



氢燃料电池混动机车关键技术综述

高浩然¹, 刘秋降¹, 吴命利¹, 胡亮^{1,2}, 田鑫亮², 吴丽然¹, 马红超³

(1. 北京交通大学, 北京 100044;

2. 国能新朔铁路有限责任公司供电分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010399;

3. 北京铁研建设监理有限责任公司, 北京 102600)

摘要: 氢能作为一种新兴的能源, 具有绿色可再生, 能量密度大, 易于储存等特点, 目前在交通领域得到广泛应用。然而, 相比于汽车和舰船, 目前氢燃料电池在轨道交通领域的应用相对较少, 亟须构建系统的技术体系并明确其定位和发展方向。文章首先从时间和发展方向两个维度对国内外文献进行统计分析, 并对世界氢能机车研制成果的性能参数进行整理对比。随后, 文章从氢燃料电池技术、储氢技术和氢系统安全管理3个方面介绍了车载氢系统相关技术, 并对辅助电源的应用进行分析, 介绍了集中式和分散式两种机车综合电气系统拓扑, 及其相关变流器的应用; 对传统和最新的混合动力源能量管理策略进行梳理分类。在此基础上, 从高速化与重载化、复杂工况适应能力、绿氢技术推广、运营成本、安全性5个方面分析氢燃料电池混动机车面临的挑战, 并指出未来的研究趋势。最后, 对氢燃料电池混动机车技术进行了归纳总结与展望。

关键词: 氢能源; 混合动力; 轨道交通; 电力系统; 能量管理

中图分类号: TM911.42; U260.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)06-0001-16

0 引言

随着我国经济的持续增长, 轨道交通在居民出行、商品物流、能源输送等各个方面发挥着日益重要的作用。2025年春运期间, 全国铁路累计发送旅客5.13亿人次, 同比增长6.1%; 国家铁路累计发送货物4.15亿吨, 同比增长5.4%, 客货运量均创历史新高^[1]。在“一带一路”倡议的推动下, 2025年中泰高铁二期、中蒙“甘其毛都—嘎舒苏海图”口岸跨境铁路、中吉乌铁路吉尔吉斯共和国境内段和中越跨境铁路“老街—河内—海防”段等多个海内外项目先后被批准和开工建设, 体现了铁路运输在国际经济贸易中的重要地位^[2]。

铁路运输的快速发展也带来了不容忽视的环境问题。尽管我国铁路电气化率已达到75.2%, 电力机车占

比持续增加, 但是以内燃机车为代表的非依赖牵引供电网取电的机车仍在供电检修、调车作业、极端天气等特殊情况下发挥着不可替代的作用。内燃机车依赖柴油发电机产生动力, 其燃烧过程中排放的CO₂、CO、NO_x、SO_x等温室气体和颗粒污染物对环境造成严重影响。为应对这一挑战, 2024年2月6日, 国家铁路局、国家发展改革委、生态环境部、交通运输部、国铁集团等五部门联合印发了《推动铁路行业低碳发展实施方案》, 提出加快机车更新换代、推动超低和近零排放车辆规模化应用、推进高耗能高排放机车新能源化提升替换等目标^[3], 并且该方案明确到2030年要实现铁路运输综合能耗和二氧化碳排放水平显著下降, 铁路碳排放总量达峰, 并提升电力、新能源等绿色机车的比重。2024年5月29日, 国务院发布了《2024—2025年节能降碳行动方案》, 进一步强调轨道交通领域节能减排的重要性^[4]。因此, 发展清洁能源在铁路运输中的

基金项目: 国家能源投资集团有限责任公司科技支撑项目(GJNY-21-189)

通信作者: 吴命利, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电气化铁路方面的研究; E-mail: mlwu@bjtu.edu.cn

引用格式: 高浩然, 刘秋降, 吴命利, 等. 氢燃料电池混动机车关键技术综述[J]. 机车电传动, 2025(6): 1-16.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.106.

Citation: GAO Haoran, LIU Qiujiang, WU Mingli, et al. Review of key technologies and research trends for hydrogen fuel cell hybrid locomotives[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 1-16.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.106.

应用具有重要的意义。

氢能作为21世纪最具发展潜力的清洁能源,以其绿色环保、制取灵活、易于存储、高能量密度和高能源转化率等优势,有望取代传统化石能源,目前已在全球多个国家和地区的交通领域得到应用。在道路交通方面,我国氢燃料电池公交车保有量已达4 000多台,在郑州、北京、佛山等地实现规模化运营;在航运领域,2021年由中国科学院和大连海事大学研发的中国首艘燃料电池船舶“蠡湖号”成功试航^[5]。然而,在全球范围内,轨道交通领域氢燃料电池的应用仍有巨大的上升空间,包括美国、德国、日本、中国等国家都已试制出氢燃料电池机车(以下简称“氢能机车”)作为调车机车或工程车,但相比庞大的内燃机车基数,占比仍然很小;在客运方面,只有德国、中国等少数国家完成了氢燃料电池载客列车规模化商业运行。

目前,已有学者对氢燃料电池机车相关技术开展研究分析。文献[6]主要对氢燃料电池混动系统功率和能量匹配、储氢技术与环境影响等方面开展研究,但未对顶层能量管理相关技术进行梳理;文献[7]重点对氢燃料电池的集控系统、能量管理、故障诊断、寿命预测等相关技术进行研究分析,但对其提出的挑战和发展趋势还可以进一步完善;文献[8]对新能源混动机车的动力装置分类、主电路结构、综合管理控制、仿真方法进行了综合分析,但在电力系统方面还有进一步丰富的空间;文献[9]对氢燃料机车能量管理策略进行了整理与分析,但对于分层管理和多种管理策略相结合的方法并未涉及;文献[10]汇总了2023年以前国外新能源机车发展成果,但主要针对燃油混动机车,非氢燃料电池机车,而且统计并不全面;文献[11]聚焦氢能有轨电车,对其技术特点、动力性能和发展瓶颈进行了综合分析,但缺少氢燃料电池在其他形式轨道交通上的应用分析;文献[12]重点分析了氢能源在轨道交通行业的应用现状、存在的问题和创新方向,但对技术的综合分析内容较少;文献[13]针对轨道交通领域氢成本和氢能源面临的风险进行了多角度分析,但在安全风险和技术风险层面的分析还有待进一步深入。针对上述问题和不足,本文的研究范围确定为氢燃料电池在轨道交通(含智轨)上的应用,统计分析了氢燃料电池机车的发展现状、关键技术和相关应用成果;在电力系统和能量管理方面,对已有内容进行了扩充,从氢能利用原理、氢储存、安全管理、混合动力配置等角度分析了动力源技术,介绍了集中式与分散式电力拓扑的特点,及其相关变流器在系统的应用,分类分析整理了传统与新型能量管理策略;针对未来面临的挑战,进行了多角度详细分析,给出相应的解决措施和方法,并展望未来的研究和发展方向。

1 研究现状

1.1 文献统计分析

为了解相关领域的研究趋势和研究潜力,对该领域的相关文献进行了检索,并按年份和细分领域进行统计。研究团队通过检索中国知网(CNKI)和Ei Compendex数据库的相关文献,统计国内外氢燃料电池机车的研究情况(截至2025年3月);输入关键词为“(氢燃料电池 OR 混合动力(Hydrogen Fuel Cell OR Hybrid)) AND(机车 OR 有轨电车 OR 轨道交通(Locomotive OR Trams OR Rail Transit))”,根据内容相关性筛选并去除两个数据库重复的文献后,检索文献217篇,其中外文文献111篇,中文文献106篇。研究团队对文献按年份统计结果如图1所示;2000年之前的外文文献在图1中列未列出的有:1974年1篇,1983年1篇,1985年1篇,1992年1篇,1993年1篇,1995年1篇;没有发现2000年前公开发表的中文文献。

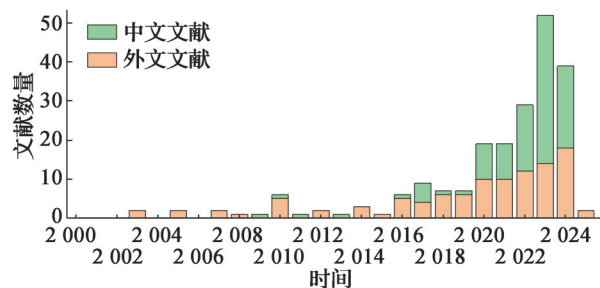


图1 氢燃料机车相关文献年份统计

Fig. 1 Statistics of literature on hydrogen fuel locomotives by year

由图1可知,轨道交通用氢燃料电池的研究最早可追溯到1974年,而在1974—2020年,氢能的基础研究尚不成熟,加之人们对环保的重视程度有限,导致该领域的研究成果较少,处于线性稳步增长阶段。在2020年以后(含2020年),随着政策的支持和氢燃料电池技术的突破,氢能技术在汽车领域的规模化应用为轨道交通提供了创新指引,推动了该领域成果呈指数级增长。2023年是氢燃料电池机车研究的爆发之年,当年论文数量达到峰值。2024年论文数量相比2023年虽有所减少,但仍高于2022年水平,表明该领域研究热度仍维持在较高区间。

