

碱性电解槽制氢设备数字孪生体构建及应用

江 悦, 沈小军

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘 要: 数字孪生技术作为推动设备数字化和智能化转型的新型技术, 已在诸多场景成功实现了巨大的应用价值。随着可再生能源发电制氢规模化与能源行业数字化转型, 碱性电解槽规模化应用亟需先进的管理与运维技术。为此, 开展了碱性电解槽数字孪生建模与应用研究。首先, 基于碱性电解槽的工作原理及流程过程, 搭建了一种碱性电解槽制氢设备数字孪生体 4 层构建框架; 然后, 重点在功能应用层分析了数字孪生体在设备故障诊断、参数控制优化、设备集群化管理等场景下的实现技术路线及核心技术; 最后, 从孪生体构建的标准化、业务化及可视化等层面总结了碱性电解槽制氢设备数字孪生技术面临的挑战。研究成果可为碱性电解槽制氢设备的信息化、数字化及运维管控的科学化提升提供理论参考。

关键词: 碱性电解槽; 数字孪生; 框架构建; 应用功能; 技术挑战

Construction and Application of Digital Twin in Hydrogen Production System of Alkaline Water Electrolyzer

JIANG Yue, SHEN Xiaojun

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: As a new technology for promoting the transformation of digital and intelligent equipment, digital twin technology has successfully realized its great application value in many scenes. With the rapid expansion of the scale of hydrogen production from renewable energy power generation and the digital transformation of the energy industry, some advanced management and operation and maintenance technologies are urgently required in the large-scale application of alkaline water electrolyzer (AWE). Therefore, the research on digital twin modeling and application of AWE is carried out in this paper. Firstly, based on the working principle and process of AWE, a four-layer construction framework of digital twin of AWE is built. Then, the application technology route and core technology of digital twin in the scenarios of equipment fault diagnosis, parameter control optimization and equipment cluster management are analyzed in the functional application layer. Finally, the challenges faced by digital twin technology of AWE are discussed from the aspects of standardization, business and visualization of twin construction. The results of the project can provide a theoretical reference for the informatization, digitization and scientific improvement of operation and maintenance management and control of AWE.

Key words: alkaline water electrolyzer; digital twin; framework construction; application functions; technical challenges

0 引言

氢能被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源, 基于绿氢实现多电-气-交的融合构建能源互联网, 目前已成为达成碳中和、碳达峰“双碳”目标的重要途径^[1-3]。电解水制氢槽作为可再生能源发电制氢系统的关键设备, 其运行状态直接影响着系统电、氢转换的安全性与先进性^[4-6]。

典型的电解水制氢槽主要有碱性电解槽、聚合物薄膜电解槽及固体氧化物电解槽 3 种。其中碱性

电解槽具有技术成熟、耐用性高和成本低的优点, 是当前唯一满足并实现了大规模工程应用的电解水制氢设备, 并在可预见的长时间内, 仍将是可再生能源发电制氢的主要设备^[7-9]。目前碱性电解槽建模多采用传统建模方法, 模型确定后因缺乏良好的演变更替技术手段, 影响了其工况多变情况下普适性及准确性, 进而限制了后续应用的拓展^[10-12]。

随着物联网、大数据与人工智能等新技术的迅猛发展, 建模仿真逐步数字化、网络化与智能化, 数字孪生技术应运而生。数字孪生技术将物理模型与数据驱动模型融合, 可实现物理实体与其虚拟模型间的双向动态映射, 已成为复杂系统性能优化、

基金资助项目: 国家重点研发技术 (2018YFB1503100)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2018YFB1503100).

监控领域的新兴研究热点,并在智能制造、电网系统、质子交换膜燃料电池等领域的探索与应用中取得了初步成果^[13-16]。借鉴相关成果及场景类比分析,碱性电解制氢装备数字孪生技术一方面可实现电解槽设备的数字化和智能化,以保障制氢系统运行的稳定性与安全性,延长设备使用寿命;另一方面可为电解槽大规模制氢系统提供新型数字化监管模式与运维功能,推动相关企业设备运维的精细化提升。例如,通过将传感器实时采集数据作为输入数据导入数字孪生体数据库,孪生体会不断更新与修正,充分融合系统机理特性和运行数据特性,实现对物理系统运行状态的实时感知,因此具备比传统建模方法更高的精准性与可靠性,为解决碱性电解槽设备运行状态评估中的问题提供了全新的思路和技术方法^[17-18]。通过数字孪生技术所建电解槽数字孪生体模型能对实际应用中电解槽实体进行在线运行监控与反馈控制优化,将其进一步应用于整个制氢系统,可实现故障诊断与设备集群化管理等工程方面应用。然而,不仅基于电解槽数字孪生技术及其应用相关研究尚处于起步阶段,涉及的技术路线、构建框架、应用模式及关键技术等也均未系统有效开展研究。

随着我国风、光、水等可再生能源的快速发展,碱性电解水制氢规模也在加速扩展,规模化运管模式在成本和效率方面的问题逐渐突显。鉴于碱性电解槽设备研究多集中于理化特性与理论建模,尚未引入数字孪生技术的现状,本文围绕碱性电解槽开展数字孪生建模与应用研究,构建了碱性电解槽数字孪生体结构框架,对该框架从3个层面进行了详细分析,并对亟需开展的工作进行了梳理总结。期望研究成果可为碱性电解槽制氢设备数字孪生体构建及应用提供参考。

1 碱性电解槽数字孪生体框架

典型的数字孪生体通用框架从基础物理层到顶层应用层依次可分为系统物理层、数据感知层、仿真模型层与数字孪生功能应用层,层与层之间、数字孪生体与物理实体之间经由虚实数据的双向传输紧密联系在一起,每一层的实现均基于前面各层。结合碱性电解槽实际情况,确立了如图1所示碱性电解槽数字孪生体构建框架^[19-20]。

物理层主要是可再生能源制氢系统中碱性电解水制氢槽设备,属于构建孪生体模型的研究对象

和基础,用于反映制氢槽运行数据和工作环境参数等物理信息;数据采集层负责实现对物理实体数据信息的获取,即通过在碱性电解槽设备外部安装多类传感器装置,实时获取用于反映设备运行状态的各个外部状态参量数据集合;仿真模型层主要基于数据采集层的实时数据和历史数据进行分析处理,从中抽象出物理实体特征构建电解槽理论与数据驱动模型,使所采数据具有实际意义;应用层则提供了模型所能实现的具体典型功能应用,包括电解槽集群化管理策略和故障诊断分析等应用。

