、事故模拟、操作预演与员工培训提供真实的操作环境。

2.4 通过现场总线实现设备智能化及远程控制

现场总线系统一体化控制装置与数据应用预警系统，大幅拓展了电厂现场总线应用范围与深度；现场总线系统的故障诊断装置及方法提高了现场总线的可靠性。率先在燃气调压、汽包水位调节等系统采用了现场总线，现场总线设备应用比例达到 64%，为目前国内电站的最高水平。现场总线协议简单、容错能力强、安全性好、成本低廉，极大地优化电站现场设备间的数字通信效率以及控制设备和高级控制系统之间的信息传递质量，实现了设备的自检、自动巡检、远程诊断等智能管理功能。

3 一体化平台智能提升

将智能设备、智能控制和智能管理三层体系按照业务全面覆盖、应用集成协同、功能定制服务、数据全局共享原则，整合为一体化平台。平台对底层业务系统做了 4 个方面集成：1）统一身份认证，避免业务操作重复登录；2）界面集成，把分散业务模块按岗位聚合到操作界面，按岗定制；3）数据集成，汇集不同系统数据，依据需求进行综合应用；4）应用集成，彻底打通业务系统壁垒，实现互联互通的信息化支撑。

平台着眼“一部一室三中心”管理模式，共集成多达 30 个业务系统。集成大屏幕、桌面终端和移动终端，搭建针对岗位的定制化智能工作平台，面向全部业务提供移动作业的数据、应用集成的共享，使全员值班远程监控、随时随地控制分析、后台支持就近

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

处理成为现实。在平台支撑下，实现如自动化报表、商务智能分析、自动分析诊断和联动安保集成等综合处理体系，极大地提升了电厂的管理运行效率。

在运行实践中，通过一体化平台，对智能化程度实现 5 个方向的反馈提升（图 5）。

1）可靠感知　通过现场总线技术的应用、全厂集中控制、信息全局共享等实现了生产与管理状况的实时全面感知。

2）真实再现　通过三维移交平台展示和仿真模拟平台，累积全厂设备运行信息，实现了生产与管理过程的真实再现。

3）即时响应　业务信息按岗位聚合显示、自动推送，实现了动态监控、异常告警、督查催办，通过移动平台实现了过程异地监控、信息随时获取、业务及时处理，支撑实现全员值班。

