

燃料电池发动机系统多场耦合模型分析与温度控制方法

朱丹, 刘京奥, 李媛, 马建, 赵轩

(长安大学, 西安 710064)

摘要: 温度控制是实现燃料电池发动机快速响应、降低能耗与安全运行的保障, 而电堆内部热量场与电化场、流场相互影响, 其耦合特性是温度控制的关键。以某中型燃料电池卡车为研究对象, 构建“热-电-流”多场耦合模型, 通过参数分析确立温度控制关键因素, 设计模糊PID温度控制器, 并通过多变工况验证控制效果。结果表明, 通过所构建的模型能全面分析温度控制关键参数, 所提出的控制器能有效提高响应速度, 降低散热风扇转速和输出电压超调量, 在设置的测试工况与NEDC工况下, 温度的超调量分别降低了19.1%与1.64%。可为燃料电池发动机设计与控制提供基础, 进一步推动大功率燃料电池的车载应用。

关键词: 燃料电池; 多场耦合; 温度控制策略; 模糊PID控制

中图分类号: U469.72 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.04.08

Analysis of Multi-Field Coupling Model and Temperature Control Method for Fuel Cell Engines

ZHU Dan, LIU Jingao, LI Yuan, MA Jian, ZHAO Xuan

(Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Temperature control is crucial for achieving rapid response, reducing energy consumption, and ensuring the safe operation of fuel cell engines. The coupling characteristics of the internal thermal field, electrochemical field, and flow field are key factors in temperature control. This article focuses on a medium-sized fuel cell truck, constructing a “heat-electricity-flow” multi-field model. It establishes key temperature control factors through parameter analysis, designs a fuzzy PID temperature controller, and verifies the control effectiveness under various operating conditions. The results show that the constructed model can comprehensively analyze the key parameters of temperature control. The proposed controller effectively improves response speed, reduces the speed of the cooling fan and decreases output voltage overshoot. Under both the set test condition and the NEDC condition, the temperature overshoot is reduced by 19.1% and 1.64% respectively. This work provides a foundation for the design and control of fuel cell engines, further promoting the in-vehicle application of high-power fuel cell engines.

Keywords: fuel cell; multi-field model; temperature control strategy; fuzzy PID control

收稿日期: 2024-02-22 改稿日期: 2024-04-19

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52202462); 中国博士后科学基金面上项目(2022M710484); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-501); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102224208)

参考文献引用格式:

朱丹, 刘京奥, 李媛, 等. 燃料电池发动机系统多场耦合模型分析与温度控制方法[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(4): 642-652.

ZHU Dan, LIU Jingao, LI Yuan, et al. Analysis of Multi-Field Coupling Model and Temperature Control Method for Fuel Cell Engines[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(4): 642-652. (in Chinese)



在全球“双碳”目标背景下，低碳清洁的氢能成为全球最具应用前景的替代能源之一^[1]。燃料电池作为氢能能量转换装置，是氢能产业的核心，其中，质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC）具有能量密度高、能源转换率高、排放污染近乎为零等优点，是理想的车载动力源，可助力缓解世界环境与能源问题^[2]。

燃料电池发动机运行涉及多个反应过程相互作用，包括电化学反应、热量传递、多相流动等，其相互影响导致了燃料电池发动机系统响应致因要素复杂，难以通过传统物理模型进行准确描述，多场耦合模型可以更好地理解和控制燃料电池发动机的性能。其中，燃料电池发动机温度不仅受到热力学场影响，还涉及电化场、流体力学场的影响，是一种大时滞、强耦合的非线性复杂系统^[3]。

相关学者从不同角度建模，用于精确描述温度变化情况。MAYYAS等^[4]融合热力学模型与电化学模型建立了燃料电池3D模型，缩短了开发时间，但对系统温度响应情况考虑不足。俞林炯等^[5]利用AMESim软件建立了不同工况下燃料电池发动机冷却系统联合仿真模型，降低了冷却模型的复杂性，指出散热器表面风速是影响散热量最主要的因素。BOSCAINO等^[6]提出了一种基于黑箱方法对燃料电池稳态和动态模型进行经验建模的方法，通过参数识别描述输出特性，但未能充分考虑内部反应过程。马睿等^[7]探究燃料电池内部“电-热-流”多场耦合关系，构建了准一维电堆动态模型，并基于单参数敏感性和多参数敏感性分析，获取不同模型参数的敏感度指标。

燃料电池发动机运行温度保持在理想范围内，能保证PEMFC电堆维持最佳工作性能和更高安全性。LI Dazi等^[8]将模型不确定性的未知动态作为外部扰动，开发了一种基于PI自抗扰的温度控制模型，研究表明，所提出的控制系统使电堆温度在两种不同干扰下均能维持在343 K。SAYGILI等^[9]开发了一种用于3 kW燃料电池发动机的水循环冷却策略，通过开关控制器最小化散热风扇的使用，同时通过反馈PI控制器操纵水泵电压，可以达

到最佳温度控制效果。O'KEEFE等^[10]开发了一种PI控制器，用于5 kW燃料电池发动机系统的水冷却管理，确定了变化电流下对应的最优冷却液流量，同时指出了变参数PI控制器的温度控制效果更优，但仅使用简单的ON/OFF和标准PID控制器，控制方法相对单一。卫东等^[11]设计基于模糊PID融合算法的温度控制器，结合不同电流下的电堆湿度调节尾气排放周期，优化发动机输出性能，但通过数值拟合方法建立的电堆温度特性模型不能充分体现电堆内部反应过程。吴迪等^[12]针对大滞后系统温度响应慢的问题，提出包含两级执行器的控制策略，设计面向散热功率调节的模糊PID控制器和面向冷却液流量调节的ADRC策略，但未考虑参数之间的相互作用及关联性。侯荣福等^[13]提出了一种基于模糊自抗扰复合控制的电堆温度控制方法，通过控制参数的自整定，实现了电堆温度的精确控制，且具有较快的响应速度，同时降低超调量，提升抗干扰能力。ZHOU Su等^[14]在冷却系统中加入了中间冷却器和冷却剂旁通阀，采用稳态优化控制和反馈控制相结合的方法，将燃料电池温度维持在设定值附近，将进口冷却液/空气与电堆温度差控制在10 K以内，同时降低了冷却系统功耗，但所用工况简单，未涉及复杂工况研究。HAN等^[15]开发了一种PEMFC堆栈模型来控制冷却系统并评估控制策略，利用寄生功耗大小评价控制器性能，但同样未经过复杂工况的验证。习璐等^[16]采用目标探测算法控制燃料电池运行温度，并通过多工况燃料电池系统试验台架验证了温度控制系统设计方案的可靠性和稳定性。

