

引文格式:

赵振瑞, 欧阳惠颖, 田国富, 等. 基于模糊逻辑与遗传算法的燃料电池热管理方法研究 [J]. 集成技术, 2021, 10(3): 35-46.  
Zhao ZR, Ouyang HY, Tian GF, et al. Research on thermal management method of fuel cell based on fuzzy logic and genetic algorithm [J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(3): 35-46.

# 基于模糊逻辑与遗传算法的燃料电池热管理方法研究

赵振瑞<sup>1,2</sup> 欧阳惠颖<sup>2,3</sup> 田国富<sup>1</sup> 郑春花<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>(沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870)

<sup>2</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

<sup>3</sup>(南方科技大学工学院 深圳 518055)

**摘 要** 有效的质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 热管理是提升氢燃料电池汽车安全性、耐久性以及运行效率的关键因素之一。该文提出一种 PEMFC 电堆热管理控制方法, 使电堆出入口温度保持在设定值。该方法以 PEMFC 热管理系统模型中电堆出入口温度的变化为依据, 设计一种二维模糊控制器, 并应用遗传算法优化模糊控制器的隶属度函数, 从而使模糊控制器的控制精度更高。为验证所提出方法的有效性, 该文选用 Autonomie 软件中的一款氢燃料电池汽车, 在两种标准工况上进行 PEMFC 热管理方法验证。仿真结果显示, 经过遗传算法优化后的模糊控制器相对于未优化的模糊控制器具有更高的控制精度, 电堆出入口温度与设定值的偏差更低。

**关键词** 质子交换膜燃料电池; 热管理; 模糊控制; 遗传算法; 氢燃料电池车

中图分类号 U 469.72 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20201231001

## Research on Thermal Management Method of Fuel Cell Based on Fuzzy Logic and Genetic Algorithm

ZHAO Zhenrui<sup>1,2</sup> OUYANG Huiying<sup>2,3</sup> TIAN Guofu<sup>1</sup> ZHENG Chunhua<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>( School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China )

<sup>2</sup>( Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China )

<sup>3</sup>( College of Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China )

\*Corresponding Author: ch.zheng@siat.ac.cn

**Abstract** The thermal management of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) influences the safety, durability, and operating efficiency of hydrogen fuel cell vehicles. A thermal management control method is proposed for PEMFCs in this research to maintain the temperature at the inlet and outlet of the

收稿日期: 2020-12-31 修回日期: 2021-02-21

基金项目: 深圳市海外高层次人才创新创业计划项目 (KQJSCX20180330170047681); 深圳无人驾驶感知决策与执行技术工程实验室计划项目 (Y7D004); 深圳电动汽车动力平台与安全技术重点实验室计划项目

作者简介: 赵振瑞, 硕士研究生, 研究方向为氢燃料电池汽车热管理; 欧阳惠颖, 硕士研究生, 研究方向为燃料电池; 田国富, 教授, 研究方向为大型机械和矿山机械; 郑春花(通讯作者), 副研究员, 博士研究生导师, 研究方向为新能源汽车能量管理及燃料电池, E-mail: ch.zheng@siat.ac.cn.

stack at the set values. A two-dimensional fuzzy controller is designed based on the temperature changes at the inlet and outlet of the stack in the thermal management system model of PEMFCs, where the membership function of the fuzzy controller is optimized by using the genetic algorithm, so that the control precision of the fuzzy controller is higher. A hydrogen fuel cell vehicle from the Autonomie software is used to validate the proposed thermal management method of the PEMFC on two standard vehicle driving conditions. Simulation results show that the fuzzy controller optimized by the genetic algorithm presents the higher control accuracy than the one without the optimization.

**Keywords** proton exchange membrane fuel cell; thermal management; fuzzy control; genetical gorithm; hydrogen fuel cell vehicle

**Funding** This work is supported by Shenzhen Science and Technology Innovation Commission (KQJSCX20180330170047681), Shenzhen Engineering Laboratory for Autonomous Driving Technology (Y7D004), and Shenzhen Key Laboratory of Electric Vehicle Powertrain Platform and Safety Technology

## 1 引 言

由于传统汽车使用的化石燃料正在逐年减少,同时汽车尾气排放造成的环境污染仍没有得到有效的改善,新能源汽车发展迅速,其中氢燃料电池汽车以其高效、清洁等优势受到了广泛关注。质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)具有能量转换效率高、可低温运行、可靠性高和零排放等优点,在汽车领域的应用前景广阔<sup>[1-2]</sup>。

电堆的工作温度是影响电堆输出性能和寿命的关键因素之一。一方面,温度过高将会导致液态水蒸发增加,使质子交换膜脱水,影响燃料电池的性能;另一方面,温度过低则会减少液态水的蒸发,降低化学反应速度,使燃料电池性能下降。一般地,电堆的正常工作范围在 60~100 °C,而 PEMFC 在运行过程中会产生大量的热量,因此需要对 PEMFC 进行有效的热管理。

目前,PEMFC 热管理控制方法主要有 PI(Proportion Integration)控制、状态反馈控制、预测控制和模糊控制等。O'Keefe 等<sup>[3]</sup>设计了 PI

控制器用于控制水冷型燃料电池温度,该控制器通过调节进入电堆的水流量来控制电堆的工作温度。PI 控制的原理简单、使用方便,目前传统 PI 控制已广泛用于 PEMFC 热管理中,但 PI 控制存在响应速度慢、调节时间长等缺点<sup>[4]</sup>。另外,状态反馈控制<sup>[5]</sup>、预测控制<sup>[6]</sup>等方法也被应用到 PEMFC 热管理中,但燃料电池固有的非线性特性以及参数的不确定性使得这些控制方法的应用具有一定难度。模糊控制响应速度快、抗干扰能力强,尤其适用于滞后系统的控制,被不少学者应用于 PEMFC 热管理中。Wang 等<sup>[7]</sup>设计了模糊控制方法,通过调节风扇转速来控制电堆的温度,与 PI 控制的对比结果表明,模糊控制具有优越性。胡鹏等<sup>[8]</sup>考虑了克服外部负载的干扰,并采用了带积分的模糊控制器实时调节冷却水的流量,结果显示该方法能实时将电堆的温度控制在合理的范围内。其中,模糊控制的设计主要依靠专家的经验,因此为了充分利用模糊控制的优点,需要对模糊控制方法进行优化,使模糊控制的精度更高。

另外,为验证 PEMFC 热管理方法的有效

性, 目前大多数相关文献采用阶跃负载信号的方式进行。而氢燃料电池汽车在实际行驶中会有加速、匀速、减速等过程, 工况的变化会更频繁且复杂。因此, 需要采用适合氢燃料电池汽车的负载来验证 PEMFC 热管理方法。