4）业务协同　依照业务主线，共享设备、任务、岗位等信息，综合利用数字移交、三维拆解、性能计算、故障预警等技术手段实现了流程互联，业务协同。

5）决策支撑　围绕生产经营指标分析，实时全面采集生产运营相关数据，利用经营分析模型，以各岗位需求为出发点，层次化提供决策支持服务。

a) 可靠感知

b) 真实再现

c) 即时响应

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

d) 决策支撑

图 5 一体化平台智能提升

Fig.5 Smart progress of the integrated platform

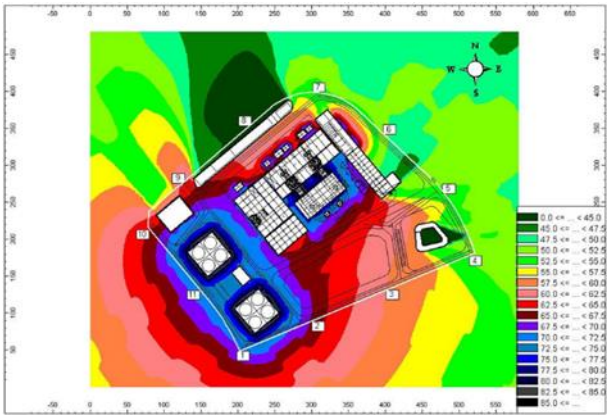
4 绿色和谐的环保技术

4.1 噪声控制

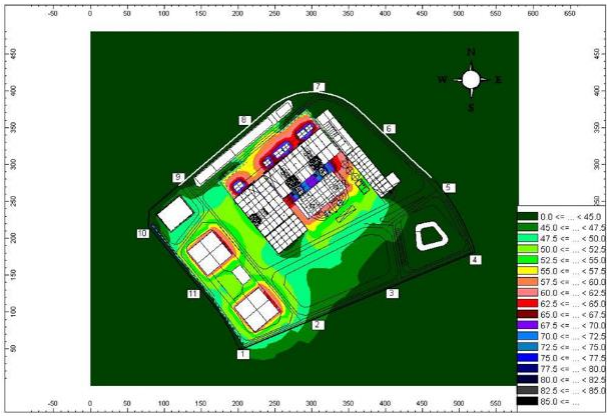
通过软件模拟分析结合计算经验修正，预测全厂控制前后噪声排放水平，结果如图 6 所示。厂区执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》中 1 类标准，夜间限值要求≤45 dB[19]。从图 6 可以看到，不采取降噪控制措施情况下，整个厂界噪声排放均超过标准限值，绝大部分厂界处于 60 dB 以上。在考虑合理设计余量基础上，确定各区域降噪量，并实施针对性噪声控制措施后，整体厂区噪声排放达标。

4.2 烟气排放控制

北京燃气热电厂设计时选用国际先进低氮燃烧器，加装选择性催化还原脱硝装置。机组投运后，烟尘、SO_2 排放均为 0，NO_x 排放为 7.7 mg/m^3，每年可节约燃煤约 130 万 t，SO_2 减排 780 t，NO_x 减排 1 900 t，减少粉尘排放 220 t。



a) 控制前



b) 控制后

图 6 控制前后噪声排放水平

Fig.6 The noise pollution levels before and after the control

5 结　语

国华北京燃气热电示范工程建设是我国对于智慧电厂建设重要尝试，为发电企业解决智慧电厂建设过程可能遇到的问题提供了宝贵的实践经验。电厂首创“一部一室三中心”管理模式，实现“实时预测、日清日结”经营模式；建立智能设备、智能控制和智能管理三层架构，通过全态一键启停、三维可视、实时在线仿真以及现场总线控制系统实现全厂数字化泛在感知；整合业务体系，综合三层架构，搭设一体化平台，实现可靠感知、真实再现、即时响应、业务协同、决策支撑 5 项智能化能力提升。在实践过程中，通过管理创新驱动运营模式创新，通过技术创新应用固化模式创新成果，使“数字化电站、信息化管理”成为现实。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[参 考 文 献]

[1] 陈世和, 张曦. 基于工业 4.0 的智能电站控制技术[J]. 自动化博览, 2015(9): 42-50.
CHEN Shihe, ZHANG Xi. Control technology of smart power plant based on industry 4.0[J]. Automation Panorama, 2015(9): 42-50.

[2] 高海东, 王春利, 颜渝坪. 绿色智能发电概念探讨[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 7-9.
GAO Haidong, WANG Chunli, YAN Yuping. Discussions on the concept of green intelligent power plant[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 7-9.

[3] 凌海, 罗颖坚. 智能电厂规划建设内容探讨[J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 9-12.
LING Hai, LUO Yingjian. Discussion on the content of planning and construction of intelligent power plant[J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 9-12.

[4] 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.

[5] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 16.
LIU Zhenya. Smart grid technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 16.

[6] 郭为民, 张广涛, 李炳楠, 等. 火电厂智能化建设规划与技术路线[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 17-25.
GUO Weimin, ZHANG Guangtao, LI Bingnan, et al. Construction planning and technical route for thermal power plant intelligentization[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 17-25.

[7] 葛志伟, 刘战礼, 周保中, 等. 火力发电厂数字化发展现状以及向智能化电厂转型分析[J]. 发电与空调, 2015, 36(5): 45-47.
GE Zhiwei, LIU Zhanli, ZHOU Baozhong, et al. Current situation of digitized coal-fired power plants and analysis of it transformation to the intelligent power plant[J]. Power Generation and Air Condition, 2015, 36(5): 45–47.