该框架中设备的物理实体与孪生体间存在虚实数据双向传输的交互对比机制,其将物理层面实时获取数据与镜像仿真模型层面的仿真数据进行对比分析,验证模型精度并通过不断地迭代优化提升电解槽孪生体准确度和物理层数据采集的有效性,是实现双向动态映射的关键。碱性电解槽数字孪生体作为电解槽在数字层面的高精度仿真模型,能更准确地同步映射实际系统中槽体运行状态和特性。

1.1 系统物理层

系统物理层主要对应碱性电解水制氢槽系统的物理实体,作为系统数据信息源提供系统运行数据及系统环境参数。该装置主要由碱性电解槽、电源系统、碱液循环系统和分离提取系统等部分组成,其中碱性电解槽和电源系统直接参与槽内电解水反应,包含碱液循环系统和气体系统的碱性电解水制氢装置基本工作流程图如图2所示。

首先,电源整流柜将交流电转换为电流电压可调的直流电,为槽内水电解反应提供能量。纯水中离子浓度很小,不易导电,因此要在水中加入碱性物质,电离后与水形成水合离子,起到增加导电性、加速电解进程的作用。当直流电作用于碱液时,液体中的正负离子分别向两极移动,并在阳极侧和阴极侧得到氧气和氢气,且由于隔膜阻碍,两侧气体不能大量穿过隔膜相互混合,仅电解液可由隔膜进入另一侧。之后,带有氧气和氢气的碱液混合物分别进入各自的换热器冷却,再流入气液分离器通过质量的作用使气体和碱液分离。其中,两分离器底部的碱液借助碱液循环泵的动力在过滤器汇合,待滤除杂质后再重新进入电解槽,构成碱液循环,因此理论上装置中的碱并不消耗,只需不断向系统内补充纯水。补充水将借助加水泵从气体洗涤器中流入,再流回分离器与碱液混合。而从气液分离器流出的氢气和氧气各自进入气体洗涤器洗掉气体夹带

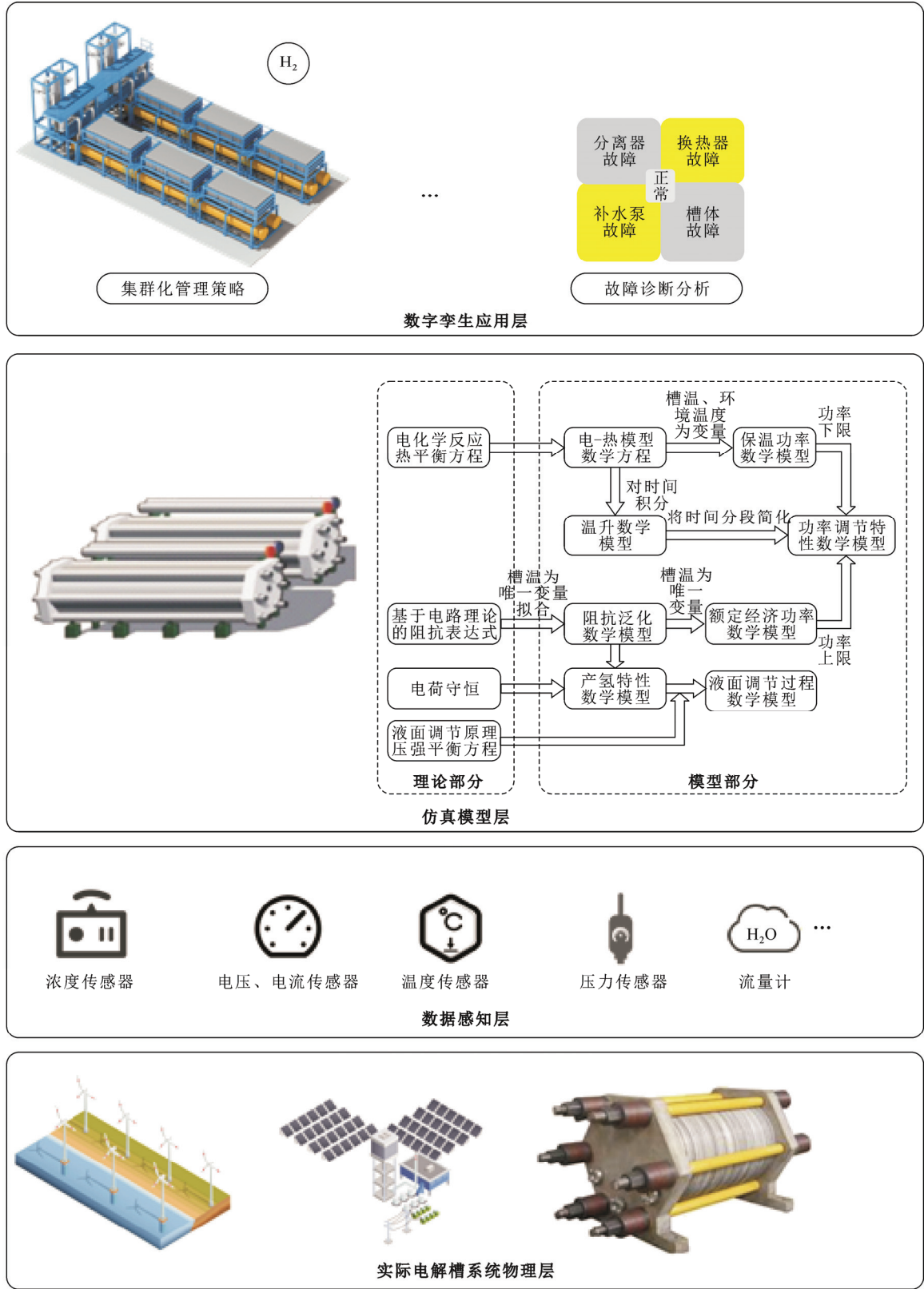


图 1 碱性电解槽数字孪生体的构建框架
Fig.1 Construction framework of digital twinning in alkaline water electrolyzer

