

压气储能电站智能建造体系及其关键技术

赵星源¹, 谢芳毅², 刘乙学³, 陈昉¹, 崔建华², 韩少峰³, 何青³

(1. 中能建数字科技集团有限公司, 北京市 海淀区 100044; 2. 北京洛斯达科技发展有限公司, 北京市 海淀区 100044; 3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Intelligent Construction System and Key Technology for Compressed Air Energy Storage Power Plant

ZHAO Xingyuan¹, XIE Fangyi², LIU Yixue³, CHEN Fang¹, CUI Jianhua², HAN Shaofeng³, HE Qing³

(1. China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100044, China; 2. Beijing North-Star Technology Development Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100044, China; 3. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要:【目的】压气储能(compressed air energy storage, CAES)是利用电能和压缩空气势能相互转化来平衡电网波动的新型储能系统。CAES电站建造及运行相关经验的积累对CAES技术的发展具有重要意义。针对建造过程中设计与现场信息传递效率低、施工方管控难度大、项目整体流程监督难等问题,提出了一种适用于CAES电站的全流程智能体系。【方法】首先,分析CAES电站的建造流程,找出其工程特点。其次,围绕CAES电站从设计到运维的全过程,在空间和时间维度构建CAES电站的全流程智能建造体系。最后,在设计阶段提出正向设计出图等关键技术;在装备制造阶段提出设备虚拟预组装等关键技术;在施工阶段提出5D施工管理等关键技术;在运维阶段提出面向运维的数据交付等关键技术。【结果】对某300 MW级CAES示范工程的验证结果表明,CAES电站全流程智能体系的构建具有合理性,且关键设备及软件的应用为项目提供了技术支撑。【结论】通过CAES电站全流程智能体系及其关键技术,打通了电站建造各阶段的互通链条,实现了CAES电站的全生命周期信息管理。

关键词: 储能; 压气储能(CAES); 智能建造; 正向设计; 数字化交付

ABSTRACT: [Objectives] Compressed air energy storage (CAES) is a new type of energy storage system that utilizes the mutual conversion of electrical energy and compressed air

potential energy to balance the fluctuation of power grid. The accumulation of relevant experience in the construction and operation of CAES power station is of great significance to the development of CAES technology. In view of the low efficiency of information transfer between the designer and the site, the difficulty of construction control, and the difficulty of overall project process supervision, a whole-process intelligent system suitable for CAES power station was proposed. [Methods] Firstly, the construction process of CAES power station was analyzed and its engineering characteristics were found out. Secondly, based on the whole process from design to operation and maintenance of CAES power station, the whole process intelligent construction system of CAES power station was constructed in space and time dimensions. Finally, in the design stage, the key techniques such as forward design drawing were proposed. In the stage of equipment manufacturing, the key technologies such as virtual pre-assembly of equipment were proposed. In the construction stage, the key technologies such as 5D construction management were proposed. In the operation and maintenance stage, the key technologies such as data delivery oriented to operation and maintenance were proposed. [Results] The verification results of a 300 MW CAES demonstration project show that the construction of the whole process intelligent system of CAES power station is reasonable, and the application of key equipment and software provides technical support for the project. [Conclusions] Through the intelligent system of the whole process of CAES power station and its key technologies, the interworking chain of each stage of power station construction is opened, and the information management of the whole life cycle of CAES power station is realized.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB0905902); 中国能源建设股份有限公司重大科技项目(CEEC2021-KJZX-07)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2020YFB0905902); Science and Technology Foundation of CEEC (CEEC2021-KJZX-07).

KEY WORDS: energy storage; compressed air energy storage (CAES); intelligent construction; forward design; digital delivery

0 引言

随着“双碳”目标的提出，新能源得到快速发展^[1-4]。国家能源局的相关报告显示，截至2023年上半年，全国新能源装机达到13.22亿kW，发电量达到1.34万亿kW·h^[5]。但是，新能源具有的波动性、随机性和间歇性会导致发电量短期大幅度变化，这是由于大规模、高比例新能源接入电力系统会影响电网稳定性，降低电能质量，因此需要采取措施平衡电力系统的供需差异。储能可以存储冗余电量并在电力短缺时发电，是解决这一需求的途径之一^[6-10]，其中压气储能^[11] (compressed air energy storage, CAES)作为新型物理储能受到广泛关注。压气储能电站在用电波谷时段通过压缩机将多余电能以高压空气的形式进行储集，在用电波峰时段利用高压空气膨胀推动透平发电^[12]。压气储能的优势在于其较好的适应性，储气装置可以被放置在地下洞穴或已经存在的地下设施中，从而最大程度地减少占地空间^[13]。现如今对压气储能的研究已经从试点逐步转为商业应用。2016年在贵州毕节，中科院陈海生团队研究并建造了压气储能国家示范电站，系统发电功率为10 MW，效率高达60.2%^[14]。2021年在江苏金坛，中国第一个储能功率为60 MW、储能容量为300 MW·h的先进绝热压气储能电站成功运行。该电站采用“非补燃”技术将效率提高到60%以上，实现了世界首次压缩空气“零碳发电”^[15]。伴随着越来越多的压气储能项目规划立项和开工建设，如何更高效、安全地建设压气储能电站已成为当前的研究热点。

