

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250584

电-氢能源接入牵引供电系统综述

赖寒雨, 李奇, 蒲雨辰, 门炜杰, 王泽群, 陈维荣

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 铁路运输作为重要的基础设施和能源消耗大户, 面临着显著的减碳压力。针对列车组高密度、重载化运营趋势下, 牵引供电系统能源单一、再生制动能量回收难等问题导致的安全运行风险及能源利用率低等技术瓶颈, 对铁路沿线可再生资源禀赋进行了分析。系统阐述了电-氢能源接入牵引供电系统组成模块, 探讨了跨相式、同相式、贯通式结构下电-氢能源接入方式。在此基础上, 分析了系统运行优化策略在实时调控、能源优化调度、决策精度等方面的应用效果。并基于氢能在跨区域运输、长时间储存及低碳经济方面的特性, 分析了电-氢能源接入牵引供电系统的大规模制氢能力及其在运行安全与应急方面的供电韧性。

关键词: 电-氢能源; 牵引供电; 多能互补; 协同运行

Overview of electric-hydrogen energy access in traction power supply systems

LAI Hanyu, LI Qi, PU Yuchen, MEN Weijie, WANG Zequn, CHEN Weirong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: As a vital infrastructure and a major consumer of energy, railway transportation is facing significant pressure to reduce carbon emissions. In response to technical bottlenecks, such as safety operation risks and low energy utilization rates, caused by the only energy sources in the traction power supply system and the difficulties in recovering regenerative braking energy under trends of high-density and heavy-haul train operations, this paper analyzes the renewable resource endowments along railway lines. It systematically elucidates the component modules of electric-hydrogen energy integration into the traction power supply system and explores the access methods of electric-hydrogen energy under cross-phase, same-phase, and through-type configurations. On this basis, this paper analyzes the application effects of system operational optimization strategies in terms of real-time regulation, energy optimization scheduling, and decision accuracy in real-time scheduling. Furthermore, based on the characteristics of hydrogen energy in cross-regional transport, long-term storage, and a low-carbon economy, it analyzes the large-scale hydrogen production capabilities of electric-hydrogen energy integration in the traction power supply system and its resilience in operational safety and emergency power supply.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377123).

Key words: electricity-hydrogen energy; traction power supply; multi-energy complementarity; coordinated operation

0 引言

铁路运输在全国交通运输体系中占有举足轻重的地位, 全国铁路营业总里程已扩展至 15.9 万 km, 电气化率达到 75.2%。国家铁路系统能源消耗量(以标准煤计算)为 1752.7 万 t, 同比增长 15.2%。全国铁

路机车拥有量为 2.24 万台, 其中内燃机车约占 35%^[1]。轨道交通系统因其庞大的能源消耗量、持续扩张的运营规模及其在社会经济发展中的显著作用, 已成为实现节能减排目标的关键领域之一。在“碳达峰”与“碳中和”目标驱动下, 面对日益严峻的全球能源危机和环境挑战, 我国铁路行业积极制定了一系列方案, 以探索绿色低碳转型路径。国家铁路局等相关部门相继颁布了《交通强国建设纲要》、《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》和《推动铁路行业低碳发展实施方案》等重要文件, 强调根据

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377123); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2682025CG004); 四川省自然科学基金青年基金项目资助(2026NSFSC1206)

地域特性、实现多种能源互补,旨在推动运输的低碳化转型、优化调整运输结构、促进运维体系向绿色低碳方向转变^[2-5]。

在轨道交通绿色低碳转型过程中,太阳能、风能、地热能等可再生能源因其环境友好的特点发挥了关键作用。在技术创新和政策引导推动下,铁路行业正逐步实现能源结构多元化,以降低对化石燃料的依赖。对此,国内外学者与研究机构已开展了大量理论探索与实证研究,并在实践应用层面取得了显著进展。例如,日本东京站安装了 453 kW 的太阳能电池板,为东海道本线列车提供能源^[6];智利圣地亚哥的城市地铁运营商建造了两座太阳能电厂,将可再生能源的使用比例提高至 76%^[6];荷兰铁路已实现铁路一次能源 100%由风能供应^[7];维也纳地铁 U2 线扩展部分安装了地热能墙,利用地下土壤层交换热量来实现制冷或供暖^[8]。在国内,北京南站和杭州东站分别在屋顶和顶棚安装了 220 kW 和 10 MW 的太阳能发电设施^[9];雄安高铁站利用其丰富的地热、光伏、污水余热等可再生能源,打造了低碳精品示范工程,并实现了绿色电力的就地消纳。上述实践案例充分证实了可再生能源利用的技术可行性,为铁路行业可持续发展奠定了坚实基础。

然而,可再生能源受气候、地形等自然条件的制约,不可避免地呈现随机性、间歇性和地域性特征,汇入牵引供电系统将影响其供电稳定性、可靠性和安全性。因此有必要引入储能技术,以确保系统在稳定运行的基础上,最大限度地解决能源在时空上供需错配问题以减少能源浪费。当前牵引供电系统对储能技术的研究主要聚焦于储能技术集成、可再生能源整合和再生制动能量回收。文献[10]将风光可再生能源引入牵引供电系统,以钒电池+超级电容的混合储能形式,运用自适应粒子群算法验证了该模型具有良好的低碳经济效益。文献[11]分析了铁路沿线各个区域建设分布式光伏发电系统的可行性,并研究了并网方案。文献[12]采用了高速飞轮作为储能装置对地铁的再生制动能量进行回收利用,并在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型验证其有效性。文献[13]将氢能发电装置和电储能装置接入牵引供电系统,提出了协同控制策略并验证该方案的可行性、有效性和经济性,但未考虑氢能作为储能介质的应用潜力。文献[14]建立了一种可再生电-氢储能混合牵引供电系统,仿真验证了其框架的有效性,但对能源接入的具体方式与系统结构阐述尚显不足。

尽管氢能储存技术在牵引供电应用领域的研究

尚处于起步阶段,但氢能作为一种可再生、高效率、零污染的清洁能源,将逐步成为牵引供电系统中能源转型的重要载体^[15],发挥至关重要的作用。《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》将氢能上升到国家能源战略高度,强调加大制、储、输、用氢全链条安全技术的开发应用^[16]。氢能因其高质能比和高能量密度特性,在满足同等能量需求情况下,可降低所占质量与空间。氢储能自放电率几乎为 0,可适应长达一年以上储能需求^[17]。这些特点使氢储能可在可用空间有限、需大规模长期储能的轨道交通供电场景中表现出较强应用潜力。同时,氢能凭借其储存形式多样(气、液、固)和运输方式多元(管道输送、车载运输、站点储存)的独特优势^[18],能有效突破传统牵引网地域限制,实现能源跨区域调度。这种特性使氢储能既可作为可再生能源的重要储存载体,又可与电化学储能形成互补,通过电-氢混合储能的方式实现能源高效存储与供应,为牵引供电系统中可再生能源规模化应用提供了可靠支撑。

在牵引供电系统围绕高效、高弹性和绿色化三方面发展的情况下^[19],氢能的融入将成为关键环节。氢能兼具跨区域运输适配性、长周期储存稳定性及低碳经济性优势,可为牵引供电系统构建稳定清洁的能源供给范式。其设计模块化程度高、环境适应性强,能灵活适配复杂工况,达成区域能源供需动态平衡,为牵引供电系统全生命周期的高效低碳运行提供可靠保障。相较于已有研究,本文的主要工作包括:首先,分析了电-氢储能接入牵引供电系统时,“网-源-储-荷”各环节的能量流动关系,揭示了多能流耦合作用下功率交互机制。其次,对电-氢能源接入牵引供电系统的拓扑结构进行了归纳分类,形成了跨相式、同相式和贯通式等多类拓扑。在此基础上,融合运行优化与能量管理策略,系统探讨了多能互补背景下的实时调控与决策机制。上述工作为牵引供电系统的绿色低碳升级及高韧性运行提供理论基础和实践方向。

1 牵引供电系统面临的问题

牵引供电系统的稳定性与可靠性是确保轨道交通运营的关键技术指标,其运行效能受供电制式适配性、技术装备迭代水平、地理环境约束条件及牵引负荷动态特性等多维度耦合作用制约,仍面临以下关键问题。

1) 电网依赖度高。当前铁路对外部电网高度依赖,外部能源来源单一且自身应急保电能力较弱。当遭遇随机性高、可控性弱的外源性干扰时,其运行状态可能产生显著偏离,严重时将引发线路断电,