的碱后，经气液分离过滤最终进入储气罐^[21-22]。

1.2 数据感知层

数据感知层基于物理层底层进行数据采集、传

输工作。受环境变化和老化等因素影响，根据系统理论知识和仿真需求所建模型可能存在误差。为实现对电解槽运行状态的全面在线监控和评估，

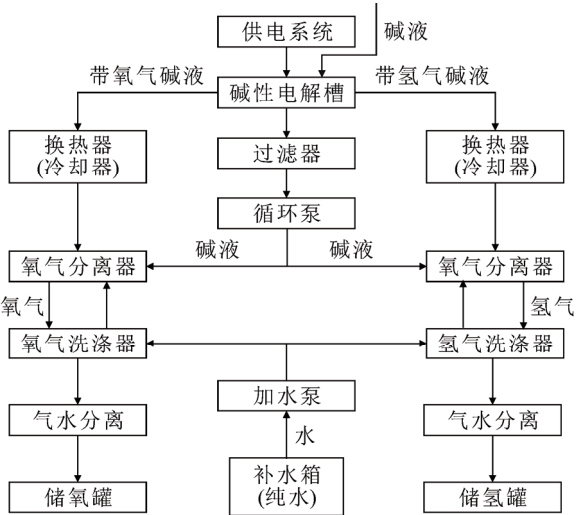


图2 碱性电解水制氢装置基本工作流程图

Fig.2 Working flow chart of alkaline water electrolyzer hydrogen production plant

需安装各类高精度传感装置在线获取并分析运行数据，以实现对各方面特征量多维度、全局式和实时性的深度感知，目前已有采集参数集如表 1^[23]。

由传感器采集实际系统运行过程中的状态信息，融合设备及环境的静态数据、历史运行数据以及离线试验数据等多维度数据，对运行数据全方位感知，在其与仿真模型输出参数间建立数据动态关联比对分析，修正模型状态参数使模型与实际系统具较高一致性。在该过程中，数字孪生体模型的参数及状态将通过迭代和增量方式不断更新，模型质量不断提高。

以槽体温度传感器分布为例，目前对碱性电解槽槽体的温度测量常用槽体两端电解液出入口的温度传感器，如图 3 槽体结构简图的模块 A。实际应用中，某个小室电压成倍突升会使该小室迅速升温，而电解槽温度过高会加速膜劣化。小室温度突增不仅会使槽体温度分布不均，甚至部分电解小室会烧毁引起氢氧混合爆炸的严重事故。电解槽小室数量众多，尤其随着电解槽制氢系统规模的扩大，单个电解槽可达百个小室，仅靠现有的温度传感器很难监测到槽体温度分布不均的情况，因此还需要在槽体横向等距增设温度传感器，如图 3 中 B 模块。后续通过数据采集软件即可综合不同位置温度传感器数据进行分析得到更精准的槽体平均温度，并根据温度变化情况定位问题小室。

目前，电解槽体状态感知的传感器系统结构尚未完善，信息传感采集层面临的主要问题有：

表 1 传感器采集参数集

Table 1 Set of parameters collected by the sensor

传感器	测量参数	传感器选型	分布位置
温度传感器	槽体系统温度、氢、氧分离罐温度	热电偶、数字温度传感器	槽体、氢氧分离罐外部
	液位	磁致伸缩线性液位传感器、差压式液位传感器、磁翻板远传液位传感器	氢氧分离罐外部
压力传感器	槽体、储气罐、管道压力、氢、氧分离罐压差	陶瓷压力传感器、扩散硅压力传感器、差压传感器	槽体、储气罐、各部件连接管道内、氢氧分离罐
流量计	产氢量、产氧量	气体涡轮流量计、转子流量计、热式气体流量计	氢氧分离罐进气口
气体纯度传感器	氢气纯度、氧气纯度	气体纯度分析仪	氢氧分离罐进气口
电流传感器	槽体电极电流	霍尔传感器	槽体
电压传感器	槽体总电压	电压采集器	槽体
浓度传感器	电解液浓度	在线比重计	槽体内部、氢氧分离罐内部

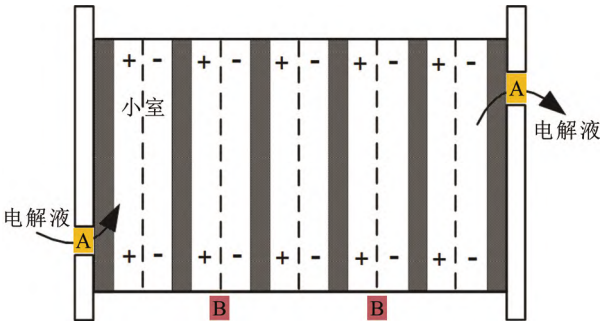


图3 碱性电解水制氢槽结构简图

Fig.3 Structure diagram of alkaline water electrolyzer

1) 信息采集维度不够全面，无法实现多方面、全局式的深度监测。碱性电解槽设备整体性结构和特殊的运行工况使其内部数据的实时获取难度较大，退出运行进行离线试验会降低工作效率，离线试验操作繁琐、耗时长，因此所测参数局限于外部参数，对内部监测存在盲区。通过对内外参数的关联性研究，即可根据所测外部参数分析完善槽体特性监测。

2) 所采集数据缺乏一定的准确性。由于传感器选型和工作环境的不同，传感器所采集的电流、电压数据易受谐波干扰，噪声较大，低质量数据将导致系统对电解槽运行状态误判或漏判，影响数字孪生体的准确性。对所采集在线数据还要通过数据

清洗等操作进一步处理, 提升数据质量为模型的构建提供可靠的数据基础。

3) 产生气体纯度的数据采集实时性较差。在工程应用中, 对氢气、氧气槽中气体纯度的监测有约数十秒延时, 且会随着罐体体积的增大而增大, 传感器并不能实时反应实际数据, 将导致系统无法及时监测到氢气浓度的变化而引起氢氧混合爆炸事故。对于气体纯度分析仪的选点和数量设计, 还要进一步试验以优化测量数据的实时性。

1.3 仿真模型层

仿真模型层基于物理层所得多维度数据, 结合碱性电解槽工作机理, 通过理论模型与数据驱动模型融合的混合建模技术构建电解槽数字孪生体, 实现对物理槽体的虚拟映射。

电解槽理论模型主要基于碱性电解槽运行原理进行公式的计算和推导, 构成数字孪生体模型的物理特性; 数据驱动模型则根据所采运行数据分析处理, 从设备各类状态量数据中挖掘出表征设备运行状态的特征参数, 同时避免了物理模型计算复杂, 模型难以随实际情况灵活变化的问题。

