

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.127

质子交换膜燃料电池发动机热管理特性仿真分析

孙铁生¹, 陈 山², 孙 红¹, 李 洁¹

(1. 沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168; 2. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

摘要:为解决质子交换膜燃料电池发动机在功率变化时热管理系统温度不稳定、进出口冷却液温差大等问题,使用 LMS AMESim 仿真软件,以 30 kW 质子交换膜燃料电池发动机为基础,考虑整车的功率变化和驾驶员需求等因素,建立质子交换膜燃料电池发动机热管理系统模型。使用燃料电池发动机标定工况来分析热管理系统各个部件的冷却液温度和压力情况;采用新欧洲驾驶循环(NEDC)工况进行质子交换膜燃料电池热管理仿真测试。结果表明,所建立的热管理系统可以在 NEDC 工况下保持温度稳定,进出口冷却液最高温差约为 5.6 °C,可为质子交换膜燃料电池发动机热管理试验研究及测试提供一定的依据和指导。

关键词:质子交换膜燃料电池;整车模型;热管理系统;LMS AMESim;NEDC

中图分类号:TM911.42

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)04-027-10

Simulation analysis on thermal management characteristics of proton-exchange-membrane fuel-cell engine

SUN Tiesheng¹, CHEN Shan², SUN Hong¹, LI Jie¹

(1. College of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, P. R. China;

2. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, P. R. China)

Abstract: To solve the problems of unstable temperature of thermal management system and large coolant temperature difference between inlet and outlet when the power of proton-exchange-membrane fuel cell (PEMFC) changes, using LMS AMESim simulation software, a thermal management system model of PEMFC engine was proposed based on a 30 kW PEMFC engine, considering factors including the power change of the whole vehicle and the driver's demand. Firstly, the fuel-cell engine calibration condition was used to analyze the coolant temperature and pressure of each component of the thermal management system. Secondly, the New European Driving Cycle (NEDC) was used to simulate the PEMFC thermal management. The results show that the established thermal management system can keep the temperature stable under NEDC working condition, and the maximum temperature difference between inlet and outlet coolant is about 5.6 °C. This simulation analysis can provide guidance for the thermal management test research of PEMFC engine.

Keywords: proton-exchange-membrane fuel cell; vehicle model; thermal management system; LMS AMESim; NEDC

收稿日期:2021-06-29 网络出版日期:2022-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51906166, 51776131);辽宁省自然科学基金资助项目(lnzd201902);“兴辽英才计划”项目(XLYC1802045)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51906166, and 51776131), the Natural Science Foundation of Liaoning Province (lnzd201902), and the Xingliao Talent Plan (XLYC1802045).

作者简介:孙铁生(1998—),男,硕士研究生,研究方向为氢能与燃料电池系统,(E-mail)956028258@qq.com。

通信作者:李洁,女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方为新能源电池技术,(E-mail)lijie@sjzu.edu.cn。

燃料电池发动机通过催化剂将燃料中的化学能直接转换为电能,与传统内燃机不同的是燃料电池发动机不受卡诺循环限制、内部没有机械传动结构等。因此,燃料电池发动机运行时具有能量转换效率高、噪音小等特点^[1-3],其中质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)因其比能量高、可靠性高等优点被广泛应用于车用燃料电池发动机。但是,由于质子交换膜燃料电池内部催化剂在高温下易失效,工作温度通常被限制在60~80 °C范围内,并且对冷却液进出口温差的要求较高,一般不大于10 °C。为解决这一问题,国内外学者对质子交换膜燃料电池发动机热管理进行了大量研究工作^[4-7]。

余翔^[8]阐述了内燃机热管理系统各个部件的选型方案 and 设计要求,运用LMS AMESim仿真软件对所匹配设计的内燃机系统进行不同工况下的热管理系统仿真分析。陈维荣等^[9]提出了一种冷却液流量跟随电流的控制策略,结果表明,该策略实现了较高的控制精度。Khan等^[10]建立了一种动态算法用于检测负载变化时引起的燃料电池温度变化。Zhang等^[11]采用了一维与三维模型协同仿真对质子交换膜燃料电池发动机热管理系统进行仿真模拟,预测了极端条件下热管理系统的动态性能。Bao等^[12]建立了燃料电池水热管理一维模型,对空气化学计量、阴极出口压力及加湿情况对水热管理的影响进行分析。Kang等^[13]基于MATLAB/Simulink与LMS AMESim联合建立PEMFC模型,对换热器、加湿器、鼓风机和泵等部件进行能耗仿真,得出在联邦测试规程(FTP75)测试循环期间,辅助部件消耗378.01 kJ能量,PEMFC的效率为41.94%。Xu等^[14]基于关键零部件对车辆综合热管理系统建模,该车辆由36 kW的燃料电池和11 kW·h的锂电池共同供电,针对车辆进行5种工况仿真,结果表明,所建立模型可以在部件热状态变化时分析对整车的影响。