智能建造是一种利用数据分析和自动化工具来优化建筑物全生命周期的建造方法，涵盖从设计、施工、运营到维护和拆除的各个阶段。将该方法引入压气储能电站建设领域可以降低电站建设成本，提高电站建设效率^[16]。众多学者针对智能建造领域开展了广泛研究。尤志嘉等^[17]呈现了一个智能建造理论体系的框架，揭示了其科学内

涵并展示了其内在逻辑联系。陈珂等^[18]提出了新一代智能建设体系的信息技术，其特点是数字化、网络化和智能化。樊启祥等^[19]提出一套智能构建的闭环控制理论，在定量描述的基础上对新的建设活动进行感知、分析、控制和持续优化。毛超等^[20]认为智能建造核心逻辑是基于建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 和物料清单 (bill of material, BOM) 的数据统一。其中BIM是智能建造的核心工具之一，是一种数字化的建筑信息模型，它整合了建筑物的几何形状、构造、材料属性和各种数据，可以为设计、建造和运营阶段提供全面支持^[21]。BIM可以提高协作效率、减少错误、优化资源使用，并在整个建筑生命周期中支持智能决策^[22]。

上述研究分别从智能建造的理论框架、信息处理、控制策略和核心逻辑等角度开展了论述，但都停留在理论研究阶段，对于智能建造的实际应用并没有涉及。压气储能作为新型物理储能，在其建造体系中融入智能建造具有很大的研究价值，因此，本文将智能建造融入压气储能电站的建造体系中。通过各种智能设备及关键技术从空间及时间各个维度辅助压气储能电站的建设及运维，使得电站建造的各个环节衔接紧密，加强了电站建造过程的信息传递。此外，探究了压气储能电站建设领域中使用智能建造技术对电站建设成本及建设效率的影响。

1 压气储能电站工程特点分析

与火电站等常规发电系统相比，压气储能电站的工程建造有以下优点：压气储能电站的介质为空气，电站运行中没有大量化石能源的参与，因此，建造过程中不需要考虑燃料供应及排放物处理，对周围环境的影响小；压气储能电站结构简单、易维护，如压缩机组、膨胀机组、换热器和储气设备等主要设备布置集中，在电站维护阶段，只需定期检查设备和储气装置的状态；压气储能电站可以实现模块化施工和积木式组装，百兆瓦级压气储能电站可以在小型压气储能电站的基础上积木式地逐年扩建，这种建造方法有利于电站设备更新换代^[23]。但是，压气储能电站在建

造过程中也有一些难点，例如储气设备密封不严、压缩机及膨胀机选型困难等，这些问题都需要建造电站的各单位多次研究探讨。为了提高工作效率并降低成本，本文考虑在压气储能电站建造工程中引入智能建造技术。

2 压气储能电站的智能建造体系

压气储能电站的智能建造体系可分为空间维度和时间维度。

2.1 压气储能电站空间维度体系

压气储能电站的智能建造空间维度体系可分为 5 个基本层次，分别为压气储能空间层、感知层、传输层、分析层和决策层，如图 1 所示。压气储能空间层是物理层；感知层负责感知和处理对象；传输层将感知层获取的信息传送至分析层的储存空间；在分析层中分析处理信息；决策层的各服务子层调用分析层，智能表达处理结果，并将决策信息反馈回 CAES 空间层。