工作温度是电化学工程中决定电化学反应器稳定运行的关键因素。根据电解槽工作机理可知, 电解槽的工作温度即槽温对电解水反应的效率及工作电压、电流效率等电化学技术经济指标均有重要影响, 电解质的腐蚀性、电极材料以及隔膜材料的稳定性也均与温度有关; 根据电解槽工作特性的试验结果, 电解槽等效阻抗、功率调节特性以及产氢特性都与槽温直接相关^[24-25]; 此外, 相比较于等效电阻抗、运行功率等只能间接测得的参数, 槽温可直接测量, 数据获取更加方便准确。而数字孪生技术实现模型准确性和有效性的关键就在于选择可观测量且敏感的参数作为特征参数。选择以槽温为统一变量构建碱性电解槽的数字孪生模型, 从而为碱性电解槽镜像仿真模型的准确性提供保障。

电解水制氢的化学反应机理与碱性电解槽静态伏安特性试验结果均表明, 碱性电解槽等效电阻抗仅与槽温相关, 当电解槽结束升温启动状态进入正常运行状态时, 槽温逐渐保持恒定, 此时电解槽等效电阻抗几乎不受输入电压变化的影响并保持不变^[26]。同时, 槽温越高等效电阻抗越小, 当槽温升高至约某阈值后, 等效电阻抗将保持恒定。典型阻抗特性数字孪生仿真模型的建立过程如图4。

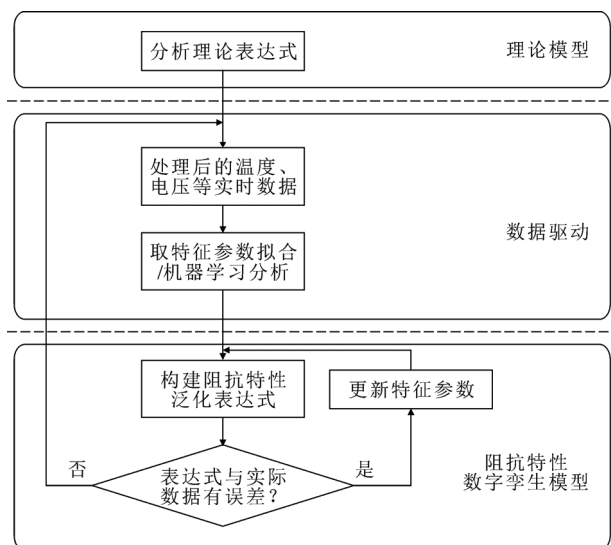


图4 阻抗特性数字孪生体的构建流程图

Fig.4 Flowchart for the construction of a resistor digital twin

其中数据是核心要素, 包含物理实体和仿真模型的所有数据, 根据输入孪生体的实时数据不断地更新迭代优化所建模型, 即通过对传感器测得实际数据与仿真模型输出的仿真数据对比分析, 验证模型的准确度, 修正模型参数以提高精度。在电解槽持续运行过程中, 通过对实时获取的阻抗-温度数据拟合, 同步对比并更新等效电阻抗的数学特征表达式, 确保了模型的在线性和准确性。

在建立具有准确性的碱性电解槽阻抗特性数字孪生模型基础上, 结合槽静、动态伏安特性试验以及碱性电解槽制氢工作机理, 围绕设备在运行期间的槽体总电压、电流、槽温、运行功率以及产氢量等特征变量, 将进一步构建碱性电解槽温升特性、功率调节特性、产氢特性以及分离罐压强特性的数字孪生模型, 建模流程如图5。

镜像仿真模型将电解槽特性从抽象特性描述转换为有理论和数据分析作支撑依据的数学表达式, 根据图4和图5所示电解槽数字孪生体模型的构建方法和路线, 可结合碱性电解槽的运行机理以及试验数据率先构建以温度为中心的电解槽温升特性和等效电阻抗特性模型。前期相关研究结果已验证了该模型的准确性和可信度, 能更加直观地通过温度反映电解槽部分运行特性, 降低建模复杂度从而克服传统机理模型通用性差、构建流程复杂的问题^[27], 为数字孪生技术在电解槽应用领域的研究提供理论与工程价值。

2 碱性电解槽的数字孪生功能应用

在设备各类传感装置获取到实时运行数据后,通过访问所建的融合了模型驱动和数据驱动的电解槽数字孪生体模型,结合运行环境数据、设备工艺制造数据、设备离线试验以及运维检修数据、故障案例数据等,就能基于设备状态评价模型、设备故障诊断模型,进行设备在物理空间和虚拟空间的同步运行与交互比对,在线实时获得电解槽的运行数据与运行状态评估等信息,分别实现对碱性电解槽阵列的故障诊断、运行控制参数整定优化与集群化管理等应用。同时将此类功能封装成服务,以应用软件形式提供给用户。

2.1 设备故障诊断

电解槽系统在实际运行中可能出现槽体指标异常、氢氧分离器等常见故障,对其性能和可靠性造成影响。例如电解槽电源波动会引起爆炸性混合物产生、材料腐蚀、效率降低、压降和温度变化等问题,将会降低系统性能并缩短设备使用寿命^[28]。仅凭运维人员经验判断很难准确定位和修复故障,由于安装复杂和结构整体性,在电解槽正常运行期间对其进行拆解检测会加大运维工作量,导致生产成本增加。因此,需要稳健且具备成本效益的方式来确保电解槽运行的可靠性和维护的高效性。

当前电解槽故障诊断领域还鲜有研究,业界广泛使用的仍是基于模型或数据驱动的方法。但故障建模、监测和诊断涉及影响因素较多,准确识别故障对于模型构建精度要求较高。利用对物理系统数字仿真的数字孪生新技术,可实时精确估计电解槽工作特性的变化,基于数字孪生技术一体化感知监测体系,对电解槽物理实体的运行状态与环境数据实时感知,实现其在运维阶段的实时监测。设备数字孪生模型在孪生数据的驱动下与物理设备同步运行,可形成故障诊断等数据,在此基础上应用机器学习等人工智能算法对数字孪生模型进行仿真计算与数据分析,将故障诊断模型数据不断迭代优化,并将实时计算分析所得数据信息与指令反馈给物理实体设备,自主驱动物理实体设备进行缺陷诊断和故障预警,快速制定合理运维策略。图6是数字孪生技术在碱性电解槽故障诊断应用的具体流程图。