研究团队梳理目前氢燃料电池机车在各个具体方向的研究热度,将国内外文献细分为7个研究方向进行统计,结果如图2所示。由图2可知,关于氢燃料电池机车的研究主要集中在电气系统拓扑、能量管理与优化、性能评估、氢系统安全管理、氢能利用、机车部件设计,以及综述文献。其中,关于氢燃料电池机车的能量管理与优化、机车部件设计等方向研究较多,属于目前研究方向的热点,但关于氢燃料电池的安全

电池在动车组、有轨电车等大功率、高时速情景下的使用,但由于技术还处于起步阶段,成果较难落地。近年来,研发人员先从调车机车应用做起,取得了多项成果,积累了大量的工程经验,后续又将研究方向转回动车组、有轨电车等轨道交通形式。

1.2 应用成果统计

国内外许多公司和科研机构对氢燃料电池机车技术进行了探索,目前已取得许多成果。表1对世界各国研发机车在时速、功率、续航、用途4个方面进行了统计和对比。

由表1可知,美国早在2002年就尝试将氢燃料电池应用在轨道车辆上,当时采用的是纯氢燃料电池,没有其他动力电池作为辅助能量源。2009年,美国 Placer Dome Inc. 与 BNSF Railway Company 研制出一款调车机

车,将功率提升至1 MW。早期研发的氢燃料车辆主要用作矿车或调车机车,功率低、速度慢、续航性能差,但其仍具有重要意义,为后续混合动力机车的研发打下了基础。2017年3月,由法国 Alstom 研制的全球首列氢能客运列车 Coradia iLint 在德国完成首次试跑[图4(a)],截至目前,该型列车已应用到法国、沙特阿拉伯等多国。2019年,由英国 Porterbrook 与 University of Birmingham 改造的 HydroFLEX 型机车下线,该机车由氢燃料电池和锂电池系统共同供电。2022年,日本 Hitachi 与 Toyota 研发的 FV-E991 HYBARI 机车下线。2022年8月,世界首条运行氢能列车的铁路在德国北部下萨克森州改造完成,并投入商业运营,该线路使用14组 Coradia iLint 型列车,运行时速约为140 km,列车每天在加氢站进行加注氢气,加氢站拥有64个高压(50 MPa/500 bar)储气罐、6台压缩机和2个燃料泵^[14-15]。该项目

表1 世界各国氢燃料电池机车统计

Table 1 Statistics of hydrogen fuel cell locomotives in various countries

国家	年份	制造公司	车型	速度/ (km·h ⁻¹)	功率/kW	续航	用途
美国	2002	Vehicle Projects Inc., Placer Dome Inc.			17 ¹⁾		矿车
美国	2009	Placer Dome Inc., BNSF Railway Company			1 000 ¹⁾		调车机车
西班牙	2011	FEV		20	120 ¹⁾		有轨电车
南非	2012	Vehicle Projects Inc., Anglo American Platinum Ltd.			50 ²⁾		矿车
德国	2016	Alstom	Coradia iLint	140		800 km	轻轨列车
英国	2019	Porterbrook, University of Birmingham	HydroFLEX	120		800 km	动车组
美国	2019	Stadler Inc.	FLIRT H2	120	750 ¹⁾	500 km	轻轨
波兰	2021	Polskie Koleje Państwowe Spółka Akcyjna	SM42-6Dn		720 ¹⁾	24 h	调车机车
德国	2022	Siemens	Mireo Plus H	160	1 700 ¹⁾	1 000 km	动车组
西班牙	2022	Talgo	TPH2 Vittal One	160		800 km	电力机车
日本	2022	Hitachi, Toyota	FV-E991 HYBARI	100	380 ²⁾	140 km	动车组
埃及	2022	Hyundai		80	190 ²⁾		地铁
法国	2023	Alstom	Coradia Polyvalent (改造)			600 km	动车组
捷克	2026	CZ LOKO	HydrogenShunter 1000		800 ¹⁾		调车机车
中国	2013	西南交通大学	蓝天号	65	240 ¹⁾	24 h (轻载)	调车机车
中国	2015	中车青岛四方机车车辆股份有限公司	佛山有轨电车	70	150 ²⁾	40 km	有轨电车
中国	2017	中车唐山机车车辆有限公司, 西南交通大学	唐胥铁路有轨电车	70	300 ²⁾	40 km	有轨电车
中国	2021	中车大同电力机车有限公司, 西南交通大学	锦白铁路调车	80	700 ¹⁾	24.5 h (单机)	调车机车
中国	2021	中车戚墅堰机车有限公司		100	1 400 ¹⁾	24 h	调车机车
中国	2021	中车南京浦镇车辆有限公司	临港 T2 数字轨道胶轮电车	70	200 ²⁾	100 km	智轨列车
中国	2022	中车唐山机车车辆有限公司		70	240 ²⁾		智轨列车
中国	2022	中国中车, 国家能源集团	氢龙一号	100	2 400 ¹⁾		调车机车
中国	2022	中车长春轨道客车股份有限公司	成都市域列车	160	400 ²⁾	600 km	市域列车
中国	2023	中国中车	宁东号		800	190 h (单机)	调车机车
中国	2023	北京轨道交通技术装备集团有限公司		80	200 ²⁾	100 km	轻轨列车
中国	2024	中车青岛四方机车车辆股份有限公司	CINOVA H2	160		1 200 km	城际动车
中国	2025	中车资阳机车有限公司	CN10A-Q			150 km	调车机车

注:1)一机车最大牵引功率;2)一氢燃料电池最大输出功率。

为全球氢燃料电池机车规模化应用提供了范式, 未来计划通过“电解和再生发电”实现绿氢自给。

中国最早的氢燃料电池机车是2013年由西南交通大学研制的“蓝天号”调车机车[图4(b)], 该车填补了国内氢燃料电池应用于轨道交通的空白^[16]。2015年, 世界首列氢能有轨电车在中国中车下线。2019年, 佛山高明现代有轨电车示范线建成[图4(c)], 其列车成为世界首列正式投入商业运营的氢能源有轨电车。2022

年, 由中国中车和国家能源集团研发的大功率氢能机车“氢龙一号”下线[图4(d)], 该车采用国内目前最大的燃料电池系统。该系统的储氢系统配置了国富氢能高压储氢瓶(28×210 L), 储氢总量达到140 kg, 单组燃料电池系统可达400 kW^[8], 是目前国内储氢量最大的车载氢系统。总体而言, 我国在该领域虽然起步较晚, 但发展迅速, 目前已在速度、功率和续航方面达到了世界先进水平。



(a) Coradia iLint



(b) 蓝天号



(c) 佛山有轨电车



(d) 氢龙一号

图4 中外氢燃料电池机车(部分)

Fig. 4 Domestic and foreign hydrogen fuel cell locomotives (partial)

通过对比, 可以发现氢燃料电池在轨道交通上的应用广泛, 主要集中在矿车、调车机车、有轨电车、城市地铁等低功率、短续航的场景, 机车功率最大为2.4 MW, 续航能力最大为1 200 km。该技术的实现途径主要包括基于原有机车平台改造(多数)和整车正向设计。目前, 多数成果处于样车试验阶段, 只有少部分实现大规模商业化应用。

2 机车动力源相关技术

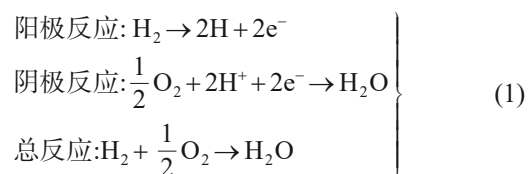
2.1 车载氢能系统

氢气作为氢燃料电池机车的核心动力源, 工厂生产的氢气通过管道或公路运输的方式被输送到铁路沿线的加氢站, 加氢站将氢气注入机车携带的储氢装置, 为氢燃料电池供氢。氢燃料电池机车根据综合调度指令和实际路况信息, 通过多级能量控制器控制氢燃料电池输出功率; 同时, 氢燃料电池和储氢装置中的传感器实时监测气压、温度等参数, 防止氢气泄漏或压

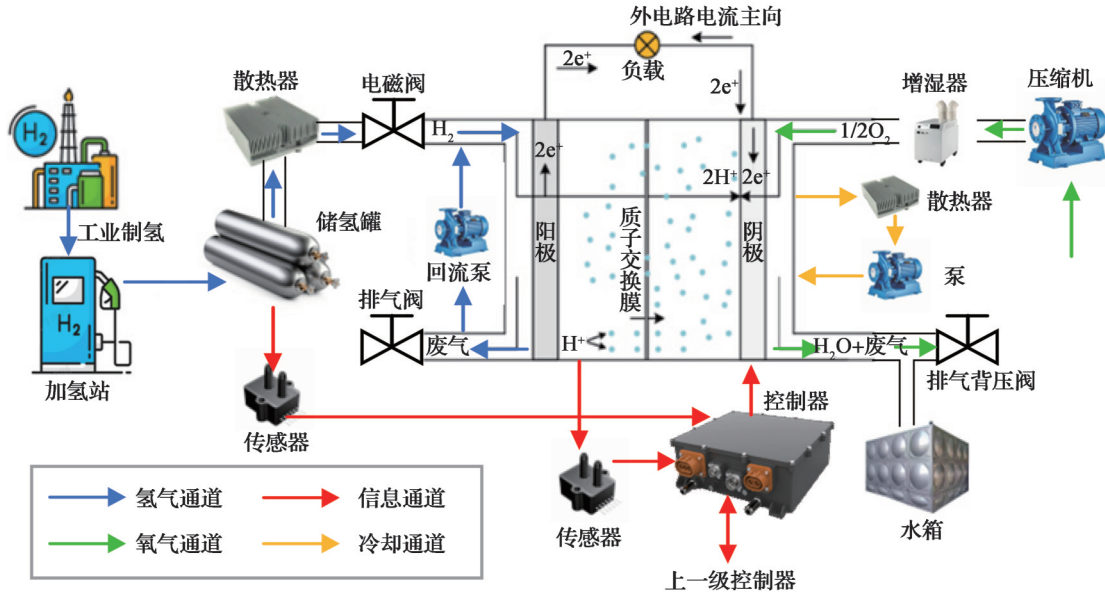
力过大造成的安全隐患。因此, 车载氢能系统主要包含氢燃料电池反应堆、储氢装置和相关辅助部件^[6], 工作示意图如图5所示。

