

智能化技术在核电行业应用的可行性研究分析

王娟, 吴旭*

广西高校并行分布与智能计算重点实验室, 广西 南宁

收稿日期: 2023年3月21日; 录用日期: 2023年7月20日; 发布日期: 2023年7月27日

摘要

能源行业是一个正在发展的蓬勃行业, 需要逐步将智能化应用到正在蓬勃发展的核能中。本文从其他能源行业出发, 通过对风能、火电、水电、电网等能源行业已投入运营的智能化系统进行分析, 将智能化运行的功能划分为智能感知、智能控制、智能维护、智能巡检四个方向, 选取可应用在核能行业内的相关技术进行综述, 调研结果可以为核电智能化技术落地提供支撑。

关键词

核电智能化, 在线巡检, 大数据, 能源互联网, 机器学习

Feasibility Study and Analysis of Intelligent Technology Application in Nuclear Power Industry

Juan Wang, Xu Wu*

Guangxi University Key Laboratory of Parallel Distribution and Intelligent Computing, Nanning Guangxi

Received: Mar. 21st, 2023; accepted: Jul. 20th, 2023; published: Jul. 27th, 2023

Abstract

The energy industry is a booming industry that needs to gradually apply intelligence to the booming industry. Starting from other energy industries, this paper analyzes the intelligent systems that have been put into operation in the energy industries such as wind power, thermal power, hydropower and power grid, and divides the functions of intelligent operation into four directions: intelligent perception, intelligent control, intelligent maintenance and intelligent inspection. The

*通讯作者。

selected relevant technologies that can be applied in the nuclear energy industry are reviewed, and the research results can provide support for the implementation of nuclear intelligent technology.

Keywords

Intellectualization of Nuclear Power, Online Patrol Inspection, Big Data, Energy Internet, Machine Learning

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“工业 4.0”首次提出了以高度数字化、网络化、机器自组织为标志的第四次工业革命。2015 年,我国继而提出了“中国制造 2025”,其内涵旨在信息化和工业化深度融合的背景下,应对人工智能、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。在“中国制造 2025”列出的十大重点发展领域中,新一代信息技术、高档数控车床和机器人、电力装备等均与核电行业紧密相关。在 2018 年底中核集团发布的《创新 2030》工程方案中,将“智慧核工业”列为 29 项重点型号任务之一,在 2030 年前初步建成智慧核工业,通过广泛采用现代技术(如物联网、云计算、大数据分析、人工智能、机器人、虚拟现实和移动应用等),首先做到“少人干预,少人值守”,最终实现装备无人化和工厂智能化。从核电发展的需求上,随着对于核电安全性和经济性要求的不断提升,新型核电机组的出现,对于现有技术也提出了新的挑战,都需要智能化技术的贡献。可见,智能化已经成为核电技术未来发展的一个必然趋势。

2022 年国家信通部发布的《人工智能白皮书》将我国能源行业智能化关键技术应用方向分为以下六个方面:智能开采设备的设计、研发、管控、使用、检修和维护方面;能源传输设备的智能巡检及安全预警;能源分配及消耗;能源价格调优;需求侧的能源节约;能源公司的运营及后续服务。北京必可测公司给出火电厂智能化建设包括三个模块,“智能经营”,这是发电企业的最终目标;“智能发电”,是通过人机(自动化设备)交互、并根据预设和整定好的控制逻辑,自动执行企业经营计划、完成生产任务的基础;“智能维护”,是通过不断改善设备的运行工况与不断提升设备的可靠度,持续支撑“智能发电”优化运行[1]。但当下电厂的自动化水平并没有比基于模拟技术的电厂有显著的提升、海量数据缺乏深入的挖掘等。对于智能化技术的研究和应用,则还是处于研究探索阶段,仅有少量零星的工程应用。因此在核电领域的智能化研究,可以参照火电行业,从智能感知、智能控制、智能维护、智能巡检等方向开展研究。

2. 智能感知

智能感知主要包括数据采集、数据生成以及数据处理和存储等几部分,是能源行业智能化建设过程中必不可少的一环。在核电亟需智能化,减少人工的今天,需要对火电、电网行业的感知系统进行探索与研究。

2.1. 大数据、云计算能源行业应用案例

在核电智能化中,需要建立核电大数据平台,通过大数据平台对场内部数据分析、建模,充分挖掘

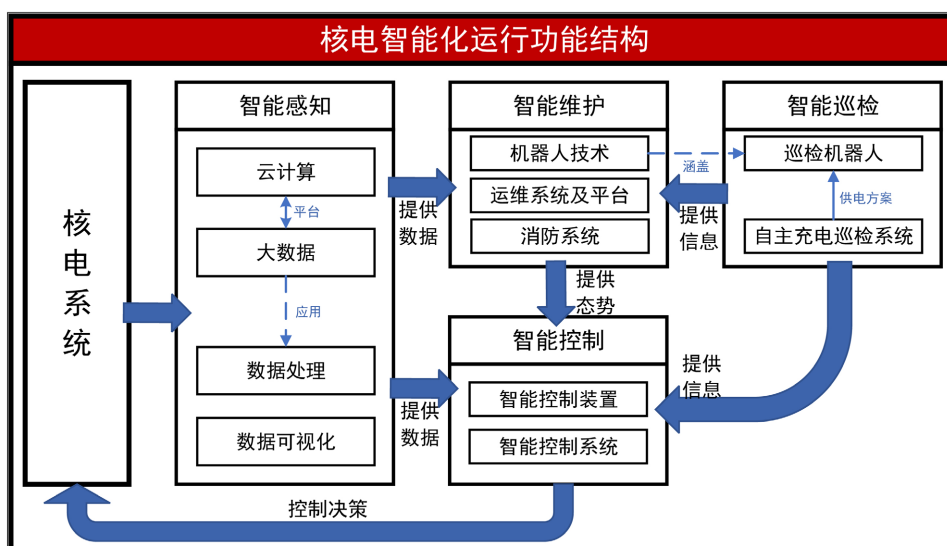


Figure 1. Structure diagram of intelligent operation function

图 1. 智能化运行功能结构图

数据价值, 并对社会需电量进行预测。提出该时间区间内, 最优的控制方案。可有效降低核电厂的运营、维护成本, 将利益最大化。如图 1 所示, 为该运行功能简化结构。

