

## 燃料电池发动机水热管理系统设计、仿真与试验验证

马文举, 周家旺, 谢奇光, 李洪涛, 姜珮, 胡囡涛, 周丰松

(东风汽车集团有限公司研发总院, 武汉 430058)

**摘要:** 燃料电池水热管理系统是维持燃料电池发动机水热平衡的核心系统, 其流量、温度、压力分布等都对燃料电池发动机的性能、功耗和可靠性有着重要的影响。基于某额定功率 120 kW 的燃料电池发动机, 从系统功能和性能最优的角度给出了架构方案设计、零部件选型匹配的理论依据, 根据相关设计输入和设计目标要求, 借助一维仿真软件 FloMaster 进行了水热管理系统的建模、仿真与结果分析, 评估了系统在不同工况下流量、压力、温度和流速的分布, 并通过台架试验手段进行了验证。仿真与试验结果表明, 在系统额定工况和怠速工况点, 水泵流量、电堆进出口温差、电堆入口温度等关键技术指标均满足系统目标需求。

**关键词:** 燃料电池发动机; 水热管理系统; 系统设计; 仿真; 试验验证

中图分类号: U469.72+2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.04.11

## Design, Simulation and Experimental Verification of the Water-Thermal Management System for a Fuel Cell Engine

MA Wenju, ZHOU Jiawang, XIE Qiguang, LI Hongtao, JIANG Pei,

HU Jiongtao, ZHOU Fengsong

(Dongfeng Motor Corporation Research & Development Institute, Wuhan 430058, China)

**Abstract:** The water-thermal management system of a fuel cell is the core system that maintains the water-thermal balance of fuel cell engines. Factors such as flow rate, temperature and pressure distribution have significant impacts on the performance, power consumption, and reliability of fuel cell engines. Based on a 120 kW-rated fuel cell engine, a theoretical basis for architecture design and component selection matching was provided from the perspective of optimal system function and performance. According to relevant design inputs and objectives, the modeling, simulation, and result analysis of the water-thermal management system were carried out using the one-dimensional simulation software FloMaster. The distribution of flow rate, pressure, temperature, and velocity in the system under different operating conditions was evaluated, and verified through bench testing. The simulation and experimental results show that key technical indicators, such as the water pump flow rate, the temperature difference between the inlet and outlet of the fuel cell stack, and the inlet temperature of the fuel cell stack meet the system's target requirements under both rated and idle operating conditions.

收稿日期: 2024-02-21 改稿日期: 2024-04-17

参考文献引用格式:

马文举, 周家旺, 谢奇光, 等. 燃料电池发动机水热管理系统设计、仿真与试验验证[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(4): 674-686.

MA Wenju, ZHOU Jiawang, XIE Qiguang, et al. Design, Simulation and Experimental Verification of the Water-Thermal Management System for a Fuel Cell Engine[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(4): 674-686. (in Chinese)



**Keywords:** fuel cell engine; water-thermal management system; system design; simulation; experimental verification

随着世界向着零碳排放的目标加速前进,迄今为止,占全球生产总值超过70%的30多个国家和地区已发布了相应的氢能战略。绿氢作为一种低碳、灵活的能源形式,在汽车交通领域发挥着越来越重要的作用。氢燃料电池汽车具有零排放、续航里程长、燃料加注快的特点,是全球汽车动力系统转型升级的重要方向之一,也是我国新能源汽车战略的重要组成部分<sup>[1]</sup>。

燃料电池系统的工作原理为电解水的逆反应,其工作温度一般为60~80℃,在反应的过程中约有50%左右的能量会转化为热能<sup>[2]</sup>。水热管理系统作为燃料电池发动机的几个核心子系统之一,其设计是否合理对质子交换膜燃料电池系统的性能和动态特性都有很大的影响<sup>[3-5]</sup>。燃料电池的水热管理是指通过控制流经电堆的冷却液流量进行燃料电池电堆的温度控制,其核心任务是将燃料电池的工作温度控制在安全合理的范围。如果工作温度过低,电堆的活化极化损失会增强,导致电堆的性能变差;如果工作温度过高,又容易导致膜水干,使欧姆极化损失加大,导致电堆性能下降<sup>[6]</sup>。目前,针对氢燃料电池发动机水热管理系统,国内外学者已做了大量的研究,其核心重难点之一是如何通过合理的架构设计与零部件选型匹配实现系统稳定高效地运行。刘波等<sup>[7]</sup>分析了各种散热技术在燃料电池热管理领域的研究和应用现状,结果表明,进行有效热管理的重点是电堆的最高温度和温度分布均匀性等指标。NOLAN等<sup>[8-10]</sup>研究了燃料电池的产热和散热分布,结果表明,燃料电池发动机工作温度较低,且工作过程中产生的热量,除少部分被排气带走外,其余超过90%的热量均通过冷却液被带走发散,这对燃料电池系统的散热提出了更高的挑战。贾秋红等<sup>[11]</sup>针对车载燃料电池散热部件的排布方式对热管理系统的影响进行研究,结果表明,在不同工况下,散热部件的不同排布方式有不同的

优缺点。王远等<sup>[12]</sup>对国外典型燃料电池汽车水热管理系统布置方案进行了分析,总结了水热管理系统的设计要点。

本文以国内自主开发的某燃料电池发动机为基础,对水热管理系统的设计匹配、建模仿真及试验验证进行研究。根据水热管理系统的性能指标及核心零部件匹配的要求,进行了燃料电池发动机水热管理系统的方案设计,并利用一维仿真软件FloMaster进行建模与仿真分析,研究了系统的温度、压力分布和流量、流速情况,同时利用台架试验结果进行了方案验证,为氢燃料电池水热管理系统的开发设计和关键零部件方案选型提供了参考。

## 1 研究对象

本文的研究对象为自主开发的某系统功率为120 kW的氢燃料电池系统。该系统的主要技术参数,见表1。

表1 系统主要技术参数

参数	值
额定输出功率/kW	120
最高效率/%	≥60
质量功率密度/(W/kg)	≥650
最低工作温度/℃	-30
寿命/h	≥15 000

燃料电池水热管理系统的管理对象主要包括电堆、水泵、水空中冷器、去离子器、膨胀水壶、散热器、正温度系数(Positive Temperature Coefficient, PTC)加热器、电控调温器、氢气换热器等。根据整车及燃料电池发动机系统层级的目标输入和关键性能指标分解,输出水热管理子系统各主要零部件参数和性能要求,见表2。

