



氢能高速列车关键集成技术研究

焦京海¹, 陶林¹, 刘飞¹, 张国瑞¹, 董侃², 张业¹
(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 山东 青岛 266111;
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所, 北京 100081)

摘要: 在各国氢能发展战略推动下, 氢能技术与轨道交通装备融合发展。当前, 世界主要经济体均开展了氢能在轨道交通车辆上的技术研究和工程应用探索。文章调研了国内外氢能轨道交通车辆发展现状, 以速度不低于250 km/h、续航里程不短于1 000 km作为列车顶层技术指标评估氢动力系统功率与能耗配置需求, 分析由氢动力系统功率大、质量大、占用空间显著增加等问题带来的动力系统拓扑结构优化、动力集成、减阻设计、氢能及锂电池安全设计等关键技术, 研究氢能高速列车设计面临的关键技术挑战。结果表明, 现有技术在低速度等级氢能列车集成方面取得了一定成果, 但氢能高速列车的研制仍需进一步研究氢动力系统集成、多源均衡及容错控制、气动效应及隧道运行安全等技术。本文研究可为氢能高速列车整车研制提供技术基础。

关键词: 高速列车; 系统集成; 减阻设计; 氢动力系统; 氢安全; 电池安全

中图分类号: U267.9; TK91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)06-0111-08

0 引言

氢能作为一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源, 正逐步成为全球能源转型发展的重要载体之一^[1]。近年来, 美、日、韩等国家和欧洲地区围绕能源安全、绿色发展、国际贸易等目标, 陆续发布国家氢能战略, 中东、南美、东南亚等新兴市场同步跟进^[2]。各国氢能发展战略推动着氢能与轨道交通行业融合发展。目前, 我国已成为全球最大制氢国, 丰富的资源为发展氢能产业奠定了物质基础^[3]。面向我国“双碳”目标, 氢能被视为轨道交通实现能源转型升级的优选能源。氢燃料电池以氢气为燃料, 是将化学能转化为电能的装置, 具有能量密度高、启动快和工作温度低等优点^[4], 目前研发完成的氢能轨道车辆大多采用氢燃料电池作为动力装置。世界不少国家开展了不同动力架构、不同速度等级的氢能轨道车辆研制及应用, 其运行主要集中在160 km/h及以下速度等级, 运营场景以城际铁路和城市轨道交通线路为主, 250 km/h及

以上速度等级的氢能高速列车尚属空白。高速列车运行速度高、列车质量大、运行场景复杂, 对整车系统集成技术提出了更严峻的挑战。

1 氢能列车发展现状

世界上第一辆应用氢燃料电池的轨道交通车辆由美国车辆工程公司 (Vehicle Projects LLC) 和燃料电池动力研究所 (Fuel Cell Propulsion Institute) 共同研制。该车辆于2002年研制成功, 为矿用机车, 最大功率仅为17.5 kW。2006年, 东日本铁路公司 (JR East) 发布了世界首款氢能源轻轨列车E995, 该车配备功率为130 kW的燃料电池和340 kWh的蓄电池动力系统, 最高速度为100 km/h。2022年, 东日本公司联合日立公司和丰田汽车公司研制新一代氢能源轻轨列车FV-E991 (HYBARI), 配备2个180 kWh燃料电池与2个25 kWh蓄电池, 最高速度为100 km/h, 单次加氢可行驶140 km, 目前正在开展线路试验, 计划于2030年开始商业应用。2022年, 阿尔斯通研制的Coradia iLint氢能

基金项目: 国家重点研发计划科技项目(2023YFB4301601); 中国中车重点项目(2024CTB 083)

作者简介: 陶林, 女, 正高级工程师, 主要从事高速动车组整车集成设计方面的研究; E-mail: sf-taolin@cqsf.com

引用格式: 焦京海, 陶林, 刘飞, 等. 氢能高速列车关键集成技术研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 111-118.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.012.

Citation: JIAO Jinghai, TAO Lin, LIU Fei, et al. Study of key integration technology for hydrogen-powered high-speed trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 111-118.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.012.

列车在德国下萨克森州投入运营,成为全球首列商业营运的客运列车,其最高运行速度为140 km/h,续航里程超过1 000 km。两编组列车采用2个198 kW燃料电池和2个110 kWh锂动力电池,储氢量为2×89 kg。2024年12月,德国联邦铁路公司(Deutsche Bahn)与西门子铁路系统(Siemens Mobility)合作开发的氢燃料电池列车Mireo Plus H取得客运运营授权。该列车最高运行速度可达160 km/h,整车功率为1.7 MW,续航里程为1 200 km。2025年9月13日,施泰德(Stadler)公司与美国加州圣贝纳迪诺县运输管理局(SBCTA)共同打造的美国首列商用氢燃料电池列车——Flirt H2在加州投入客运服务。该列车最高速度为127 km/h,整车功率为700 kW,续航里程大于460 km。与其他车型不同的是,该列车将储氢罐和燃料电池系统集中布置在动力车厢。2021年韩国铁路研究所(KRRI)宣布其正在研究以液氢为动力的火车头,该车最高速度为150 km/h,最大行驶里程不低于1 000 km。列车动力系统由400 kW的燃料电池、300 kWh的电池组和600 kW的DC-DC转换器组成。目前已成功开发了用于轨道车辆的一体化(On-board)液氢供应系统。

