

燃料电池客车氢安全方案设计

王丙虎¹, 陈振国¹, 吴光平^{1,2}, 刘康¹, 刘雷¹

(1. 中通客车股份有限公司, 山东 聊城 252000; 2. 中北大学, 太原 030051)

摘要:氢安全一直是氢燃料电池汽车安全中的关键问题。本文分别从整车控制、电气、结构等方面展开氢安全方案设计,以提高氢燃料电池汽车的安全性。

关键词:氢燃料电池客车; 氢安全; 整车控制

中图分类号:U461.91

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)06-0001-05

Design of Hydrogen Safety Plan for Fuel Cell Buses

WANG Binghu¹, CHEN Zhenguo¹, WU Guangping^{1,2}, LIU Kang¹, LIU Lei¹

(1. Zhongtong Bus Co., Ltd., Liaocheng 252000, China; 2. North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Hydrogen safety has always been a key problem in the safety of hydrogen fuel cell vehicles. This paper designs the hydrogen safety plans based on different aspects, including vehicle control, electrical, and structure to improve the overall safety of hydrogen fuel cell vehicles.

Key words: hydrogen fuel cell bus; hydrogen safety; vehicle control

氢燃料电池汽车的燃料是氢气。由于氢气本身具有易燃、易爆、易扩散、易泄漏的特性,使得氢燃料电池汽车氢系统的安全性成为首要问题^[1-5]。因此,为了氢燃料电池汽车的推广和使用,有必要对其氢系统的安全性进行研究。已有文章在氢燃料电池汽车集成布置、结构设计、氢气泄漏检测等方面对氢安全进行了探讨^[6-7],但相关氢安全可行性方案仍不够完善。本文针对中通氢燃料电池汽车氢安全问题,分别从整车控制、电气及结构设计层面展开氢安全设计,以满足不同类型燃料电池客车对氢安全的需求,保障燃料电池车辆安全、稳定行驶。

1 氢安全方案整车控制层面设计

整车控制层面分别从加氢、储氢、排氢、燃料电池紧急状态4个方面采取安全控制策略对氢气进行安全控制。

1) 加氢安全控制策略(如图1所示)为:①检测加氢过程中氢气瓶中氢气的温度 T 并计算出实时温升梯度 T_v 和压升梯度 P_v ,当 $T_v > T_{vl}$ (T_{vl} 为温升梯度

阈值,本文为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)时,氢系统控制器发出警告信号,仪表发出蜂鸣声并显示警告字样;另外,氢系统控制器通过红外信号与加氢站进行通讯,将 T_v 和 P_v 反馈给加氢站,加氢站执行升温控制和分级加注等控制策略。②实时监测氢气瓶中氢气压力变化,计算上一时刻及目前时刻的压差值 ΔP_p ,当 $\Delta P_p > \Delta P_{pl}$ (ΔP_{pl} 为压差阈值,本文为 14 MPa)时,整车加氢次数 n 加1,当 $n > n_1$ (n_1 为加氢次数阈值,本文为 $7\text{ }500$)时,氢系统控制器发出警告信号,仪表发出蜂鸣声并显示警告字样。

2) 储氢安全控制策略(如图2所示)为:当燃料电池车辆不使用燃料电池而只使用动力电池作为动力源进行整车驱动时,氢系统控制器检测氢气瓶中的高压 P_p 及管路中的低压 P_g ,并计算出氢气瓶中的实时压降梯度 P_{vp} 及管路中的实时压降梯度 P_{vg} 。当 $P_{vp} > P_{vpl}$ (P_{vpl} 为瓶压压降梯度阈值,本文为 $0.03\text{ MPa}/\text{min}$)或 $P_{vg} > P_{vgl}$ (P_{vgl} 为管压压降梯度阈值,本文为 $0.1\text{ MPa}/\text{min}$)时,氢系统控制器发出警告信号,仪表发出蜂鸣声并显示警告字样。