2.1.1 氢燃料电池系统

氢燃料电池目前广泛采用质子交换膜燃料电池(PEMFC)^[17]。氢气通入负极, 在催化剂的作用下分解成氢离子(质子)和电子, 电子通过外部导线流向正极形成电流, 为负载供电, 质子单向通过质子交换膜流入正极。正极中的氧气与电子结合形成氧离子, 与质子结合生成水分子, 并产生热量。热量通过壳体散逸^[18], 其化学反应表达式为:



在建模过程中, 氢燃料电池等效为一种非线性多变量模型^[19], 输出特性极易受外界环境影响, 直接使用无法适应机车稳定供电的需求。因此, 需要在燃料

图5 氢燃料电池系统工作原理图^[8]Fig. 5 Schematic diagram of hydrogen fuel cell system^[8]

电池模组之外设计辅助模组配合才能正常工作。文献[20]针对100 kW氢燃料电池系统设计了配套的氢循环模组、热稳定模组和电气拓扑,并对模组之间的连接结构进行设计,提升了燃料电池系统输出能量的稳定性。多模组的电池系统也带来一些问题,当燃料电池系统模组中某一个环节发生故障,则会导致整机无法运行,而且对故障的排查十分重要且复杂。文献[21]采用故障树分析法对调车机车氢燃料电池系统进行故障分析,发现膜电极、空压机、汽水分离器、氢气循环泵、水泵等为氢燃料电池系统中故障发生率较高的部件,对于这些部件增加检修和维护频次,可减少氢燃料电池系统的故障发生率。

2.1.2 储氢技术

目前,主流的储氢技术主要有高压气态储氢、低温液态储氢和金属氧化物储氢等多种方式^[22-23]。其中,高压气态储氢成本低,结构简单,但储氢密度相对较低^[24];低温液态储氢储氢密度高,但由于需要极低的温度,在车载条件下不适宜运用;金属氧化物储氢安全系数高,但极大地提高了成本,增大车身重量,应用较少。因此,车载储氢一般采用简单高效的高压储氢方式。高压储氢技术采用储氢瓶将氢气压缩,目前常见的压力等级有35 MPa和70 MPa;按照瓶体材质又分为I型(钢或铝合金无纤维缠绕)、II型(钢内胆纤维缠绕)、III型(铝合金内胆纤维缠绕)、IV型(塑料内胆纤维缠绕)。I型瓶、II型瓶因氢脆问题严重和重容比较大,不适合车载使用^[25]。国外目前主要使用的是IV型瓶,国内使用的是35 MPa的III型瓶,而且我国对于IV型储氢瓶的相关标准还有待完善^[26];同时,储氢装置的制造成本仍需降低,据统计,对于35 MPa的氢系统,储能模块成本占比约57%,而70 MPa氢系统

的储能模块成本占比高达80%^[27]。

2.1.3 安全管理

氢气作为一种易燃易爆气体,如泄漏会与周围空气形成 H_2 云团^[28],遇明火或静电会发生剧烈爆炸,造成人员伤亡和财产损失,因此制定燃料电池安全保障措施是必要的^[29]。保证车载氢燃料电池系统的安全主要基于避免泄漏、防止积累、及时检测、快速控制4个方面^[30],具体分析如下:

①关于氢气泄漏预防和预测,需要研究氢气在不同场景下的扩散特性与潜在的后果。文献[31]针对加氢站建立几何模型,研究加氢站发生泄漏时的氢气扩散特性。文献[32]从有害因素、事故概率和事故后果等方面评估氢燃料电池潜在的安全问题,并给出了防控措施。

②关于防止积累,对于停放在室内的氢燃料电池车辆,必须配备氢气检测设备并确保通风良好,以稀释可能发生的泄漏氢气,一旦检测到过量氢气泄漏,应立即停止电堆运行,并进行泄漏检测;同时,在车上也需配备通风装置。文献[33]基于多源供电的车载氢系统设计了一套通风电力系统,保障通风系统平稳运行,防止氢气泄漏后积聚。

③关于快速检测,燃料电池电堆内部的氢气泄漏可通过内置的氢传感器进行监测,并在氢气浓度达到可燃阈值前发出预警。

④关于快速控制,当检测装置检测到异常时,控制器会主动切断排气阀,确保能够迅速切断氢气供应。另外,有关人员需按照标准立刻采取安全应急措施,文献[34]对加氢作业的安全措施和应急处置方案进行了研究,提出了相关作业标准;同时,由于氢气遇到电火花也会引起危险,氢气系统和电气系统之间需做隔离,文献[35]介绍了一种氢电安全联锁的方法,可实现

充电和加氢作业完全隔离。

2.2 辅助电源

作为机车动力的重要组成部分, 氢燃料电池具有清洁环保、能量密度高的特点。然而, 受电化学反应原理限制和低温环境下催化剂活性衰减的影响, 氢燃料电池也存在响应速度慢、冷启动性能差和只能单向输出的问题^[21]。单一氢燃料电池构成的动力系统不能满足机车频繁启停、高寒作业和再生制动的需求; 同时, 当功率需求激增导致氢燃料电池单独供电不能满足牵引功率时, 需要其他电源进行能量补偿。因此, 目前只有极少数机车采用单一氢燃料电池作为动力源, 大部分机车采用“氢燃料电池+钛酸锂电池/磷酸铁锂电池/铅酸动力电池/超级电容”的组合方案, 表2为各种辅助电源性能对比。

表2 辅助电源性能对比

Table 2 Performance comparison of auxiliary power supplies

参数名称	钛酸锂电池	磷酸铁锂电池	铅酸电池	超级电容
能量密度/ (W·h·kg ⁻¹)	60~160	100~200	30~50	5~30
功率密度/ (W·kg ⁻¹)	100~800	1 400~2 400	50~200	5~15
单体电压/V	1.5~2.3	3.0~3.3	1.5~2.4	2.5~3.0
充电速度	较快	较快	慢	快
循环寿命/次	10 000~12 000	3 000~4 000	300~500	≥100 000
成本/ (元·(kW·h) ⁻¹)	1 000~1 500	400~600	500~800	3 000~5 000

由表2可知, 钛酸锂电池具有能量密度高、功率密度高、使用寿命长、动态响应快等优点, 当机车功率发生突变时, 可快速补齐氢燃料电池响应慢所造成的功率缺口, 在氢能混合动力车上应用潜力最大^[36]。铅酸电池能量密度低, 充电时间长, 并且废弃后会对环境造成污染, 所以几乎不用于轨道交通领域。超级电容充放电时间短, 但能量密度低, 成本高昂, 可作为具有频繁启停特点的城轨列车的辅助电源, 吸收高频次的再生制动能量^[37-38]。与氢燃料电池不同, 辅助电源需要同时具备充电和放电能力——充电时, 采用先恒流、后恒压方式; 放电时, 要制定合理的规则, 防止电池深度放电造成安全隐患^[39]。

目前, 对于混动系统的研究重点是动力源的参数匹配。在满足基本功率要求的前提下, 混动系统各部分的功率、容量等参数对机车质量、体积和经济性等指标有直接影响。一般地, 系统参数需要考虑机车体积、质量、最大需求功率、直流母线电压的限制, 以配置成本最低或电池寿命最长为目标建立数学模型。对此, 文献[40-42]基于机车动力性能对燃料电池混合动力系统参数匹配方法进行了研究, 给出确定氢燃料

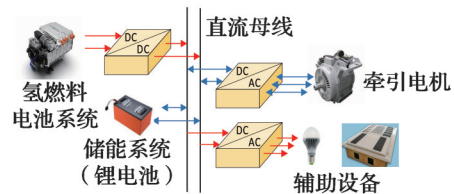
电池和蓄电池的最佳尺寸的方法。

3 车载电力系统和功率变流器

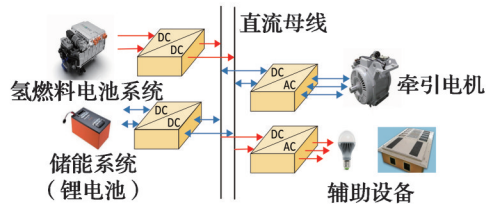
3.1 机车综合电力系统

车载电力系统的主要作用是构建电能传输网络, 实现电池系统与牵引电机、辅助负载之间的双向能量交互, 同时为控制系统和继电保护系统等部件的正常运转提供电能, 该系统主要包含母线和功率转换器件。目前, 车载电力系统有直流和交流两种技术路线。交流电力在传统电网中应用相对成熟, 但机车使用相对较少, 目前交通领域常采用直流电力系统。相比于交流电力系统, 直流电力系统具有功率密度大、效率高等优点, 在电源同步和储能系统集成方面具有很大优势^[43-44], 更能满足机车对功率密度、响应速度和系统可靠性的要求。