致使机车被迫停于非安全防护区域。若中枢线路中断将造成交通运输行业停摆,严重影响国民经济发展甚至威胁国防安全^[20]。我国西部地区运输任务繁重,但其电力供应却表现出明显的脆弱性^[21],这种情况引发了铁路路网与电网空间布局失配或适配困难,成为铁路系统运行、维护、智能化和绿色化发展的结构性约束和瓶颈性障碍。因此,需通过多元化清洁能源融合,构建具有韧性的供能体系,以降低对传统电网的过度依赖。

2) 电网友好度低。牵引负荷本身随机波动性大,反调峰特性显著,这加剧了调节能力原本有限的电网调峰压力^[20]。负荷功率因数低、不对称、非线性性和冲击性特征,使牵引网电压水平变化幅度大、随机性强,导致正弦电压畸变。当非正弦电压施加于线性负荷,或非线性负荷接入牵引网时,均会引发谐波电流,这加剧了设备损害,增大了输电线路损耗。此外,牵引负荷破坏了电力系统三相对称性,加之变压器接线方式表现出的差异化不对称特性,都将引起负序电流,并且两臂功率差值越大电流不平衡度越高^[22],这导致电力设备产生额外热效应,降低容量利用率,限制了系统输出能力。负荷产生的谐波、负序电流注入电网,使得电能质量下降,且干扰电气设备正常运作,对沿线通信产生负面影响,可导致继电器误动,并使得网侧仪器仪表测量结果失真,在控制层面引发错误,增加了系统安全风险^[23]。

3) 再生制动能量利用差。再生制动能量一般有4种解决方案:一是供给沿牵引供电线路同步负载;二是返送外部电网;三是存储于储能系统;四是以热能形式被制动电阻消耗。我国电气化铁路再生制动能量十分丰富,最高可占牵引能量的20%^[24]。目前牵引供电系统一般采用方案一、四相结合的技术路径,但电能浪费严重、能源利用率低。再生制动能量具有显著的三相不平衡特性,并伴随高含量谐波干扰,若将其直接返送电网,将作为新扰动源影响电网运行,加剧系统动态复杂度,且长下坡路段重载机车制动能量持续馈入接触网将引发网压过度抬升,触发线路保护动作,影响机车连续安全运行^[20]。此外,电力部门对铁路采用“返送正计”或“返送不计”计费政策,导致将再生制动能量直接返回电网在经济性方面缺乏吸引力。因此直接返送电网方式既不经济也不安全。随着电力电子与储能技术的快速发展,储能被视为解决现有问题的创新性技术路径,它可实现再生制动能量的转移、存储与高效利用,从而显著提升铁路能源利用效率与运行经济性。

4) 冲击负荷强冲击。随着现代化发展需求,列车组朝密集化、重载化、高速化方向发展,其运营

时间不断延长,客货共线、交直/交直交机车混跑投运状态对牵引网产生了更显著的影响。牵引供电系统需应对更大幅度、更长持续时间、更频繁变化的负荷波动,这给网侧电压稳定和功率因数带来严峻挑战。高速化列车快速过分相将导致列车来回切换工况,加剧电压跌落,分相问题更加显著,并对继电器等保护设备要求提升。运营过程中,同一供电臂上列车数量增加会使系统侧电压谐波畸变率增大,且新旧机车并存现象将大量吸收网侧无功功率,造成系统整体功率因数表现不佳。此外,在牵引变压器、整流器、逆变器等设备共同作用下,一次侧功率因数将进一步降低,导致发电机组输出能力下降,输变电设备供电能力也相应减弱。

在此背景下,氢能凭借其绿色经济、大功率、长时续航的供能特性,以及跨区域、长周期调度和独立供能的优点,可有效缓解牵引供电系统面临的供电独立性差、功率波动强和电能质量低等问题,为牵引供电系统稳定运行提供了新方案。

2 电-氢能源接入牵引供电系统基本框架

为应对前述挑战,本文探索了电-氢接入牵引供电系统新框架,分析了牵引网侧、可再生能源模块及电-氢混合储能模块的能量流动,构建了3类电-氢能源接入牵引供电系统的结构框架。

2.1 铁路沿线资源基础分析

我国拥有全球规模最大的高速铁路网络,其覆盖范围广泛,贯穿全国各地。铁路沿线区域大致可分为3类:用于建设噪音隔离的防护绿化带、因交通限制或生态保护原因未开发的土地以及沿线建筑设施顶面(如车站屋顶、轨道车库)。鉴于这些区域存在利用率低、面积广阔及带状分布的典型特征,其资源开发潜力突出,与新能源设施开发建设的需求高度契合。

铁路沿线区域太阳能、风能等可再生能源资源丰富程度显著。根据气象部门公报显示,我国70 m高度年平均风功率密度约为 193.5 W/m^2 ,年水平面总辐照量为 1511.8 kWh/m^2 ^[25],风光能源供应充足。就太阳能资源而言,我国88.5%的轨道交通里程分布在光资源很丰富区和丰富区^[26],具有良好的资源适配开发基础。轨道沿线风能资源在时间序列与垂直高度的双重尺度作用下,变化规律复杂且呈现区域差异。我国风能资源大体呈现出高原地区丰富、平原地区匮乏的特点。此外,列车运行时周边风场以及隧道活塞效应所产生的风力亦构成可观的风能资源^[26]。

风光等可再生能源资源利用潜力因区域地理条件、气候特征及用电需求的差异而呈现显著地域性:

西北地区资源储备丰富且可开发区域广阔, 适合布置大规模风光基地; 东南地区土地资源稀缺但能源需求高, 可充分利用铁路沿线屋顶进行分布式光伏开发, 实现空间资源的复合利用。综上所述, 我国铁路设施与可再生能源的耦合开发具有显著的资源-需求-场景适配潜力。

2.2 电-氢能源接入牵引供电系统组成

为实现上述可再生资源的高效利用, 本文构建了电-氢能源接入牵引供电系统, 各部分能量流动关系如图 1 所示。“源-荷-储”三者间能量流动比单一“源-荷”或“源-储”系统更为充分, 实现了系统配置容量缩减与设备利用率提升的双重目标^[27]。“源-荷-储”有机协调可再生能源的生产、转换、存储与消耗环节, 通过多尺度调节机制, 实现能源的自我供应和自我平衡, 降低对外部“网”的依赖。具备条件的铁路还可将氢储进行跨能源网络传输, 进一步实现全线零碳排放。系统通过“以电促氢、以氢储电”双向转化机制, 实现了电能与氢能并行的多元能源供应体系的构建。“以电促氢”通过将可再生能源发电转化为氢能, 实现能源长期存储与灵活调度。“以氢储电”可为铁路牵引供电系统提供稳定、大规模的电力支持。

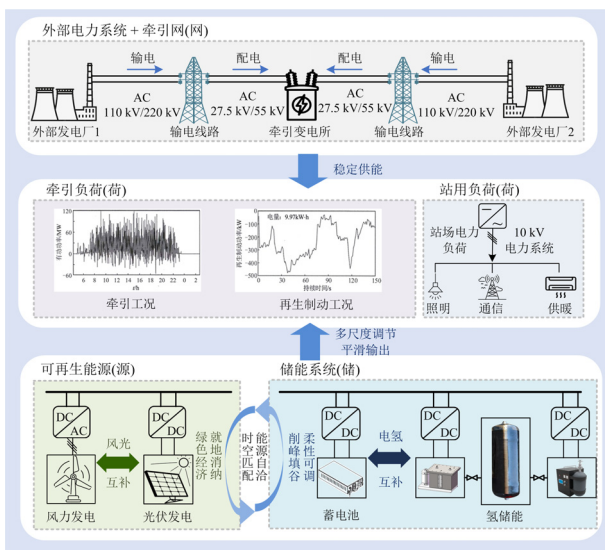


图 1 电-氢能源接入牵引供电系统组成

Fig. 1 Composition of electricity-hydrogen integrated energy traction power supply system

电-氢能源接入牵引供电系统主要由 3 部分组成: 依托外部电网的牵引网供电模块、可再生能源模块以及电-氢混合储能模块。针对牵引网模块的双边供电环流问题, 采用相邻牵引变电所与地方高压变电站同源并联的接入架构, 并综合考量系统对负序电流的承受能力。因此, 可将 2~3 个相邻牵引变

电所构成同站并联供电组, 集中接入所属高压变电站, 从而构建以若干地方高压变电站为单元的牵引变电所树状供电群组结构。为进一步增强供电系统的可靠性, 相邻供电群组间可通过高压线路实现牵引变电所高压侧互联, 形成群组间备用电源网络, 确保当某高压变电站发生故障并完全停止运行时, 由该变电站负责供电的牵引变电所能够通过群组间备用电源网络维持供电。

