

基于数字孪生的智能电厂体系架构及系统部署研究

范海东^{1,2,3}

- (1. 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121;
2. 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027;
3. 浙江省浙能工业信息工程省级重点企业研究院, 浙江 杭州 311121)

摘要: 在我国能源供给侧结构性改革和煤电生产清洁高效智能化的号召下, 在分析智能电厂研究和实践现状的基础上, 结合数字孪生理论和方法, 以工业大数据平台和管理云平台为核心, 将电厂生产经营活动及要素进行虚拟数字化, 构建了包括智能决策、智能监管、智能控制和智能设备的智能电厂体系架构, 覆盖了电厂设备、运行等生产经营的各个方面, 使电厂具备了全面感知、协同优化、预测预警和科学决策特性。

关键词: 智能电厂; 数字孪生; 全面感知; 协同优化; 预测预警; 科学决策

中图分类号: TP29

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201930

Research on architecture and system deployment of intelligent power plant based on digital twin

FAN Haidong^{1,2,3}

1. Zhejiang Zheneng Technology Research Institute Ltd., Hangzhou 311121, China
2. School of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
3. Zhejiang Zheneng Industrial Information Engineering Provincial Key Enterprise Research Institute, Hangzhou 311121, China

Abstract: Under the call of structural reform of energy supply and clean, efficient and intelligent coal-fired power production in China, based on the analysis of the research and practice status of intelligent power plant, combined with digital twin theory and methods, production and operation activities and elements of power plants were virtualized and digitized with the industrial big data platform and management cloud platform as the core, the intelligent power plant architecture were constructed including decision-making, intelligent supervision, intelligent control and intelligent equipment, which covered all aspects of production and operation of power plant equipment, so that the power plant had the characteristics of comprehensive perception, collaborative optimization, prediction and early warning and scientific decision-making.

Key words: intelligent power plant, digital twin, comprehensive perception, collaborative optimization, prediction and early warning, scientific decision-making

1 引言

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础, 由于人口众多和经济发展迅速, 我国的能源消费总量连续多年位居世界前列。我国的能源结构

是多煤、少气、贫油, 且风、光、水电资源和消费分布不平衡, 相应的发电能源也是以煤为主, 2017年煤电装机量为10.2亿千瓦, 占装机总量的58%, 从发电量来看, 占比更是高达67%, 而且在很长一段时间里我国还是以煤电为主进行电力生产、供应^[1]。

收稿日期: 2019-06-02; 修回日期: 2019-08-15

通信作者: 范海东, connich@163.com

基金项目: 浙江省重点研发计划基金资助项目 (No.2017C01082, No.2019C01048)

Foundation Items: Key R&D Projects in Zhejiang (No.2017C01082, No.2019C01048)

但为落实《巴黎协定》，在全球“弃煤”的大趋势下，中国也积极行动起来，推进能源供给侧改革，以提升能源转换效率和减轻环境污染。2016 年国家发展和改革委员会、国家能源局、工业和信息化部联合发布了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》，明确指出促进能源和信息深度融合，推进煤电生产清洁高效智能化，智能电厂的概念也随着国家能源转型提出的能源互联网应运而生。

近几年，随着云计算、大数据、物联网、移动互联网、三维可视化等技术的发展，在节能、降耗、减排政策要求和集约化、高效管理需求驱动下，我国很多发电企业对智能电厂的建设进行了探索，一些发电集团已经开始进行智能化电厂建设的前期规划、论证与实施，建设智能电厂已成为行业共识。

虽然我国部分发电企业在智能电厂领域进行了相关探索和尝试，但从目前国内智能电厂的建设和应用情况来看，其应用更侧重于智能信息集成展示层面，对节能降耗、提质增效的作用不强，偏离了智能生产的初衷，同时，很多项目的规划与实施往往是局部信息化系统、自动化系统的简单堆积，各系统之间缺乏紧密联系，很难从整体上、系统性上解决智能电厂实施中存在的问题^[2]。因此，本文将从智能电厂的内涵出发，运用数字孪生理念，提出智能电厂的整体框架，并结合智能电厂的应用实际和信息技术的特征，着重阐述智能电厂的系统部署模式。

2 智能电厂的概念及其发展

智能电厂的概念在提出的时候还没有具体的项目支撑，只是对未来发展前景的一种向往和要求。近年来，不少学者深入开展了有关研究，也有不少发电企业进行了具体实践探索，虽然目前还没有真正意义上的智能电厂具体落地，但也逐渐丰富和完善了智能电厂的内涵，行业共识的智能电厂建设目标已初步形成。

