

燃料电池混合动力列车能量管理策略及经济性分析

陈建鹏

中国电子科技集团公司第三十三研究所 山西 太原 030032

摘 要：燃料电池混合动力列车凭借绿色低碳的运行特质，成为轨道交通绿色升级的重要载体，多能源耦合的动力结构，也让车载能量调控的复杂程度显著提升。立足混动列车动力架构组成、单元运行特性与实际工况规律，本文梳理多动力协同配合、能量分配管控及经济运行层面的各类矛盾与现实短板，构建适配全工况的精细化能量管理方案，从能源配比、设备运维、制动能源回用、场景适配多角度完善优化路径，持续优化车载用能模式，提升车辆运行的节能效果与经济品质。

关键词：燃料电池；混合动力列车；能量管理；工况适配；运行经济性

引言：氢能技术的持续成熟，推动轨道交通逐步向清洁化、低碳化方向迭代。燃料电池混合动力列车依靠多动力互补优势，可适应多变线路环境与 4kW~16kW 跨度的动态行车负荷。不同动力单元的运行特性存在明显差异，常规固定的能量调控方式难以匹配动态工况变化，容易出现动力衔接紊乱、能源利用低效等问题。不合理的用能排布，会增加设备损耗与能耗浪费，制约氢能列车的实际运营价值。优化能量管控逻辑、适配工况动态变化，能够有效改善车辆运行状态，挖掘轨道交通氢能装备的经济潜力。

1 燃料电池混合动力列车系统构成与运行机理

1.1 燃料电池混合动力列车动力系统架构

燃料电池混合动力列车依托多能源耦合架构完成动力供给，整套动力体系由多个功能模块协同构成。结合系统功能属性可划分为氢能发电单元、辅助储能单元、动力传动单元以及车载控制单元四大核心板块，各模块承担专属功能，相互配合搭建车辆完整动力输出链路。氢能发电单元作为核心供能主体，完成氢能向电能的转化，为列车行驶提供基础动力来源。辅助储能单元负责电能储备与负荷调节，弥补单一氢能供电存在的运行短板。动力传动单元承担电能向机械动力的转化与传输任务，保障车体动力供给的通畅性^[1]。车载控制单元统筹整体系统运转，落实能源调配与系统调控相关工作。各功能模块按照专属拓扑结构完成集成搭建，构成完整的多能源动力运行体系。不同模块的排布组合方式存在区别，形成多样化的系统拓扑形式，衍生出差异化的动力输出逻辑。明确系统整体架构与各模块功能定位，能够为后续能量运行规律研

究与策略设计搭建扎实的基础框架。

1.2 各动力单元工作运行特性

不同动力单元依托自身硬件结构与工作原理，在运行过程中展现出差异化的输出规律。燃料电池单元依托氢能氧化反应实现发电，稳态供电性能优异，输出状态平稳。负荷出现剧烈波动时，发电端响应速度存在一定滞后，难以适配突变的动力负荷需求。储能单元拥有灵活的工作模式切换能力，可根据车辆运行状态完成充放电调整，负荷适配范围宽泛，动态响应性能优异，能够应对短时高负荷动力输出需求。频繁的模式切换会让储能单元工作状态持续波动，运行稳定性不及燃料电池单元。车载传动系统与电气系统主导动力中转为能源传输过程，自身参数的匹配程度，直接决定整车动力输出的流畅度。各类动力单元具备独特的运行优势，也存在难以规避的固有局限。多单元搭配运行可实现性能互补，这也是混动列车动力系统稳定运行的核心基础特征。

1.3 混合动力列车运行工况特征

轨道交通车辆行驶线路固定，但行驶过程会受线路坡度、行驶阶段、制动状态等因素影响，呈现出丰富的工况类型。燃料电池混合动力列车完整行驶过程包含启停、匀速、爬坡、制动、怠速等典型工况，不同工况对应完全不同的动力消耗模式。启停阶段需要瞬时动力支撑，能耗负荷处于较高水平。匀速行驶阶段运行状态平稳，动力负荷与能耗输出保持稳定。爬坡阶段需要提升动力输出强度，整体能耗负荷显著提升。制动阶段可释放冗余能量，具备能量回收利用的运行条件。怠速阶段无动力输出，系统仅维持基础待机能耗。各类工况对应的动力负荷差距明显，整车用能状态始