可再生能源模块与电-氢混合储能模块作为系统实现高效、弹性、绿色能源转换的核心环节, 在整体架构中处于关键地位, 下文将对这两个子系统进行具体剖析。

2.2.1 可再生能源模块

基于铁路沿线以太阳光、风能为主的可再生能源资源禀赋, 此类能源可作为牵引供电系统关键能源补给方案。风光资源呈现显著的时序互补特性, 日间和夏秋季太阳辐射增强而风速较弱, 夜间和春冬季则与之相反。这种天然互补性使风光发电系统能提供较稳定的电力输出。风电机组布局于高空层捕获风能, 光伏组件配置于近地面层利用太阳辐射能, 二者形成垂直空间能量分层耦合, 实现对大气不同高度能量资源的协同利用。因而根据负荷情况以及铁路沿线风光储量进行评估、设计并优化配置的风光互补发电系统, 将比独立的风光发电系统运行维护成本更低^[28]、经济效益更强、能源稳定性更高, 可构建在功率上互补、调节范围广泛的高效电力系统^[29]。

可再生能源模块对牵引负荷的作用在此不再赘述。铁路车站常处于城市电网末端, 往往依赖长距离线路单一供电, 以维持供暖、通信、照明等非牵引用电负荷。这种供电模式不仅电能损耗偏大, 还存在电能质量问题, 直接影响车站工作人员的生活舒适度与旅客的服务体验。可再生资源的接入可有效解决此类问题, 目前主要通过车站屋顶、站台雨棚、天棚等零碎式空闲空间投资光伏发电项目来实现。基于非牵引负荷的稳态特性, 可构建负荷预测模型并优化可再生能源装机容量配置, 实现源-荷动态匹配: 若容量配置不足将引发电力缺口与能源冗余; 若过量配置可导致设备低效运行及过剩功率反灌电网, 对弱电网区域构成冲击风险。需结合牵引供电制式、资源禀赋强度及电网结构类型, 建立容量-资源-网源协同优化机制。

2.2.2 电-氢混合储能模块

鉴于牵引负荷波动性与时段性特征, 储能系统需兼具瞬时集中供电能力以平抑负荷波动, 以及长期储存能力以应对时段性负荷变化。单一储能形式难以同时满足上述双重需求: 电储能虽可实现高效

电能供给,但难以兼顾长期无损储能;此外,其能量传递受电缆输电特性制约,难以实现跨区域长距离能量传输,导致能源交互范围受限。鉴于此,本系统采用电-氢混合储能方案,以蓄电池作为高功率设备、氢储能作为高能量设备,协同满足瞬时响应与长期储能需求。两者以电解槽和氢燃料电池为媒介进行电-氢能量转换,可实现多时间尺度动态负荷平衡,完成从分钟级实时削峰填谷到季节性能源调配的全维度能源缓冲。通过氢能市场化交易,区域经济可依托氢气外销实现增值,形成“环境-经济”协同效益。此外,该模块能够契合列车牵引功率需求并实现高频次再生制动能量的有效回收,达成牵引-制动工况下的动态能量耦合。同时,该模块可根据“共享储能”理念,基于容量配置策略,在发挥削峰填谷作用的基础上实现各牵引变电所间区域能量的功率调控功能^[30]。

在能源方面,为进一步优化系统能效,可设置如下能量流动关系:可再生能源优先满足负荷需求,富余能量优先注入本地储能,待储能达阈值后考虑跨区传输;当能源不足时,则由储能按需释能。在结构方面,根据能源接入方式可分为集中式与分布式两类:集中式接入成本低,但通信要求较高;分布式接入成本较高,但支持能源的网格化运行。根据拓扑结构差异,又可分为地面固定式、车载移动式和地面-车载混合式。其中地面固定式储能采用非车载布局,体积质量约束较弱且改造兼容性强。

2.3 电-氢能源接入牵引供电系统结构框架

可再生能源通过电力电子设备与网侧耦合,这种接入方式改变了系统原有的故障响应特性,典型表现为故障电流受限、频率偏移以及阻抗角波动^[31]。然而变流器出色的可控性为设计有效的控制策略提供了机会,有助于促使现有保护机制适应新型能源结构并保持正常运行。因此,基于变流器控制的能源接入方式,可作为一种理想的牵引供电系统电-氢接入方案。

牵引供电系统受电分相影响,列车仅能与受电弓接触的供电单臂获取能量,无法利用相邻单元实现能量交互,这种单独供电模式不仅导致系统能量调配效率低下,还存在显著安全隐患。随着多种复杂用能场景需求的提升,以功率融通设备^[32]、同相供电技术^[33]、贯通式供电技术^[34]为代表的过分相技术对牵引供电系统结构进行了改良优化,有效削弱电分相带来的影响,并为电-氢能源接入牵引供电系统提供了良好接口。基于此,本系统拓扑结构根据是否包含进出口侧电分相,划分为基于跨相方式的牵引供电系统、基于同相方式的牵引供电系统和

基于贯通线方式的牵引供电系统3种互联架构。

2.3.1 基于跨相方式的牵引供电系统结构框架

基于跨相方式的牵引供电结构如图2所示。通过电力电子设备打破不同相位供电臂间物理隔离,最终形成覆盖全系统的电-氢能源共享网络。该方案

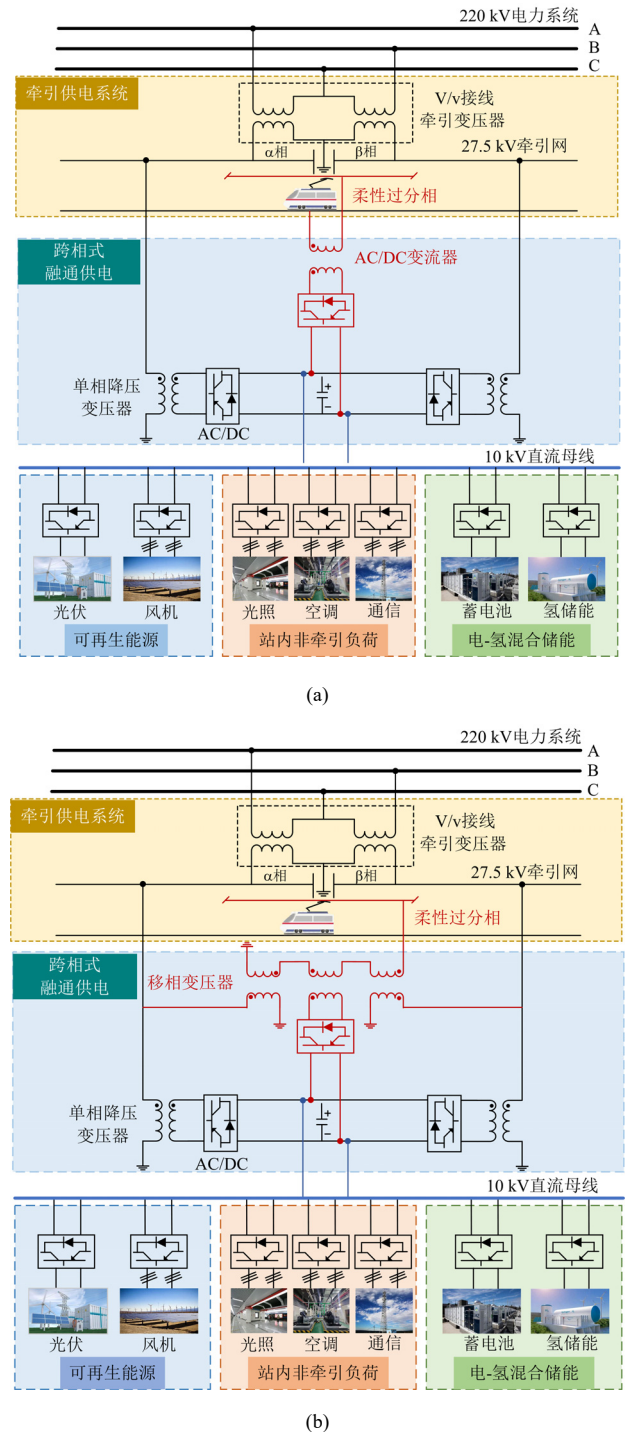


图2 基于跨相方式的牵引供电系统结构框架

Fig. 2 Structural framework based on cross-phase traction power system

以铁路功率调节器(railway power conditioner, RPC)为核心跨相设备, 利用其端口的强扩展性与高可控性, 通过直流电容侧冗余容量实现电-氢能源动态耦合。针对 RPC 稳压特性引发的分合闸过电压问题, 结合柔性过分相技术构建全程带电的中性段供电网络, 以实现供电臂两端电压相位平滑变化。该中性段供电网络与 RPC 进行能量耦合, 使得电-氢能源既可以通过 RPC 两侧的变流器接入牵引网侧, 又可以直接通过交直变流器供电于柔性过分相区, 供电方式灵活, 减少了能量损失。图 2(b)所示结构额外配置移相变压器, 通过相角偏移技术实现跨相融通供电, 可显著降低 RPC 容量需求, 进而压缩电-氢能源可用容量配置, 适用于客货混运等牵引负荷波动大、电-氢能源配置受限的场景; 而图 2(a)所示结构未加装移相变压器, 整体控制复杂度更低, 更适用于列车运行模式固定、沿线电-氢能源资源富集的常规场景。此方案对现有牵引供电系统的改造需求最小,