收稿日期:2023-07-12。

第一作者:王丙虎(1991—),男,硕士;工程师;主要从事燃料电池整车技术开发工作。E-mail:13863516315@163.com。

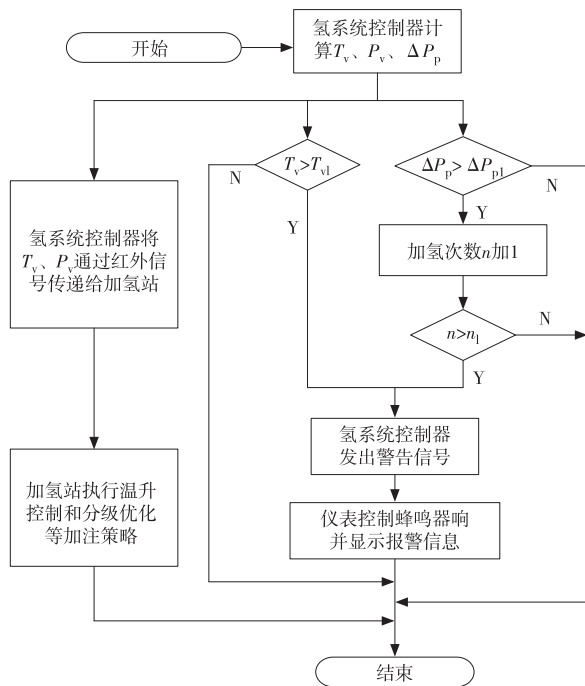


图1 加氢安全控制策略

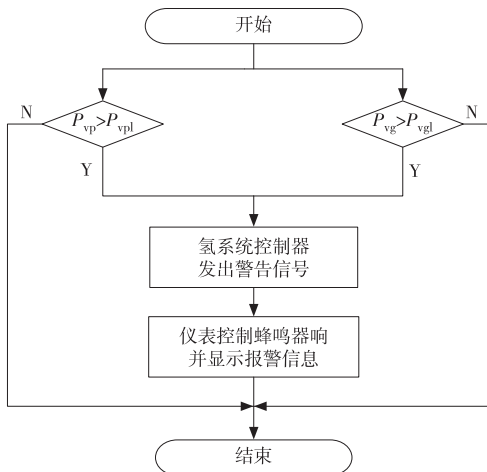


图2 储氢安全控制策略

3) 排氢安全控制策略(如图3所示)为:在燃料电池尾排口加装氢气浓度传感器,当燃料电池系统运行时,氢控制器检测尾气排管中的氢气浓度 C_w ,当 $C_w > C_{wl}$ (C_{wl} 为尾排氢气浓度阈值,本文为 40 000 ppm)时,氢系统控制器发出警告信号,燃料电池系统控制器接收到此信号后通过修正控制策略对尾排氢气浓度进行调整,若发出警告信号 5 s 后 C_w 依旧大于 C_{wl} ,氢系统控制器将主动关闭氢控制系统中的主阀和瓶阀,不再响应燃料电池系统控制器指令,视燃料电池系统控制器策略修正无效。

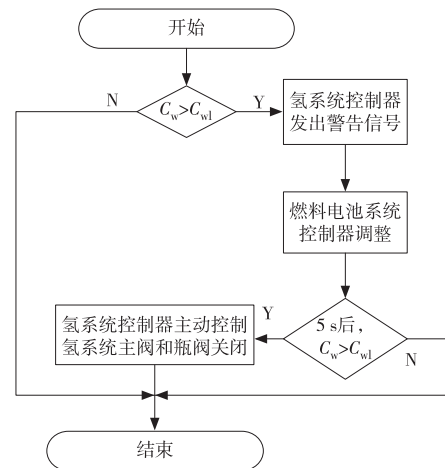


图3 排氢安全控制策略

4) 整车紧急状态安全控制策略(如图4所示)为:整车前围装有碰撞传感器且仪表装有急停开关,氢系统控制器检测到碰撞信号后,将主动关闭氢控制系统中的主阀和瓶阀,不再响应燃料电池系统控制器指令;仪表上的急停开关由驾驶员操控,当遇到紧急状况不得不切断燃料电池系统时,按下急停开关,氢系统控制器检测到急停信号后,主动控制氢系统主阀和瓶阀关闭,不再响应燃料电池系统控制器指令。

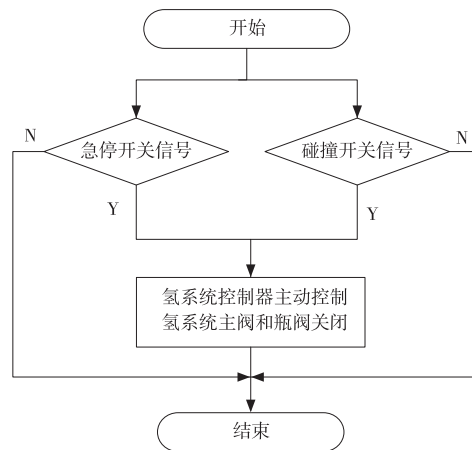


图4 整车紧急状态安全控制策略

5) 加氢、储氢、排氢和整车紧急状态共有安全控制策略(如图5所示)为:监测氢气瓶中的温度 T ,监测氢气瓶中的高压 P_p 、低压 P_{pl} ,监测管路中的高压 P_{gg} 、低压 P_g ,监测加氢口、乘客舱、氢瓶、后舱处的氢气浓度 C ,监测温度传感器数字量 T_{szl} 、压力传感器数字量 P_{szl} 、氢气浓度传感器数字量 C_{szl} 等,并将监测信号与其阈值进行比较,判断故障状态并对故障进行分