2.1 智能电厂的研究探索

目前业界对智能电厂的解释并不统一，我国相关权威机构也尚未对智能电厂做出严格定义和制定统一标准，但在世界各国对“第三次工业革命”新提法的刺激下^[3]，在国家“互联网+”行动的引导下，已有不少学者围绕智能电厂的概念和架构开展了深入研究。

中国自动化学会发电自动化专业委员会发布

的《智能电厂技术发展纲要》给出了智能电厂的定义，智能电厂是以现代信息技术、通信技术以及智能传感、执行、控制、决策技术等为基础的智能发电模式，可使电厂更高效、更安全、更环保。该文件还提出了智能电厂的 4 层体系架构：智能设备层、智能控制层、智能生产监管层和智能管理层^[4]。参考文献[5-6]认为智能电厂是一种具备自趋优、自适应、自恢复、自学习、自组织等特征的智能发电运行控制与管理模式，并完善和优化了《智能电厂技术发展纲要》提出的 4 层体系架构。参考文献[7]按照智能设备层、智能控制层和综合管理决策层进行架构划分。参考文献[8]则借鉴工业 4.0 参考架构模型（RAMI4.0）和美国工业互联网联盟（IIC）参考架构，从生命周期、系统层级和智能功能 3 个维度提出智能电厂系统参考架构。

从相关学者的研究情况来看，智能电厂随着先进信息技术的发展，进一步扩展了电厂的生产运营管理，提升了电厂的自动化、数字化、智能化水平，其中，智能电厂的核心技术和体系架构是研究关注的重点。

2.2 智能电厂实践探索

在专家学者推进理论研究的同时，各发电企业也紧跟工业化、信息化两化融合大潮，大力推进智能电厂的实施建设，部分信息工程公司也围绕智能电厂的需求开展了信息系统平台研究和示范工作，协助推进智能电厂建设。

大唐姜堰燃机热电有限公司^[9]围绕三维可视化故障诊断系统、三维数字化档案等 5 个功能模块推进实施。大唐南京发电厂^[10]规划了三维数字档案和可视化立体设备模型、锅炉 CT、智慧管控中心等 8 个功能模块。山西赵庄鑫光发电有限公司^[11]主要采用三维仿真、人员定位、在线诊断等技术，提高电厂的安全运营能力。华能南京金陵发电有限公司^[12]按照生产过程控制系统、厂级监控信息系统、管理信息系统和决策支持系统 4 层结构进行数字化电厂规划。

从部分正在实施和已经投运的电厂实际情况来看，目前正在推进实施的智能电厂更多地侧重于信息集成展示以及智慧管理等层面，尤其侧重于三维展示、人员定位等系列技术，依托三维模型、定位技术来提升信息化水平，提升现场管控水平。而在生产过程中智能化的应用很少，特别是很少利用智能电厂建设推进管理模式变革，未真正做到提质增效。

2.3 智能电厂的内涵

从目前关于智能电厂的研究以及实施推进情况来看，虽然研究者在智能电厂的定义描述上有所不同，体系架构方面也存在一些不同的理论看法，在实现方式上更是各有区别，但对智能电厂的核心要求已经有了初步的共识，那就是通过智能化改造，以自动化、数字化、信息化为基础，综合应用互联网、大数据资源，充分发挥智能化系统强大的分析处理能力，规范生产管理流程，提升生产管理水平，把握生产管理趋势，形成一系列智能化的生产管理模式，提高能源利用效率，推动节能减排。

智能电厂完全符合电厂自动化的发展趋势，从最近几十年电厂自动化技术的发展历史来看，电厂自动化经历了常规仪表控制、分布式控制系统（distributed control system, DCS）控制，再到厂级监视信息系统的应用，随着计算机技术的不断进步，又出现了就地控制电厂、自动化电厂、数字化电厂，电厂的生产力水平逐步提升^[13]。进入数字化时代，“互联网+”、大数据以及人工智能等新的信息技术将进一步提升电厂的自动化水平，推进电厂向智能化迈进，以实现“本质安全、高效清洁、人机协同、智慧决策”的电厂价值目标。这样智能电厂就是一个全面、整体、多维度的生产经营管理系统。结合管理学理论，可以将智能电厂按照智能设备层、智能控制层、智能监管层以及智能决策层 4 个层次进行划分。智能设备层和智能控制层着重执行，具备全面感知和协同优化特性；智能监管层和智能决策层着重管理，具备预测预警和科学决策特性，具体层次架构与对应特性如图 1 所示。