本文提出一种模糊控制方法用于 PEMFC 热管理中, 使电堆的出入口温度稳定在目标温度值。同时, 以电堆的出入口温度和目标温度值之间的误差更小、控制系统的响应时间更短为目标, 通过遗传算法对模糊控制器的隶属度函数进行优化。其中, 基于遗传算法优化模糊控制的方法虽在其他领域已有一些应用<sup>[9]</sup>, 但在 PEMFC 热管理控制领域还鲜有应用。本文选用 Autonomie 中的一款氢燃料电池混合动力汽车, 设计一种基于规则的能量管理策略, 并采用两种标准工况作为热管理方法的验证条件, 对所提出的热管理方法进行验证, 并与未优化的模糊控制进行性能比较。结果显示, 在对 PEMFC 电堆出入口温度的控制中, 经过优化的模糊控制明显优于未优化的模糊控制, 具有更好的温度调节能力, 可以更好地降低外部负载的扰动, 与设定值的偏差也 smaller。

## 2 PEMFC 热管理系统模型

本文设计的 PEMFC 热管理系统模型包括电堆温度动态模型、水箱模型和散热器模型。在氢燃料电池车运行过程中, PEMFC 在提供动力的同时会产生大量的热量, 为了使电堆的工作温度在合理的范围内, 需要冷却水泵和散热器一起工作来将多余的热量带走<sup>[10]</sup>。在本文的 PEMFC 热管理系统中, 电堆产生的热量被冷却水泵通过控制冷却水流量先带到水箱处, 然后将热量带到散热器处, 由散热器通过控制散热器风量, 将热量排放到空气当中, 具体如图 1 所示。本文假设冷却水中的温度均匀, 并将电堆出口冷却水温度

作为电堆出口处的温度, 将散热器的出口温度作为电堆的入口处温度。同时, 本文假设其他辅助系统处于正常工作状态下不影响电堆的工作温度。

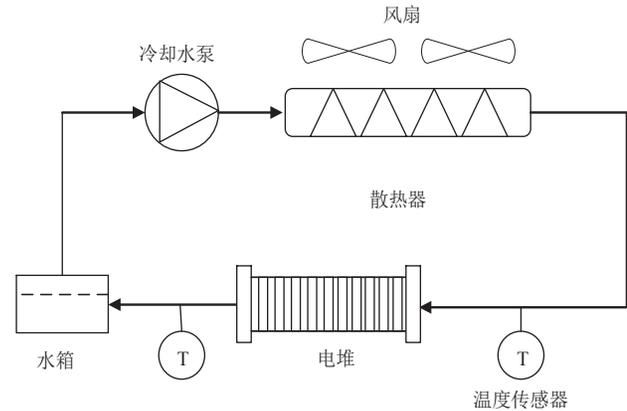


图 1 热管理系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal management system

### 2.1 电堆温度动态模型

氢燃料电池汽车在运行时需 PEMFC 提供大量的动力, 随着动力的产生, 电堆的温度也会有所变化。根据能量守恒定律建立 PEMFC 的电堆温度动态模型, 其能量包括电化学反应总功率  $Q_{\text{react}}$ 、负载消耗的电功率  $P_{\text{st}}$ 、阴阳极气体带入/带出的热功率  $Q_{\text{in}}/Q_{\text{out}}$ 、冷却水带走的热功率  $Q_{\text{cl}}$  及电堆向外辐射的热功率  $Q_{\text{amb}}$ , 具体如公式(1)<sup>[11]</sup>所示:

$$m_{\text{st}} C_{\text{st}} \frac{dT_{\text{st}}}{dt} = Q_{\text{react}} + Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} - P_{\text{st}} - Q_{\text{cl}} - Q_{\text{amb}} \quad (1)$$

其中,  $m_{\text{st}}$  为电堆的质量;  $C_{\text{st}}$  为电堆比热容;  $T_{\text{st}}$  为电堆冷却水出口温度, 工程中常把此温度看作电堆温度。

电化学反应的总功率表示为:

$$Q_{\text{react}} = \Delta H \frac{nI_{\text{st}}}{2F} \quad (2)$$

其中,  $n$  为电池节数;  $F$  为法拉第常数;  $\Delta H$  为反应焓变;  $I_{\text{st}}$  为电堆输出电流。

PEMFC 在反应过程会有气体出入电堆中, 气体带走的热量等于电堆内排出气体热量减去气体进入电堆的热量。根据热平衡公式和理想

状态下气体的状态方程, 进入电堆的气体热量可表示为<sup>[11]</sup>:

$$Q_{in} = (M_{an.H_2}^{in} C_{H_2} - M_{an.H_2O}^{in} C_{H_2O})(T_{an}^{in} - T_0) + (M_{ca.air}^{in} C_{air} - M_{ca.H_2O}^{in} C_{H_2O})(T_{ca}^{in} - T_0) \quad (3)$$

其中,  $M_{an.H_2}^{in}$  为阳极氢气入口流量;  $C_{H_2}$  为氢气比热容;  $M_{an.H_2O}^{in}$  为阳极水蒸气流量;  $C_{H_2O}$  为水蒸气比热容;  $T_{an}^{in}$  为阳极气体入口温度;  $M_{ca.air}^{in}$  为阴极空气入口流量;  $C_{air}$  为空气比热容;  $M_{ca.H_2O}^{in}$  为阴极入口水蒸气流量;  $T_{ca}^{in}$  为阴极入口温度;  $T_0$  为环境温度。

根据热平衡公式, 电堆出口的气体热量可表示为:

$$Q_{out} = M_{an.H_2}^{out} C_{H_2} (T_{an}^{out} - T_0) + (M_{an.H_2O}^{out} C_{H_2O} + M_{ca.O_2}^{out} C_{O_2} + M_{ca.N_2}^{out} C_{N_2} + M_{ca.H_2O}^{out} C_{H_2O} + M_{ca.H_2O,l}^{out} C_{H_2O,l}) (T_{ca}^{out} - T_0) \quad (4)$$

其中,  $M_{an.H_2}^{out}$  为阳极出口气体流量;  $T_{an}^{out}$  为阳极气体出口温度;  $M_{an.H_2O}^{out}$  为阳极出口水蒸气流量;  $M_{ca.O_2}^{out}$  为阴极氧气出口流量;  $M_{ca.N_2}^{out}$  为阴极氮气出口流量;  $C_{N_2}$  为氮气比热容;  $M_{ca.H_2O}^{out}$  为阴极出口水蒸气流量;  $M_{ca.H_2O,l}^{out}$  为阴极水出口流量;  $C_{H_2O,l}$  为液态水的比热容;  $T_{ca}^{out}$  为阴极气体出口温度。

负载消耗的电功率等于电堆输出电压  $V_{st}$  和电流  $I_{st}$  的乘积, 具体如公式(5)所示:

$$P_{st} = V_{st} I_{st} \quad (5)$$

本文选用 Autonomie 中的电堆模型来预测单电池的输出电压和输出功率。其中, 单电池在发电过程中产生了不可避免的损耗, 分别是活化损耗、欧姆损耗和浓度损耗。PEMFC 的实际输出电压等于热力学电动势减去以上 3 种损耗, 燃料电池的极化曲线如图 2 所示。

