

氢燃料电池系统在轨道交通列车上的应用

韩 玉 韩 斌

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海)

摘 要 [目的]为使氢燃料电池在轨道交通列车上得到更加安全、高效的应用,需要对氢燃料电池在列车应用上的技术瓶颈与挑战进行梳理分析。[方法]介绍了氢燃料电池在轨道交通领域中的应用状况。系统梳理了氢燃料电池在轨道交通列车应用上一些共性的关键技术,主要包括氢燃料电池系统集成与控制技术、轨道交通列车混合动力技术、轨道交通列车混合动力能量管理技术、氢气供应体系等,对比分析了不同技术方法的优缺点。结合氢燃料电池在轨道交通列车中的应用与发展现状,针对性地分析了氢能轨道交通列车目前面临的技术挑战。[结果及结论]氢燃料电池在轨道交通许多车型上已经有所应用。当前关键技术研究不断突破,但氢能轨道交通列车领域目前还存在高功率、牵引系统正向设计等尚待进一步攻克的难题。随着相关技术产业的更迭、相关政策和标准的建立及技术攻关的持续推进,氢燃料电池系统在轨道交通行业的应用发展前景将更为广阔。

关键词 轨道交通; 列车; 氢能源; 燃料电池

中图分类号 U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.043

Application of Hydrogen Fuel Cell Systems in Rail Transit Trains

HAN Yu, HAN Bin

(Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] To ensure a safer and more efficient application of hydrogen fuel cells in rail transit trains, it is crucial to analyze and address the technical challenges and bottlenecks involved in their deployment. [Method] The current state of hydrogen fuel cell applications in rail transit sector is reviewed, the common key technologies involved are systematically outlined, such as hydrogen fuel cell system integration and control, rail transit train hybrid power technology, rail transit train hybrid energy management technology, and hydrogen supply systems. A comparative analysis of the strengths and weaknesses of different technological approaches is provided. Based on the current application and development status of hydrogen fuel cells in rail transit trains, the existing technical challenges faced by hydrogen-powered rail transit vehicles are specifically examined. [Result & Conclusion] Hydrogen fuel

cells are applied in multiple types of rail transit vehicles. Despite ongoing breakthroughs in critical technologies, the rail transit field still faces significant challenges, such as high-power output and traction system forward design, requiring further advancements. With continuous progress in related technology upgrades, the establishment of relevant policies and standards, and on-going technical innovations, the development prospects for hydrogen fuel cell systems in rail transit industry are increasingly promising.

Key words rail transit; train; hydrogen power; fuel cell

氢燃料电池作为一种将燃料中化学能转换为电能的发电装置,被认为是实现氢能高效利用的最佳技术^[1]。作为一种新型能源动力系统,氢燃料电池系统具有零污染排放、建设应用周期短、自身具备主动力源等优势。此外,列车采用氢燃料电池系统驱动时,不依赖于地面供电系统和弓网体系,可推动列车无网化,促进列车低碳高效运行,进而使得线路应用场景选择更为灵活。因此,采用氢燃料电池系统,在取得良好环境效益的同时,还产生了很好的社会效益,氢燃料电池可以成为推动我国城市轨道交通低碳、绿色、可持续发展的重要途径。

本文首先从氢燃料电池在轨道交通列车的应用状况着手,对氢燃料电池驱动系统的关键技术进行梳理,对比不同技术方法的优势与不足。在此基础上,对使用氢能的轨道交通列车后续需要解决的重点问题进行分析,以期为其在行业内的应用提供参考。

1 氢燃料电池在轨道交通列车上的应用状况

氢燃料电池具有无污染、无噪声和高效率的特点,目前在轨道交通领域主要集中应用于有轨电车、调车机车等较低功率或低速车型。学者们也在进一步研究,使氢燃料电池应用于速度更高、功率

更大的车型上,并提高其经济性和耐久性。

1.1 氢燃料电池应用于有轨电车

氢燃料电池在有轨电车上应用已有一定研究基础与工程实践。2006 年,东日本铁路公司成功研制了世界上第一辆燃料电池混合动力列车,该车采用 100 kW 的 PEMFC(质子交换膜燃料电池)和锂电池作为动力源。2011 年,西班牙 FEVE 公司也推出了独立研发的氢燃料电池驱动有轨电车。2022 年,东日本铁路公司研发了 FV-E991 型氢燃料列车,该车较 2006 年研发的混合动力列车在功率上有