仅需在原有的牵引系统上增加设备, 改造简单且易于电-氢能源的扩展, 其模块化设计使得增减设备灵活。但跨相方式的供电架构存在负序和谐波问题, 且受开关管性能瓶颈和系统复杂度的影响, 对设备本身和控制系统的技术指标要求更高。

2.3.2 基于同相方式的牵引供电系统结构框架

基于同相方式的牵引供电结构如图 3 所示。该结构通过采用主变压器辅以相应功率补偿装置或三相-单相电力电子变电所组合搭配的方式, 实现将牵引变压器输出的异相电压转变为同相电压, 并可从牵引变压器以及相邻变电所间互联设备的直流侧接入电-氢能源。虽然该结构能够实现变电所输出同相电能, 进而取消变电所出口侧的电分相装置, 并对牵引供电网中的负序、无功和谐波问题开展综合治理, 然而在并联供电模式下, 牵引变压器二次侧易形成环流, 导致无法彻底取消电分相, 相邻变电所间仍需保留电分相设置。

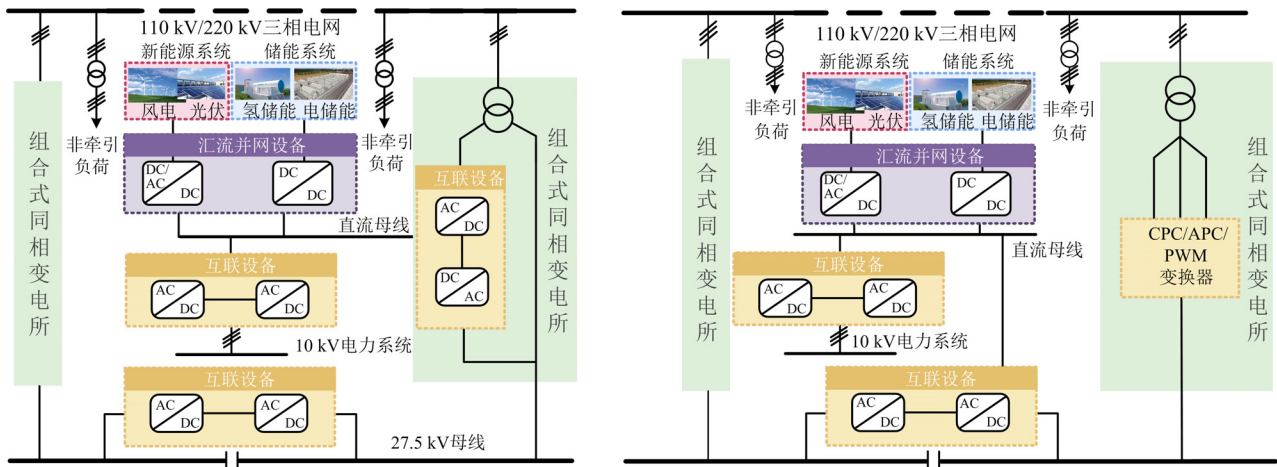


图 3 基于同相方式的牵引供电系统结构框架

Fig. 3 Structural framework based on a homogeneous traction power supply system

在牵引变电所间互联设备接入电-氢能源的方式与跨相式接入类似, 在此不再赘述。针对采用主变压器搭配功率补偿装置的同相供电体系而言, 电-氢能源可从功率补偿装置侧接入。此方案既保留了原有牵引变压器, 又简化了系统集成架构, 有效降低了改造成本。由于牵引供电系统不向网侧反馈能量且主变压器为不可控设备, 从牵引变压器侧接入的电-氢能源只进行单向能量流动, 能量耦合关系简单但利用率受限。对于三相-单相电力电子变电所与牵引变压器的组合架构, 需重构现有变压器结构, 在电力电子设备的直流侧接入电-氢能源。该方案虽成本较高, 但因电力电子设备具备可控性, 可实现电-氢能源的双向流动, 具备更高的调节灵活性与能

量优化潜力。该结构当前取得了诸多研究进展, 如恒定功率控制器(constant power control, CPC)、三相-单相脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)变流器以及多电平自动功率控制器(automatic power control, APC)同相方案。文献[23]提出了采用多电平技术替代主变压器的同相供电方式, 实现高压、大功率的直接变换以及对公共电网电能质量的主动综合治理。文献[35]提出利用绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)取消牵引变流器, 构建 3 kV 交流列车牵引系统, 实现单相与三相制式兼容。但多电平技术在实现跨相融通方面经验尚不充分, 因此将其直流单元与电-氢能源耦合以促进功率流动, 仍面临较高的技术复杂性和较低的

可行性。

相较于跨相式结构，同相式结构借助电力电子技术达成相位统一，有效改善了电分相问题，提升了电能质量。但同相式结构因需改造既有牵引网、增设互联设备而提升了初期投资成本，且其供电装置对电力电子器件的性能指标提出了更高要求。

2.3.3 基于贯通线方式的牵引供电系统结构框架

基于贯通线方式的牵引供电系统取消了全线电分相，将各种分散电-氢能源整合于贯通线，由贯通线对牵引网进行集中供电来实现全线贯通。在结构上由单相变压器结合整流逆变装置构成，如图4所示。该结构搭建的直流贯通线具备能量聚合与传输功能，能够整合牵引网及电-氢能源能量并输送至牵引网侧。针对电-氢能源接入，无需额外搭建新直流母线，经贯通线侧完成能量汇入。该结构还具备支持大规模电力传输与网络扩展的能力，适用于在广阔区域内进行部署，尤其是跨区域能源整合。

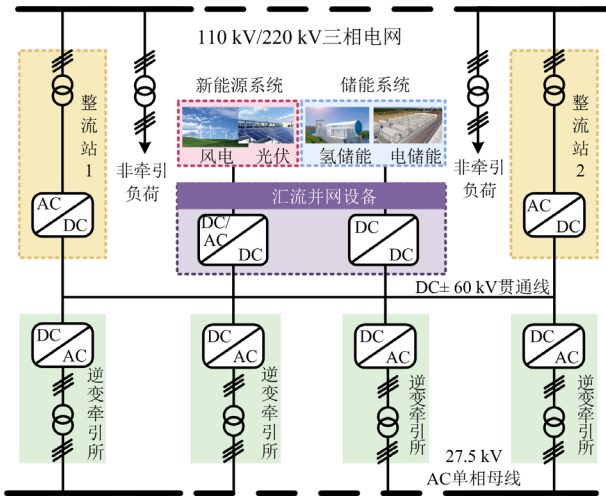


图4 基于贯通线方式的牵引供电系统结构框架

Fig. 4 Structural framework based on through-line traction power supply system

高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)技术的使用和直流背靠背输电系统的搭建能够实现大规模、长距离电力输送，传输容量大，且传输过程中可高效控制功率和方向^[36]，为电-氢能源的贯通式接入提供了良好思路。如图5和图6所示，两者主要区别在于HVDC包含直流输电环节，而背靠背系统则不具备这一特点。针对图5，其超长直流输电环节具备接入电-氢能源潜力。针对基于背靠背输电技术的贯通牵引供电系统，由于其不存在直流输电环节，可直接从牵引贯通线侧引入电能和氢能资源。此外，由于贯通线采用交流形式，当接入风力等可再生能源时，无需额外增设整流设备，从而

降低了成本并提升了资源利用效率。该结构还可借鉴RPC接入方法，利用背对背变流器直流侧接入电-氢能源，技术可行性更强，如图6所示。贯通式结构的设计使电-氢能源接入牵引供电系统的能源整合能力得到大幅提升，供电能力进一步增强、供电半径增加，适用于高速、重载及山区铁路等超长距离、大功率需求的运行场景^[37]。