本文以某中型卡车燃料电池发动机作为研究对象，利用Matlab/Simulink搭建燃料电池发动机多场耦合仿真模型，并对关键参数特性进行分析，确立温度控制变量。在此基础上，考虑控制变量之间的耦合特性，建立模糊PID控制器，在测试工况和新欧洲驾驶循环（New European Driving Cycle, NEDC）工况下进行仿真分析，验证模糊PID控制效果，为燃料电池发动机设计与控制提供理论参考，推动大功率燃料电池发动机的车载应用。

1 燃料电池多场耦合模型

燃料电池发动机多场耦合模型主要包括 3 个物理场, 分别为考虑内部电子流动的电场、考虑气体在流道中分布扩散的流场和考虑热量管理及温度变化的热场, 如图 1 所示, 其中 Q 表示热量传递情况。通过对不同物理场的动态响应和相互作用进行建模, 改进燃料电池发动机设计和控制策略, 有望提高燃料电池发动机运行效率和可靠性。

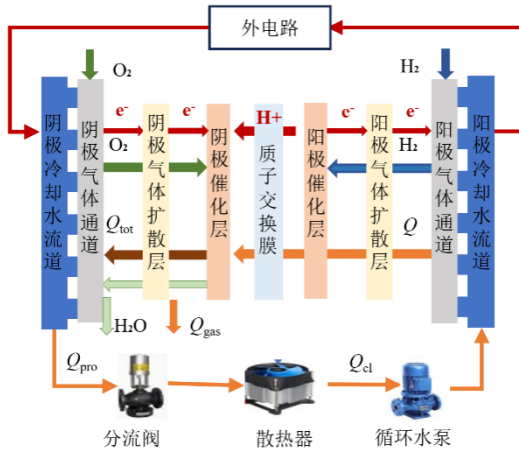


图 1 燃料电池发动机多场示意图

1.1 电场模型

电化学模型是描述燃料电池内部电化学过程的数学模型, 基于电化学基本原理和反应动力学理论描述电荷传递过程与电压输出情况, PEMFC 单体的实际输出电压可表示为^[17]:

$$V = E_{\text{nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{con}} \quad (1)$$

式中: E_{nernst} 为能斯特电压; V_{act} 、 V_{ohm} 、 V_{con} 分别为燃料电池活化极化电压损失、欧姆极化电压损失与浓度极化电压损失, 具体可表示为:

$$E_{\text{nernst}} = -\frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T_{\text{fc}} - 298.15) + \frac{RT_{\text{fc}}}{2F} [\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2})] \quad (2)$$

$$V_{\text{act}} = \zeta_1 + \zeta_2 \cdot T_{\text{fc}} + \zeta_3 \cdot \ln(c(\text{O}_2)) + \zeta_4 \cdot T_{\text{fc}} \cdot \ln I \quad (3)$$

$$V_{\text{ohm}} = I \cdot R_{\text{int}} \quad (4)$$

$$R_{\text{int}} = \frac{r_{\text{M}} \sigma}{A} \quad (5)$$

$$V_{\text{con}} = -\frac{RT_{\text{fc}}}{nF} \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_{\text{max}}}\right) \quad (6)$$

式中: G 为吉布斯自由能, 单位 J/mol; S 为熵值,

单位 mol · K; F 为法拉第常数, 单位 C/mol; R 为理想气体常数, 单位 J/(mol/K); T_{fc} 为电池的工作温度, 单位 K; P_{H_2} 、 P_{O_2} 分别为氢气分压和氧气分压, 单位 Pa; ζ_1 、 ζ_2 、 ζ_3 、 ζ_4 为半经验系数; I 为工作电流, 单位 A; $c(\text{O}_2)$ 为界面氧气浓度, 单位 g/cm³; R_{int} 为质子交换膜等效阻抗, 单位 Ω ; r_{M} 为膜电阻率, 单位 $\Omega \cdot \text{cm}$; σ 为膜厚度, 单位 cm; A 为膜的有效面积, 单位 cm²; n 为电子计量数; i 为电流密度, 单位 A/cm²; i_{max} 为最大电流密度, 单位 A/cm²。

结合 Herry 定律, 燃料电池阴极界面氧气浓度可表示为:

$$c(\text{O}_2) = P_{\text{O}_2} / (5.08 \cdot \exp(-\frac{498}{T})) \quad (7)$$

膜电阻率同样与电流、温度、活化面积有关:

$$r_{\text{M}} = \frac{181.6 [1 + 0.03 \cdot (\frac{I}{A}) + 0.062 \cdot (T/303) \cdot (I/A)^{2.5}]}{[\lambda - 0.634 - 3(I/A)] \cdot e^{[4.18 \cdot (T - 303)/T]}} \quad (8)$$

式中: λ 为质子交换膜含水量, 取值范围为 (10, 24)。

本文所涉及的燃料电池电堆由 430 片单电池组成, 几何尺寸为 765 mm × 660 mm × 242 mm, 额定功率为 115 kW。燃料电池发动机的 I-V 曲线如图 2 所示。