级处理。当氢系统控制器判断为非最高级故障时, 氢系统控制器给予警告; 当氢系统控制器判断为最高级故障时, 氢系统控制器主动控制氢系统主阀和瓶阀关闭, 不再响应燃料电池系统控制器指令。

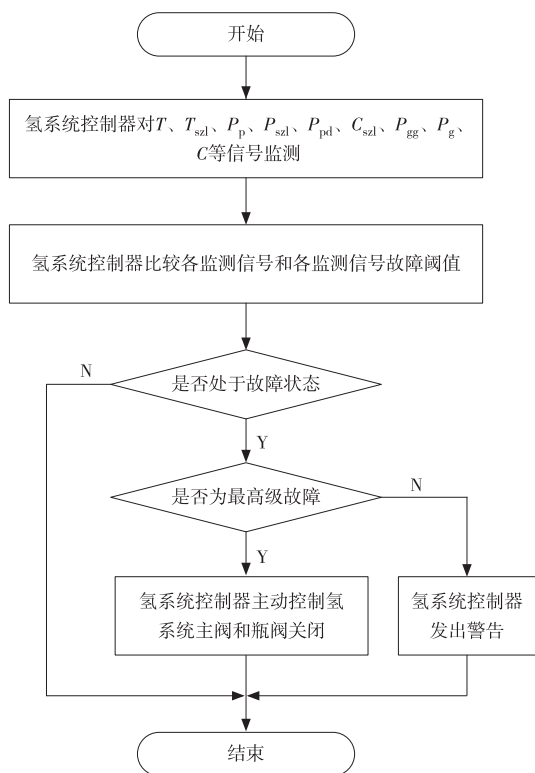


图5 各个状态共有安全控制策略

6) 对氢安全控制策略中氢系统阀门的开启和关闭进行测试。利用发光二极管代替主阀和瓶阀(模拟六瓶组氢系统, 6个瓶阀和1个主阀), 发光二极管的正极连接24V电源, 负极连接氢系统控制器相应的接地输出。当氢控制器输出接地信号时, 发光二极管亮, 代表阀门打开; 若氢控制器未输出接地信号, 即管脚悬空, 发光二极管不亮, 代表阀门关闭。

将氢系统控制器与其线束端子连接, 并给控制器供电电源和激活电, 利用电脑及CANalyzer设备模拟发送一个尾气排管中大于 C_{wl} 的氢气浓度值、急停开关信号、碰撞开关信号、最高故障等级信号。报文发送后, 现场观察相应的发光二极管的响应动作是否正确。由图6左图可以看出, 各个二极管全亮, 代表各个阀门处于打开状态; 当各个模拟信号发送后, 二极管由亮状态变为暗状态, 说明氢系统主阀及瓶阀关闭

(图6右图)。



图6 发光二极管模拟瓶阀及主阀开关图示

2 氢安全方案电气层面设计

主要通过电气层面设计实现整车氢系统供电或断电情况下的全时域监控。全时域监控涉及的电器部件包括电池管理系统(BMS)、整车控制器(VCU)、氢管理系统(HMS)、燃料电池控制器(FCU)、降压DC/DC、远程监控终端。全时域监控包括如下情况:

1) 整车正常上电。BMS接收到整车ON挡信号, 整车蓄电池或3kW DC/DC或6kW DC/DC给控制器供电, 各控制器处于激活状态。

2) 整车断电情况下或者BMS没有接收到整车ON挡信号。此时降压DC/DC在满足条件下输出电压为24V的电给各控制器供电。具体供电设置为: 在一个断电周期内首次DC/DC可以通过自唤醒激活控制电路, 给各个控制器供电。首次自唤醒时间是DC/DC出厂设置的0.5h。自唤醒后, 在下个唤醒周期内, DC/DC接收BMS设定的唤醒时间对自身进行唤醒。后续每次自唤醒激活后, DC/DC要重新接收BMS的唤醒时间设置, 以此不断重复。若DC/DC激活后未接收到BMS所设定的唤醒时间, DC/DC唤醒时间按照上一个唤醒周期内BMS设定的唤醒时间进行唤醒。若DC/DC所接收BMS唤醒时间超出DC/DC设定的唤醒时间阈值, 则DC/DC不响应, 并将唤醒时间设置为上个周期BMS设定的时间唤醒。