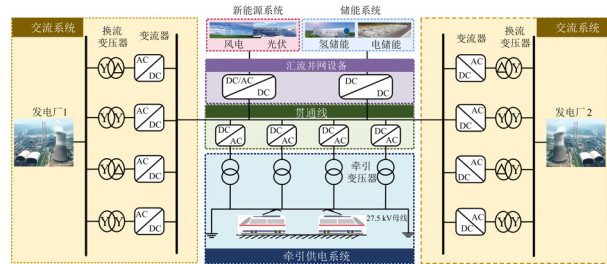


图5 基于HVDC的贯通式牵引供电系统

Fig. 5 HVDC-based through-line traction power supply

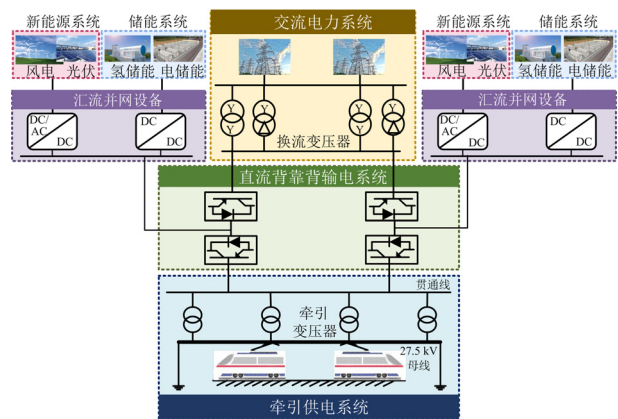


图6 基于背靠背输电系统的贯通式牵引供电系统

Fig. 6 Through-line traction power supply system based on back-to-back transmission system

“三相-直流-单相”型贯通式结构能够从根本上消除电分相与负序等电能质量问题，实现能量的高度聚合、高效利用。但该结构要求对现有牵引变电站实施全面改造，涉及大量设备的更新与增设，导致整体改造成本偏高、系统保护设计复杂。该方案更适用于非电气化、弱电气化铁路的改造。电-氢能源接入3种不同供电结构的特点如表1所示。

3 电-氢能源接入牵引供电系统运行优化

在电-氢能源接入牵引网的背景下，系统内部能量流动展现出多源性、多向性和动态性特征。为应对这种复杂能量耦合关系，必须构建科学合理的运行机制，以实现各类能源的高效利用。在系统内部可再生能源随机波动、电-氢转换效率、储能状态变

表 1 电-氢能源接入不同供电结构特点

Table 1 Characteristics of different power supply structures for electric-hydrogen energy access

	跨相式结构	同相式结构	贯通式结构
核心设备	RPC 为主, 可增配移相变压器	主变压器+功率补偿装置 三相-单相电力电子变电所	单相变压器+整流逆变装置 HVDC/背靠背输电系统
电-氢能源接入路径	RPC 直流电容侧接入	变压器直流侧汇入 互联设备直流侧汇入	贯通线直流侧汇入 背靠背变流器直流侧接入
电-氢能源流动方向	通过 RPC 两侧变流器流向牵引网 通过 RPC 直流侧交直变流器流向 过分相区间	带功率补偿装置侧单臂流入牵引网 电力电子设备变电所双臂流入牵引网	经贯通线流入牵引网
适用场景	改造需求小、灵活性高的场景	需取消电分相但无法彻底改造的场景	超长距离、重电能需求的场景 非电气化/弱电气化铁路改造
技术挑战	存在负序、谐波问题 系统复杂度较高	部分改造现有牵引网 器件性能要求高	改造成本偏高 保护设计复杂

化及动态列车负荷等多重因素影响下, 需对本系统的能量平衡、经济效益和设备寿命等方面进行优化调度和精准控制, 以提升系统的整体运行效率。当前, 关于牵引供电系统的优化策略可大致分为 3 类: 基于规则类策略、基于最值目标函数类策略以及基于机器学习类策略。本文提出的电-氢能源接入牵引供电系统将依据上述策略构建多层次协同优化架构, 以实现电-氢能源全维度运行控制与性能优化, 进一步提升整体调控效能。

3.1 基于规则类策略

基于规则类策略的核心在于通过预先设定的明确决策规则来实现动态负荷模式下的智能控制。具体是通过设定牵引网电压、功率波动率等关键状态变量门限阈值, 并构建列车运行工况-能量分配映射表, 从而能够在复杂场景下实现运行模式的智能切换与能量分配方案的秒级调取, 以保障系统的电压稳定性与功率跟踪精度, 具体流程如图 7 所示。所制定的规则根据处理逻辑可分为固定规则与模糊规则两类: 前者预先人为设定了一套固定的规则表, 后者则通过隶属函数进行模糊推理, 两类规则的对比如表 2 所示。

基于规则类策略因其简单、计算量小、易于实现而在牵引供电系统领域具有广泛的实践应用。相关研究已展现了规则类策略在牵引供电系统中的多样化实现形式。文献[13]分为氢能补偿模式、混合补偿模式、空载待机模式和再生制动充电模式, 并根据各模式下的固定规则进行电能质量优化。文献[38]根据列车运行工况确定各功率分配方法, 并在牵引工况下将功率及寿命状态进行模糊化处理, 采用模糊 Petri 网对放电阈值进行动态调整。文献[39]根据列车在减速、加速、恒定、停止 4 种状态下的能量路由器端口状态设置控制模式, 实现对储能交

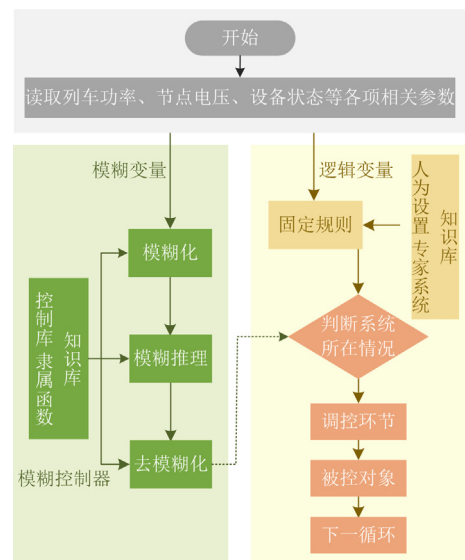


图 7 规则类策略运行流程图

Fig. 7 Operation flowchart of rule-based strategy

表 2 固定规则与模糊规则对比

Table 2 Fixed rules vs. fuzzy rules

特点	固定规则	模糊规则
规则形式	明确的条件-动作	模糊推理
适应性	对变化的输入变量敏感、 灵活性低	适应不确定性和变化 环境、灵活性高
难度	设计依赖经验但实现简单	设计复杂
优化方式	离线优化	在线调整规则
典型应用	明确目标、约束清晰的场景	不确定性、 非线性场景

换功率的精准调控, 在保障了储能装置使用寿命的同时, 又稳定了直流母线电压。文献[40]提出了一种基于级联式模糊控制的能量管理策略, 该策略依据储氢状态与荷电状态, 借助模糊控制器进行功率分配, 有效减小了氢储能系统在非合理区间的功率

波动范围，同时提升了氢储能系统中各装置的响应精度与速度。

在电-氢能源接入牵引供电系统中，该类运行优化策略通过设置决策门限和能量分配规则，实现列车在牵引、惰行、制动 3 种不同工况下的能源协调管理。根据电压波动、电-氢储能系统荷电状态(state of charge, SOC)的阈值和网侧条件，智能切换氢能主导、电网支撑、混合供能、能量回收等运行模式，在保障供电可靠性的同时优化能源利用效率、延长关键设备寿命并降低运行成本。

3.2 基于最值目标函数类策略

基于最值目标函数类策略在牵引供电系统中主要以运行成本最小化、能源利用效率最大化或系统可靠性最优化为核心目标。从总体上看，该策略通过构建单目标或多目标优化模型，综合考虑系统经济性、环保性和可靠性等多维度指标，实现能量流的最优配置和调度，可分为离线优化和实时优化两类，如表 3 所示。

表 3 离线优化和实时优化对比

Table 3 Offline optimization vs. real-time optimization

特点	离线优化	实时优化
运行目标	全局性能提升 (如全网损耗降低)	局部性能优化(如实时电压 稳定、能量动态分配)
数据来源	依赖大量历史数据	以实时数据为主，可结合 短期历史数据调整决策
执行时间	运行前执行，通常适用于 长期或周期性操作	运行过程中执行，根据当前 状态实时更新策略，适用于 短时动态决策
时间跨度	关注长期效果，跨度大	关注短时瞬态性能
空间跨度	作用于大型系统， 建模相对复杂	作用于较小单元， 减少计算复杂度