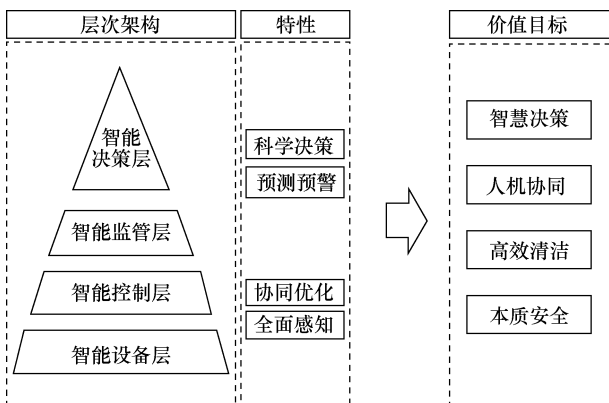


图 1 智能电厂层次架构与特性

总体来说，智能电厂就是在数字化电厂的基础上，利用新一代信息技术、人工智能技术、检测和

控制技术加强信息化和智能化的融合，清楚掌握生产经营流程、科学制订生产经营计划、提高生产经营过程的可控性、减少人工干预的智能化新型电厂。

3 数字孪生研究及应用

近年来，随着智能化进程的日益加速，为实现物理世界与信息世界的交互与融合，“数字孪生”的概念应运而生，并不断地快速演化发展，对很多行业产生了巨大的推动作用。虽然数字孪生当前在电力行业中的应用较少，但借鉴其在航空航天、汽车制造、油气管道等行业的应用，将有利于推动智能电厂的建设和发展。

3.1 数字孪生研究进展

数字孪生这一概念最早出现在 2003 年，由 GRIEVES^[14]在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程中提出。参考文献[15]将数字孪生定义为一种具有实时同步、忠实映射特性，能够实现物理世界与信息世界交互、融合的技术手段。虽然在 2017 年之前关于数字孪生的研究较少，且主要集中在概念讨论，但在 2017 年之后研究数量大量增长，研究者除了继续对概念进行讨论外，还提出了使用案例对数字孪生进行验证并提出了新的应用框架与方式。自 2017 年以来，全球权威的 IT 研究与顾问咨询公司 Gartner 连续两年将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一。

在数字孪生概念不断完善和发展的过程中，研究者主要针对数字孪生的建模、物理信息融合及服务应用等开展了研究，重点在分析数字孪生和相关行业关系、建立虚拟模型、借助孪生数据融合分析、服务应用准则等方面^[16-18]。可以看出数字孪生的内涵就是构建一个数字孪生体，其最终表现形式是对物理实体的完整、精确的数字化描述，可用来对物理实体进行模拟、监控、诊断、预测及控制。随着人工智能应用技术的深度发展^[19-20]，在对孪生体深化应用方面，结合平行控制理论，形成了伴生现实系统的平行建模、平行预测、平行执行数字四胞胎平行演化架构^[21]，并将能源发电延伸到了社会能源的平行系统中^[22]。

3.2 数字孪生应用实践

在研究者围绕数字孪生开展深入研究的同时，数字孪生理念也逐渐被美国通用电气、德国西门子等企业所接受，并应用于技术开发及生产，形成了 Predix、Simcenter 3D 等数字孪生开发软件工具，引

起了学术界、工业界及新闻媒体的广泛关注^[23-26]。

同时也有很多行业进行了数字孪生的应用实践。在宝马丁格芬智能工厂中，人工监控被基于数字孪生的智能数据分析系统（smart data analytics system）取代；美国空军^[27]提出利用数字孪生概念，进行飞机的结构寿命预测；中国石油天然气集团有限公司^[28]利用数字孪生推进智慧管网建设；也有文献提出基于数字孪生概念的电厂发电机组智能健康管理^[16]。

3.3 智能电厂的数字孪生应用

企业通过建立数字孪生体进行模拟仿真和预警，可以减少非故障停车时间，同时也能不断降低员工的工作强度^[15]。智能电厂也完全可以应用数字孪生体提升电厂的智能化水平，从而达到减人增效、节能减排的目的。电厂作为技术密集型、高自动化的现代生产企业，在应用数字孪生方面有很好的基础，从数字孪生的内涵和 DCS 的体系结构来看，局部生产过程通过 DCS 实现也可以算一种低级别的数字孪生。DCS 通过 I/O 输入模块，采集来自物理现场的信号，并且在 DCS 中进行生产过程的建模，根据物理模型的控制要求，针对采集的信号得出相应的控制参数，最后通过 I/O 输出模块对现场进行执行控制。生产过程数字孪生如图 2 所示。

对于整体的智能电厂而言，随着信息技术的发展，现场的模型也不再局限于生产过程的控制内容，还涉及更多的管理优化内容，因此该数字孪生将进一步扩大，通过数据桥梁连通虚拟电厂和物理电厂。物理电厂的内容不但包括设备、环境等资源，还包括

