

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.05.001

牵引供电系统与新型配电系统优化控制技术

多能互补接入下贯通式柔性铁路牵引供电系统 运行状态感知技术综述

葛磊蛟^{1,2}, 林可愿¹, 任丽苗¹, 赵珊鹏¹, 程宏波³, 陈晓婧¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;
3. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

摘要:贯通式柔性牵引供电系统是保障绿色轨道交通高速可靠运行的关键,也是提升铁路运行效率的核心技术。多能互补接入下贯通式柔性牵引供电系统面临源网荷储随机性强、运行工况复杂化、运行态势多样化等挑战,高精度的运行状态感知技术是重点。为此,本文聚焦于实现铁路运输可持续发展与绿色低碳运营,系统梳理了多能互补接入下贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知技术。面向精准感知的需求,设计了牵引负荷与新能源强随机的运行状态感知架构,阐述了数据获取、特征提取、感知融合、态势预测等运行状态感知4个方面关键技术。最后,从实现数据驱动和智能化的角度出发,总结了该技术面临的挑战与发展趋势,为该领域的进一步研究与工程实践提供了重要参考与指导。
关键词:多能互补;贯通式柔性铁路牵引供电系统;运行状态感知;绿色轨道交通;态势预测

Review of Operational State Perception Technologies for Through-type Flexible Railway Traction Power Supply System with Multi-energy Complementary Integration

GE Leijiao^{1,2}, LIN Keyuan¹, REN Limiao¹, ZHAO Shanpeng¹, CHENG Hongbo³, CHEN Xiaojing¹

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The through-type flexible traction power supply system is not only the key to ensuring the high-speed and reliable operation of green rail transit, but also the core technology for enhancing the operational efficiency of railway. Under the multi-energy complementary integration, the through-type flexible traction power supply system faces such challenges as strong randomness of source-grid-load storage, complicated operation conditions and diversified operating situations. High - precision operating state perception technology is the key point. Accordingly, this paper focuses on achieving sustainable development and green, low-carbon operation in railway transportation, and systematically reviews the operation state perception technology of through-type flexible traction power supply systems with multi-energy complementary access. Aiming at the demand of accurate perception, a operation state perception architecture for traction load and new energy strong randomness is designed, and key technologies from such four aspects of operation state perception as data acquisition, feature extraction, perception fusion and situation prediction are expounded. Finally, from the perspective of achieving data-driven and intelligence, the challenges and development trends of this technology are summarized, which provide important reference and guidance for further research and engineering practice in this field.

Keywords: multi-energy complementarity; through-type flexible railway traction power supply system; operational state perception; green rail transit; situation prediction

收稿日期:2024-10-12

基金项目:国家自然科学基金(52277118);天津市自然科学基金多元投入重点项目(22JCZDJC00660);兰州交通大学—西南交通大学联合创新基金项目(LH2024027)。

0 引言

我国电气化铁路目前采用工频 27.5 kV 的单相牵引供电系统,其通过分相供电臂为电力机车提供必要的电能,然而种供电方式下将形成两相非对称的供电结构^[1]。并且异相供电方式在实际运作中表现出明显的非对称特性,包括电压的相位差异和幅值的变化,其导致了供电的复杂性。因此许多研究者在现有的牵引供电模式基础上,提出了多种创新的改进方案。而贯通式柔性牵引供电系统,因其能有效解决供电效率低下和供电不稳定的问题^[2],发展前景广阔。

风光等新能源是实现我国“双碳”能源战略目标的关键力量。当前,推动新能源的就近就地消纳成为新能源发展的重要方向,也是实施我国能源战略的关键措施之一。将贯通式柔性铁路牵引供电系统与风光等新能源发电技术有效结合,能解决我国西北地区新能源消纳问题、提升电气化铁路绿色低碳运行水平。这种结合形成了在多能互补接入下的贯通式牵引供电系统架构。这一新型系统不仅能够增强供电的稳定性和可靠性,而且有利于推动铁路运输的可持续发展和实现绿色低碳运营。目前,牵引供电系统中常见的能源耦合形式主要包括:太阳能、风能等可再生能源,电池储能和传统电力系统相结合^[3]。对于采用“贯通式柔性供电系统”的铁路网络,考虑到新能源接入的位置,其接入方案可分为电网侧的全部自用与余电上网,以及牵引侧的全部自用^[4]。通过在轨道交通中引入分布式发电和储能技术,其能实现能源的转置和梯级利用。此外,综合能源系统的灵活性使其能够更好地应对不同运行条件下的电力需求,进一步优化运营成本^[5]。

多能互补接入下贯通式柔性铁路牵引供电系统相较于传统铁路牵引供电系统,其有效解决了电能质量问题,彻底取消了电分相装置,同时接入的分布式能源可被就地消纳,但其变流控制相对复杂,技术难度大。并且由于多能源接入带来的强波动性和间歇性特点^[6],以及牵引负荷的大幅波动,导致贯通式柔性铁路牵引供电系统在应对运输需求峰值、自然灾害或能源市场变化时,无法提供持续稳定的能量支持^[7]。因此,开展多能互补接入下贯通式柔性铁路牵引供电系统的运行状态感知技术研究,深入分析系统内部的交互机制和外部环境影响,探索创新技术解决方案和管理策略,以优化系统的整体性能和可靠性为目标,不仅对提升铁路供电系统的能效和安全性具有重要意义,也是推进铁

路运输现代化和实现绿色发展目标的关键路径。

本文聚焦于实现铁路运输可持续发展与绿色低碳运营,系统梳理了多能互补接入下贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知技术。面向精准感知的需求,设计了面向牵引负荷与新能源强随机的运行状态感知架构,深入浅出阐述了数据获取、特征提取、感知融合、态势预测等运行状态感知 4 个方面关键技术。最后,指出了当前状态感知技术面临的挑战及其未来的发展方向,旨在为我国相关研究提供参考与启示。

1 运行状态感知系统简介

1.1 多能互补接入下贯通式牵引供电系统运行状态感知关键技术框架

强随机多能互补接入下,贯通式柔性牵引供电系统如图 1 所示,保障其安全可靠运行的重点在于精准感知技术。其要求对供电系统进行全局多层域、快速、精准的感知,并解决跨层域协同感知难、高精度实时传输难以及突发事件的智能识别难等系列问题^[8]。本文针对上述问题梳理了当前保证系统稳定性、安全性和经济性 3 个层面的发展方向,以及其关键技术见图 2。

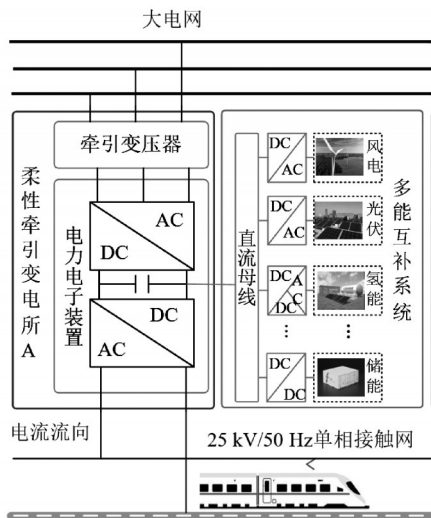


图1 贯通式柔性铁路牵引供电系统
Fig. 1 Through-type flexible railway traction power system

在稳定性方面,采用数据监测技术和动态负荷管理对新能源与牵引供电系统进行感知,实现对运行状态的实时监控。这不仅能够迅速识别潜在故障并进行有效处理,还能解决突发事件智能识别的难题,从而确保路网整体运行的全局最优状态^[9]。

在安全性方面,牵引变压器监测与电力物联网技术的结合显著提升了系统的预警能力与数据实时

传输速度,有效防范并减少了事故发生的风险^[10]。此外,数据融合技术在此过程中发挥了关键作用,其通过整合海量的多源数据,有效解决了跨层域协同感知的挑战^[11]。同时,数据融合技术还打破了传统的运行控制与动态调度的分层架构,实现了两者之间的紧密耦合,从而显著提升了系统的安全保障能力。

在经济性方面,态势预测技术的应用能够优化资源配置,提高能源利用效率。通过对系统运行态势的预测,可以实现更为有效的能源调度与管理,降低不必要的浪费,从而实现经济高效的运行^[12]。

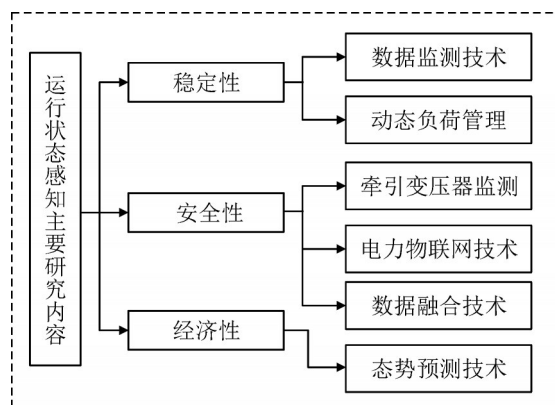


图2 运行状态感知关键技术

Fig. 2 Key technologies of operational state perception

1.2 多能互补接入下贯通式牵引供电系统运行状态感知技术组成

状态感知技术通过深度学习、决策树等智能算法,综合考虑气象、经济、社会、资源、负荷等多种影响因素,从而实现对未来发展趋势和运营风险的预测^[13-14]。相比于电力系统态势感知,牵引供电系统运行状态感知技术更专注于铁路运输的特殊需求。牵引供电系统运行状态感知技术需要适应铁路供电系统的特点,如长线路供电、电压等级相对较低、负载受运行图影响而具有明显的周期性,以及在高速运行条件下对供电稳定性和连续性的严格要求^[15]。此外,牵引供电系统运行状态感知技术还需考虑新能源的接入和列车运行中的动态变化,如速度变化、车流量以及由于列车振动引起的结构性影响,这些因素对供电系统的稳定性和可靠性有着直接的影响。因此,牵引供电系统运行状态感知技术的数据类型和监测范围更广、故障类型更多、数据传输的要求也更高,以此才能确保铁路运输的高效和安全^[16]。