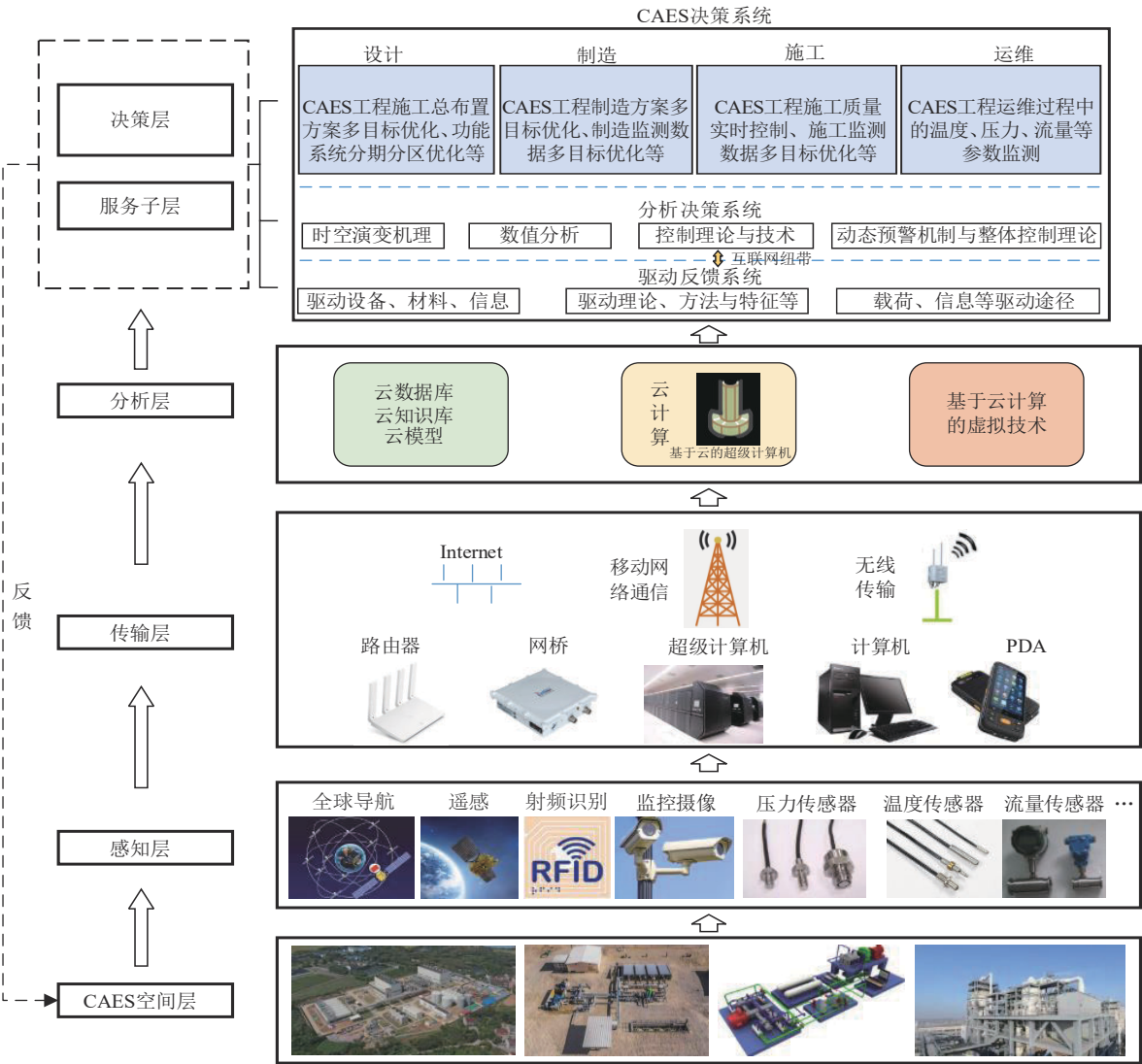


图 1 压气储能电站空间维度体系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CAES power plant in spatial dimension system

2.1.1 感知层

感知层涵盖了数据采集、传感器感知、实时监测等技术，目的是获取压气储能电站的数据和信息并将其数字化，便于进行分析和决策。

在压气储能电站智能建造的感知层，通过各种感知设备可以实现电站建设过程中各种数据参数的实时监测，具体实现的功能^[24]如表 1 所示。

表1 感知层的功能及优点

Tab. 1 Functions and advantages of the perception layer

项目	功能	优点
全球导航	导航定位,监测电站设备的移动轨迹	精度高,实时性强
遥感	通过卫星、飞机等远距离采集地表信息	信息多样化,数据范围广
射频识别	标识物体、监测物品运输、库存管理等	附加射频识别标签以实现实时追踪
流量传感	测量液体或气体的流量	支持资源管理和流程优化

在压气储能电站项目中,利用固定式摄像头、移动布控球、AR全景摄像头等监控设备,建立了分布式现场视频监视体系,全面覆盖主要施工作业风险点。利用先进传感技术、数字化技术等实现盐穴地面沉降监测、施工环境监测及井筒健康监测。

2.1.2 传输层

传输层涵盖了数据传输、通信网络等技术,旨在实现电站各个基础设施之间的数据交换、共享和处理。传输层通过连接各种智能设备和系统,实现数据的自动传输、集成和分析,从而实现更

高层次的自动化和智能化。

压气储能电站智能建造的传输层可以自动传输数据并实时反馈,通过硬件间的信息交换可以实现的具體功能如表2所示。压气储能电站的传输层具有通信和电力2种协议。与通用的通信协议相比,电力传输协议用于传输与电力系统相关的数据,如电流、电压、功率因数等;电力系统需要实时监测和响应,因此电力传输协议对数据的精度要求较高;电力传输协议强调数据的安全性、机密性和完整性,需要对通信身份进行严格验证。

表2 传输层的功能及优点

Tab. 2 Functions and advantages of the transport layer

项目	功能	优点
自动数据传输	设备和系统间自动传输数据	无需人为干预即可实现数据的即时交换
通信协议	保障设备间通信协议	确保可以相互交流并理解传输的数据
电力传输协议	协助电网监控、管理和优化数据	准确安全,具有实时性
本地网络	建立本地网络	使智能设备能直接互相通信
自主协作	共享数据、合作控制	智能化协作办公
实时反馈	实时反馈和响应	支持系统快速调整优化

传输层可以通过智能设备和系统之间的高效连接来实现实时的数据共享和处理。在300 MW级压气储能电站示范项目中,数据中心采用微模块机房方案,基于超融合服务器方案搭建云数据中心,基于5G+Wi-Fi网络组建一张低时延、高带宽的多网融合全覆盖网络,开展5G视频监控等典型业务场景技术验证及深度应用。相关网络架构分为管理信息网和生产控制网。管理信息网将传感终端、视频监控终端、定位设备的数据通过以太网传输到智慧施工管理信息平台层。生产控制网将表计设备、控制设备等的数据通过工控网传输到生产控制平台层。按照预期,管理信息大区将满足建造数字化管理、运营数字化管理、三维数字化移交等应用,生产信息大区将满足生产实时数据存储和镜像等应用。

2.1.3 分析层

分析层涵盖了数据分析、实时处理、模型预测等技术。该层从感知层和传输层收集的实时数据中提取有价值的信息和趋势,以帮助电站工作人员及时做出决策,优化电站管理。

通过云数据库及云计算,分析层可以实现的功能如表3所示。分析层的目标是利用实时数据和分析技术,实现对电站及其相关设施的即时监测、预测和优化。这种实时性能够帮助用户迅速做出决策,及时应对变化,提高运行效率和资源利用率。在300 MW级压气储能电站示范工程项目中,通过云计算实现了工程标段划分、人员智能分析、智能告警、安全风险统计、环境敏感点核查等功能。其中:工程标段划分对现场施工进度进行实时分析,通过记录工程节点,实现各方施工进度调整及相关

