

载具用液氢系统研制创新方法

卜玉, 尹奇志

北京航天试验技术研究所, 北京 100074

DOI: 10.61369/SSSD.2025080015

摘 要 : 液氢作为一种高能液体燃料, 可满足氢能载具长运输里程的要求。载具用紧凑型液氢系统自主创新和航天产业的不断发展对创新能力提升和产品开发思维转变提出了新要求。本文锚定液氢技术路线与场景化应用牵引, 聚焦载具用液氢系统研制创新方法和体系建设, 形成“需求牵引”“数字化赋能”“模块化设计+液氢试验验证”等载具用液氢系统研发制造的产品配套方案, 助力氢能产业链更安全、更高效和可持续发展。

关 键 词 : 载具; 液氢系统; 研制方法

Research on Innovation Methods for Vehicle Liquid Hydrogen System Development

Bu Yu, Yin Qizhi

Beijing Institute of Aerospace Test Technology, Beijing 100074

Abstract : Liquid hydrogen, as a high-energy liquid fuel, can meet the requirements of long-distance transportation of hydrogen vehicles. The independent innovation of compact liquid hydrogen systems for vehicles and the continuous development of the aerospace industry have put forward new requirements for improving innovation capabilities and transforming product development thinking. This article anchors the route of liquid hydrogen technology and the traction of scenario based applications, focusing on innovative methods and system construction for the development of liquid hydrogen systems for vehicles, forming product matching solutions for the research and manufacturing of liquid hydrogen systems for vehicles such as "demand driven", "digital empowerment", "modular design+liquid hydrogen test verification", etc., to help the hydrogen energy industry chain develop more safely, efficiently, and sustainably.

Keywords : vehicle; liquid hydrogen system; development method

一、载具用液氢系统产品特征分析

氢燃料电池为电驱载具提供了新的电源形式, 由此氢能成为锂电之外另一个重要的新能源领域^[1]。对于氢能载具而言, 液态氢的应用优势在于, 作为燃料在长距离大载重的重型载具、长途运输、氢能飞机中潜力较大, 能从公路车辆到飞机等多种交通工具提供动力, 目前全球已有部分液氢动力载具投入运营, 如戴姆勒卡车、MF Hydra 渡轮、Suiso Frontier 运输船、HY4 飞机等。

然而液氢的存储和使用面临着低温存储要求、燃料分配安全性等技术难题, 技术难题又需要通过液氢系统产品来解决。载具用液氢系统是指, 从液氢加注口至氢气使用装置进口, 与氢加注、储存、供应和控制有关的装置的集合。典型的载具用液氢系统如图1所示。

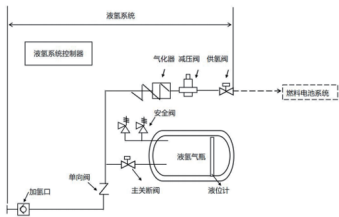


图1 典型的载具用液氢系统示意图

载具用液氢系统研发属于高效储供小型液氢产品开发任务, 其具有跨领域、新技术、高难度、重效益的特点。液氢系统研制过程中应适应氢能行业发展趋势, 兼具可行性和前瞻性。应涵盖液氢加注和供气全过程, 保证性能完整、功能完备。鉴于氢易燃易爆的特性及与载具的氢电耦合使用环境, 氢安全直接影响载具安全性。作为新产品研制, 载具用液氢系统应侧重液氢的安全性。如载具通常有高压电装置, 本来可燃气体设备和电器设备存在电火花引起火灾的风险, 安全设计的准则是将它们分开。但是, 从载具原理上来说, 这两种设备同时都安装在有限的载具空间内, 保证安全的挑战更加严峻。

二、面向载具需求的数字化赋能液氢产品研制方法

在不同的载具场景中, 液氢系统研制需求各有不同。比如在重型车辆场景, 液氢系统需要维持三天至五天不对外排放氢气, 对液氢气瓶绝热性能要求高。重型车辆匹配的大功率燃料电池需要超临界的氢气压力, 液氢系统需要增压稳压功能。在无人机用液氢系统场景下, 液氢气瓶仅需要满足无人机巡航运行的动态热平衡的绝热要求, 续航时间几个小时, 而对液氢系统轻量化的要求更高, 液氢系统需要高效利用存储空间并轻量化。船用液氢系

