

45 kW 质子交换膜燃料电池发动机建模与仿真

高昆鹏¹, 章 桐^{1,2,3}, 黄晨东⁴, 周 苏^{1,2,3}

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804;
3. 同济大学 中德学院, 上海 200092; 4. 上海汽车集团股份有限公司, 上海 201804)

摘要: 建立了较为完整的包括电堆、反应气体供应以及水热管理 3 个主要模块的 45 kW 级质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 发动机数学模型。电堆电压模型引入了误差补偿项, 提高了电压计算精度, 并通过实验数据得到验证。选取冷却液入堆温度、空气过量系数和阴极入口空气压力为系统的操控变量, 在给定电流密度下进行了电堆相关性能对操控变量的敏感性分析。仿真结果表明, 为了获得较好的系统输出性能, 应适当降低冷却液入堆温度, 提高阴极入口空气压力; 为了保持合理的电堆温度, 必须有效控制该系统的水热管理系统。

关键词: 质子交换膜燃料电池发动机; 建模; 仿真; 敏感性分析

中图分类号: TP 15

文献标志码: A

Modeling and Simulation of a 45 KW Proton Exchange Membrane Fuel Cell Engine

GAO Kunpeng¹, ZHANG Tong^{1,2,3}, HUANG Chendong⁴, ZHOU Su^{1,2,3}

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Shanghai 201804, China; 3. Sino-German Postgraduate School, Shanghai 200092, China; 4. SAIC Motor Co. Ltd., Shanghai 201804, China)

Abstract: A mathematic model for a 45 kW proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) engine system was established, including a fuel cell stack and a reacting gases supply subsystem as well as a water/thermal management subsystem. An error correction term was introduced to improve model accuracy in calculating the stack voltage. Subsequently, the model was validated experimentally. The coolant temperature at stack inlet, air excess ratio and air pressure at cathode inlet were employed as the manipulating variables, meanwhile, the corresponding sensitive analysis

and systematic response were made under the given current densities. The simulation results show that the coolant temperature at stack inlet was proposed to reduce appropriately, while the air pressure at cathode inlet to be regulated as high as possible to obtain a better performance of the PEMFC engine system; in order to maintain rational stack temperature, the water/thermal management subsystem should be controlled effectively.

Key words: proton exchange membrane fuel cell engine; modeling; simulation; sensitive analysis

目前, 结构复杂的质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 发动机系统技术尚不成熟, 其试验、制造和运行成本居高不下, 一定程度上阻碍了燃料电池汽车产业化。因此, 有必要在研发过程中建立 PEMFC 系统模型, 对系统开展仿真研究, 从而节省系统研发成本和缩短开发周期^[1]。

通过机理分析法和参数辨识实验法可以建立 PEMFC 系统模型 (即电堆及其辅助单元模型), 为电堆内部机理研究和系统优化集成提供依据。上世纪 90 年代初, 国外 Bernardi 和 Verbrugge^[2] 建立了 1D 的单电池稳态模型。随后, Amphlett 等^[3] 基于 Ballard Mark IV 电堆的经验模型被广泛用于电堆电压计算。Pukrushpan 等^[4-5] 针对车用 75 kW 级 PEMFC 系统建立了动态模型 (包括空压机和进气歧管的动态模型)。国内对 PEMFC 系统模型的研究起步要晚于国外。2004 年周苏等^[6] 较早将三步催化反应的动力学机理应用在 PEMFC 电堆模型中, 2010 年在电堆模型中考虑了膜水含量的动态特性^[7], 2011 年提出了基于实验值查表方法的车用高压

收稿日期: 2011-12-29

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划 (2011AA11A265); 高等学校创新引智计划 (B08019); 上海市重点学科 (B303)

第一作者: 高昆鹏 (1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为燃料电池系统温度控制。E-mail: hngaokp@163.com

通讯作者: 周 苏 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新型车辆动力系统 (包括燃料电池发动机、动力蓄电池和电动机) 的建模、仿真及控制。E-mail: suzhou@tongji.edu.cn

PEMFC 系统模型^[8]. 张建琴等^[9]将机理建模与经验建模相结合,其中 PEMFC 电堆电化学特性采用经验建模,辅助部件如鼓风机等采用机理建模. 贺建军等^[10]通过分析影响输出性能的主要因素,建立了相应的燃料电池数学模型. 卫爱国等^[11]对 PEMFC 系统空压机部件采用神经网络进行模型辨识. 李曦等^[12-13]针对 PEMFC 热管理系统开展了建模工作.