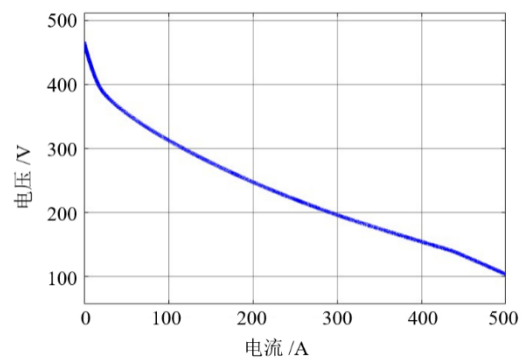


图 2 燃料电池发动机 I-V 曲线

1.2 流场模型

燃料电池流场模型包括阳极流道模型、阴极流道模型和跨膜水传递模型 3 部分, 通过微分方程对燃料电池内部气体流动状态进行描述。阳极流道模

型和阴极流道模型分别描述氢气在阳极流道中的流动行为和氧气在阴极流道中的流动行为，跨膜水传递模型则描述了水在膜电极之间的传递行为，包括电渗拖曳和浓差扩散^[18]。建模过程作出以下2条假设：

1) 建模中气体分压均通过各自的质量守恒方程单独计算，考虑到流道中各种气体相互作用力较小，假设气体都符合理想气体规律，满足：

$$PV = nRT。 \quad (9)$$

2) 不考虑水在流道中的相变问题，假设气体扩散过程持续稳定。

由下列公式建立燃料电池发动机流场模型，气体通道中每种气体质量守恒，可知：

$$\frac{V_{ca} \times M_{O_2}}{RT_{fc}} \times \frac{dP_{O_2, ca}}{dt} = m_{O_2, ca, in} + m_{O_2, ca, out} - m_{O_2, react}。 \quad (10)$$

$$\frac{V_{an} \times M_{H_2}}{RT_{fc}} \times \frac{dP_{H_2, an}}{dt} = m_{H_2, an, in} + m_{H_2, an, out} - m_{H_2, react}。 \quad (11)$$

$$N_{v1} = n_d \frac{i}{F}。 \quad (12)$$

$$N_{v2} = D_w \frac{(c_{v, ca} - c_{v, an})}{\delta_m}。 \quad (13)$$

$$m_{v, mem} = (N_{v1} - N_{v2})M_v An。 \quad (14)$$

式中： V_{ca} 为阴极体积，单位 m^3 ； V_{an} 为阳极体积，单位 m^3 ； M_{O_2} 、 M_{H_2} 分别为氧气和氢气的摩尔质量，单位 g/mol ； N_{v1} 为电拖曳传输水量，单位 $mol/(s/cm^2)$ ； n_d 为电拖曳系数； N_{v2} 为反向扩散传输水量，单位 $mol/(s/cm^2)$ ； D_w 为扩散系数， $c_{v, ca}$ 为阴极水浓度，单位 mol/cm^3 ； $c_{v, an}$ 为阳极水浓度，单位 mol/cm^3 ； δ_m 为膜厚度，单位 cm ； $P_{O_2, ca}$ 、 $P_{H_2, an}$ 分别为氧气分压和氢气分压，单位 Pa ，可表示为：

$$P_{O_2, ca} = \frac{m_{O_2, ca} RT}{V_{ca}}。 \quad (15)$$

$$P_{H_2, an} = \frac{m_{H_2, an} RT}{V_{an}}。 \quad (16)$$

式中： $m_{O_2, ca, in}$ 、 $m_{H_2, an, in}$ 分别为氧气和氢气入口流量，单位 kg/s ； $m_{O_2, ca, out}$ 、 $m_{H_2, an, out}$ 分别为氧气和氢气出口流量，单位 kg/s ； $m_{O_2, react}$ 、 $m_{H_2, react}$ 分别为氧气和氢气反应消耗量，单位 kg 。

氢气反应消耗量是燃料电池电堆进行电化学反应的原料，可通过工作电流计算得到：

$$m_{H_2, react} = I \frac{M_{H_2}}{2F}。 \quad (17)$$

1.3 热场模型

如图1所示，燃料电池发动机热场除了燃料电池电堆内部由电化学反应产热过程外，还包括温度控制系统驱使水循环与外界进行热量交换。交换过程包括冷却液经由水泵驱使，流经电堆时进行热量交换；分流阀将冷却系统分为大小两个循环以提高换热效率；冷却液经散热风扇将热量耗散到外界。

1.3.1 电堆温度动态模型

燃料电池发动机电堆的热量变化模型可从产热和散热两个角度分析，电化学反应产生的热量中，部分热量通过热辐射到外界；部分热量先经由冷却液带出电堆，再由散热风扇耗散至外界；还有一部分由反应完剩下的气体带出电堆^[19]。基于广义能量守恒定律，电堆热量变化模型可表示为：

$$Q_{pro} = Q_{tot} - P_{st}。 \quad (18)$$

$$Q_{tot} = N_{cell} \times q_{m, rec} \times \Delta H。 \quad (19)$$

$$Q_{gas} = (q_{O_2}^{rec} C_{O_2} + q_{H_2}^{rec} C_{H_2} + q_{H_2O, g}^{gen} C_{H_2O, l})(T_{st} - T_{atm})。 \quad (20)$$

$$Q_{cl} = q_{cl} C_{cl} (T_{st}^{out} - T_{st}^{in})。 \quad (21)$$

式中： Q_{pro} 为电堆中产热，单位 W ； Q_{tot} 为电化学反应总能量，单位 W ； P_{st} 为电堆输出功率，单位 W ； N_{cell} 为电池单体数量； $q_{m, rec}$ 为反应物摩尔流量，单位 kg/s ； ΔH 为氢氧反应过程中的焓差，单位 kJ/mol ； Q_{gas} 为反应气体带走的能量，单位 W ； $q_{O_2}^{rec}$ 、 $q_{H_2}^{rec}$ 分别为参与反应的氧气和氢气流量，单位 kg/s ； $q_{H_2O, g}^{gen}$ 为生成水蒸气流量，单位 kg/s ； C_{O_2} 、 C_{H_2} 、 $C_{H_2O, l}$ 分别为氧气、氢气、液态水比热容，单位 $kJ/(kg/K)$ ； T_{st} 为电堆工作温度，单位 K ； T_{atm} 为环境温度，单位 K ； Q_{cl} 为冷却液散热量，单位 W ； q_{cl} 为冷却液流量，单位 kg/s ； C_{cl} 为冷却液比热容，单位 $kJ/(kg/K)$ ； T_{st}^{out} 为出口冷却温度，单位 K ； T_{st}^{in} 为入口冷却温度，单位 K 。