大幅提升。

在我国,2016 年中车唐山机车车辆有限公司与西南交通大学共同研制了世界上首列商用氢燃料电池混合动力有轨电车,该车于 2017 年在唐山举办的中国工业旅游产业发展联合大会上首次投入载客运营。2023 年,北京轨道交通技术装备集团有限公司研发了我国首列使用氢燃料电池的混合动力铰接有轨电车,该车具备编组灵活与全自动运行功能。

氢燃料电池应用于有轨电车的案例如表 1 所示。

表 1 氢燃料电池应用于有轨电车的案例

Tab. 1 Application cases of hydrogen fuel cells in trains

年份	国家	编组方式	功率/kW	最高运行速度/(km/h)	动力结构
2006	日本	1 节编组	100	100	氢燃料电池 + 锂电池
2011	西班牙	1 节编组	24	20	氢燃料电池 + 锂电池
2016	中国	3 节编组	300	70	氢燃料电池 + 锂电池 + 超级电容
2019	中国	3 节编组	300	70	氢燃料电池 + 锂电池
2022	日本	2 节编组	240	100	氢燃料电池 + 锂电池
2023	中国	2 节编组	200	80	氢燃料电池 + 锂电池

1.2 氢燃料电池应用于市域轨道交通列车

以氢燃料为动力源的市域轨道交通列车起步总体晚于有轨电车。在国外,法国 Alstom 公司在原有内燃机动车组的基础上展开研究,于 2016 年率先研制出 Coradia iLint 型市域轨道交通列车。随后,Alstom 公司又与 Eversholt Rail 公司联合研发了 Breeze 氢能市域轨道交通列车,与 Coradia iLint 型市域轨道交通列车相比,其最高运行速度和续航里程均有大幅的提升。2022 年,德国 Siemens 公司研发了 Mireo Plus H 型市域轨道交通列车,该车的最高运行速度可达 160 km/h,已成功在德国铁路网上进行商用化试运行。同年,瑞士铁路车辆制造商 Stadler 推出了 FLIRT H2 型氢能市域动车组,该动车组在美国得到了成功应用。

在我国,2022 年中车集团与成都轨道交通集团共同研制了氢能源市域轨道交通列车,该车的最高运行速度达 160 km/h。我国市域轨道交通的发展起步较晚,且多采用动车组列车,因此,该领域的应用仍有较大的发展空间。

1.3 氢燃料电池应用于无轨电车

无轨电车目前在北京公共交通集团中已有广泛应用。2022 年,中车南京浦镇车辆有限公司研制了世界上较为先进的中型氢动力数字轨道胶轮电

车,该车采用了氢燃料电池 + 超级电容的组合方式,并采用了虚拟轨道等先进技术,不需要依赖传统铁轨、供电网即可实现运行,有效降低了交通占用成本与供电施工成本。

1.4 氢燃料电池应用于调车机车

调车机车主要用于车辆段或线路区间内的列车编组、列车解编等作业。氢燃料电池混合动力系统应用于调车机车,可有效降低污染与噪声,实现产业绿色发展。氢燃料电池应用于调车机车的案例如表 2 所示。

表 2 氢燃料电池应用于调车机车的案例

Tab. 2 Application cases of hydrogen fuel cells in trains

年份	国家	功率/kW	最高运行速度/(km/h)	动力结构
2002	美国	17	30	氢燃料电池 + 铅酸电池
2005	德国	80	60	氢燃料电池 + 锂电池
2009	美国	250	70	氢燃料电池 + 铅酸电池
2013	中国	150	65	氢燃料电池 + 锂电池
2021	中国	80	80	氢燃料电池 + 钛酸锂电池
2021	中国	400	100	氢燃料电池 + 磷酸铁锂电池
2022	中国	400	120	氢燃料电池 + 锂电池

2002 年美国能源部研发了全球首款氢燃料电池矿用机车,该车解决了传统内燃机高污染、高排

放的问题,但缺点是功率较低。2009年,美国 BNSF 公司成功研制了新型氢燃料电池混合动力调车机车,将机车的功率提升至 250 kW,全系统的瞬时功率可达 1 MW。德国 Fraunhofer 公司在 2005 年研发了氢燃料电池机车,该机车的最高运行速度可达 60 km/h。丹麦也在 2007 年启动了该方向的研究,并于 2010 年研制了基于氢燃料技术的调车机车。