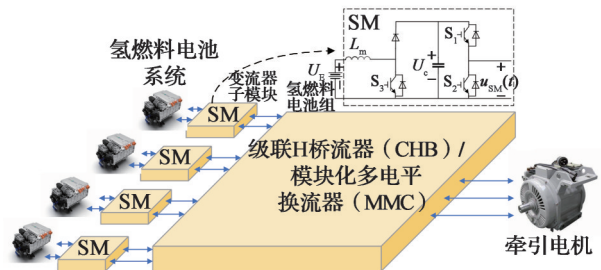
通过对比多篇文献, 目前氢燃料电池和锂电池接入直流电力系统的方式分为集中式和分散式两种, 其拓扑如图6所示, 下面将对其进行详细分析。



(a) 储能系统直接接入直流母线



(b) 储能系统经DC-DC接入直流母线



(c) 电池系统分散式接入直流母线

图6 氢燃料机车电力系统拓扑示意图

Fig. 6 Topology of power system for hydrogen fuel locomotive

1) 集中式

集中式接入可根据储能系统与直流母线之间是否

直接连接分为两种：①拓扑一。由于储能系统直接接入直流母线，母线电压由储能系统电压决定，而燃料电池的输出功率通过单向 DC-DC 控制。该系统省略了储能系统的 DC-DC 换流器，成本低，控制简单，但母线电压会随储能系统的荷电状态 (SOC) 波动，稳定性较低，容易造成部分储能容量的浪费。②拓扑二。直流母线电压由燃料电池系统和储能系统共同决定，因此需要通过下垂控制等较复杂的控制方式实现系统稳定，并且增加了 1 台 DC-DC 换流器，导致整车质量和体积增加，但该拓扑可以充分利用储能系统的容量，提升了系统的安全性和可靠性，在一定程度上降低了系统成本^[45]。

2) 分散式

分散式接入方法主要是利用级联 H 桥 (CHB) 或模块化多电平换流器 (MMC)，将多组氢燃料电池分散地接入换流器的每个子模块，通过载波移相调制输出三相交流电能，直接给牵引负荷供电。该方法提高了系统的稳定性，当某一电池组发生故障时，可通过旁路开关实现故障模块隔离，系统其余部分仍可正常工作；同时，通过子模块级联可以提高直流母线电压等级，增大输出功率，适用于大功率重载机车场景。

如图 6(c) 所示，氢燃料电池通过 DC-DC 与 MMC 子模块电容侧并联形成新的子模块拓扑 (SM)，进而把电池能量传递给牵引负荷。每个子模块包含 3 个开关。其中， S_1 、 S_2 是传统 MMC 子模块中的开关，通过其导通状态可以控制子模块是否投入运行，通过多组子模块的导通或关断在交流侧形成多电平电压波形，同时稳定直流侧电压； S_3 则与上桥臂的二极管构成单向 DC-DC 变流器，提高氢燃料电池系统的输出电压。MMC 变流器的加入使得机车电气系统的控制更加复杂，需要解决子模块电容电压均衡、电池 SOC 均衡和桥臂环流抑制等多个问题^[46-58]，目前该方法还处于试验阶段，暂无实际应用。

3.2 车载变流器

氢燃料混合动力机车的换流器主要包括 3 种：燃料电池换流器、蓄电池换流器和牵引逆变器。

1) 燃料电池换流器

对于燃料电池换流器，由于燃料电池只发出能量而不吸收能量，所以采用单向 DC-DC 换流器调节输出功率。燃料电池输出电压与直流母线电压相差不大，通常为几百伏，因此无须隔离，采用非隔离单向 Boost 变流器即可。

2) 蓄电池换流器

对于蓄电池换流器，由于蓄电池可以存储列车再生制动回馈能量，能量需要双向流动，最常见的 DC-DC 换流器是非隔离双向两电平 Buck-Boost 换流器^[49]。

3) 牵引逆变器

对于牵引逆变器，其作用是将直流母线提供的能量转化为交流电提供给牵引电机。机车通常采用两电平三相逆变器和三电平中点箝位型逆变器 (NPC)。文献[50]设计了一种采用双有源桥 (DAB) 的双向隔离 DC-DC 变流器，软开关范围宽，变换效率高，并具备电气隔离和热冗余功能。文献[51]基于部分功率处理 (partial power processing, PPP) 设计了一款 DC-DC 换流器，降低了功率转换器的传输功率，降低了整车成本、体积和重量。文献[43]提出用高增益、高密度的多谐振换流器替代传统的车用三电平升压换流器，并通过“频率/占空比”的控制方法实现^[48]。文献[52]提出一种由单台 DC-DC 连接单台逆变器驱动电机的拓扑结构，该拓扑结构在实现融合氢燃料电池和储能的同时简化了系统结构和控制方法。文献[53]通过将多个 Boost 电路级联，提高氢燃料电池组输出电压的同时起到变流效果，交流侧可直接驱动牵引电机。文献[54]提出一种用于氢燃料机车的软开关变压器电感升压转换器，以减少开关元件的电流应力和整个系统的电流纹波。

4 能量管理策略

氢燃料混合动力机车通常采用分层控制：底层为部件控制层，对燃料电池堆、储能装置和功率变换单元实时控制，涵盖燃料电池空气流量调节、蓄电池充放电状态监测、变流器脉冲宽度调制等基础功能模块；上层为监督控制层，其核心是能量管理系统 (EMS)。图 7 为能量管理系统在机车控制中的作用示意图^[55]。由图 7 可知，能量管理系统接收来自车辆和调度的信息，通过一定的规则和算法将设定值传输至底层执行器，控制电源出力比例和能量流动方向，同时维持电池荷电状态在规定范围内。当前，国内学者对机车的能量管理策略研究较为广泛，主要分为基于规则、基于优化和新兴能量管理策略 3 类，具体分类结果如图 8 所示。

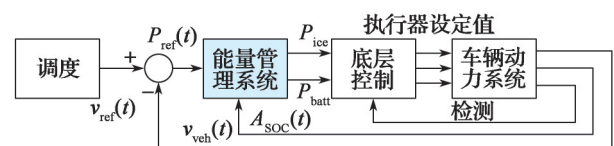


图 7 能量管理系统在机车控制中的作用

Fig. 7 Role of energy management system in locomotive control

4.1 基于规则的能量管理策略

该方法是通过预设逻辑条件和阈值规则实现电动机、燃料电池系统和蓄电池系统间能量分配和流动的方法。其主要包括基于开关策略、基于功率跟随、基

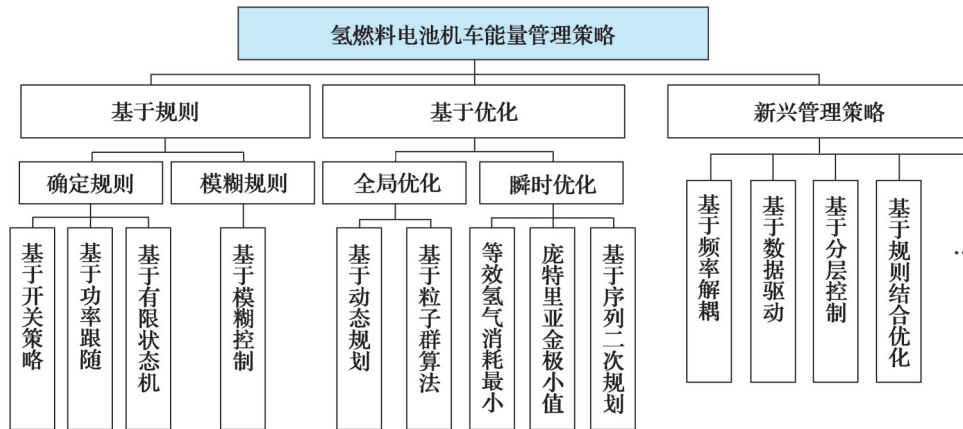


图8 氢燃料电池混合动力机车能量管理策略分类

Fig. 8 Classification of energy management strategies for hydrogen fuel cell hybrid locomotives

于有限状态机、基于模糊控制4类方法^[45]。前3种方法分别是以燃料电池、蓄电池和负载为控制基点进行能量管理,属于基于确定规则的方法。基于开关策略是通过调制开关的通断让燃料电池工作在一个最大功率点或最大效率点,但该方法无法对蓄电池系统的SOC进行控制,容易造成系统失稳。基于功率跟随的方法是通过监测蓄电池的SOC和负载功率的变化情况,调整燃料电池的参考功率,从而使蓄电池的SOC保持在合理区间。基于有限状态机的方法是在功率跟随法的基础上,考虑了实际工况中负载的波动,对燃料电池工作点进行调整。文献[56]将电压补偿环路引入瞬时功率控制,提高列车母线电压稳定性;文献[57-58]采用基于状态机的能量管理方法,其中文献[57]基于8个状态机控制策略确定系统各组件的工作点,并对仿真结果进行了验证,证明了可行性;文献[58]提出了一种基于下垂控制的状态机策略,在稳定运行的前提下提升混动系统的氢气消耗效率和电源效率。文献[59]基于规则的能量管理策略,采用序贯算法进行解耦控制,实现列车能量协同优化。