冷却水带走的热量  $Q_{cl}$  如公式(6)<sup>[12]</sup>所示:

$$Q_{cl} = W_{cl} C_{cl} (T_{st} - T_{st,in}) \quad (6)$$

其中,  $W_{cl}$  为冷却水流量;  $C_{cl}$  为冷却水比热容;  $T_{st,in}$  为电堆冷却水进口温度。

电堆热辐射散发热量  $Q_{amb}$  如公式(7)所示:

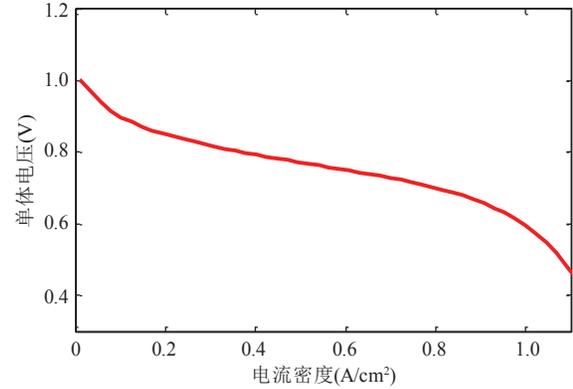


图 2 燃料电池极化曲线

Fig. 2 Fuel cell polarization curve

$$Q_{amb} = (T_{st} - T_0) \times k \times A_{st} \quad (7)$$

其中,  $k$  为传热系数;  $A_{st}$  为 PEMFC 的表面积。

## 2.2 水箱模型

水箱在 PEMFC 热管理系统中是一个储存冷却水的装置, 同时还可以降低整个冷却水循环系统中的水压, 防止水压过大对热管理系统造成破坏。本文假设水箱入口冷却水温度近似等于离开电堆出口冷却水温度  $T_{st}$ 。水箱的出口冷却水温度为  $T_{w,out}$ , 假设水很快混合到一起, 则水箱模型如公式(8)<sup>[6]</sup>所示:

$$m_w C_w \frac{dT_{w,out}}{dt} = W_{cl} C_{Pcl} (T_{st} - T_{w,out}) - h_w (T_{w,out} - T_0) \quad (8)$$

其中,  $m_w$  为水箱质量;  $C_w$  为水箱比热容;  $C_{Pcl}$  为冷却水的比热容;  $h_w$  为水箱的自然热传导系数。

## 2.3 散热器模型

散热器是热管理系统中重要的零部件, 可以通过空气之间的热交换来降低水流的温度。本文假设水箱出口温度  $T_{w,out}$  近似为进入散热器的温度, 并将散热器出口温度视为电堆入口温度  $T_{st,in}$ <sup>[6]</sup>, 则散热器模型如公式(9)所示:

$$m_r C_{Pcl} \frac{dT_{st,in}}{dt} = W_{cl} C_{Pcl} (T_{w,out} - T_{st,in}) - W_a C_{Pa} (T_{r,a} - T_0) \quad (9)$$

其中,  $W_a$  为空气质量流速;  $C_{Pa}$  为空气的比热容;  $T_{r,a}$  为散热器出口的空气温度, 视为散热器出入口冷却水温度的平均值。

### 3 PEMFC 热管理控制方法设计

#### 3.1 模糊控制方法设计

本文建立两个曼达尼型的二维模糊控制器, 对电堆出入口温度进行控制。针对电堆出口温度控制, 根据本文选用的电堆, 把电堆出口目标温度  $T_{ref, st}$  设定为  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 将电堆实际出口温度与设定目标温度的误差  $e_{st}$  和温度误差的变化率  $\dot{e}_{st}$  作为模糊控制器的输入, 冷却水流量作为模糊控制器的输出。针对电堆入口温度控制, 把电堆入口目标温度  $T_{ref, st, in}$  设为  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 将电堆实际入口温度与设定的目标温度的误差  $e_{in}$  和温度误差的变化率  $\dot{e}_{in}$  作为模糊控制器的输入, 散热器风量作为控制器的输出。整体模糊控制示意图如图 3 所示。

在对电堆出口温度控制时, 将模糊控制的输入、输出量都划分为 5 个模糊子集<sup>[13]</sup>, 即 NB(负大)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)和 PB(正大)。选取电堆出口温度误差和温度误差变化率的模糊论域为  $[-3, 3]$ , 选取冷却水流量的模糊论域为  $[0, 1]$ 。同样在设计电堆入口温度控制器时, 选取电堆入口温度误差和温度误差变化率的模糊论域都为  $[-3, 3]$ , 选取散热器风量的模糊论域为  $[0, 1]$ 。

本文提出采用遗传算法优化模糊控制器的隶

属度函数<sup>[14-15]</sup>, 如图 4 所示。未经优化的隶属度函数选用均匀分布的隶属度函数, 并使用三角形形状的隶属度函数, 如图 5 所示。本文采用 if-then 模糊控制规则设计模糊推理系统, 针对被控变量分别制定了 25 条模糊规则。表 1 为电堆出入口控制器的控制规则, 模糊推理后, 反模糊化采用加权平均法。

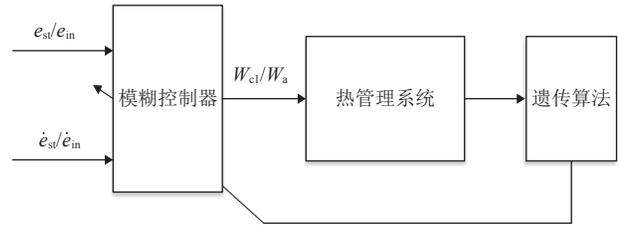


图 4 基于遗传算法的模糊控制器框图

Fig. 4 Fuzzy controller block diagram based on genetic algorithm

表 1 冷却水流量和散热器风量( $W_{cl}/W_a$ )的模糊控制规则表  
Table 1 Fuzzy control rules of cooling water flow rate and radiator air volume ( $W_{cl}/W_a$ )

$e_{st}/e_{in}$	$\dot{e}_{st}/\dot{e}_{in}$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB/PB	PS/PB	PS/PS	PS/ZO	ZO/ZO
NS	PB/PB	PS/PS	PS/PS	ZO/ZO	NS/NS
ZO	PB/PB	PS/PS	ZO/ZO	NS/ZO	NB/NB
PS	PS/PS	ZO/ZO	NS/NS	NS/NS	NB/NB
PB	ZO/PS	NS/NS	NS/NB	NS/NB	NB/NB