在我国,2013 年西南交通大学成功研制了我国首辆氢燃料电池调车机车——蓝天号,该机车采用 HD6 型电池电堆,最高功率可达 150 kW。2021 年,中车大同电力机车有限公司自主开发了氢燃料电池+钛酸锂电池的混合动力机车。同年中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司联合同济大学开发了全球首台功率达到兆瓦级的调车机车,其氢燃料电池系统功率达 400 kW,整车功率可达 1 400 kW,大幅提高了调车的作业效率。

2 氢燃料电池的关键技术

2.1 氢燃料电池系统集成与控制技术

氢燃料电池的核心零件为电堆。电堆正常工作需要匹配供氧系统、供氢系统、散热系统、控制系统等。对各系统进行有效的集成与控制,可以提高电堆的运行效率和动态响应能力,同时也可以增强系统的鲁棒性。

文献[2]提出了采用一阶自抗扰控制方法来控制氢燃料电池发电系统,通过数据驱动反馈,将系统线性化,以此提高系统效率,并改善系统动态响应特性。通过梳理可知,控制电堆稳定运行、增强动态响应输出特性的常见方法主要包括 PID(比例-积分-微分)策略、模糊控制算法、自适应模糊 PID 控制法等,此外,神经网络、粒子群等高阶算法是较新的研究算法。

2.2 轨道交通列车驱动混合动力技术

从氢能轨道交通列车的应用现状看,氢燃料电池通常与其他动力源组合,共同驱动列车运行。氢燃料电池自身的输出特性较软,在列车运行过程中面对瞬态剧烈变化功率需求时的动态响应特性较差,且其在进入稳定输出阶段前,需先依靠电力来驱动空压机、气体循环泵、冷却水泵等辅机。备选的辅助动力源主要有 BAT(蓄电池)、SC(超级电容)。

氢燃料电池在列车起动或加速时,BAT 可辅助提供峰值负载功率,在列车制动时回收能量,其能量密度高,能满足列车对续航里程的要求。SC 具有

高比功率的优点,但存在自放电的情况,SC 放电至低谷后无法为辅机提供电力,可能会导致氢燃料电池无法启动。因此,氢燃料电池与其他动力源组合的常见方式主要有 3 种:氢燃料电池+BAT、氢燃料电池+SC、氢燃料电池+BAT+SC。相较而言,当前氢燃料电池+BAT 更适用于轨道交通列车。

2.3 轨道交通列车混合动力能量管理技术

轨道交通列车混合动力能量管理的基本思想是根据整车功率需求对各能量源进行功率分配,以提升系统的整体工作效率。图 1 为轨道交通列车混合动力系统控制优化策略,主要分为规则类、优化类及学习类 3 个类别。

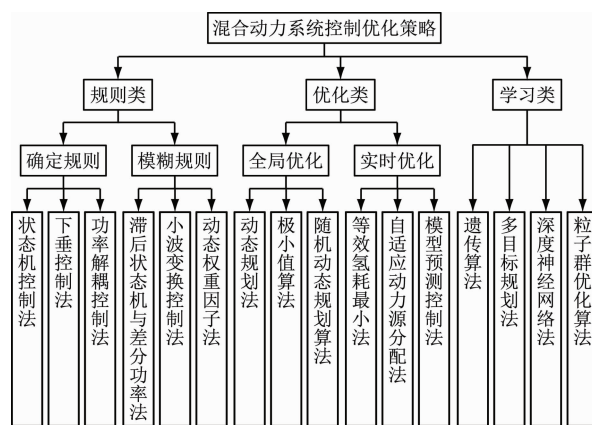


图 1 轨道交通列车混合动力系统控制优化策略

Fig. 1 Hybrid power system control and optimization strategies of rail transit train

1) 规则类:规则类的系统一般需要大量工程经验与实践经验,可进一步细分为确定规则、模糊规则 2 个子类。

2) 优化类:优化类的系统通常以减少能耗、降低成本为优化目标。通过定义约束条件,求解可行域内目标函数的极小值。

3) 学习类:文献[3]运用遗传算法来优化模糊规则控制,以规避模糊规则等需要依赖工程经验的不足。学习类控制优化策略尽管能在一定程度上改善传统 EMS(能量管理系统)策略的不足,但多数学习类控制优化策略的计算量仍较大。