因此，电堆温度动态模型可表示为：

$$C_{st} M_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = Q_{tot} - Q_{cl} - Q_{gas} - P_{st}。 \quad (22)$$

式中： C_{st} 为燃料电池比热容，单位 $kJ/(kg/K)$ ； M_{st}

为电堆质量, 单位 kg。

1.3.2 循环水泵模型

在燃料电池发动机温度控制系统中, 水泵为冷却液提供动力, 其换热量如式 (21) 所示。

维持适当的冷却液出入口温差有助于稳定电堆的工作温度, 过热或过冷都可能导致电堆性能下降、损坏或操作不稳定。假设电堆反应产生的剩余热量全部由冷却液带走, 且维持冷却液出入口温差 ΔT 不高于 10 K, 所需的冷却液质量流量为:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.06 \times \frac{Q_{\text{cl}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \times C_{\text{H}_2\text{O}}^l \times \Delta T} \quad (23)$$

式中: $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 为冷却水密度, 单位 kg/m^3 ; $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 为冷却水流量, 单位 kg/s ; ΔT 为冷却水进出口温差, 单位 K。

结合工程经验, 水泵转速和流量成一次函数关系, 结合水泵额定工况, 水泵动态流量可表示为:

$$L_{\text{cl}} = \frac{n_1}{n_0} L_0 \quad (24)$$

式中: L_{cl} 为冷却水流量, 单位 L/min ; L_0 为额定工况下水流量, 单位 L/min ; n 为水泵的转速, 单位 r/min 。

1.3.3 散热器模型

散热器包括换热板和散热风扇两部分, 换热板将冷却液的热量传出去, 同时, 散热风扇产生强风带走热量, 将热量传到外界。冷却液在散热器内失去的热量可表示为:

$$Q_{\text{cl}} = AK(T_{\text{rad}} - T_{\text{atm}}) \quad (25)$$

式中: A 为换热面积, 单位 cm^2 ; K 为传热系数; T_{rad} 为换热温度, 单位 K。

结合散热风扇数据表, 拟合散热器传热系数为:

$$K = -13.68q_{\text{air}}^2 + 70.56q_{\text{air}} + 5.13 \quad (26)$$

其中, 拟合评价参数 R^2 为 0.989 3, 拟合结果比较贴合实际传热系数。

2 燃料电池发动机温度控制策略

2.1 燃料电池冷却系统控制要求

结合实际应用情况, 燃料电池发动机运行温度

的控制需求包括:

- 1) 电堆工作温度应控制在 333~353 K 范围内;
- 2) 在冷却系统中, 应控制燃料电池出口与入口之间的温差不高于 10 K;
- 3) 在电流变化的情况下, 循环水泵和散热风扇的转速能快速响应, 尽可能快地接近最佳温度且减少调节时间。

本文采用了某燃料电池中型卡车在 NEDC 工况下的响应测试, 通过控制燃料电池的出入口温差, 保持在 10 K 以下, 设定燃料电池入口温度为 338 K。

2.2 模糊PID控制策略

在燃料电池发动机冷却系统工作过程中, 由于电流、循环水泵转速、散热风扇转速是非线性的不确定关系, 出入口温差的控制具有耦合性, 加之实际运行中还存在外界干扰, 所以, 针对 PID 参数不易在线调整的局限, 结合模糊控制模块设计在线整定控制系数的模糊 PID 控制器, 实现对 PEMFC 温度的稳定控制。燃料电池发动机冷却系统的模糊 PID 控制策略, 如图 3 所示。

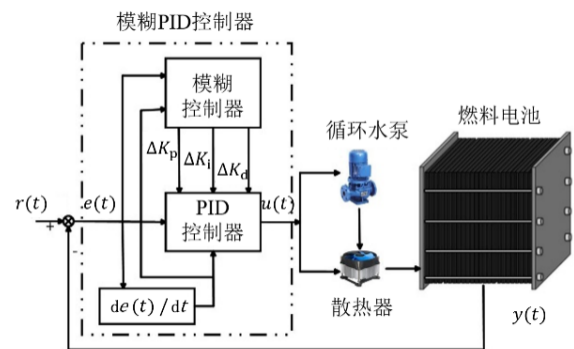


图3 模糊PID控制策略原理

2.2.1 模糊控制器的设计

为了避免双PID控制的耦合现象, 采用PID对散热风扇进行控制, 而水泵采用模糊PID控制, 使两者的控制效果互不影响, 满足温度控制需求。控制器的控制目标为冷却液入口温度和出入口温度的差值大小, 输入是燃料电池电堆冷却液出入口温度, 输出为散热风扇转速和循环水泵的流量。