注: NB 为负大; NS 为负小; ZO 为零; PS 为正小; PB 为正大

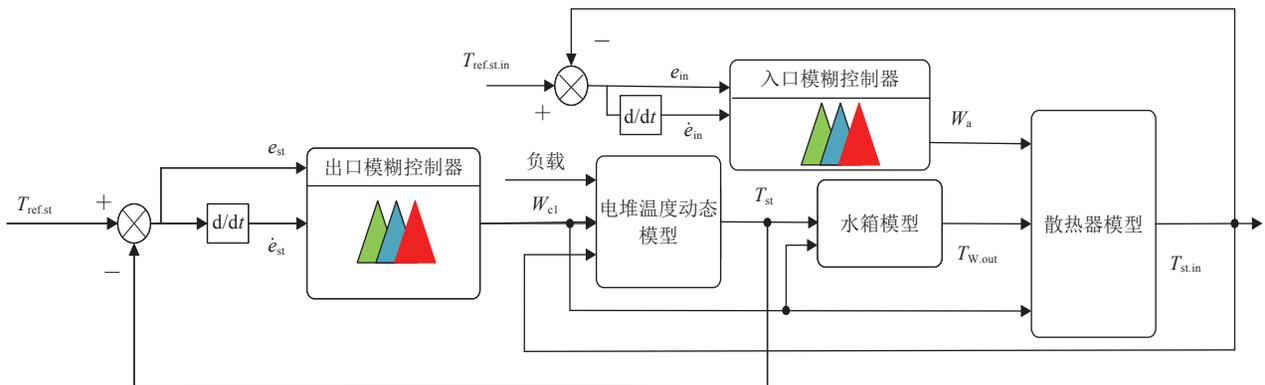


图 3 模糊控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fuzzy control

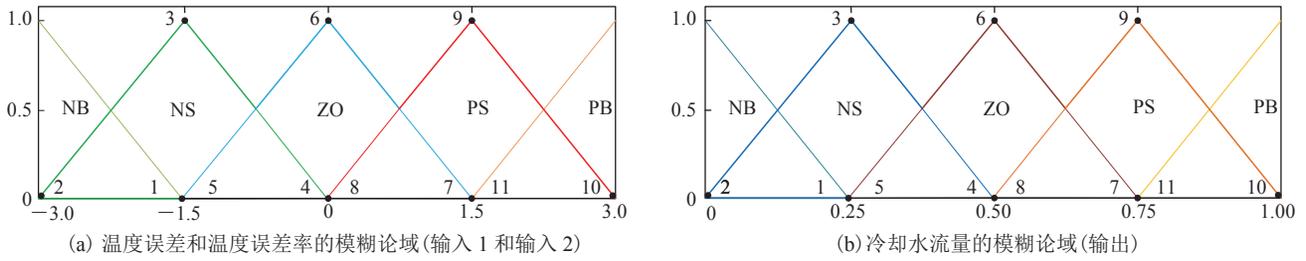


图5 输入输出隶属度函数以及待优化参数

Fig. 5 Input-output membership functions and parameters to be optimized

### 3.2 基于遗传算法的优化

本文提出使用遗传算法优化模糊控制器的隶属度函数的中心和宽度，从而提高模糊控制器的精准度和稳定性。

#### 3.2.1 遗传编码

本文需要对隶属度函数进行优化，首先确定待优化的参数，并对隶属度函数进行编码，如图5所示。输入输出待优化的参数一共有33个，采用实数编码，故对应的编码为 $\{x_1 x_2 x_3 x_4 \cdots x_{33}\}$ 。本文电堆入口模糊控制器与未经优化的电堆出口模糊控制器的隶属度函数一致，因此基于遗传算法优化过程只介绍针对电堆出口的模糊控制器。

#### 3.2.2 选取适应度函数

适应度是衡量种群中个体好坏的标志，其性能直接影响遗传算法的整体性能。ITAE (Integral Time-Weighted Absolute Error) 性能指标具有响应速度快、调节时间短等优点，本文选用ITAE性能指标作为适应度函数来调整模糊控制器的参数，具体如公式(10)所示：

$$\min F = \int_1^N t |T_{\text{ref}} - T_{\text{st}}| dt \quad (10)$$

其中， $t$ 为时间； $T_{\text{ref}}$ 为参考目标温度； $T_{\text{st}}$ 为电堆温度。

#### 3.2.3 个体的选择、交叉与变异

(1) 选择操作。选用轮盘赌法，即基于适应度比例的选择策略，个体 $i$ 被选中的概率为：

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^N F_j} \quad (11)$$

其中， $F_i$ 、 $F_j$ 分别为个体 $i$ 和个体 $j$ 的适应度值； $N$ 为种群中的个体数目。

(2) 交叉操作。由于个体采用实数编码，则交叉操作采用实数交叉法，第 $k$ 个染色体 $c_k$ 和第 $i$ 个染色体 $c_i$ 在 $j$ 处交叉的方法为：

$$\begin{cases} c_{kj} = c_{ij}(1-b) + c_{kj}b \\ c_{ij} = c_{ij}(1-b) + c_{kj}b \end{cases} \quad (12)$$

其中， $b$ 为 $[0, 1]$ 的随机数。

(3) 变异操作。第 $i$ 个个体的第 $j$ 个基因 $c_{ij}$ 进行变异的操作方法为：

$$\begin{cases} c_{ij} = c_{ij} + (c_{ij} - c_{\max}) * f(b), r \geq 0.5 \\ c_{ij} = c_{ij} + (c_{\min} - c_{ij}) * f(b), r < 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

其中， $c_{\max}$ 为基因 $c_{ij}$ 的上界； $c_{\min}$ 为基因 $c_{ij}$ 的下界； $f(b) = r_2(1-b/G_{\max})$ ， $r_2$ 为一个随机数， $b$ 为当前迭代次数， $G_{\max}$ 为最大进化次数， $r$ 为 $[0, 1]$ 的随机数。

## 4 仿真结果

为了验证本文所提出的PEMFC热管理控制方法的有效性，选取一款氢燃料电池混合动力汽车，针对燃料电池和电池的混合动力系统设计一种简单的能量管理策略，并根据第2小节和第3小节的内容，在计算机仿真环境下，对所提出的方法进行仿真。

### 4.1 仿真条件

#### 4.1.1 氢燃料电池汽车与行驶工况

为了使仿真结果更加接近氢燃料电池车在

运行过程中燃料电池的工作状态, 本文选用 *Autonomie* 软件中的一款氢燃料电池汽车, 其中燃料电池作为主动力源, 电池作为辅助动力源。表 2 为整车以及动力系统参数。本文选用 WLTC (The Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycles) 和 HWFET (Highway Fuel Economy Test) 两种工况<sup>[16]</sup>。其中, WLTC 工况是全球统一轻型车辆测试工况的一部分, 该工况取代了 NEDC (New European Driving Cycle) 测试工况, 包括 4 个速度范围<sup>[17]</sup>。图 6 显示了两种工况周期以及速度与时间的关系。

表 2 整车及动力系统参数

Table 2 Parameters of vehicle and powertrain system

类别	参数	数值
整车参数	整车质量 (kg)	1 763
	车轮半径 (m)	0.301
	迎风面积 (m <sup>2</sup> )	2.5
	风阻系数	0.24
燃料电池	燃料电池数量	400
	最大输出功率 (kW)	89
	最大工作效率	0.59
电池	最大输出功率 (kW)	39
	额定容量 (A·h)	39
电机	最输出大功率 (kW)	107
	最大效率	0.9