以上方法是基于确定性的规则,但由于能量管理系统参数众多,彼此存在耦合,对系统的影响是非线性的,很难进行精确控制。有学者利用模糊控制理论对混动系统进行能量管理,制定模糊的规则,采用智能模糊控制器实现控制,具有较强的鲁棒性。文献[60-62]采用模糊控制进行能量管理。基于规则的能量管理策略操作简单,实时性好,但严重依赖工程经验和规则的准确性,一般很少单独使用,通常与基于优化的能量管理策略混合使用,增加控制的准确性^[8]。

4.2 基于优化的能量管理策略

在能量管理的过程中,通常希望系统的某些方面可以做到最优,例如等效氢气消耗量最小、电池使用寿命最长或运行成本最低。基于规则的能量管理策略使能量按照预设规定进行分配,但结果无法做到最优。

因此,基于优化的能量管理策略可以弥补基于规则方法的不足,其又可分为全局优化和瞬时优化。

全局优化考虑整个时间周期的信息,理论上可以得到全局最优解,但往往计算复杂,实时性差,很少直接应用,可为其他方法提供设计思路。文献[63-64]采用基于动态规划的管理策略,目前该策略研究得相对较多;文献[65]在考虑电池功率、SOC多重约束条件下采用粒子群算法和萤火虫算法将电池设计和更换成本降到最低。文献[66]通过采用等效氢耗最小策略和随机动态规划策略进行功率最优分配,发现随机动态规划效果优于等效氢耗最小策略。

瞬时优化仅基于当前时刻的系统状态,快速决策当前最优的能量分配策略,不预测未来的信息。该方法计算简单,响应快,对复杂环境(如频繁启停、上下坡、天气骤变等)适应性强,但有时会陷入局部最优,长期来看不如全局优化效果好。文献[40, 67]采用等效氢耗最小的方法;文献[68-70]采用基于庞特里亚金极小值的能量管理方法;文献[69]在缩比硬件系统进行测试,测试结果优于等效最小氢耗策略;文献[71]考虑吸收更多的再生制动能量兼维持SOC,提出一种基于动态因子策略的能量管理方法,比等效氢耗最小策略效率提高2%。文献[40]提出一种等效氢耗策略的实时优化方案,可以在保证机车安全运行的前提下使等效氢耗降低8.44%。文献[72]提出基于序列二次规划的算法,在降低氢耗的同时保证电池SOC处于最佳效率区域。文献[73]提出一种等效能量因子自适应调整瞬时优化方法,降低了计算量,简化了控制结构,利用瞬时优化的方法实现功率分配和能耗全局最优。

4.3 新兴能量管理策略

除了传统的基于规则和基于优化的能量管理策略之外,还有很多新兴能量管理策略应用在新能源汽车和轨道交通^[74]。随着人工智能技术的发展,一些学者采用了基于数据驱动的能量管理方法,通过对原有经

验和运行参数的学习和挖掘,预测能量变化情况并实时调整规则。还有学者基于频率解耦的能量管理策略^[75],采用小波变换将功率需求分为高频、中频和低频3个分量,分别由氢燃料电池、蓄电池和超级电容分担,这样可以更好地响应机车功率波动,同时延长动力系统的寿命。许多研究采用分层控制^[58, 67, 76-78],分层控制一般在顶层采用基于优化的策略协调多个电池堆之间的功率分配,在底层先对某一电池堆多个电池的状态进行评估,再采用虚拟下垂控制对多个电池输出功率的设定值进行二次分配,这样可以在保持各个电池性能趋于一致的前提下,使系统的某项参数达到最优。

还有许多研究采用混合能量管理策略。混合能量管理策略主要包含“基于规则结合优化”和“基于优化结合机器学习”两种形式,目前常见的是基于规则结合优化的方法。文献[77]提出的控制策略集成了模糊逻辑策略、模型预测控制和基于规则的策略,针对混动系统不同的能量源采取不同的管理策略。文献[79-82]将基于规则和基于优化的方法结合;文献[79]采用有限状态机的方法,同时利用动态规划对方程参数进行优化;文献[80-81]采用模糊控制,分别利用遗传算法和等效氢耗最小进行寻优;文献[82]利用模糊规则结合神经网络对多变量函数进行寻优。

5 面临挑战与研究趋势

随着全球变暖等环境问题日益突出,一些国家正加紧氢燃料电池在轨道交通的应用研发。虽然目前已在一些国家有了较为成熟的应用,但与传统电力机车相比,氢燃料混合动力机车在牵引性能、经济性和安全性等诸多方面仍面临许多挑战,未来的技术研究趋势也将基于这些挑战展开。

5.1 重载化与高速化

随着我国对矿产资源运输的需求增大,以及旅客对出行效率的期待提高,轨道车辆的研发趋向于重载化和高速化。但是,通过表1可知,目前氢能机车牵引功率最大为2.4 MW,与重载机车和高铁列车的大功率要求仍存在差距。

在保证机车体积不变的前提下提高输出功率,就必须提高电池系统功率密度和储能系统的能量密度。目前,体积功率比最高的氢燃料电池可达到5.4 kW/L,研究人员正聚焦于更高效的催化剂、氢燃料电池系统集成等方面的研究;同时,许多学者正对储氢领域相关技术进行研究,包括高压储氢罐体材料研发、车载储氢瓶安装位置和形状尺寸优化设计等方面,旨在提升单位体积储能系统的储氢量。通过前文的分析,未来的研究方向可聚焦于电力系统拓扑结构的优化,尽

量减少母线和开关元器件的使用以提高机车功率密度。

5.2 复杂工况适应能力

我国山地众多,地形复杂,铁路线路存在许多长大坡道,机车在上下坡时功率波动大且波动频繁。相比于采用接触网供电模式的机车牵引特性曲线,采用动力电池供电模式的机车牵引特性曲线更陡,上坡和加速时随着牵引力的增加,氢能机车运行速度急剧降低。在相同的行驶速度下,氢能机车的制动力明显小于传统机车,制动距离更长,而当该技术用于频繁启停的地铁或轻轨列车时,车辆运行效率大幅降低;同时,温度和海拔的剧烈变化也会影响储氢罐的储氢能力和电池效率^[82],大幅度降低机车的续航能力和氢燃料电池生命周期。

复杂的工况对混合储能系统能量管理策略的灵活性提出了更高要求。随着各种新兴算法和人工智能的发展,能量管理策略的制定方法由依靠经验逐渐转向依靠大数据,基于数据驱动的能量管理方法将成为热门的研究方向。通过机器学习,模型训练优化相关参数,在保证电池组工作状态良好的前提下更加快速、实时地做出调整,降低能耗并延长电池生命周期;同时,未来也需对机车传动系统参数匹配进行深入研究,考虑成本优化,并保证蓄电池或超级电容能快速且有足够裕度地响应机车功率需求变化。

5.3 运营成本

机车的运营成本主要包括氢气的使用成本、储存成本、运输成本,以及其他配套设施成本,目前相对较高。在使用成本上,氢动力系统耗氢成本是柴油发动机耗能成本的5.9倍^[83]。在储氢方面,若想增加机车能量密度需要采用高压储氢罐。然而,相比于35 MPa的储氢装置,70 MPa的储氢装置成本由6 200元/kg提升至22 400元/kg^[35],成本高昂。在运输方面,随着氢能供需规模的持续扩大,制氢厂和加氢站的数量增多,管道运输的经济性在某些情况下优于公路运输,未来将形成“大规模,多点位,多途径”的氢气运输格局,单位气体运输成本可能会有所下降。在配套设施方面,要实现氢能机车大规模应用还需对既有线路进行改造,沿线建设配套加氢站,目前加氢站的建设维护成本较高,增加的成本约为14.17元/kg^[84]。要想实现机车的规模化商业运行,必须从各方面降本增效。

在后续的研究中,针对使用成本,可继续通过优化机车能量系统参数匹配和采用能量管理算法降低总能耗或延长电池使用寿命。针对储氢成本,需要进一步提高罐体耐压能力,优化生产工艺,尽早实现高压储氢罐国产化;也可以进一步研究低温液态储氢、有机液态储氢和固体储氢等新型储氢方式在机车上应用的可行性。针对复杂的运输需求,需要根据线路合理

规划制氢厂与加氢站的位置, 建立氢能智能调度管理体系, 将总运输成本优化到最低。针对线路改造和加氢站建设等其他成本, 也要在建设前进行规划, 尽可能将成本降低, 同时提高加氢设备的利用率。

5.4 绿氢技术推广

氢气的制取方式主要有煤制氢、天然气制氢和电解水制氢, 其中通过可再生能源电解水制氢是目前最环保的制氢方法(也称绿氢)。然而, 我国目前以化石能源制氢为主, 其占制氢总量的62%^[85], 因此依然存在碳排放和环境污染问题。绿氢占比较少的原因是其成本(20~38元/kg)显著高于化石能源制氢成本(10~15元/kg)^[86], 只有当机车用的氢燃料成本降低到15元/kg以下才有可能实现盈利^[76], 其本质是经济性问题。若要想扩大绿氢占比, 真正体现氢燃料机车的环保优势, 则需要进一步提高绿氢产业的设备利用率^[87]、降低催化剂成本和可再生能源(风电、光伏)发电成本。