统需要坚固耐用，能够承受颠簸。这些特定需求使得液氢系统在多场景载具应用变得更加灵活与高效。

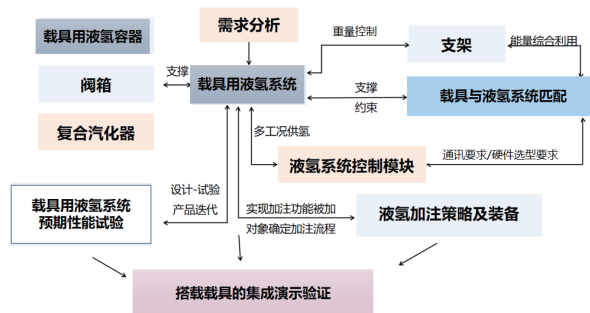


图2 面向需求的载具用液氢系统研制流程

数字化设计技术凭借其高度集成与自动化的特点，实现了从几何建模到性能仿真的一体化设计流程^[2]，贯穿载具用液氢系统设计流程。

(1) 在液氢系统阀箱模块开发中，集成化平台缩短了各规格阀门组件的设计时间。通过标准化设计模板和参数化工具，技术支持复杂零件的快速生成和修改，减少了重复性工作。

(2) 详细设计阶段是数字化技术的核心应用环节，贯穿几何建模、物理仿真和性能优化等多个方面。在几何建模中，参数化设计工具如 CATIA 或 SolidWorks 被广泛使用。有限元分析用于模拟零部件在实际工况下的受力情况。例如：对液氢系统承力结构进行疲劳寿命分析，结合模拟结果优化材料分布，减少高应力区域，从而提高零部件的可靠性和耐久性。流体动力学仿真则在液氢系统设计中表现突出，通过流体仿真优化管道的几何形状和流体分布，提升液氢系统气化传热效率。

(3) 如图3所示，在液氢系统和载具底盘装配结构开发过程，数字化高性能装配技术可有效预示装配结构干涉，使装配不协调问题提前暴露，便于产品制造公差要求的确定和实际实施装配过程变形控制与加工补偿策略的制定。

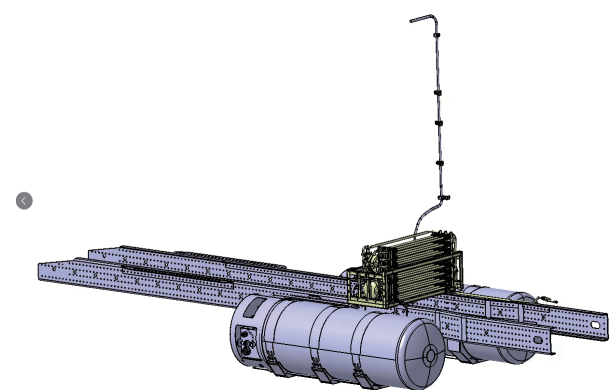


图3 液氢系统和载具底盘的集成设计

三、建立“模块化产品设计 + 液氢真实试验验证”的产品迭代模式

模块化产品方法既能高效地满足个性化需求，又能保持低成本。模块化产品设计的核心理念是在功能模块规划的基础上的^[3]，

通过模块的组合形成一系列不同的产品，满足不同载具场景的定制要求。

典型的载具液氢系统按功能划分为液氢气瓶、阀箱、气化缓冲、控制、承力结构五大模块，如图4所示。其中：液氢气瓶部件包括气瓶及配件。阀箱模块包括液位计、压力表、安全阀、低温截止阀、加氢口等。气化缓冲模块包括气化器、液空收集板和缓冲装置。管路及配件应包括：加氢口、单向阀、主关断阀、减压阀、供氢阀、连接管路等。控制模块主要是压力传感器、温度传感器等部件，可设置液氢系统控制器。承力结构是指液氢系统和整车底盘连接的支架结构。