国内氢能与轨道交通融合应用研究起步较晚,但随着国家双碳目标的提出,氢能源轨道列车技术研究及应用均发展迅速。2013年,西南交通大学研制了我国第一辆燃料电池电动机车“蓝天号”。该车最高速度为65 km/h,轻载工况下可续航24 h。2015年3月19日,中车青岛四方机车车辆股份有限公司研制的世界首列氢燃料电池有轨电车下线^[5],并于2019年12月在佛山高明上线运营。该车是世界上首次正式投入商业运营的氢能有轨电车,运行速度为70 km/h,配置了200 kW燃料电池和88.32 kWh钛酸锂电池,采用35 MPa储氢系统,最大载客量为360人,单次加氢续航约100 km。2022年10月,中车浦镇氢动力数字轨道胶轮电车在上海临港T2线开通运营。列车速度为70 km/h,配置200 kW燃料电池和64.8 kWh超级电容,采用35 MPa储氢系统,载客量300人,单次加氢续航约150 km。2024年4月,国家能源集团与中国中车联合研制的我国首台大功率氢能源动力调车机车在新朔铁路四道柳站首次完成万吨装车试验^[6]。该车速度为100 km/h,配置400 kW氢燃料电池,轮周功率短时可达2 400 kW,采用35 MPa储氢系统,单次加氢续航800 km。2024年9月,我国首列氢能源智能城际动车组CINOVA H2在德国柏林国际轨道交通技术展览会正式发布^[7]。该车速度为160 km/h,配置960 kW燃料电池和365.96 kWh锂电池,采用70 MPa储氢系统增大储氢量,单次加氢续航1 200 km。

综上,氢能在轨道交通领域的应用仍处于初期阶段,受氢能储运形式、燃料电池功率密度等限制,速度等级均在200 km/h以下,且尚未实现氢能源列车的大批量应用。Coradia iLint等已实现商业运营的氢能列

车,其应用场景均为开放线路、无隧道等半封闭场景,储氢形式大多选用高压储氢,动力转换装置均采用燃料电池,氢动力系统与整车系统集成方式大多选用动力分散布置。

2 关键集成技术

随着轨道交通与氢能的不断融合,国内外均有氢能源轨道交通装备投入正式商业运营。文献[8]从列车车载储氢、系统设计、燃料电池技术、标准规范、可再生能源制氢等方面分析了我国氢燃料列车发展面临的诸多技术瓶颈,从技术、产业和政策角度提出相关发展对策和建议。文献[9]深入研究了氢燃料电池系统集成与控制、混合动力等关键技术,分析了氢能轨道交通主要技术挑战。氢能高速列车以运行速度不低于250 km/h、续航里程不小于1 000 km为设计目标,因此功率需求大,质量、体积与既有氢能列车相比显著增加,整车集成设计需充分考虑设备布局及车辆质量均衡、动力集成、减阻设计、氢与锂电池安全等关键技术。

2.1 氢电混合系统拓扑

质子交换膜燃料电池(PEMFC)具有功率密度高、电解质无腐蚀、工艺成熟、维护方便等优点,是目前氢能源轨道交通装备发电装置的主要选择。虽然PEMFC低温启动性能较其他类型燃料电池已具备明显优势,但仍无法满足高速列车启动加速度的瞬时大功率需求,因此需配置储能系统,构建氢电混合动力系统。氢电混合动力系统分为两种^[10]:两混型动力系统仅配置两种动力装置,包括燃料电池+锂电池、燃料电池+超级电容两种方案;三混型动力系统则配置三种动力装置,为燃料电池+锂电池+超级电容方案。不同类型的拓扑结构如图1所示。

常用的车载储能装置主要包括锂电池和超级电容,不同储能装置的特点对比如表1所示。

由表1可知,超级电容除储能密度较锂电池有较大劣势外,其他特性均更适用于轨道交通高速列车应用场景。

三混型动力系统因为同时兼具功率型和能量型储能装置,系统配置及性能更优,但由于直流母线上同时挂接燃料电池、动力电池和超级电容,所以需要更为复杂的控制策略,这对动力系统架构设计和控制提出更大挑战。钛酸锂电池单体的峰值充放电倍率可达40C,集成系统的峰值充放电倍率可达15C,行业已有相关实际应用验证,因此仅使用动力电池可满足轨道交通车辆应用需求,氢能高速列车可采用两混型拓扑结构。