5.5 安全性

安全性是机车成熟运用的前提, 目前虽然没有数据表明氢能机车的事故率高于普通机车, 但其作为近年来刚起步发展的新兴技术, 许多轨道交通运营公司对其大规模应用还持保留态度。因此, 对于安全保障措施提升的方法可以围绕“源头把控”“精准监测”“故障应急”方面展开。在源头上, 严把加氢、储氢和用氢环节的安全隐患: 结合氢气扩散特性和机车特殊空间结构, 对燃料电池、储氢罐等部件设计合理的安装位置, 并进行高温、低压、穿刺等安全性试验, 验证机车在遇到极端天气和碰撞事故情景下的安全性; 对于燃料电池和蓄电池, 要防范混动架构电池热失控带来的风险, 可对其热管理系统控制方法进行优化, 保证电堆低温运行和电池组均温控制。在检测方面, 可开发机车氢气泄漏动态监测和智能防控系统, 结合AI采用“感知-预测-决策”的手段提升传感器响应的快速性和灵敏性, 还可以研究信号系统与电气系统之间的电磁干扰问题, 保证通信的实时可靠。当机车遇到严重的安全问题时, 需要模拟氢气泄漏、电池失火等事故造成的后果, 并针对各种风险制定应急预案, 保证人身和财产安全。

6 结束语

本文对氢能机车的文献和成果进行统计分析, 从机车动力源、电力系统和能量管理3方面介绍了当前的研究现状, 并从多个角度提出面临的难题和需要进一步研究的重点方向; 针对面临的挑战, 进行了多角度详细分析, 给出了相应的解决措施和方法。

我国作为世界铁路强国, 在该领域的研究具有起步晚、发展快、应用广的特点。总体而言, 氢能机车的产业化还面临3类矛盾: 技术性能与经济性的矛盾, 系统复杂性与安全可靠性的矛盾, 创新需求与技术瓶颈的矛盾。未来突破路径应着眼于3个维度: 在技术层面, 需构建“材料-部件-系统”的全链条创新体系, 重点突破IV型储氢瓶国产化、绿氢生产、智能故障诊断等“卡脖子”技术; 在产业层面, 需要建立成功的示范工程, 进而扩大应用规模, 通过规模化应用摊薄基础设施成本; 在政策层面, 亟须完善氢能机车技术标准体系和安全认证规范。未来, 氢能机车的价值不仅在于节能减排, 更将重塑轨道交通能源结构, 推动“接触网供电+分布式供电”新型牵引供电系统的构建。我国作为全球轨道交通装备制造强国, 若能把握氢能发展机遇, 必将在绿色交通领域实现从技术跟随到标准引领的历史性跨越。

参考文献:

- [1] 齐慧. 铁路春运升级彰显澎湃活力[N]. 经济日报. 2025-02-26(06).
QI Hui. Upgrading of railway transportation during spring festival travel rush demonstrates surging vitality[N]. Economic daily. 2025-02-26(06).
- [2] 李秀中. 中国四条跨境铁路终落地 陆权大通道将崛起[EB/OL]. (2025-02-25) [2025-05-17]. <https://www.yicai.com/news/102487015.html>.
LI Xiuzhong. China's four cross-border railways finally settle in, and a major land-based corridor will rise[EB/OL]. (2025-02-25) [2025-05-17]. <https://www.yicai.com/news/102487015.html>.
- [3] 佚名. 推动铁路行业低碳发展实施方案[J]. 铁道技术监督, 2024, 52(3): 4-7.
Anon. Implementation plan for promoting low carbon development in railway industry[J]. Railway quality control, 2024, 52(3): 4-7.
- [4] 佚名. 2024—2025年节能降碳行动方案[J]. 安装, 2024(7): 1-4.
Anon. 2024—2025 energy conservation and carbon emission reduction action plan[J]. Installation, 2024(7): 1-4.
- [5] 刘彦呈, 曾宇基, 尤石, 等. 氢燃料电池船舶直流综合电力系统研究及应用[J]. 供用电, 2022, 39(1): 8-16.
LIU Yancheng, ZENG Yuji, YOU Shi, et al. Research and application of hydrogen fuel cell ship DC integrated power system[J]. Distribution & utilization, 2022, 39(1): 8-16.
- [6] 樊运新, 江大发, 康明明, 等. 氢能源混合动力机车关键技术与应用[J]. 机车电传动, 2023(3): 12-23.
FAN Yunxin, JIANG Dafa, KANG Mingming, et al. Key technologies and applications of hydrogen hybrid power locomotives[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 12-23.

- [7] 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.
- [8] 樊运新, 龙源, 江大发, 等. 新能源混合动力机车发展现状及关键技术综述[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(1): 1-11.
FAN Yunxin, LONG Yuan, JIANG Dafa, et al. Overview of development status and key technologies of new energy hybrid electric locomotive[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2023, 46(1): 1-11.
- [9] 康劲松, 李鸿哲, 马源, 等. 氢燃料电池列车能量管理策略研究综述[J]. 铁道车辆, 2023, 61(2): 1-9.
KANG Jinsong, LI Hongzhe, MA Yuan, et al. Review on energy management strategy of hydrogen fuel cell trains[J]. Rolling stock, 2023, 61(2): 1-9.
- [10] 李廉枫, 朱兵, 任聪. 国内外混合动力机车的开发与应用[J]. 机车电传动, 2020(5): 73-76.
LI Lianfeng, ZHU Bing, REN Cong. Development and application practice of hybrid locomotive at home and abroad[J]. Electric drive for locomotives, 2020(5): 73-76.
- [11] 汪培楨, 杨升. 氢能有轨电车应用综述[J]. 装备制造技术, 2020(2): 196-199.
WANG Peizhen, YANG Sheng. Overview of hydrogen power tram applications[J]. Equipment manufacturing technology, 2020(2): 196-199.
- [12] 李明, 高利华, 李泽宇. 氢能轨道车辆及动力系统发展与创新[J]. 机车电传动, 2023(3): 32-39.
LI Ming, GAO Lihua, LI Zeyu. Review on development and innovation of hydrogen-powered rail vehicles and power systems[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 32-39.
- [13] 唐易安. 氢能在轨道交通领域的应用与发展研究[J]. 中国机械, 2024(21): 56-59.
TANG Yi'an. Research on the application and development of hydrogen energy in the rail transit field[J]. Machiner China, 2024(21): 56-59.
- [14] ECHIM S, BUDEA S. Applications of hydrogen energy in the field of transport[C]//Proceedings of 24th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2024. Sofia : SGEM, 2024.
- [15] 苏靖棋. 使用氢燃料电池的动车组 Coradia iLint[J]. 现代城市轨道交通, 2019(4): 84-86.
SU Jingqi. Coradia iLint hydrogen fuel cell train[J]. Modern urban transit, 2019(4): 84-86.
- [16] 董侃, 刘伟志, 刘冰, 等. 氢能源在轨道交通领域的应用现状分析及展望[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 6-12.
DONG Kan, LIU Weizhi, LIU Bing, et al. Analysis and prospect of hydrogen energy application in the field of rail transit[J]. Urban mass transit, 2024, 27(9): 6-12.
- [17] 王洪建, 王冬冬, 曹权, 等. 燃料电池分布式供能技术发展现状及分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8113-8125.
WANG Hongjian, WANG Dongdong, CAO Quan, et al. Development status and analysis of fuel cell based distributed energy supply technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8113-8125.
- [18] 刘建国, 李佳. 质子交换膜燃料电池关键材料与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
LIU Jianguo, LI Jia. Key materials and technology of proton exchange membrane fuel cells[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021.
- [19] LI Q, CHEN W R, LIU Z X, et al. Nonlinear multivariable modeling of locomotive proton exchange membrane fuel cell system[J]. International journal of hydrogen energy, 2014, 39(25): 13777-13786.
- [20] 张志文, 黄永聪, 谢庄佑, 等. 轨道交通用氢燃料电池系统架构设计与测试验证[J]. 电力机车与城轨车辆, 2025, 48(2): 13-18.
ZHANG Zhiwen, HUANG Yongcong, XIE Zhuangyou, et al. Architecture design and test verification of hydrogen fuel cell system for rail transit[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2025, 48(2): 13-18.
- [21] 付建军, 张东涛, 谢庄佑, 等. 轨道交通车辆氢燃料电池系统故障分析与维保研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2025, 48(2): 133-137.
FU Jianjun, ZHANG Dongtao, XIE Zhuangyou, et al. Fault analysis and maintenance research on hydrogen fuel cell systems for rail transit vehicles[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2025, 48(2): 133-137.
- [22] 童亮, 余豪华, 毛佰一, 等. 金属氢化物储氢研究新进展[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2025, 59(1): 33-45.
TONG Liang, YU Haohua, MAO Baiyi, et al. An overview on metal hydride hydrogen storage technology[J]. Journal of huazhong normal university(natural sciences), 2025, 59(1): 33-45.
- [23] 杨静丽, 蒋琳琳, 牛成成, 等. 高效经济储氢的最优选择[N]. 中国石化报. 2025-01-20(08).
YANG Jingli, JIANG Linlin, NIU Chengcheng. The optimal choice for efficient and economical hydrogen storage[N]. China petrochemical news, 2025-01-20(08).
- [24] 程站立, 陈维荣, 刘小强, 等. 燃料电池混合动力机车供氢系统安全管理研究[J]. 内燃机车, 2010(1): 5-7.
CHENG Zhanli, CHEN Weirong, LIU Xiaoqiang, et al. Re-hash of hydrogen supply system's safety management for fuel cell hybrid locomotive[J]. Diesel locomotives, 2010(1): 5-7.
- [25] 杨文刚, 李文斌, 林松, 等. 碳纤维缠绕复合材料储氢气瓶的研制与应用进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(12): 99-104.
YANG Wengang, LI Wenbin, LIN Song, et al. Research and application progress of carbon fiber composite hydrogen