本文针对一套车用 45 kW 级 PEMFC 发动机系统,建立其模型并通过实验对模型进行验证. 选取特

定的操控变量,在给定电流密度下进行相关敏感性分析. 同时,应用所建模型在设定工况需求电流下进行了动态仿真分析.

1 45 kW 级 PEMFC 发动机系统描述

本文研究对象系统的结构如图 1 所示. 系统主要包括燃料电池堆、反应气体供应(包括空气供应和氢气供应)和水热管理 4 个子系统.

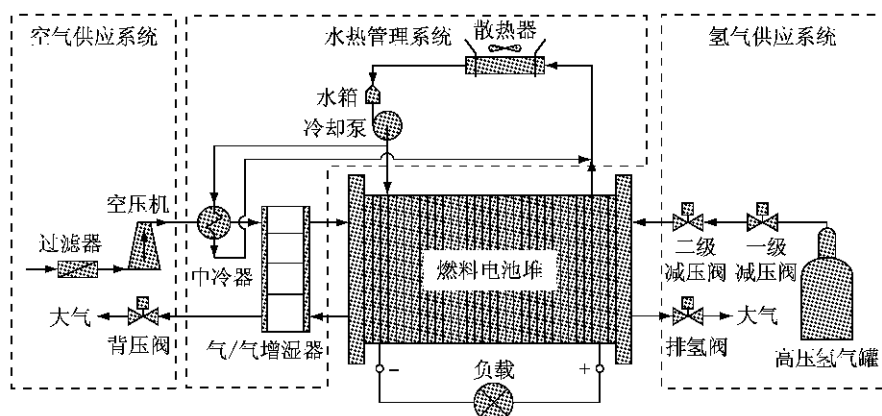


图 1 45 kW 车用 PEMFC 系统结构示意图

Fig.1 Structure of a 45 kW PEMFC system

本文建模和研究的重点是水热管理子系统,其包括冷却液泵、节温器、散热器、中冷器、气/气增湿器和冷却管道. 通过冷却液循环和散热器与环境的热交流,电堆多余的电化学反应热被排出,使电堆温度保持在合适范围内. 空压机出口端的高温高压干燥空气通过中冷器和气/气增湿器后,能够以合适的温度和湿度进入燃料电池堆.

2 PEMFC 发动机系统建模

2.1 燃料电池电压模型

PEMFC 极化曲线可由下式描述^[3-4]:

$$V_{\text{cell}} = f(I, P, \varphi_{\text{st}}, T_{\text{st}}, \lambda) = E_{\text{oc}} - |\eta_{\text{act}}| - \eta_{\text{ohm}} \quad (1)$$

式中: V_{cell} 为电池电压; E_{oc} 为可逆电动势; η_{act} 为活化极化损失电压; η_{ohm} 为欧姆极化损失电压,公式中暂不考虑浓差极化损失电压. 函数 f 中的参数 P 和 λ (即电堆阴阳两端操作压力和空气过量系数)均与空压机和背压阀运行状态以及工作电流 I 相关,参数 φ_{st} (即相对湿度)与系统操作压力、空气过量系数以及电堆温度相关,参数 T_{st} (即电堆温度)与水热管理相关. 由于阳极多数采用随动控制,因此,本文所建立的模型主要考虑电堆空气供应与水热管理系统.

按 Nernst 公式可获得式(1)中的可逆电动势:

$$E_{\text{oc}} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{\text{st}} - 298.15) + 4.305 \times 10^{-5} \ln(2p_{\text{H}_2}/p_{\text{O}_2}) \quad (2)$$

式中: p_{H_2} 为电堆中氢气的分压; p_{O_2} 为电堆中氧气的分压.