在贯通式柔性铁路牵引供电系统中,信息物理的深度融合发展带来了海量数据的生成,由此导致

的复杂性和数据冗余,间接或直接影响着系统的分析与优化调度,实现对这些数据的即时有效感知,能确保其高效运行,是重点技术之一^[17]。针对多能互补接入下的柔性牵引供电系统运行状态感知流程见图3,其涉及数据获取、特征提取、感知融合和态势预测等多个环节。

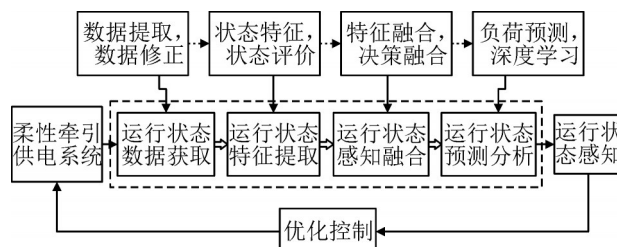


图3 运行状态感知流程

Fig. 3 Operational state perception process

1) 运行状态数据获取

运行状态数据快速精准获取对于铁路系统的安全分析和运维决策,至关重要,其是数据分析和融合的基础。在多能互补接入的贯通式柔性铁路牵引供电系统中,涉及对“源-网-储-车”全方位、多角度的数据采集。首先,通过动态负荷管理构建负荷模型,并结合变电所自动化系统、高速铁路供电安全检测监测系统(6C系统)、数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)及远端测控单元(remote terminal unit, RTU)等多种设备,获取多源数据^[18-20]。然而,变电所自动化系统与6C系统在采样频率、时延和测量结构等方面存在差异,常出现数据漂移偏差、传输误差等问题^[21],需要对混合测量数据进行动态补插、离群样本诊断和同步化处理。同时,面向海量数据,常需要采用特定的压缩算法,以降低数据分辨率、去除冗余信息,从而减少存储空间并提高传输效率。进一步,利用大数据分析、5G通信等技术,实现数据压缩和可视化^[22],以提高后续状态估计的准确性和可靠性。

2) 运行状态特征提取

运行状态特征提取是将获取的海量数据,应用深度机器学习方法进行特征提取,以挖掘潜在的运行状态趋势变化规律信息。

在新能源方面,利用电力物联网技术,整合不同新能源发电多源异构数据,应用深度神经网络方法进行时空不确定性特征分析(包括收集和分析风电、光伏发电的历史数据以及相关的气象数据),构建满足边界条件的新能源发电主要特征参数库,通过应用灵敏度分析方法、主成分分析法以及经验模态法等方法,辨析影响发电不确定性的关键因素^[23]。

进一步,对这些因素与铁路牵引供电系统运行状态的影响特性及其相互关系作出详细分析,并实现数据的可描述和可视化,展现其关联关系和运行特性。

在负荷方面,对于电力机车和牵引变压器,通过收集和分析电力机车的历史负荷数据、牵引变压器的运行数据以及环境参量和操作条件,构建一个全面的参数库。而后,应用深度机器学习方法提取其关键特征,包括负荷波动、温度变化、机械应力等^[24]。并构建综合评估指标体系进行深入分析,实现对电力机车负荷和牵引变压器的有效评估,识别其潜在风险和脆弱环节。如通过监测变压器油中溶解气体的组分变化来评估其绝缘状态等^[25],以上的研究结果可为后续评估牵引供电系统的可靠性、灵活性、稳定性等关键技术指标提供数据来源。

3)运行状态感知融合

运行状态感知融合技术是将获取的海量多元特征量进行高效融合计算,形成一个统一全面的视图。这种技术在航空航天、电力能源、交通运输等多个领域都有应用,在融合的过程中,通常涉及数据层、特征层和决策层等多级融合。数据层融合是指在原始数据级别上进行信息的直接融合,它能够保留更多的细节信息,但计算量较大,且对传感器数据的稳定性和不确定性要求较高。特征层融合则是在数据特征提取后进行的融合,其有效减少了数据量,提高了运算的实时性。决策层融合则是基

于各个传感器的初步决策结果进行的高层次融合,具有高灵活性和强抗干扰性的优点,但会丢失一些细节信息。简而言之,通过融合来自牵引变压器、牵引网、电力机车、新能源等关键设备的特征量,能较好评估系统可靠性、灵活性、稳定性等关键指标。

4)运行状态预测分析

运行状态预测分析技术是运用深度强化学习智能算法^[26],对铁路牵引供电系统和牵引负荷的发展趋势进行多角度模拟和预测,为牵引供电管理部门提供最优决策的理论支撑。在这一过程中,充分考虑系统运行时间的连续性和空间分布的关联性,采用全连接神经网络和卷积神经网络,对系统拓扑及其属性信息进行深层次的学习,以提取表征运行断面空间特征的属性向量^[27]。此外,通过计算不同窗口间样本的相似性,从时间、空间等不同方面确定与当前时段内一组连续断面最相似的历史断面组合,进而预测系统的未来运行状态,为牵引供电系统的智能化管理和决策提供科学依据^[28]。

2 多能互补接入下贯通式牵引供电系统运行状态感知关键技术

2.1 运行状态感知系统整体架构设计

多能互补接入下贯通式柔性牵引供电系统运行状态协同感知框架,如图4所示,其包括物理层、感知层和管理层3个层级,并结合数据获取、特征

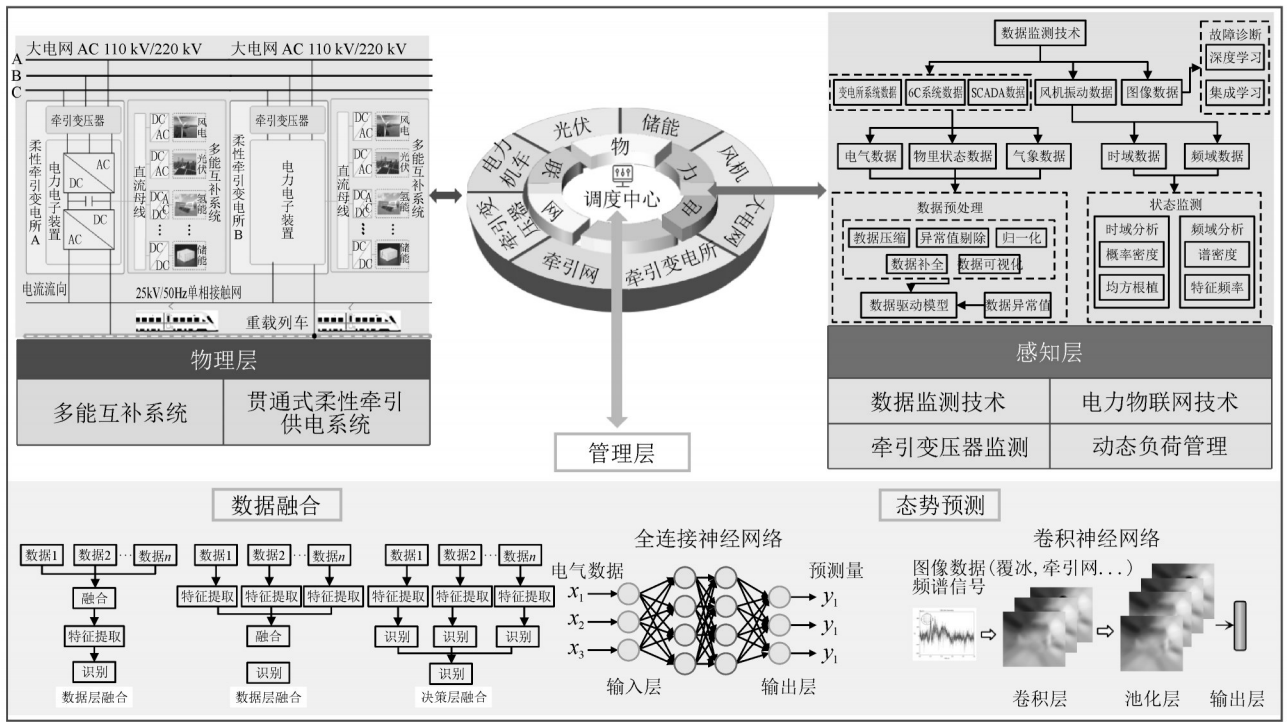


图4 多能互补接入下贯通式柔性铁路牵引供电系统运行状态感知架构

Fig. 4 Operational state perception architecture of through-type flexible railway traction power supply system under multi-energy complementary integration