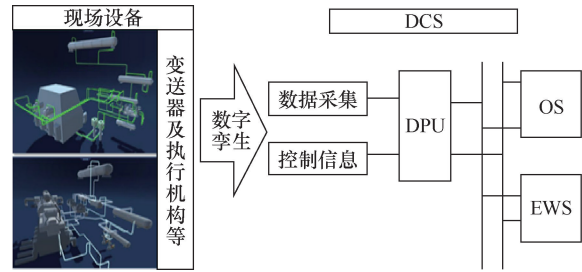


图 2 生产过程数字孪生

人的行为和相应的业务标准等，因此在数据虚拟电厂环境中不但要实现设备的监测、预警、诊断、试验，优化其运行状态，更要结合虚拟环境的人、机、物、法、环整体多维度分析，对于设备、运行、安全等各种管理自动提出决策，并实现管理控制，全面提升电厂智能化水平。智能电厂数字孪生如图 3 所示。

4 智能电厂体系架构及系统部署

综合参考有关智能电厂内涵和智能电厂的数字孪生应用，从智能电厂的核心能力要求出发，结合具体的信息系统层次结构和国内电厂组织结构划分，基于数字孪生理论，利用电厂生产运行数据进行相关模型构建和应用，可以在智能设备层、智能控制层、智能监管层和智能决策层 4 层架构上进一步完善智能电厂的体系架构模型，同时针对电厂的具体智能化要求部署相应的业务应用模块。

4.1 智能电厂核心能力

智能电厂的核心能力就是智能化，智能化有两方面的含义：一方面就是采用“人工智能”的理论、

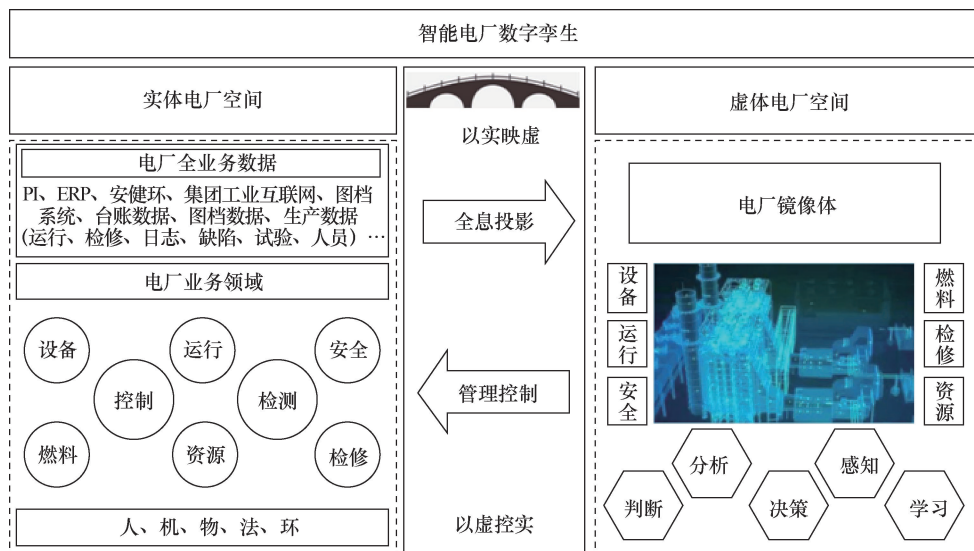


图 3 智能电厂数字孪生

方法和技术处理信息与问题，另一方面就是具有“拟人智能”的特性或功能，例如自主性、主动性、敏感性、机动性^[29]，即具有泛在感知、自诊断、自校正、自修复、自寻优、自协调、自组织、自学习等能力。智能电厂核心能力如图 4 所示。

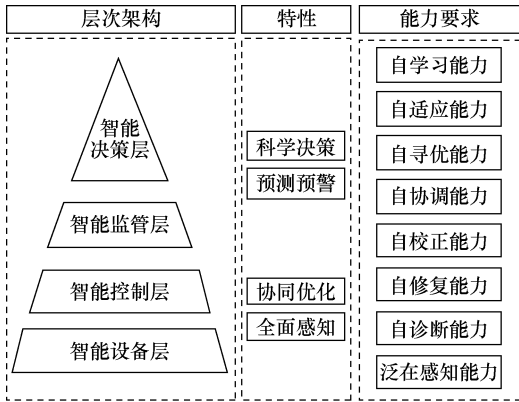


图 4 智能电厂核心能力

- 智能设备层将突破传统仪表和控制装置，能够全面采集现场信息，并对采集的信息进行诊断。
- 智能控制层将突破传统的 DCS，具备各种

复杂计算和修正误差的数据处理能力。

- 智能监管层将突破传统的安全仪表系统 (safety instrumented system, SIS)，具备设备运行状态的多维度分析能力，能灵活改变和扩展功能。