1) 在风电行业, 远景能源设计的能源管理系统已得到成熟应用。远景能源建立了基于智能传感网和云计算的智慧风场生命周期管理系统, 系统主要组成包括了格林威治(Greenwich)云平台、智慧风场 WindOS 管理系统以及 WindOS 高级应用。系统可帮助客户提升风场实际投资收益和减少风电场减少发电量损失。远景能源已经管理了包括美国最大的新能源上市公司 Pattern 能源、美国大西洋电力公司以及中广核集团等在内的 1000 万千瓦的国内外新能源资产[2]。

2) 光伏发电行业, 基于云平台技术的能源管理与服务正逐步推进。天合光能股份有限公司公司已宣布与阿里巴巴旗下阿里云合作共同为客户提供基于阿里云计算平台的智慧光伏电站设计、建设、智能运维、金融等全面服务, 搭建 SolarCloud。

3) 大数据是电力行业数据智能管理的关键技术。在国家大数据战略、能源互联网及能源行业转型升级背景下, 恒华龙信公司研发了电力大数据分析平台(Power Data Platform), 可全面支撑电力业务领域的数据建模、数据分析、数据挖掘, 充分发现和利用数据价值。同时提供从规划到集成建设的一体化电力大数据实验室(中心)的解决方案。平台有很多接口, 包括数据接入, 数据存储管理, 主题库构建, 模型算法库管理, 数据分析挖掘等, 为服务电力行业提供了有力保障。

4) 大数据技术是能源行业智能运维的助推力。河南省能源大数据中心已开发建设能源监测预警和规划管理、电眼巡航、新能源规划与消纳监测预警、充电智能服务平台等实用化应用场景 23 项, 初步构建了开放共享的能源大数据共创平台。该场景以服务政府治理能力现代化为根本, 贯通能源企业级、项目级数据, 上线运行能源概况、运行监测、预测预警、项目管理四大功能, 实现全省能源运行全景监测和精准预警, 有效破解了能源数据管理分散、共享性差的难题[2]。

5) 针对火电厂厂用电气监控管理系统(ECMS)现有的系统结构(通讯 + 硬接线与全通讯方式)存在的问题, 首钢京唐钢铁联合有限责任公司自备电厂使用了一种与 DCS 系统相互独立的多机组 ECMS 系统结构的新型方案, 实现对全厂用电系统的监测、管理, 以及对高低压厂用电源、厂变等设备的监测、控制和管理功能[3]。

大数据与云计算技术是在互联网生产水平高速发展的需要下形成的,从应用角度看,大数据是云计算的应用案例,云计算是大数据的实现工具,二者在现实应用中有密不可分的联系,在能源行业的数据管理与运维监控等方面有巨大的意义。据上所述,智能化技术相对成熟的风电、光伏、火电行业中均在不同程度上应用大数据与云计算技术实现运维数据管理与能源监控等功能,证明了该技术的落地所需的硬件配套水平较成熟,对需求相近的核电行业具有可迁移的参考价值,相关技术可应用于核电行业数据与能源市场管理、运维监测等方面。

2.2. 数据处理及可视化

在核电领域,系统的运行数据具有非线性、携带噪声、高维度等特点,对核电系统运维分析、人员判断形势、及智能化应用方面带来阻碍。如何从核电系统高维度大样本的运行数据中提取有效的信息,以供运行操作人员与智能化系统分析系统情势、判断后续操作,有十足的意义。

1) Nvidia-Baker Hughes GE 智能平台。贝克休斯把英伟达的运用自然语言处理、递归神经网络模型、深度学习神经网络等技术用于地震模拟、油气井自动化、机械故障预测和供应链优化等领域。通过 GPU 加速的分析技术,大量传感器数据实现可视化,并能让工程师对这些数据展开分析。同时,通过对深度学习和机器学习算法的运用,贝克休斯可以对条件变化时作业的可靠方式进行判定,并能将大量的地震数据图像转换成 3D 地图,提高油藏储存预测的准确度。

2) 为了提升大型机组设备故障信息的提取效率,实现故障可视化诊断,上海工商外国语职业学院智能制造与信息工程学院提出了一种大数据处理环境下大型机组设备故障可视化诊断方法。该方法能够获取设备不同模式下的故障频率响应信号,并将其频率谱作为故障特征,利用模糊减法聚类算法获取故障诊断结果,并利用三维平行散点图与人机交互将故障诊断结果可视化呈现。该方法可有效完成大型机组设备故障诊断,并且具备较好的可视化效果,可满足大型机组设备故障的可视化需求。

3) 随着能源大数据的快速增长以及能源数据监测的传感器数量与种类急剧增加,导致电力数据质量和数据融合遇到了一系列问题,针对此问题国网吉林省电力有限公司开展基于多源异构的能源数据处理技术研究。基于随机森林的多源异构数据融合理论,建立了能源大数据训练网络。通过采用增量学习与离线学习的思想,在在线训练实时图像数据中搭建能源大数据的 MCS-RF 框架,有效解决了大数据的稀疏问题,并将离散数据转为适用于关联规则的数据,从而消除了能源大数据中的冗余信息。提高了不良数据的识别及能源数据状态估计的准确性[4]。