提取、感知融合和态势预测等技术,实现高效的协同精准感知。首先,系统集成牵引供电 6C 系统、变电所自动化系统、SCADA 系统及 RTU 等多种设备,实现对“源-网-储-车”多角度、全方位的物理感知,精准获取表征系统运行的海量数据,为后续分析和决策提供原始数据支持。接着,在感知层,对所采集的数据进行多重化处理和分析,以提取重要特征和关键信息,从而快速识别系统运行中的异常情况和潜在风险,并通过数据监测、电力物联网技术和深度机器学习方法,分析影响系统运行的主要因素,为后续决策提供重要依据。最后,管理层利用感知层所提供的信息,结合深度强化学习和数据融合技术,开展特征融合和预测分析等流程。通过对不同层级数据的综合分析,为牵引供电系统的运行优化提供科学依据,从而确保系统的安全性、可靠性和灵活性。此外,管理层还能够指导运营策略的调整,以适应不断变化的运行环境和需求。综上所述,多能互补接入下贯通式柔性牵引供电系统运行状态协同感知框架为状态运行感知的数据获取、特征提取、感知融合、态势预测奠定坚实的平台基础,下面将对 4 个方面的关键技术进行详细阐述。

2.2 运行状态数据获取关键技术

2.2.1 动态负荷管理

牵引供电系统在运行中所面临的负荷通常具有高度的动态性^[29]和随机波动性^[30]。由于列车的类型、速度、线路条件、气候条件等不同,都会导致负荷的频繁变化。因此,建立一个准确的牵引负荷模型对于获取其运行数据来说至关重要。传统牵引负荷的建模方法可以分为 4 类:定值描述法、数字仿真模型法、牵引计算法和总体测辨法^[31]。

1)在定值描述领域,已有研究倾向于将牵引负荷视为具有固定特性的电源模型,独立于电网条件或时间的变化。这种方法在早期牵引供电系统的设计和运行计算中被广泛应用,尤其是在计算接触网容许电流、牵引变压器容量和牵引网电压损失时。牵引负荷通常被视为具有不对称性和非线性特性的电力负荷。尽管这种方法便于分析,但它忽略了牵引负荷的随机性和波动性,导致无法准确捕捉其动态特性。

2)在数字仿真领域,通常采用电力系统全数字仿真系统(advanced digital power system simulator, ADPSS)、实时数字仿真系统(real-time digital simulator, RTDS)和 MATLAB 等来构建系统的虚拟模型。文献[32]通过矢量控制策略对异步牵引电机进行控

制,成功搭建了 CRH3 型高速动车组的牵引传动系统仿真模型,并进一步发展了该动车组负荷的数学模型。此外,该研究还深入探讨了在不同机车位置、数量以及牵引网长度等条件下,车网耦合的牵引供电系统在谐波传输特性和系统谐振现象方面的表现^[33]。这种仿真手段的优势在于,其允许在无需实际构建物理系统的前提下,对牵引供电系统及电力机车的运行进行模拟。

3)在牵引计算领域,已有研究通过分析列车在不同工况下的受力情况、构建运行过程模型、参照列车运行图,并结合能耗计算,包括对一次供电网络、牵引变电所、牵引网等关键组成部分的数学模型建立,来预测不同运行场景下的牵引负荷并进行潮流计算,以模拟多列动车在不同运行条件下的电压和电流分布。该方法能够全面模拟列车从启动到停车的整个运行周期,综合考量空气阻力、轨道摩擦力、坡度等多维影响因素,并深入分析这些因素如何对能耗产生影响。

4)在总体测辨领域,已有研究通过合理简化牵引负荷的电气结构和运行机理,构建由多个参数组成的数学模型来描述牵引负荷的特性。这种方法依赖于实测数据来辨识模型中的参数,确保模型能够准确地反映牵引负荷的行为。文献[34]提出了一种基于极大似然估计的高速列车非线性模型辨识方法,研究者构建了描述高速列车单质点力学行为的随机离散非线性状态空间模型,并设计了高速列车状态估计的粒子滤波器和粒子平滑器,通过梯度搜索方法(gradient descent method, GDM)来最大化该数学期望,从而得到列车参数的辨识算法。

2.2.2 数据监测技术

随着新能源的不断融入,传统的人工巡检方法已无法满足贯通式柔性牵引供电系统的运维需求。因此,基于数据驱动的监测方法逐渐成为研究的前沿。其通过综合分析来自 3 个层面的海量数据资源,实现对牵引供电系统和新能源发电机组状态的实时监测和故障的早期诊断,如图 5 所示^[35]。

在混合测量数据监测层面,目前研究人员已经利用 SCADA 数据在数据分析方法、性能评估模型、故障诊断算法等方面取得了显著进展,如表 1 所示。通过这些方法,可以有效评估接入贯通式柔性牵引供电系统的新能源发电性能指标,如发电比例和负载率^[36]。而 6C 系统和变电所自动化系统提供了包括接触网和受电弓的几何参数、母线电压、线路电流功率等关键数据。通过车载和地面设备实现接触网张力、抬升量、线索温度、补偿位移以及

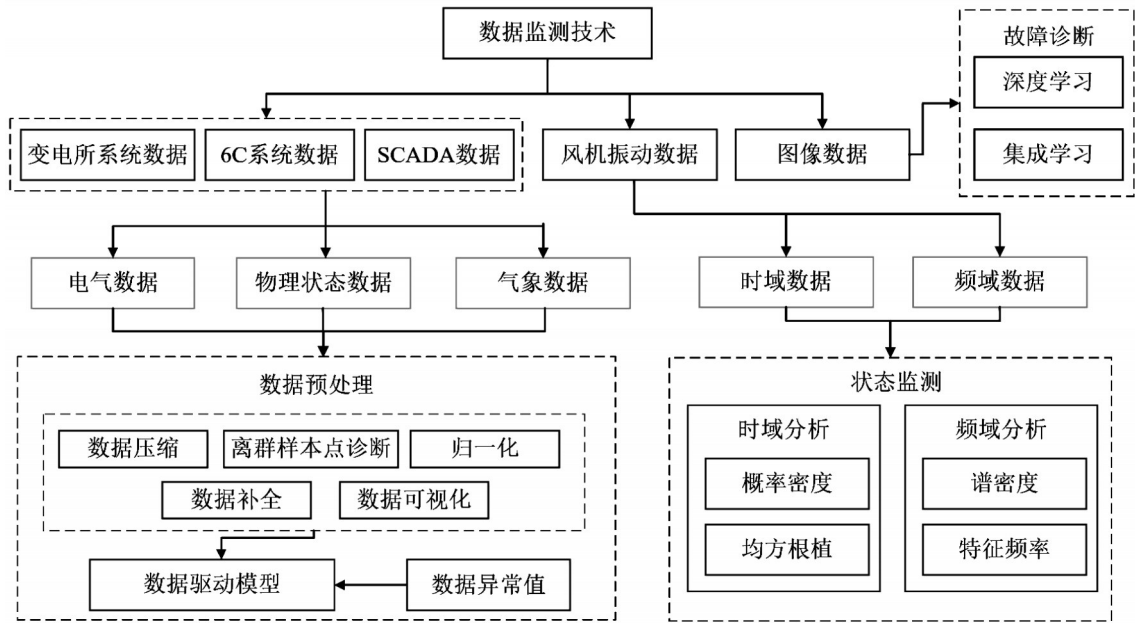


图5 数据监测技术
Fig. 5 Data monitoring technology

电力系统设备的监测。通过对混合测量数据的实时分析,实现了高速铁路牵引供电系统全方位、全覆盖的综合测量,提高了供电系统的可靠性和安全性。

表1 基于SCADA数据的监测类型
Table 1 Monitoring type based on SCADA data

监测类型	文献	实现方法
数据分析	[37]	将系统数据图形化处理并整体输入神经网络
	[38]	构建了多模态数据融合的风险知识图谱
性能评估	[39]	采用滑动数据窗方法实时计算残差评价指标
	[40]	提出一种状态劣化指数加权计算性能指标方法
故障诊断	[41]	利用SAE网络进行故障诊断
	[42]	基于系统数据进行故障排除

在振动数据监测层面,通过收集振动特性数据,其有助于识别潜在故障。然而,风力的不稳定性使得采集到的振动数据复杂多变,给故障特征提取带来困难。为了解决这一问题,研究人员采用了多种方法,包括时频分析(如傅里叶变换、小波变换)、模态分解(empirical mode decomposition, EMD)以及生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)等。特别是GAN,它通过生成逼真的数据样本来处理小样本振动数据,提高了故障诊断的准确性。尽管振动数据的采样频率高于SCADA系统,

能够提供更细致的机械状态变化信息,但这种高频率的数据采集也带来了成本上的挑战。

在图像数据监测层面,其包括两种方法:一种是基于图像的故障诊断技术,这种方法主要通过分析牵引变电所内部件的图像来检测机械故障,利用机器视觉技术可以准确识别各种机械问题,但对设备内部的监测存在一定的局限性^[43]。第二种是“数据-图像”转换技术,其通过将运行数据映射成图像,实现特征级别的信息融合,并利用深度学习技术挖掘隐藏信息,提取故障状态的特征参数,从而对供电设备内外的状态进行评估^[44]。

然而,尽管已有研究取得了一定成就,实际应用中仍面临诸多挑战。首先,数据质量问题突出,SCADA系统常记录大量异构数据,包括异常值和噪声,影响分析的准确性。其次,许多模型依赖特定参数样本,缺乏对不同类型发电机组的适应性,导致应用范围受到限制。

为了解决上述不足,未来研究可从多个方面进行改进。引入先进的数据清洗技术,如强化学习,可以更有效处理异常值和噪声,提高数据质量。同时,开发能够实时处理和分析数据的模型,将显著提升牵引供电系统和新能源发电机组状态的实时监测能力。