变动；人员智能分析包括考勤人员统计、特种作业人员分类及统计、请/休假人员统计、各项目部请/休假情况、考勤人数趋势分析等方面；智能告警包括烟火监测、陌生人识别、未戴安全帽、越界侦测等；安全风险统计对作业施工中发生的异常工况进行统计，并对异常工况进行实时分析。

表3 分析层的功能及优点
Tab. 3 Functions and advantages of the analysis layer

项目	功能	优点
实时监测	监测电站及设施的实时状态,防止出现储罐压力过高等问题	及时发现能量损失,提高效率
实时预测	基于实时数据和预测模型,预测未来电站的发电情况	提前探知问题,节省成本
实时报警	当发现电站的监测数据出现异常情况时,及时通知相关人员	弥补人工监控的不足,减少系统误报率和漏报率
实时数据可视化	将电站输出功率等参数以图表等形式呈现	帮助工作人员直观了解电站情况

2.1.4 决策层

决策层涵盖了人工智能^[25-27]、决策支持等技术，旨在分析从感知层到分析层的数据，为各种决策提供智能化支持和指导。

决策层的功能如表4所示，决策层的决策能反馈到设计、制造、施工及运维各个阶段。在

300 MW 级压气储能电站示范工程项目中，智能决策依托“大云物智移”对实时监测到的海量数据进行分析，自主生成问题解决综合最优方案，如在设备(如压缩机、膨胀机等)运行过程中发生严重工况预警时，大数据分析平台能及时做出判断，并做出智能决策，实现设备的自主启停。

表4 决策层的功能及优点
Tab. 4 Functions and advantages of the decision level

项目	功能	优点
设计	数字化建模、管线综合设计、属性参数和估值可视化、地下管网设计等	可视化设计图纸,降低设计难度
制造	实现智能化管理,包括重要设备虚拟预组装、管道焊缝探伤等	加快制造速度,降低零部件误差风险
施工	施工质量实时管理、人员定位及体征感知、作业环境监测	降低压气储能电站施工危险,保障现场人员安全
运维	设备状态监测、设备拆解智能培训、全生命周期信息库、性能计算与分析	完善压气储能电站管理体系,提高电站工作效率

2.2 压气储能电站时间维度体系

压气储能电站时间维度体系可分为4个阶段，分别为智能设计、智能制造、智能施工及智能运维，如图2所示。

1) 在智能设计阶段，对电站总体规划做出智能设计方案，包括对电站的普通构件进行拆分设计和对特殊部件进行单独设计或定制，最终得出设计物料清单及施工方案。

2) 在智能制造阶段，工厂根据物料清单及施工方案数据包进行生产准备。生产准备包括所需产品信息、工艺信息和资源信息。完成信息处理后进行设备生产，包括基础材料的选购和特殊器材的生产。

3) 在智能施工阶段，施工过程分为现场施工及数字孪生。通过可视化模拟、进度监控、AI识别和机器人施工等技术，收集施工现场的实时数据并导入数字孪生系统。系统内包括建设一体化平台、资源管控平台、决策指挥平台、勘测平台

及3D模拟实验平台等。该模型完全模拟了物理空间的建筑实体，可对施工现场的数据进行分析，从而优化施工安排。

4) 在最终的智能运维阶段，将施工阶段的三维数字信息进行处理，通过BIM等平台实现电站智能巡检、能耗管理等功能。

3 压气储能电站智能建造的关键技术

3.1 智能建造关键技术分类

在压气储能电站的建造体系中，应用智能建造相关的关键技术可以加速电站建造速度并提高电站建设的准确性和安全性。将这些关键技术归纳为智能设计、智能制造、智能施工及智能运维4个阶段，如图3所示。

这些关键技术可通过BIM平台进行统一管理与应用。在设计阶段，将关键技术的相关物理模型输入BIM软件；在制造和施工阶段，通过BIM平台实现关键技术的实时数据传输及交互；在运