数据处理及可视化技术有助于将高维度、信息复杂的运行数据处理成精炼易读的可视化数据,在核电系统运维期间辅助主控室操纵人员高效识别系统态势。综上所述,该技术的硬件基础与配套能力较为成熟,可应用于核电站机组级数据信息处理与可视化处理。

3. 智能控制

对于压水堆核电站而言,核电站主要控制系统有:反应堆功率控制系统、反应堆平均温度控制系统、稳压器压力温度控制系统、蒸汽发生器水位控制系统和主辅给水控制系统。其中,反应堆功率控制系统对于运行而言是最为重要的,根据不同的电网需求采取不同的运行方式。但因此而引起的堆内功率空间分布的不确定性、非线性和温度通道的滞后性是建立模型和选择控制方案过程中需要着重考虑的。因此对于压水堆核电站功率控制系统的建模和控制方法研究,不管是对于系统优化,还是对核电站安全经济运行都有十分重要的意义。

3.1. 智能控制装置(可应用在核电智能化)

1) 上海宏力达信息技术股份有限公司主要从事配电网智能设备主要包括智能柱上开关、故障指示器和

接地故障研判辅助装置等。该公司最成功的产品是柱上智能开关(如图 2 所示), 该开关实现了传统电气开关与物联传感设备、边缘计算、工业控制设备的融合, 从而使柱上开关具备了人机互联能力, 终端研判能力以及深度集成化的特点, 能高效地在终端进行故障研判、故障定位、故障隔离, 并且实现远程人机交互。

智能柱上开关

智能柱上开关由柱上开关本体、控制终端和配套软件组成。

本产品深度融合了电流传感器、电压传感器、电容取电模块、线损采集模块等关键技术。具有自适应综合型就地馈线自动化功能, 不依赖主站和通信, 通过短路/接地故障检测和分级保护等技术, 自适应多分支、多联络配电网架, 实现线路故障选择性保护, 短路和单相接地故障迅速定位并就地自动隔离, 不影响非故障区域供电, 可以大幅提升供电可靠性, 实现配电架空线路的智能感知和边缘计算。

支持无线公网专网合一 (4G/3G/2G五模自适应、专网4G)、LTE1.8G通信频道、北斗、5G、光纤等多种通信方式, 适应配电网的各种应用环境及条件, 满足更高级的馈线自动化应用需求。

技术特点

- 开关本体极柱一体化密封交流电压/电流传感器和电容取电模块, 小型化设计
- 更高的绝缘特性和可靠性
- 超低功耗设计
- 可靠的选择性保护
- 就地式单相接地故障诊断
- 防远方误合闸的联动控制
- 定值自动匹配
- 科学的定值管理
- 安装免调试、运行免维护

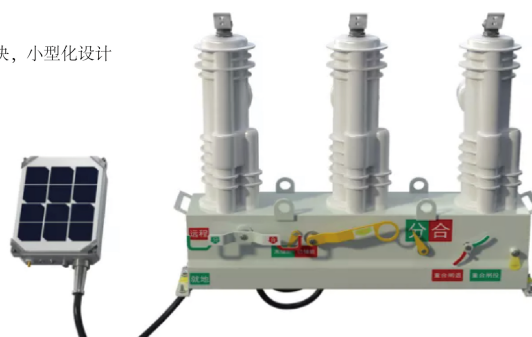


Figure 2. Introduction to intelligent switch on column

图 2. 柱上智能开关介绍

2) 针对大规模并网导致电站运行状态感知难、场站源网协调控制难、电力电量平衡难等一系列难题。大规模的新能源并网将使场站层级多、通信不规范、设备协调控制难度大、功率响应慢等问题更加突出, 对新能源发电高占比下的大电网安全稳定性的影响日益加大。

针对上述问题, 国网甘肃电科院研发团队开展了新能源发电统一信息建模及信息交互技术、基于多源数据融合的大型新能源电站有功分层控制技术和动态无功控制技术研究, 自主研发了大规模新能源电站多层级智能化运行控制系列装置和系统, 实现了新能源电站运行控制响应时间小于 4 秒, 有功/无功控制误差小于 1%, 有效解决了大规模新能源电站的组件/发电单元/场站不同层级设备运行控制的通信标准化、响应快速化、控制智能化技术难题, 降低了大规模新能源接入的电力系统运行风险[5]。

3) 河南省兰考县能源互联网平台开展示范建设基于多智能体的能源互联网分布式协同控制平台(如图 3)以含有冷、热、电、气等多种能源的能源互联网为用户对象, 分析能源互联网中基础数据、业务数据及各个能源系统间接口数据, 设计区域能源互联网分布式协调优化系统架构。设计系统的通信、安全防护以及与冷热气系统、储能系统的集成方案, 进行功能模块、用户体验界面、接口等的详细设计, 完成系统开发、测试与部署上线。建立基于多智能体的分布式协同控制架构, 可有效解决单一分布式能源个体容量小、波动性强、可控性差、难以集中调控等问题, 从而提升能源互联网的综合治理水平[6]。

4) 雷州发电厂控制系统采用基于现场总线技术的国产分散控制系统, 实现全厂机组炉、机、电、辅的一体化集中监控功能。采用先进的现场总线网络通信技术, 以数字信号取代模拟信号, 应用数字化、智能化、智能化、网络化和数据集成技术, 在设计、建设、移交、运行和管理全过程构建现代化、自动化、智能化和集约化的数字化电厂, 增强现场信息集成、采集能力, 提高系统的可靠性、可维护性。相比传统的 DCS 系统, 现场总线技术能提供更全面的设备状态信息, 为智慧电厂数据深度挖掘、利用提供数据基础[7]。