表 3 为轨道交通列车混合动力系统控制优化策略分类中不同能量管理策略的特点。

2.4 氢气供应体系

2.4.1 制氢技术

氢气的供给也是氢能应用于轨道交通领域面临的阻碍之一。常用的制氢方式主要有化石燃料

表 3 不同能量管理策略的特点

Tab.3 Characteristics of different energy management strategies

策略	优点	缺点
确定规则	控制简单,易实现	需试验积累和工程经验,无法达到效果最优
模糊规则	鲁棒性和适应性好	需试验积累和工程经验,无法达到效果最优
全局优化	能够达到全局最优	计算量大、计算耗时较长,无法应对突发情况
实时优化	能够得到瞬时最优	难度大,精确性和适应性有待验证

制氢法、工业副产制氢法、电解水制氢法等。其中:化石燃料制氢法、工业副产制氢法的产能之和约占我国制氢总产能的 98.5%,电解水制氢法的产能占比仅为 1.5%^[4]。由此可知,低碳清洁氢的供给能力明显偏低。

2.4.2 储氢技术

1) 高压气态储氢:将氢气高压压缩并存储在储氢罐中。这是目前技术最成熟、成本较低、使用最为广泛的储氢方式,通常额定的压强为 35 MPa,罐内的氢气密度为 24 g/L。但该方式易存在氢气泄漏、储氢密度低等问题。

2) 液态储氢:将氢气压缩冷却至 $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,以液态形式储氢,储氢密度可达 70 g/L。与高压气态储氢相比,液态储氢得到氢气的纯度和密度均有大幅提高,但该方式的能耗和成本均较高。

3) 金属固态储氢:通过储氢合金催化将氢分子解离为氢原子并溶入储氢合金晶格中,以固溶体的形式储存。金属固态储氢具有储氢压力平稳、安全性好等优势,但后续释放氢的过程是吸热反应,需要持续输入热量。

3 氢能轨道交通列车的技术挑战与发展方向

氢燃料电池技术已经是一个相对比较成熟的新能源技术,在轨道交通列车上也已经有所运用。为了让氢燃料电池在轨道交通列车上得到更高效、更安全和更广泛的应用,目前还存在一些技术瓶颈与技术挑战尚待进一步技术攻关。

3.1 大功率燃料电池系统

当前应用于轨道交通的多为质子交换膜燃料电池。由于单个氢燃料电池功率较小,通常将多组单功率等级的氢燃料电池通过串并联等方式组合,

以满足实际应用需求。但是,多堆氢燃料电池结构复杂,具有多物理场、多能量流、多时间尺度等特征,在实际应用时涉及维度较为复杂。

因此,首先要解决氢燃料电池自身功率较小问题。只有在单个氢燃料电池的额定输出功率不小于 400 kW 时,才能实现氢燃料电池在动车组等车型上的应用;其次,与氢燃料电池匹配的 DC/DC 变换器应更关注其体积大、散热管理复杂,以及因高频谐振引起电磁干扰与噪声等问题。

此外,应用过程中还会涉及续航里程短、加氢时间长等问题。当前储氢方式多为气态储氢,采用 35 MPa 大容量高压储氢罐存储氢气,即使在当天运营开始时满载氢气,这些氢气也不能满足列车运行 1 d 的动力要求,这就需增加储氢罐的数量,由此会带来储氢罐总质量的增加。也可以在运营期间中途加氢,例如,若某有轨电车的续航里程是 50 km,在运营线路长度为 25 km 的线路上往返 1 次,至少需要加氢 1 次,每次加氢时间大于等于 10 min^[5],加氢时间较长,可能会影响列车的正常运行。因此,70 MPa 储氢压力的 IV 型储氢瓶优势明显,符合氢燃料电池高压、高质量、高安全性的发展需求。

3.2 牵引系统正向设计

与传统接触网不同,氢燃料电池的能量输出不是简单的动力源替换,因此,氢能轨道交通列车应从源头进行匹配设计考量,开展正向设计,即:从设计开始进行整体规划,将研发与生产融合一体化。

从列车牵引系统整体正向设计出发,对系统整体的效率、能耗、安全等进行优化。现阶段,氢燃料电池在轨道交通列车上的应用通常基于现有的列车需求。基于应用需求对氢燃料电池系统进行的调整以现有车型改造和零部件替换为主,由此存在着电堆性能与列车运行要求相匹配的要求。例如,在轨道交通范围内,内燃机车因采用柴油发电,其牵引特性曲线与电力机车就不相同。因此,现有轨道交通列车的牵引特性曲线是否可以更好地匹配氢燃料电池的输出特性,匹配后列车在效率、能耗、安全等方面能否达到更优,均有待进一步探索验证。可基于计算机仿真技术,进一步优化现有列车/机车的牵引特性曲线,以验证氢燃料电池的输出特性曲线与现有牵引系统之间能否更好地相互配合。