从方法论角度，该类策略常见的优化方法有动态规划(dynamic programming, DP)、模型预测控制(model predictive control, MPC)、等效消耗最小化策略(equivalent consumption minimization strategy, ECMS)以及遗传算法、粒子群算法等启发式算法。DP 可用于离线优化整体能量调度，MPC 通过预测可再生能源发电和牵引负荷需求来优化功率分配，ECMS 可动态平衡各个能源间的实时消耗。基于最值目标函数类策略优化流程如图 8 所示。该类策略可有效解决牵引供电系统中能量调度效率低、再生制动能量利用少及系统动态响应迟缓等问题。文献[41]针对可再生能源出力不确定性，提出了联合制氢系统的日前-日内-实时多时间尺度优化策略，提升系统在不确定情况下的运行经济性。文献[42]建立了多馈线(枢纽)动态牵引供电系统通用数学模

型，提出了基于行车轨迹优化和再生制动能量回收利用的牵引供电系统综合能耗优化策略。文献[43]以线性多目标优化为主、规则判断为辅的形式对牵引供电系统进行实时能量优化管控。

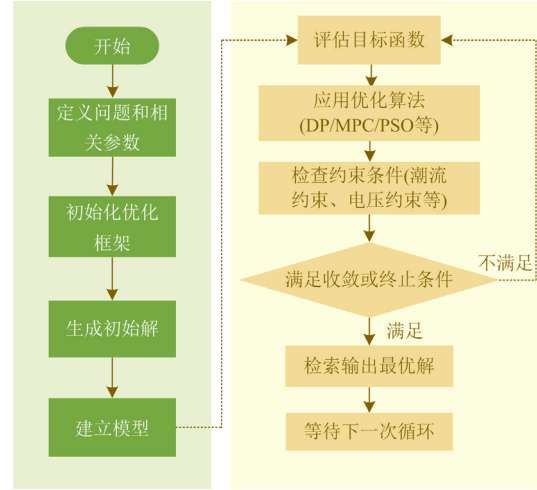


图 8 最值目标函数类策略运行流程图

Fig. 8 Operation flowchart of the maximum-value objective function strategy

在电-氢能源接入牵引供电系统中，该策略将通过构建多层次优化框架发挥重要作用。在宏观层面可采用改进遗传算法优化储能系统配置和氢能系统规划，协调各能源子系统的出力来提高可再生能源消纳比例。在微观层面可基于改进的 MPC 算法实现储能系统的实时功率分配，确保系统运行的经济性和稳定性。

3.3 基于机器学习的策略

机器学习策略以提升牵引供电系统自适应能力与决策精度为核心目标，基于历史运行数据构建非线性映射模型，实现运行优化。主要采用深度学习和强化学习两种方法。深度学习通过构建多层神经网络结构自动提取复杂特征，处理高维非线性关系，从而实现系统状态精确预测和分类；强化学习则基于马尔可夫决策过程框架，通过智能体与环境的持续交互和奖惩机制，逐步优化控制策略，特别适用于实时动态优化场景。两种方法在牵引供电系统领域应用已相当广泛，对比见表 4。二者共同为复杂多变的牵引供电系统提供基于数据驱动的智能决策。

深度强化学习可发挥上述两者优势，提升牵引供电系统能量管理水平^[44]，在实际应用中实现牵引供电系统“网-源-储-荷”复杂动态环境下多种能源间的自适应调度控制，显著提升了系统实时响应能力和决策准确性。其中，深度 Q 网络(deep q-network, DQN)学习是一种结合了深度学习与 Q 学习的强化

表 4 深度学习和强化学习对比

Table 4 Deep learning vs. reinforcement learning

特点	深度学习	强化学习
数据需求	依赖大量历史数据	依赖实时交互数据
特征	特征提取, 为强化学习提供高质量状态表示	数据驱动, 自适应学习并调整实时决策
适用场景	负荷预测、故障检测	动态能量分配、实时调控

学习方法, 能够通过神经网络对动作价值函数进行逼近, 从而在高维状态空间下实现高效决策。文献[45]提出了一种基于深度 Q 网络的控制策略优化方法, 将“源-储-荷”能量管理系统作为智能代理, 利用光伏出力、储能荷电状态、牵引网压等外部状态对其进行训练, 以实现系统经济可靠运行的优化策略。此外, Sarsa 方法是一种基于时序差分的强化学习算法, 其核心思想是在智能体与环境交互过程中, 利用当前状态-动作对及其后续状态-动作对的信息来更新策略, 使得学习过程更加平滑和稳定。文献[46]将 Sarsa(λ) 算法应用于城市轨道交通列车的节能驾驶控制, 该研究通过构建“驾驶状态-动作-能耗奖励”的强化学习模型, 优化列车启停、巡航和制动策略, 实现了能耗降低。机器学习方法不仅能够提升系统的决策能力, 还可以与数字孪生技术结合使用, 进一步增强系统的实时监控与预测分析能力。数字孪生是指通过构建物理系统的虚拟模型, 对实际设备和运行状态进行实时映射与动态仿真, 从而辅助运维决策、优化管理流程。结合机器学习, 数字孪生能够对系统运行数据进行智能分析, 实现故障诊断、性能预测等功能。文献[47]通过融合数字孪生技术和人工智能算法, 建立牵引供电系统的智能运维体系, 实现系统运维决策的智能化, 以提高系统的响应、自愈和预防能力。

电-氢能源接入牵引供电系统可基于机器学习

表 5 运行优化策略的对比与应用

Table 5 Comparison and application of optimal operation strategy

策略类型	优点	缺点	应用场景
基于规则	简单、高效、实时性强	依赖人工经验, 难以应对复杂多变的环境	更关注各子系统的独立运行与稳定性
基于最值目标函数	性能优越、能够全局优化	对系统模型依赖性较高, 计算复杂	离线优化或部分实时优化场景
基于机器学习	自适应性强、处理复杂工况能力强	数据依赖性强, 训练成本高	动态、复杂、多变的工况

4 电-氢能源接入牵引供电系统应用潜力

电-氢能源接入牵引供电系统突破了传统单一能源供电模式的局限, 形成了更加灵活、可靠的能源供应网络, 供电距离延长, 牵引所数量减少, 建

设难度降低。该系统应用潜力主要体现在两个方面: 1) 系统凭借先进的制氢技术能够充分利用丰富的可再生能源, 实现氢能的规模化生产、存储与应用, 支持多异质能源的跨时间、跨地域高效利用; 2) 在供电韧性上, 多元化能源供应架构显著提升了

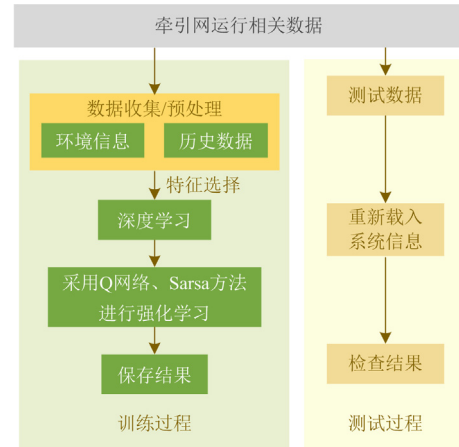


图 9 基于机器学习策略运行流程图

Fig. 9 Operation flowchart based on machine learning strategy

基于机器学习的策略不需要精确数学模型, 设计简单, 能够加快求解速度并具有较好性能, 但这种数据驱动形式使其缺乏物理解释。运算过程呈现黑盒形式, 导致结果的可解释性、交互性和可操作性较差。此外, 计算过程受困于高维海量数据, 需要对数据进行筛选、稀疏化及降维处理。

上述 3 类运行优化策略的特点与应用场景如表 5 所示。除以上策略外, 对于电-氢能源接入牵引供电系统还可以通过确定总体技术规范准则(例如再生能量引入规范)、对现有规定准则进行修订提升、结合无人机通信感知技术等方法, 进一步加速构建成熟可靠的运行控制系统。

系统抵御单一能源中断风险的能力，不仅强化了运行安全性，还优化了应急响应机制，为牵引供电系统构建了更为稳健可靠的安全防护屏障。

制氢技术凭借其在能源转化效率、设备成本和产业链配套方面的显著技术进步，在电-氢能源接入牵引供电系统中展现出规模化应用的巨大潜力，为系统带来能源跨时空调配、供电稳定性提升及低碳转型的多重优势。在能源转化效率方面，最新一代质子交换膜电解槽的能效已有显著提升。在设备成本方面，随着规模化生产和技术的进步，电解槽系统投资成本下降，显著降低了制氢成本。在产业链配套方面，从可再生能源发电、电解制氢到氢能储存与运输应用的全链条已逐步成熟，多个国家和地区已建成示范项目，验证了将间歇性可再生电力转化为稳定氢能的技术可行性。依托可再生能源禀赋，多区域具备绿氢规模化生产条件，该规模化制氢能力将为电-氢能源接入牵引供电系统的跨区域能源传输提供能源基础，通过“可再生能源发电-绿电制氢-集中储存/跨区运输-燃料电池发电”的完整能源闭环，实现了月度甚至季度级能源时移，提高了能源自给率，为实现“双碳”目标提供了有力的技术支撑。