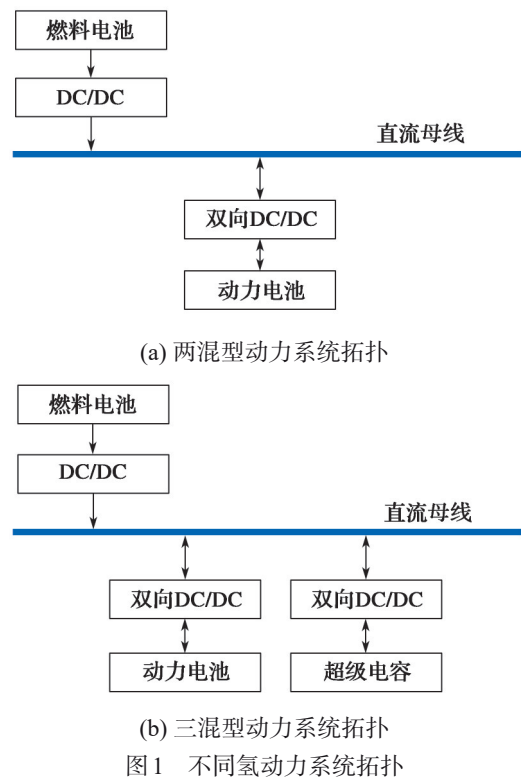


图1 不同氢动力系统拓扑

表1 不同储能装置特点对比

指标	锂离子电池	超级电容	能量型超级电容
能量密度/ (W·kg ⁻¹)	80~300	3~10	15~25
功率密度/ (kW·kg ⁻¹)	<1	10~100	8~50
充放电 时间	30 min 至数小时	秒级	分钟级
循环 寿命/次	1 000~20 000	50万~100万	5万~10万
温度 适应性	工作温度为 -20~60℃, 低温性能急剧下 降, 高温有热失 控风险	工作温度为 -40~70℃, 高低温性能优 异, 适合恶劣 环境	工作温度为 -30~70℃, 高低温性能优异, 适合恶劣环境
安全性	锂离子电池在过 充、短路、碰撞 等工况下可能起 火爆炸	物理储能, 无 剧烈化学反应, 安全	以鼓包、性能衰减 为主, 极端滥用有 燃烧风险, 反应过 程比锂电池温和, 相对安全

2.2 动力集成

氢能高速列车氢动力系统通常包括储氢系统、燃料电池、燃料电池DC/DC、动力电池及动力电池DC/DC, 高速列车运行速度不低于250 km/h, 四编组整车运行功率约为4 000 kW, 储氢量等系统配置较汽车或

低速轨道交通装备将增加数十倍, 重量和体积的增加对整车轻量化及系统集成提出了严峻挑战。

氢能高速列车应与传统动车组保持相同的动力性能, 据此可确定其主要顶层技术指标如下:

- ①最高运行速度不低于250 km/h;
- ②平均加速度不小于0.4 m/s² (0~120 km/h);
- ③续航里程不低于1 000 km。

以一系列四编组列车为例开展牵引分析及计算, 得到牵引及制动过程的曲线如图2所示。进一步对车辆牵引、制动及匀速过程的功率及能耗进行分析, 结果如表2所示。

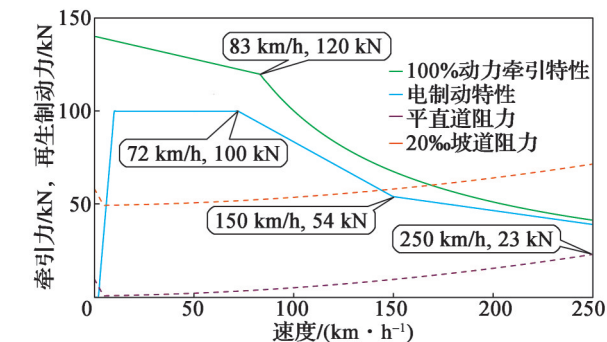


图2 牵引及再生制动特性曲线

图2 牵引及再生制动特性曲线

表2 250 km/h 高速列车牵引制动能耗计算

工况		需求	备注
加速	母线侧牵引峰值功率/kW	3 345	加速
	母线侧牵引总能量/(kWh)	282.24	时间323 s
匀速(250 km/h)		母线侧总功率/kW	1 977
制动	母线侧制动峰值功率/kW	2 432	制动
	母线侧再生制动总能量/(kWh)	127.61	时间241 s

由表2可知, 氢能高速列车牵引和制动峰值功率较高但持续时间较短, 匀速运行工况下的总功率相对较低。高速列车运用里程长、站间距较大, 因此能量需求高, 匀速过程持续时间长。为同时满足列车不同工况动力及能量需求, 燃料电池输出功率应至少大于车辆匀速功率, 并选用高倍率动力电池进行功率及能量补充。

由表2数据可知, 车辆250 km/h匀速行驶总功率约为1 977 kW, 按车辆匀速运行4 h进行估算(续航里程1 000 km), 能耗约为7 908 kW·h。考虑当前技术水平, 燃料电池系统平均发电效率取45%, 氢气质量能量密度取低热值120 MJ/kg, 可进一步估算列车需配置的最低有效储氢量约为527.2 kg。以目前相对成熟的70 MPa、210 L储氢瓶为例, 为满足527.2 kg的有效储氢量需求, 整列车需配置68个储氢瓶, 储氢系统占用的车长空间尺寸约为36 m。参考复兴号动车组车体尺

寸进行评估,车顶空间可满足安装要求。高功率、大容量、高储氢量的氢动力系统需集成安装于车体之上。

根据动力配置方式,主要可分为动力分散式与动力集中式两种技术路径。动力分散式是将氢动力系统部件分散布置在列车每节车厢,动力集中式是增加一节车厢集中布置氢动力系统部件。