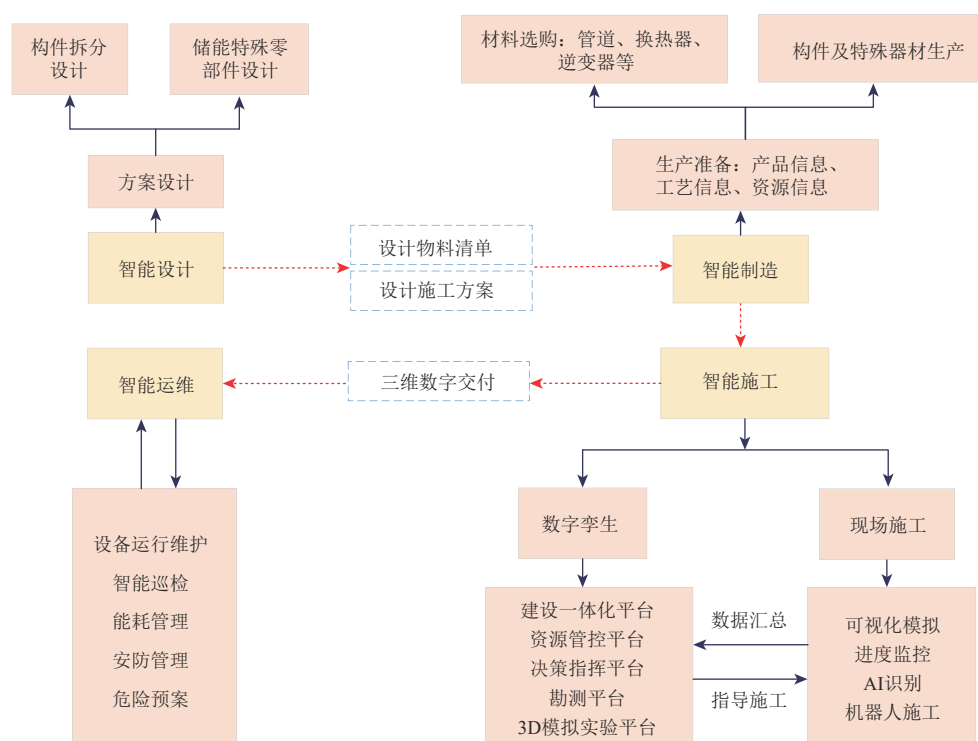


图2 压气储能电站时间维度体系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CAES power plant in time dimension system



图3 压气储能电站智能建造体系的关键技术

Fig. 3 Key technologies of CAES power plant in intelligent construction system

维阶段，将BIM平台与其他平台数据相结合，可以辅助电站运行^[28]。

3.2 智能设计阶段

在智能设计阶段，压气储能电站智能建造体系的关键技术主要包括以下5个部分。

1) 三维数字化建模。使用BIM等三维建模软件，对压气储能电厂的地质、土建、机组本体、地下管网等电厂设备及建筑物进行三维建模，构

建整个电厂的1:1整体三维模型^[29]。

2) 声纳测腔反射解译。利用声纳向储气室的腔体边界发射声波，通过时间差曲线将声波由发射探头经反射返回接收探头的时间差记录下来，从而获得储气室的外形和体积，并在储气室内将已获得的多波束和声纳图像数据进行几何匹配。

3) 管线综合深化设计。制定管道的命名规则及颜色划分，确定机电模型的精度与深度。根据

各专业智能建造模型,对有碰撞的部位进行翻弯调整,并预先发现项目图纸的错误^[30]。

4) 地下管网设计。利用探测设备对管线预设位置、管线深度进行探测,并将数据信息归纳为施工图深化设计模型,然后在模型对应位置的管线上标注所获取的数据信息,辅助工作人员管理、施工地下管线^[31]。

5) 正向三维设计出图。正向出图技术是一项创新性的数字化方法,用于将电站设计转化为实际施工所需的信息完整准确的2D图纸。3D至2D的信息转化与图纸的自动绘制是正向三维出图技术的重点。在信息转换的过程中,需要建立CAES电站相关设备的精准3D模型,利用几何运算将2D视图的几何轮廓信息导出并转换成为中间数据文件。在绘制图纸阶段,需进行信息读取和绘制相关图纸,最后通过读取中间文件获得对应的2D视图。正向三维出图将不同维度的信息高度集成到同一平台,弥补了二维图纸不能深化应用及信息传递的缺点,有效提高了电站设计效率^[32]。

3.3 智能制造阶段

在智能制造阶段,压气储能电站智能建造体系的关键技术主要包括以下4个部分。

1) 制造智能化管理。工厂根据BOM数据包制定电站包括生产进度、物料采购及调配管理等在内的生产准备工作。将所有生产数据实时整合到BIM中,并对设备和部件的生产进行质量管理和进度监测。

2) 智能焊缝探伤。输入所有焊缝的等级及需要探伤的区域,结合现场施工进度计划,预警探伤时间。探伤完成后,在模型中输入焊缝信息,以判定是否有遗漏,然后基于判定结果进行进一步处理。

3) 设备虚拟预组装。根据设计院或生产厂商提供的数据或模型,对工程中重要的机电设备进行虚拟预拼装,提前发现加工缺陷,并加强设计加工的一体化衔接,以减少加工甚至施工阶段的返工情况。

4) 数字孪生体构建。根据建筑信息模型之间的关系搭建压气储能系统的数字孪生场景,建立各建筑信息模型的关联关系和本构模型,实现各

个模型之间的关联^[33]。

3.4 智能施工阶段

在智能施工阶段,压气储能电站智能建造体系的关键技术主要包括以下5个部分。

1) 5D施工管理。通过5D施工管理技术可以实现施工进度模拟和动态成本管理。结合BIM与可视化技术,构建可视化环境对工程施工进度指标的可视化监测。运用BIM与5D模型,精准统计工程中的所有物料资源、设备设施等资源的需求数量,合理控制工程施工成本^[34]。

2) 现场管控和人员定位。基于智能建造平台,对出入车辆进行识别,对接智能安全帽、监测手环等设备感知数据,实时掌控作业人员的生命体征、位置和行动轨迹。通过高清语音对讲实现远程对话,辅助远程协作指导作业、监督检查和应急指挥。

3) 作业微环境监测。基于微环境智能在线监测技术实时三维可视化监测(包括氧气、硫化氢、二氧化硫、氨气等有害气体浓度),监测数值达到预警值时,系统自动发出预警提醒^[35]。

