

燃料电池汽车制动灯智能触发系统的开发与实验研究

钟辉煌 王 敏 王士英

海南海马汽车有限公司 海南 海口 570216

摘 要: 本研究聚焦于燃料电池汽车制动灯智能触发系统的开发。鉴于燃料电池汽车动力结构和制动过程的独特性,以及现有制动灯控制技术的缺陷,通过理论分析、系统设计与实验验证的方法,构建了由车载传感器、整车控制器(VCU)、车身电子控制器(BCM)和制动灯组成的系统架构。该系统利用多参数融合智能判断算法,综合车辆状态和环境信息,精准判定制动行为。经多工况实验验证,系统在不同制动工况及复杂环境下均能及时、准确地触发制动灯,显著提升了燃料电池汽车制动灯控制的准确性与及时性,增强了行车安全性。未来有望通过引入深度学习算法、优化硬件电路和软件通信协议、研发先进传感器以及拓展系统功能等方式,进一步提升系统性能。

关键词: 燃料电池汽车; 制动灯智能触发系统; 多参数融合; 环境适应性; 行车安全

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着环保理念普及与能源结构转型,新能源汽车产业发展迅速,燃料电池汽车凭借零排放、高效率优势备受关注。各国政策推动与消费者需求促使该领域技术持续进步、市场规模扩大。制动灯控制系统对燃料电池汽车行车安全至关重要,其能否及时精准传递制动信号直接影响追尾事故概率^[1]。但燃料电池汽车动力结构与制动过程复杂,传统控制方法难以适配。因此,研发适配的智能触发系统,对提升行车安全、优化驾驶体验及推动产业发展意义重大。

1.2 研究目的与创新点

本研究致力于开发针对性强的燃料电池汽车制动灯智能触发系统,解决现有技术在该领域的缺陷,提升制动灯控制的精准度与可靠性,增强行车安全性。创新点在于针对燃料电池汽车特性优化设计,采用多参数融合智能判断,综合车辆状态与环境信息,结合特殊动力及制动过程,精准判断制动行为,提升制动灯控制性能。

1.3 研究方法与技术路线

本研究运用理论分析、系统设计、实验验证的方法。理论分析阶段剖析燃料电池汽车动力与制动特点及现有技术不足,为系统设计提供依据。系统设计阶段根据需求设计架构,进行传感器选型、算法及控制流程设计,开展硬件电路与软件功能模块开发。实验验证阶段搭建平台,全面测试系统,通过数据分析评估性能,验证系统的各项特性。

2 现有技术缺陷分析

2.1 传统控制方式局限

传统机械开关控制存在响应延迟问题,由于机械结构的动作特性,从制动踏板被踩下到制动灯点亮存在一定时间滞后,这在紧急制动时可能影响后方车辆的及时反应。同时,其判断标准单一,仅依据制动踏板的机械动作判断制动行为,无法考虑车辆的其他运行状态,如在能量回收过程中,即使车辆实际在减速,若未踩下制动踏板,制动灯也不会点亮,缺乏多元化判断机制,难以满足复杂工况下的安全需求^[2]。

2.2 智能控制技术不足

智能控制技术虽有优势,但部分算法复杂度高,对计算设备性能要求苛刻,增加了系统成本。而且,其环境适应性欠佳,在不同路面条件(如湿滑路面、冰雪路面)或天气状况(如雨、雾、雪天)下,传感器采集的数据可能存在偏差,导致算法无法准确判断制动行为^[3]。此外,长时间运行后,智能控制系统易出现传感器故障、通信延迟等问题,影响控制的可靠性。

2.3 制动灯控制策略不完善

现有制动灯控制策略普遍缺乏综合判断,未充分融合车辆状态、外部环境等多方面信息,在特殊工况下,如车辆高速行驶且路面湿滑时紧急制动,难以准确控制制动灯点亮。同时,多数车辆缺乏制动预警功能,不能提前向后方车辆发出制动信号,降低了行车安全性。

3 燃料电池汽车制动灯智能触发系统设计

3.1 系统架构设计

该智能触发系统基于燃料电池汽车独特的动力结构和制动过程构建。其核心架构主要由车载传感器(如:电机控制器MCU、电池管理系统BMS)、整车控制器(VCU)、车身电子控制器(BCM)以及制动

灯构成，各组件间信息交互紧密，共同保障系统高效运行。车载传感器负责实时采集车辆状态及环境信息；VCU接收并处理传感器数据，依据预设算法做出制动行为判断；BCM则根据VCU指令，控制制动灯的点亮与熄灭。

3.2 传感器选型与数据监测

3.2.1 车辆状态传感器

选用制动踏板传感器监测制动踏板行程或压力，以判断驾驶员是否踩下制动踏板。电机转速传感器用于获取电机实时转速，电池管理系统（BMS）则监测电池电量。这些信息能直观反映车辆运行状态，为后续制动行为判断提供基础数据。