目前,已投入运营的氢能列车多采用动力分散式布置,以阿尔斯通 Coradia iLint 为代表,其动力布局如图 3 所示。该车型将储氢系统与燃料电池系统置于车顶,以利于氢气的泄放与扩散;DC/DC 变换器及动力电池则布置于车下。动力分散式布置方式可充分利用列车空间和轴重,不影响车内布局,但由于各车厢需独立集成,控制、冷却、密封等功能均无法一体化集成设计,系统总质量与体积均较大。

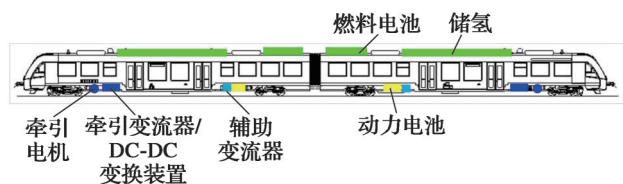


图 3 Coradia iLint 氢能列车动力布局示意图

Fig. 3 Powertrain layout of the Coradia iLint hydrogen-powered train

施泰德 Flirt H2 列车采用动力集中式布置,其动力布局如图 4 所示。该车将储氢系统和燃料电池系统集中布置于 1 节车厢并将该车厢编入列车,动力电池布置在其他车厢顶部。动力集中式布置可充分实现系统集成,控制与冷却可一体化设计,系统总质量与体积较小,但新增车厢使列车长度增加,列车运行阻力增大,对外接口(如车站)变化较大,且编入动力车后车内布局变化较大。

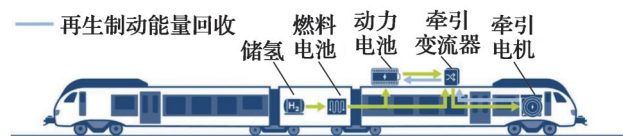


图 4 Flirt H2 氢能列车动力布局图

Fig. 4 Powertrain layout of the Flirt H2 hydrogen-powered train

综上所述,氢能驱动高速列车能耗、功率大幅提升,对氢动力系统与整车集成提出更大挑战,需针对体积及轻量化等开展深入研究,同时结合项目需求及应用场景,统筹考虑列车性能、成本等因素确定合理集成方式。

2.3 减阻设计

高速列车减阻设计是动车组集成设计的关键技术,国内外已有大量研究成果^[13-16]。为方便分析,本文将高速列车单位运行阻力用一元二次函数表示,具体为

$$w_0 = A + Bv + Cv^2 \quad (1)$$

式中: w_0 为列车单位运行阻力; v 为列车速度; A 、 B 、

C 均为常数,通常由试验和经验获得。

式(1)中的常数项 A 代表列车运行时克服的机械阻力,包括轴承摩擦阻力、滚动阻力等;列车与轨道型式确定后,该常数项主要与列车质量有关。一次项 Bv 代表动量损失阻力,与列车设备通风量正相关,包括空调、废排装置、牵引变流器等设备用风;该一次项与列车运行速度呈正比。二次项 Cv^2 代表空气阻力,是列车高速运行时阻力的主要来源,与列车运行速度的平方成正比,与列车外形、横截面积、表面平顺度、编组长度等有关。由此可知,氢能高速列车高度或长度的增加,燃料电池通风散热格栅的设置,以及氢气快速安全扩散的通风孔设置都将引起列车运行阻力的增加。

以图 5 所示的燃料电池安装于车顶为例,这种设计增加了车体高度,使得车体横截面积增加,车辆在运行过程中的迎风面积与气动阻力明显增加;同时燃料电池结构及外形复杂,影响车顶平顺度,气流在燃料电池区域引发复杂气流场,局部气动阻力增大。

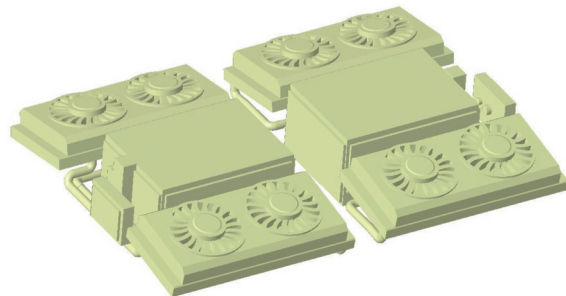


图 5 典型燃料电池外形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of typical fuel cell configurations

燃料电池散热通风量大对同样安装于车顶的空调系统及整车气流场有较大影响。设计时除了根据车顶区域压力及气流速度分布特性优化通风格栅等结构提高燃料电池散热效率、减少阻力部件之外,还应优化车顶布局,避免燃料电池散热排风产生的热空气对客室空气质量与空调制冷效率的影响。

图 6 提出了一种燃料电池通风格栅优化结构,通风孔采用椭圆形开孔,格栅采用沿车长方向布置的竖直格栅。仿真计算表明,进气口区域的表面压力分布更加均匀,有利于降低局部气体流动阻力,提高进气效率。

综上所述,氢能高速列车应优化结构,提高车体外形的平顺度,降低整车空气阻力;优化车顶空调与燃料电池的结构布置,降低动量损失阻力。

2.4 氢安全设计及应用

氢燃料电池的安全管理已具备完整的框架,涵盖加氢、储氢、排氢及整车紧急状态处理。国内外学者已围绕氢的泄漏及扩散、燃料电池故障诊断等开展了大量研究。文献[12]开展了不同孔径、不同质量流速的氢气泄放试验,结果表明氢释放流量为 1 g/s 时,封闭