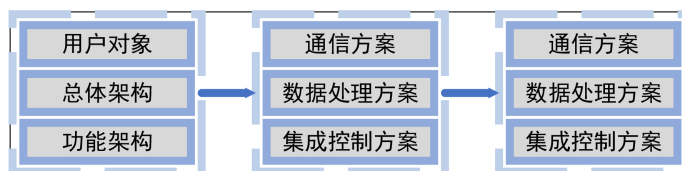


Figure 3. Distributed collaborative control architecture of multi-agent
图 3. 多智能体的分布式协同控制架构图

核发电机组在变工况运行期间(如机组启堆过程或事故下处置过程)的控制规程涉及大量子系统与设备的级联控制, 具有通信交互量大、控制耦合复杂的问题。大规模新能源电站多层次智能化运行控制系列装置及基于现场总线技术的分散控制系统, 都为核能系统的智能控制提供了方案参考。考虑到核能系统极高的安全性要求, 控制理论智能化技术(如强化学习、知识图谱等)在核能系统控制方面的表现仍待验证。

3.2. 智能控制系统(可应用在核电智能化)

针对能源互联网中的海量分布式设备和电动汽车的需求, 利用 C#和 Java 编程语言设计并开发了面向能源互联网的能量管理系统。该系统采用典型 B/S 架构, 以 Asp.Net 动态网页开发技术和数据库技术为核心, 由云端后台算法、云端服务器的 MySQL 数据库、前端的网页三大部分构成。该系统分为上下两层。其中, 上层为日前-实时协同的多时间尺度能量管理系统模块, 下层包含分布式设备协调控制子系统和电动汽车协调控制子系统。最后, 通过仿真算例分析, 能量管理系统能对海量的分布式设备和电动汽车进行优化调度, 验证了该软件的可移植性、有效性和实用性[8]。该系统的设计理念与相关技术可向核电系统迁移, 其中下层的分布式设备协调控制子系统和电动汽车协调控制子系统可迁移为核电系统控制设别协调控制子系统和核电智能机器人协调控制子系统。

4. 智能维护

实时监控及预测、故障诊断、自主决策是核电智能维护的三个研究热点, 国内外学者将深度学习、大数据、智能算法等与能源行业专业化设备融合。比如提出了一系列故障诊断、实时预测和智能决策方法。

4.1. 机器人技术

1) 针对煤矿环境下自行走轨道式巡检机器人在能源供给方面所存在的弊端, 研制了一套完整可靠的能源供给技术。该技术提出了应用耐低温锂电池组作为存储电源, 配备锂电池组电源管理系统, 实现对充放电过程进行安全管理与故障报警的技术; 设计的专用充电机构能够保证充电过程中接触点的可靠连接与压紧, 配备的充电辅热系统在使充电效率最大化的同时, 保障了充电的安全; 另外, 设置的充电站机库为巡检机器人提供了防护。该技术为巡检机器人的电源供给问题提供了一种更加安全可靠的方案, 有利于巡检机器人在煤矿井下的长时间续航与稳定作业[9]。

2) 通过智能化的改造, 大量智能变电站得到了建设与应用, 使得电力设备稳定性和系统安全性得到了不断提升。而变电站作为供电网络核心, 需发挥电力调度和持续供应作用。所以, 加强变电站的安全稳定运行管理至关重要, 是确保电力能够得到持续供应的保障。而在变电站安全稳定运行管理方面, 巡检工作十分重要, 可以通过巡视检查电力设备和抄录设备运行参数确认电力设备运行情况, 并及时发现设备存在的问题和隐患, 从而实现对电力事故的有效预防。在过去, 受技术水平限制, 需要依靠人力进行变电站巡检管理, 由人员逐个进行设备检查, 但在智能变电站得到建设的背景下, 依靠过去的巡检模式将遭遇技能不到位、巡查质量不佳和巡检周期长等问题。而伴随着人工智能技术和机器人技术的快速

发展,应用变电站机器人智能巡检系统(如图4所示),可解决变电站巡检问题,通过提高变电站巡检工作质量确保变电站安全稳定运行[10]。



Figure 4. Intelligent patrol robot for substation
图4. 变电站智能巡检机器人

3) 基于塔筒清洁和维护的爬壁机器人(如图5)可将工人从高空作业的高强度以及危险的环境中解放出来,并且能够极大的提高清洗效率和维护工作。根据风力发电机塔筒外壁的作业环境,西安理工大学顾盛明建立虚拟样机进行仿真分析,验证机器人的稳定性和运动性能。最后进行有限元分析,验证爬壁机器人在作业时的安全性,可以为带负载的磁吸附爬壁机器人提供理论设计依据[11]。



Figure 5. Overall model of wall-climbing robot
图5. 爬壁机器人整体模型

4) 塔身清洗机器人本体由驱动系统、传动机构、悬架结构以及支撑结构组成,在悬架系统上还装载有控制箱以及清洗作业单元。伺服电机驱动器、清洗作业单元的直流电源模块、倾角传感器以及下位机控制电路板等均安装在控制箱内。下位机根据上位机传输的指令驱动伺服电机,从而控制爬壁机器人的运动,并采集倾角传感器的反馈数据传输给上位机,使其能够实时进行路径规划,防止机器人爬偏;同时控制清洗单元电动推杆的动作,从而实现清洗刷的抬起和落下,使其能够顺利完成清洗工作。机器人的驱动系统由交流伺服电机、行星减速器、联轴器、链轮和链条组成,采用后驱动形式,两侧电机对称布置。由交流伺服电机经行星减速器减速后带动链轮,链轮带动链条运转,从而驱动爬壁机器人前进。行走机构的悬架系统采用销轴连接的形式,选用型号为 12×48 的A型销轴。整个机器人通过线缆与塔筒顶端的电源、水管以及上位机控制系统相连,并在塔筒顶端通过吊绳的方式为机器人提供安全保护[12]。