电堆是水热管理系统中最核心的零部件,该款电堆最佳的工作温度范围为65~83℃。同时,为保证电堆内部温度分布的均匀性,还要保证电堆进

表 2 系统主要零部件参数和性能要求

项目	零部件	设计指标	
		额定点	怠速点
散热量/kW	电堆	179.0	14.8
	中冷器	12.8	-0.4
	氢气换热器	-3.3	-0.4
温度/°C	电堆入口温度	≤65	≤60
	电堆进出口温差	≤17	≤4.5
	中冷器出口温度	≤70	
	散热器进出口温差	≤16.5	
压力/kPa	电堆入口压力	≤130	
	水泵入口压力	≥30	
流速/(m/s)	主路	≤3	
	支路	≤10	

出口温差小于 17 °C。电堆、水空中冷器作为系统中的主要发热源，系统设计要满足其散热需求。此外，电堆的水侧工作压力设计也对其可靠性具有重要影响，同样应重点考虑。

## 2 系统架构方案设计

水热管理系统架构的设计应从功能和性能角度出发，基于热源发热特性和温度要求，合理设计热管理方式和系统结构，并将其有机地组合起来<sup>[13]</sup>，再结合各部件的功能特性和结构特点来布置该系统各个零部件的位置，最终形成水热管理系统的最终构型。

本研究对象水热管理系统架构方案，如图 1 所示。

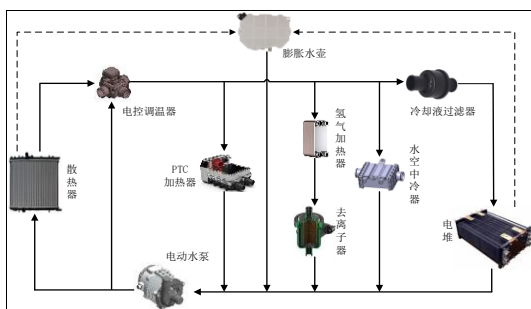


图 1 水热管理系统架构

由于本燃料电池发动机选用的电堆水侧工作压力较低，水泵出水直接进入电堆会超过电堆允许的

水侧工作压力，所以进行系统架构设计时，水泵出水连接散热器和三通阀，可通过系统的沿程阻力降来保证电堆入水压力处于合理水平。将冷却液过滤器与电堆入水口串联，可用于滤除进堆杂质。由于 PTC 加热器主要用于低温冷启动过程中给冷却液加热，所以将其布置于小循环回路中且与电堆并联。因为水空中冷器的散热和水流量需求仅次于电堆，所以一般采用和电堆支路并联的方案。由于氢气换热器和去离子器的流量需求较小且比较接近，所以二者串联在同一支路中与另外几个支路并联。此外，水热管理系统还需要设置膨胀水箱，用于去除电堆和散热器内部的气体，同时给水泵进口补水，保持整个系统平衡。

## 3 系统选型匹配

### 3.1 水泵

水泵是燃料电池水热管理系统的动力源，通过水泵转速调节可以控制管路中冷却液的流速进而控制换热强度。合理匹配水泵的流量和扬程才能保证系统各处的流量和压力分布满足要求，同时让水泵功耗处于合理水平。本系统选用的水泵为国内某主流厂商生产的高压电动水泵，水泵结构型式为离心式。水泵流量计算如式 (1) 所示。

$$V_{\text{pump}} = \frac{Q_{\text{system}}}{c_w \rho_w \Delta t_{\text{system}}} \quad (1)$$

式中： $V_{\text{pump}}$  为水泵的体积流量； $Q_{\text{system}}$  为系统的散热量； $c_w$  为冷却液比热容； $\rho_w$  为冷却液密度； $\Delta t_{\text{system}}$  为系统进出口水温差。

水泵扬程的初步估算如式 (2) 所示。

$$H_{\text{pump}} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3}{9.8} \quad (2)$$

式中： $H_{\text{pump}}$  为水泵的扬程； $\Delta P_1$  为散热器的水压降； $\Delta P_2$  为电堆的水压降； $\Delta P_3$  为系统其他零部件水压降及沿程管路损失压降等。

水泵功率计算如式 (3) 所示。

$$P_{\text{pump}} = \frac{\rho_w V_{\text{pump}} H_{\text{pump}} g}{\eta_{\text{pump}}} \quad (3)$$

式中： $P_{\text{pump}}$  为水泵轴功率； $\eta_{\text{pump}}$  为水泵效率； $g$  为重力加速度。

根据表 2，将系统散热量及温差输入等代入式

(1), 初步计算得出水泵流量不低于 234.4 L/min。根据计算结果和行业竞品对标情况, 选定某主流厂商生产的额定功率为 1.5 kW、流量为 210 L/min、扬程为 22 m 的高压电动水泵, 其性能曲线如图 2 所示。

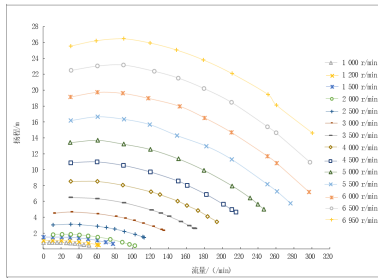


图2 水泵性能曲线

### 3.2 散热器

散热器的作用是将冷却液的热量传递给环境, 降低冷却液的温度。这要求氢燃料电池水热管理系统的散热器具备散热性能高、清洁度高和离子释放率低等特性。当前主流的车用散热器为铝制管带式散热器, 其换热效率高、质量轻且成本低, 已在国内外广泛应用<sup>[14]</sup>。

散热器的散热性能需求计算如式(4)所示。

$$Q_{\text{radiator}} = Q_{\text{system}} \quad (4)$$

式中:  $Q_{\text{radiator}}$  为散热器散热量。

散热器的散热面积计算如式(5)所示。

$$A = K \times \frac{Q_{\text{radiator}}}{h(T_w - T_a)} \quad (5)$$

式中:  $A$  为散热器散热面积;  $K$  为储备系数, 一般取 (1.1~1.2);  $h$  为散热器表面对流换热系数;  $T_w$  为散热器水侧平均温度;  $T_a$  为散热器空气侧平均温度。

根据上述理论公式计算和布置边界条件, 最终选定的某款散热器的主要参数, 见表3。

### 3.3 电控调温器

电控调温器的作用是改变冷却液的流电路径, 当电堆冷启动或温度较低时, 控制冷却液不流经散热器, 确保电堆温度迅速达到工作温度(小循环); 当电堆温度过高时, 控制冷却液流经散热器进而达到散热的作用(大循环)。目前, 主流的电控调温器为电控两位三通阀, 通过程序智能地调节球阀转