- 智能决策层具有学习能力和自适应能力，即通过与环境的相互作用，不断学习、积累知识，使自己能够适应环境变化。

4.2 智能电厂体系架构

要实现智能电厂的核心能力，需要充分应用当前的云计算、大数据、物联网、移动应用等先进信息技术，在发电厂控制系统、厂级监控系统、管理信息系统、辅助监控系统等基础上，进行数字孪生建模、信息物理融合、交换与协同，促进数字孪生的落地应用，必须抓住数字孪生的数据和模型两个核心，以工业互联网平台、管理云平台 and 电厂 SIS 数据库为支撑，在智能设备层、智能控制层、智能监管层和智能决策层构建符合智能电厂要求的模型，形成智能电厂生产与管理系统，实现发电过程的全面感知、协同优化、预测预警和科学决策。智能电厂体系架构如图 5 所示。

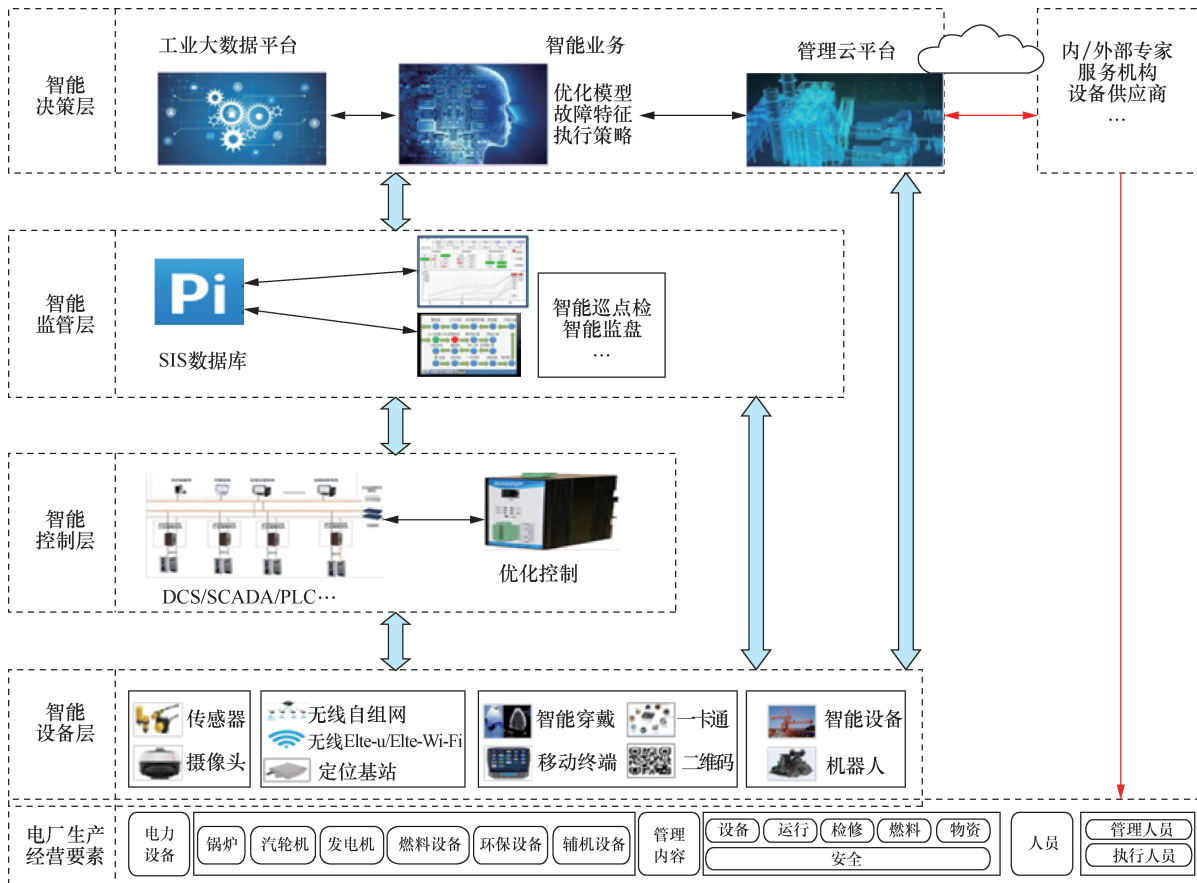


图 5 智能电厂体系架构

(1) 智能设备层

智能设备层与电厂生产经营要素紧密融合,这是物理世界与虚拟世界交互和协同的关键,也是数字孪生的关键,要实现全面感知,主要通过先进的测量技术,将电厂所有的设备状态、工艺参数、管理过程及环境条件转换为数字信息,并且能按照自诊断的要求对其进行相应处理和高效传输。同时也能接受智能控制层、智能监管层、智能决策层的指令,将指令准确解析并传达到相对应的电厂生产经营要素,从而实现少人干预的闭环控制要求。