4) 智能安防及机器状态感知。利用固定式摄像头等监控设备建立分布式现场视频监控体系,对现场塔吊、升降机、卸料平台等设备运行状态进行实时监测,实时显示各机器的空间位置、距离、速度、载重等,当监测数据超过设定的阈值时,系统自动发出预警提醒。

5) 盐穴智能施工及储气稳定监测。通过自动分析围岩属性及实际施工进度信息直观展示盐穴的围岩类别及分布,并对盐穴的温度、压力、流量进行监测,判别腔体是否存在泄漏问题。

3.5 智能运维阶段

在智能运维阶段,压气储能电站智能建造体系的关键技术主要包括以下4个部分。

1) 设备状态监测。通过对接监控信息系统,统计电厂各主要设备的运行时间、启停次数、停运时间、检修时间等数据,从而降低因设备故障导致的事故及停机时间。

2) 三维数字化交付。利用数字化移交软件,将全厂三维数字化模型与主要设备属性及设备相关数字化档案导入移交平台组织,进行数字化交

付。交付数据全面涵盖电厂盐穴地质、结构、属性、设备关联关系等各种业务结构化数据，并按照进度来实施渐进式的交付。工程竣工后，按竣工图进行移交^[36]。

3) 全生命周期信息库。构建设备全生命周期信息库，逐步累积压气储能电站设计、制造、施工及运维的过程资料，实现全生命周期的模型、过程资料、运行数据的查询与分析。

4) 性能计算与分析。计算电厂各设备的性能效率，并根据电价等经济性信息计算单个机组及全厂相关的各个成本指标。通过这些方式，压气储能电厂的决策人员可以随时了解当前机组的性能及成本等信息。

4 应用实例

中国某新型储能试点示范项目采用了全球首创、全绿色、非补燃、高效率的300 MW级压气储能技术，利用废弃盐矿作为储气库，每天可储能8 h、释能5 h，储能容量达1 500 MW·h，系统转换效率约70%，能够有效提升区域电网的调峰能力，促进电网消纳更多风电、光伏等新能源^[37]。项目建设过程中，本文的压气储能电站智能建造体系及其关键技术相关成果也得到了有效应用。

1) 在智能设计阶段，电站采用正向出图的设计方式，基于“先建模后出图”的设计思维理念，建立压气储能电站场地三维模型。该工程地上部分采用工厂三维布置设计管理系统平台进行设计，地下部分基于老腔对储库进行改建。其地下三维模型的创建通过声纳测腔、地震勘探技术及对各参建单位收集的相关资料完成。在智能设计阶段，相关设计文档分为初步设计、施工图设计、竣工图设计3种。

2) 在智能制造阶段，需将详细设计图纸传入生产系统，并根据工艺路线发布采购计划，采购原材料。原材料采购完成后，进入生产车间加工生产。在加工生产过程中，设计人员全程进行技术支持。检验阶段以人工检验为主，通过检测单、视频和照片等多种方式进行存档备案。设备生产完成后，需在厂区进行设备虚拟组装及实物组装测试。智能制造全过程采用智能化管理方式，对

交付时间、生产经营、物料采购、储备管理等信息进行实时收集和精准调控。

3) 在智能施工阶段，电站利用智慧三维平台，采用“工地一张图”的监管模式，依托电厂三维数字化模型展示厂区盐穴，以及地下、地上的基本结构和项目基本信息，形成相互关联的工地实时信息展示^[38]。目前，该平台能做到工地现场多物联感知覆盖采集。在此基础上，将平台功能划分为工程影像、业务总览、重点区域监测、基础监测、智能门禁、视频监控、施工机械管理、盐穴地质监测、环境监测、智能告警、智能广播等分区。

4) 在智能运维阶段，目前正在进行电站相关研究。电站完工后智能运维将包括BIM可视化盐穴及井筒健康诊断监测、地下管网泄漏检测、全厂三维预览和漫游、设备拆解智能培训、设备管理与仿真培训等关键技术。

压气储能电站智能制造体系及其关键技术研究实现了压气储能工程数据感知、传输、分析、决策的全场景应用，以及从设计、制造、施工、到运维的全生命周期贯通，为某300 MW级压气储能电站的顺利建设提供了有力支撑。

5 结论

提出了压气储能电站智能建造体系，以智能建造系统架构为指导，对压气储能电站智能建造的关键技术进行了分析研究和现场应用，具体结论如下：

1) 在空间维度上构建了压气储能电站物理-数据-网络-物理的传递体系，在时间维度上梳理了电站从设计到运维的所有建设周期。通过某300 MW级压气储能工程检验了空间维度感知、传输、分析、决策全场景应用和设计、制造、施工、运维的全生命周期贯通的可靠性。

2) 提出了适用于压气储能电站不同时间维度的关键技术，通过BIM等平台可将所有维度的关键技术进行联通。通过某300 MW级压气储能工程验证了关键技术对CAES电站的建造具有多方面优势，包括加速各方信息传递，保证建造过程安全，提高建造效率等。

3) 针对CAES电站的智能建造体系,在空间和时间维度的构建上还需进一步细化。通过多种软件搭建的平台统一体系内的信息数据,智能建造体系能更好地结合其关键技术提高电站建设效率。