由于电解槽设备结构的特殊性,小室电压、内阻抗等内部参数在工程应用中无法直接测量,难以对诸如小室电压不均的故障进行有效诊断。考虑到

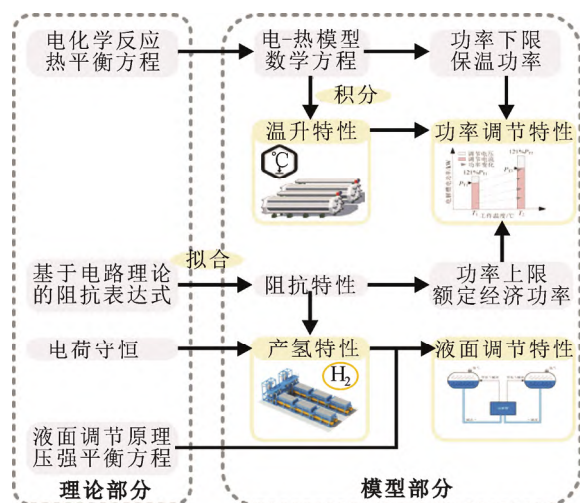


图5 碱性电解槽数字孪生体构建的技术路线

Fig.5 Technical route of constructing digital twin in alkaline water electrolyzer

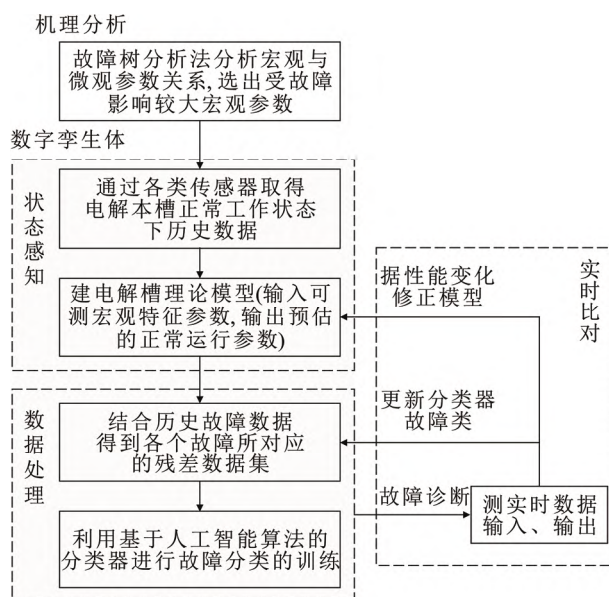


图6 基于数字孪生的电解槽故障诊断流程图

Fig.6 Flow chart of electrolyze fault diagnosis based on digital twin technology

小室电压与内阻抗直接相关且内阻抗与温度具有映射关系,如图7所示,根据模型仿真层构建的碱性电解槽数字孪生体运行特性模型,则可借助软测量方式通过输入所采温度间接推得槽体等效内阻抗数据,再结合实际值不断分析误差数据实现小室电压不均故障的诊断。

目前,基于神经网络的诊断模型被认为具有一定的准确性,为同时判断故障的严重等级,可利用组合神经网络的诊断模型。随着槽体状态改变,模

型中对故障特征参数的判定条件可能会变, 也可能存在故障分析阶段未统计到的新型故障, 诊断模型需要实时更新以增加故障分类并避免误判。电解槽故障库在线迭代更新的具体方法流程如图 8。

基于数字孪生技术的故障诊断特点在于对不可测故障特征变量的软测量与故障诊断模型的自主更新, 通过对这些故障的在线精准识别, 可有效对电解槽进行停机维护或更换, 并避免整个系统发生更严重的故障或损坏。

此外, 通过在模型中改变参数模拟故障情况来推演故障, 预测故障的风险和影响, 有助于优化应对故障的决策, 加强实际工程系统的安全管理, 为设备检修及维护提供指导。在后续研究中, 通过监测电解槽实体并智能分析数据获得其运行特性, 还能预测设备的隐藏缺陷和潜在问题, 提前排查出系统中的故障, 提升系统运维的效率。

本节所提出的应用了数字孪生技术的故障诊断方法仍处于概念阶段, 将其推广到实际应用中, 需要具备的关键技术支撑主要有以下几点:

1) 小样本量情况下, 高性能机器学习模型能进行自适应优化。碱性电解槽设备运维管理状况良好, 槽体发生故障尤其是严重故障多为小概率事件, 非常态设备样本数量匮乏。若与大样本量采用相同算法, 会引起训练样本类别不均衡问题, 需收集并完善故障案例库的相关信息, 并选择适合小样本的算法优化模型。

2) 数据预处理阶段特征提取与识别的准确度和速度需要满足数字孪生在线性要求。基于数字孪生技术的故障诊断与传统诊断方法最大区别在于在线实时性。通过数据预处理有效过滤干扰信息, 能从数据集中提炼故障特征, 减小模型层数从而缩短模型训练时间, 进行高效、准确的模型训练, 实现物理实体与数字模型的同步。

3) 用多故障同步分析法对混合多个故障的复杂故障情况进行判断。电解槽产生的部分故障现象可能由多个故障同时引起, 多故障同步分析法能够识别出所有可能的故障情况作为运维人员的决策参考, 能显著提升检修效率。

2.2 运行控制参数整定优化

工程应用中, 可再生能源制氢系统的电解槽受环境和系统等因素影响, 设备性能会随时间演化, 采用预设条件、固定参数的模型难以保证电解槽设备运行在最佳工作状态。基于数字孪生技术, 电解

槽实体与数字孪生模型间的数据实时交互使数字孪生体在线感知系统和环境变化, 通过数字孪生参数校正技术根据真实系统状态自主修正模型参数, 实现碱性电解槽运行参数的在线自主校正和优化。基于数字孪生技术的参数整定优化流程如图 9。

采用数字孪生技术, 可综合大量历史数据和实测数据, 利用持续性的参数整定优化碱性电解槽运行状态模型。参数整定主要包括模型校正参数的选择和对所选参数的校正, 选择合理的校正参数是有