为了解决质子交换膜燃料电池热管理系统温度不稳定、进出口冷却液温差大等问题,笔者利用LMS AMESim仿真软件,以30 kW质子交换膜燃料电池发动机为基础,考虑整车的功率变化和驾驶员需求等因素,建立质子交换膜燃料电池发动机热管理系统模型。在整车功率变化的基础上,对所建立热管理系统在标定工况和NEDC工况进行质子交换膜燃料电池发动机热管理仿真,所得结果可为燃料电池热管理试验研究及测试提供一定的依据和指导。

1 质子交换膜燃料电池仿真平台建立

1.1 质子交换膜燃料电池系统拓扑结构

燃料电池动力系统的拓扑结构如图1所示,主要包括供气系统、燃料电池电堆、热管理系统、DC/DC变流器和电机及控制器等^[15]。供气系统包括氢气供气和氧气供气:氢气供气将高压氢气瓶中的氢气通过减压阀降到合适的压力输送至电堆;氧气供气通过空压机将空气压缩至一定压力,在加湿器加湿后送入电堆。燃料电池电堆所产生的电能通过DC/DC变流器后为驱动汽车行驶的电机供电,燃料电池发电时电堆产生的热量通过冷却液带到散热器处散发到外界。

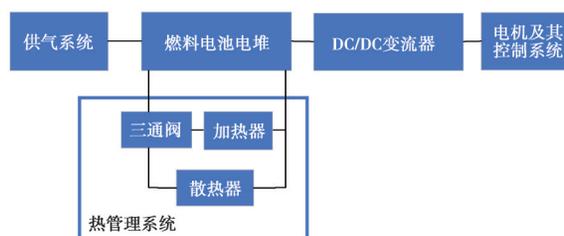


图1 燃料电池系统拓扑结构示意图

Fig. 1 Topological structure of the fuel cell system

1.2 仿真软件简介

LMS AEMSim仿真软件提供系统工程设计的完整平台,实现机电液一体化分析。使用该仿真软件可以建立一个复杂的多学科领域系统模型,可研究系统模型的动态和瞬态特性。因此,输入真实试验数据,使用该仿真软件建立质子交换膜燃料电池发动机及其热管理系统模型能够较真实地反应热管理系统情况,可以为燃料电池发动机热管理测试提供一定的指导。

使用LMS AMESim仿真软件建立的模块主要包括燃料电池模块、混合气体模块、热液压模块、控制单元模块、整车及驾驶员模块等。

1.3 供气系统模型

燃料电池供气系统分为空气供气和氢气供气,模型如图2所示。图中空气供气模型包括空压机、加湿器和空气尾排阀。其中空压机的转速通过燃料电池输出电压函数控制,而空压机的自身特性通过图3数据输入。压缩空气经空压机加压后进入加湿器,在加湿器中湿度增加到90%后进入电堆参与反应。空气尾排阀开度为40%常开,为了排气管路的压力安全加装安全阀,在排气管路中压力过高时安全阀起跳,安全阀开启的质量流量设置为 $0.1 \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{kPa})^{-1}$ 。

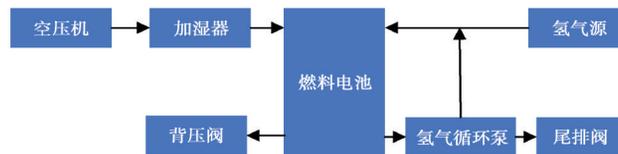


图2 燃料电池气体供应架构图

Fig. 2 Fuel cell gas supply model

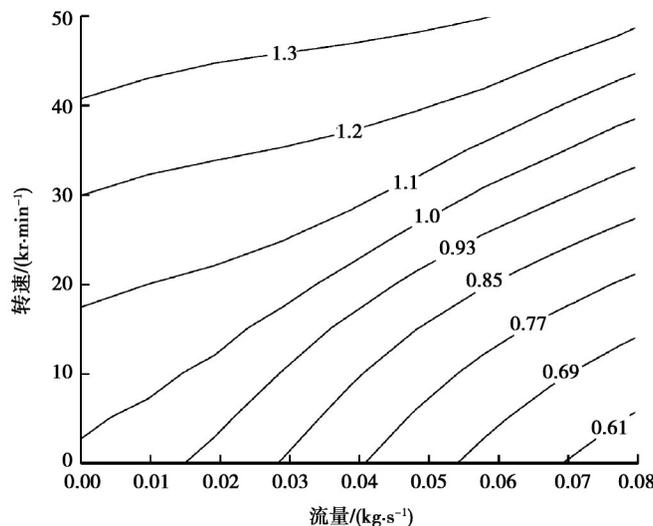


图3 空压机转速、流量与空压比关系曲线

Fig. 3 Dependence of speed on flow for different air pressure ratio of the air compressor