终处于动态波动过程中。梳理列车全工况运行特征与动力需求变化规律,能够为能量管理策略的科学设计提供可靠工况依据。

2 燃料电池混合动力列车能量运行矛盾与管控痛点

2.1 多能源单元协同运行冲突

燃料电池与储能单元的硬件构造与工作原理存在本质区别,响应速度、功率输出区间、常态运行状态都具备独立的变化规律^[2]。多能源耦合运行体系依靠两类单元相互配合完成动力供给,参数特性的差异化会诱发动力输出匹配失衡问题。列车行驶工况出现切换时,整体动力负荷会产生明显波动,各动力单元的功率分配节奏无法做到有序衔接。负荷升降过程中,能源输出秩序混乱,动力供给链路出现短暂衔接断层。这类运行问题会打乱整车动力输出节奏,破坏动力系统运行平稳度,干扰多能源体系常态化协同运转状态。

2.2 车载能量分配管控方式局限

现阶段多数车载能量分配体系采用固定化调控逻辑,预设的功率分配比例保持长期不变。列车行驶全程的动力需求始终处于动态变化状态,不同行驶阶段的负荷强度、能耗需求存在明显差异。固化的分配模式缺少充足的调节空间,无法根据实时工况调整多动力单元的输出配比结构。单一的管控逻辑难以应对复杂的用能变化,要么过度输出造成能源闲置,要么动力供给不足影响行驶状态。传统管控模式很难兼顾车体运行稳定性与能源利用科学性,难以适配混动列车的常态化运行需求。

2.3 氢能列车运行经济属性制约因素

氢能介质的转化特性、动力单元长期工作产生的性能损耗、能源切换过程中产生的链路损耗,都会对列车整体运行成本构成影响。不合理的能量分配结构会让动力单元长期处于非最优工作区间,产生大量无效工作损耗。设备高频次异常运行会加速部件老化,压缩核心设备的正常使用周期。粗放的用能排布方式会持续拉高氢能消耗与运维投入,形成结构性的用能浪费。各类问题层层叠加,持续压低列车运行的经济效能,阻碍氢能轨道交通装备经济价值的释放。

3 适配全工况的燃料电池列车能量管理策略构建

3.1 多动力单元协同功率分配逻辑设计

混动列车动力系统由多类性能特质不同的能源单元组成,车辆行驶过程中的负荷需求会随线路条件与运行阶段产生明显变化。结合各动力单元固有运行特性与整

车实际工况需求,可搭建层次清晰、适配性更强的多能源协同功率分配逻辑。燃料电池具备稳定持续的发电能力,适合承担基础负荷供给任务,维持整车长时间稳态运行^[3]。储能单元拥有灵活的负荷调节能力,可在负荷波动阶段承担调峰任务。依据不同运行工况的负荷属性,科学划分各场景下的动力输出主体,明确各单元的出力优先级与功率承担范围。依靠单元性能差异形成良性互补的出力模式,完善整车功率分配结构,保障动力系统运行状态更加平稳有序。

3.2 动态工况适配的能量调控机制搭建

列车实际行车过程涵盖多种运行状态,负荷波动幅度存在明显差异,固定化的能量调控模式无法覆盖全部运行场景。针对列车复杂的运行特征,结合实时行车状态与负荷演变规律,建立具备动态调整属性的能量调控机制。围绕常规平稳行驶、爬坡重载行进、制动能量回馈、低速怠速停留等典型工况,根据每类场景的用能特点设置独立的能量调控方案。系统可以根据行车负荷的升降变化,主动调整多能源单元的功率输出结构,改变各模块的出力配比。通过差异化、精细化的调控方式应对多样的运行场景,让能量供给结构适配工况变化带来的用能需求变化。

3.3 设备损耗优化的用能运行规则设计

动力单元的工作状态直接影响整套混动系统的运行稳定性与服役周期,科学的用能规则能够有效延缓设备性能衰减。以动力系统长效稳定运行为核心目标,对整车能量切换方式与功率调节逻辑进行优化升级。通过合理的功率管控手段,减少燃料电池启停频次,抑制运行过程中出现的大幅功率波动,保持发电单元平稳的工作节奏。对储能单元的充放电标准进行细化界定,设置合理的工作区间,规避超限运行带来的设备负担。规整各动力单元的运行边界,减少频繁工况切换引发的无效损耗,提升整套动力系统的耐久运行能力。