2.2.2 输入、输出变量的隶属度函数

将模糊控制系统的冷却液出入口温差 e 和设定水温温差 e_c 定义为模糊集上的论域。出入口水温温差 e 的基本论域为 $[-10\ 10]$ ，模糊论域为 $[-3\ 3]$ ，模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ；设定水温温差 e_c 的基本论域为 $[-20\ 20]$ ，模糊论域为 $[-3\ 3]$ ，模糊子集为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ；模糊输出 ΔK_p 的模糊论域为 $[-0.3\ 0.3]$ ，模糊输出 ΔK_i 的模糊论域为 $[-0.06\ 0.06]$ 、模糊输出 ΔK_d 的模糊论域为 $[-3\ 3]$ ，三者的模糊子集均为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ，上述NB和PB均设为高斯形，其余设为三角形，其中， $[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB]$ 代表的实际意义分别是负大，负中，负小，零，正小，正中，正大。模糊控制隶属度函数如图4所示。

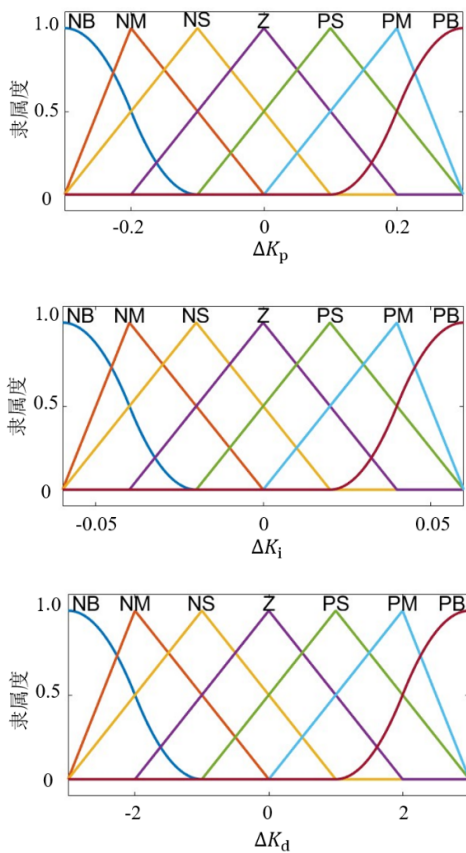


图4 模糊控制隶属度函数

2.2.3 模糊控制规则

结合模糊控制及Mamdani的逻辑语言if...and...then...进行模糊规则的设计，由此设计的3个比例系数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的推理规则见表1~3。

表1 ΔK_p 的推理规则

E	EC						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
Z	PM	P	PS	Z	NS	NM	NM
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
NM	PB	PM	PM	PS	PS	Z	NS
NB	PB	PM	PM	PM	PS	Z	Z

表2 ΔK_i 的推理规则

E	EC						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z

表3 ΔK_d 的推理规则

E	EC						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NB	PS
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

最后，将得到的结果进行清晰化处理，即可得到修正参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ，为模糊控制器的3个输出。设置3个参数的初始值 K_p' 、 K_i' 、 K_d' ，再将其分别代入式(27)、(28)、(29)后，通过计算得到修正后参数 K_p 、 K_i 、 K_d ，即：

$$K_p = K_p' + \Delta K_p \quad (27)$$

$$K_i = K_i' + \Delta K_i \quad (28)$$

$$K_d = K_d' + \Delta K_d \quad (29)$$

3 仿真结果分析

结合实车参数, 燃料电池发动机参数见表 4, 在 Matlab/Simulink 软件中搭建燃料电池发动机多场耦合仿真模型。

表 4 115 kW 燃料电池发动机参数

参数	值
电堆单电池片数	430
单片活化面积/cm ²	298
阳极流道体积/m ³	0.005
阳极出口流量系数	1.68×10^{-7}
阴极流道体积/m ³	0.01
阴极出口流量系数	2.17×10^{-6}
膜厚度/cm	0.012 75

结合模型进行参数特性分析, 提出温度控制策略。之后, 设置测试工况和 NEDC 工况对控制策略进行仿真测试。

3.1 多场耦合模型温度参数特性分析

燃料电池温度与其运行过程的稳定性密切相关, PEMFC 电堆只有在一定温度范围内才可以保持较高的工作效率。本文对模型中影响温度变化的关键参数进行分析, 进而研究温度对发动机性能的影响。考虑到燃料电池发动机模型的多场耦合特性, 分别讨论在电场模型、流场模型和热场模型中, 温度对电堆动态特性的影响, 从而确定温度控制关键参数, 各参数的取值范围见表 5。

表 5 关键参数及取值范围

参数	取值范围
质子交换膜厚度/cm	0.01~0.02
阳极过量比	1~2
阴极过量比	2~4
阳极入口压力/MPa	0.1~0.2
阴极入口压力/MPa	0.1~0.4
散热器换热面积/m ²	6~35
风扇转速/(r/min)	2 000~5 000
水泵转速/(r/min)	3 000~8 000

3.1.1 电场模型参数分析

对于电场模型, 不同温度下燃料电池单体输出电压如图 5 所示, 燃料电池发动机输出功率如图 6 所示。由图可知, 在相同电流下, 随着温度不断增长, 对应的输出电压和功率在电流较低时, 差别较小, 但随着电流的逐渐增大, 温度对输出电压和功率的影响会逐渐明显。温度升高, 输出电压和功率会明显升高。