参考文献

- [1] 许洪华,邵桂萍,鄂春良,等.我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J].发电技术,2023,44(4): 484-491.
- XU H H, SHAO G P, E C L, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.
- [2] 李锦煜,刘锐剑,周朝阳,等.我国能源安全形势技术分析[J].电力工程技术,2023,42(6): 249-255.
- LI J Y, LIU R J, ZHOU C Y, et al. Technical analysis of China's energy security situation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 249-255.
- [3] 王书峰,钟明,许贤泽,等.计及需求侧管理的新能源微电网多目标优化调度方法[J].智慧电力,2022,50(12): 55-62.
- WANG S F, ZHONG M, XU X Z, et al. Multi-objective optimal scheduling method for renewable energy microgrid considering demand side management [J]. Smart Power, 2022, 50(12): 55-62.
- [4] 龚贤夫,梁秀壮,廖晖,等.考虑集中式新能源接入的综合能源系统韧性提升研究[J].广东电力,2023,36(11): 75-86.
- GONG X F, LIANG X Z, LIAO H, et al. Study on the resilience enhancement of integrated energy systems considering centralised new energy sources[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(11): 75-86.
- [5] 陈海东,蒙飞,王庆,等.储能系统和新能源发电装机容量对电力系统性能的影响[J].储能科学与技术,2023,12(2): 477-485.
- CHEN H D, MENG F, WANG Q, et al. Influence of installed capacity of energy storage system and renewable energy power generation on power system performance[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 477-485.
- [6] LIU Y, HE Q, SHI X, et al. Energy storage in China: development progress and business model[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108240.
- [7] 沙伟燕,胡伟,何宁辉,等.大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差优化调度方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(6): 167-174.
- SHA W Y, HU W, HE N H, et al. Optimal scheduling method for stabilizing power prediction error of new energy by large-scale virtual energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 167-174.
- [8] 夏晨阳,杨子健,周娟,等.基于新型电力系统的储能技术研究[J].内蒙古电力技术,2022,40(4): 3-12.
- XIA C Y, YANG Z J, ZHOU J, et al. Research of energy storage technology based on new power system [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(4): 3-12.
- [9] 叶季蕾,李斌,张宇,等.基于全球能源互联网典型特征的储能需求及配置分析[J].发电技术,2021,42(1): 20-30.
- YE J L, LI B, ZHANG Y, et al. Energy storage requirements and configuration analysis based on typical characteristics of global energy Internet[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 20-30.
- [10] 孙浩锋,章健,熊壮壮,等.含风光储联合发电系统的主动配电网无功优化[J].电测与仪表,2023,60(2): 104-110.
- SUN H F, ZHANG J, XIONG Z Z, et al. Reactive power optimization of active distribution network with wind-photovoltaic-energy storage hybrid generation system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 104-110.
- [11] 韩雪茹,杨德昌,DEHGHANIAN P,等.考虑AA-CAES季节效率优化的建筑微网群多能协同优化策略[J].电力建设,2023,44(9): 94-107.
- HAN X R, YANG D C, DEHGHANIAN P, et al. Multi-energy cooperative scheduling of building microgrid group considering AA-CAES seasonal efficiency optimization[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 94-107.
- [12] SARMAST S, FRASER R A, DUSSEAUULT M B. Performance and cyclic heat behavior of a partially adiabatic cased-wellbore compressed air energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 44: 103279.
- [13] LU C, HE Q, CUI S, et al. Evaluation of operation safety of energy release process of liquefied air energy storage system[J]. Energy, 2021, 235: 121403.
- [14] 李子钰,吕宏,李祖辉,等.空气压缩储能的发展现状及其应用前景[J].资源节约与环保,2023(8): 5-8.
- LI Z Y, LÜ H, LI Z H, et al. Development status