2.3 运行状态特征提取关键技术

2.3.1 电力物联网技术

电力物联网通过深度融合智能化设备和快速的双向通信网络,实现对牵引供电系统的全面感知

和数据的高精度实时传输。具体来说,电力物联网技术能够实现对牵引供电设施的实时监测和数据分析,包括接触网的状态监测、变电站的运行参数等,从而提高对供电系统健康状态的感知能力^[45]。此外,通过智能化的电力供应设备和快速的双向通信网络,电力物联网技术还具备多维融合、全息感知、重构自愈、智能运维等功能特征,为列车提供安全可靠、优质高效的牵引电力^[46]。在实际应用中,电力物联网技术通过部署智能传感器和通信设备,能够实现对电网设备的立体化在线监视,提高电网设备运行状态的感知,及时发现潜在的风险并进行消缺处理。

为深入分析并提取关键特征,其采用多种数据分析方法。灵敏度分析被应用于识别影响发电不确定性的关键因素^[47]。主成分分析(principal component analysis,PCA)作为一种降维技术,能有效提取数据集中最重要特征,从而减少数据集的维度,同时保留关键信息^[48]。经验模态分解(empirical mode decomposition,EMD)作为一种自适应分析工具,专门用于处理非线性和非平稳时间序列数据,能够将复杂数据集分解为一系列本征模态函数,从而揭示数据的内在规律和特性^[49],这些分析方法的优缺点如表2所示。

表2 数据分析方法适用条件及优缺点
Table 2 Applicable conditions, prons and cons of data analysis method

数据分析方法	优点	缺点	适用条件
灵敏度分析	识别关键参数 优化数据模型	计算成本高 参数不确定 对模型要求高	分析系统 变化参量
主成分分析	数据降维 无监督学习 消除数据冗余	数据规模大 对异常值敏感 非线性处理不佳	提取数据 重要特征
经验模态分解	自适应性 时频聚焦性	对噪声敏感 计算复杂度高	揭示数据 内在规律

尽管电力物联网的发展前景广阔,但在实施过程中也面临一些技术挑战。首先,现有的电力通信系统传输通道纵深且容量有限,导致数据在传播过程中出现质量下降^[50]。其次,数据采样率普遍不高,难以满足系统对瞬态事件的分析需求。此外,现场终端的计算能力有限,难以独立完成复杂的故障诊断和状态监测任务^[51]。

为克服这些挑战,研究者们提出了一系列解决方案。其包括两个方面:1)在通信网络方面,通过构建智能感知网络,旨在减少大量数据在主干通信

网络或中央站点的聚集。该网络架构显著提升了数据传输的效率和实时性。文献[52]中提出的一种新型智能感知网络模型,相较于传统的数据采集方式,能够实现更广泛的数据项上传及更高的数据采集频率,从而有效应对海量数据的挑战,并为实时监测和决策提供支持。2)在边缘计算方面,通过将计算任务迁移至网络边缘,有效缓解了主站算力不足、网络延迟和数据量庞大的问题。这种技术策略理论上能够满足电力物联网在敏捷性、实时性、数据优化、应用智能以及安全与隐私保护方面的关键需求,有效降低了对带宽的依赖^[53]。

2.3.2 牵引变压器监测技术

在牵引变压器的运行状态感知研究中,已有研究已开发多种方法来提取其特征并监测其状态,主要包括基于频率响应分析的方法、小波变换技术、正交多项式辨识,以及新兴的基于随机暂态信号捕获分析的方法,其优缺点见表3。

表3 牵引变压器运行状态感知方法比较
Table 3 Comparison of operational state perception methods of traction transformer

方法	优点	缺点
频率响应分析	适用于线性系统的分析 精度高,便于优化设计	不适用于非线性电路,对高阶电路分析计算量大
小波变换技术	适应性强,用于非平稳信号分析,可以提供时域和频域	在处理具有复杂频谱的信号时,可能无法提供准确的分析结果
正交多项式辨识	方法成熟,理论基础坚实,根据函数零极点分布来诊断	计算过程复杂,对于非线性或时变系统不够灵活
随机暂态信号捕获分析	把电信号并转化为频响曲线,便于分析 识别信号的频率成分	对信号处理技术要求高,需要有效的算法来分析频响曲线

频率响应分析方法通过施加正弦扫频信号并测量响应信号来获得变压器绕组的幅频和相频特性,进而分析绕组状态^[54]。小波变换技术则利用其多分辨率分析的优势来处理频响曲线,提取更加细致的特征^[55]。正交多项式辨识方法则通过辨识变压器的传递函数,根据函数的零极点分布来诊断^[56]。而基于随机暂态信号捕获分析的方法则是通过捕获变压器绕组的端口暂态电信号,并将其转化为频响曲线,再结合图像处理技术提取其特征,实现对牵引变压器运行状态的实时监测^[57]。尽管这些方法在变压器状态监测方面取得了一定的进展,但仍然存在一些挑战和局限性,如牵引变压器绕组的频响

曲线可能非常复杂,因此需要更优的信号处理技术来准确分析。

2.4 运行状态感知融合关键技术

数据融合技术能够将来自多个数据源的信息

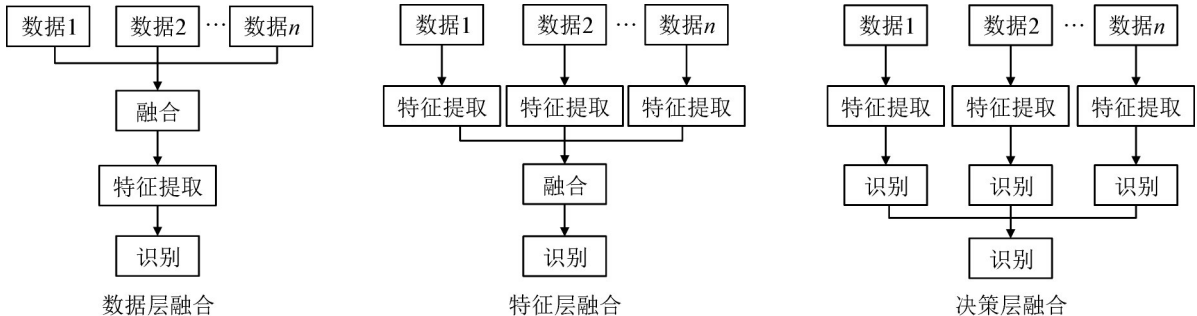


图6 数据融合技术流程
Fig. 6 Proces of data fusion technology

贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知主要应用在特征层和决策层的融合,其通过综合各个关键设备的特征量来评估系统的关键性能指标,如可靠性、灵活性和稳定性。

1)特征层融合:侧重于从原始数据中提取关键特征,并将这些特征融合成一个全面的特征集。这一过程涉及从牵引变压器、牵引网、电力机车和新能源等关键设备中提取电压、电流、功率和负载率等特征。其关键在于特征的提取和对齐,以及如何有效地融合这些特征以捕捉多模态数据的互补信息。通过特征层融合,系统能够减少数据量、提高处理速度,并有助于突出数据中的关键信息。例如,在京张高铁智能牵引供电系统中,通过构建基于 BIM+GIS 融合的基础设施综合运维系统,实现了对牵引供电系统状态的全面感知和监控。该系统能够实现对牵引变压器、接触网等关键设备的全息感知,通过特征层融合技术,提取关键特征信息,为后续的决策提供支持^[60]。

2)决策层融合:在决策层融合中,来自不同数据源的特征被用来做出最终的决策或判断。这种融合方式的优点是能够综合考虑各种信息源,提高决策的准确性和可靠性。其适用于需要综合多源信息以做出复杂决策的情况。智能牵引供电系统通过建立广域测控保护、故障自愈重构、故障报警预警机制和系统健康评估体系,可以提高系统的可靠性和运行维护水平^[61]。在这一过程中,决策层的融合是关键,其通过对特征的联合判断和处理,得出最终的决策结果,如故障诊断、预测维护等,从而实现智能运维。

这些层次的融合技术在不同的应用场景中有不同的优势。例如,在军事应用中,数据融合技术

进行整合,提供一个全面的系统运行视图。在数据融合的过程中,通常会涉及到数据层融合、特征层融合和决策层融合 3 个层次^[58]。图 6 为 3 个不同层级的融合流程图^[59]。

可以帮助从多个传感器中提取目标的位置和速度信息^[62];在自动驾驶汽车中,数据融合技术可以整合来自雷达、摄像头和激光雷达等多种传感器的数据,以实现更安全的车辆导航^[63]。尽管数据融合技术在提高信息准确性、可靠性和全面性方面具有显著优势,但其也存在一些缺点和挑战,如表 4 所示。数据融合技术的研究和应用是一个跨学科领域,它涉及到信号处理、模式识别、和计算机科学等多个学科。随着技术的发展,数据融合在提高系统性能、增强决策支持和优化资源利用等方面发挥着越来越重要的作用。

表4 数据融合技术缺点
Table 4 Shortcomings of data fusion technology

类型	内容
复杂性	融合层次的增加导致结果的可解释性降低
计算负担重	数据层融合需要对原始数据进行大量处理
信息丢失	特征层和决策层融合,会丢失细节信息,影响决策的全面性
数据稳定性要求高	任何传感器的故障或数据异常都可能影响融合结果的准确性

2.5 运行状态预测分析关键技术

运行状态预测分析通过运用智能算法,对铁路牵引供电系统和牵引负荷的发展趋势进行多角度模拟和预测,其关键技术为态势预测技术。态势预测在多个领域都有应用,这些技术通常依赖于历史数据和实时信息,通过分析和建模来预测未来的发展趋势^[64]。