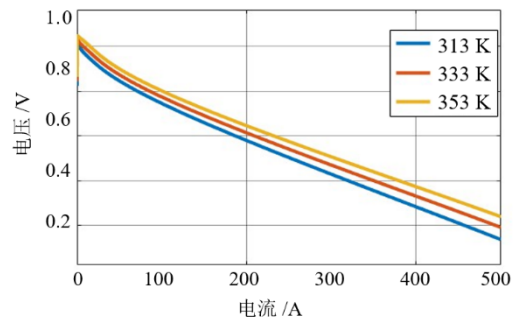


图 5 温度对 PEMFC 单体输出电压的影响

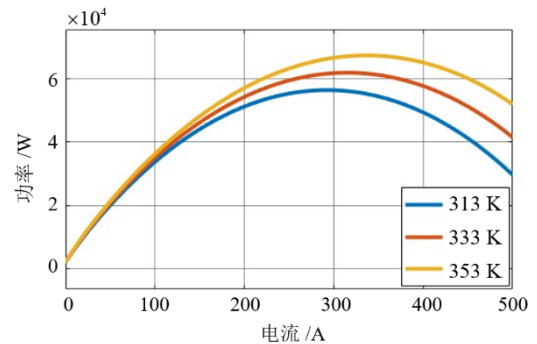


图 6 不同温度下的燃料电池发动机输出功率

同时, 电场模型中参数改变也会引起燃料电池输出电压的变化, 进而引起热力学模型变化, 由此影响温度。由式 (1)、(4)、(5) 可知, 当减小质子交换膜厚度时, 会导致质子交换膜等效阻抗的减小, 进而降低欧姆极化损失, 输出电压增大。电压的提升会导致热场模型发生变化, 从而影响温度的变化情况。

3.1.2 流场模型参数分析

对流场模型而言, 在不同温度下输出的氢气分压和电流曲线如图 7 所示, 氧气分压和电流曲线如图 8 所示。由图可知, 在相同电流下, 工作温度升高, 氢气分压与氧气分压均呈上升趋势。

同时, 流体力学模型参数的改变也会引起阴、

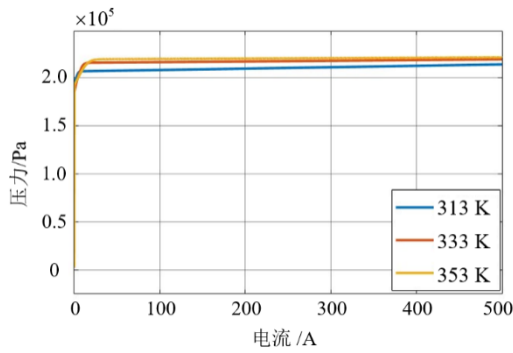


图7 温度对氢气分压的影响

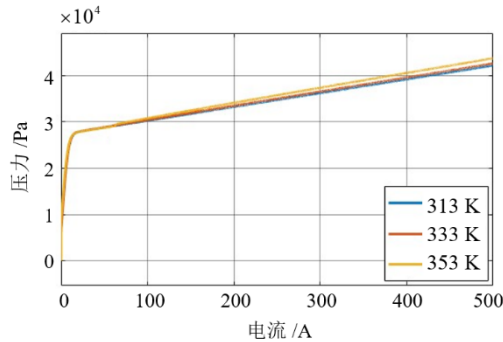


图8 温度对氧气分压的影响

阳极入口相对湿度以及氢气和氧气分压的变化，影响输出的电压，从而进一步导致电堆温度发生变化。

氢气入口流量实际消耗可通过阳极过量比和电流计算得到，如式(30)所示。

$$m_{H_2, an, in} = I \frac{M_{H_2} N}{2F} \phi_{H_2} \quad (30)$$

式中： I 为电流，单位A； M_{H_2} 为氢气摩尔质量，单位kg/mol； N 为燃料电池片数； F 为法拉第常数，单位C/mol。

结合式(11)可知，当阳极过量比增大时，氢气入口流量增大，引起氢气分压增大，促使气体浓度上升，有助于交换电流密度的提升，降低整个过程出现的电压损失，加快气体传输速率，从而导致输出电压和电堆温度的变化。阳极出口压力、阴极出口压力以及阴极过量比的改变同理也会对温度造成影响。

3.1.3 热场模型参数分析

热场模型的参数会直接对温度造成影响。由式(21)、(22)、(25)可知，当散热器换热面积增大时，会使冷却液在散热器内的换热量增多，导致温

度降低。风扇转速、水泵转速的改变同理也会对温度造成影响。由上文分析可知，温度变化也会进一步影响电场模型和流场模型的输出特性。

综上所述，温度对燃料电池电场模型的输出电压和输出功率、流场模型的氢气分压和氧气分压都有较大影响，且3个物理场模型互相耦合，每个物理场模型中某些关键参数的改变都会直接或间接地对温度造成影响。

3.2 测试工况下的仿真结果分析

设定测试工况如图9所示，燃料电池发动机输出电流迅速提升，增速为8 A/s，当电流达到100 A后保持不变，运行到1 200 s时电流阶跃提升到220 A，然后稳定运行800 s。

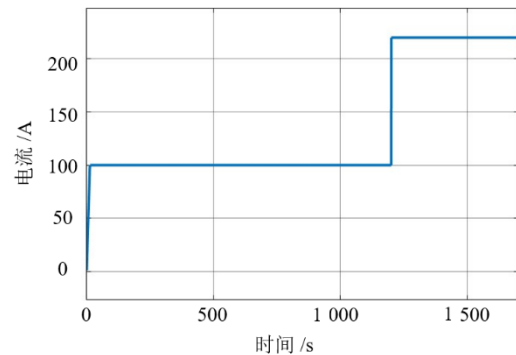


图9 仿真电流输入

仿真得到燃料电池发动机的出入口温度，如图10所示。

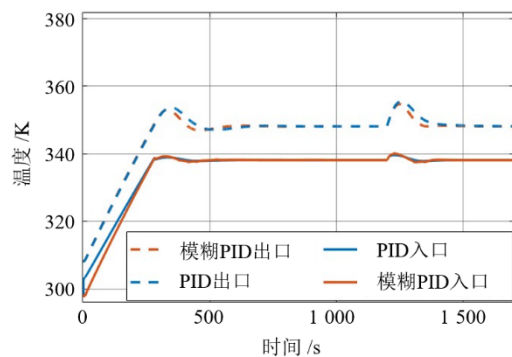


图10 出入口温度控制效果对比

从仿真结果来看，2种控制方法都能满足温度控制要求。在稳态工况下，电堆入口温度小于338 K，出入口温差小于20 K。对于冷却液的出口温度，模糊PID方法的控制效果更好，PID控制的出口温度