公式(1)中活化极化损失电压可按下式计算:

$$\eta_{\text{act}} = k_1 + k_2 T_{\text{st}} + k_3 \ln c_{\text{O}_2}^* + k_4 T_{\text{st}} \ln I \quad (3)$$

其中,氧气的等效摩尔体积浓度为 $c_{\text{O}_2}^* = 1.969 \times 10^{-7} p_{\text{O}_2} \exp(-T_{\text{st}}/498)$.

公式(1)中的欧姆极化损失电压可由下式获得:

$$\eta_{\text{ohm}} = IR_{\text{ohm}} \quad (4)$$

式中,燃料电池的等效阻抗为

$$R_{\text{ohm}} = \frac{L_{\text{st, mem}} \exp[-350(1/303 - 1/T_{\text{st}})]}{-0.003 + 0.0915\varphi_{\text{st}} - 0.2048\varphi_{\text{st}}^2 + 0.185\varphi_{\text{st}}^3}$$

其中 $L_{\text{st, mem}}$ 为电堆电解质的厚度.

由于电堆结构、材料参数不同,采用上述公式进行的电堆极化曲线拟合总是存在一定的误差,而且采样数据噪声干扰也会降低式(1)的准确性. 因此,为了提高模型的精度和鲁棒性,通过对误差数据的分析及处理,在式(1)中添加误差补偿项 ΔV ,则燃料电池电压 $\bar{V}_{\text{cell}} = V_{\text{cell}} + \Delta V$,其中误差补偿项 ΔV 可由下式确定:

$$\Delta V = k_5 (I/T_{\text{st}}) + k_6 (I/T_{\text{st}})^2 + k_7 (I/\lambda) + k_8 (I/\lambda)^2 + k_9 e^I \quad (5)$$

为了给模型辨识提供合适的实验数据,同时分析所选操控变量对电堆性能的影响,应用正交试验法设计并进行了相关实验.正交试验法是利用正交表选取与分析多因素实验的方法,也是最常用的试验设计方法之一.正交表能够在因素变化范围内均衡抽样,使每次试验都具有较强的代表性^[14].

表1 PEMFC 四因素三水平因素水平表

Tab.1 4-element and 3-order orthogonal table for the PEMFC

电流密度/ (mA·cm ⁻²)	空气过量系数			冷却液入口温度/℃			阴极入口相对湿度/%			阴极入口压力/kPa		
	水平1	水平2	水平3	水平1	水平2	水平3	水平1	水平2	水平3	水平1	水平2	水平3
150	4.0	5.0	6.0	30	55	75	30	60	80	120	165	200
800	1.5	2.0	2.5	30	55	75	30	60	80	120	165	200
1 000	1.4	1.6	1.8	30	55	75	30	60	80	120	165	200

表2 L₉(3⁴)正交实验表案例(150 mA·cm⁻²)Tab.2 Experimental results obtained at 150 mA·cm⁻² for the L₉(3⁴)

试验	因素1	因素2/ ℃	因素3/ %	因素4/ kPa	性能指标 单片电压/V
1	4	30	30	120	0.865 6
2	4	55	60	165	0.820 6
3	4	75	80	200	0.828 4
4	5	30	60	200	0.819 0
5	5	55	80	120	0.814 3
6	5	75	30	165	0.786 7
7	6	30	80	165	0.826 4
8	6	55	30	200	0.827 1
9	6	75	60	120	0.793 1

表3 经过辨识后 k_i(i=1,2,⋯,9)的具体值Tab.3 Identified model parameters k_i(i=1,9)

k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k ₉
0.474 3	0.002 6	0.136 8	-1.8×10 ⁻⁴	0.637 7	-0.394 0	-0.002 3	9.853×10 ⁻⁶	6.090×10 ⁻⁴

2.3 水热管理模型

2.3.1 中冷器

空压机出口空气温度远高于电堆工作温度.因此,需要中冷器降低空压机出口空气温度.高温空气流经中冷器其流量不变,但温度发生变化.中冷器的空气出口温度 $T_{inc,air,out}$ 可由如下传热单元数法^[15]得到:

$$T_{inc,air,out} = T_{inc,air,in} - \varepsilon(T_{inc,air,in} - T_{inc,cool,in}) \quad (7)$$