表3 散热器主要参数

参数	值
散热器流道型式	纵流
散热器芯体尺寸(宽×高×厚)/mm	814×890×52
散热管厚度方向排数/排	2
每排散热管数量/个	114
散热管内部通道尺寸/mm	26×1.60
散热管壁厚/mm	0.26
散热翅片波高/mm	5.50
散热翅片间距/mm	2.10
散热翅片厚度/mm	0.06
进出水室尺寸(宽×高)/mm	75×70

动角度实现精确的大小循环分水量<sup>[15]</sup>。电控调温器选型时需要关注流阻、泄漏量及响应性等关键指标。根据开发经验和市场竞品对标情况, 本系统选用的某款电控调温器主要技术参数, 见表4。

表4 电控调温器主要技术参数

参数	值
驱动功率/W	≤5
工作压力/kPa	≤300
工作温度/°C	-40~105
工作电压/V	18~24
流阻/kPa	≤20 (大循环 350 L/min 流量下)
	≤20 (小循环 225 L/min 流量下)
内泄漏/(L/h)	≤2 (150 kPa 压力下)

### 3.4 水空中冷器

在燃料电池空气供应子系统中, 经过空气压缩机压缩后的空气温度能达到 150 °C 以上<sup>[16]</sup>, 因此, 压缩空气需要经过冷却降温后才能进入电堆内部参与反应<sup>[17]</sup>。水空中冷器主要功能是冷却增压后的高温空气, 需要保证中冷器的入口水温 and 流量, 才能使增压后的空气达到理想的冷却温度。氢燃料电池发动机常用的水空中冷器有叠片式和管壳式两种结构形式, 管壳式中冷器由于其较好的换热性能和更低的流动阻力<sup>[18]</sup>, 逐渐成为燃料电池水热管理系统中主流采用方案。

水空中冷器所需的散热性能计算如式(6)所示。

$$Q_{\text{intercooler}} = \frac{c_{\text{air}} m_{\text{air}} \Delta t_{\text{air}}}{3600} \quad (6)$$

式中： $Q_{\text{intercooler}}$  为中冷器换热量； $c_{\text{air}}$  为空气定压比热容； $m_{\text{air}}$  为进气质量流量； $\Delta t_{\text{air}}$  为中冷器进出口空气温差。

根据系统输入的空气侧流量和温度要求，可得出中冷器的换热性能，本系统选用的国内某公司生产的管壳式水空中冷器的主要技术参数，见表 5。

表 5 水空中冷器主要技术参数

参数	值
散热性能/kW	$\geq 12.80$
进气温度/°C	$200 \pm 10$
气侧阻力/kPa	$\leq 5$ (在 150 g/s 气体流量下)
水侧阻力/kPa	$\leq 40$ (在 40 L/min 水流量下)
中冷器芯体尺寸(长×宽×厚)/mm	$220 \times 120 \times 90$
中冷器芯体内通道数/个	12
中冷器芯体外通道数/个	11

### 3.5 PTC 加热器

PTC 加热器是用于燃料电池发动机冷启动过程中对冷却液辅助加热，从而缩短系统达到适宜工作温度区间的部件。PTC 具有温度自限性，加热功率会随着温度的变化而变化<sup>[19]</sup>，在低温条件下有更高的加热功率，有助于低温的快速加热，高温时自动减小功率，降低加热速率，防止过加热。PTC 加热功率的粗略估算如式 (7) 所示。

$$P_{\text{PTC}} = \frac{(c_w V_s \rho_w + c_{\text{stack}} m_{\text{stack}}) \Delta t_{\text{cold start}}}{T_{\text{cold start}} \eta_{\text{PTC}}} \quad (7)$$

式中： $P_{\text{PTC}}$  为 PTC 加热功率； $V_s$  为水热管理系统小循环冷却液容积； $c_{\text{stack}}$  为电堆比热容； $m_{\text{stack}}$  为电堆质量； $\Delta t_{\text{cold start}}$  为加热起始和终了时刻冷却液温差； $T_{\text{cold start}}$  为冷启动目标升温时间； $\eta_{\text{PTC}}$  为 PTC 加热器效率。

本系统选用的某 PTC 加热器主要技术参数见表 6，加热功率曲线如图 3 所示。

### 3.6 膨胀水箱

膨胀水箱总成在水热管理系统中起到除气和保压的作用。一般在电堆上部和散热器顶部都设置有除气口，由管路连接到膨胀水壶上部的进水口上。系统升温过程中，冷却液里析出的气体随着冷却液

表 6 PTC 加热器主要技术参数

参数	值
功率/kW	$6 \pm 0.8$
工作温度范围/°C	$-40 \sim 105$
工作电压/V	$500 \sim 900$
绝缘电阻/M $\Omega$	$\geq 200$
流阻/kPa	$\leq 20$ (在 30 L/min 流量下)

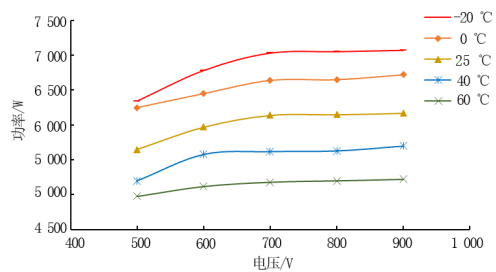


图 3 PTC 加热功率曲线

的循环，进入到膨胀水壶中，并在膨胀水壶中实现气液分离，以避免气泡参与到冷却循环中，从而造成电堆内部冷却效果下降和温度分布不均匀的问题。

膨胀水壶的容积计算如式 (8) ~ (11) 所示。

$$V_{\text{tank}} = V_r + V_{\text{full-low}} + V_{\text{low}} \quad (8)$$

$$V_r = \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \times V_1 \quad (9)$$

$$V_{\text{full-low}} = (6\% \sim 11\%) \times V_{\text{all}} \quad (10)$$

$$V_{\text{low}} = 35A \times 10^{-6} \quad (11)$$

式中： $V_{\text{tank}}$  为膨胀水箱总容积； $V_r$  为膨胀容积； $V_{\text{full-low}}$  为补偿容积； $V_{\text{low}}$  为残留容积； $V_{\text{all}}$  为整个水热管理系统内腔总容积； $V_1$  为整个冷却系统冷却液密度最大时的冷却液容积，一般为最低许用温度时的容积； $\rho_1$  为冷却液最大密度，一般为在最低许用温度时的密度； $\rho_2$  为冷却液最小密度，一般为在最高许用温度时的密度； $A$  为膨胀水箱底平面投影面积。