#### 4.1.2 能量管理策略

氢燃料电池车有燃料电池和电池两个动力源, 本文以燃料电池尽量工作在高效率区为目标, 设计基于规则的能量管理策略<sup>[18]</sup>。从燃料电池效率曲线可知, 燃料电池在高功率区和低功率区的工作效率都较低, 如图 7 所示。根据燃料电池效率曲线, 确定燃料电池工作门限值, 引入燃料电池最小功率  $P_{FCmin}$ 、燃料电池最大功率  $P_{FCmax}$ , 以及当燃料电池的效率下降到较低位置时对应的燃料电池输出功率  $P_C$ , 引入车辆需求功率  $P_{dem}$ 。同时为了使电池 SOC 工作在合理区域, 根据电池特性, 引入电池充放电门限值, 即电池 SOC 上限  $SOC_{max}$  和电池 SOC 下限

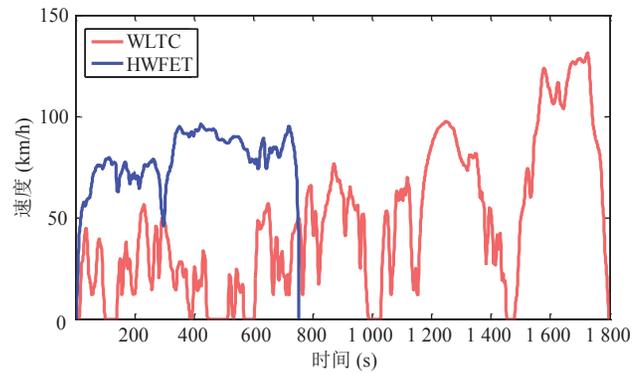


图 6 WLTC 和 HWFET 速度曲线

Fig. 6 Velocity curves of WLTC and HWFET cycles

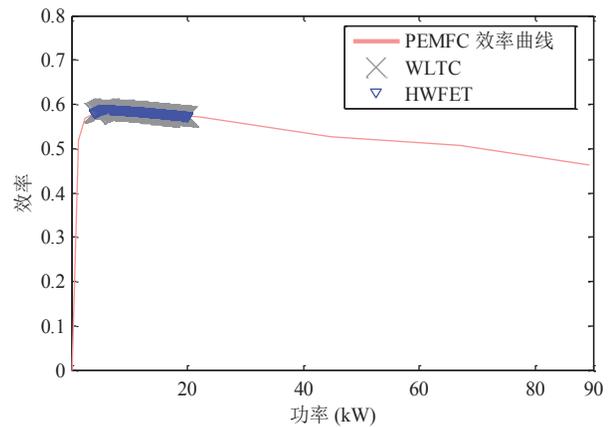


图 7 燃料电池效率曲线和两种工况下的燃料电池工作效率点

Fig. 7 Fuel cell efficiency curve and fuel cell efficiency points under two cycles

$SOC_{min}$ <sup>[19-21]</sup>。

能量回收工况下:

(1) 当车辆需求功率  $P_{dem} \leq 0$  时, 车辆处于制动或者停止状态, 若电池  $SOC > SOC_{max}$ , 则不再回收能量, 对应充电保护模式。

(2) 当车辆需求功率  $P_{dem} \leq 0$  时, 若电池  $SOC \leq SOC_{max}$ , 为保持 PEMFC 寿命和工作效率, 燃料电池以最小功率模式工作, 同时锂电池将对能量进行回收, 对应锂电池回收模式。

驱动工况下:

(1) 当车辆需求功率  $0 < P_{dem} < P_{FCmin}$  时, 若电池  $SOC \geq SOC_{max}$ , 车辆需求功率将全由燃料电池提供, 对应功率跟随模式。若电池  $SOC < SOC_{max}$ , 燃料电池将以恒功率  $P_{FCmin}$  工作, 对应最小功率

模式。

(2) 当车辆需求功率在  $P_{FCmin} \leq P_{dem} < P_C$  时, 若电池  $SOC \leq SOC_{min}$ , 燃料电池除了要满足负载功率要求, 还要为电池充电, 对应快速充电模式。若电池  $SOC > SOC_{min}$ , 则不再为电池充电, 对应功率跟随模式。

(3) 当车辆需求功率在  $P_C \leq P_{dem} < P_{FCmax}$  时, 若电池  $SOC \leq SOC_{min}$ , 将由燃料电池提供全部功率, 对应功率跟随模式。若电池  $SOC > SOC_{min}$ , 由于车辆需求功率较高, 燃料电池工作效率达到了阈值附近, 此时效率下降较快, 车辆需求功率将由电池和燃料电池共同分担, 燃料电池以恒功率  $P_C$  工作, 对应恒功率模式。

(4) 当车辆需求功率  $P_{dem} > P_{FCmax}$  时, 为了保护燃料电池, 燃料电池的输出功率为  $P_{FCmax}$ , 剩余功率需求由电池提供, 对应最大功率模式。

在本文基于规则的能量管理策略制定中, 测试工况决定了逻辑门限值参数的数值。同时, 决

定了燃料电池和电池的功率分配。图 8 为基于规则的能量管理策略原理图。

## 4.2 结果分析

### 4.2.1 PEMFC 输出功率结果

图 7 为两种工况下燃料电池工作效率点和燃料电池曲线。图 9 为 HWFET 和 WLTC 两种工况下能量管理策略的功率输出结果。从图 7 和图 9 可以看出, 车辆所需功率由电池和燃料电池一同提供, PEMFC 提供主要工作需求功率, 同时燃料电池的工作效率点始终保持在高效率区间。

### 4.2.2 隶属度函数优化结果

WLTC 工况是目前全世界通用的、更加符合实际道路状况的车辆行驶工况。本文选择该路况使用遗传算法分别对应用在电堆出入口的模糊控制器进行优化。将遗传算法的种群大小设为 100, 遗传代数设置为 100, 交叉率为 0.9, 变异率为 0.1。图 10 为电堆出入口模糊控制器优化后的隶属度函数。