如图7所示, BMS、VCU、HMS、FCU、远程监控终端都是连接在同一条网络上进行CAN通讯和信息交互。整车正常供电、断电或者BMS没有接收到整车ON挡信号的情况下, 各控制器都能处于激活状态并且开始收发报文。远程监控平台可以接收车辆各控制器状态信息、有效捕捉车辆故障报文, 根据故障严重程度和级别进行一键预警, 并通知车辆管理人员。

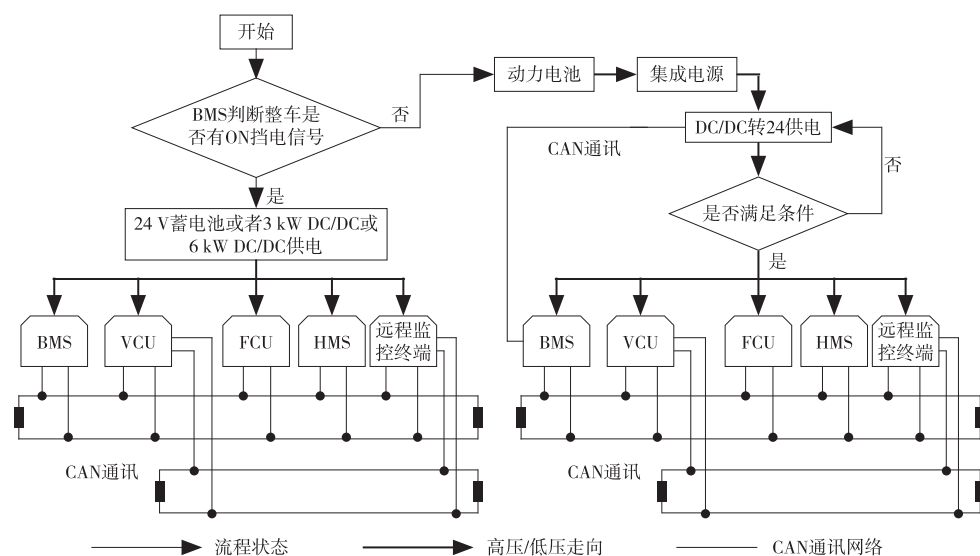


图7 全时域监控电气架构

3 氢安全方案结构层面设计

结构层面的氢安全设计主要针对的是氢气瓶底置的情况。由于空间相对密封,氢气易聚集,且处于车辆的易碰撞区域,危险系数高^[8-9]。因此,综合考虑主动与被动安全设计,从防止氢气泄漏、氢气泄漏后的停机工作、减少氢气聚集、降低火源及爆炸的损坏等层面最大程度地保证整车安全。

其中主动安全设计如图8所示:

1) 在氢瓶封闭空间两侧设计防撞梁,防撞梁的数量可灵活掌握。氢瓶瓶阀一侧防撞梁垂直投射面积应覆盖氢系统各阀门及管路,另一侧防撞梁垂直投射面积应覆盖氢瓶最突出位置,实现防撞梁安全设计的应用最大化。

2) 在氢瓶封闭空间两侧侧舱门设置竖直透气孔。当车辆运行时,竖直透气孔有助于气体的流通。透气孔覆盖整个氢瓶封闭空间两侧舱门。

3) 氢瓶封闭空间上下侧应采用防爆材质,材质为纤维水泥复合钢板。

被动安全设计包括:

1) 图8所示的氢瓶密闭空间内配置自动灭火装置。灭火器安装在氢瓶封闭空间顶部,探测器可检测到火焰、烟雾、温度等信号。当氢系统控制器接收到探测器阈值信号后,氢系统控制器通过硬线控制灭火器释放并控制主阀及瓶阀关闭(控制如图9所示)。