自上世纪, 核电行业就开始探索机器人技术的应用, 美国、日本、法国等国家各自开展了相关研究。日本福岛事故后美国曾派遣核应急机器人进行厂房内的环境监测与碎物搬运等工作, 法国也根据核电系统复杂不规则的管线空间设计了形体柔软的蛇形机器人。但国际上核机器人技术并未有一套统一的标准与应用方向, 整体呈现出功能杂乱、标准不一、体形差距大等特点, 此外, 高放射环境也为核机器人的设计与应用带来困难。

4.2. 智能运维系统

1) 江西电建公司新能源场站智慧运维平台项目基于云计算、大数据、物联网、移动互联网及人工智能相关技术, 以传统业务的移动化、智慧化应用为切入点, 聚焦新能源场站设备状态参数的数据挖掘, 实时分析设备健康状态, 预警预判设备运行风险, 智能决策安排场站侧的设备检修计划; 有效调度运维资源与力量, 实现新能源场站由计划检修向精准检修、预防性检修的创新转变, 逐步实现风电场“集中监控、无人值班、少人值守”的高效智能运维模式, 最终实现集中化监控、集约化管理、高效化利用的跨越式发展, 从而提高企业核心竞争力。

2) 基于互联网的电能计量故障诊断排查专家系统。该发明提供了一种基于互联网的电能计量故障诊断排查专家系统, 该电能计量故障诊断排查专家系统包括第一移动终端、后台数据分析处理系统和云端数据库服务器; 其中云端数据库服务器设置电能计量诊断故障库; 第一移动终端, 与后台数据分析处理系统通讯互联, 用于供现场检修人员输入故障现象描述信息, 并将所述故障现象描述信息传输至后台数据分析处理系统; 所述后台数据分析处理系统, 还与云端数据库服务器通讯互联, 根据接收到的故障现象描述信息, 调用所述电能计量诊断故障库中的数据, 并将输出的故障消缺处理步骤发送至第一移动终端。该发明具有远程在线、排故效率高和人力成本低的优点[13]。

3) 电力系统故障诊断专家系统。一种电力系统故障诊断专家系统, 包括诊断系统主站, 诊断系统主站包括: 数据存储结构, 用于数据的存储; 专家知识库, 用于专家知识存储; 前置服务器, 用于采集电力系统的运行参数, 并执行数据预处理; 分析引擎, 用于作为实时推理机, 从前置服务器采集缓存推理所需的观测信息, 从专家知识库搜索合适的专家知识, 完成推理, 并保存推理过程与推理结果; 运行工作站, 用于作为用户客户端。故障诊断专家系统实现对电力系统故障的诊断及事故处理的辅助决策[14]。

4) 基于深度学习的电力设备故障诊断专家系统。对于变压器的高压套管检测问题, 北京工业大学卢俊达提出一种基于 Hu 不变矩的 SVM 检测算法。该算法针对变压器背景复杂不利于检测的问题, 将图像预处理方法引入特征提取步骤, 并使用经遗传算法参数寻优后的支持向量机对待测对象进行分类。该方法可以去除杂乱背景的干扰并准确检测高压套管, 检测准确度优于传统检测方法; 同时, 卢俊达针对绝缘子的检测问题提出一种基于多尺度卷积神经网络的检测算法。该算法的准确性优于基于传统卷积神经网络的检测算法。基于以上两种电力设备检测算法, 设计并实现了一种故障诊断专家系统。该系统通过上述检测算法的学习过程来获取知识, 完成检测知识库和推理机的构建。该系统在获取设备的位置信息后, 结合红外图像中设备的热状态信息, 可以对设备故障信息进行诊断并给出检修建议[15]。

核事故的超前预测与诊断技术用于识别核电系统的事故与发生趋势, 对核电系统安全运行有重要的意义。据上所述, 故障诊断技术包含专家知识系统、深度学习等方法, 支持设备级、系统级的特定故障识别。然而核电系统故障诊断并非受限于诊断技术的成熟度, 而是受限于核电系统各类故障数据难以获得的现状。

4.3. 人工智能消防系统

1) 杭州市消防救援支队打造“数据治火”智能防控平台。随着新形势下消防安全管控需要, 面对火

灾防控“自动化”、执法工作“规范化”、灭火指挥“智能化”、队伍管理“精细化”的消防安全需求,浙江杭州市抢抓机遇,多措并举着力推进“智慧消防”建设,建成了信息化与消防业务的深度融合,全覆盖的社会火灾防控体系,打造“数据治火”智能防控平台,实现了“传统消防”向“智慧消防”的转变。以动态数据展示、重大安保应用、事件决策辅助等内容为重点,优化升级“数据治火”智能管控平台,综合运用消防物联网、智能 AI、大数据、云计算等科技手段,开发亚运重大安保应用场景。2021 年截至目前,已试点参与“杭州建党 100 周年庆典、中国质量(杭州)大会、白马湖动漫节”等重大安保活动。试运行期间通过重大安保移动端开展 300 余次社会面排查,70 余次单位自主防火巡查,发现 60 余项火灾隐患,执行工作指令 30 余条,累计接收场馆以及周边单位智能感知设备预警 700 余次。