(2) 智能控制层

智能控制层要实现电厂各工艺过程的智能控制,要将生产工艺进行建模,重点是物理实体的行为模型和规则模型,构建生产工艺的数字孪生体,主要通过 DCS 自有的相关高级算法程序,结合边缘计算等先进信息技术,针对工艺特点,形成自适应控制、预测控制、模糊控制、神经网络控制等具体程序,能综合智能设备层采集的信息和智能监管层的指令要求进行协同优化,形成符合电厂安全、经济、环保要求的控制指令,使电厂在不同的燃料和环境条件下的安全性、经济性、环保性达到最佳。

(3) 智能监管层

智能监管层的重点是实现电厂设备资产的智能化管理,要在生产工艺的基础上,以厂级监控信息系统为核心,汇集、融合全厂生产过程与管理的数据与信息,实现厂级能效对标与考核、运行管理、智能巡点检、设备健康管理、设备远程诊断等预测预警功能,在电厂层级实现发电厂的闭环、自组织的精细化管理。此时建模的重点是设备的物理模型和运行维护的规则模型,虚拟模型对应的物理实体包括设备资产本身以及维护服务行为,智能监管层接收的输入信息包括来自控制层的生产实时数据、来自智能设备层的现场实时信息以及来自智能决策层的执行策略和优化模型信息等。

(4) 智能决策层

智能决策层通过生产、运营系统提供的海量数据开展大数据应用及相关模块的开发,促进管理数据与生产数据之间的相互融合,实现辅助决策、仓储成本分析、智能供应链支持、绩效评价等科学决策,从而提升整个集团的精细化管理水平。智能决策层的核心是工业大数据平台和管理云平台,智能决策层加上智能监管层基本上将电厂现场的所有生产经营要素都进行了数字化,是真正意义上的数

字孪生。在这个层级,生产、运行、经营的管理行为等都形成了数字孪生体,甚至包括智能监管层的模型构建行为。

4.3 智能电厂系统部署

智能电厂基于现代先进信息技术发展而成,其核心是依托云计算、大数据、物联网等技术进化而形成的信息系统和装备,智能电厂的体系架构落地最终还是落实到包含工业大数据平台在内的信息系统上。通过相应的现场设备改造和信息系统开发,才能真正完成智能电厂的建设,通过数字孪生形成智能电厂生产经营模型,最终达到本质安全、高效清洁、人机协同、智慧决策的目标。智能电厂的系统部署以集团级数据中心(工业大数据平台、管理云平台)和厂级数据中心(SIS 数据库)为核心,按照智能设备层、智能控制层、智能监管层以及智能决策层 4 个层级,根据电厂实际情况进行优化调整。智能电厂系统部署如图 6 所示。

- 智能设备方面重点部署先进的监测设备,如包括入炉煤质^[30]、锅炉入炉煤粉流量、烟气含水量^[31]等机组重要参数的高精度的软测量系统、火焰图像频谱分析系统;工业无线和全厂 Wi-Fi,可提升各层级的数据交互和融合能力;使用智能机器人完成一些高劳动强度的重复操作和高风险的操作等。

- 智能控制方面着重满足电厂安全、经济、环保多目标优化控制要求,重点部署燃烧优化、环保优化、锅炉吹灰优化、制粉系统优化等节能环保优化控制算法和系统;在燃料区域结合智能设备改造,实现燃料部分工艺过程无人值守;对于部分设备通过智能监盘系统部署实现无人值守;通过进阶生产规划及排程(advanced planning and scheduling, APS)系统实现机组级自启停。

- 智能监管方面着重关注生产过程和设备健康管控,可以智能化地实现预测预警,智能两票、智能安全准入系统可以强化现场维修作业的安全管理;智能巡点检可以进一步补充完善现场设备的健康参数;智能视频监控可以及时传送现场的异常情况。

- 智能决策方面则按照电厂管理职责的分工,通过集团数据中心围绕设备、运行、燃料、安全、物资、培训、档案的智能化管理开发相应的系统,建立相应的管理模型,融合生产数据和管理信息,最终实现科学决策。