膨胀水箱压力盖的选用原则为：

- 1) 系统冷却液沸点大于系统许用水温；
- 2) 水泵入水口压力大于水泵气蚀压力。

由于当前阶段燃料电池发动机水热管理系统工作的水温和压力普遍不高，所以市场主流的压力盖方案为常压或低压型压力盖。

本系统选用的膨胀水箱总成的主要技术参数，见表7。

表7 膨胀水箱主要技术参数

参数	值
总容积/L	6
膨胀容积/L	2.1
补偿容积/L	2.3
残留容积/L	1.6
泄压阀开启压力/kPa	30
真空阀开启压力/kPa	2.5~10

### 3.7 冷却液过滤器

冷却液过滤器的主要功能是对冷却系统进行过滤，避免生产制造过程中残留的杂质和异物进入电堆的双极板流道造成堵塞，从而影响电堆内部的冷却效果或造成水热管理系统中其他零部件的损坏。冷却液过滤器需满足高过滤精度、低流通阻力的特性要求。本系统选用的某款冷却液过滤器主要技术参数，见表8。

表8 冷却液过滤器主要技术参数

参数	值/周期
(长度×直径)/mm	213×55
压降/kPa	≤12.5 (在250 L/min水流量下)
过滤精度/%	≥99% (175 μm 粒径)
工作温度/°C	-40~95
保养周期	全寿命

## 4 建模与仿真

### 4.1 仿真目的

仿真分析是支撑系统零部件选型优化和性能定义的重要手段，其中一维仿真相比三维CFD仿真在复杂系统级建模和性能预测方面具有更全面、更快捷的优势，三维CFD仿真则更聚焦于零部件级流场详细结构的设计开发。因此，为了验证燃料电池水热管理系统架构设计和主要零部件选型是否合理，基于全球领先的一维流体系统仿真解算工具软件FloMaster进行仿真模型的搭建。仿真主要目的如下：

1) 进行回路内各部件的流量分布评估；

- 2) 进行回路布置及水力性能评估；
- 3) 进行冷却回路温度分布评估；
- 4) 进行冷却回路内部压力分布评估。

### 4.2 仿真实论基础

FloMaster软件可针对一维热流体系统进行仿真分析，在汽车、船舶、航空航天及给水排水等领域得到了广泛应用<sup>[20-23]</sup>。FloMaster模型可以对系统中的流动、传质、压力等物理现象进行比较准确的建模，这主要依赖于相应的数学求解模型。在仿真计算过程中，主要的数学模型方程如下。

流动阻力方程：

$$p_1 - p_2 = \xi \frac{\rho_{\text{coolant}}}{2} v^2 \quad (12)$$

式中： $p_1$ 、 $p_2$ 分别为元器件进出口的压力； $\xi$ 为一元器件的沿流动方向的流动损失系数； $v$ 为流体的流速。

质量守恒方程：

$$V = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (13)$$

式中： $V$ 为流体的体积流量； $A_1$ 、 $A_2$ 为元件边界处截面积； $v_1$ 、 $v_2$ 为元件截面处流体流速。

压力损失方程：

$$\Delta P = \left( P_1 + \frac{\rho_w v_1^2}{2} \right) - \left( P_2 + \frac{\rho_w v_2^2}{2} \right) + \rho_w g (z_1 - z_2) \quad (14)$$

式中： $\Delta P$ 为元件上下游的压力损失； $p_1$ 、 $p_2$ 分别为元件上下游位置的静压力； $\frac{\rho_w v_1^2}{2}$ 、 $\frac{\rho_w v_2^2}{2}$ 分别为元件上下游位置的动压力； $z_1$ 、 $z_2$ 分别为元件上下游位置中心处的标高。

换热方程：

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{mc_p} \quad (15)$$

式中： $T_1$ 、 $T_2$ 分别为元件进出口的温度； $Q$ 为在该元件处流体吸热或放热的功率； $m$ 为流体的质量流量； $c_p$ 为流体的定压比热容。

### 4.3 仿真的参数和边界输入

#### 4.3.1 系统零部件流阻输入

水热管理系统零部件的流阻对系统的阻力和各个部件的流量分配有着至关重要的影响：在水泵功率一定的情况下，回路流阻越大则流量越低，要保证相应的流量需求则需提升水泵扬程，从而克服相

应的阻力。通过收集各个零部件的流动阻力曲线，按照系统架构原理图进行仿真模型的搭建，可以评估系统的流量、压力分布情况。系统主要零部件的流动阻力曲线输入如图 4 所示，横坐标为流量，纵坐标为压降。

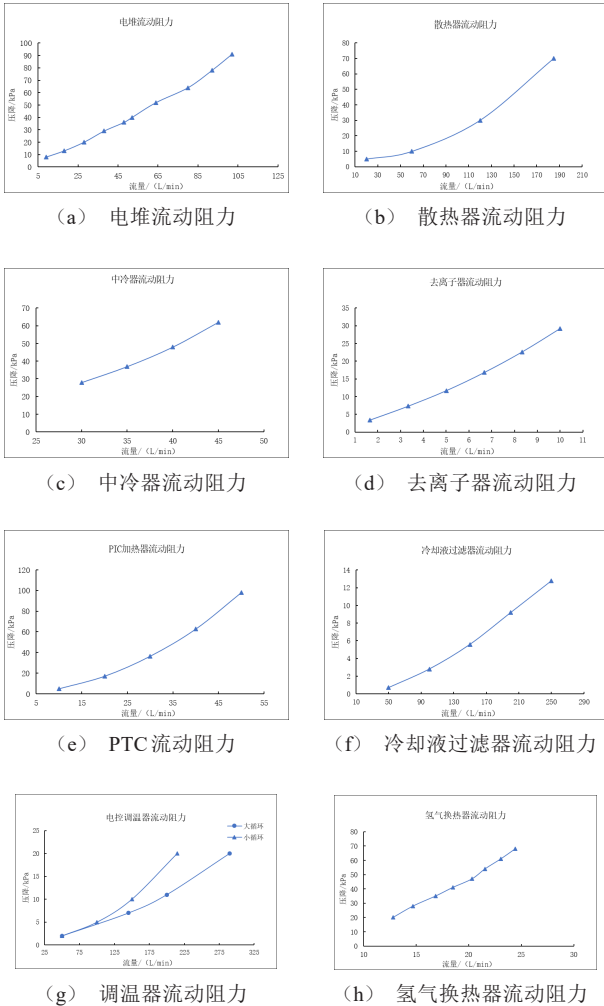


图 4 主要零部件的流阻曲线

4.3.2 仿真边界条件及工况

仿真边界条件和仿真工况分别见表 9 和表 10。

表 9 仿真计算边界

项目	参数
仿真类型	稳态传热
介质	燃料电池专用冷却液
环境温度/°C	40/-10
环境压力/kPa	0

表 10 仿真工况

工况	额定点-热态	额定点-冷态	怠速-热态	怠速-冷态
电控节温器	全开	全开/全关	全开	全关
环境温度/°C	40	-10	40	-10
电堆入口温度/°C	65	65	60	60