基于前文所述的运行优化策略，电-氢能源接入牵引供电系统韧性优势尤为突出，在面临严峻挑战时，这种多元化能源供应体系展现出卓越的应对能力。氢能作为高能量密度清洁能源载体，其长周期存储能力为系统提供稳定后备电源，在极端天气、设备故障或外源中断等突发情况下，系统可依靠氢储能提供长续航应急能源，体现独特供电优势。这种韧性特性使得铁路交通即使在情况多变的复杂环境条件下也可正常运行，大幅提升了铁路系统的安全性和可靠性。氢能传输方式灵活多元，为跨区域输送提供多种方案，显著拓展了电-氢能源接入牵引供电系统的应用场景。同时，分布式储存设施增强了系统抗灾能力，即使局部设施受损，整体系统仍能保持基本功能，展现出较强韧性，其能量信息流动如图 10 所示。

电-氢能源接入牵引供电系统落地应用时，需重点考量以下关键要素：其一，基于当地历史数据，开展间歇性可再生能源发电功率与负荷功率预测，综合建设难度、运维成本、消纳水平及经济效益进行站址优选；结合空气动力学与结构动力学原理，划定轨道周边风光等可再生资源收集设备的安全安装阈值。其二，分析列车再生制动能量处置策略，结合编组工况，核算供电系统容量能否适配牵引负荷长期递增需求，尤其强化列车在长大坡道环境下的运行分析；设计系统与区域电网的互联方案，评



图 10 系统能量信息流动图

Fig. 10 Diagram of system energy information flow

估接入主电网的可行性。其三，针对高寒、暴雨、沙尘等极端特殊环境，采用特种适配材料，保障设备极端环境下的可靠运行。其四，鉴于新型牵引供电系统电力电子设备众多引发的谐波问题，需科学规划谐波监测与治理方案。其五，集成能源自洽、多级广域保护等前沿技术，确保系统安全、稳定、高效、高弹性运行。

5 结论与展望

伴随全球能源转型与可持续发展战略的深化，牵引供电系统绿色化、智能化转型势在必行。本文梳理了牵引供电系统现存问题，搭建电-氢能源接入牵引供电系统基本架构，形成互补互济、协同优化的能源供应模式，提出多种运行策略，以提升能源利用率、降低运行成本并保障供电可靠稳定，同时探讨系统规模化制氢能力与供电韧性。本文的分析表明，将可再生能源和氢能接入牵引供电系统是实现轨道交通绿色转型和可持续发展的有效途径。然而，要推动电-氢能源接入的牵引系统从理论走向实际应用，仍需在标准体系建设、多场景验证平台、能源-轨道多系统耦合优化等方面进行深入研究。

在标准体系建设上，目前尚未形成完备体系框架，现有标准多聚焦燃料电池或氢能储存通用规范^[48-49]，而针对铁路特殊运行环境，如振动冲击、再生制动能量回收、车载储氢系统与轨道限界兼容性等，仍缺乏专项标准。同时，我国在电-氢耦合应用领域基础设施不完善、业务框架不清晰^[50]，在可再生能源制氢等关键技术环节的标准缺失严重^[51]，制约了氢能技术在牵引系统的深度融合与广泛应用。在多场景验证平台方面，系统多集中于实验室或单一场景测试，缺乏能够覆盖实际复杂工况的平台，导致运行数据、性能评估和安全性分析不全面，阻碍了技术的规模化推广。基于此，亟需构建“场

景全覆盖、数据全贯通、安全全链条”的验证平台, 填补极端环境模拟等领域的空白。在能源-轨道多系统耦合优化方面, 当前研究多聚焦单一能源系统, 缺乏能够覆盖能源-轨道-氢储能的多维度协同优化模型。例如, 轨道交通负荷与氢储能动态响应的耦合机制研究不足、模型验证缺乏实际工程支持、氢储能与轨道交通系统能量流匹配依赖经验参数、氢储能与制动能量回收的协同优化尚未涉及等。未来该领域需以“全链条协同、全生命周期管理”为核心, 通过数字化技术、智能化控制与跨专业协作, 推动氢能技术在能源-轨道耦合领域深度应用。

参考文献

- [1] 国家铁路局. 2023 年铁道统计公报[EB/OL]. [2024-06-28]. https://www.nra.gov.cn/xwzx/xwxx/xwlb/202406/t20240628_345561.shtml
- [2] 中共中央国务院. 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. [2019-09-19]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm
- [3] 中共中央国务院. 中共中央 国务院印发《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》[EB/OL]. [2022-01-18]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/18/content_5669049.htm
- [4] 国家铁路局. 国家铁路局 国家发展改革委 生态环境部 交通运输部 国铁集团联合印发《推动铁路行业低碳发展实施方案》[EB/OL]. [2024-02-06]. https://www.nra.gov.cn/xwzx/xwxx/xwlb/202402/t20240218_344691.shtml
- [5] 国家铁路局. 国家铁路局关于印发《老旧型铁路内燃机车淘汰更新监督管理办法》的通知[EB/OL]. [2024-09-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202409/content_6977731.htm
- [6] CHENG Peng, LIU Wenquan, MA Jing, et al. Solar-powered rail transportation in China: potential, scenario, and case[J]. *Energy*, 2022, 245.
- [7] ZHONG J, BOLLEN M, RONNBERG S. Towards a 100% renewable energy electricity generation system in Sweden[J]. *Renewable Energy*, 2021, 171: 812-824.
- [8] SU Xing, CHEN Chaoyang, HUANG Yixiang, et al. System reliability study of geothermal energy walls in subway stations based on rapid thermal performance prediction model[J]. *Energy*, 2024, 304.
- [9] ZHOU Xinjun. A study on potential for using new energy and renewable energy sources in railways[J]. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2019, 8(4): 45-51.
- [10] 李光耀, 袁佳歆, 甘栋良, 等. 高铁新能源混合储能系统低碳经济优化运行研究[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(1): 67-78.
- LI Guangyao, YUAN Jiabin, GAN Dongliang, et al. Research on low-carbon economy optimization operation of high-speed railway new energy hybrid energy storage system[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(1): 67-78.
- [11] 鲍英豪. 铁路沿线建设分布式光伏发电系统的可行性研究[J]. *太阳能*, 2024(3): 5-13.
- BAO Yinghao. Feasibility study on construction of distributed PV power generation systems along the railway[J]. *Solar Energy*, 2024(3): 5-13.
- [12] 张丹, 姜建国, 陈鹰, 等. 地铁牵引供电系统中高速飞轮储能系统控制研究[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(12): 1-8.
- ZHANG Dan, JIANG Jianguo, CHEN Ying, et al. Research on control strategy of high speed flywheel energy storage system in metro traction power supply system[J]. *Journal of Electrical Machines and Control*, 2020, 24(12): 1-8.
- [13] 宋治东, 解绍锋, 彭友, 等. 含氢储装置的同相供电系统控制方法[J]. *机车电传动*, 2024(3): 173-181.
- SONG Zhidong, XIE Shaofeng, PENG You, et al. A control method for co-phase power supply system of hydrogen containing energy storage device[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2024(3): 173-181.
- [14] YU Haoyuan, WANG Yanbo, CHEN Zhe. A renewable electricity-hydrogen-integrated hybrid DC traction power system[C]// 2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), December 6-9, 2021, Kigali, Rwanda: 1-6.
- [15] 陈维荣, 王颖民, 李秉训, 等. 氢能轨道交通的研究现状与发展趋势[J]. *机车电传动*, 2023(3): 1-11.
- CHEN Weirong, WANG Yingmin, LI Bingxun, et al. Overview on current research status and development trends of hydrogen-powered rail transit[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2023(3): 1-11.
- [16] 国家发展改革委 国家能源局. 《氢能产业发展中长期规划(2021-2035 年)》[EB/OL]. [2022-03-23]. https://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm
- [17] LIU Xuan, LI Kang. Energy storage devices in electrified railway systems: a review[J]. *Transportation Safety and Environment*, 2020, 2(3): 183-201.
- [18] 安新茹, 吴宗臻, 龚雨波, 等. 双碳目标下铁路储运氢气现状及展望[J]. *铁道运输与经济*, 2024, 46(11): 1-12, 29.
- AN Xinru, WU Zongzhen, GONG Yubo, et al. Status and outlook for hydrogen storage and transportation via railway under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Railway Transport and Economy*, 2024, 46(11): 1-12, 29.
- [19] 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.
- [20] 陈冲, 贾利民, 赵天宇, 等. 去碳化导向的轨道交通与新能源融合发展——形态模式、解决方案和使/赋能技术[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3321-3337.
CHEN Chong, JIA Limin, ZHAO Tianyu, et al. Decarbonization-oriented rail transportation and renewable energy integration development—configurations, solutions, and enabling/empowering technologies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3321-3337.
- [21] 唐力. 弱电网条件下的牵引供电系统谐波谐振特性及治理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
TANG Li. Research on harmonic resonance characteristics and suppression of traction power supply system in weak grid[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [22] 罗忠游, 赵普志, 段玉, 等. 电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 124-134.
LUO Zhongyou, ZHAO Puzhi, DUAN Yu, et al. A negative sequence optimization compensation strategy for an electrified railway connected to wind power integration areas[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 124-134.
- [23] 周京华, 祝天岳, 曾鹏, 等. 电气化铁路牵引供电系统研究现状及关键性技术[J]. 电气传动, 2015, 45(6): 3-9.
ZHOU Jinghua, ZHU Tianyue, ZENG Peng, et al. Research of electrified railway traction power supply system status and key technology[J]. Electric Drive, 2015, 45(6): 3-9.
- [24] 胡海涛, 黄毅, 高仕斌. 电气化铁路再生制动能量利用与新能源储能技术[C] // 第三届中国铁路发展论坛, 2022年11月17日, 成都, 中国: 204-214.
- [25] 中国气象局. 气象报告[EB/OL]. [2025-02-11]. https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gkqr/qxbg/202502/t20250211_6847016.html
- [26] 胡田飞, 刘济华, 李天峰, 等. 铁路与新能源融合发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 122-132.
HU Tianfei, LIU Jihua, LI Tianfeng, et al. Current status and prospect of the integration of railway and new energy[J]. China Engineering Science, 2023, 25(2): 122-132.
- [27] 高仕斌, 罗嘉明, 陈维荣, 等. 轨道交通“网-源-储-车”协同供能技术体系[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5): 959-979, 989.
GAO Shibin, LUO Jiaming, CHEN Weirong, et al. Rail transit “network-source-storage-vehicle” collaborative energy supply technology system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(5): 959-979, 989.
- [28] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 11-20.
LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11-20.
- [29] 荆涛, 陈庚, 王子豪, 等. 风光互补发电耦合氢储能系统研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 75-83.
JING Tao, CHEN Geng, WANG Zihao, et al. Research overview on the integrated system of wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 75-83.
- [30] 刘素梅, 王丹枫, 韩伟, 等. 计及储能充放电特性的交流耦合光储电站送出线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(10): 66-77.
LIU Sumei, WANG Danfeng, HAN Wei, et al. Pilot protection of exporting lines in AC-coupled PV-energy storage power stations considering the charging-discharging characteristics of energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 66-77.
- [31] YANG Zhe, WANG Hongyi, LIAO Wenlong, et al. Protection challenges and solutions for AC systems with renewable energy sources: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(1): 18-39.
- [32] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣, 等. 铁路功率调节器研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4640-4655, 4742.
DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong, et al. Research progress of railway power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4640-4655, 4742.
- [33] 黄小红, 赵艺, 李群湛, 等. 电气化铁路同相储能供电技术[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4): 856-864.
HUANG Xiaohong, ZHAO Yi, LI Qunzhan, et al. Cophase traction power supply and energy storage technology for electrified railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4): 856-864.
- [34] 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 Xiaoqiong, HAN Pengcheng, WANG Yi, et al. Study on advanced cophase traction power substation system based on cascade-parallel converter[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 52-61.
- [35] 李群湛. 新型轨道交通工频 AC 3 kV 制式: 列车牵引系统与牵引供电系统[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(1): 107-118.
LI Qunzhan. Novel rail transit power frequency AC 3 kV mode: a train traction system and traction power supply system[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, 54(1): 107-118.