峰值为 355.5 K，模糊 PID 控制下峰值温度为 354.7 K。在模糊 PID 控制下，燃料电池电堆达到设定温度的响应时间降低了 3.372 s。

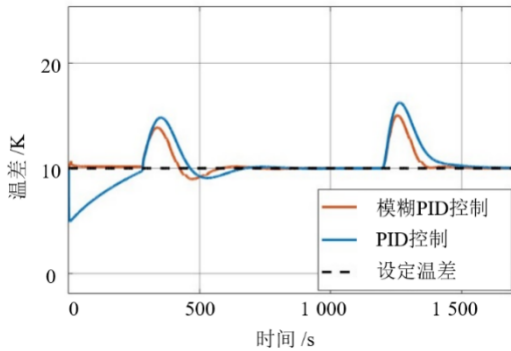


图 11 温差控制效果对比图

由图 11 可知，模糊 PID 控制器的最大超调量比 PID 控制器降低了 1.19 K，其原因为水泵和散热风扇的运行惯性，二者之间的耦合作用使温度控制出现较大的振荡。在电流快速变化的 2 个时间点，控制器调节时间也相差较大，模糊 PID 控制比 PID 控制分别提前了 16.62 s 和 30.86 s。模糊 PID 控制策略根据实时温度变化对 PID 的 3 个参数进行整定，从而优化了对燃料电池发动机温度的控制效果。

3.3 NEDC 循环工况下的仿真结果分析

如图 12 所示，在进行一段稳定运行后，燃料电池入口温度稳定在 338 K，燃料电池卡车进入 NEDC 工况，对燃料电池发动机温度控制进行仿真，分析控制效果并验证控制策略的可行性。

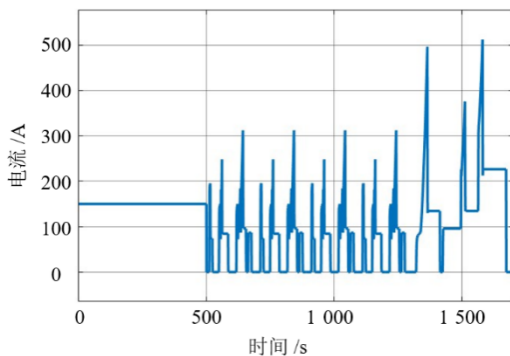


图 12 NEDC 工况下的电流

PID 控制器与模糊 PID 控制器的控制效果如图 13 所示。

由 PID 控制器和模糊 PID 控制器对温度的控制

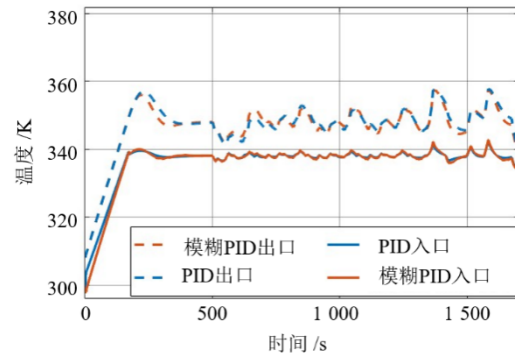


图 13 不同控制器下出入口温度仿真结果

效果对比来看，PID 的平均入口温度为 326.5 K，模糊 PID 控制为 324.8 K，2 种控制器响应时间相近。

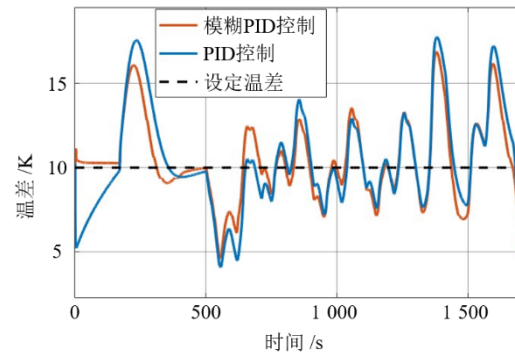


图 14 不同控制器下的温差控制效果对比

由图 14 可知，模糊 PID 控制的平均出入口温差为 10.21 K，PID 控制器的平均出入口温差为 10.31 K，其标准差分别为 6.48 和 8.40。由此可知，模糊 PID 控制相较于 PID 控制更稳定，温度控制效果更好。

因此，针对电流变化较复杂的工况，模糊 PID 控制策略对出入口温差的控制效果更好，整体上优于 PID 控制。

4 结论

本文以某款燃料电池中型卡车作为研究对象，基于 Matlab/Simulink 搭建了燃料电池发动机多场耦合仿真模型，对模型进行温度参数特性分析，并设计温度控制策略，得出以下结论。

1) 所建立的燃料电池多场耦合模型，可用于全面分析参数之间的相互影响。模型中的温度特性参数包括质子交换膜厚度等间接参数，可通过电堆结构设计进行优化；阴阳极入口气体压力与过量比、发动机温度控制元件配置功率等直接参数，可

通过控制算法进行优化。分析结果有助于对温度管理策略的验证。

2) 提出了基于模糊PID控制的温度控制策略, 通过设置测试工况和NEDC循环工况进行了仿真验证。结果显示, 在设置的测试工况下, 模糊PID控制器超调量降低19.1%, 且调节时间提前。在NEDC工况下, 入口水温升高了3.28%, 温差的超调量降低了1.64%, 平均温差与目标值的差距降低了1%, 验证了温度控制策略的有效性。

3) 在设置工况和NEDC循环工况2种工况下,

模糊PID控制相较于PID控制更稳定, 温度控制效果更好, 为后续研发适合燃料电池电动卡车的实时温度控制策略提供了一定的参考。

本文重点分析了相关参数对燃料电池发动机运行温度的影响情况, 提出了考虑多场耦合的温度控制方法, 为热量管理策略制定时的参数选取及边界条件提供了参考。在未来的研究中, 拟通过多参数协同控制, 提高燃料电池温度控制的精确性和鲁棒性。