因为质子交换膜燃料电池内部的催化剂需要一定湿度才能达到良好的催化效果,所以燃料电池中空气加湿器的作用是对空气进行加湿,使进入电堆的空气可以湿润质子交换膜。加湿器中气体湿度可以描述为:

$$\lg(P_{\text{sat}}) = 32 - \frac{3152.2}{T} - 7.3 \lg(T) + 2.4 \times 10^{-9} + 1.8 \times 10^{-6} T^2, \quad (1)$$

$$h = \frac{P_v}{P_{\text{sat}}}. \quad (2)$$

式中: P_v 为饱和水蒸气的分压力,Pa; P_{sat} 为饱和水蒸气的饱和分压力,Pa; T 为温度,K; h 为气体湿度。

氢气供气模型包括氢气罐(70 MPa)、氢气循环泵和氢气尾排。燃料电池系统工作时,70 MPa氢气罐中的气体通过减压阀减到0.15 MPa后进入电堆进行反应,未反应完全的氢气通过氢气循环泵循环回电堆进气口再次参与反应。模型中的尾排阀通过传感器识别电堆氢气出口的湿度进行控制,当湿度超过80%时打开氢气尾排阀,在湿度降回到50%后关闭尾排阀。本研究中氢气循环泵的特性曲线如图4所示,氢气瓶基本参数如表1所示。

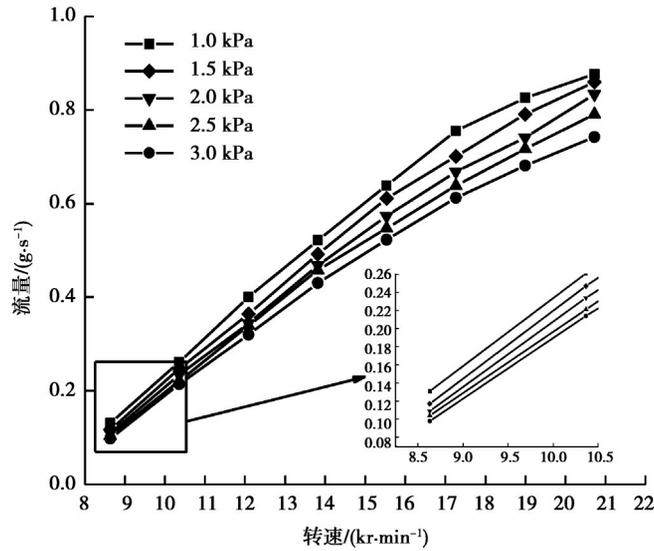


图4 氢气循环泵转速、流量与进出口压差关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between speed, flow and pressure difference between inlet and outlet of hydrogen circulating pump

表1 氢气瓶基本性能参数

Table 1 Basic performance parameters of hydrogen cylinder

名称	参数名称	参数值
氢气瓶	容积/L	50
	出气压力/MPa	0.15
	设置压力/MPa	70

1.4 燃料电池电堆模型

质子交换膜燃料电池电堆极化性能由图5定义,电堆功率描述如下:

$$P_{stack} = N_{cell} UI \quad (3)$$

式中: N_{cell} 为单电池个数, U 为单电池电压, I 为电堆电流。

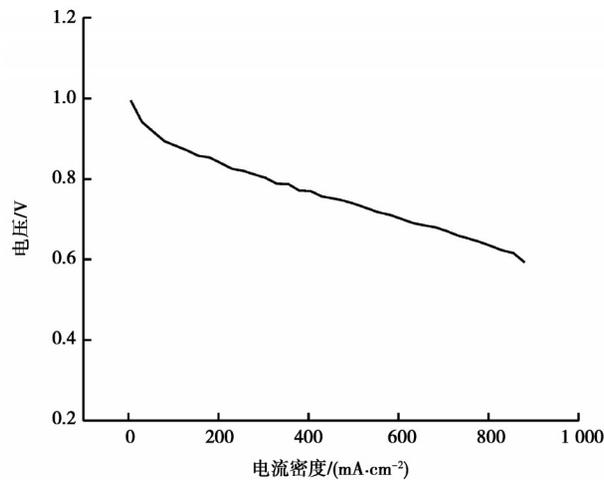


图5 燃料电池极化曲线

Fig. 5 Polarization curve of fuel cell

燃料电池电堆的产热功率由电压和电流推导得到:

$$Q_{gen} = N_{cell}(1.25 - U) I \quad (4)$$

燃料电池的基本性能参数如表2所示。

表 2 燃料电池基本性能参数

Table 2 Basic performance parameters of fuel cell

名称	参数名称	参数值
燃料电池电堆	额定功率/kW	30
	电池数	150
	活化面积/cm ²	509
	参考温度/°C	60

1.5 驾驶员及整车模型

在驾驶舱模型中通过将当前车速与预期车速比较,判断当下应该做出的动作是加速或制动,模型输出控制信号(0:不做动作;1:最大加速或制动加速度)到整车控制器,控制车辆行驶速度^[16]。