2) 电气火灾监控系统在智慧消防建设中的应用。针对电气火灾事故进行预先测算与报警,并在出现问题时及时开展救助。目前在电气系统中已准入了智慧用电监控系统,该系统有机融合物联网、云载体及大数据技术等多元优势特征,可有效监控漏电等不良状况。当相应问题出现时可将各类信息及时传送至系统中,接着整体系统便会开始运作,将即时信息再次传输给相应移动设备终端,之后通过电气火灾监控系统对基础信息进行查看,最终探寻出最优的解决方法[16]。

3) 基于计算机视觉技术的油库智能消防系统。智能消防系统一般以智能控制为核心,采用微处理器进行控制,通过智能控制中心来控制火灾探测器和联动控制装置。火灾探测器负责对油库进行实时监测,控制中心以查询命令的方式调用探测数据,随后对数据进行分析,按预置的算法进行处理。通过已有的判据设置来判定火灾的发生与否。鉴于现代油库的发展趋势,基于计算机视觉技术的油库智能消防系统已成为消防系统的主流方向。本消防系统的技术重点是火灾探测算法和消防射流终点定位的算法,通过实际模拟,证实了算法的可行性[17]。

4) 基于深度强化学习的智能体在智慧消防中的应用研究。针对在火灾发生时因救援环境复杂导致被困人员搜救困难的问题,安徽理工大学计算机科学与工程学院提出了一种基于深度强化学习的智能体在消防场景中的目标别和路径规划算法。通过将强化学习算法与卷积神经网络相融合,赋予智能体一定的自主判断、规划分析和目标识别能力。建立了基于公共消防场景的模拟仿真环境。基于上述消防场景的实验模拟,实现了当智能体在规定区域的任何位置扫描到火源或火灾中的被困人员时,即可及时将之前学习的最合理的规划路线传达给外部救援人员,为救援人员提供救援时间短路线合理的救援方案[18]。

5) 人工智能在智能消防系统中的研究与应用[19]。现阶段消防系统的智能化研究及应用主要集中于以下几个方面:安全评价标准、消防监督工作、风险预测、资源推荐等。智能消防系统 AIFFSa,旨在打破消防业务系统层面分散化的局面,利用大数据技术和人工智能技术,通过数据多源融合进行态势推演及风险预测、资源调度路径规划,为火灾指挥提供支持。

5. 智能巡检

在核电领域,由于设施或运行环境具有放射性,往往存在人员无法操作或者风险较大的问题,这种情况下利用机器人进入放射性高或者操作难度大的区域进行类似关键设施维护检修、放射性废物处置、应急响应等工作[20],因此,巡检机器人是能源行业智能化研究的重点之一。针对在复杂电力智能巡检任务与环境下,多机器人路径规划算法计算量大、实时性差的问题,提出了面向电力智能巡检的多机器人系统协同路径规划算法[21]。

5.1. 智能巡检机器人

1) 风电机组巡检机器人系统[22]。该风电机组巡检机器人系统,包括机舱智能巡检机器人、机器人机舱柜、机器人塔底柜及智能巡检机器人远程监控站;机舱智能巡检机器人搭载有监测传感器,用于在

机舱内按照规定路线行进, 通过搭载的监测传感器对机舱内部监测点进行巡检; 监测传感器包括红外夜视摄像头、热成像摄像头、烟雾传感器、声音传感器、温湿度传感器; 机舱内部监测点包括发电机、高速轴、齿轮箱、主轴、主轴螺栓、机舱柜; 机器人机舱柜包括控制器、稳压电源、光电转换器、光端机; 机器人塔底柜包括光端机、wifi 网关、手持操作终端; 智能巡检机器人远程监控站包括监控设备; 该发明实现机舱内部状态监测、数据分析、故障分析, 具有可靠、高效、省时、安全等多种优点。

2) 中山嘉明电力有限公司利用丰富的电厂管理及业务经验, 于 2020 年 6 月首度创新提出全地形四足巡检机器人应用方案, 并组织合作团队对国产四足机器人进行二次开发。经多方努力突破重重技术瓶颈, 成功落地国内首个发电厂四足机器人智能巡检项目。该项目不仅实现了发电厂工艺介质跑冒滴漏、仪表读数、PPE 穿戴等机器视觉 AI 分析, 还创新集成了声学成像技术, 可实现肉眼不可见工质泄漏、局部放电、振动检测等巡检功能, 工业场景普遍实用性极强, 大幅降低了一线运行人员在高风险环境暴露时间, 提升了工作效率及职业健康安全水平。

3) 杭州申昊科技股份有限公司成立于 2002 年, 是一家致力于设备检测及故障诊断的高新技术企业。通过充分利用传感器、机器人、人工智能及大数据分析技术, 服务于工业大健康, 为工业设备安全运行及智能化运维提供综合解决方案。目前, 公司已开发了一系列具有自主知识产权的智能机器人及智能监测控制设备产品, 可用于电力电网、轨道交通、油气化工等行业, 解决客户的难点与痛点, 为客户无人或少人值守和智能化管理提供有效的检测、监测手段。

该公司主要致力于智能巡检机器人的生产及智能化研究, 相关机器人产品如图 5 所示。以 SHIR-3002 变电站开关室内轮式巡检机器人为例, 如图 6 所示, 该机器人采用小型化、轻型化和模块化设计, 融合无轨导航与自主建图、图像智能识别与分析、多传感器融合等技术, 实现对室内设备进行状态监测, 并通过后台对巡检数据进行对比和分析, 提前发现设备隐患和故障征兆, 保障设备稳定运行, 提高巡检效率。如图 7 所示, 该公司目前已针对不同应用场景推出多种巡检机器人。