- storage cylinder[J]. *Fiber reinforced plastics/composites*, 2015(12): 99-104.
- [26] 俞逸希, 王洁璐, 袁奕雯, 等. 车载高压储氢气瓶国内外标准对比分析[J]. *石油化工设备*, 2022, 51(6): 57-62.
YU Yixi, WANG Jielu, YUAN Yiwen, et al. Comparative analysis of domestic and foreign standards for vehicle-mounted high-pressure hydrogen storage containers[J]. *Petro-chemical equipment*, 2022, 51(6): 57-62.
- [27] 王昕雨, 郝佳, 傅林, 等. 车载氢系统成本分析概述[J]. *时代汽车*, 2024(19): 25-27.
WANG Xinyu, HAO Jia, FU Lin, et al. Overview of on-board hydrogen system cost analysis[J]. *Auto time*, 2024 (19): 25-27.
- [28] 默帆. 燃料电池机车液氢储存系统泄漏危害研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
MO Fan. Study on leakage hazard of fuel cell locomotive liquid hydrogen storage system[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [29] 曹楠. 车载燃料电池混合动力系统设计与管理[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
CAO Nan. Design and energy management of fuel cell hybrid power system for tram[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [30] YAO Z H, QI W, WANG J, et al. Safety risk and strategy analysis of on-board hydrogen system of hydrogen fuel cell vehicles in China[J]. *Energies*, 2023, 16(23): 7717.
- [31] 郭紫焯. 储氢技术对机车加氢站安全性与经济性影响研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
GUO Ziyue. Study on influence of hydrogen storage technology on safety and economy of locomotive hydrogenation station[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2024.
- [32] 李戈良. 车用氢燃料电池安全评价方法及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
LI Geliang. Research on safety evaluation method and application of vehicle hydrogen fuel cell[D]. Guangzhou: South China university of technology, 2023.
- [33] 韩冰, 李靖, 白晶, 等. 基于多源供电的车载氢系统通风电路设计[J]. *铁道机车与动车*, 2024(10): 28-30.
HAN Bing, LI Jing, BAI Jing, et al. Design of ventilation circuit for on-board hydrogen system based on multi-source power supply[J]. *Railway locomotive and motor car*, 2024 (10): 28-30.
- [34] 孙尚林, 李小满, 唐成明, 等. 氢能源机车的加氢工艺及安全管理[J]. *内燃机与配件*, 2022(6): 29-31.
SUN Shanglin, LI Xiaoman, TANG Chengming, et al. Hydrogenation process and safety management of hydrogen energy locomotive[J]. *Internal combustion engine & parts*, 2022(6): 29-31.
- [35] 韩冰, 李靖. 氢燃料电池混合动力机车氢电安全联锁设计[J]. *铁道机车与动车*, 2024(8): 31-33.
HAN Bing, LI Jing. Design of hydrogen-electric safety interlock for hydrogen fuel cell hybrid locomotives[J]. *Railway locomotive and motor car*, 2024(8): 31-33.
- [36] 吴健, 王占国, 张言茹. 锂离子电池在轨道交通装备上的适应性研究[J]. *铁道机车车辆*, 2022, 42(2): 43-49.
WU Jian, WANG Zhanguo, ZHANG Yanru. Research on adaptability of lithium ion battery in rail transit equipment[J]. *Railway locomotive & car*, 2022, 42(2): 43-49.
- [37] DIXON J W, ORTUZAR M E. Ultracapacitors + DC-DC converters in regenerative braking system[J]. *IEEE aerospace and electronic systems magazine*, 2002, 17(8): 16-21.
- [38] DESTRAZ B, BARRADE P, RUFER A, et al. Study and simulation of the energy balance of an urban transportation network[C]//IEEE. 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. Aalborg: IEEE, 2007: 1-10.
- [39] 龙源. 轨道交通辅助电池系统综述[J]. *电池工业*, 2021, 25(4): 221-226.
LONG Yuan. Review of auxiliary power supply batteries systems for railway applications[J]. *Chinese battery industry*, 2021, 25(4): 221-226.
- [40] 江大发, 黄海, 李旺, 等. 燃料电池混合动力机车参数匹配与等效氢耗优化能量管理方法[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(8): 68-76.
JIANG Dafa, HUANG Hai, LI Wang, et al. Parameter matching and equivalent hydrogen consumption for optimization energy management of fuel cell hybrid locomotive[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(8): 68-76.
- [41] 王旭海, 齐红瑞, 孙凤霞, 等. 氢燃料电池增程式混合动力机车动力系统设计[J]. *机车电传动*, 2022(3): 110-115.
WANG Xuhai, QI Hongrui, SUN Fengxia, et al. Powertrain system design of hydrogen fuel cell range-extended hybrid electric locomotive[J]. *Electric drive for locomotives*, 2022 (3): 110-115.
- [42] PENG Y, LU S F, HUANG Y M, et al. Optimal sizing of energy storage system for hydrogen-electric intercity trains based on life cycle cost analysis[J]. *Journal of energy storage*, 2025, 107: 114722.
- [43] QAZI S, VENUGOPAL P, RIETVELD G, et al. Powering maritime: challenges and prospects in ship electrification[J]. *IEEE electrification magazine*, 2023, 11(2): 74-87.
- [44] AYERS W N. DC grids for ship propulsion: benefits and challenges[C]//SNAME Maritime Convention. Houston, Texas: SPE, 2022.
- [45] 孟翔. 市域列车用燃料电池混合动力系统能量管理与优化运行[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
MENG Xiang. Energy management and optimal operation of the fuel cell hybrid power system for the hydrogen intercity train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [46] FERNANDEZ L M, GARCIA P, GARCIA C A, et al. Hybrid electric system based on fuel cell and battery and inte-

- grating a single DC/DC converter for a tramway[J]. Energy conversion and management, 2011, 52(5): 2183-2192.
- [47] KRASTEVIĆ I, TRICOLI P. Boost multilevel cascade inverter for hydrogen fuel cell light railway vehicles[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69(8): 7837-7847.
- [48] LUO H, XU C, DAI K, et al. Balance control of SOC for MMC-bess with power fluctuation suppression, PCC voltage regulation, and harmonic mitigation in grid-connected wind farm[J]. IEEE access, 2022, 10: 117732-117744.
- [49] 汪晋安, 许建中. 分布式储能型MMC电池荷电状态均衡优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 44-50.
WANG Jinan, XU Jianzhong. SOC balancing optimal control strategy amongst batteries in MMC-DES[J]. Electric power automation equipment, 2023, 43(7): 44-50.
- [50] 孙浩, 徐友, 赵涛, 等. 一种低频储能型MMC子模块电容电压均衡控制策略[J]. 机械与电子, 2024, 42(1): 26-30.
SUN Hao, XU You, ZHAO Tao, et al. A capacitor voltage equalization control strategy for low-frequency energy storage MMC submodule[J]. Machinery & electronics, 2024, 42(1): 26-30.
- [51] YIN S B, DIAO L J, LI W J, et al. On board energy storage and control for inter-city hybrid EMU[C]//IEEE. IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing: IEEE, 2017: 3889-3894.
- [52] 罗盼, 饶沛南, 周峰武, 等. 基于双有源桥电路的氢能双源机车双向变流器设计与应用[J]. 控制与信息技术, 2022(6): 8-14.
LUO Pan, RAO Peinan, ZHOU Fengwu, et al. Design and application of bidirectional converter based on DAB for hydrogen energy dual-source locomotive[J]. Control and information technology, 2022(6): 8-14.
- [53] BANG J Y, CHOI D, PARK J H, et al. Design and verification of partial power DC-DC converter for hydrogen fuel cell locomotive[J]. Transactions of the Korean institute of electrical engineers, 2023, 72(9): 1057-1065.
- [54] JUNG N G, KIM J M. Study on soft-switching transformers inductor boost converter for fuel cell powered railway vehicle[J]. Journal of electrical engineering and technology, 2018, 13(6): 2553-2560.
- [55] 西蒙娜·奥诺里, 洛伦佐·塞拉奥, 乔治·里佐尼. 混合动力汽车能量管理策略[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
SIMONA Onori, LORENZO Serrao, GIORGIO Rizzoni. Hybrid electric vehicles energy management strategies[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [56] 李文荣, 段慧达, 孙士杰, 等. 氢能源混合动力列车能量管理控制策略优化[J]. 电工技术, 2024(22): 91-95.
LI Wenrong, DUAN Huida, SUN Shijie, et al. Optimization of energy management control strategy for hydrogen-electric hybrid train[J]. Electric engineering, 2024(22): 91-95.
- [57] LI Q, YANG H Q, HAN Y, et al. A state machine strategy based on droop control for an energy management system of PEMFC-battery-supercapacitor hybrid tramway[J]. International journal of hydrogen energy, 2016, 41(36): 16148-16159.
- [58] FERNANDEZ L M, GARCIA P, GARCIA C A, et al. Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single DC/DC converter for a tramway[J]. Energy conversion and management, 2011, 52(5): 2183-2192.
- [59] PENG H J, CHEN Y J, CHEN Z, et al. Co-optimization of total running time, timetables, driving strategies and energy management strategies for fuel cell hybrid trains[J]. eTransportation, 2021, 9: 100130.
- [60] 何榕佳. 混合动力动车组能量管理控制优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
HE Rongjia. Research on optimization of energy management control for DEMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [61] 庄金虎. 基于多变量模糊控制的混合动力机车能量管理策略研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2022.
ZHUANG Jinhu. Research on energy management strategy of hybrid electric locomotive based on multi-variable fuzzy control[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2022.
- [62] 李宏伟, 陈丽美, 高阳, 等. 基于模糊控制的氢电混合动力城市轨道交通车辆能量管理控制策略研究[J]. 机车电传动, 2024(6): 1-8.
LI Hongwei, CHEN Limei, GAO Yang, et al. Research on control strategy for energy management of hydrogen-electric hybrid vehicles in urban rail transit applications based on fuzzy control[J]. Electric drive for locomotives, 2024(6): 1-8.
- [63] 汪琪, 黄小华. 基于动态规划的轨道交通协同供能系统能量管理策略[J]. 电气化铁道, 2025, 36(2): 20-25.
WANG Qi, HUANG Xiaohua. Management strategy for collaborative energy supply system for rail transit based on dynamic planning[J]. Electric railway, 2025, 36(2): 20-25.
- [64] 毛业军, 文午. 基于改进动态规划算法的混合动力有轨电车能量管理策略[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(5): 1-5.
MAO Yejun, WEN Wu. Energy management strategy of hybrid tram based on improved dynamic programming algorithm[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2022, 45(5): 1-5.
- [65] SUDEVAN A, SELVAKUMAR A I. Implementation of firefly algorithm in optimal sizing of proton exchange membrane fuel cell-battery hybrid locomotive[J]. International journal of renewable energy research, 2020, 10(2): 614-624.
- [66] ZHAO Q S, FENG T H, CHEN D M, et al. Power management for a fuel cell/battery/supercapacitor hybrid locomotive [C]//ASME 2020 Dynamic Systems and Control Conference. ASME, 2020.
- [67] 刘梦. 多堆燃料电池一致性与混合动力系统分层能量管理方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.