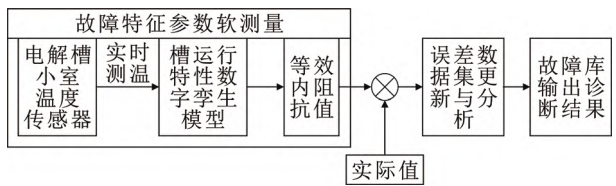


图 7 小室电压不均故障诊断流程图

Fig.7 Flow chart of electrolyze voltage imbalance fault diagnosis

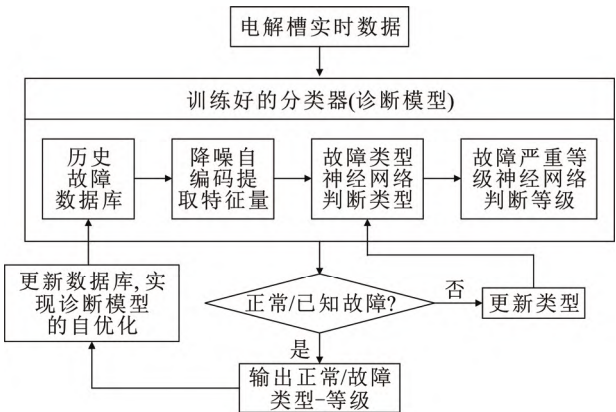


图 8 电解槽故障库更新流程图

Fig.8 Flow chart of fault library update of electrolyzer

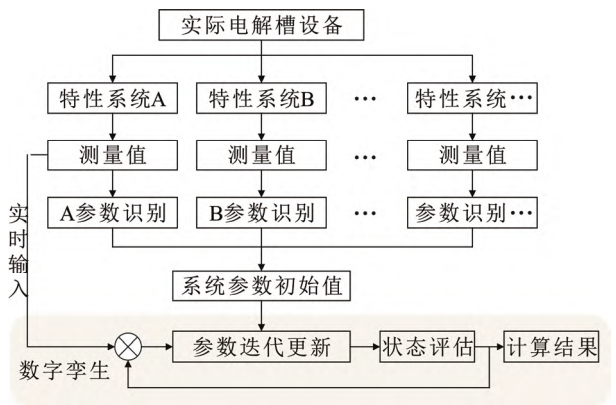


图 9 基于数字孪生技术的参数整定优化流程图

Fig.9 Flow chart of parameter optimization based on digital twin technology

效提高校正效率的重要因素之一。将电解槽系统按特性分成不同模块,分别测量分析进行并行的参数识别,将识别结果作为整体系统参数的初值,再根据实时测量结果与状态评估结果的差异对系统参数进行迭代校正,经计算和分析后,若参数优化设计状态评估结果收敛,则可生成参数优化设计方案。

以槽工作功率为例,随着环境温度的升高,维持电解槽工作温度所耗最低功率将降低,若仍保持槽体工作功率不变,槽温会不断上升甚至有可能超过最大允许工作温度,需要额外的电能损耗启动冷却装置,增加了系统生产成本。通过数字孪生技术则可基于环境温度波动情况获取电解槽最小工作功率值并与当前运行功率进行实时比对,比对结果输入环控装置实现对槽温的调节控制,确保电解槽始终运行在合理的工作功率下,提升系统的经济性。将数字孪生技术应用于此的优点在于模型参数在闭环反馈下的自动迭代,系统整体参数能持续自主修正,保证电解槽运行状态的优化和稳定。

考虑到工程应用中电解槽系统多变的环境和工况,对包含复杂数据分析和不确定性量化在内的多物理耦合数字孪生模型进行较为准确的参数整定仍然具有挑战性,需要实现的关键技术有:

1) 保障数字孪生模型参数处理的实时性。由于实测数据量庞大,且呈现高维度的空间分布及时间序列特点,数据分析处理过程耗时较长,需有可靠的算法组合来保证海量数据的高效处理。

2) 模型校正过程中对校正参数集的合理筛选。选择的校正参数应与电解槽设备运行状态具备较强的关联关系,校正参数的上下限设定也需控制合理的范围内。

3) 模型校正参数的多目标优化。当前参数优化的目标主要集中于对单个或2个,针对3个及以上目标的优化研究还比较少。在分析特性参数间的相关性与影响的基础上,构建参数多目标优化模型,能提高参数优化的决策效率。

2.3 设备集群化管理优化

碱性电解水制氢凭借其技术成熟和性价比高的优势,早在十多年前就已投入如电厂制氢等工业生产运行中,也是目前大规模制备氢气的主要手段,在实际运行中,多个碱性电解槽组成的电解槽阵列与储能装置、波动性特征的分布式能源交互,使系统呈现出结构更复杂、设备更繁多、技术更庞杂的趋势^[29-30]。传统优化控制方法已无法满足电解槽阵

列运行优化要求,对大量设备的管理将耗费大量人力物力,大大降低系统管理效率。基于数字孪生镜像仿真模型层对单个电解槽设备数字化,有助于实现对集群化设备的数字孪生,掌握多个设备整体状态的掌握与评估,反应异常、故障信息,以便工作人员全面实时检测电网状态,有效提升运维效率。

图10为基于数字孪生技术的碱性电解槽阵列管理的基础流程图。镜像仿真模型层的数字孪生属于设备级数字孪生,仅是对单台电解槽设备的数字孪生,将其进一步拓展应用于电解槽阵列,即构成了电解水制氢系统中由多个电解槽设备所组成的系统级数字孪生。系统级数字孪生模型除了涵盖该阵列所包含设备的数字孪生外,还具备如全站状态评估、站内风险点识别、故障设备定位和运行决策优化等特有功能。将所有设备级数字孪生有机整合,打破原有单一化管理方式,形成制氢系统级别数字孪生,为精准掌握整个系统的实时状态和变化趋势提供支持。

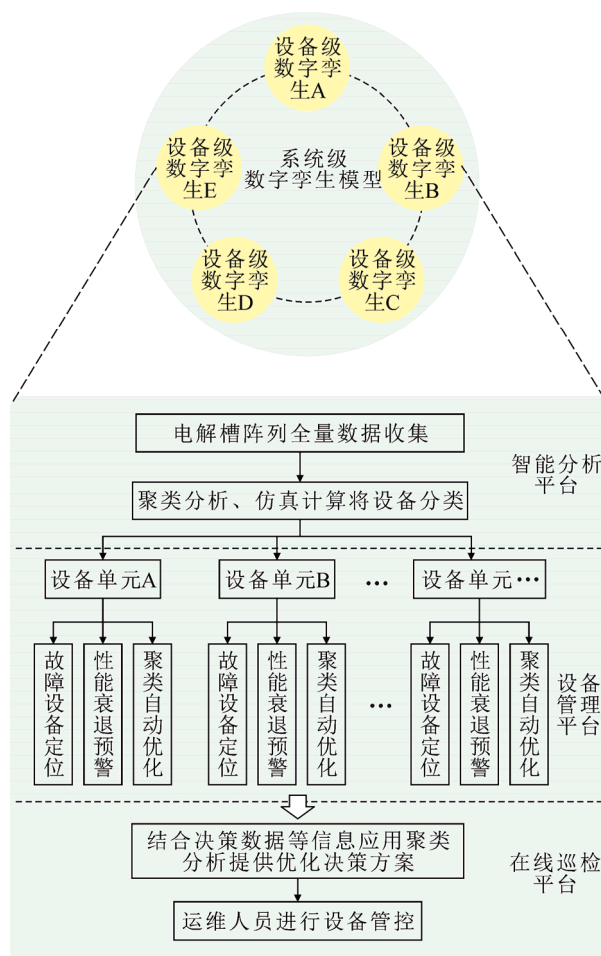


图10 基于数字孪生技术的电解槽集群管理流程图

Fig.10 Flow chart of electrolyzer cluster management based on digital twin technology