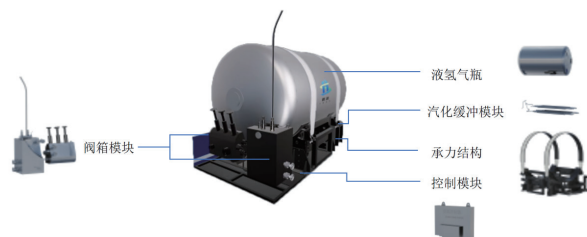


图4 典型的载具用液氢系统功能模块

上述面向场景需求的功能模块配置方法可以通过数字化模块的更换和重新组合来实现灵活切换。其基本理念都是在共性功能模块基础上通过定制化功能模块的选择、组合、检查及确认，尽可能重复利用已有部件和空间，达到面向不同载具场景需求的液氢系统定制化设计，载具用液氢系统模块化产品设计方法如图5所示^[4-7]。

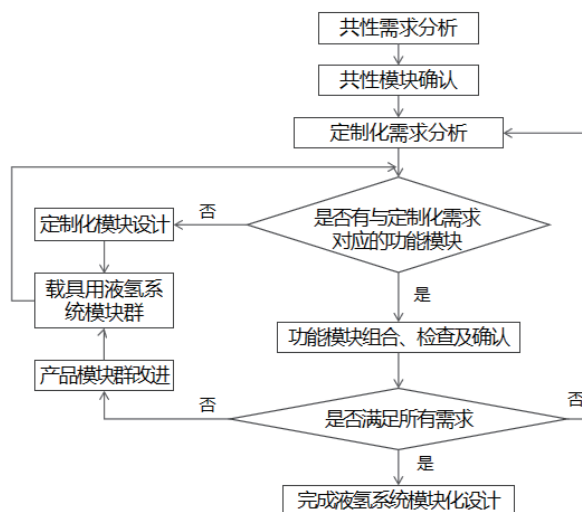
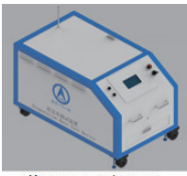


图5 基于模块化产品设计的载具用液氢系统设计流程

就“研制 + 测试”这一产品迭代模式，主要包括两个方面：一是，基于液氢产品技术新、跨领域、难度大的特点，真实介质的产品性能测试在有效检验产品性能的验证方法。如，载具用液氢系统需要完成预期性能试验、绝热性能测试、火烧、振动、跌落等安全性试验验证（图6所示）。二是，集成测试是产品最关键的一步测试，如果问题较多的产品进入集成测试环节就会造成人力、物力资源的浪费。因此，产品测试要涵盖核心单体测试、原理机预测测试和功能样机测试等过程，将测试过程贯穿产品研制过程^[8]。



预期性能试验



蒸发率测试装置



火烧试验工位



振动试验工位

图6 载具用液氢系统试验验证能力建设

四、展望

未来，聚焦公路、水面、空中多维度应用场景，完善全场景液氢系统体系型谱，为氢能在交通领域的规模化应用提供系统级解决方案，助力氢能载具从“单点示范”迈向“全域覆盖”^[9,10]。

参考文献

[1] 韩秉睿. 氢内燃机和氢燃料电池的应用 [J]. 汽车画刊, 2024, (03): 36-38. DOI:CNKI:SUN:QCHK.0.2024-03-014.

[2] 任彭枫. 产品开发管理方法 流程 工具 [M].2018.

[3] 张虎翼, 等. 模块化视角下产品的创新路径研究 [J]. 机械设计, 2022, 39 (3): 46-52.

[4] 车载液氢系统整车匹配安全要求 DB11/T 2304-2024[S].2024.

[5] 液氢燃料电池电动商用车 车载液氢系统 T/BJQC 202401—2025[S].2025.

[6] 范悦谦, 王超. 车载液氢冷能利用系统设计与分析 [J]. 科学技术创新, 2023(12):42-46.DOI:10.3969/j.issn.1673-1328.2023.12.012.

[7] 姚若军, 高啸天. 氢能产业链及氢能发电利用技术现状及展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(4):7.DOI:10.16516/j.vedi.issn2095-8676.2021.04.002.

[8] 邵艳波, 宋义伟, 张志贵, 等. 氢气低温液化与储运技术进展 [J]. 低温与超导, 2023, 51(6):55-61.

[9] 陈良, 周楷森, 赖天伟, 等. 液氢为核心的氢燃料供应链 [J]. 低温与超导, 2020, 48: 1-7.

[10] 黄宣旭, 练继建, 沈威, 等. 中国规模化氢能供应链的经济性分析 [J]. 南方能源建设, 2020, 7: 1-13.