

燃料电池客车散热系统控制策略研究

刘康^{1,2}, 齐洪磊^{1,2}, 王丙虎^{1,2}, 黄玉鹏^{1,2}, 吴光平^{1,2,3}

(1. 中通客车股份有限公司, 山东 聊城 252000;

2. 山东省新能源客车安全与节能重点实验室, 山东 聊城 252000;

3. 中北大学, 太原 030051)

摘要:为解决燃料电池客车散热系统散热需求大、散热难、能耗高及噪声大等突出问题,提出一种智能分级控制方法,从而保障车辆可持续、有效运行。

关键词:燃料电池客车; 散热系统; 分级控制

中图分类号: U469.72; U463.99

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)03-0001-05

Research on Control Strategy of Cooling System for Fuel Cell Buses

LIU Kang^{1,2}, QI Honglei^{1,2}, WANG Binghu^{1,2}, HUANG Yupeng^{1,2}, WU Guangping^{1,2,3}

(1. Zhongtong Bus Co., Ltd., Liaocheng 252000, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of New Energy Bus Safety and Energy Conservation, Liaocheng 252000, China;

3. North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: This paper proposes an intelligent hierarchical control method to solve the prominent problems of high heat dissipation demand, heat dissipation difficulty, high energy consumption, and high noise in the heat dissipation system of fuel cell buses and ensure the vehicle runs continuously and efficiently.

Key words: fuel cell bus; cooling system; hierarchical control

我国燃料电池客车经过十几年的发展,已初具规模,且国内新能源市场份额在不断扩大。燃料电池客车与纯电动客车的主要区别在于前者以氢能为主要动力源,通过氢氧的电化学反应将化学能转化为电能用以驱动车辆^[1]。在氢氧电化学反应向外输出电能的同时,也会产生大量的热能^[2-3]。目前燃料电池发动机的工作效率可达50%,即每发出1 kW的电能便有1 kW的热能产生,因此燃料电池客车存在散热需求大、散热难、能耗高和噪声大等问题。传统内燃机大部分热量通过尾排管排出,而燃料电池的热量大部分需要通过散热器散发,且在恶劣条件下更加依赖于散热系统^[4-6]。因此本文对燃料电池客车散热系统进行重点研究,提出一种智能分级降热控制方法,以解决燃料电池客车电堆散热问题。

1 燃料电池散热系统结构及工作原理

1.1 燃料电池散热系统结构

本文的燃料电池客车散热系统结构与常规的完全相同,如图1所示。

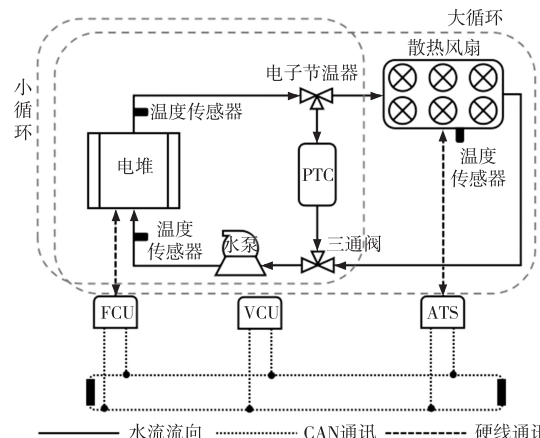


图1 燃料电池客车散热系统结构

收稿日期: 2023-12-02。

第一作者: 刘康(1993—),男,硕士;助理工程师;主要从事燃料电池客车技术开发工作。E-mail: liukqng@163.com。

该系统主要由电堆、水泵、PTC、散热风扇、电子节温器、三通阀、温度传感器等部件组成,并由管路连接成大、小循环回路。各电控部件 FCU、VCU、ATS 分别通过 CAN 总线网络和硬线进行互相通讯。本文与常规控制方案的区别在于控制策略不同。