目前态势预测主流的方法主要集中于深度学习模型的应用,其包括:全连接神经网络(deep

neural network, DNN)、卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和递归神经网络(recurrent neural network, RNN)下表为其结构特点和适用条件^[65]。

表5 深度学习结构特点与适用条件
Table 5 Structural characteristics and applicable conditions of deep learning

深度学习网络	结构特点	适用条件
DNN	由多层神经元组成	适合回归分类问题
CNN	通过卷积层提取特征 包含池化层以减少 维度	适合处理图像数据 或有空间结构的数据
RNN	具有循环连接 能够处理序列数据	适合时间序列 预测和自然语言处理

在牵引供电系统的运行状态预测方面,目前研究包括健康诊断^[66]及风险评估方法^[67],其考虑了不确定性因素,如信息获取的不确定性、健康认知的不确定性以及运行环境的不确定性。通过采用随机数学、模糊数学以及区间数学的方法,可以解决健康诊断和风险评估过程中存在的不确定问题^[68-70]。

然而,传统方法存在一些不足之处。首先,模型依赖于人工设定的参数,可能导致其适应性较差。其次,在建模过程中对不确定性的处理较为局限,可能无法充分捕捉系统中的动态变化。而深度学习模型通常缺乏对不确定性的量化,因此考虑把深度学习与不确定因素相结合,如图7所示。利用深度学习的强大特征提取能力和非线性建模能力,能更好地应对牵引供电系统中复杂的运行状态预测问题。通过引入深度学习,能够在大规模数据中自动识别潜在模式,并提高对不确定性因素的鲁棒性,从而提升系统的运行状态预测精度和可靠性。这种结合不仅可以优化现有的预测模型,还能为未来的智能化供电系统提供更为有效的解决方案。

在牵引负荷预测方面,通过准确预测牵引负荷,可以提前准备足够的电力资源以应对高峰时段的需求,从而避免因电力不足导致的服务中断。此外,预测结果还可以帮助系统运营商进行更加精细化的电网监测和维护,减少故障发生的风险。

牵引负荷预测的研究主要分为两类方法:一类是基于牵引计算和供电计算的仿真方法^[71],这类方法通过建立数学模型模拟牵引供电系统的工作,包括使用仿真软件如电力系统计算机辅助设计(power systems computer aided design, PSCAD)、搭建动车组和牵引网的模型^[72],以预测不同工况下的负荷特性。另一类是基于实测负荷数据和列车运行

图的方法,这种方法依赖于统计分析和机器学习技术,利用历史数据来训练模型,从而预测未来的负荷变化。文献[73]通过分析高铁动车组的典型运行过程和实测负荷数据,运用滑动窗事件检测算法提取负荷曲线,建立了动态负荷模型。进一步,利用行车运行图信息,提出了一种预测高铁牵引变电站负荷的方法。两种方法各有优势,仿真方法可以在数据不足时提供预测,而基于实测数据的方法则能提供更准确的预测结果。在实际应用中,通常将这两种方法结合起来,以提高预测的准确性和可靠性。

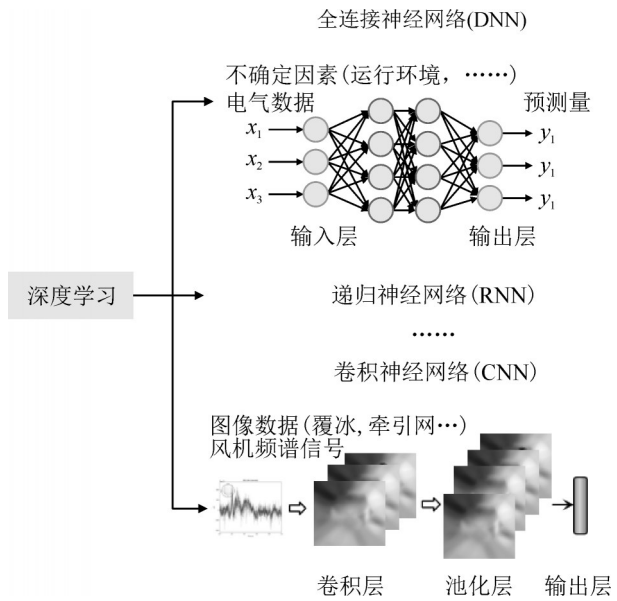


图7 态势预测技术
Fig. 7 Situation prediction technology

3 现有技术的挑战与发展趋势

在当前全球对可持续发展和绿色低碳运营的迫切需求下,贯通式柔性牵引供电系统成为保障轨道交通高效可靠运行的重要技术。随着多能互补接入的推进,这一系统不仅能够有效整合各种能源资源,还能提升整体运行效率。然而,随着系统复杂性的增加,实现数据驱动与智能化的运行状态感知,还有许多问题亟待解决。

1) 系统集成的多样性

运行状态感知涉及多种能源和牵引供电设备,这些设备和系统产生的数据类型多样、格式不一,如何高效整合这些多源异构数据是一个重大挑战。

2) 数据处理的复杂性

随着系统规模的扩大,产生的数据量也呈爆炸式增长。如何高效处理和分析这些数据,提取有价值的信息,对系统的计算能力和算法效率提出了更高要求。并且多能互补系统需要实时监测和感知

各能源子系统的运行状态,以快速响应系统变化。然而,实时性往往与准确性存在矛盾,如何在保证实时性的同时确保数据的准确性是一个技术难题。

3) 协同控制的挑战性

协同控制不仅涉及到局部的设备控制,还需要考虑整个系统的运行优化。这包括从监测、调度到检修和运维的全寿命周期管理。这些能源和设备之间的控制复杂度高,如何制定有效的控制策略以实现能源的优化利用是一个技术挑战。

上述3大问题也代表了贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知技术未来发展趋势,如图8所示。

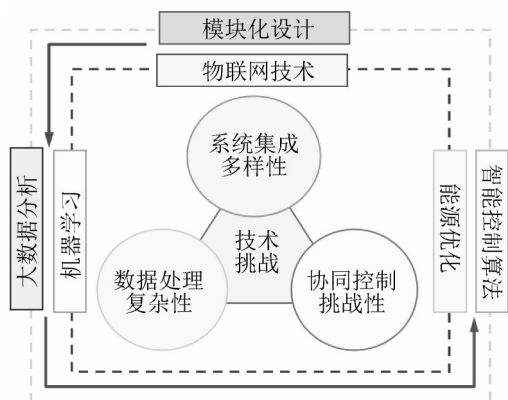


图8 牵引供电系统运行状态感知技术未来发展趋势
Fig. 8 The future development trend of operational state perception technology of traction power system

1) 系统集成层面

在系统集成领域,高精度传感器技术与物联网的深度融合正持续推动技术的发展与创新。未来研究应致力于多域特征优化的智能传感器开发,以增强其自适应能力,使其在复杂多变的环境中能够实现自主调整^[74]。同时,推动行业的标准化与模块化设计将显著提高设备的互操作性,便于系统的升级与维护。此外,提升传感器网络的互联互通能力^[75],并促进不同设备间的数据共享,将为全面的系统集成与协同监测提供强有力的支持。

2) 数据处理层面

在数据处理层面,大数据分析和人工智能技术的应用愈发普及。通过对大量实时数据进行深度处理与分析,这些技术能显著提升系统的预测能力^[76]和决策支持能力^[77]。具体而言,机器学习广泛应用于模式识别与故障预测^[78],有效识别潜在问题并提出预警,从而减少故障发生的概率,提高系统的可靠性。未来研究应重点关注开发更高效的算法,以处理更大规模的数据集,并提升分析的全面性和准确性,同时构建可解释的人工智能模型,以增加系统的透明度。

3) 系统控制层面

在系统控制层面,智能控制算法的不断发展使得牵引供电系统能够快速响应环境变化并进行优化调度。未来研究应探索更复杂的控制策略,如多智能体系统的协同控制^[79],同时引入强化学习等前沿技术^[80],研究“电力+算力”的优化控制算法以提升系统在不确定环境中的决策能力,从而推动可持续能源的有效利用。

4 结语

开展多能互补接入下贯通式柔性铁路牵引供电系统运行状态感知技术研究,能够深入分析其内部交互机制和外部环境影响,对提升铁路供电系统的能效和安全性具有重要意义。为此,本文详细阐述了其精准感知的主要流程,建立了协同感知全局架构,并深入探讨了其关键技术。主要结论如下:

1) 对新能源进行感知其优点在于能够实时监控和管理可再生能源,提高能源利用效率并保障系统安全稳定。数据监测技术和物联网技术的结合增强了数据采集和分析能力,支持预测性维护和故障预警。然而,其缺点包括数据采集的多样性和异构性带来的整合挑战,以及随着系统规模扩大而产生的大数据处理复杂性。

2) 在贯通式柔性铁路牵引供电系统中,牵引变压器是关键设备,其状态监测与故障诊断至关重要。目前,频率响应分析、小波变换、正交多项式辨识和随机暂态信号捕获等技术被广泛应用于变压器状态监测,但信号处理仍面临挑战。尽管故障诊断方法有所进展,但对状态参数耦合关系的全面考虑仍显不足。在负荷建模与预测方面,现有方法包括定值描述、数字仿真、牵引计算和总体测辨,各具优势。未来研究应聚焦于优化监测技术,提高故障诊断的全面性,并完善负荷预测策略,以增强系统的整体可靠性。