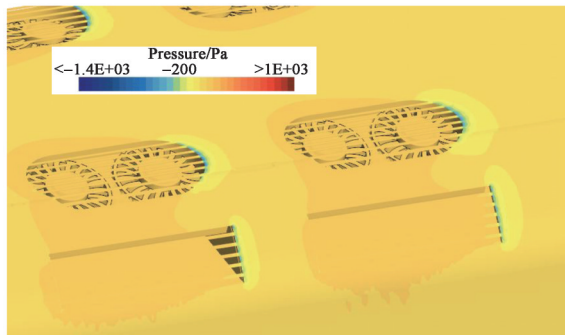


图6 燃料电池通风格栅优化

Fig. 6 Optimization of fuel cell ventilation grilles

空间形成约 40 m^3 的氢气混合爆炸团; 氢释放流量为 0.2 g/s 时, 房间内氢气体积分数未超过 4% 的可燃范围下限。文献[18]通过拟合函数进行泄漏点的质量流量估计及定位。文献[19]通过研究半封闭停车场内氢能客车氢泄漏扩散行为, 给出场地规划及氢气浓度传感器布局建议。

相关研究可为氢能高速列车的应用提供参考, 但由于其储氢量较氢能客车显著增加, 且应用场景更为复杂, 涉及车站、检修库、隧道等众多半封闭空间, 需进一步深入研究各应用场景的氢泄漏及扩散特性, 评估安全性并给出设计应用建议。

2.5 锂电池安全设计及应用

氢能列车的储能装置多采用锂电池。国内外学者对锂电池的安全性进行了一系列研究, 可为后续氢能列车设计提供参考。文献[22]研究比较了磷酸铁锂电池和三元锂电池热失控特征, 得出磷酸铁锂电池引发热失控的单位受热面积所需热量远高于三元锂电池的结论。文献[23]对某储能系统中的单体方形电池热失控过程进行模拟分析, 为储能系统气体传感器布置及气体排放结构设计提供参考。

钛酸锂电池常温循环寿命长且支持高倍率充放电, 是氢能列车锂电池选型的主要方向。相关试验研究^[22]证明, 20 Ah 方形钛酸锂电池过充热失控时, 会产生大量可燃和助燃气体, 电池表面最高温度达 792.7°C , 且单电池热失控会引起相邻电池热失控, 造成热失控扩展, 但在电池热失控前向电池箱内释放气体抑制剂, 当其体积分数达到 30% 以上时可避免电池起火燃烧。

氢能高速列车整车牵引功率高, 且受车辆空间与轴重限制, 动力电池通常采用轻量化、紧凑化布置方案。因此, 需根据高速列车实际需求开展锂电池选型, 并结合车辆应用场景进一步开展电池热失控相关风险分析与试验验证。

3 主要技术挑战

氢能高速列车研制存在氢动力系统集成、多源均

衡及容错控制、气动效应及隧道运行安全等关键技术挑战。

3.1 氢动力系统集成

为满足高功率输出与长续航里程的需求, 氢能高速列车所配置的氢动力系统在功率等级与能量等级上均有大幅提升, 进而导致系统质量与空间占用显著增加。初步评估, 四编组列车需增重约 30 t 。若系统采用分散式布置, 考虑安全等因素, 储氢系统适宜布置在车顶, 燃料电池等其他设备可布置在车顶或者车下。原有动车组车顶仅有空调、受电弓等设备, 氢能源列车增加的大量设备会导致布局困难, 尤其是头尾车; 同时, 考虑到列车运行稳定性等, 车顶高度拓展空间有限, 通常仅为 $500 \sim 600 \text{ mm}$ 。

因此, 为提升整车的有效能源储量, 应充分结合氢动力系统特点和整车的物理、逻辑以及功能架构, 系统性开展融合设计。燃料电池方面, 可通过电堆选型、辅机一体化、系统架构优化、设备与车体一体化集成等提升集成密度; 储氢系统方面, 选取储氢密度更高的 70 MPa IV 型瓶或液氢、储氢-车体结构协同重构设计提升储氢密度; 动力电池方面可通过 CTP (Cell to Pack) 集成等进行结构融合; 此外, 还应充分考虑安全防护需求, 包括动力电池热失控后对热扩散的隔离、抑制和防控, 储氢系统防护、氢泄漏扩散路径等要求。

3.2 多源均衡及容错控制

氢能高速列车电源侧拓扑架构复杂, 故障模式多样, 现有混合动力系统架构下的能量管理算法难以有效应对多源系统 (多堆燃料电池与多套动力电池) 在功率协同控制、全工况功率动态分配、故障条件下的容错运行及能量重调度等方面的诸多挑战, 因此需重点开展相关控制策略研究。

需建立高保真、精细化的大功率集群式氢动力系统级与整车级数字孪生模型, 为控制策略的研究和仿真验证提供平台; 设计分层、分域的顶层分配架构, 开发以系统氢耗量最小、多源部件老化均衡、母线电压稳定性最优及动态响应特性最优的多目标实时优化算法; 构建基于多传感网络的故障诊断和预测模型, 研究考虑氢安全约束的主动容错控制方法, 制定故障导向安全的分级故障应对策略, 实现故障快速隔离, 确保系统的供能冗余性与可靠性。