[8] 张晋宾, 周四维. 智能电厂概念及体系架构模型研究[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 2-7.
ZHANG Jinbin, ZHOU Siwei. Study on the concept of the smart power plant and its architecture model[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 2-7.

[9] 中国自动化学会发电自动化专业委员会. 智能电厂技术发展纲要[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 26.
China Automation Society Power Automation Professional Committee. Development outline of intelligent power plant technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 26.

[10] 陈进发, 高伟, 刘军辉. 智能化火电站建设现状、发展方向与展望[C]//中国动力工程学会自控专业委员会. 智能化电站技术发展研讨暨电站自动化 2013 年会论文集. 上海: 中国动力工程学会, 2013: 14-19.
CHEN Jinfa, GAO Wei, LIU Junhui. Present situation development direction and prospect of intelligent thermal power station construction[C]//China Power Engineering Society Autocontrol Professional Committee. Intelligent Power Station Technology Development Seminar and Proceedings of the Power Station Automation Committee Conference 2013. Shanghai: China Power Engineering Society, 2013: 14-19.

[11] 王曦钊, 刘胜军, 王德军, 等. 智能电站框架研究与信息化工程实践[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 181-185.
WANG Xizhao, LIU Shengjun, WANG Dejun, et al. Research of smart power station framework and practice of informatization construction[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 181-185.

[12] 周怀春, 胡志方, 郭建军, 等. 面向智能发电的电站燃煤锅炉在线运行优化[J]. 分布式能源, 2019, 4(3): 1-7.
ZHOU Huaichun, HU Zhifang, GUO Jianjun, et al. On-line optimization of coal-fired boiler operation in power plants for smart power generation[J]. Distributed Energy, 2019, 4(3): 1-7.

[13] 崔青汝, 李庚达, 牛玉广. 电力企业智能发电技术规范体系架构[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 32-36.
CUI Qingru, LI Gengda, NIU Yuguang. Architecture of the intelligent power generation technical specification for electric power enterprises[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 32-36.

[14] 韩华锋, 马玉娟, 黄一志, 等. 1 000 MW 级火电机组智慧电厂建设研究[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 49-55.
HAN Huafeng, MA Yujuan, HUANG Yizhi, et al. Research on the construction of intelligent power plant of 1 000 MW thermal power unit[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 49-55.

[15] 杨新民, 陈丰, 曾卫东, 等. 智能电站的概念及结构[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 10-13.
YANG Xinmin, CHEN Feng, ZENG Weidong, et al. Concept and structure of intelligent power stations[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 10-13.

[16] 杨新民, 曾卫东, 肖勇. 火电站智能化现状及展望[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 1-8.
YANG Xinmin, ZENG Weidong, XIAO Yong. Present situation and prospect of thermal power plant intelligentization[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 1-8.

[17] 李华. 中型热电厂智能热电管理系统建设[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(10): 113-114.
LI Hua. Construction of intelligent thermoelectric management system for medium power plant[J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(10): 113-114.

[18] 张化冰. 智能化:电力企业发展的趋势——访国家能源集团国华京燃热电公司总工程师闫计栋[J]. 电力设备管理, 2019(2): 22-26.
ZHANG Huabing. Intelligent: the trend of power enterprise development: interview with Yan Jidong, Chief engineer of National Energy group Guo Hua Jing Thermal Power Co., Ltd[J]. Power Equipment Management, 2019(2): 22-26.

[19] 中国环境监测总站, 天津市环境监测中心, 福建省环境监测中心站. 工业企业厂界环境噪声排放标准: GB 12348—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 10.
China General Environmental Monitoring Station, Tianjin Environmental Monitoring Center, Fujian Environmental Monitoring Center Station. Emisson standard for industrial enterprises noise at boundary: GB 12348—2008[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008: 10.

（责任编辑　杜亚勤）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net