3) 在协同感知方面,通过有效整合来自新能源、储能单元和牵引设备等多源数据,并利用智能算法实时分析和预测运行状态,从而提升系统效率。运行状态感知流程包括数据获取、特征提取、感知融合和态势预测,确保了信息的准确性与全面性。此外,多能互补与柔性牵引供电系统的协同感知架构,结合物理层、感知层和管理层,提供了一个系统化的解决方案,以应对日益复杂的运行环境。这一综合框架不仅增强了系统的监测能力,也为未来铁路运营的智能化发展奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 张刚毅,李群湛. 电气化铁道异相供电方式向同相供电方式的转换[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 142-145.
ZHANG Gangyi, LI Qunzhan. Conversion from out-of-phase power supply mode to non-in-phase power supply mode of electrified railway[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 142-145.
- [2] 何晓琼,韩鹏程,王怡,等. 基于级联-并联变换器的贯通式牵引变电所系统研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 52-61.
HE Xiaojiong, HAN Pengcheng, WANG Yi, et al. Research on through-type traction substation system based on cascade-parallel converter[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 52-61.
- [3] BADE S K, KULKARNI V A. Analysis of railway traction-power system using renewable energy: a review[C]// International Conference on Computation of Power, Energy, India, ICCPEIC, 2018: 11-14.
- [4] 陈维荣,王璇,李奇,等. 光伏电站接入轨道交通牵引供电系统发展现状综述[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3663-3670.
CHEN Weirong, WANG Xuan, LI Qi, et al. A review of the development status of photovoltaic power station connected to rail transit traction power supply system[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3663-3670.
- [5] 周萌,于龙,王子龙. “双碳”目标下电气化铁路源网车储关键技术研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(7): 80-85.
ZHOU Meng, YU Long, WANG Zilong. Research on key technologies of electrified railway source network vehicle storage under the *double Carbon* goal[J]. Power Electronics, 2024, 58(7): 80-85.
- [6] 王英,辛月阳,谢子昀,等. 光储接入牵引供电系统应急供电方案下低频稳定性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(3): 1189-1201.
WANG Ying, XIN Yueyang, XIE Ziyun, et al. Research on low-frequency stability under emergency power supply scheme of optical storage access traction power supply system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(3): 1189-1201.
- [7] 张建兴,刘顺新,陈天锦,等. 电气化铁路同相供电装置应用研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(2): 21-23.
ZHANG Jianxing, LIU Shunxin, CHEN Tianjin, et al. Research on the application of non-inverting power supply device for electrified railway[J]. Power Electronics, 2013, 47(2): 21-23.
- [8] 李红波,丁荣军,张超,等. 城市轨道交通智慧牵引供电系统[J]. 机车电传动, 2021, 62(3): 1-8.
LI Hongbo, DING Rongjun, ZHANG Chao, et al. Intelligent traction power supply system for urban rail transit[J]. Electric Locomotive Drive, 2021, 62(3): 1-8.
- [9] 王保国. 智能牵引供电系统工程实践与发展思考[J]. 铁道学报, 2024, 46(6): 1-10.
WANG Baoguo. Thinking on the engineering practice and development of intelligent traction power supply system[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(6): 1-10.
- [10] 张冬冬,李保宗,于培培,等. 基于物联网技术的同相供电控保装置远程控制研究[J]. 电气化铁道, 2024, 35(2): 20-23.
ZHANG Dongdong, LI Baozong, YU Peipei, et al. Research on remote control of non-inverting power supply control and protection device based on internet of things technology[J]. Electrified Railway, 2024, 35(2): 20-23.
- [11] 于士伟. 基于数据融合的高速电气化铁路牵引供电安全智能监测方法[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(11): 81-85.
YU Shiwei. Intelligent monitoring method for traction power supply safety of high-speed electrified railway based on data fusion[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(11): 81-85.
- [12] 姜海燕. 基于BP神经网络的牵引供电系统的故障预测研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(6): 82-84.
JIANG Haiyan. Research on fault prediction of traction power supply system based on BP neural network[J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(6): 82-84.
- [13] GE L, LI Y, LI Y, et al. Smart distribution network situation awareness for high-quality operation and maintenance: a brief review[J]. Energies, 2022, 15(3): 828.
- [14] 葛磊蛟,崔庆雪,李明玮,等. 面向低碳经济运行的新型电力系统态势感知技术综述[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(1): 1-13.
GE Leijiao, CUI Qingxue, LI Mingwei, et al. Survey of situational awareness technology of new power system for low-carbon economic operation[J]. Integrated Smart Energy, 2023, 45(1): 1-13.
- [15] 孙亮,吕伟,彭旭,等. 牵引供电技术研究现状及关键性技术[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(2): 65-70.
SUN Liang, LYU Wei, PENG Xu, et al. Research status and key technologies of traction power supply technology[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 65-70.
- [16] 王潘潘,刘磊,杨凯,等. 牵引变电设备状态感知与分析系统方案研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(2): 1-3.
WANG Panpan, LIU Lei, YANG Kai, et al. Research on condition perception and analysis system scheme of traction substation equipment[J]. Electrified Railways, 2023, 34(2): 1-3.
- [17] 赵莎莎,袁葆,安亚刚,等. 智能电网需求侧用户参与度研究模型[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 60-66.
ZHAO Shasha, YUAN Bao, AN Yagang, et al. A study on the research model of user participation on the demand

- side of the smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 60-66.
- [18] 张平, 赵兴东. 我国高速铁路牵引供电综合自动化系统分析[J]. 铁路技术创新, 2011, 10(1): 31-34.
ZHANG Ping, ZHAO Xingdong. Analysis of integrated automation system for traction power supply of high-speed railway in China[J]. Railway Technology Innovation, 2011, 10(1): 31-34.
- [19] 张克永. 高速铁路供电安全检测监测体系建设分析与研究[J]. 电气化铁道, 2019, 30(6): 1-4.
ZHANG Keyong. Analysis and research on the construction of high-speed railway power supply safety detection and monitoring system[J]. Electrified Railway, 2019, 30(6): 1-4.
- [20] 张平. 我国高速铁路牵引供电 SCADA 系统的分析与探讨[J]. 铁道建筑技术, 2010, 48(4): 72-74.
ZHANG ping. Analysis and discussion of SCADA system for traction power supply of high-speed railway in China[J]. Railway Construction Technology, 2010, 48(4): 72-74.
- [21] 何逢广, 李朝阳, 张华赢, 等. 基于实测数据的牵引供电系统并联谐波谐振概率识别方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2084-2094.
HE Fengguang, LI Chaoyang, ZHANG Huaying, et al. Parallel harmonic resonance probability identification method for traction power supply system based on measured data[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2084-2094.
- [22] 张科鑫, 窦晓波, 李炜祺, 等. 基于量测数据补全的有源配电网电压优化技术[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 67-74.
ZHANG Kexin, DOU Xiaobo, LI Weiqi, et al. Voltage optimization technology of active distribution network based on measurement data completion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 67-74.
- [23] 杨嘉琛. 新能源在网络化牵引供电系统中的调节应用研究[J]. 电气化铁道, 2024, 35(3): 1-8.
YANG Jiachen. Research on the regulation and application of new energy in networked traction power supply system[J]. Electrified Railway, 2024, 35(3): 1-8.
- [24] 朱佼佼, 陈特放, 付强. 车载牵引变压器智能故障诊断技术新研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(23): 27-31.
ZHU Jiaojiao, CHEN Tefang, FU Qiang. New research on intelligent fault diagnosis technology for vehicle-mounted traction transformer [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(23): 27-31.
- [25] 余涛, 梁敏航, 罗庆全, 等. 新型电力系统专用传感与边缘智能关键技术及其展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3324-3338.
YU Tao, LIANG Minhang, LUO Qingquan, et al. Key technologies of special sensing and edge intelligence for new power systems and their prospects[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3324-3338.
- [26] 唐文虎, 牛哲文, 赵柏宁, 等. 数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 2985-2999.
TANG Wenhui, NIU Zhewen, ZHAO Boning, et al. Research and application of data-driven artificial intelligence technology in state analysis of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 2985-2999.
- [27] 赵双石, 尹建斌, 闫兆辉, 等. 基于神经网络的 AT 单线供电系统故障测距研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(3): 6-11.
ZHAO Shuangshi, YIN Jianbin, YAN Zhaohui, et al. Research on fault ranging of AT single-line power supply system based on artificial neural network[J]. Electrified Railways, 2023, 34(3): 6-11.
- [28] 高仕斌, 胡晋豪, 韩正庆, 等. 牵引供电数字孪生系统框架设计及典型应用[J]. 中国铁路, 2024, 63(7): 114-125.
GAO Shibin, HU Jinhao, HAN Zhengqing, et al. Framework design and typical application of digital twin system for traction power supply[J]. China Railway, 2024, (7): 114-125.
- [29] 王玘, 何正友, 林圣, 等. 高铁牵引供电系统 PHM 与主动维护研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 942-952.
WANG Xi, HE Zhengyou, LIN Sheng, et al. Research on PHM and active maintenance of high-speed railway traction power supply system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 942-952.
- [30] 车玉龙, 吕晓琴, 王晓茹. 考虑相关性的牵引负荷功率对电网影响概率分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3250-3261.
CHE Yulong, LYU Xiaoqin, WANG Xiaoru. Probability analysis of the Impact of traction load power on power grid considering correlation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3250-3261.
- [31] 车玉龙. 考虑不确定性的电气化铁路牵引负荷建模方法及其应用研究[D]. 西南交通大学, 2022.
CHE Yulong. Modeling method of electrified railway traction load considering uncertainty and its application[D]. Southwest Jiaotong University, 2022.
- [32] 周盛, 余丹萍, 江全元. CRH3 动车组牵引传动系统的负荷建模[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 6.
ZHOU Sheng, YU Danping, JIANG Quanyuan. Load modeling of CRH3 EMU traction drive system [J]. Electromechanical Engineering, 2011, 28(1): 6.
- [33] 李宏强, 王晓茹, 徐家俊. 车网耦合的牵引供电系统谐波仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 116-122.
LI Hongqiang, WANG Xiaoru, XU Jiajun. Harmonic simulation analysis of vehicle-grid coupled traction power sup-