智能分析平台主要基于模型层构建的典型电解槽数字孪生体和所采运行数据, 结合相同类型、运行环境和场景下个体电解槽设备数字孪生模型间的横向比较, 通过聚类算法将设备分类, 构建设备集群一体化数字孪生模型。设备管理平台则结合已有的运行状态评估和典型设备在线故障诊断方法, 对设备集群的运行状态、设备故障和运行决策聚类分析, 实现不同聚类电解槽集群内部的故障设备定位以及性能衰退预警提示, 同时不断自主更新分类器以保障计算准确率。在线巡检平台主要负责向运维人员提供相关决策优化推荐。检修决策优化部分功能是系统级与设备级最大的区别所在, 主要是根据机器学习算法, 以运行状态评估及预测结果为依据, 结合检修技术与系统运行等约束条件, 建立综合考虑运行可靠性与经济性的优化目标函数, 对检修方式等综合检修策略进行智能优化与推荐。

当碱性电解水制氢系统规模逐步扩大, 传统的专家经验决策优化方式在面临大规模设备集群决策数据纬度高、非线性强和波动性大等特点时, 存在较大的局限性和不可靠性。例如在安排设备检修计划时, 容易造成设备检修不足集群故障或检修过度系统经济性差等问题。电解槽设备检修需要考虑检修方式、检修时间等约束, 故障诊断模型定位的故障设备信息作为决策模型参数, 实时分析系统运行稳定性和检修收益, 构建并不断更新制氢系统与检修方案之间的映射关系, 实现在保障系统安全运行的情况下达到最大检修收益。

通过数字孪生应用于设备集群化管理优化的全景检测功能, 工作人员可在远程终端在线访问电解槽阵列的数字孪生模型, 实时获得设备运行数据等信息作为管控依据, 实现设备诊断决策从个体到集群的演变, 有效降低巡检工作成本。尽管数字孪生的引入为实现电解水制氢系统规模化背景下的高效管理提供了新思路, 但从单体到系统的拓展还需如下所示关键技术作支撑:

1) 复杂网络和多变工况下的数据处理模块需要可靠性和准确性高的算法作支撑来保障数字孪生的实时映射特性。算法选择要根据所获电解槽样本容量的实际情况具体分析, 根据电解槽本身的历史数据和在线数据数量和维度的不同, 选择分类准确度高和计算速度快的机器学习算法, 最终集群监测效率也要依赖于算法选择和机器性能。

2) 电解槽阵列海量且多维的数据的统一整合

研究复杂程度高。单个设备的建模数据通常取自于特定种类和属性, 拟合模型泛化能力较为欠缺。在对大规模、多种类的复杂集群系统进行分析时, 样本数据数量多、维度广, 特征参数提取的考虑角度更加宏观、整体化, 且在降维方面的处理要求更高。

3) 用于电解槽阵列集控的数字孪生控制器需要覆盖多种不同场景需求下的控制策略并结合电解槽实时状态进行决策控制。集群在不同环境条件或企业需求下, 对整体性能要求和侧重点会有所差异, 数字孪生控制器需要根据实际需求场景, 实时切换对应控制策略并根据系统在线性能提供优化策略。

3 碱性电解槽数字孪生技术发展瓶颈

工程应用中, 碱性电解槽制氢系统数字孪生体及上述应用的落地仍存在诸多共性问题亟需解决:

1) 数字孪生体的基础构建难度大, 构建方法需进一步向标准化和规范化方向发展。数据与模型间的互联互通较为复杂, 根据从传感器上所获得的大量实时数据通过实时比对技术检测并正确判断出槽体状态的变化情况, 并对所建多物理场模型进行参数调整, 从而实现虚拟与现实实时精确同步的过程, 需要性能强大的实时求解算法作为基础。

2) 基于模型的在线仿真技术基础薄弱。构建高精度的多物理场模型复杂性高, 需对电解槽工作机理具有深刻认识, 掌握相关专业知识和先验知识, 深入挖掘其各个因素间的联系与影响, 探究其变化规律; 所建模型还要跟随状态感知所获得的实时数据进行及时的在线调整, 所以初步的基础建模要能够精准表征实际电解槽特性。需将碱性电解槽设备运维过程中的各类专家经验、知识库与数字孪生体进行有机融合, 实现基于知识协同和知识图谱的模型构建。

3) 模型可视化技术需加入碱性电解槽设备数字孪生体体系中。由于设备结构复杂、运行指标众多, 在数字孪生体构建过程中涉及的知识面较广, 所构建数字孪生体模型复杂度高, 理解成本很高。基于可视化技术将设备数字孪生过程进行直观展示, 能大大提升运维人员和管理人员的工作效率, 降低学习、应用及管理成本。

4) 碱性电解槽数字孪生体典型应用多项关键支撑技术研究仍处于起步阶段。主要集中于数据处理层面, 对采集数据的降噪清洗、性能分析以及多故障诊断、参数多目标优化等多态问题处理过程中,

所选算法还要融合优化以达到数字孪生对实时性和准确性的高要求。本文仅提出了数字孪生技术在部分典型应用场景的融合,对其他高级应用场景下的功能开发未涉及,需完善并开发更多场景模式,提升可再生能源制氢系统技术经济性。

4 结论

1) 数字孪生技术是在数字空间中实现物理实体同步动态映射的新型建模技术,将其应用于碱性电解槽设备,可对系统运行特性与运维管理等情况进行高效分析,为解决碱性电解槽设备数字化、智能化及先进运维提供了全新的思路与技术方法。

2) 基于数字孪生体的通用框架以及实际电解槽制氢系统,搭建了一种碱性电解槽制氢系统数字孪生体4层架构,逐层分析了系统物理层、数据感知层、仿真模型层与功能应用层的技术体系,层与层之间依靠虚实数据的双向传输密切相关并构成递进关系。

3) 针对框架顶部功能应用层,给出了碱性电解槽数字孪生体在设备故障诊断、运行控制参数整定优化以及设备集群化管理优化3个典型场景下的应用技术路线,并指出了应用所需的支撑关键技术。