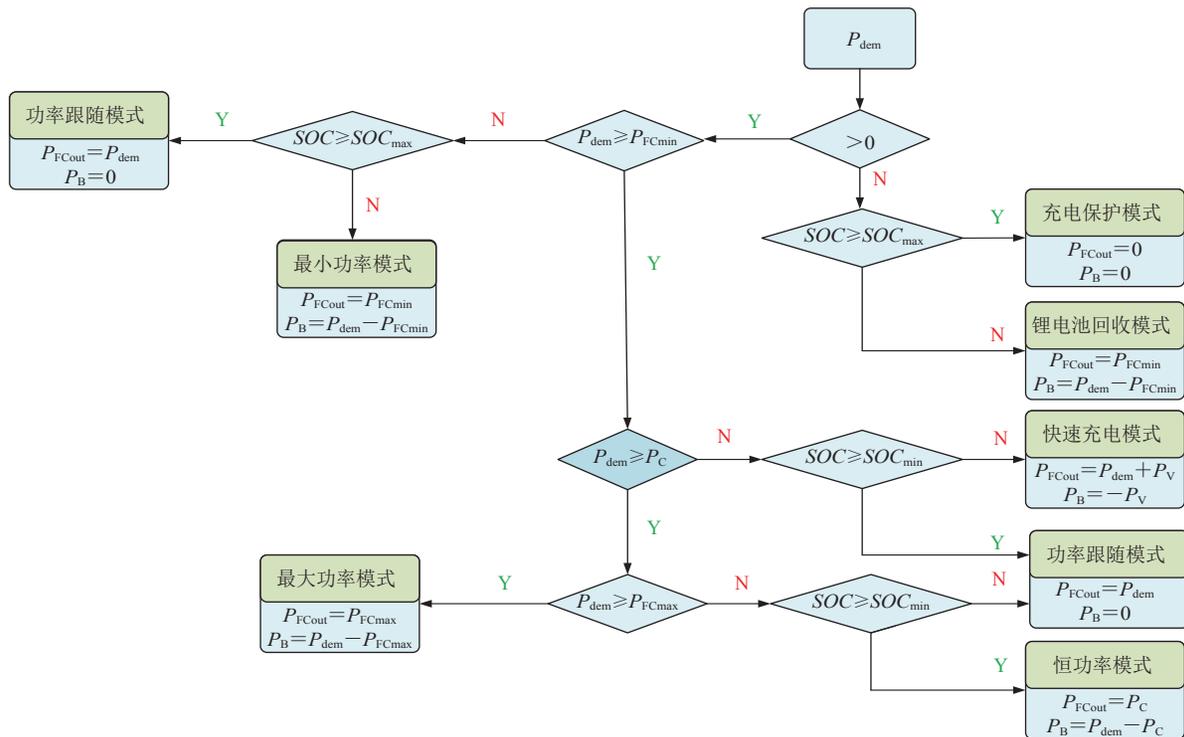


图 8 基于规则的能量管理策略

Fig. 8 Rule-based energy management strategy

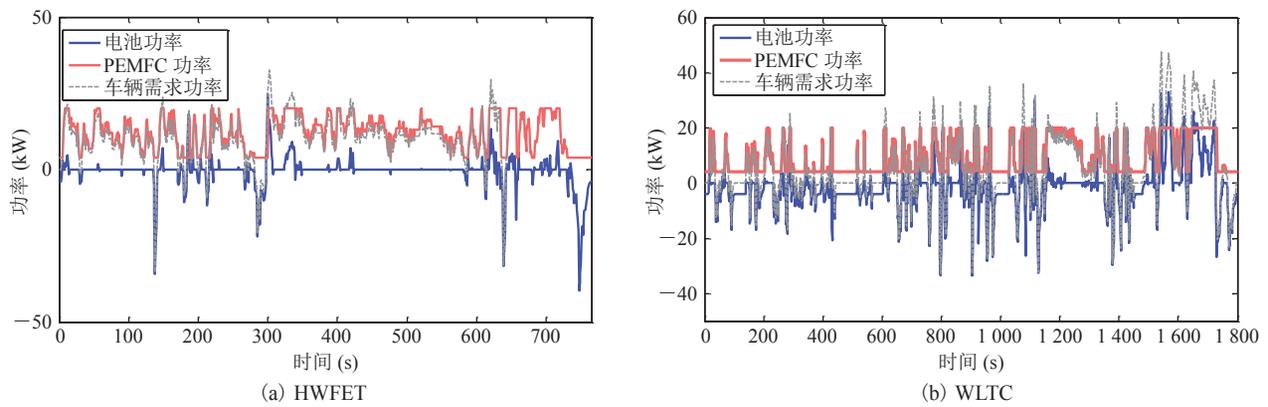


图 9 功率输出曲线

Fig. 9 Power output curve

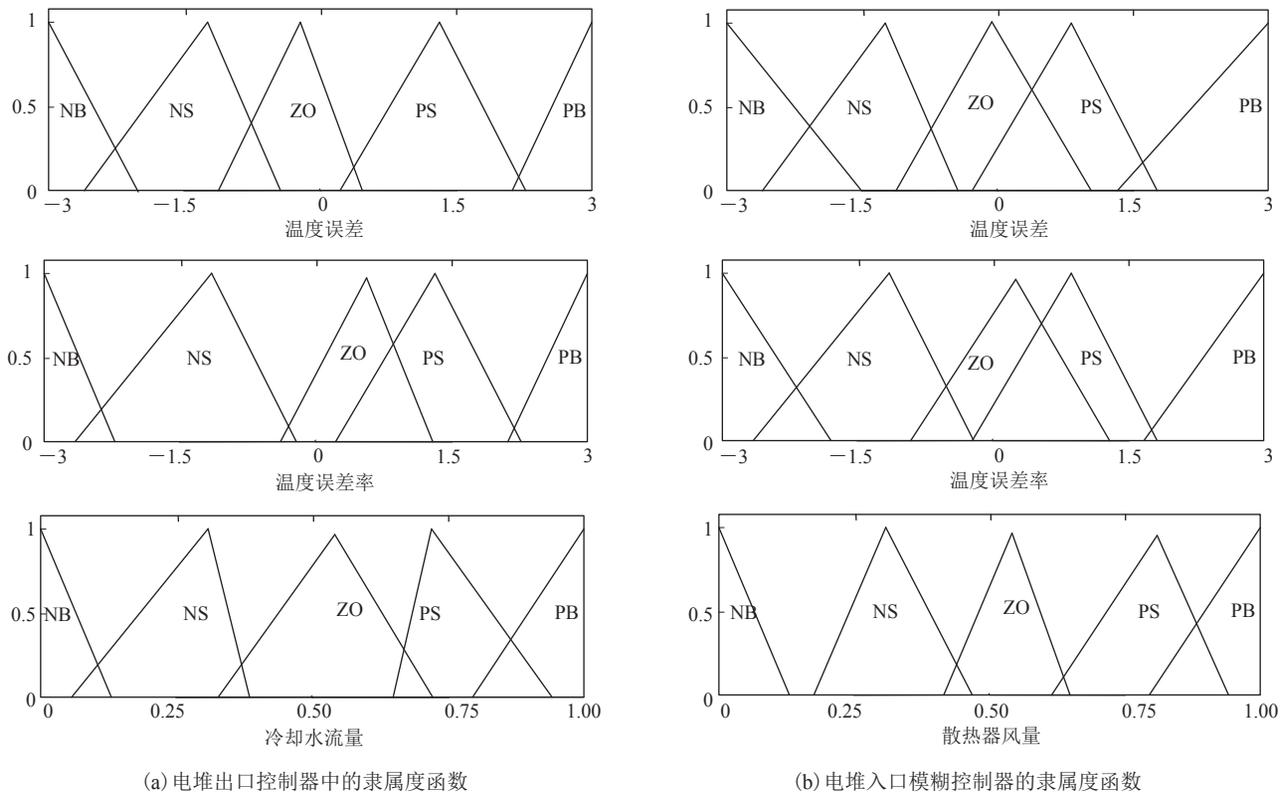


图 10 优化后的隶属度函数

Fig. 10 Optimized fuzzy membership functions

#### 4.2.3 电堆出入口温度控制结果

图 11 为 HWFET 和 WLTC 工况下电堆的出入口温度曲线。可以看出在遗传模糊控制下, 出口温度和入口温度之差保持在  $5^{\circ}\text{C}$  左右, 且出入口温度与设定目标值温度的误差均在  $-1\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。