- ply system[J]. power system protection and control, 2014, 42(20):116-122.
- [34] 袁路生,李兵,龚锦红,等. 高速列车非线性模型的极大似然辨识[J]. 自动化学报, 2014, 40(12):2950-2994.
- ZHEN Lusheng, LI Bing, GONG Jinhong, et al. Maximum likelihood identification for nonlinear models of high-speed trains[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(12):2950-2994.
- [35] 龙寰,杨婷,徐劲辉,等. 基于数据驱动的风电机组状态监测与故障诊断技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23):55-69.
- LONG Huan, YANG Ting, XU Shaohui, et al. Survey of data-driven condition monitoring and fault diagnosis technology for wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23):55-69.
- [36] 刘小峰,史长振,晏锐,等. 基于SCADA参量关联互信息自编码的风电机组故障检测方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(10):2953-2961.
- LIU Xiaofeng, SHI Changzhen, YAN Rui, et al. Wind turbine fault detection method based on SCADA parametric correlation mutual information autocoding[J]. Control and Decision, 2023, 38(10):2953-2961.
- [37] 符杨,周全,贾锋,等. 基于SCADA数据图形化的海上风电机组故障预测[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20):7465-7475.
- FU Yang, ZHOU Quan, JIA Feng, et al. Fault prediction of offshore wind turbines based on SCADA data graphization[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20):7465-7475.
- [38] 梅冰笑,周金辉,孙翔. 基于知识图谱与细胞自动机模型的配电网信息系统风险分析[J]. 中国电力, 2022, 55(10):23-31.
- MEI Bingxiao, ZHOU Jinhui, SUN Xiang. Risk analysis of distribution network information system based on knowledge graph and cellular automata model[J]. Electric Power, 2022, 55(10):23-31.
- [39] 崔恺,许宜菲,李雪松,等. 基于广义回归神经网络的风电机组性能预测模型及状态预警[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(32):13220-13228.
- CUI Kai, XU Yifei, LI Xuesong, et al. Wind turbine performance prediction model and status warning based on generalized regression neural network[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(32):13220-13228.
- [40] 曾天生,刘航,陈汉斯,等. 基于多特征信息融合的风电机组整机性能评估[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4):1052-1061.
- ZENG Tiansheng, LIU Hang, CHEN Hansi, et al. Performance evaluation of wind turbine based on multi-feature information fusion[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(4):1052-1061.
- [41] 叶林,葛鸥翔,郭永红,等. 基于堆叠自动编码器的汽轮发电机多指标故障诊断模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10):3656-3670.
- YE Lin, GE Ouxiang, GUO Yonghong, et al. Multi-index fault diagnosis model of steam turbine generator based on stacked autoencoder[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10):3656-3670.
- [42] 邱炜,林岑,郭超,等. 基于SCADA系统的CVT缺陷排查与分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(6):86-92.
- QIU Wei, LIN Cen, GUO Chao, et al. Troubleshooting and analysis of CVT defects based on SCADA system[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2023, 44(6):86-92.
- [43] ZHAO X Y, DONG C Y, ZHOU P, et al. Detecting surface defects of wind turbine blades using an Alexnet deep learning algorithm[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2019, E102-A(12):1817-1824.
- [44] YOO Y, BAEK J G. A novel image feature for the remaining useful lifetime prediction of bearings based on continuous wavelet transform and convolutional neural network [J]. Applied Sciences, 2018, 8(7):1102.
- [45] 夏炎. 铁路智能牵引供电系统技术研究与发展展望[J]. 电气化铁道, 2020, 31(4):1-5+14.
- XIA Yan. Research and development prospect of railway intelligent traction power supply system technology[J]. Electrified Railway, 2020, 31(4):1-5+14.
- [46] 孙嵘,魏宏伟,董丽,等. 牵引供电广域保护专线传输通道的时延分析[J]. 电气化铁道, 2022, 33(S1):5-10.
- SUN Rong, WEI Hongwei, DONG Li, et al. Delay analysis of traction power supply wide-area protection dedicated line transmission channel[J]. Electrified Railways, 2022, 33(S1):5-10.
- [47] 马燕峰,景雪,赵书强,等. 光伏接入系统的小干扰稳定灵敏度分析及其应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8):70-75.
- MA Yanfeng, JING Xue, ZHAO Shuqiang, et al. Sensitivity analysis of small interference stability in photovoltaic access system and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8):70-75.
- [48] 成珂,孙琦琦,马晓瑶. 基于主成分回归分析的气象因子对光伏发电量的影响[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2):403-409.
- CHENG Ke, SUN Qiqi, MA Xiaoyao. Influence of meteorological factors on photovoltaic power generation based on principal component regression analysis[J]. Journal of Solar Energy, 2021, 42(2):403-409.
- [49] 王振浩,王翀,成龙,等. 基于集合经验模态分解和深度学习的光伏功率组合预测[J]. 高电压技术, 2022, 48

- (10):4133-4142.
- WANG Zhenhao, WANG Chong, CHENG Chan, et al. Photovoltaic power combination prediction based on ensemble empirical mode decomposition and deep learning[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10):4133-4142.
- [50] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
- WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Convergence of 5G communication and ubiquitous power internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [51] 张晓华, 刘道伟, 李柏青, 等. 智能全景系统概念及其在现代电网中的应用体系[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10):2885-2895.
- ZHANG Xiaohua, LIU Daowei, LI Baiqing, et al. Concept of intelligent panorama system and its application system in modern power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10):2885-2895.
- [52] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 70-82.
- ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development ideas of key technologies for intelligent perception of ubiquitous power internet of things[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 70-82.
- [53] 刘清源, 刘瑞佳, 王健, 等. 基于边缘计算的泛在电力物联网群组密钥管理算法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7):48-56.
- LIU Qingyuan, LIU Ruijia, WANG Jian, et al. Research on group key management algorithm of ubiquitous power internet of things based on edge computing[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2022, 59(7):48-56.
- [54] LUDWIKOWSKI K, SIODLA K, ZIOMEK W. Investigation of transformer model winding deformation using sweep frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6):1957-1961.
- [55] 周利军, 林桐, 江飞明, 等. 频响多级分解与图像特征在自耦变压器绕组故障的应用研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(10):3617-3627.
- ZHOU Lijun, LIN Tong, JIANG Feiming, et al. Research on the application of frequency response multi-level decomposition and image features in winding faults of autotransformer[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3617-3627.
- [56] 朱明林, 朱子述. 正交多项式辨识变压器传递函数及其在绕组变形诊断中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2001, 46(8):1233-1237.
- ZHU Minglin, ZHU Zishu. Orthogonal polynomial identification of transformer transfer function and its application in winding deformation diagnosis[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2001, 46(8): 1233-1237.
- [57] 郭蕾, 蔡育宏, 张俊, 等. 基于随机暂态信号捕获分析的牵引变压器绕组状态在线感知技术研究[J]. 铁道技术标准, 2023, 5(8):23-29.
- GUO Lei, CAI Yuhong, ZHANG Jun, et al. Research on on-line sensing technology of winding state of traction transformer based on stochastic transient signal capture analysis[J]. Railway Technical Standards, 2023, 5(8):23-29.
- [58] 聂庆科, 孙广, 郝永攀, 等. 多源异构监测数据融合方法及应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13):5348-5357.
- NIE Qingke, SUN Guang, HAO Yongpan, et al. multi-source heterogeneous monitoring data fusion method and application[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5348-5357.
- [59] 房逸涵, 窦水海, 杜艳平. 基于物联网的数据融合研究综述[J]. 北京印刷学院学报, 2024, 32(8):42-49.
- FANG Yihan, DOU Shuihai, DU Yanping. Survey of data fusion based on internet of things[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2024, 32(8):42-49.
- [60] 闫兆辉, 沈菊, 苏醒, 等. 智能牵引变电供电运维管理系统研究与应用[J]. 电气化铁道, 2024, 35(2):79-83.
- YAN Zhaohui, SHEN Ju, SU Xing, et al. Research and application of operation and maintenance management system for intelligent traction substation power supply[J]. Electrified Railway, 2024, 35(2):79-83.
- [61] 杨斯渤, 王永亨, 郭晨曦, 等. 智能牵引供电广域保护测控系统层次化保护试验研究[J]. 电气化铁道, 2021, 32(6):36-43.
- YANG Sixi, WANG Yongting, GUO Chenxi, et al. Experimental study on hierarchical protection of wide-area protection measurement and control system for intelligent traction power supply[J]. Electrified Railways, 2021, 32(6):36-43.
- [62] 崔脩龙, 高志强, 姬伟通, 等. “艾武大模型+”:一种军事大模型系统的开发与实证[J]. 数据采集与处理, 2024, 39(3):588-597.
- CUI Zhenglong, GAO Zhiqiang, JI Weitong, et al. “Aiwu Large Model+”: development and empirical evidence of a military large model system[J]. Data Acquisition and Processing, 2024, 39(3):588-597.
- [63] 朱向雷, 王海弛, 尤翰墨, 等. 自动驾驶智能系统测试研究综述[J]. 软件学报, 2021, 32(7):2056-2077.
- ZHU Xianglei, WANG Haichi, YOU Hanmo, et al. A review of the test research of autonomous driving intelligent system[J]. Journal of Software, 2021, 32(7):2056-2077.
- [64] 葛磊蛟, 李元良, 陈艳波, 等. 智能配电网态势感知关键技术及实施效果评价[J]. 高电压技术, 2021, 47(7):2269-2280.
- GE Leijiao, LI Yuanliang, CHEN Yanbo, et al. Key technol-