1.2 燃料电池散热系统工作原理

本文控制策略与常规控制策略的工作原理相同点为:冷却液通过小循环对燃料电池加热升温,通过大循环对燃料电池散热降温,且在燃料电池系统运行过程中,通过电堆的拉载电流请求控制水泵转速来实现冷却液循环流量的调节^[6]。下面重点介绍不同点。

1) 常规控制策略多采用上高压后供使能,并在设定温度范围内输出对应的脉冲宽带调制(PWM)值进行控制。此控制模式,从燃料电池散热系统层面来看,易出现无序、无规则的工作情况;从整车层面来看,易出现能耗较高、外部噪声大的问题。

2) 本文控制策略为:整车上高压后严格监控环境温度、电堆进出水温,采用 PID 算法实时调节 PWM 值,并智能分级控制散热风扇的启动与关闭。此控制模式,从燃料电池散热系统层面来看,可精确控温,延长燃料电池使用寿命;从整车层面来看,可在一定程度上降低能耗和噪声,从而提升用户驾乘体验^[7-8]。

此外,当整车处于持续高速工况时,燃料电池散热需求较大,相比常规控制策略,本文的控制策略可使散热系统处于高效、合理的工作模式,让其达到最佳效果。

2 散热系统控制策略设计

本文主要从散热系统风扇逻辑控制方面设计了3种控制方案,其中,方案1与方案2为现有常规控制方案,方案3为本文的控制方案。在以下3种设计方案中,温差 ΔT 的计算见式(1)。

$$\Delta T = T_{in} - T_{aim} \quad (1)$$

式中: T_{in} 、 T_{aim} 分别为燃料电池冷却液入堆温度和入堆目标温度。

2.1 常规控制方案

1) 方案1控制策略。该方案采用直接控制方

式,主要根据输入温差 ΔT 值发出对应的 PWM 值,从而控制散热风扇的开启与关闭;且根据电堆拉载电流的大小控制水泵转速来控制冷却液的流量,从而实现燃料电池的散热^[9]。该控制方案的优点是控制策略简单,无需大量试验标定;缺点是无法精确控制电堆入口水温,可能会导致过度散热或出现散热不足的情况,且整车能耗较大。方案1的散热系统逻辑设计如图2所示。

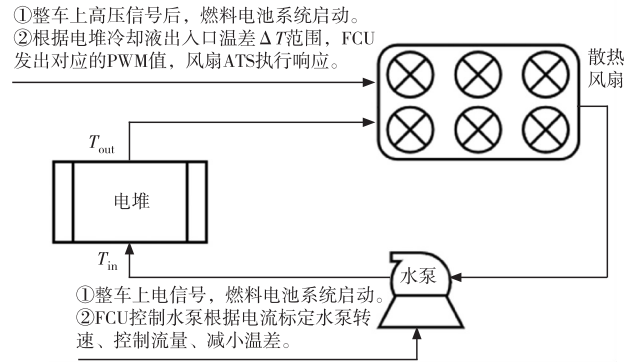


图2 方案1散热系统逻辑设计

2) 方案2控制策略。该方案采用 PID 控制方式,其与方案1的主要区别是在控制信号中加入了 PID 算法。其中 FCU 根据输入温差 ΔT 值进行 PID 控制,标定输出 PWM 值,从而精确地控制散热风扇;水泵的控制方法与方案1一致。与方案1相比,方案2的优点是可精确控制电堆入口水温并使其逼近目标温度值,即散热精度高,从而使电堆处于适宜工作环境下,有利于延长电堆寿命^[10];缺点是无法很好地降低散热过程中产生的能耗及噪声。方案2的散热系统逻辑设计如图3所示。