该模型对加速度的控制如下:

$$e = V_{cont} - V_{veh}, \tag{5}$$

$$a_{acc} = b_{GPacc} e + b_{GIacc} \int e dt + b_{GAacc} dV_{contAnt}, \tag{6}$$

$$V_{contAnt} = \frac{V_{contAnt} - V_{cont}}{t}, \tag{7}$$

$$I_{acc} = b_{GIacc} \int e dt. \tag{8}$$

式中: e 为目标车速与当前车速的误差; V_{cont} 为目标车速; V_{veh} 为当前实际车速; $V_{contAnt}$ 为预期控制车速; a_{acc} 为加速控制参数,其值范围为0~1; b_{GPacc} 为加速度控制回路的比例增益; b_{GIacc} 为加速度控制积分增益; b_{GAacc} 为加速度控制预期增益; t 为提前控制时间; I_{acc} 为加速过程中的积分部分。

对制动的控制如下:

$$a_{brak} = b_{GPbr} e - b_{GIbr} \int e dt + b_{GAbbr} dV_{contAnt}, \tag{9}$$

$$I_{brak} = -b_{GIbr} \int e dt. \tag{10}$$

式中: a_{brak} 为制动控制参数,范围为0~1; b_{GPbr} 为制动控制比例增益; b_{GIbr} 为制动控制积分增益; b_{GAbbr} 为制动控制预期增益; I_{brak} 为制动过程中积分部分。

驾驶员和整车模型参数如表3所示。

表 3 驾驶员及整车基本参数

Table 3 Basic parameters of driver and vehicle

名称	参数	参数值
驾驶舱	反应时间/s	2.0
	制动时间/s	0.5
	加速控制比例	0.1
	减速控制比例	0.3
整车	质量/kg	1 360
	迎风面积/m ²	2.08
	车轮惯性/(kg·m ²)	0.843 75

1.6 热管理系统模型

质子交换膜燃料电池发动机的工作温度为60~80 °C,且电堆进出口的温差要小于10°C,温差越小越好,而燃料电池在工作过程中不断产生的热量会使电堆内部温度不断上升,所以对电堆进行散热是必要的^[17]。热管理系统架构如图6所示,包括水泵、散热器、加热器和三通阀。

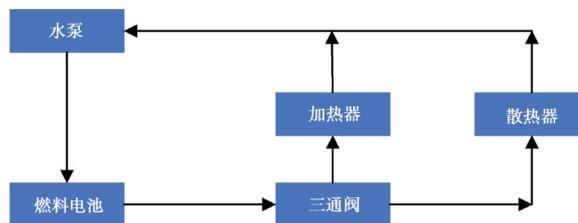


图 6 热管理系统架构

Fig. 6 Thermal management system model

散热器的散热量为冷却液与流经散热器的空气所交换的热量,是冷却液体积流量和经过散热器空气速度的函数。

风扇区域散热量:

$$H_{V_{exp}} = f(V_{fan}, q_{lh}) \frac{\pi}{4} \frac{(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{R_h R_1} \quad (11)$$

非风扇区域散热量:

$$H_{NV_{exp}} = f(V_{air_{rad}}, q_{lh}) \frac{R_h R_1 - \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{R_h R_1} \quad (12)$$

式中: $V_{air_{rad}}$ 为散热器入口的空气速度; V_{fan} 为开风扇散热器入口的空气速度; q_{lh} 为冷却液流速; D_{ext} 为风扇的外径; D_{int} 为风扇的内径; R_h 为散热器的高度; R_1 为散热器的长度; f 为查数表函数,如图7所示。

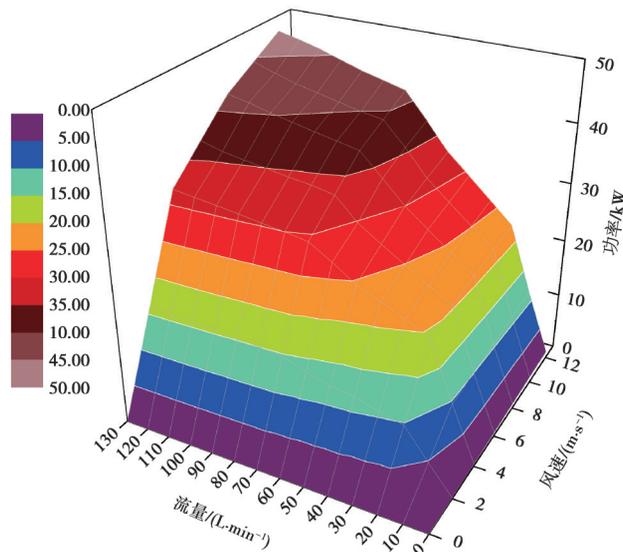


图7 散热器散热量图

Fig. 7 Heat dissipation map of radiator

加热器的换热量为:

$$Q_{heat} = P_{elec} N_{heats} \quad (13)$$

式中: P_{elec} 为加热棒电功率, N_{heats} 为加热棒数。

水泵、散热器和加热器的基本参数如表4所示。

表4 水泵、散热器、加热器基本参数

Table 4 Basic parameters of water pump, radiator and heater		
名称	参数名称	参数值
水泵	额定排量/(L·r ⁻¹)	0.1
	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
散热器	散热器高度/m	0.547
	散热器长度/m	0.415
	风扇外径/m	0.300
	风扇内径/m	0.005
	冷却液容量/L	1.4
加热器	加热棒数	3
	加热棒功率/W	3 000
	换热效率/%	90

2 热管理仿真研究

2.1 实验验证

为了验证仿真模型,在质子交换膜燃料电池电堆冷却液进出口处安装温度传感器测量进出口温度,将测得的温差与仿真结果进行对比。在冷却介质为去离子水、流量为 $100\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 情况下,对比输出功率为22、25、28、31 kW的电堆冷却水温差,结果如图8所示。可以看出实验数据与仿真数据的变化趋势相同,在31 kW功率下两者温差较为接近,在22 kW、25 kW和28 kW功率下两者温差相差约为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

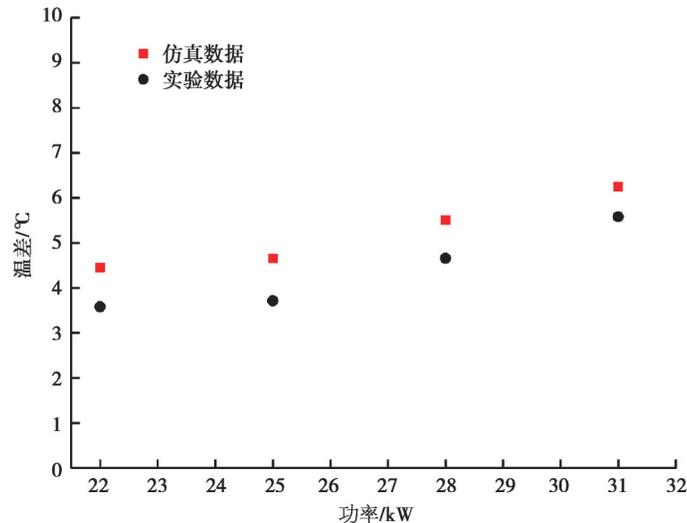


图8 不同功率下冷却液温差的对比图

Fig. 8 Comparison of coolant temperature difference under different powers

2.2 热管理系统在标定工况下的仿真分析

标定工况为:燃料电池电堆的输出功率固定在30 kW,冷却介质流量 $100\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,加热器关闭温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,散热器风扇开启后空气流速为 $6.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,环境温度为室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$),环境风速 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,环境气压 101.3 kPa 。

车辆处于标定状态下,达到稳定后仿真得到冷却系统不同位置的冷却液压力和冷却液温度情况如图9所示。冷却系统中冷却液的流动是通过水泵提供的压力进行的。由于燃料电池内部冷却液流道细小,所以在电堆入口处冷却液压力急剧升高,之后随着流经电堆水套、三通阀和散热器,冷却液压力一路降低。其中流经电堆水套的压力降为 8.55 kPa ,三通阀的压力降为 9.67 kPa ,散热器中压力降为 4.80 kPa ,而散热器出口到水泵的入口之间的压力降来自连接管路的压力损耗 3.97 kPa ,用这个压力降代替整个冷却系统中的连接管路压力降。当燃料电池电堆处于此标定时,电堆温度为 $78.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却液进出口温差为 $6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却液的温升全部来自于电堆的热量,其降温全部通过散热器与外部的热交换,散热器的进出口温差与电堆温差一致。