Figure 6. Robot Products of Hangzhou Shenhao Company
图 6. 杭州申昊公司机器人产品



Figure 7. Intelligent inspection robots of Hangzhou Shenhao Technology Co., Ltd.
图 7. 杭州申昊科技股份有限公司智能巡检机器人

4) 变电站智能机器人巡检技术研究。沈阳建筑大学信息与控制工程学院庞人宁针对轮式巡检机器人进行了研究, 构建了基于机器学习的目标跟随和导航系统, 实现自主巡航, 定点拍摄、巡检图像回传等功能, 实现变电站机器人自主巡检, 提高巡检效率及运维能力[23]。

5) 一种输电线路智能巡检机器人[24]。该输电线路智能巡检机器人, 采用传统行走机构与飞行机构(无人机结构)相结合的双动力驱动方式, 在正常运行时, 通过传统行走机构驱动在输电线路行走; 当碰到铁塔需要跨越时, 通过飞机机构飞行实现跨越铁塔, 从而不会受限于各个铁塔的结构及尺寸, 巡检效率高; 在机械臂末端带有充电组件(如充电触头), 由于铁塔本体上布置有太阳能光伏板, 巡检机器人行走至附近充电处, 即可通过机械臂末端的充电触头实现对插, 从而给机器人本体供电, 实现机器人长期在输电线路不断的间歇性的巡检和作业; 通过上述设计, 实现真正意义上的输电线路机器人替代人工巡检, 替代人工作业, 减少电力工人的劳动强度, 减低人员作业的风险, 长期在输电线路不断的巡检作业; 机器人能适应各种场景, 通用性强, 可大面积推广应用[25]。

巡检机器人是机器人技术的应用之一, 用于进行工业场地日常运维的监控作业。综上所述, 巡检机器人行进方式有轮式、无人机式等, 目前在电厂、变电站等场地应用成熟, 具有向核电行业迁移的潜力, 在迁移过程中, 需额外考虑核电行业运维信息维度高、部分环境恶劣(高温、高压、高放射性)的特点。

5.2. 自主充电巡检系统

1) 利用无人机进行输电线路巡检。广东电网有限责任公司佛山供电局刘杰荣提出一种基于机器视觉的自动充电控制技术, 搭建基于蛙跳式的无人机自主充电系统。系统由无人机平台、自动充电平台和地面控制系统三部分构成, 依托智能控制技术和飞控系统, 运用机器视觉、图像识别等技术实现无人机的高精度定位和智能精准降落, 并结合无人机预设的卡位与地面充电平台充电接口的有效对接, 完成无人机电力电池的自动可靠充电, 进而实现巡线无人机的自动起降和充电功能[26]。

2) 基于视觉伺服的变电站巡检机器人自主充电对接技术[1]。针对变电站巡检机器人现有自主充电对接方案和其存在的不足, 青岛科技大学电气工程学院孟维川将机器人的自主充电对接过程分解为远程返航和近程对接。在远程返航阶段, 针对传统的路径规划算法 D^* Lite 在动态规划中存在的局部最优问题, 提出地图转角处预瞄算法, 可以通过预判障碍物, 提前进行路径规划, 提高机器人返航的效率; 在近程对接阶段, 针对现有的对接方案受环境影响大, 成功率低的问题, 提出基于 AprilTag 标签的位姿测量方案, 通过对相机采集到目标图像的预处理, 提高目标的识别精度, 并对辅助标签进行识别, 获取到巡检机器人和充电装置的相对位姿。再次, 在对基于 AprilTag 标签的位姿识别进行深入研究的基础上, 针对巡检机器人和充电装置的对接问题, 设计了基于位置的视觉伺服控制器, 对机器人进行运动控制以完成对接任务。最后, 利用巡检机器人实验平台, 设计并完成了自主充电的实验[27]。

当前核电巡检机器人的信号传递方式为“有线+无线”式, 具体为主控室与中继站之间通过无线方式连接, 中继站与机器人之间通过线缆连接, 这保障了放射环境下机器人可正常作业的要求, 但线缆的连接限制了机器人的作业距离, 同时在不规则环境下还可能导致线缆与环境障碍交缠的情况发生。同样的问题也意味着机器人通过有线接电方式工作不可取, 上述自主充电巡检系统为核电巡检机器人的供电提供了参考。

6. 总结

本文从其他能源行业出发, 通过对风能、火电、水电、电网等能源行业已投入运营的智能化系统进行分析, 将智能化运行的功能划分为智能感知、智能控制、智能维护、智能巡检四个方向。选取可应用在核能行业内的相关技术。

1) 智能感知方面, 在当下其他能源行业中, 大多使用大数据平台对场内部数据分析、建模, 充分挖掘数据价值, 并对社会需电量进行预测, 提出该时间区间内最优的控制方案。通过接入内部传感器并上传数据; 在掌握真实数据后, 通过智能算法对系统的计算分析, 形成监测、预警、优化一体化的管理系统, 这即可以提高决策者的监督管理能力, 减少人力劳动, 提高整体工作效率。所以感知系统在智能化进程中需要通过多种传感器, 对堆芯内部数据进行宏观检测、处理, 随后选取性能稳定精确的智能算法对数据进行分析。

2) 在智能控制方面, 选取一些火电、风电性能良好的且适合应用在核电领域的智能化控制设备, 同时分别探讨软件上、硬件上可应用在核电的智能控制系统。在大多数情况下, 可以应用在核电的控制系统, 在堆仓内需要有控制的硬件设备, 写入智能算法, 对功率、反应堆内设备进行精准控制, 同时需要设计简洁直观的前端操作界面, 让操作人员对各系统状态一目了然。由于核电系统极高的安全可靠要求, 系统级控制智能化难度较高, 优先从设备级控制智能化或控制辅助决策的角度来考虑可行性较高。