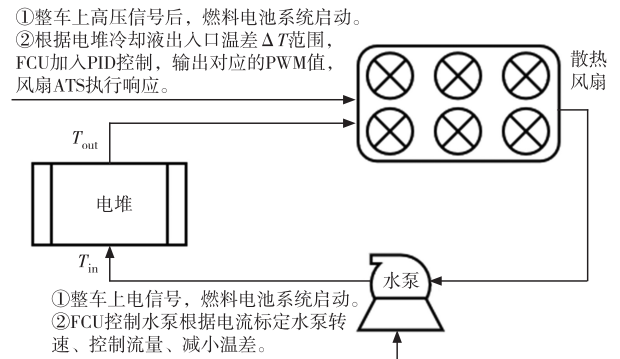


图3 方案2散热系统逻辑设计

2.2 本文控制方案

方案3为本文提出的PID+智能分级控制方案,其与方案2的主要区别是在FCU中采用了PID+智能分级控制策略。其中主要是对输入温差 ΔT 值进行PID控制,并采用智能分级控制策略来标定输出PWM值,从而控制散热风扇;水泵的控制方法与方案1及方案2一致。相较于方案2,方案3的优点是提高了散热精度,同时能合理地控制散热风扇工作过程,降低了能耗及噪声,提升了整车续航里程及用户体验。方案3的散热系统逻辑设计如图4所示。

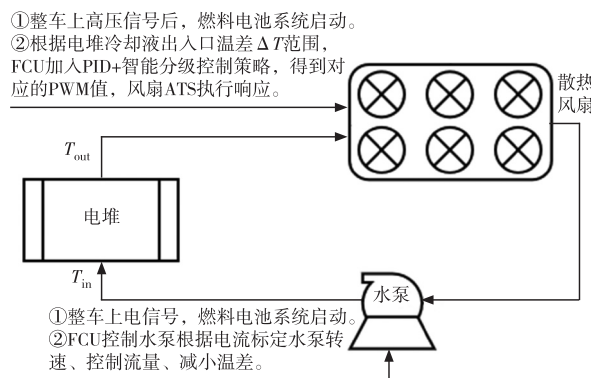


图4 方案3散热系统逻辑设计

PID+智能分级控制策略主要由FCU实现、ATS和PTC响应执行及VCU监控。当环境温度 T 值低于控制器内设定阈值 T_1 时,燃料电池系统进入低温冷启动状态,执行低温冷启动控制策略。FCU控制电子节温器打开小循环、关闭大循环;FCU控制水泵转动,驱动冷却液在管路中循环;FCU对PTC进行输出功率控制,调节冷却液入口温度,当此温度升至燃料电池系统需求温度阈值 T_1 时,FCU控制电子节温器打开,开启大循环、关闭小循环,并开启电堆进行功率输出。FCU通过温度传感器监控电堆冷却液入口温度 T_{in} ,当 T_{in} 值达到 $T_1+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,FCU关闭PTC;当入口温度 T_{in} 高于设定的 $T_{aim}-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,FCU控制ATS启动散热风扇使燃料电池入口水温散热降温至 $T_{aim}\pm1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间之内,实现一轮散热过程。这样不断循环往复,使电堆工作温度始终处于 $50\sim70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,发挥出最佳工作效率。总体逻辑流程如图5所示。