- [36] CHEN Chen, LI Chen. Fault simulation analysis of HVDC transmission[J]. *Journal of Power Electronics, Machines and Drives*, 2023, 2(1): 6-12.
- [37] 王鑫, 涂春鸣, 郭祺, 等. 电气化铁路贯通型供电系统综述[J]. *机车电传动*, 2022(3): 17-28.
WANG Xin, TU Chunming, GUO Qi, et al. Review of through-type power supply system for electrified railways[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2022(3): 17-28.
- [38] 罗嘉明, 高仕斌, 韦晓广, 等. 基于模糊Petri网的“网-源-储-车”动态阈值能量管理策略研究[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(1): 48-58.
LUO Jiaming, GAO Shibin, WEI Xiaoguang, et al. Research on “grid-source-storage-vehicle” dynamic threshold energy management based on fuzzy Petri nets[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(1): 48-58.
- [39] CHEN Richeng, YANG Yaxi, JIN Tao. A hierarchical coordinated control strategy based on multi-port energy router of urban rail transit[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(1): 201-212.
- [40] 李建林, 梁策, 曾飞, 等. 基于级联式模糊控制的电氢耦合直流微网能量管理策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(18): 87-100.
LI Jianlin, LIANG Ce, ZENG Fei, et al. An energy management strategy for an electricity-hydrogen coupled DC microgrid based on cascade fuzzy control[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(18): 87-100.
- [41] 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(3): 68-80.
YANG Sheng, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Multi-time scale optimization strategy of a renewable energy ALK-PEM combined hydrogen production system[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(3): 68-80.
- [42] 王科. 高速铁路牵引供电系统动态能耗分析及优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
WANG Ke. Research on energy consumption assessment and optimization for traction power supply system of high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [43] 李俊豪, 涂春鸣, 王鑫, 等. 基于“规则+优化”的电气化铁路站点实时能量管控策略[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(11): 3339-3352.
LI Junhao, TU Chunming, WANG Xin, et al. Real-time energy management strategy for electrified railroad stations based on “rules + optimization”[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(11): 3339-3352.
- [44] 郭庆来, 兰健, 周艳真, 等. 基于混合智能的新型电力系统运行方式分析决策架构及其关键技术[J]. *中国电力*, 2023, 56(9): 1-13.
GUO Qinglai, LAN Jian, ZHOU Yanzhen, et al. Architecture and key technologies of hybrid-intelligence-based decision-making of operation modes for new type power systems[J]. *Electric Power*, 2023, 56(9): 1-13.
- [45] 吕宗璞, 戴朝华, 姚志刚, 等. 计及稳压率和经济性的城轨直流牵引供电光储系统深度Q网络优化控制方法[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(10): 46-52.
LÜ Zongpu, DAI Chaohua, YAO Zhigang, et al. Deep Q network optimization control method for DC traction power supply photovoltaic-energy storage system of urban rail considering voltage stabilization rate and economy[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(10): 46-52.
- [46] JIANG Xiaoyi, SHI Kun, LIU Yatong, et al. Intelligent control strategy of urban rail train based on Sarsa(λ) algorithm[C] // 4th International Conference on Neural Networks, Information and Communication Engineering (NNICE), January 19-21, 2024, Guangzhou, China: 1615-1618.
- [47] 高仕斌, 刘帝洋, 韦晓广, 等. 基于数字孪生网络的牵引供电智能运维体系与应用架构[J]. *铁道学报*, 2023, 45(12): 1-15.
GAO Shibin, LIU Diyang, WEI Xiaoguang, et al. System and application architectures of intelligent operation and maintenance for traction power supply based on digital twin network[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(12): 1-15.
- [48] 全国团体标准信息平台. 氢动力市域列车通用技术条件[EB/OL]. [2023-11-27]. <https://www.ttbz.org.cn/upload/file/20231127/6383668767020275327356842.pdf>
- [49] 国家标准馆. 气态氢-加油站-第1部分: 一般要求[EB/OL]. [2020-04-20]. <https://ndls.org.cn/standard/detail/ed8c336f9f3eeb15a073b1b11954beec> 2020-04-20
- [50] 张蜚, 木合塔拜尔·拜合提亚尔, 贾利民. 轨道交通与氢能融合技术发展现状与对策建议[J]. *机车电传动*, 2023, 65(3): 24-31.
ZHANG Zhi, MUHTABAIR Baihetiyar, JIA Limin. Development status and suggestions of hydrail technology[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2023, 65(3): 24-31.
- [51] 中国电力企业管理. 电氢耦合关系分析与标准体系建设[EB/OL]. [2024-01-31]. <https://www.esnc.com.cn/news/show-1648351.html>

收稿日期: 2025-06-02; 修回日期: 2025-09-22

作者简介:

赖寒雨(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统运行优化; E-mail: 15328074436@163.com

李奇(1984—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为轨道交通新能源技术、综合能源系统运行与控制。E-mail: liqi0800@163.com

(编辑 魏小丽)