4.4 网络模型搭建

在进行网络模型搭建之前，应根据系统主要零部件的特性分类，在 FloMaster 模型库中选用相应的元件进行零部件建模。水热管理系统模型中选用的主要元件模型，见表 11。

表 11 系统主要元件模型

元件	名称	适用零部件
Pump: Radial Flow	径流泵	电动水泵
Heat Exchanger: Heater-Cooler	换热器	电堆、中冷器、氢气换热器等
Loss Discrete	阻力元件	冷却液过滤器、去离子器等
Valve: Gate	闸阀	电控调温器
Reservoir	水箱	膨胀水箱
Pipe: Cylindrical	圆管	连接管路
Bend: Circular	弯头	弯管、接头等

完成主要零部件的建模后，应按照系统架构方案及系统和整车管路布置，在 FloMaster 软件中进行网络模型的连接搭建。在进行模型搭建的过程中，本系统管路长度、直径均基于系统及整车管路三维数模进行设定，其他零部件流动阻力和换热量都基于前文的相关输入进行设定。最终搭建的 FloMaster 一维仿真模型如图 5 所示，系统各零部件模型见图中标示。

5 仿真结果分析

5.1 系统流量、压力、温度、流速分布

按照表 10 的仿真工况运行一维仿真模型，系统运行收敛后可从结果云图直观得到整个系统的流量、压力、温度、流速分布情况，以额定热态工况为例，结果如图 6~9 所示。

5.2 仿真计算结果汇总

由于仿真结果数据较多，仅选取与结果评价相

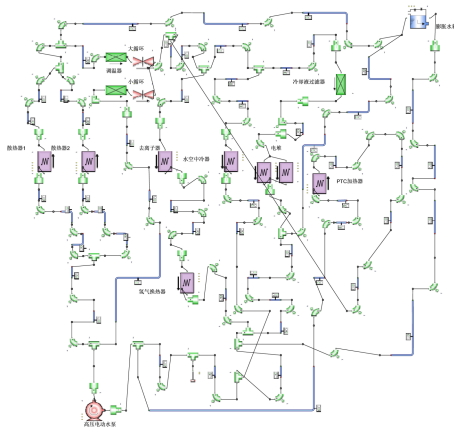


图 5 水热管理系统一维仿真模型

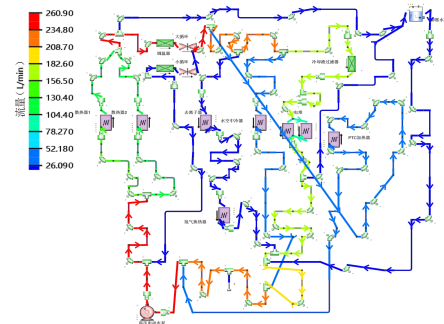


图 6 系统流量分布

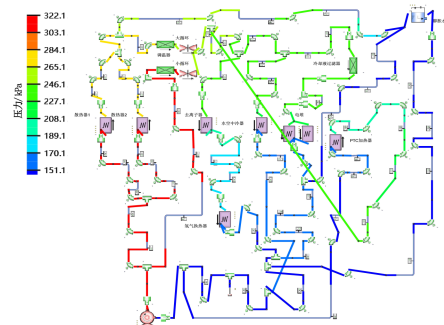


图 7 系统压力分布

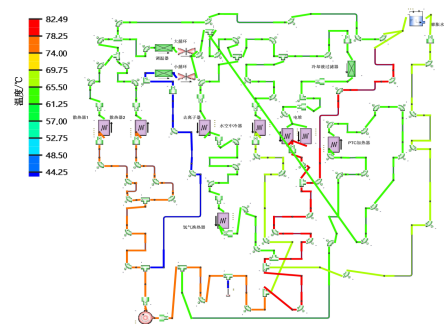


图 8 系统温度分布

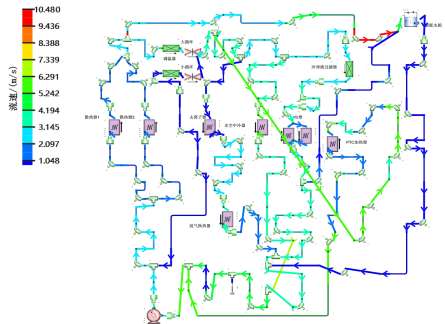


图 9 系统流速分布

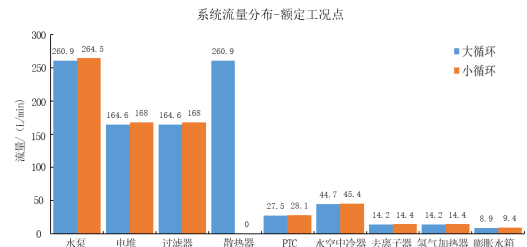


图 10 系统流量分布

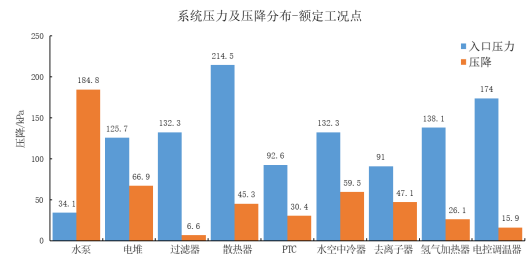


图 11 系统压力及压降分布

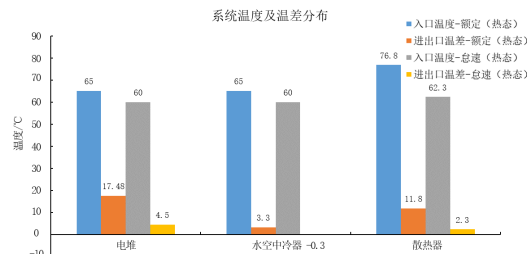


图 12 系统温度及温差分布

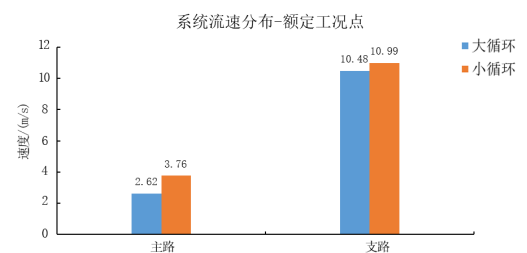


图 13 系统流速分布

关的几个工况下的系统和零部件仿真结果进行展示，如图 10~13 所示。

根据仿真计算结果和系统设计目标对比后得出以下结论。

1) 水泵: 该高压电动水泵在额定转速下, 流量为 261 L/min, 达到  $\geq 234.4$  L/min 的目标, 可以满足系统各散热部件的流量需求。