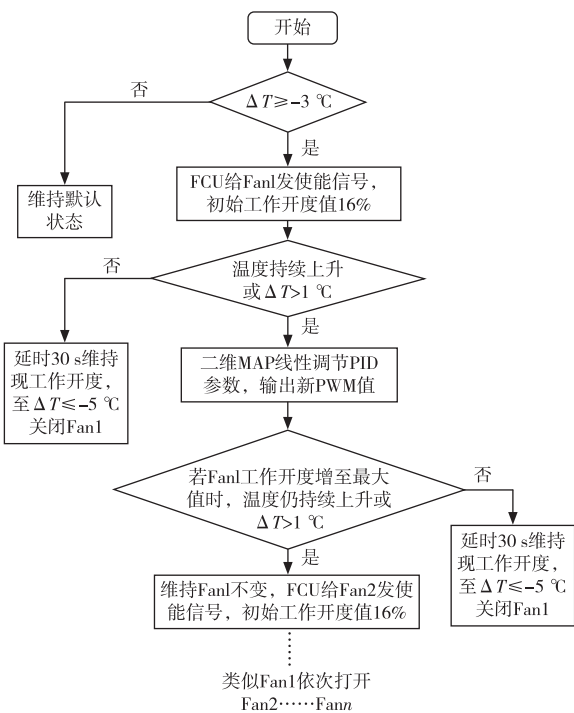


图5 PID+智能分级控制策略控制流程图

3 试验验证

3.1 试验样车参数

试验样车为我司10.5 m燃料电池城市客车,其主要参数见表1。

表1 试验样车主要参数

参数	数值
最大设计车速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	69
最大总质量/kg	16 500
电机额定/峰值功率/kW	100/200
动力电池系统额定电压/V	608.5
动力电池额定容量/Ah	173
动力电池额定电量/ $\text{kW}\cdot\text{h}$	105.28
氢罐工作压力/MPa	35
氢罐数量(个)/容积/L	6/840
燃料电池发动机额定功率/kW	50
燃料电池发动机峰值功率/kW	55
燃料电池散热风扇个数/个	4
燃料电池散热风扇总功率/W	500×4
电堆工作温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	-30~75
燃料电池最大散热量/kW	67
燃料电池电堆散热方式	液冷

3.2 试验方案

开展 3 个方案的对比试验,主要测试散热需求、能耗、噪声 3 个方面的参数。其中,燃料电池散热需求试验及散热系统能耗试验在室外环境温度 35 ℃ 条件下进行,燃料电池系统功率分别处于 15 kW、25 kW、35 kW 及 50 kW,且车辆运行在空旷道路上。噪声试验的测试条件为车辆门窗关闭,空调处于开启状态,车辆空载,将样车车速维持在 30 km/h 匀速行驶,在车内前排、中排、后排距离座垫高 70 cm 位置处测量噪声。对试验采集的 CAN 总线网络数据进行分析。

3.3 试验结果

1) 方案 1 至方案 3 的能耗测试结果见表 2~4。

表 2 方案 1 的能耗测试结果

SOC 区间/%	功率/kW	散热需求/kW	Fan 开启数/个	是否满足需求	燃料电池散热系统能耗/[(kW·h)·100 km ⁻¹]
80<SOC≤84	15	10.86	4	是	1.46
60<SOC≤80	25	19.6	4	是	3.5
40<SOC≤60	35	29.81	4	是	4.01
0<SOC≤40	50	52.04	4	是	7

表 3 方案 2 的能耗测试结果

SOC 区间/%	功率/kW	散热需求/kW	Fan 开启数/个	是否满足需求	燃料电池散热系统能耗/[(kW·h)·100 km ⁻¹]
80<SOC≤84	15	10.86	4	是	1.17
60<SOC≤80	25	19.6	4	是	2.11
40<SOC≤60	35	29.81	4	是	3.03
0<SOC≤40	50	52.04	4	是	5.4

表 4 方案 3 的能耗测试结果

SOC 区间/%	功率/kW	散热需求/kW	Fan 开启数/个	是否满足需求	燃料电池散热系统能耗/[(kW·h)·100 km ⁻¹]
80<SOC≤84	15	10.86	1	是	1.12
60<SOC≤80	25	19.6	2	是	2.02
40<SOC≤60	35	29.81	2	是	3.07
0<SOC≤40	50	52.04	4	是	5.36

2) 方案 1 至方案 3 的噪声测试结果见表 5~7。

表 5 方案 1 的噪声测试结果

位置	噪声/dB(A)			
	功率 15 kW	功率 25 kW	功率 35 kW	功率 50 kW
前排	61	61.4	62.1	63.7
中间	62.1	63.2	63.9	65.8
后排	61.6	62.5	63.4	65.1
均值	61.57	62.37	63.13	64.87

表 6 方案 2 的噪声测试结果

位置	噪声/dB(A)			
	功率 15 kW	功率 25 kW	功率 35 kW	功率 50 kW
前排	60.9	61.5	61.9	63.3
中间	61.8	62.7	64	65.1
后排	61.3	62.2	63.6	64.8
均值	61.33	62.13	63.17	64.40