3) 在智能维护上, 首先调研了应用在煤矿、管道以及变电站、火电站内部的维护机器人, 在日后的核电维护机器人设计与应用方面, 可进行参考研究, 机器人在其他行业的应用投入证明了该技术硬件配套能力是成熟的, 但在高温高压高辐照的特殊环境, 机器人的本体材料与芯片耐辐射研究需要进一步研究。应用在火电、电力设备的智能故障诊断系统以故障数据为基础进行专家知识检索或深度学习训练, 在核电行业中故障数据开源较少, 小样本故障数据下的故障诊断训练是核电领域要面临的问题。

4) 在智能巡检上, 分别调研巡检机器人以及可自主充电机器人, 均可进入辐射性高或者操作难度大的区域进行类似关键设施维护检修、放射性废物处置、应急响应等工作。在未来核电巡检机器人中, 需要拥有面向电力智能巡检的多机器人系统协同路径规划算法、自主充电对接技术、基于机器学习的目标跟随和导航系统等进行研究。

虽然目前在核电厂进行智能化运行控制上仍有许多问题, 但是仍希望本文中的调研内容能够为智慧核电的发展作出贡献, 加速智能化应用在核电厂中的进一步整合。

参考文献

- [1] 张誉千, 张星. 国内外“互联网+”智慧能源典型案例及相关建议[J]. 水能经济, 2018(1): 355.
- [2] 陈军, 刘子华, 卜飞飞. 打破“数据壁垒”实现互联互通——河南省能源大数据中心建设纪实[J]. 河南电力, 2020(10): 18-19.
- [3] 张文建, 张永霞, 王朝晖, 宫旭辉. 火电厂 ECMS 和 DCS 一体化监控[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 106-110. <https://doi.org/10.19666/j.rlfid.201808159>
- [4] 潘建宏, 张帆, 王磊, 张俊茹, 郝保中. 基于多源异构的能源数据处理技术研究[J]. 电子设计工程, 2022, 30(16): 143-147.
- [5] 颜满斌, 何文. 多层次智能控制技术筑牢大规模新能源电站安全防线[N]. 科技日报, 2022-08-26(008).
- [6] 秦羽飞, 葛磊蛟, 王波. 能源互联网群体智能协同控制与优化技术[J]. 华电技术, 2021, 43(9): 1-13.
- [7] 齐海艳. 1000 MW 二次再热机组智慧电厂建设[J]. 通信电源技术, 2019, 36(3): 236-237+240.
- [8] 赖伟坚, 陈威洪, 林泽宏, 李敬光, 张鑫, 唐建林, 余涛. 能源互联网内多类设备协同运行的能量管理系统软件设计[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 72-80.
- [9] 金建成. 矿用巡检机器人能源动力技术研究[J]. 中国新技术新产品, 2021(18): 10-12.
- [10] 汤鹏. 变电站巡检机器人视觉导航技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
- [11] 顾盛明. 风电塔筒轮式爬壁机器人设计与仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [12] 刘枫. 风力发电机塔身清洗机器人设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] 郑州万特电气股份有限公司. 基于互联网的电能计量故障诊断排查专家系统[P]. 中国, CN201910347467.6. 2021-07-02.

- [14] 程晓絮, 眭仁杰. 基于专家系统的船舶电力系统故障诊断探究[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(9): 70-71.
- [15] 卢俊达. 基于深度学习的电力设备故障诊断专家系统[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [16] 何昌金. 电气火灾监控系统在智慧消防建设中的应用[J]. 消防界(电子版), 2020, 6(6): 45+47.
- [17] 杨挺. 基于计算机视觉技术的油库智能消防系统[J]. 油气田地面工程, 2013, 32(7): 67-68.
- [18] 牛浩玉, 汤文兵, 田锦. 基于深度强化学习的智能体在智慧消防中的应用研究[J]. 通信技术, 2019, 52(10): 2567-2572.
- [19] 王浩宇, 陈颖, 缪燕子, 等. 一种矿井主要通风机故障诊断系统[J]. 工矿自动化, 2017, 43(6): 69-71.
<https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2017.06.016>
- [20] 杨笑千, 郭捷, 唐华, 等. 大数据、人工智能在核工业领域的应用前景分析[J]. 信息通信, 2020(2): 266-268.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1131.2020.02.128>
- [21] 琚泽立, 杨博, 孙浩飞, 等. 面向电力智能巡检的多机器人系统协同路径规划算法[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 92-97. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-7598.2020.06.015>
- [22] 曹庆才, 冯强, 刘立群, 等. 一种风电机组巡检机器人系统[P]. 中国, CN112621745A. 2021-04-09.
- [23] 庞人宁. 变电站智能机器人巡检技术研究[J]. 电气开关, 2022, 60(4): 19-22+27.
- [24] 郭瑜, 童丽娜, 倪旭明. 基于改进卷积神经网络的电力通信网故障诊断研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 24-30. <https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.02.004>
- [25] 刘贞瑶, 高方玉, 高安洁, 郭嵘, 何野. 一种输电线路智能巡检机器人的仿真设计[J]. 电气技术, 2019, 20(12): 41-45.
- [26] 刘杰荣, 王伟冠, 何其淼, 等. 蛙跳式充电的无人机自主巡线技术与系统(二): 基于机器视觉的自动充电控制[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 182-188. <https://doi.org/10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.022>
- [27] 孟维川. 基于视觉伺服的变电站巡检机器人自主充电对接技术[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.