2) 电堆: 在额定工况下, 散热量为 179 kW, 电堆流量为 164.6 L/min, 进出水温差为 17.5 °C, 略超出目标温差 17 °C, 在可接受的范围内 ( $\pm 5\%$ ); 怠速工况和怠速转速下, 散热量为 14.8 kW, 电堆流量为 53.3 L/min, 进出水温差为 4.5 °C, 满足目标温差为 4.5 °C 的要求; 额定工况下, 电堆入口压力最大 ( $125.7 \text{ kPa} < 130 \text{ kPa}$ ), 满足设计目标限值。

3) 散热器: 在额定工况下, 散热器的流量为 260.9 L/min, 温升为 11.8 °C, 满足  $\leq 16.5$  °C 的设计目标限值。

4) 中冷器: 在额定工况下, 水空中冷器散热量为 12.8 kW, 水流量可达 44.7 L/min, 进出口温差为 3.3 °C, 出口温度为 68.3 °C, 达到  $\leq 70$  °C 的设计目标, 可以满足散热量和出气口温度要求。

5) 压降及流速: 系统各部件和管路压降基本满足要求, 水泵入口压力最小为 34.1 kPa, 满足  $\geq 30$  kPa 的设计限值; 系统支路内最高流速为 10.99 m/s, 且略高于目标值 (10 m/s), 在可接受的范围内 ( $\pm 5\%$ )。

## 6 台架功能试验

### 6.1 测试台架

系统测试在燃料电池系统专用测试台架上进行, 整个系统由多个模块组成: 阴/阳极反应物供给单元、高低压配电系统、外部冷却系统、电子负载模块、数据采集模块、控制模块、安全保护和台架温度控制模块等。阴/阳极反应物供给单元分别与燃料电池空气系统和氢气系统连接, 按照试验工况精确控制供给反应气体流量; 高低压配电系统与燃料电池高低压电气子系统连接, 为系统 BOP 附件工作供电; 外部整车冷却系统由两组散热模块、膨胀水壶和相关管路等组成, 与燃料电池水热管理子系统进出水口和除气口连接, 模拟整车实际状态, 保证系统在各种工况下的热管理需求; 台架电子负载与燃电系统高压输出接口连接, 主要功能为系统运行提供加载方式和载荷控制; 台架控制系统与数据采集系统和燃料电池系统控制器相连, 负责燃电系统试验过程中工况的控制和试验过程中温度、压力、流量等数据的监控采集; 其余台架保护系统、环境温度控制系统等负责台架的氢电安全监控、试验环境温度调控等。测试台架原理如图 14 所示, 台架测试系统主要参数见表 12。

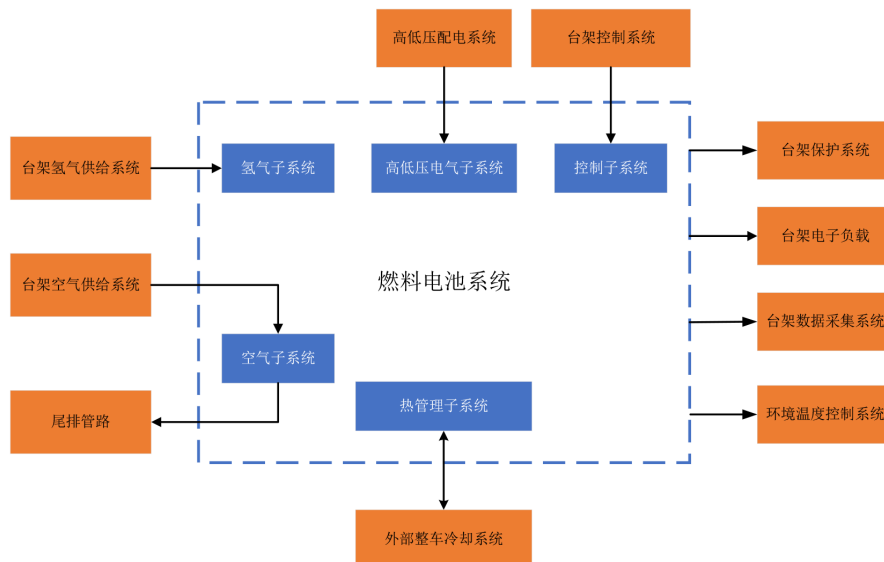


图 14 系统测试台架原理

表12 燃料电池发动机测试台架规格参数

项目	参数	
额定功率/kW	150	
氢气供给系统	氢气流量范围/(sL/min)	3 000
	氢压流量精度	$\pm 0.8\%RD + 0.2\%FS$
	氢压范围	2.5 MPa
空气供给系统	空气流量范围/(sL/min)	12 000
	空气流量精度	$\pm 1\%RD + 0.5\%FS$
	氮气吹扫	具有氢气路、冷却水回路氮气吹扫功能
	尾排	支持氢气、空气单独排放和混合排放（带水气分离装置）
冷却系统	冷却方式	台架外循环冷却或外界散热器冷却
	冷却介质	去离子水
	冷却散热功率/kW	200
	温度控制精度/%	$\pm 1$
保护系统	氢气泄漏报警	双路探测，报警值可设置
	在线绝缘监测	具备，报警值可设置
电子负载	电子负载功率/kW	150
	电子负载类型	回馈式
电气参数	高压电源	500 V、800 V可选
	低压电源	12 V、24 V或48 V可选
	供电电源	AC380 V，50 Hz
	通讯方式	内部通讯CAN，RS485，RS232，TCP/IP，外部LAN，RS485
数据采集系统	温度采集精度/ $^{\circ}C$	$\pm 1$
	压力采集精度/%	$\pm 3$
	流量测量精度/%	$\pm 5$