表 7 方案 3 的噪声测试结果

位置	噪声/dB(A)			
	功率 15 kW	功率 25 kW	功率 35 kW	功率 50 kW
前排	60.6	61.2	61.5	62.3
中间	61.7	62.5	63.2	64.5
后排	61.4	62.3	63	64
均值	61.23	62.00	62.57	63.60

3) 散热需求。燃料电池系统功率在 15~50 kW 条件下时,3 种控制方案的燃料电池冷却液入堆温度控制效果如图 6 所示。

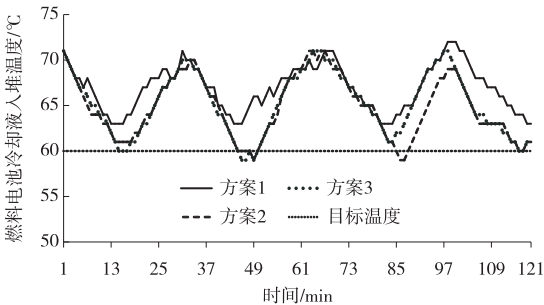


图 6 3 种方案冷却液入堆温度控制效果图

3.4 试验结论

从上述测试结果可知,方案 2 的能耗低于方案 1,方案 3 的能耗则与方案 2 无明显区别。从散热效

果可知,方案2的控制效果优于方案1,方案3的控制效果则与方案2无明显区别。但是方案3的噪声明显小于方案2和方案1。综合比较可知方案3优势更明显。

4 结束语

本文主要从散热风扇和水泵控制两方面设计了3种不同控制方案,并研究了这3种方案对电堆散热性能的影响。结果表明,本文提出的燃料电池散热系统PID+智能分级控制策略解决了燃料电池系统散热难问题,既能很好地控制燃料电池系统入堆冷却液温度,保证温差在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间;又能很好地降低整车能耗,进一步节约运营成本;还能降低系统在运行过程中产生的噪声,提升了用户驾乘体验。

参考文献:

- [1] 崔佳斌. 新能源汽车锂电池热管理技术研究[J]. 中国设备工程, 2023(11): 225-227.
- [2] 白静, 范惠芳, 崔四齐, 等. 车用燃料电池散热性能实验研

- 究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 390-395.
- [3] 张宇阳. 燃料电池客车整车热管理系统分析与探讨[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(10): 63-66.
- [4] 赵狐龙. 燃料电池汽车电堆冷却系统设计与仿真[J]. 汽车制造业, 2021(3): 17-18.
- [5] 李文浩, 方虹璋, 杜常清, 等. 氢燃料电池发动机热管理系统的控制方案研究[J]. 车用发动机, 2022(1): 58-63.
- [6] 周苏, 陈春光, 樊磊. 质子交换膜燃料电池动力系统热管理综述[J]. 汽车文摘, 2023(2): 1-14.
- [7] HAN Jaeyoung, PARK Jisoo, YU Sangseok. Control strategy of cooling system for the optimization of parasitic power of automotive fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(39): 13549-13557.
- [8] 陈维荣, 李艳昆, 李岩, 等. 水冷型质子交换膜燃料电池温度控制策略[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(3): 393-399.
- [9] 陈维荣, 牛茁, 韩喆, 等. 水冷PEMFC热管理系统流量跟随控制策略[J]. 化工学报, 2017, 68(4): 1490-1498.
- [10] 赵萌, 刘世通, 苏东超, 等. 燃料电池水热管理的技术研究[J]. 内燃机与配件, 2021(15): 63-64.

◆ 广告目次

招商局检测车辆技术研究院有限公司	(封面)	厦门金龙联合汽车工业有限公司	(前插三)
厦门金龙旅行车有限公司	(封二)	扬州亚星客车股份有限公司	(前插四)
《客车技术与研究》理事会名录	(封三)	中通客车股份有限公司	(后插一)
期刊信息	(封底)	公益广告	(后插二)
中车时代电动汽车股份有限公司	(前插一)	北京福田欧辉新能源汽车有限公司	(后插三)
太原泰立机电新技术有限公司	(前插二)	比亚迪汽车工业有限公司	(后插四)