4) 碱性电解槽数字孪生体在实际的工程应用中具有广阔的发展前景,成果可为碱性电解槽状态监测以及规模化系统运行管理策略的数字化、智能化升级提供参考。但实际应用中碱性电解槽数字孪生体的构建在标准化、业务化及可视化等方面仍存在关键问题亟待解决。

参考文献 References

- [1] KOTOWICZ J, JURCZYK M, WĘCEL D. The possibilities of cooperation between a hydrogen generator and a wind farm[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(10): 7047-7059.
- [2] 孙鹤旭, 李争, 陈爱兵, 等. 风电制氢技术现状及发展趋势[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(19): 4071-4083.
SUN Hexu, LI Zheng, CHEN Aibing, et al. Current status and development trend of hydrogen production technology by wind power[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(19): 4071-4083.
- [3] LI Z, GUO P, HAN R H, et al. Current status and development trend of wind power generation-based hydrogen production technology[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019, 37(1): 5-25.
- [4] 俞红梅, 衣宝廉. 电解制氢与氢储能[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(3): 58-65.
YU Hongmei, YI Baolian. Hydrogen for energy storage and hydrogen production from electrolysis[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(3): 58-65.
- [5] DOBÓ Z, PALOTÁS Á B. Impact of the voltage fluctuation of the power supply on the efficiency of alkaline water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(28): 11849-11856.
- [6] 邓浩, 陈洁, 焦东东, 等. 风氢耦合并网系统能量管理控制策略[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 99-106.
DENG Hao, CHEN Jie, JIAO Dongdong, et al. Control strategy for energy management of hybrid grid-connected system of wind and hydrogen[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 99-106.
- [7] 杜泽学, 慕旭宏. 水电解技术发展及在绿氢生产中的应用[J]. *石油炼制与化工*, 2021, 52(2): 102-110.
DU Zexue, MU Xuhong. Development of water electrolysis technology and its application in green hydrogen production[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2021, 52(2): 102-110.
- [8] GRIGORIEV S A, FATEEV V N, BESSARABOV D G, et al. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(49): 26036-26058.
- [9] TENHUMBERG N, BKER K. Ecological and economic evaluation of hydrogen production by different water electrolysis technologies[J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2020, 92(10): 1586-1595.
- [10] HAMMOUDI M, HENAO C, AGBOSSOU K, et al. New multi-physics approach for modelling and design of alkaline electrolyzers[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(19): 13895-13913.
- [11] SHEN M Z, BENNETT N, DING Y L, et al. A concise model for evaluating water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(22): 14335-14341.
- [12] SHEN X J, ZHANG X Y, LIE T T, et al. Mathematical modeling and simulation for external electrothermal characteristics of an alkaline water electrolyzer[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(12): 3899-3914.
- [13] 齐波, 张鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1522-1538.
QI Bo, ZHANG Peng, ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1522-1538.
- [14] MERAGHNI S, TERRISSA L S, YUE M L, et al. A data-driven digital-twin prognostics method for proton exchange membrane fuel cell remaining useful life prediction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(2): 2555-2564.
- [15] 杨帆, 吴涛, 廖瑞金, 等. 数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1505-1521.
YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and implementation method of digital twin in electric equipment[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1505-1521.
- [16] 相晨萌, 曾四鸣, 闫鹏, 等. 数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1564-1575.
XIANG Chenmeng, ZENG Siming, YAN Peng, et al. Typical application and prospect of digital twin technology in power grid operation[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1564-1575.
- [17] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.
- [18] LU Y Q, LIU C, WANG K I K, et al. Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 61:

- 101837.
- [19] CHOI B B, JO J H, LEE T, et al. Operational characteristics of high-performance kW class alkaline electrolyzer stack for green hydrogen production[J]. Journal of Electrochemical Science and Technology, 2021, 12(3): 302-307.
- [20] BRAUNS J, TUREK T. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: a review[J]. Processes, 2020, 8(2): 248.
- [21] 郭育菁, 慕秀松, 周俊波, 等. 中小型工业化碱性水溶液制氢电解槽设计[J]. 化学工程, 2020, 48(9): 70-73.
- GUO Yujing, MU Xiusong, ZHOU Junbo, et al. Design of hydrogen production cell for small and medium-sized industrial alkaline aqueous solution[J]. Chemical Engineering (China), 2020, 48(9): 70-73.
- [22] ĐUKIĆ A, FIRAK M. Hydrogen production using alkaline electrolyzer and photovoltaic (PV) module[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(13): 7799-7806.
- [23] MORI M, MRŽLJAK T, DROBNIČ B, et al. Integral characteristics of hydrogen production in alkaline electrolyzers[J]. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2013, 59(10): 585-594.
- [24] DOUGLAS T G, CRUDEN A, INFELD D. Development of an ambient temperature alkaline electrolyser for dynamic operation with renewable energy sources[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(2): 723-739.
- [25] CHEN Y N, MOJICA F, LI G F, et al. Experimental study and analytical modeling of an alkaline water electrolysis cell[J]. International Journal of Energy Research, 2017, 41(14): 2365-2373.
- [26] SHEN X J, ZHANG X Y, LI G J, et al. Experimental study on the external electrical thermal and dynamic power characteristics of alkaline water electrolyzer[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(10): 3244-3257.
- [27] JIANG Y, SHEN X J, LV H, et al. Construction and simulation of digital twin model for alkaline water electrolyzer[C]//34th Electric Vehicle Symposium. Nanjing, China: China Electrotechnical Society, 2021.
- [28] ROSYID O A, JABLONSKI D, HAUPTMANN U. Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(15): 3194-3200.
- [29] 沈小军, 聂聪颖, 吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 463-472.
- SHEN Xiaojun, NIE Congying, LÜ Hong. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 463-472.
- [30] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 84-94.
- CAI Guowei, CHEN Chong, KONG Lingguo, et al. Control of hybrid system of wind/hydrogen/fuel cell/supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 84-94.



JIANG Yue

江悦

1997—, 女, 硕士生

研究方向为数字孪生技术在碱性电解水制氢系统的应用

E-mail: izyuejiang@gmail.com



SHEN Xiaojun

Ph.D., Professor

Corresponding author

沈小军(通信作者)

1979—, 男, 博士, 教授, 博导

研究方向为新能源高效利用与储能技术、电网实景3维重构及其数字孪生技术、状态感知与智能诊断等

E-mail: xjshen79@163.com

收稿日期 2021-11-07 修回日期 2022-02-05 编辑 卫李静