- ogies of situational awareness of smart distribution network and evaluation of implementation effect[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2269-2280.
- [65] 刘悦, 黄新波, 刘天娇. 基于深度学习的架空输电线路绝缘子缺陷检测方法研究综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 167-177.
- LIU Yue, HUANG Xinbo, LIU Tianjiao. A review of insulator defect detection methods for overhead transmission lines based on deep learning[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 167-177.
- [66] 李进宁, 王顺鹏, 周鲁宁, 等. 基于剩余寿命可靠度的地铁供电设备预防性维修研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(10): 145-151.
- LI Jinning, WANG Shunpeng, ZHOU Luning, et al. Research on preventive maintenance of metro power supply equipment based on residual life reliability[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(10): 145-151.
- [67] 何正友, 冯珂, 林圣, 等. 高速铁路牵引供电系统安全风险评估研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3): 418-429.
- HE Zhengyou, FENG Ling, LIN Sheng, et al. A review of safety risk assessment of traction power supply system for high-speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(3): 418-429.
- [68] 包伟滢, 韦钢, 刘佳, 等. 基于区间模型的多能互补系统优化运行[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 8-16.
- BAO Weishuo, WEI Gang, LIU Jia, et al. Optimal operation of multi-energy complementary system based on interval model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 8-16.
- [69] 李振坤, 钱晋, 符杨, 等. 基于负荷聚合商优选分级的配电网多重阻塞管理[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 109-116.
- LI Zhenkun, QIAN Jin, FU Yang, et al. Multiple congestion management in distribution network based on load aggregator optimization and hierarchy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 109-116.
- [70] 苏永新, 聂伟棋, 谭貌. 考虑风电接入和机电转换的综合能源系统日前区间优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 63-71.
- SU Yongxin, NIE Weiqi, TAN Maung. Interval optimization of integrated energy system considering wind power access and gas-power conversion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 63-71.
- [71] 刘福, 廖启术. 电气化铁路牵引负荷预测研究[J]. 机车电传动, 2023, 38(2): 142-150.
- LIU Fu, LIAO Qishu. Research on traction load prediction of electrified railway[J]. Electric Locomotive Transmission, 2023, 38(2): 142-150.
- [72] 何晓琼, 彭旭, 周瑛英, 等. 基于多质点动车组制动模型的动态牵引负荷[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(5): 878-884.
- HE Xiaoqiong, PENG Xu, ZHOU Yingying, et al. Dynamic traction load based on braking model of multi-mass EMU[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5): 878-884.
- [73] 魏波, 胡海涛, 王科, 等. 基于实测数据和行车运行图的高铁牵引变电站负荷预测方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 179-188.
- WEI Bo, HU Haitao, WANG Ke, et al. Load prediction method of high-speed railway traction substation based on measured data and running diagram[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 179-188.
- [74] 庞策, 黄树彩, 刘锦昌, 等. 多传感器交叉提示技术在UCAV侦察任务中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(6): 968-976.
- PANG Ce, HUANG Shucui, LIU Jinchang, et al. Research on the application of multi-sensor cross prompting technology in UCAV reconnaissance mission[J]. Journal of Sensing Technology, 2017, 30(6): 968-976.
- [75] 俞清, 金捷, 李佳, 等. 面向ZigBee与TSN融合的确定性协议转换器架构[J]. 仪表技术与传感器, 2022, 59(10): 57-63.
- YU Qing, JIN Jie, LI Jia, et al. Deterministic protocol converter architecture for ZigBee and TSN convergence[J]. Journal of Instrument Technology and Sensors, 2022, 59(10): 57-63.
- [76] 李鹏, 余涛, 李立涅, 等. 电力人工智能的演变与展望——从专业智能走向通用智能[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 1-17.
- LI Peng, YU Tao, LI Lixun, et al. The evolution and prospect of artificial intelligence for electric power: from professional intelligence to general intelligence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 1-17.
- [77] HU Z, XIA K, FAN Z, et al. A novel switch open-circuit fault diagnostic method for three-phase inverter based on PSO-DBN[C]// International Forum on Electrical Engineering and Automation, America, IEEE, 2022: 802-806.
- [78] 孙永辉, 孟云帆, 葛磊蛟, 等. 人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2239-2252.
- SUN Yonghui, MENG Yunfan, GE Leijiao, et al. Application and prospect of artificial intelligence-enabled microgrid operation optimization[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2239-2252.
- [79] 席磊, 刘治洪, 李彦营. 基于拉格朗日松弛强化学习算法的自动发电控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1359-1369.

(下转第27页)

- 2024,21(3):1189-1201.
- WANG Ying, XIN Yueyang, XIE Ziyun, et al. Low-frequency stability under emergency power supply scheme of photovoltaic and battery access traction power supply system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(3): 1189-1201.
- [67] 胡海涛, 葛银波, 黄毅, 等. 电气化铁路“源-网-车-储”一体化供电技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4374-4390.
- HU Haitao, GE Yinbo, HUANG Yi, et al. “Source-network-train-storage” integrated power supply system for electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4374-4390.
- [68] 王晖, 吴命利. 电气化铁路低频振荡研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 70-78.
- WANG Hui, WU Mingli. Review of low-frequency oscillation in electric railways[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 70-78.
- [69] 徐瑞梓零. 基于导纳判据的多母线直流微电网小信号稳定性分析方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [70] PAN Pengpeng, CHEN Wu, SHU Liangcai, et al. An impedance-based stability assessment methodology for DC distribution power system with multivoltage levels[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4033-4047.
- [71] MU Han, ZHANG Yao, TONG Xiangqian, et al. Impedance-based stability analysis methods for DC distribution power system with multivoltage levels[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9193-9208.
- [72] CAO W, LIU K, WANG S, et al. Harmonic stability analysis for multi-parallel inverter-based grid-connected renewable power system using global admittance[J]. Energies, 2019, 12(14): 2687-2697.
- [73] CAO Wu, WANG Shunyu, KANG Haotian, et al. Inherent interaction analysis for harmonic oscillations in the multi-parallel grid-connected inverter system using a sum type criterion: global admittance (GA)[J]. IEEE Access, 2020, 8: 8275-8285.
- [74] LIAO Yicheng, LIU Zhigang, ZHANG Han, et al. Low frequency stability analysis of single-phase system with dq-frame impedance approach: part I: impedance modeling and verification[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4999-5011.
- [75] INDU RANI B, SARAVANA ILANGO G, NAGAMANI C. Control strategy for power flow management in a PV system supplying DC loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3185-3194.
- [76] 王久和, 王勉, 吴学智, 等. 直流分布式电源系统稳定性判据研究综述[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 175-185.
- WANG Jiuhe, WANG Mian, WU Xuezhi, et al. Review of stability criteria study for direct current distributed power system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 175-185.

作者简介:

蔡瑾(2000—),女,硕士研究生,研究方向为光储接入牵引供电系统稳定性。E-mail:1900700569@qq.com。

王英(1978—),男,教授,研究方向为高速铁路“弓-车-网-桥隧”动力学、牵引“源-网-荷-风光储”多源供电和人工智能、信息处理在电力系统的应用等。E-mail:wangying01@mail.lzjtu.cn。

陈小强(1966—),男,教授,研究方向为铁路电能质量分析与控制。E-mail:xqchen@mail.lzjtu.cn。

葛磊蛟(1984—),男,副教授,研究方向为智能配电网态势感知、新能源并网优化控制和人工智能赋能微电网/配电网等。E-mail:legendglj99@tju.edu.cn。

马喜平(1987—),男,博士,主要从事为新能源并网技术及电网降损节能技术工作。E-mail:maxpgs@163.com。

(上接第15页)

- Xi Lei, Liu Zhihong, Li Yanying. Automatic power generation control based on lagrangian relaxation reinforcement learning algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1359-1369.
- [80] 葛磊蛟, 范延赫, 来金钢, 等. 面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2219-2238.
- GE Leijiao, FAN Yanhe, LAI Jingang, et al. Artificial intelligence enabling microgrid optimal operation technology for low-carbon economy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2219-2238.

作者简介:

葛磊蛟(1984—),男,副教授,研究方向为智能配电网态

势感知、新能源并网优化控制和人工智能赋能微电网/配电网等。E-mail:legendglj99@tju.edu.cn。

林可愿(2002—),男,硕士研究生,研究方向为贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知。E-mail:linkeyuan328@126.com。

任丽苗(1982—),女,讲师,研究方向为贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知。E-mail:renlimiao@mail.lzjtu.cn。

赵珊鹏(1983—),男,副教授,研究方向为牵引供电理论与新技术、电能质量预测、评估与控制技术。E-mail:zsp@mail.lzjtu.cn。

程宏波(1979—),男,教授,研究方向为输变电设备的健康管理及电网的智能控制等。E-mail:hbcheng@ecjtu.edu.cn。

陈晓婧(1988—),女,讲师,研究方向为贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知。E-mail:chenxiaojing@mail.lzjtu.cn。