如表 3 所示, 经过优化的模糊控制, 电堆出入口温度的最大偏差全部下降。相对于模糊控制, 经过遗传算法优化的模糊控制器有着更快的响应速度和较小的误差。

当负载增加时, 燃料电池将产生更多的热

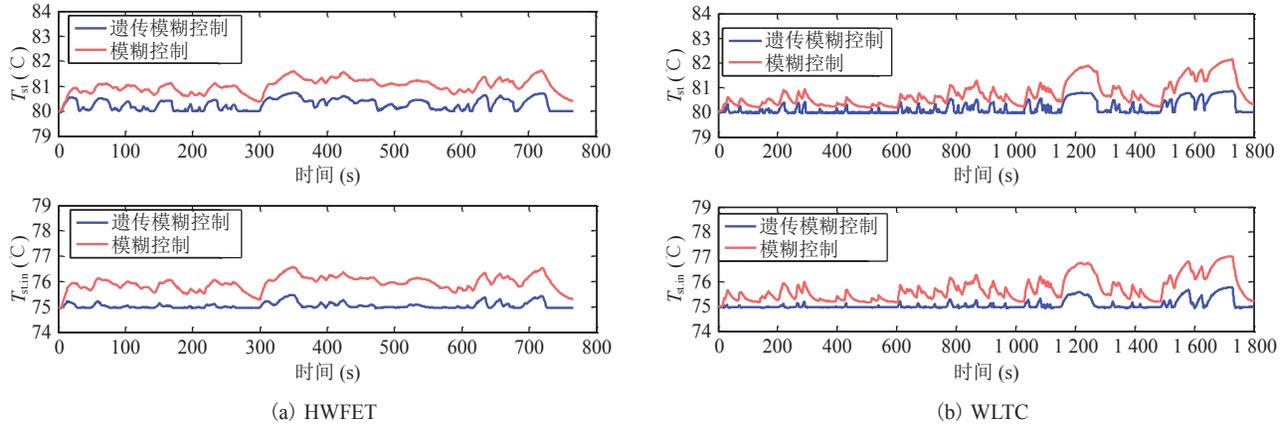


图 11 两种工况下进出口温度曲线

Fig. 11 Inlet and outlet temperature curve under two cycles

表 3 两种工况下的热管理参数

Table 3 Thermal management parameters under two cycles

工况	控制方法	出口温度最大偏差 (°C)	入口温度最大偏差 (°C)
HWFET	模糊控制	1.63	1.58
	遗传模糊控制	0.73	0.48
WLTC	模糊控制	2.14	2.01
	遗传模糊控制	0.86	0.78

量。因此，为确保电堆处于稳定安全的温度环境，冷却水流量和散热器风量都将随着负载的增加而增大，这时，冷却水带走的热量也会增大。反之，当负载减小，冷却水流量和散热器风量均随负载的减少而减小，冷却水带走的热量也相应

地减少，如图 12~13 所示。考虑到实际应用中冷却水泵不能频繁启停，所以针对以上两种工况，本文将设置最小水流量。

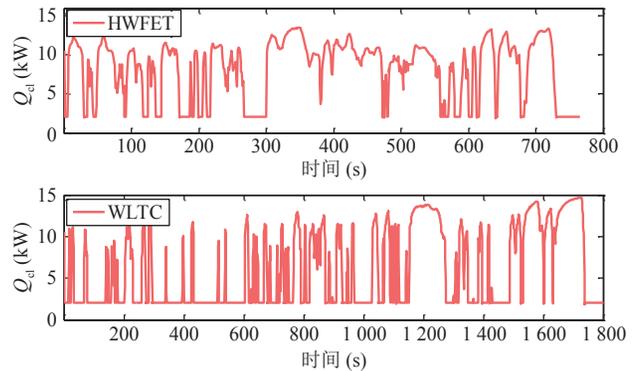


图 12 两种工况下冷却水带走的热量

Fig. 12 Heat taken away by cooling water under two cycles

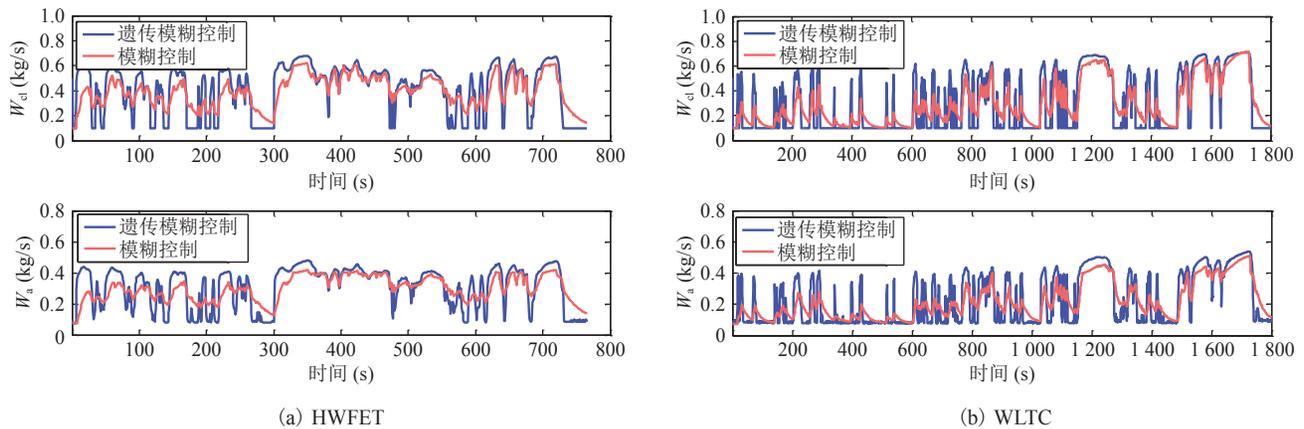


图 13 两种工况下的冷却水流量和散热器风量

Fig. 13 Cooling water flow and radiator air volume under two cycles

## 5 讨论与分析

电堆温度的变化会影响氢燃料电池汽车的输出性能以及安全性, 因此需要应用合理的热管理方法来使电堆温度保持在合理的工作温度。本文中, 燃料电池具有非线性和参数的不确定性等特点, 并且电堆温度的变化具有滞后性。本文提出使用模糊控制方法对电堆出入口温度进行控制, 但模糊控制的设计主要依靠专家的经验, 因此本文进一步地提出应用遗传算法优化模糊控制器的隶属度函数。目前应用遗传算法优化模糊控制的方法相对成熟, 已被应用到其他领域<sup>[9]</sup>, 而本文将此方法应用到 PEMFC 热管理中。通过使用遗传算法优化模糊控制, 在 HWFET 工况下, 相对于未优化的模糊控制, 电堆的出入口温度与目标温度的最大偏差分别降低了 0.9 °C 和 1.1 °C。在 WLTC 工况下, 与未优化的模糊控制相比, 电堆的出入口温度与目标温度的最大偏差分别降低了 1.28 °C 和 1.23 °C。