使用氢燃料电池作为电源时,需要使用 DC/DC 转换器,使氢燃料电池的输出电压满足负载需求。

氢燃料电池是电流源还是电压源,决定了相应转换器的类型,其主要原理为:将化学能转变为电能,氢气在阳极失电子生成氢离子,而后质子通过交换膜传至阴极,同时电子也经过外电路传至阴极,进而氢离子与氧离子结合生成水,此时的输出电压为几十伏至几百伏,因此,目前较多将氢离子视为电压源,接入DC/DC中。

除上述氢燃料电池需要与轨道交通列车牵引系统、元器件匹配外,整车的设计也是需要考虑的。在氢燃料电池系统的布置方面,电堆和多组储氢罐的体积、质量均较大,通常会将其放在车顶或车底,在整车设计时应预留足够的空间。理想情况下,当氢燃料电池输出功率稳定在400 kW时,可以考虑每个转向架配置1个燃料电池,即每节车厢配置2个燃料电池;若氢燃料电池输出功率较低,还可以考虑每个电机配置1个燃料电池,以满足列车的功率需求,但配置的燃料电池越多,列车需要预留的体积空间就越大。

3.3 氢燃料电池的安全问题

氢燃料电池的安全管理也是制约其发展的技术难点之一。当前氢燃料电池的应用场景主要集中在有轨电车、市域轨道交通列车等车型,若进一步推广应用至地铁,该问题会更加凸显。如若地铁在隧道里发生氢燃料泄漏进而引发燃烧或爆炸等事故,此时的安全管理和人员逃生将会更为困难。

因此,首先要保证储氢方式的安全。相比于气态储氢和液态储氢,固态储氢更为安全,具有较高的储存密度与能量密度,可以制备成不同形状来适应不同的布局需求。固态储氢的缺点是需要高温、高压环境下较长时间才能释放氢气,这导致释放氢气时安全风险增加。无论是固态储氢还是液态储氢,氢气一旦发生泄漏,均以气态形式散至空气中,此时若氢气的体积浓度过高,再遇明火、高温等环境条件,则有发生爆炸的风险。

还有学者提出使用甲烷、甲醇、液氨等其他清洁燃料来保障氢气储运的安全,其中对液氨燃料电池的研究较多。氨气可以在常温条件下储运,易液化,适合长距离运输,且结构稳定,不易爆炸,但氨气反应后的产物为氮氧化物,不能同氢燃料电池一样实现零污染排放。也有研究人员另辟蹊径,结合氢气、氨气二者优势,研发了“氨-氢”燃料电池,通过低温氨分解催化剂技术将氨气转化为氢气并进行发电,但该核心技术仍在研究的起步阶段。

目前,氢燃料电池的安全管理策略已具备了完善的框架,形成了从加氢、储氢、排氢全过程及整车紧急状态的安全管理策略。但氢燃料电池在轨道交通的既有应用尚未涉及到地铁地下线路区间等更为封闭的环境,因此,氢燃料电池的安全控制还有很长的路要走。

3.4 相关标准

我国相继发布了GB/T 29729—2022《氢系统安全的基本要求》、GB/T 33979—2017《质子交换膜燃料电池发电系统低温特性测试方法》、GB/T 34584—2017《加氢站安全技术规范》等多项氢能的国家标准,但氢能在轨道交通领域应用的国家标准仍是空白。

近年来,我国在制定轨道交通列车氢燃料电池供电技术的行业标准、企业标准等方面做了许多努力。例如,我国联合其他国家开展了氢燃料电池在轨道交通应用的IEC(国际电工委员会)标准编制工作,其中:中车唐山机车车辆有限公司牵头编制了轨道交通列车用燃料电池性能测试方法的国际标准,并与法国Alstom公司联合编制了轨道交通列车用燃料电池系统设计的国际标准。呼吁我国有关部门进一步促进建立氢能在轨道交通行业发展的政策环境体系,以支撑氢燃料电池产品的应用和氢能技术的快速发展。

4 结语

作为一种低碳环保的新型动力源,氢燃料电池在技术上具备了零碳排放、零污染、低噪声的特性,符合能源结构及国家“双碳”战略的要求。与现有的接触网供电方式相比,氢燃料电池有着更为广阔的应用场景,无须建设接触网等高成本的基础设施。