此外, 针对燃料电池性能易受外部环境 (海拔、温度等) 影响, 且高速列车运行地域跨度大、外部环境参数波动较大的特点, 应开展环境自适应控制策略研究, 保障系统在复杂环境工况下的高效稳定运行, 如针对 -40°C 低温环境的智能加热策略, 针对运行环境变化、气压变化的基于工况预测与主动动态补偿的控制策略等。

3.3 气动效应

氢能源列车安装燃料电池及储氢瓶后,车体横截面增大,整车气动阻力增加;同时,车体横截面高度的增加会产生一系列空气动力学效应,增加了整车设计的复杂性。

首先是横风气动效应,相同环境风速下,车体横截面高度增加,各节车厢(尤其是头车)所受气动横向力、倾覆力矩增大,车辆平稳性降低;其次是气动噪声问题,车顶燃料电池区域增加的通风格栅与风道壁面构成格栅-空腔结构,在列车高速运行时,该结构流体-声学耦合问题较为突出,格栅缝隙处的流场剪切振荡增强,导致表面噪声源强度增大,噪声向车内与远场传播,增大了车内噪声与车辆通过噪声。

还有局部湍流场与进气效率问题,氢能源车辆车顶可采用减小车辆气动阻力的导流罩,但燃料电池系统较高的冷却空气流量需求对导流罩、通风格栅的气动外形设计提出了低阻、低噪与空气流量兼顾的多目标设计要求。

基于此,需建立氢能源动车组精细化仿真模型,开展气动减阻设计,主要方向包括以下3个方面:

①外形平顺化,针对燃料电池复杂结构及外形,通过加装导流罩,实现列车外表面与车体轮廓平齐;

②通风格栅优化,以低阻、低噪和高进气效率为目标,合理设计格栅形状,优化格栅间距及排布;

③小型化设计,减小燃料电池尺寸与高度,优化风扇、风道等结构。

3.4 隧道运行安全

氢气是质量密度最小的气体,泄漏后会快速向上方逸散,若上方空间呈封闭/半封闭结构,则氢气会在此积聚,当其体积分数积累至4%时,即达到可燃范围下限,在此浓度下存在被静电、火花等引燃的风险。

轨道车辆车载储氢容量大,运用场景存在电气化设施多、隧道多、车辆检修和加氢站点相对集中^[21]的特点。隧道属于典型的封闭/半封闭空间,尤其是高速列车沿线常有长隧道。当前氢系统设计可以确保部件在气密失效、管阀件机械损坏等常规故障工况下实现氢气泄漏的快速检测与关断,但列车仍然存在极端灾害工况导致的氢泄漏风险。若列车在隧道内运行时发生无法快速阻断的氢气大量泄漏,则可能引发燃烧,严重时甚至存在爆炸风险。

由上文分析可知,氢安全问题是高速列车隧道内运行的主要挑战,可从以下3个方面开展车地协同安全防控设计与系统化评估:①强化列车在碰撞、侧翻、隧道内异物跌落击打、高速砾石击打、侵限异物撞击等极端灾害工况下的氢安全设计,通过结构设计优化、泄漏冗余检测等措施确保上述工况下系统结构完整性

与功能可靠性;②针对隧道涉氢应用的空白,开展隧道氢安全防控设计攻关,包括隧道防氢积聚结构设计、氢泄漏传感器布局、电气防爆设计、联动式通风及换气量设计;③基于行业FMEA、PHA等定性安全评估方法,通过流体仿真和实物试验开展隧道内氢气泄漏后的流体扩散定量分析,研究隧道内氢气体积分数分布、传感器布局有效性和通风换气量水平,并综合开展安全评估。

此外,研究泄漏风险低、安全性高的储氢技术也是确保隧道等封闭场景用氢安全的重要方向,主要包括以常温常压有机物的形式存储氢气、不存在游离氢气的有机液体储氢技术,以氢化物的形式将氢气存储在金属晶格内、游离氢气少的金属储氢技术,以及具备高储氢密度和低存储压力(≤ 1 MPa)的低温液氢技术。其中,低温液氢技术已经在国内外多种重卡车型上开展示范应用,是氢能卡车、轨道交通等重载、长续航车辆的重点发展方向。其采用的低压储氢方式一方面降低了容器本身的失效风险,另一方面降低了氢气泄漏的流量及速率,同时针对液氢储罐的保温技术可确保其静态日蒸发率相对可控。但是,与高压储氢相比,上述储氢技术还存在诸多技术和成本难题,如有机液体储氢的脱氢温度高、能耗大,金属储氢的质量储氢密度低、材料成本高,低温液氢的液氢蒸发率高、成本高等,且新型储氢技术的加氢设施、标准体系等尚不完善,这些方向均是后续研究的重点。

4 结束语

本文梳理了国内外氢能源轨道交通车辆发展现状,分析了时速250 km氢能高速列车系统集成关键技术,给出了氢动力系统集成、多源均衡及容错控制、气动效应及隧道运行安全等方面面临的挑战,相关结论主要包括:

①以速度不低于250 km/h,续航里程不低于1 000 km,牵引制动性能与既有电力高速动车组持平为设计目标,可计算得出一列四编组氢能高速列车持续运行至少需配置的有效储氢量约为527.2 kg,氢动力系统部件体积、质量显著增加,需优化拓扑结构,开展小型化、轻量化集成设计。

②氢能高速列车横截面或长度增加、燃料电池散热通风量增加引起整车气动阻力增加,应从列车外形平顺化、燃料电池通风格栅优化及部件小型化等方面开展气动减阻设计。

③应建立高保真精细化系统级及列车级数字孪生模型,开发多目标实时优化算法,构建基于多传感网络的PHM模型,采用基于预测和主动动态补偿的燃料电池控制策略,解决配置多套燃料电池及动力电池带来的多源均衡及容错控制问题。

④应强化异常工况下列车氢安全设计、隧道适应性设计及隧道内氢气泄漏后的流体扩散定量分析, 保障高速列车在隧道运行安全。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年) [EB/OL]. (2022-03-23) [2025-01-10]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm.
National Energy Administration. Medium and long-term plan for the development of the hydrogen industry(2021—2035) [EB/OL]. (2022-03-23) [2025-01-10]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm.
- [2] 国家能源局能源节约和科技装备司, 北京国氢中联氢能科技研究院. 中国氢能发展报告-2023[M]. 北京: 人民日报出版社, 2024.
Department of Energy Conservation and Science & Technology Equipment, National Energy Administration, Beijing Guohydro Zhonglian Hydrogen Energy Technology Research Institute. China hydrogen development report 2023 [M]. Beijing: People's Daily Press, 2024.
- [3] 舟丹. 我国氢能产业化发展现状[J]. 中外能源, 2022, 27(11): 62.
ZHOU Dan. Current status of hydrogen energy industrialisation in China[J]. Sino-global energy, 2022, 27(11): 62.
- [4] 冯聪, 罗聪, 明平文, 等. 氢燃料电池列车研究进展[J]. 内燃机与配件, 2022(19): 103-105.
FENG Cong, LUO Cong, MING Pingwen, et al. Research progress of hydrogen fuel cell train[J]. Internal combustion engine & parts, 2022(19): 103-105.
- [5] 陈燕荣, 王晓波. 氢燃料电池在现代有轨电车上的应用[J]. 铁道车辆, 2017, 55(4): 14-17.
CHEN Yanrong, WANG Xiaobo. Application of hydrogen fuel cells on modern tram cars[J]. Rolling stock, 2017, 55(4): 14-17.
- [6] 张胜杰. 交通部首次将氢能机车纳入准驾铁路机车范围——氢能机车迎来更大发展空间[N]. 中国能源报, 2024-09-02(7).
ZHANG Shengjie. The ministry of transport includes hydrogen-powered locomotives in the scope of licensed railway locomotives for the first time: hydrogen-powered locomotives usher in greater development opportunities[N]. China Energy News, 2024-09-02(7).
- [7] 宋迎迎, 邓旺强. 我国首列氢能智能城际动车组问世 [EB/OL]. (2024-09-24) [2025-02-10]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2024-09/24/content_234337.html.
SONG Yingying, DENG Wangqiang. China's first hydrogen-powered intelligent intercity EMU has been launched[EB/OL]. (2024-09-24) [2025-02-10]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2024-09/24/content_234337.html.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张国瑞, 李奇, 韩莹, 等. 基于运行模式和动态混合度的燃料电池混合动力有轨电车等效氢耗最小化能量管理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6905-6914.
ZHANG Guorui, LI Qi, HAN Ying, et al. Study on equivalent consumption minimization strategy based on operation mode and DDOH for fuel cell hybrid tramway[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6905-6914.
- [11] 蒲亮, 余海帅, 代明昊, 等. 氢的高压与液化储运研究及应用进展[J]. 科学通报, 2022, 67(19): 2172-2191.
PU Liang, YU Haishuai, DAI Minghao, et al. Research progress and application of high-pressure hydrogen and liquid hydrogen in storage and transportation[J]. Chinese science bulletin, 2022, 67(19): 2172-2191.
- [12] 韩玉, 韩斌. 氢燃料电池系统在轨道交通列车上的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 231-235.
HAN Yu, HAN Bin. Application of hydrogen fuel cell systems in rail transit trains[J]. Urban mass transit, 2025, 28(3): 231-235.
- [13] 何德华, 张岩, 白夜, 等. 动车组车体断面气动外形优化研究[J]. 铁道机车车辆, 2023, 43(4): 9-16.
HE Dehua, ZHANG Yan, BAI Ye, et al. Study on aerodynamic shape optimization of EMU body section[J]. Railway locomotive & car, 2023, 43(4): 9-16.
- [14] 马胜全, 何思俊, 支锦亦, 等. 高速列车局部外形气动优化设计研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(1): 19-23.
MA Shengquan, HE Sijun, ZHI Jinyi, et al. Research on aerodynamic optimization design of some part on high-speed train[J]. Railway locomotive & car, 2020, 40(1): 19-23.
- [15] 林鹏, 李桂波. 基于边界层减阻理论的高速列车抽吸气减阻特性数值研究[J]. 中国铁路, 2020(10): 71-77.
LIN Peng, LI Guibo. Numerical study on the aerodynamic drag reduction characteristics of high speed train suction based on the drag reduction theory of boundary layer[J]. Chinese railways, 2020(10): 71-77.
- [16] 柳宁, 李岩松, 龙金兰, 等. 高速列车流线型转向架与底部导流板的气动减阻效果研究[J]. 铁路科学与工程学报, 2024(1): 38-47.
LIU Ning, LI Yansong, LONG Jinlan, et al. Aerodynamic drag reduction of streamlined bogie and bottom deflector of high-speed train[J]. Journal of railway science and engineer-