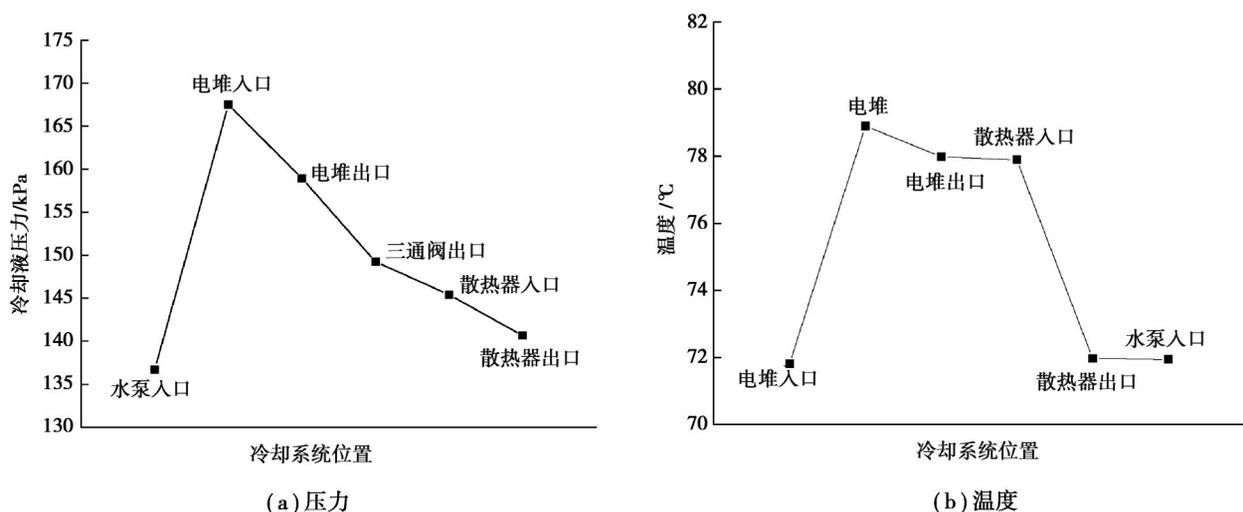


图9 热管理系统不同位置的压力和温度

Fig. 9 Pressure and temperature at different locations of thermal management system

上述分析说明,热管理系统可以满足 30 kW 质子交换膜燃料电池电堆的散热需求,对 30 kW 稳定输出的燃料电池的冷却效果较为理想,电堆进出口温差为 6.1 °C,电堆温度稳定在 78.9 °C,满足燃料电池发动机的散热要求。

2.3 NEDC 工况下发动机冷却结果分析

NEDC 包括 4 个城市路况单元和 1 个高速路况单元,包含加速、减速、怠速和均速 4 种运行状态,能比较真实地反映整车在道路中的运行情况,因此,选择 NEDC 作为仿真测试工况^[18]。对热管理模型进行 NEDC 工况下的产热仿真^[19],结果如图 10 所示。产热功率与电堆功率较为接近,说明电堆模型较合理。可以看到,NEDC 高速工况下的产热急剧增加,最高产热峰值达到 36.7 kW,并且热功率变化频率较大。因此,对冷却系统进行优化以达到快速降温需求:用温差控制水泵的流量,温差超过 4.5 °C 时水泵流量为 110 L·min⁻¹,在温差降到 3.5 °C 后水泵流量为 90 L·min⁻¹。

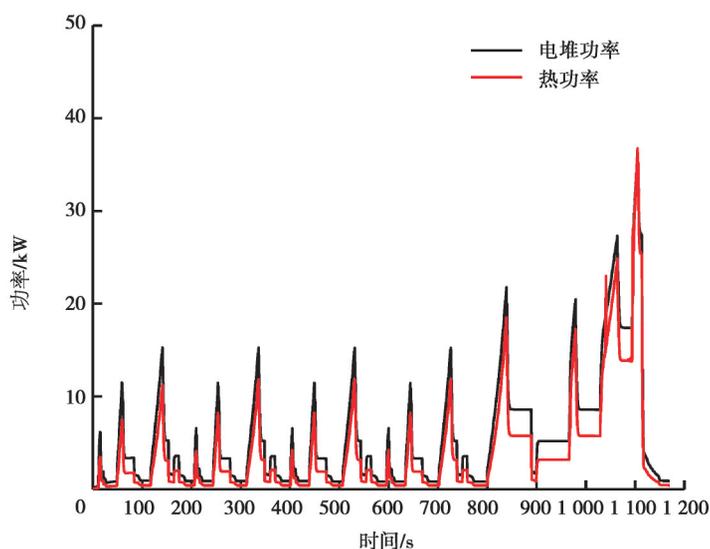


图 10 NEDC 工况下车辆功率与产热情况

Fig. 10 Vehicle power and heat production under NEDC condition

从图 11 可以看出,在 0~234 s 之间电堆温升过程散热系统功率为负值,表示热管理系统加热器打开为电堆升温提供热量,达到电堆稳定工作温度后,电堆温度基本保持在 60 °C。在 1 095 s 时,电堆功率缓慢攀升至工况段内峰值,这时由于产热量变大且热管理系统达到满负荷,电堆温度上升至 70 °C,当峰值过后电堆温度又回落到 60 °C。