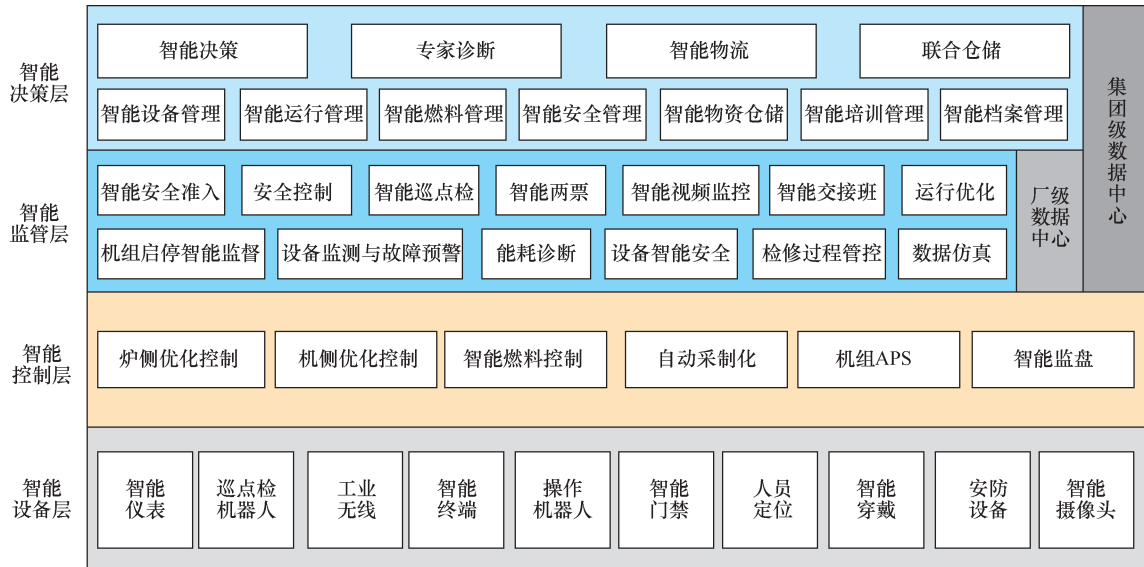


图6 智能电厂系统部署

5 结束语

智能电厂的核心在于生产经营过程的智能化，本文利用数字孪生方法将生产经营要素和过程全息投影到由工业大数据平台、管理云平台融合的集团级数据中心，按照决策、监管、控制和设备4个层级部署相应的智能化系统，覆盖设备、运行、燃料、物资等生产经营方面，从而实现了智能电厂全面感知、协同优化、预测预警和科学决策的目标，更好地实现了电厂的节能降耗、减人增效、灵活调节和安全管控。

参考文献：

[1] 朱成章. 试论煤电在中国的不可替代性[J]. 中外能源, 2016, 21(2): 14-18.
 ZHU C Z. A discussion on why coal is irreplaceable in power generation in China[J]. Sino-Global Energy, 2016, 21(2): 14-18.

[2] 屠学伟, 郑亚锋. 智慧电厂建设探讨[J]. 自动化博览, 2019(1): 29-31.
 TU X W, ZHENG Y F. Discussion on construction of wise power plant[J]. Automation Panorama, 2019(1): 29-31.

[3] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命[M]. 北京: 中信出版社, 2017.
 RIFKIN J. The third industrial revolution[M]. Beijing: China CITIC Press, 2017.

[4] 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.
 Chinese Association of Automation. Technology development program in smart power plant[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.

[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 J Z. The tendency of the fourth industrial revolution[N]. China Energy News, 2016-07-25.

[6] 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, 6758.
 LIU J Z, HU Y, ZENG D L, et al. Architecture and feature of smart power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6463-6470, 6758.

[7] 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 X M, CHEN F, ZENG W D, et al. Concept and structure of intelligent power stations[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 10-13.

[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, 42.
 ZHANG J B, ZHOU S W. Study on the concept of the smart power plant and its architecture model[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 2-7, 42.

[9] 南京科远自动化集团股份有限公司. 南京科远助力姜堰电厂实现智能化运营[J]. 自动化博览, 2017(9): 58-61.
 Nanjing SCYON Automation Group Co., Ltd. Nanjing SCYON helps jiangyan power plant implement intelligent operation[J]. Automation Panorama, 2017(9): 58-61.

[10] 余娜. 煤电样本：大唐南电大步跨入智慧 1.0[J]. 能源, 2018(6): 27-29.
 YU N. Coal power sample: datang Nanjing power plant striding into wisdom 1.0[J]. Energy of China, 2018(6): 27-29.