- ing, 2024(1): 38-47.
- [17] LACOME J M, JAMOIS D, PERRETTE L, et al. Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area[J]. International journal of hydrogen energy, 2011, 36(3): 2302-2312.
- [18] 陈子烁, 曾胜. 基于 CFD 的封闭空间内氢气泄漏质量流量估计及泄漏点定位方法研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(5): 135-139.
- CHEN Zishuo, ZENG Sheng. Research on estimation of hydrogen leakage flow and leakage point localization method in enclosed space based on CFD[J]. Automation application, 2025, 66(5): 135-139.
- [19] 陈国华, 谢沐霖, 张强, 等. 停车场内氢能客车氢泄漏爆炸事故及风险分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 84-94.
- CHEN Guohua, XIE Mulin, ZHANG Qiang, et al. Study on hydrogen leakage-explosion and risk of hydrogen bus in station[J]. Journal of south China university of technology(natural science edition), 2024, 52(2): 84-94.
- [20] 中国科学院科技战略咨询研究院. 美国能源部更新氢能和燃料电池多年期计划[EB/OL]. (2024-10-28) [2025-02-10]. https://casisd.cas.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2024/kjqykb2407/202410/t20241028_7409469.html.
- Institute of science and development, Chinese academy of sciences. The U. S. department of energy has updated its multi-year plan for hydrogen energy and fuel cells[EB/OL]. (2024-10-28) [2025-02-10]. https://casisd.cas.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2024/kjqykb2407/202410/t20241028_7409469.html.
- [21] 王中钢, 樊运新, 陈卓, 等. 氢能源动力轨道车辆氢泄漏安全防控技术分析[J]. 机车电传动, 2025(3): 11-21.
- WANG Zhonggang, FAN Yunxin, CHEN Zhuo, et al. Analysis of safety prevention and control techniques for hydrogen leakage in hydrogen-powered rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 11-21.
- [22] 朱鸿章, 吴传平, 周天念, 等. 磷酸铁锂和三元锂电池外部过热条件下的热失控特性[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 201-210.
- ZHU Hongzhang, WU Chuanping, ZHOU Tiannian, et al. Thermal runaway characteristics of LiFePO₄ and ternary lithium batteries with external overheating[J]. Energy storage science and technology, 2022, 11(1): 201-210.
- [23] 甄箫斐, 王贝贝, 张小虎, 等. 锂电池储能系统热失控气体生成及扩散规律研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 1986-1994.
- ZHEN Xiaofei, WANG Beibei, ZHANG Xiaohu, et al. Study on the generation and diffusion law of thermal runaway gas in lithium battery energy storage system[J]. Energy storage science and technology, 2024, 13(6): 1986-1994.
- [24] 董海斌, 尹国瑞, 安普春, 等. 钛酸锂电池模组热失控扩展抑制技术研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(6): 779-782.
- DONG Haibin, YIN Guorui, AN Puchun, et al. Research on thermal runaway propagation suppression technology of lithium titanate battery module[J]. Fire science and technology, 2021, 40(6): 779-782.

Study of key integration technology for hydrogen-powered high-speed trains

JIAO Jinghai¹, TAO lin¹, LIU Fei¹, ZHANG Guorui¹, DONG Kan², ZHANG Ye¹

(1. Technical Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China; 2. Locomotive and Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China))

Abstract: Driven by the hydrogen energy development strategies of various countries, the integration of hydrogen technology with rail transit is gaining traction. At present, major world economies are actively conducting technical research and engineering application explorations in this field. This article investigated the developments of hydrogen-powered rail transit vehicles both domestically and internationally. A top-level technical specification—featuring a speed ≥ 250 km/h and a range $\geq 1,000$ km—was used to assess the power and energy consumption requirements of hydrogen power systems. Key technologies arising from challenges such as high power intensity, mass, and significant spatial constraints were analyzed, including the optimization of power system topology, power integration, drag reduction design, and the safety design of hydrogen and lithium batteries. Furthermore, the key technical challenges associated with developing hydrogen-powered high-speed trains were examined. The study indicates that while existing technology has achieved notable results in integrating hydrogen power into low-speed trains, the development of hydrogen-powered high-speed trains still requires overcoming critical technological challenges such as system integration, multi-source balancing and fault-tolerant control, aerodynamic effects, and tunnel operational safety. These findings provide a technical research foundation for the overall vehicle design of hydrogen-powered high-speed trains.

Keywords: high-speed train; system integration; drag reduction design; hydrogen power system; hydrogen safety; battery safety