目前, 验证热管理方法的工作负载通常使用阶跃负载信号<sup>[3-11]</sup>。但车辆的工况变化频繁, 从而 PEMFC 的工作负载也会进行相应的调整。本文针对上述问题, 提出一种新的负载模式, 即选用 *Autonomie* 中的一款车, 选取两种道路工况进行能量管理, 得出需要 PEMFC 提供的工作负载, 并以此作为热管理方法验证的工作负载。

本文的不足之处在于虽简化了控制模型, 但忽略了电堆温度从常温开始升高到目标温度的这一过程。同时, 本文建立的 PEMFC 热管理模型相对简单, 下一步可以加上旁路阀, 并设置大小循环, 使模型更加完整。当电堆温度比较低时, 开启小循环并对冷却水进行加热, 通过旁路阀控制冷却水进入电堆的温度, 从而使电堆温度快速升高到合理的工作温度; 当电堆温度超过目标温度时, 开启大循环, 对电堆进

行冷却降温。

## 6 结 论

本文针对车用 PEMFC 的热管理, 提出使用模糊控制的方法对电堆出入口温度进行控制。为了使电堆的出入口温度具有更好的调整能力, 提出使用遗传算法优化模糊控制器。为了验证所提出的控制方法, 选取一款燃料电池混合动力汽车, 设计了燃料电池混合动力汽车的能量管理策略, 使 PEMFC 工作在高效率区, 并在 HWFET 和 WLTC 两种标准工况下验证所提出的 PEMFC 热管理方法。结果显示, 当工作负载连续变化时, 经过遗传算法优化的模糊控制方法展示出较好的性能。电堆出口与入口的温度差维持在 5 °C 左右, 出入口温度与目标温度的误差均在 -1~1 °C, 并且, 相对于未优化的模糊控制, 电堆出入口温度与目标温度的误差均有降低。本文所提出的方法针对两种测试工况, 电堆的出入口温度表现出更强的响应能力, 有效地修正了温度动态误差, 提高了热管理方法的控制精度。

## 参 考 文 献

- [1] 王吉华, 居钰生, 易正根, 等. 燃料电池技术发展及应用现状综述(下) [J]. 现代车用动力, 2018(3): 1-5.  
Wang JH, Ju YS, Yi ZG, et al. Review on development and application of fuel cell technology(2) [J]. Modern Automotive Power, 2018(3): 1-5.
- [2] Snoussi J, Elghali SB, Benbouzid M, et al. Optimal sizing of energy storage systems using frequency-separation-based energy management for fuel cell hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9337-9346.
- [3] O'Keefe D, El-Sharkhb MY, Telottec JC, et al. Temperature dynamics and control of a water-cooled fuel cell stack [J]. Journal of Power Sources,

- 2014, 256: 470-478.
- [4] 张宝斌, 刘佳鑫, 李建功, 等. 燃料电池冷却方法及热管理控制策略进展 [J]. 电池, 2019, 49(2): 158-162.  
Zhang BB, Liu JX, Li JG, et al. Development of fuel cell cooling method and thermal management control strategy [J]. Battery Bimonthly, 2019, 49(2): 158-162.
- [5] Cheng SL, Fang C, Xu LF, et al. Model-based temperature regulation of a PEM fuel cell system on a city bus [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(39): 13566-13575.
- [6] Chatrattanawet N, Hakhen T, Kheawhom S, et al. Control structure design and robust model predictive control for controlling a proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 148: 934-947.
- [7] Wang YX, Qin FF, Ou K, et al. Temperature control for a polymer electrolyte membrane fuel cell by using fuzzy rule [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(2): 667-675.
- [8] 胡鹏, 曹广益, 朱新坚. 质子交换膜燃料电池温度模型与模糊控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1371-1376.  
Hu P, Cao GY, Zhu XJ. Temperature model and fuzzy control of proton-exchange membrane fuel cells [J]. Control Theory and Applications, 2011, 28(10): 1371-1376.
- [9] Zhang RD, Tao JJ. GA-based fuzzy energy management system for FC/SC-powered HEV considering H<sub>2</sub> consumption and load variation [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2016, 6(4): 1833-1843.
- [10] Wang YP, Li J, Tao Q, et al. Thermal management system modeling and simulation of a full-powered fuel cell vehicle [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2010, 142(6): 061304.
- [11] Zou WJ, Kim YB. Temperature control for a 5 kW water-cooled PEM fuel cell system for a household application [J]. IEEE Access, 2019, 7: 144826-144835.
- [12] Kandidayeni M, Macias FA, Boulon L, et al. Efficiency enhancement of an open cathode fuel cell through a systemic management [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 11462-11472.
- [13] Hu P, Cao GY, Zhu XJ, et al. Coolant circuit modeling and temperature fuzzy control of proton exchange membrane fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(17): 9110-9123.
- [14] Kandi-D M, Soleymani M, Ghadimi AA. Designing an optimal fuzzy controller for a fuel cell vehicle considering driving patterns [J]. Scientia Iranica, 2016, 23(1): 218-227.
- [15] Dayeni MK, Macias A, Depature C, et al. Real-time fuzzy logic strategy scheme for energetic macroscopic representation of a fuel cell/battery vehicle [C] // 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2017: 1- 6.
- [16] Huo WW, He HW, Sun FC. Electrochemical-thermal modeling for a ternary lithium ion battery during discharging and driving cycle testing [J]. RSC Advances, 2015, 5(71): 57599-57607.
- [17] Tsokolis D, Tsiakmakis S, Dimaratos A, et al. Fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of passenger cars over the New Worldwide Harmonized Test Protocol [J]. Applied Energy, 2016, 179: 1152-1165.
- [18] 王哲, 谢怡, 孙维, 等. 燃料电池客车动力系统建模与能量管理策略研究 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 97-103, 123.  
Wang Z, Xie Y, Sun W, et al. Modeling and energy management strategy research of fuel cell bus [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(1): 97-103, 123.
- [19] Kasimalla KV, Srinivasulu GN, Velisala V. A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(14): 4263-4283.
- [20] Hu ZY, Li JQ, Xu LF, et al. Multi-objective energy management optimization and parameter sizing for proton exchange membrane hybrid fuel cell vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 129: 108-121.
- [21] Tribioli L, Cozzolino R, Chiappini D, et al. Energy management of a plug-in fuel cell/battery hybrid vehicle with on-board fuel processing [J]. Applied Energy, 2016, 184: 140-154.