[11] 李志刚. 智慧电厂系统解决方案——以鑫光发电有限公司为例[J]. 工业技术创新, 2017, 4(3): 170-172.
 LI Z G. A perfect solution for intelligent power plant: a case study on Xinguang power generation Co., Ltd.[J]. Industrial Technology Innovation, 2017, 4(3): 170-172.

[12] 高鹏里. 智能化电厂建设探索[J]. 市场周刊(理论研究), 2013(11): 7-9, 74.
 GAO P L. The exploration of intelligent power plant construction[J]. Market Weekly, 2013(11): 7-9, 74.

[13] 李子连. 火电自动化与仪器仪表发展综述[J]. 中国仪器仪表,

- 2006(11): 25-31.
- LI Z L. An overview of automation and instrumentation development in thermal power plants[J]. *China Instrumentation*, 2006(11): 25-31.
- [14] GRIEVES M. PLM-beyond lean manufacturing[J]. *Manufacturing Engineering*, 2003, 130(3): 23-25.
- [15] 任川, 陈磊. 建立在智能工厂基础上的企业数字孪生体[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2018(21): 127-128.
- REN C, CHEN L. Enterprise digital twins based on smart factories[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2018(21): 127-128.
- [16] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018(1): 1-18.
- TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018(1): 1-18.
- [17] 张龙. 从智能制造发展看数字孪生[J]. *软件和集成电路*, 2018(9): 59-62.
- ZHANG L. Digital twin: from the development of intelligent manufacturing[J]. *Software and Integrated Circuit*, 2018(9): 59-62.
- [18] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4): 753-768.
- ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4): 753-768.
- [19] 郑南宁. 人工智能新时代[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 1-3.
- ZHENG N N. The new era of artificial intelligence[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 1-3.
- [20] 张钹. 人工智能进入后深度学习时代[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 4-6.
- ZHANG B. Artificial intelligence is entering the post deep-learning era[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 4-6.
- [21] 刘腾, 王晓, 邢阳, 等. 基于数字四胞胎的平行驾驶系统及应用[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 40-51.
- LIU T, WANG X, XING Y, et al. Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 40-51.
- [22] 张俊, 王飞跃, 方舟. 社会能源: 从社会中获取能源[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 7-20.
- ZHANG J, WANG F Y, FANG Z. Social energy: mining energy from the society[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 7-20.
- [23] 秦晓珠, 张兴旺. 数字孪生技术在物质文化遗产数字化建设中的应用[J]. *情报资料工作*, 2018, 39(2): 103-111.
- QIN X Z, ZHANG X W. Application of digital twin technology in the digital construction of material cultural heritage[J]. *Information and Documentation Services*, 2018, 39(2): 103-111.
- [24] RIOS J, HERNANDEZ J C, OLIVA M, et al. Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: literature review and implications in an aircraft[C]//The 22nd ISPEInc International Conference on Concurrent Engineering, Jul. 20-23, 2015, Delft, The Netherlands. [S.l.:s.n.], 2015: 657-666.
- [25] TIMOTHY D W, MARK B. Is digital thread/digital twin affordable? A systemic assessment of the cost of DoD's latest Manhattan Project[J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 114: 47-56.
- [26] GE. GE digital twin: analytic engine for the digital power plant[R]. 2018.
- [27] TUEGEL E J, INGRAFEAA R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011: 1687-5966.
- [28] 李柏松, 王学力, 王巨洪. 数字孪生体及其在智慧管网应用的可行性[J]. *油气储运*, 2018(10): 1081-1087.
- LI B S, WANG L X, WANG J H. Digital twin and its application feasibility to intelligent pipeline networks[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2018(10): 1081-1087.
- [29] 杜军平, 涂序彦. 拟人智能管理系统的研究[C]//2003 年中国智能自动化会议, 2003 年 12 月 15-17 日, 中国香港. 2003: 153-158.
- DU J P, TU X Y. Research on anthropomorphic intelligent management system[C]//CIAC 2003 Dec.15-17, 2003, Hong Kong, China. 2003: 153-158.
- [30] ZHAO Z, ZENG D L, HU Y, et al. Soft sensing of coal quality[J]. *Thermal Science*, 2015, 19(1): 231-242.
- [31] 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 T X, GUO G Q. Intelligent hybrid prediction method of the flue gas oxygen content in powder plant[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(8): 1826-1833.

[作者简介]



范海东 (1979-), 男, 浙江浙能技术研究院有限公司高级工程师, 主要从事能源技术、智能化、自动化技术研究工作。