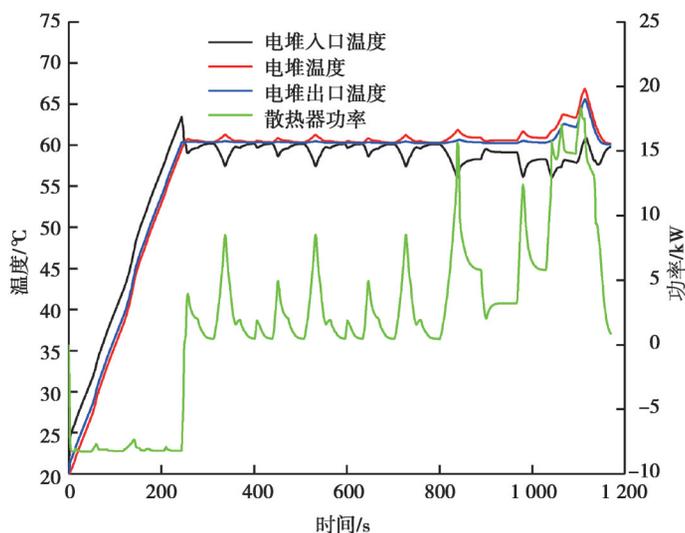


图 11 电堆进出口温度与散热功率的关系

Fig. 11 Relationship between inlet and outlet temperature of stack and heat dissipation power

从图12可以看到,温差越大,冷却液经过散热器的流量越大,且当温差超过 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水泵加大流量以达到散热器需求。 $1\ 050\text{ s}$ 之后最高温差达到 $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,这时泵的流量为 $110\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,且全部流过散热器来满足散热要求。

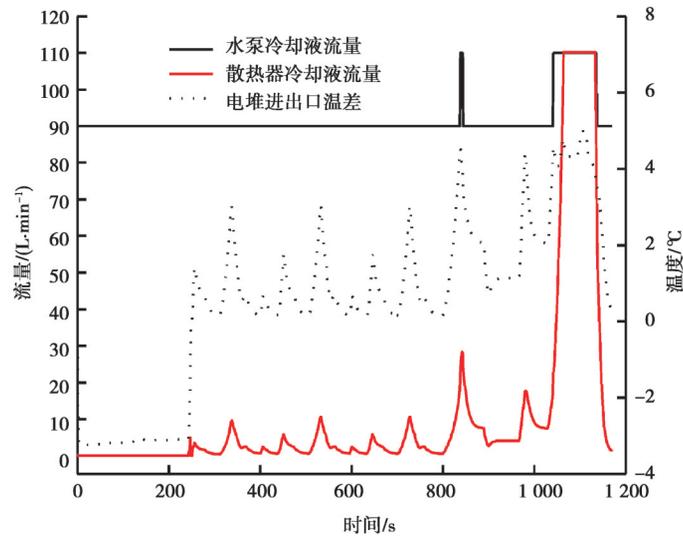


图12 冷却液流量对温差的影响

Fig. 12 Influence of coolant flow rate on temperature difference

从图13可以看到,在 220 s 之后三通阀打开,冷却液开始流经散热器,此时冷却液流量很小,散热器进出口的温差较大,这是由于散热器的散热能力强,而流经冷却液少,导致进出口温差较大;在 $1\ 040\text{ s}$ 之后电堆的功率变大,散热器内部的冷却液流量急剧增大,所有冷却液全部流经散热器以应对增多的热量,这时散热器的进出口温差减小到与燃料电池电堆冷却液进出口温差相同(根据图12,此时电堆冷却液进出口温差为 $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$),并且最高温度在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,满足燃料电池散热要求。

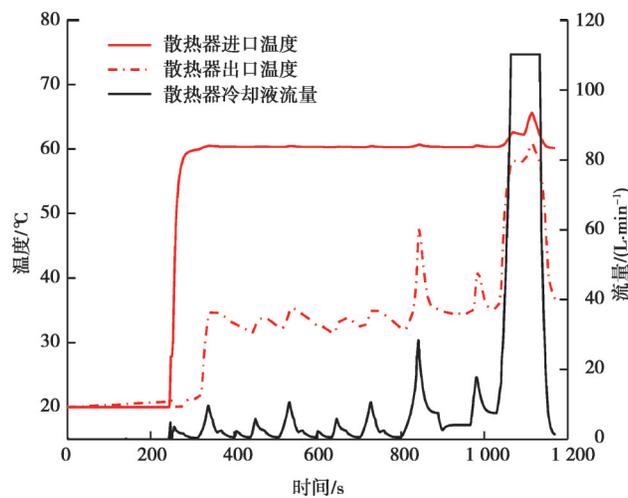


图13 散热器流量对进出口温度的影响

Fig. 13 Influences of the coolant flow rate in the radiator on the temperatures at the inlet and the outlet

3 结论

针对质子交换膜燃料电池发动机在功率变化时其热管理系统温度不稳定、进出口冷却液温差大等问题,提出了基于LMS AMESim仿真软件建立热管理系统模型。利用模型对标定工况和NEDC工况进行热管理系统分析,得出如下结论:

1)在标定状态下给出该热管理系统各个部件的温度和压力情况,可为燃料电池热管理系统试验研究及测试提供一定的参考价值。

2)整车在NEDC工况下运行,所建立的热管理系统可满足该工况下加速、减速、怠速和匀速的散热需求。

3)所建立的热管理系统在整车功率变化剧烈的情况下保持燃料电池电堆温度稳定,有利于燃料电池电堆长期稳定运行。

参考文献

- [1] 衣宝廉. 燃料电池——原理·技术·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
Yi B L. Fuel cell—principles, technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 孟祥廷. 燃料电池发动机热管理系统设计与优化[D]. 济南: 山东大学, 2020.
Meng X T. Design and optimization of fuel cell thermal management system[D]. Jinan: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [3] 陈思彤, 李微微, 王学科, 等. 相变材料用于质子交换膜燃料电池的热管理[J]. 化工学报, 2016, 67(S1): 1-6.
Chen S T, Li W W, Wang X K, et al. Thermal management using phase change materials for proton exchange membrane fuel cells[J]. CIESC Journal, 2016, 67(S1): 1-6. (in Chinese)
- [4] Yang L R, Karnik A, Pence B, et al. Fuel cell thermal management: modeling, specifications and correct-by-construction control synthesis[J]. 2017 American Control Conference (ACC), 2017: 1839-1846.
- [5] Zhang B, Lin F, Zhang C Z, et al. Design and implementation of model predictive control for an open-cathode fuel cell thermal management system[J]. Renewable Energy, 2020, 154: 1014-1024.
- [6] Strahl S, Costa-Castelló R. Temperature control of open-cathode PEM fuel cells[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 11088-11093.
- [7] 卢炽华, 王良旭, 刘志恩, 等. 燃料电池汽车整车热管理系统设计与仿真分析[J/OL]. 重庆大学学报: 1-14[2021-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20210428.1338.002.html>.
Lu C H, Wang L X, Liu Z E, et al. Design and simulation analysis of the whole vehicle thermal management system for the fuel cell vehicle[J/OL]. Journal of Chongqing University: 1-14[2021-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20210428.1338.002.html>. (in Chinese)
- [8] 余翔. 基于AMESim的汽车发动机冷却系统仿真分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.
She X. Research of cooling system of automobile engine based on AMESim[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [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.
Chen W R, Niu Z, Han Z, et al. Flow following control strategy for thermal management of water-cooled PEMFC[J]. CIESC Journal, 2017, 68(4): 1490-1498. (in Chinese)
- [10] Khan S S, Shareef H, Mutlag A H. Dynamic temperature model for proton exchange membrane fuel cell using online variations in load current and ambient temperature[J]. International Journal of Green Energy, 2019, 16(5): 361-370.
- [11] Zhang Q G, Xu L F, Li J Q, et al. Performance prediction of proton exchange membrane fuel cell engine thermal management system using 1D and 3D integrating numerical simulation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(3): 1736-1748.
- [12] Bao C, Ouyang M G, Yi B L. Analysis of the water and thermal management in proton exchange membrane fuel cell systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(8): 1040-1057.
- [13] Kang S, Min K. Dynamic simulation of a fuel cell hybrid vehicle during the federal test procedure-75 driving cycle[J]. Applied Energy, 2016, 161: 181-196.
- [14] Xu J M, Zhang C Z, Fan R J, et al. Modelling and control of vehicle integrated thermal management system of PEM fuel cell vehicle[J]. Energy, 2020, 199: 117495.
- [15] Jiang H L, Xu L F, Li J Q, et al. Design and control of thermal management system for the fuel cell vehicle in low-temperature environment[J/OL]. SAE Technical Papers, 2020 [2021-05-01]. <https://doi.org/10.4271/2020-01-0851>.
- [16] 纪常伟, 李响, 梁晨, 等. 基于LMS AMESim的车用燃料电池-锂离子动力电池混合动力系统能量管理仿真[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(1): 58-67.
Ji C W, Li X, Liang C, et al. Simulation of energy management for hybrid power system of vehicle fuel cell and lithium ion power battery based on LMS AMESim[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(1): 58-67. (in Chinese)
- [17] Bargal M H S, Abdelkareem M A A, Tao Q, et al. Liquid cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks: a detailed survey[J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(2): 635-655.
- [18] Wei Q S, Zhang X, Oh B S. The effect of driving cycles and H₂ production pathways on the lifecycle analysis of hydrogen fuel cell vehicle: a case study in South Korea[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(10): 7622-7633.
- [19] 郭硕. 质子交换膜燃料电池热管理系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
Guo S. Study on proton exchange membrane fuel cell thermal management system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)

(编辑 罗敏)