## 6.2 试验测试

按照系统测试台架原理图，如图14所示，进行燃料电池系统相关接口连接，并在水热管理系统处布置相应的温度、压力传感器、流量计等。以GB/T 24554—2022《燃料电池发动机性能试验方法》中规定的相关试验方法为基础，按照表10所列的工况进行水热管理系统的功能测试，被测系统在台架上的布置如图15所示。

## 6.3 试验结果分析整理

由于篇幅有限，选取几个典型工况下的系统实测流量、压力、温度分布结果与仿真结果的对比，如图16~21所示。

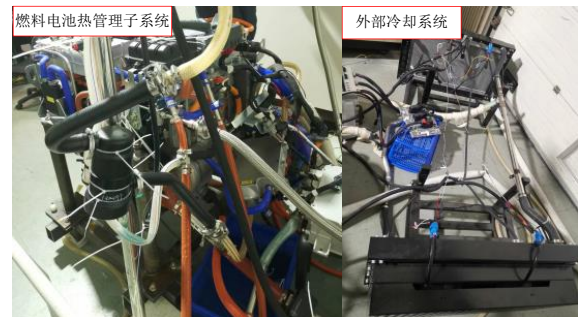


图15 燃料电池水热管理系统台架测试

对比实测结果和系统一维仿真结果后，得出以下结论。

1) 系统流量：去离子器支路和膨胀水箱支路的流量仿真和实测结果偏差稍大，经分析应为水空中冷器支路实际流阻较仿真输入流阻偏差较大所

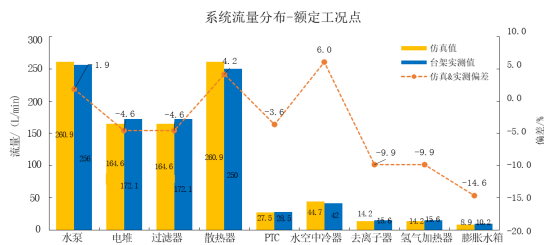


图 16 系统台架测试流量分布-额定工况点

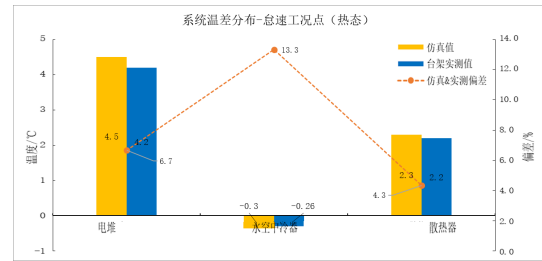


图 21 系统台架测试温差分布-怠速工况点

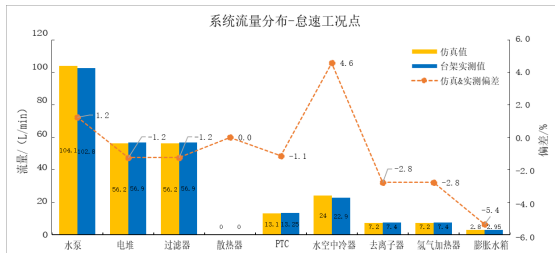


图 17 系统台架测试流量分布-怠速工况点

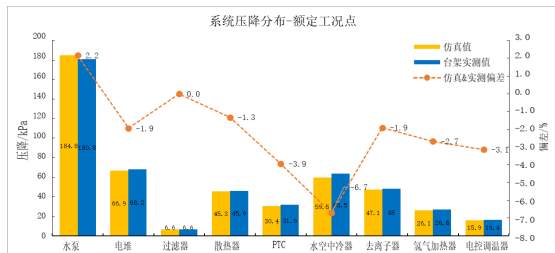


图 18 系统台架测试压降分布-额定工况点

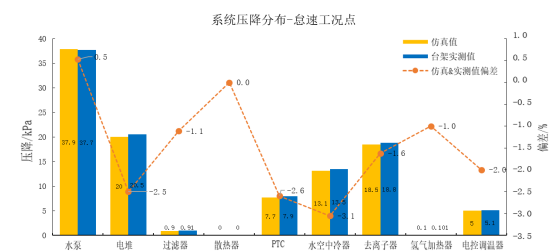


图 19 系统台架测试压降分布-怠速工况点

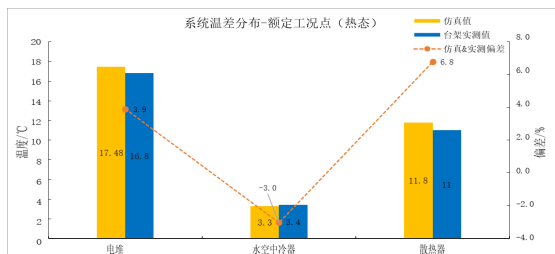


图 20 系统台架测试温差分布-额定工况点

致,从而导致水空中冷器支路流量稍有下降,其他几个支路流量相应增加,但仍处于合理范围内,后续根据零部件流阻实测结果对仿真模型进行标定修正。

2) 系统压降:水空中冷器压降实测结果比仿真输入结果大 7% 左右,这也是导致系统几个支路流量偏差的主要因素,后续要严格控制零部件性能一致性。

3) 系统温度:系统核心部件电堆的进出口温差在目标范围内,但水空中冷器由于流量下降导致进出口温差稍有提升,需要进一步确认在系统大功率时对进气温度的影响。

4) 综合系统和零部件的制造偏差、台架测试误差、测量精度等因素的影响,系统流量、压力、温度分布结果实测值与仿真值偏差基本在  $\pm 10\%$  以内,验证了系统设计选型的合理性和仿真的准确性。此外,对于偏离项可通过采用零部件质量控制和系统支路节流或旁通的方式进行改进优化。

## 7 总结

本文针对国内某主机厂的大功率燃料电池水热管理系统,给出了从系统架构方案设计到零部件方案选型的理论指导依据,采用一维仿真软件 FloMaster 搭建了水热管理系统仿真模型,针对系统不同工况下的流量、压力、温度及流速分布进行了仿真计算,并与设计目标和台架实测结果进行了对比分析,结果表明,仿真与实测结果均满足系统的设计评价指标,验证了系统设计选型的合理性。同时也发现仿真时零部件的流动阻力输入偏差对系统的压力和流量分布会产生较大的影响,具体体现在台架实测结果与仿真结果的偏差。由此也给系统开发过程中仿真环节提出了新的要求,即要根据试验结果进行仿真模型的修正和标定,不断迭代从而保证仿真模型的精度以确保系统的开发。采取仿真与