- LIU Meng. Research on multi-stack fuel cell consistency and hybrid power system hierarchical energy management method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [68] 朱雄文. 油电混合动力调车机车能量管理策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- ZHU Xiongwen. Research on energy management strategy of oil-electric hybrid shunting locomotive[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [69] 洪志湖, 李奇, 陈维荣. 基于PMP的机车用燃料电池混合动力系统能量管理策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3867-3878.
- HONG Zhihu, LI Qi, CHEN Weirong. An energy management strategy based on PMP for the fuel cell hybrid system of locomotive[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3867-3878.
- [70] 臧治. 氢能城际动车组混合动力系统配置优化与分层能量管理[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- ZANG Zhi. Configuration optimization and layered energy management of hybrid power system for hydrogen powered EMU[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [71] HONG Z H, LI Q, HAN Y, et al. An energy management strategy based on dynamic power factor for fuel cell/battery hybrid locomotive[J]. International journal of hydrogen energy, 2018, 43(6): 3261-3272.
- [72] WANG X T, LI Q, WANG T H, et al. Optimized energy management strategy based on SQP algorithm for PEMFC hybrid locomotive[C]//IEEE. 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific. Seogwipo: IEEE, 2019: 1-5.
- [73] 高锋阳, 张浩然. 氢燃料电池混合动力有轨电车的自适应瞬时等效能耗优化[J]. 机械工程学报, 2023, 59(6): 226-238.
- GAO Fengyang, ZHANG Haoran. Adaptive instantaneous equivalent energy consumption optimization of hydrogen fuel cell hybrid electric tram[J]. Journal of mechanical engineering, 2023, 59(6): 226-238.
- [74] 陈薇玉, 姜莉. 氢燃料电池混合动力汽车能量管理策略研究综述[J]. 黑龙江工程学院学报, 2024, 38(4): 1-8.
- CHEN Weiyu, JIANG Li. A review of energy management strategies for hydrogen fuel cell hybrid electric vehicles[J]. Journal of Heilongjiang institute of technology, 2024, 38(4): 1-8.
- [75] LI H Z, KANG J S, LI C. Energy management strategy based on reinforcement learning and frequency decoupling for fuel cell hybrid powertrain[J]. Energies, 2024, 17(8): 1929.
- [76] AL-HAMED K H M, DINCER I. Comparative evaluation of fuel cell based powering systems for cleaner locomotives [J]. Thermal science and engineering progress, 2021, 23: 100912.
- [77] RODRIGUEZ R, F. TROVÃO J P, SOLANO J. Fuzzy logic-model predictive control energy management strategy for a dual-mode locomotive[J]. Energy conversion and management, 2022, 253: 115111.
- [78] 王天宏. 轨道交通用燃料电池混合动力系统能量管理与协调控制方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- WANG Tianhong. Energy management and coordinated control method of fuel cell hybrid power system for rail transit [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [79] 高岩. 燃料电池混合动力系统能量管理控制器设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- GAO Yan. Design of energy management controller for hybrid fuel cell power systems[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [80] 莫浩楠. 储能式有轨电车容量配置协同优化及智能化能量管理策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- MO Haonan. Collaborative optimization of capacity configuration and intelligent energy management strategy for energy storage tram[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [81] 王旭峰. 燃料电池混合动力机车建模及能量管理策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- WANG Xufeng. Research on fuel cell hybrid locomotive modeling and energy management strategy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [82] 林庚毅. 混合动力机车牵引系统建模与能量管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LIN Gengyi. Modeling and energy management of traction system for hybrid locomotive[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [83] 姚美娇, 杨梓. 多方联动破解氢燃料电池汽车商业化难题 [N]. 中国能源报. 2025-02-10(11).
- YAO Meijiao, YANG Zi. Multi-party collaboration to solve the commercialization challenges of hydrogen fuel cell vehicles[N]. China energy news, 2025-02-10(11).
- [84] 殷伊琳. 我国加氢站发展现状及未来展望[J]. 天津化工, 2021, 35(2): 3-5.
- YIN Yilin. Current development status and future prospects of hydrogen refueling stations in China[J]. Tianjin chemical industry, 2021, 35(2): 3-5.
- [85] 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(3): 24-31.
- ZHANG Zhe, BAIHETIYAER·Muhetabaier, JIA limin. Development status and suggestions of hydrail technology[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 24-31.
- [86] 刘坚, 钟财富. 我国氢能发展现状与前景展望[J]. 中国能源, 2019, 41(2): 32-36.
- LIU Jian, ZHONG Caifu. Current status and prospects of hydrogen energy development in China[J]. Energy of China, 2019, 41(2): 32-36.
- [87] 孙浩, 吴维宁, 陈丽杰, 等. 新能源电解水制氢技术发展研

究综述[J/OL]. 电源学报. (2024-01-24) [2025-05-17].
https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240123.1730.002.
SUN Hao, WU Weining, CHEN Lijie, et al. Review on the
development of new energy electrolytic water hydrogen pro-

duction technology[J]. Journal of power supply. (2024-01-
24) [2025-05-17]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.
TM.20240123.1730.002.

Review of key technologies and research trends for hydrogen fuel cell hybrid locomotives

GAO Haoran¹, LIU Qiujiang¹, WU Mingli¹, HU Liang^{1,2}, TIAN Xinliang², WU Liran¹, MA Hongchao³

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Power Supply Branch of CHN ENERGY Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010399, China; 3. Beijing Tieyan Construction Supervision Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: As an emerging energy source, hydrogen offers renewability, high energy density, and convenient storage, supporting its widespread application in the field of transportation. However, compared with automobiles and ships, the application of hydrogen fuel cells remains relatively rare in rail traffic. To accelerate hydrogen adoption in the railway sector, a systematic technology framework and clear application orientations and development directions are urgently needed. This paper begins with a statistical analysis of domestic and international literature by publication year and development direction, and compares performance parameters of hydrogen-powered locomotives from industrial developments worldwide. Next, key technologies of onboard hydrogen systems are introduced from three aspects: hydrogen fuel cells, hydrogen storage, and hydrogen system safety management, and auxiliary power supply applications are analyzed. Two integrated electrical system topologies for locomotives (centralized and distributed) and their associated converter applications are introduced, and conventional and emerging energy management strategies for hybrid power sources are examined and classified. Building upon this foundation, challenges faced by hydrogen fuel cell hybrid locomotives are analyzed across five dimensions: high-speed and heavy-haul capabilities, adaptability to complex operating conditions, adoption of green hydrogen technologies, operational costs, and safety, and future research trends are outlined. The paper concludes with a summary of hydrogen fuel cell hybrid locomotive technologies and prospects for future development.

Keywords: hydrogen energy; hybrid power; rail traffic; power system; energy management