当前氢燃料电池已在市域轨道交通列车、轻轨列车、有轨电车及干线铁路调车机车等车型上得以应用,在关键技术研究方面不断实现突破。但对于轨道交通列车而言,目前尚存在有待进一步攻克的技术难题,如高功率化、牵引系统正向设计、氢能源安全对策、规范标准体系环境建立等。

相信随着相关技术产业的更迭以及相关政策、标准的建立,氢燃料电池系统在轨道交通行业的应用发展前景更为广阔,不断推动我国城市轨道交通向低碳、绿色、可持续方向发展。

(下转第241页)

确定与拉出值影响相关的频率范围,并据此提取相应的特征。通过仿真分析验证,在速度变化及定位点存在一定垂向偏移的情况下,随机森林模型能够准确识别拉出值,且其识别效果相较于其他模型具有显著优势。

参考文献

- [1] 陈唐龙,于涤,陈耀坤. 接触网检测车振动补偿研究[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(4): 461.
CHEN Tanglong, YU Di, CHEN Yaokun. Study on vibration compensation of measuring cars for overhead contact line equipment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(4): 461.
- [2] 刘文强,刘志刚,耿肖,等. 基于均值漂移和粒子滤波算法的接触网几何参数检测方法研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(11): 30.
LIU Wenqiang, LIU Zhigang, GENG Xiao, et al. Research on detection method for geometrical parameters of catenary system based on mean shift and particle filter algorithm[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(11): 30.
- [3] 张冬凯,高仕斌,于龙,等. 车体振动对接触网检测的影响分析及补偿方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 43.
ZHANG Dongkai, GAO Shibin, YU Long, et al. Research on influence of vehicle vibration on catenary detection and compensation method[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(9): 43.
- [4] LIU Z, LIU W, HAN Z. A high-precision detection approach for catenary geometry parameters of electrical railway[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7): 1798.

- [5] BLANCO B, ERRANDONEA I, BELTRÁN S, et al. Panhead accelerations-based methodology for monitoring the stagger in overhead contact line systems[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 171: 104742.
- [6] 张磊,郑侃,孙连军,等. 基于小波包敏感频带选择的复材铣边颤振监测研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 140.
ZHANG Lei, ZHENG Kan, SUN Lianjun, et al. Investigation on chatter monitoring of composite milling edge based on the selection of sensitive frequency band of wavelet packet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(3): 140.
- [7] KIRBY J F. Which wavelet best reproduces the Fourier power spectrum? [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(7): 846.
- [8] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61.
- [9] ZHANG P. A novel feature selection method based on global sensitivity analysis with application in machine learning-based prediction model[J]. Applied Soft Computing, 2019, 85: 105859.
- [10] SÁNCHEZ René-Vinicio, ZURITA Grover, CERRADA Mariela. Fault diagnosis of spur gearbox based on random forest and wavelet packet decomposition[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2015, 3(10): 277.

· 收稿日期:2022-11-27 修回日期:2023-01-11 出版日期:2025-03-10
Received:2022-11-27 Revised:2023-01-11 Published:2025-03-10
· 第一作者:陈鸿明,硕士研究生, chm@my.swjtu.edu.cn
通信作者:周宁,副研究员, zhou_ningbb@sina.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 235 页)

参考文献

- [1] 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.
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.
- [2] SUN L, SHEN J, HUA Q, et al. Data-driven oxygen excess ratio control for proton exchange membrane fuel cell[J]. Applied Energy, 2018, 231: 866.
- [3] WANG D, LIN X, ZHANG Y. Fuzzy logic control for a parallel hybrid hydraulic excavator using genetic algorithm[J]. Automation in Construction, 2011, 20(5): 581.
- [4] 徐连兵. 我国氢能利用前景与发展战略研究[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(9): 1.

- XU Lianbing. Research on the prospect and development strategy of hydrogen energy in China[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(9): 1.
- [5] 汪培桢,杨升. 氢能有轨电车应用综述[J]. 装备制造技术, 2020(2): 196.
WANG Peizhen, YANG Sheng. Overview of hydrogen power tram applications[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(2): 196.

· 收稿日期:2024-05-17 修回日期:2024-06-06 出版日期:2025-03-10
Received:2024-05-17 Revised:2024-06-06 Published:2025-03-10
· 第一作者:韩玉,硕士研究生, 2231403@tongji.edu.cn
通信作者:韩斌,教授, hanbin@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license