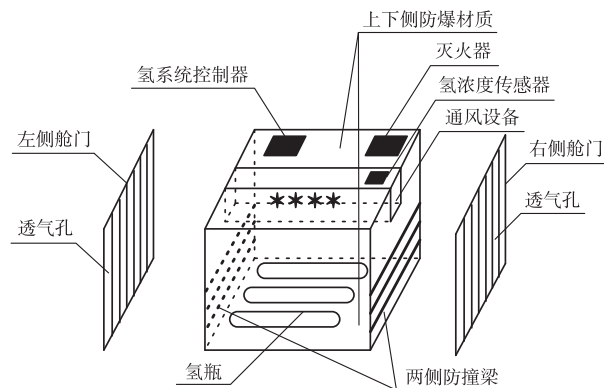


图8 氢瓶封闭空间氢安全结构

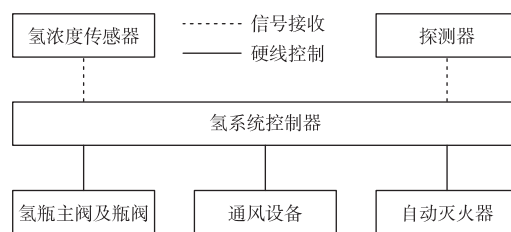


图9 氢瓶封闭空间氢安全控制示意图

2) 图8所示的氢浓度传感器,置于中间气瓶瓶口阀正上封闭空间的顶部,用于检测封闭空间内氢气浓度。氢系统控制器对氢浓度传感器检测到的氢气浓度数值进行判断,当超过浓度阈值,氢系统控制器通过硬线控制氢系统主阀和瓶阀关闭(控制如图9所示)。

3) 图8所示的通风设备,置于氢气瓶安装空间顶部中点并延伸至封闭空间两侧。当检测到氢气浓

度超过浓度阈值,氢系统控制器通过硬线控制通风系统工作(控制如图9所示)。

对氢气瓶安装密闭空间的氢安全控制效果进行测试。利用电脑及 CANalyzer 设备分别模拟发送氢气浓度阈值及探测器阈值信号报文,并通过 CANalyzer 读取氢气瓶主阀及瓶阀、通风设备及自动灭火器工作状态。

采用六瓶组氢系统(6个瓶阀和1个主阀)的测试结果如图10所示。当触发探测器阈值信号后,主阀、瓶阀及自动灭火器状态信号都检测到上升沿;当触发氢浓度阈值信号后,主阀、瓶阀及通风设备状态信号都检测到上升沿,说明控制有效。

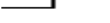
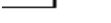
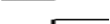
信号	触发探测器	触发氢浓度
探测器阈值信号		
氢浓度阈值信号		
主阀状态		
瓶阀1状态		
瓶阀2状态		
瓶阀3状态		
瓶阀4状态		
瓶阀5状态		
瓶阀6状态		
自动灭火器状态		
通风设备状态		

图10 氢瓶封闭空间氢安全控制测试结果

4 结束语

整车控制层面的氢安全设计方案需预判出加氢、储氢、排氢、燃料电池紧急状态等各个层面的危险因

素,能够及时对危险因素进行报警并主动关闭氢系统主阀与瓶阀。电气设计层面的氢安全设计方案能够实现氢燃料电池汽车的全时域监控,不管是整车正常上电还是断电情况下,都能有效捕捉车辆故障信息并实现故障预警。结构设计层面的氢安全方案设计综合考虑整车主动安全及被动安全,从整车防撞、防爆、防火、避免氢气聚集等各个层面保证整车氢安全。

参考文献:

- [1] 郭森杰,杨燕红,姚露,等. 车用氢燃料电池系统性能测试评价标准体系分析[J]. 汽车实用技术,2023,48(5):194-198.
- [2] 田晓冲. 氢燃料电池产业发展现状及需求分析[J]. 建设机械技术与管理,2023,36(3):89-90.
- [3] 肖飞. 氢燃料电池原理及应用[N]. 科学导报,2022-09-13(B02).
- [4] 徐志红,朱晓雯,徐彩妮. 氢燃料电池的结构特性与氢燃料电池汽车的发展概述[J]. 时代汽车,2023(13):88-90.
- [5] 刘兰,王军雷. 基于专利分析的氢燃料电池电堆结构研究[J]. 汽车文摘,2022(3):1-6.
- [6] 吴兵. 燃料电池汽车氢安全的研究与设计[J]. 上海汽车,2013(12):5-8.
- [7] 姜峻岭. 燃料电池汽车氢安全集成设计与控制策略研究[J]. 上海汽车,2023(3):5-8.
- [8] 闫喜江,杨金华,成信聪,等. 大客车氢燃料电池仓结构碰撞安全分析[C]//四川省汽车工程学会,成都市汽车工程学会. 四川省第十五届汽车学术年会论文集,2021:112-117.
- [9] 雷霆,高婧. 氢燃料电池乘用车国内外研究发展现状及趋势分析[J]. 上海汽车,2022(2):3-8.