试验相耦合的开发模式可大大缩短试验优化、改进的周期,提升系统开发效率,规避前期潜在设计缺陷。应用该设计、仿真和验证流程,可为燃料电池

水热管理系统的开发提供全面有力的支撑,从而提升系统设计开发的效率和置信度。

## 参考文献 (References)

- [1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0 [R/OL]. (2020-10-27) [2024-01-16]. <http://www.sae-china.org/news/society/202010/3957.html>.  
China Society of Automotive Engineers. Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles 2.0 [R/OL]. (2020-10-27) [2024-01-16]. <http://www.sae-china.org/news/society/202010/3957.html>. (in Chinese)
- [2] OMRAN A, LUCCHESI A, SMITH D, et al. Mathematical Model of a Proton-Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell[J]. International Journal of Thermofluids, 2021, 11:1-10.
- [3] HUSSAIN M M, BASCHIK J J, LI Xiaogao, et al. Thermodynamic Analysis of a PEM Fuel Cell Power System [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(9):903-911.
- [4] KANDLIKAR S G, LU Zijie. Thermal Management Issues in a PEMFC Stack—A Brief Review of Current Status [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(7):1276-1280.
- [5] AHN J W, CHOE S Y. Coolant Controls of a PEM Fuel Cell System[J]. Power Sources, 2008, 179:252-264.
- [6] 展茂胜, 韩吉田, 于泽庭, 等. 车用 PEMFC 发动机水热管理与低温起动研究现状[J]. 内燃机与动力装置, 2018(5):82-87.  
ZHAN Maosheng, HAN Jitian, YU Zeting, et al. Research Progress on Water Heat Management and Low Temperature Starting of PEMFC Engine for Vehicle [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2018(5):82-87. (in Chinese)
- [7] 刘波, 赵锋, 李骁. 质子交换膜燃料电池热管理技术的进展[J]. 电池, 2018, 48(3):202-205.  
LIU Bo, ZHAO Feng, LI Xiao. Review on Thermal Management Technology of PEMFC[J]. Battery Bimonthly, 2018, 48(3):202-205. (in Chinese)
- [8] NOLAN J. Modeling and Control of an Automotive Fuel Cell Thermal System [D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2009.
- [9] LEE H S, CHO C W, SEO J H, et al. Cooling Performance Characteristics of the Stack Thermal Management System for Fuel Cell Electric Vehicles Under Actual Driving Conditions[J]. Energies, 2016, 9(5):1-14.
- [10] NOLAN J, KOLODZIEJ J. Modeling of an Automotive Fuel Cell Thermal System[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(15):4743-4752.
- [11] 贾秋红, 朱灵, 崔垚鹏, 等. 车载燃料电池散热部件排布方式热管理研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(6):308-316.  
JIA QiuHong, ZHU Ling, CUI Yaopeng, et al. Research on Thermal Management of Heat Dissipation Component Arrangement for On-Board PEMFC [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(6):308-316. (in Chinese)
- [12] 王远, 牟连嵩, 刘双喜. 国外典型燃料电池汽车水、热管理系统解析[J]. 内燃机与配件, 2019(24):198-200.  
WANG Yuan, MOU Liansong, LIU Shuangxi. Analysis of Water and Heat Management System of Typical Foreign Fuel Cell Vehicles [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(24):198-200. (in Chinese)
- [13] 李菁, 汪怡平, 陶琦, 等. 全功率燃料电池汽车散热系统设计、建模与分析[J]. 汽车工程学报, 2019, 9(6):462-467.  
LI Jing, WANG Yiping, TAO Qi, et al. Design, Modeling and Analysis of Heat Dissipation System for Full-Power Fuel Cell Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(6):462-467. (in Chinese)
- [14] 胡武, 谷波. 汽车发动机制冷散热器技术的发展现状及方向[J]. 制冷技术, 2010(3):11-14.  
HU Wu, GU Bo. Prospect of Automobile Radiator [J]. Refrigeration Technology, 2010(3):11-14. (in Chinese)
- [15] 王静中, 宋宏利, 张俊生, 等. 一种乘用车热管理控制阀控制系统[J]. 内燃机与配件, 2021(1):25-28.  
WANG Jingzhong, SONG Hongli, ZHANG Junsheng, et al. The Utility Model Relates to a Control System of Passenger Vehicle Thermal Management Control Valve [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(1):25-28. (in Chinese)
- [16] 周苏, 俞林炯, 高昆鹏, 等. 质子交换膜燃料电池系统中冷器建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4):769-773.  
ZHOU Su, YU Linjiong, GAO Kunpeng, et al. Modeling and Simulation Analysis of Intercooler in PEMFC System [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4):769-773.

- (in Chinese)
- [17] SUNDEN B, YUAN Jinliang. Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems Involving Heat Exchangers [J]. Heat Transfer Engineering, 2014, 35 (6-8):567-575.
- [18] 杜文静, 赵浚哲, 张立新, 等. 换热器结构发展综述及展望[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5):76-83.  
DU Wenjing, ZHAO Junzhe, ZHANG Lixin, et al. Review and Prospect of the Development of Heat Exchanger Structure [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(5):76-83. (in Chinese)
- [19] 余爱梅, 李强. 新型 PTC 材料的阻温特性及其热控性能的研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(2):525-531.  
YU Aimei, LI Qiang. Study on the Temperature-Resistivity Characteristics and Thermal Control Behavior of Novel PTC Materials [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(2):525-531. (in Chinese)
- [20] CAI Huikun, QIAN Yaoyi, HOU Liang, et al. Virtual Design and Analysis with Multi-Dimension Coupling for Engineering Machinery Cooling System [J]. Science China (Technological Sciences), 2015, 58(1):117-122.
- [21] ATMACA A U, EREK A, ALTAY H M. Comparison of Two Numerical Approaches to the Domestic Hot Water Circuit in a Combi Boiler Appliance [J]. Energy and Buildings, 2016, 127:1043-1056.
- [22] VARMA M, DANAPALAN P, KUMAR S S. A Novel Approach to Plug-in Hybrid Electric Vehicle Coolant System Modeling [C]//SAE Technical Papers, 2018-01-1189, 2018.
- [23] ARTHANARI T, KUMAR A, PATIL V, et al. Simplified Approach to Model a HEV/PHE-V/Battery Vehicle Cooling System in 1D and Validating Using DFSS Methodology [C]//SAE Technical Papers, 2020-01-1386, 2020.

#### 作者简介



马文举 (1994-), 男, 河南驻马店人, 学士, 工程师, 主要研究方向为燃料电池热管理系统。

Tel: 13756498339

E-mail: mawenju@dfmc.com.cn