3.4 制动能量回收利用管控优化

列车制动阶段会产生规模可观的冗余能量,对这类能量进行高效转化与利用,是提升整车能源利用率的重要方式。结合燃料电池混动列车的制动运行特点,梳理制动过程中的能量产生与回馈演变规律,优化现有制动能量管控体系的运行逻辑。完善制动能量的分流传输路径,搭建更为高效的能量归集与存储体系,保障制动产生的电能顺利接入储能单元完成储备。细化能量存储与二次释放的管控标准,让回收电能有效参与车辆常规行驶供能。持续压缩制动阶段的能源流失,提升车载能源

体系的循环复用效率,夯实列车节能运行的整体基础。

4 燃料电池混合动力列车运行经济性优化路径

4.1 能源利用结构优化升级路径

科学完善的能量管理体系,能够对车载能源架构进行系统性优化,合理调整氢能与储能电能的配比模式。列车不同行驶阶段的负荷需求存在显著差异,传统固化的用能模式容易造成高成本能源的无效损耗。针对各类行车场景优化能源组合策略,依据负荷大小动态调整两类能源的出力比例,低负荷工况下缩减燃料电池低效出力区间,合理缩减低负荷工况下的氢能消耗。依托储能电能灵活可调的运行优势,承接车辆波动负荷与辅助负荷,有效缩减氢能整体消耗规模^[4]。持续整改能源配置中的不合理环节,摒弃粗放低效的耗能模式,逐步构建低能耗、高利用率的车载能源运行体系,为列车长期稳定的经济运营夯实基础。

4.2 车载设备全周期运维优化路径

标准化的能量调控手段,能够有效约束动力单元的运行状态,保障设备工况平稳稳定。功率频繁波动、超负荷运转等不良工况,都会加剧硬件损耗,缩短动力单元正常服役时长。通过规整整车功率输出节奏,规避极端工况对核心设备的损耗冲击,让各动力单元维持平稳有序的运行状态。设备运行稳定性得到提升后,整体服役周期能够有效延长,大幅降低核心部件更换频次,有效压缩设备迭代投入。这一优化方式可精简日常运维工作内容,缩减运维物资与人力投入,持续完善车辆全生命周期成本结构,从设备运行源头管控损耗问题,达成设备稳定运行与运营成本可控的双向增益。

4.3 制动能源循环利用增效路径

列车制动过程会产生大量可回收冗余能源,搭建闭环化的制动能量利用体系,能够充分挖掘这类能源的复用价值。优化制动能量归集路径、存储机制与二次调用逻辑,提升再生能源的回收质量与利用效率。完善能量转化与传输链路,降低能源流过程中的传输损耗,最大化留存制动回馈能源并投入整车供能体系。回收得到的再生电能可补给车辆常规行驶负荷,填补车载能源供给缺口。弱化车辆对外购氢能的供给依赖,减少日常运

营中的氢能资源消耗,稳步压缩列车常态化运行的资源投入成本。

4.4 全场景经济运行适配优化路径

不同运营线路的路况环境、行车频次与负荷特性存在客观差异,单一固化的能量管理标准无法适配全场景节能增效需求。结合各类运营场景的独有运行特征,细化能量管理的调控标准与实施细则,针对低速通勤、中速巡航、重载爬坡等差异化场景设置专属管控参数。根据差异化工况调整功率分配逻辑与能源排布结构,定制适配性更强的节能管控方案。搭建分层分类的场景化经济运行管控模式,匹配多样化运营环境的节能提质需求。深度挖掘各类工况的节能空间,持续优化整车用能体系,有效提升燃料电池混合动力列车市场化运营的综合经济竞争力。

结束语

燃料电池混合动力列车的用能秩序与运营质量,高度依赖科学合理的能量管控方式。结合动力系统运行规律,梳理多能源耦合运行的各类适配矛盾,依托工况特征搭建动态化、精细化的能量管理策略,可有效规整多单元出力逻辑,减少设备无效运行损耗。通过调整车载能源结构、完善设备运维方式、提升制动能源利用效率并适配差异化运营场景,能够持续优化整车用能体系。合理的能量管控手段,可充分释放混动列车的节能优势,提升车辆长期运营的经济水平。

参考文献

- [1] 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):1-9,18.
- [2] 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].机电传动,2024(6):1-8.
- [3] 张晗,杨继斌,张继业,等.燃料电池有轨电车能量管理与速度曲线协同优化[J].机械工程学报,2022,58(10):169-179.
- [4] 关权,涂正凯.锂电池与燃料电池混合观光车动力系统的优化设计[J].汽车安全与节能学报,2024,15(2):199-207.