3.2.2 环境信息传感器

配备雨量传感器监测降雨量，路面摩擦系数传感器检测路面状况。不同天气及路面条件会影响车辆制动性能，这些环境信息的采集有助于系统更精准地判断制动行为，提升系统在复杂环境下的适应性^[4]。

3.3 智能判断算法设计

3.3.1 制动踏板状态判断

制动踏板传感器实时监测制动踏板行程X或压力F，当X超过X₀，或F大于设定压力阈值F₀，判定驾驶员踩下制动踏板。

3.3.2 回收扭矩值计算

在能量回收过程中，利用电机转速传感器测得的电机转速n和电池管理系统（BMS）计算的电池电量E，代入回收扭矩计算公式：

$$T = f(n, E) \tag{1}$$

计算回收扭矩值T。该公式依据燃料电池汽车动力系统特性构建，例如常见的一种形式为：

$$T = k_1 n + k_2 E \tag{2}$$

其中k₁、k₂为与车辆动力系统相关的系数。

3.3.3 综合判断逻辑

结合制动踏板状态和回收扭矩值进行综合判断。当制动踏板被踩下，或者回收扭矩值

T达到预设阈值T₀时，判定车辆存在制动行为，触发制动灯点亮。

3.4 控制流程设计

系统控制流程分为数据采集、处理、信号发送及制动灯点亮四个环节。车载传感器实时采集车辆状态和环境信息，将数据传输至VCU。VCU对数据进行处理，运用智能判断算法判断车辆是否制动。若判断为制动行为，VCU发送制动灯点亮信号至BCM。BCM接收到信号后，拉高制动灯电位，点亮制动灯（参见图1、图2）。

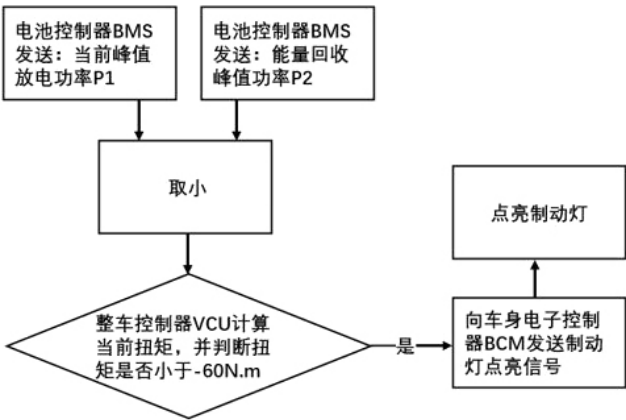


图1 展示了制动灯控制中各部件连接及信号传递关系

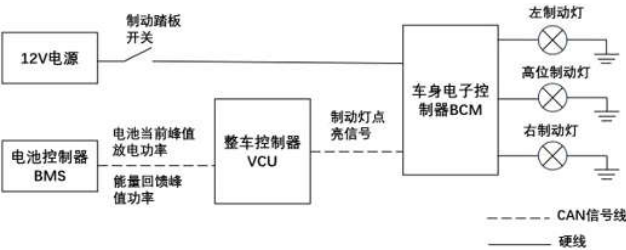


图2 呈现了智能触发系统从数据采集到制动灯点亮的完整流程

4 燃料电池汽车制动灯智能触发系统硬件实现

4.1 硬件电路工作原理

制动系统通过多传感器协同实现精准控制：正常制动时，制动踏板传感器实时监测信号并传输至VCU，经制动行为判定后触发BCM导通制动灯电路，依据欧姆定律驱动标准亮度照明。能量回收工况下，VCU综合电机转速及电池电量数据计算回收扭矩，当达到预设阈值时同步发送点亮指令，通过调节驱动电路电阻实现亮度分级控制。系统采用冗余传感器与算法保障功能可靠性，配合电源防护机制确保全工况稳定运行，形成闭环控制逻辑。

4.2 硬件系统可靠性设计

系统通过电磁兼容性设计抵御复杂电磁干扰：电源线路配置滤波电路抑制高频杂波，PCB布局优化敏感元件与干扰源间距降低耦合效应，信号线采用屏蔽结构抑制共模/差模干扰。配合过压过流保护电路实现异常工况快速切断，关键部件及VCU、BCM控制器采用冗余设计，确保硬件故障时系统持续稳定运行，形成多层次电磁防护与容错机制。

5 燃料电池汽车制动灯智能触发系统软件实现

5.1 软件功能模块设计

5.1.1 数据采集与处理模块

此模块负责从各类传感器采集数据，如制动踏板传

传感器的踏板行程、电机控制器MCU检测的转速以及电池管理系统BMS计算的电量等信息。运用滤波算法,如卡尔曼滤波,对原始数据进行去噪处理^[5],公式为:

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k + K_k(z_k - H\hat{x}_{k-1}) \quad (3)$$

其中 $\hat{x}$ 为估计值, A、B、H为状态转移矩阵等, K_k 为卡尔曼增益, Z_k 为测量值。经校准后,将数据转换为可用于智能判断的格式。

5.1.2 智能判断模块

依据数据采集与处理模块输出,实现制动行为智能判断算法。通过判断制动踏板是否被踩下(踏板行程或压力超过阈值)以及回收扭矩值(依电机转速与电池电量计算)是否达预设阈值,综合判定车辆制动状态

5.1.3 通信与控制模块

负责VCU与BCM及其他相关模块通信。采用CAN通信协议。通过发送控制信号,依据智能判断结果,控制制动灯点亮或熄灭。

5.2 软件流程设计

软件启动后,先进行系统初始化,配置各模块参数。随后进入数据采集与处理循环,实时采集并处理传感器数据。智能判断模块依处理后数据判定制动状态,若判定为制动,通信与控制模块通过CAN总线向BCM发送制动灯点亮信号,BCM执行点亮操作,实现制动灯智能触发。

6 燃料电池汽车制动灯智能触发系统实验验证

在整车测试数据中,其表现尤为卓越,如图3清晰展示。在能量回收环节,系统展现出高度的精确性与效率:一旦检测到的扭矩值全部低于或等于预设的 $-60\text{N}\cdot\text{m}$ 阈值,整车控制器(VCU)即能准确无误且高效地向车身电子控制器(BCM)发出制动灯点亮指令。随即,车身电子控制器(BCM)迅速响应,通过提升电压,成功激活制动灯。尤为值得一提的是,在车辆减速度较大的情况下,该系统能够精准而及时地为后方车辆提供警示,有力保障了行车安全。

此外,系统采用了创新的信号采集技术,进一步提升了系统的可靠性。车身电子控制器(BCM)直接获取制动踏板的硬线信号高电平,以此作为判断驾驶员是否实施制动操作的直接依据。这一设计巧妙规避了因整车控制器误判而导致的制动灯点亮功能失效的风险,显著增强了系统的稳定性。制动踏板踩下信号及其关联信号显示,在制动踏板被踩下的瞬间,整车控制器并未发出

额外的制动灯点亮请求,这有力证明了该系统在信号判断方面的准确性与可靠性^[6]。

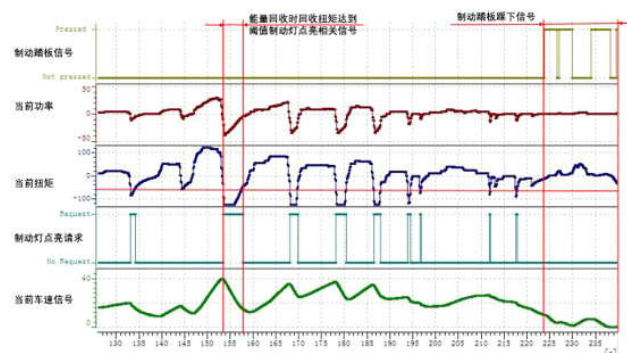


图3 实车数据图

7 结论与展望

本研究针对燃料电池汽车制动灯智能触发系统,构建了包含车载传感器、VCU、BCM及制动灯的系统架构,实现车辆状态与环境信息的实时采集、智能判断与精准执行。多工况实验表明,该系统在不同制动场景及环境条件下均可稳定工作,显著提升制动灯控制精度与响应速度,有效减少追尾风险。未来研究可从三方面深化:其一,引入深度学习算法优化判断模型,利用实际制动数据提升复杂工况识别能力;其二,通过硬件电路优化与通信协议改进,缩短信号传输与数据处理时间;其三,开发多合一传感器增强环境感知能力,并拓展制动灯闪烁预警等功能,以全面适应复杂行车环境,进一步提升系统安全性与智能化水平。

参考文献

- [1] 孙文,张涵睿,张津硕,等.新能源汽车再生制动能量回收研究综述[J].汽车工程学报,2023,13(04):470-480.
- [2] 孙路.MEMS汽车压力传感器的标定算法研究[J].汽车电器,2025,(03):73-76.2025.03.022.
- [3] 江军,田哲文.模糊逻辑控制在模块化车辆轨迹的应用研究[J].机械设计与制造,2024,(12):161-168.20240617.030.
- [4] 李乐,李昂,阎毓杰.基于改进卡尔曼滤波的多测温传感器数据融合方法分析[J].电子技术,2024,53(03):214-215.
- [5] 翟文涛.汽车电子控制系统的电磁兼容性研究[J].科技与企业,2015,(02):196.2015.02.175.
- [6] 卢善武.燃料电池汽车制动能量回收策略的研究[D].湖南理工学院,2023.DOI:10.27906/d.cnki.gngghy.2023.000253.