参考文献 (References)

- [1] 张锁江. 技术变革是碳中和唯一途径[J]. 中国石油和化工产业观察, 2023(4): 39-40.
ZHANG Suojiang. Technological Change is the Only Way to be Carbon Neutral [J]. China Petroleum and Chemical Industry Review, 2023(4): 39-40. (in Chinese)
- [2] 欧阳明高. 我国新能源与新能源革命[J]. 电气时代, 2024(1): 24-26.
OUYANG Minggao. New Energy and New Energy Revolution in China [J]. Electric Age, 2024(1): 24-26. (in Chinese)
- [3] 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.
ZHOU Su, CHEN Chunguang, FAN Lei. Thermal Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power System [J]. Automotive Digest, 2023(2): 1-14. (in Chinese)
- [4] MAYYAS A R, RAMANI D, KANNAN A M, et al. Cooling Strategy for Effective Automotive Power Trains: 3D Thermal Modeling and Multi-Faceted Approach for Integrating Thermoelectric Modules into Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(30): 17327-17335.
- [5] 俞林炯, 陈凤祥, 贾骁, 等. 基于 Matlab/Simulink 和 AMESim 的 PEMFC 冷却系统联合仿真[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2013, 31(3): 338-342, 346.
YU Linjong, CHEN Fengxiang, JIA Xiao, et al. Joint Simulation of PEMFC Cooling System Based on Matlab/Simulink and AMESim [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2013, 31(3): 338-342, 346. (in Chinese)
- [6] BOSCAINO V, MICELI R, CAPPONI G, et al. Fuel Cell Modelling and Test: Experimental Validation of Model Accuracy [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, May 13-17, 2013, Istanbul, Turkey. 2013: 1795-1800.
- [7] 马睿, 杨富旺, 霍喆, 等. 质子交换膜燃料电池多物理场建模及模型参数敏感性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2699-2711.
MA Rui, YANG Fuwang, HUO Zhe, et al. Multi Physical Field Modeling and Sensitivity Analysis of Model Parameters for Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2024, 44(7): 2699-2711. (in Chinese)
- [8] LI Dazi, LI Chong, GAO Zhiqiang, et al. On Active Disturbance Rejection in Temperature Regulation of the Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. Journal of Power Sources, 2015, 283: 452-463.
- [9] SAYGILI Y, EROGLU I, KINCAL S. Model Based Temperature Controller Development for Water Cooled PEM Fuel Cell Systems [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(1): 615-622.
- [10] O'KEEFE D, EL-SHARKH M Y, TELOTTE J C, et al. Temperature Dynamics and Control of a Water-Cooled Fuel Cell Stack [J]. Journal of Power Sources, 2014, 256: 470-478.
- [11] 卫东, 郑东, 褚磊民. 空冷型质子交换膜燃料电池堆最优性能输出控制[J]. 化工学报, 2010, 61(5): 1293-1300.
WEI Dong, ZHENG Dong, CHU Leimin. Optimal Performance Output Control for Air-Cooled Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks [J]. Acta Chimicae Sinica, 2010, 61(5): 1293-1300. (in Chinese)
- [12] 吴迪. 多工况燃料电池发动机建模及控制策略研究

- [D].成都:电子科技大学,2023.
WU Di. Research on Modeling and Control Strategy of Multi-operating Mode Fuel Cell Engine [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [13] 侯荣福,杨君,于蓬,等.基于模糊自抗扰的质子交换膜燃料电池温度控制[J].山东工业技术,2022(6):16-23.
HOU Rongfu, YANG Jun, YU Peng, et al. Temperature Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Based on Fuzzy Active Disturbance Rejection [J]. Shandong Industrial Technology, 2022(6): 16-23. (in Chinese)
- [14] ZHOU Su, ZHI Xuelei, YU Linjong, et al. Temperature Control of PEMFC Based on Optimal Power Consumption [C]//Proceedings of the 38th Chinese Control Conference (CCC), July 27-30, 2019, Guangzhou, China. Piscataway NJ: IEEE: c2019: 6072-6077.
- [15] HAN J Y, PARK J S, YU S S. 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.
- [16] 习璐.基于目标探测的车载燃料电池热管理系统集成化设计[J].环境技术,2023,41(11):121-126.
XI Lu. Integrated Design of Vehicle Fuel Cell Thermal Management System Based on Target Detection [J]. Environmental Technology, 2023, 41(11): 121-126. (in Chinese)
- [17] 顾洮,袁野.质子交换膜燃料电池仿真建模与分析[J].电源技术,2021,45(4):459-462.
GU Tao, YUAN Ye. Simulation Modeling and Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. Power Supply Technology, 2021, 45(4): 459-462. (in Chinese)
- [18] O'HAYRE R P, CHA S W, COLELLA W, et al. Fuel Cell Fundamentals [M]. Hoboken: Wiley, 2016.
- [19] GAO Fei, BLUNIER B, CHRENKO D, et al. Multirate Fuel Cell Emulation with Spatial Reduced Real-Time Fuel Cell Modeling [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1127-1135.
- [20] 李兰.质子交换膜燃料电池热管理技术分析与展望[J].重型汽车,2023(4):21-22.
LI Lan. Analysis and Prospect of Thermal Management Technology for Proton Exchange Membrane Fuel Cells [J]. Heavy Duty Vehicle, 2023(4): 21-22. (in Chinese)

作者简介



朱丹 (1991-), 女, 安徽宿州人, 博士, 讲师, 主要研究方向为氢能源动力系统状态估计与优化控制。

Tel: 029-82334478

E-mail: dan.zhu@chd.edu.cn

通信作者



赵轩 (1983-), 男, 陕西汉中人, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源汽车控制与管理。

Tel: 029-82334478

E-mail: zhaoxuan@chd.edu.cn