- and application prospect of air compression energy storage[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2023(8): 5-8.
- [15] 李广阔, 王国华, 薛小代, 等. 金坛盐穴压缩空气储能电站调相模式设计与分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 91-99.
- LI G K, WANG G H, XUE X D, et al. Design and analysis of condenser mode for Jintan salt cavern compressed air energy storage plant of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 91-99.
- [16] 周绪红. 智能建造关键技术研究[J]. 建筑, 2023(6): 26-28.
- ZHOU X H. Research on key technologies of intelligent building[J]. Construction and Architecture, 2023(6): 26-28.
- [17] 尤志嘉, 吴琛, 刘紫薇. 智能建造研究综述[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(3): 82-87.
- YOU Z J, WU C, LIU Z W. An overview of intelligent construction research[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2022, 39(3): 82-87.
- [18] 陈珂, 丁烈云. 我国智能建造关键领域技术发展的战略思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 64-70.
- CHEN K, DING L Y. Development of key domain-relevant technologies for smart construction in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 64-70.
- [19] 樊启祥, 林鹏, 魏鹏程, 等. 智能建造闭环控制理论[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(7): 660-670.
- FAN Q X, LIN P, WEI P C, et al. Closed-loop control theory of intelligent construction[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(7): 660-670.
- [20] 毛超, 彭窑胭. 智能建造的理论框架与核心逻辑构建[J]. 工程管理学报, 2020, 34(5): 1-6.
- MAO C, PENG Y Y. The theoretical framework and core logic of intelligent construction[J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(5): 1-6.
- [21] 刘子寒, 白博阳, 高鹏, 等. BIM技术的发展简介与前景展望[J]. 科技风, 2023(17): 82-84.
- LIU Z H, BAI B Y, GAO P, et al. Brief introduction and prospect of BIM technology[J]. Technology Wind, 2023(17): 82-84.
- [22] 任大海. BIM技术在智慧工地建设中的应用研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(6): 73-75.
- REN D H. Research on the application of BIM technology in the construction of intelligent site[J]. Intelligent Building & Smart City, 2023(6): 73-75.
- [23] 姜小峰, 李季, 陆云, 等. 大规模压缩空气储能电站主厂房设计优化分析[J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 32-38.
- JIANG X F, LI J, LU Y, et al. Optimization analysis of main power house design of a large-scale compressed air energy storage power station[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(2): 32-38.
- [24] 王俊德, 周清松, 高永丽. 基于人机物融合数据采集系统的设计与应用研究[J]. 物联网技术, 2023, 13(8): 102-104.
- WANG J D, ZHOU Q S, GAO Y L. Research on design and application of data acquisition system based on man-machine-object fusion[J]. Internet of Things Technologies, 2023, 13(8): 102-104.
- [25] 陈羽飞, 赵琦, 何永君, 等. 人工智能在电力系统中的应用综述[J]. 分布式能源, 2023, 8(6): 49-57.
- CHEN Y F, ZHAO Q, HE Y J, et al. An overview of the application of artificial intelligence in power systems[J]. Distributed Energy, 2023, 8(6): 49-57.
- [26] 霍龙, 张誉宝, 陈欣. 人工智能在分布式储能技术中的应用[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 707-717.
- HUO L, ZHANG Y B, CHEN X. Artificial intelligence applications in distributed energy storage technologies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 707-717.
- [27] 王浩哲, 丁爱飞, 陆继翔, 等. 计及新能源接入的地区电网人工智能无功优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 133-142.
- WANG H Z, DING A F, LU J X, et al. Artificial intelligence reactive power optimization of regional power grids considering renewable energy access[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 133-142.
- [28] 丰慧, 张焱, 张辰颖, 等. 建设工程项目管理BIM底层平台搭建研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(9): 45-52.
- FENG H, ZHANG Y, ZHANG C Y, et al. Research on the construction of the BIM underlying platform for construction project management[J]. Construction Economy, 2023, 44(9): 45-52.
- [29] 高远. 基于BIM协同平台面板堆石坝三维建模技术研究[J]. 水电与新能源, 2023, 37(7): 23-26.
- GAO Y. Three-dimensional modeling technology of concrete face rockfill dams based on BIM collaborative platform[J]. Hydropower and New Energy, 2023, 37(7): 23-26.
- [30] 蔡财敬. 建筑机电设计与管线综合优化研究[J]. 洁净

- 与空调技术, 2022(2): 48-58.
- CAI C J. Research on comprehensive optimization of pipeline and design of construction electrical and mechanical engineering[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2022(2): 48-58.
- [31] 王凯, 刘鹏飞. 城市级地下管网BIM建设及应用[J]. 测绘通报, 2022(11): 132-134.
- WANG K, LIU P F. BIM construction and application of urban underground pipe network[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(11): 132-134.
- [32] 吴尧. 基于BIM技术的三维正向设计应用分析[J]. 四川建筑, 2023, 43(5): 26-28.
- WU Y. Application analysis of 3D forward design based on BIM technology[J]. Sichuan Architecture, 2023, 43(5): 26-28.
- [33] SHI J, PAN Z, JIANG L, et al. An ontology-based methodology to establish city information model of digital twin city by merging BIM, GIS and IoT[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 57: 102114.
- [34] 杨涛. BIM5D在基坑工程施工中的动态管理措施[J]. 价值工程, 2023, 42(22): 4-6.
- YANG T. Dynamic management measures of BIM5D in foundation pit engineering construction[J]. Value Engineering, 2023, 42(22): 4-6.
- [35] 杨鸿珍, 王云焯, 吴建伟, 等. 电网有限空间作业可穿戴环境监测及报警系统设计和实现[J]. 电子器件, 2022, 45(3): 760-766.
- YANG H Z, WANG Y Y, WU J W, et al. Design of wearable environment monitoring and alarm system for limited space operation in power grid[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(3): 760-766.
- [36] 郭丽娟, 聂宇航, 刘象, 等. 基于数字化交付平台的三维资产管理系统建设[J]. 电工技术, 2023(8): 219-221.
- GUO L J, NIE Y H, LIU X, et al. Construction of 3D asset management system based on digital delivery platform[J]. Electric Engineering, 2023(8): 219-221.
- [37] 丁怡婷, 吴君. 湖北应城300兆瓦级压缩空气储能电站并网发电[N]. 人民日报, 2024-04-10(10).
- DING Y T, WU J. Hubei Yingcheng 300 MW compressed air energy storage power plant connected to the grid[N]. People's Daily, 2024-04-10(10).
- [38] 周东阳, 刘爱君, 王承文, 等. 电站三维数字化模型技术的研究与应用[J]. 热力发电, 2020, 49(1): 134-138.
- ZHOU D Y, LIU A J, WANG C W, et al. Research and application of 3D digital model technology in power plant[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 134-138.
-
- 收稿日期: 2024-01-18.
修回日期: 2024-02-26.
作者简介:
-
- 赵星源(1988), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为能源大数据、电力信息化, xyzhao3215@ceec.net.cn;
-
- 刘乙学(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为液化空气储能技术, 1531063540@qq.com;
-
- 何青(1962), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为压缩空气储能技术, heq@ncepu.edu.cn.
- (责任编辑 苗雪连)