式中: $T_{inc,air,in}$ 为中冷器入口空气温度; $T_{inc,cool,in}$ 为中冷器入口冷却液温度; 传热效率 ε 是传热单元数 N_{tu} 和空气与冷却液比热容之比 C_r 的函数,其具体的计算公式为

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-N_{tu}(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-N_{tu}(1 - C_r)]} \quad (8)$$

2.3.2 电堆冷却系统模型

在水热管理系统中,冷却液环路由冷却液泵、节流器、散热器和中冷器组成,通过冷却液循环和散热

根据影响 PEMFC 发动机系统性能的 4 个主要操控变量及这些变量在低、中和额定工况下的值,设计四因素三水平的因素水平表(表1),分析所选操控变量对电堆输出性能的影响,并基于获取的实验数据(表2)借助最小二乘法对式(3)和式(5)中的 k_i ($i=1,2,\dots,9$)进行参数辨识,具体数值见表3.

2.2 空压机动态模型

空压机是空气供应子系统的核心部件,其转速是燃料电池堆电流、阴极操作压力和空气过量系数等变量的函数.空压机动态模型为

$$\omega_{comp} = \int_0^t \frac{T_{mot} - T_f - T_{comp}}{J_{comp} + J_{mot}} dt \quad (6)$$

式中: ω_{comp} 为空压机的角速度; T_{mot} 为电机的转矩; T_f 为电机的摩擦转矩; T_{comp} 为空压机的转矩; J_{mot} 为电机的转动惯量; J_{comp} 为空压机的转动惯量.具体的参数和子模型可参见文献[8].

器与环境的热交换带走燃料电池堆和空气供应系统中多余的热量.冷却液采用 50% 乙二醇溶液.假设冷却过程中冷却液流量损失为零,忽略各部件的辐射散热和电堆表面散热.

电堆温度受冷却液同电堆热交换强弱的影响可以由以下公式获得:

$$m_{st} C_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = Q_{st} - k_{st,cool} A_{st,cool} (T_{st} - T_{st,cool,out}) \quad (9)$$

式中: m_{st} 为电堆的质量; C_{st} 为电堆的比热容; T_{st} 为电堆的温度; $A_{st,cool}$ 为电堆和冷却液之间的传热面积; $k_{st,cool}$ 为电堆和冷却液之间的传热系数; $T_{st,cool,out}$ 为电堆出口冷却液温度; 燃料电池堆需要冷却液带走的热量为 $Q_{st} = N_{cell} I (1.23 - \bar{V}_{cell})$; N_{cell} 为电堆单片片数.

冷却液流经电堆后温度升高,电堆出口冷却液温度计算公式如下:

$$m_{\text{cool, in, stack}} C_{\text{cool}} \frac{dT_{\text{st, cool, out}}}{dt} = k_{\text{st, cool}} A_{\text{st, cool}} (T_{\text{st}} - T_{\text{st, cool, out}}) + \dot{m}_{\text{cool, in, stack}} C_{\text{cool}} (T_{\text{st, cool, in}} - T_{\text{st, cool, out}}) \quad (10)$$

式中: $m_{\text{cool, in, stack}}$ 为电堆中冷却液的质量; C_{cool} 为冷却液的比热容; $\dot{m}_{\text{cool, in, stack}}$ 为冷却液的流量; $T_{\text{st, cool, in}}$ 为电堆入口冷却液温度。

冷却液流经散热器同环境空气产生热交换, 散掉多余的热量, 然后再进入电堆为电堆散热。散热器出口冷却液温度计算公式如下:

$$m_{\text{cool, in, rad}} C_{\text{cool}} \frac{dT_{\text{rad, cool, out}}}{dt} = \dot{m}_{\text{air, rad}} C_{\text{air}} (T_{\text{amb}} - T_{\text{rad, air, out}}) + \dot{m}_{\text{cool, rad}} C_{\text{cool}} (T_{\text{rad, cool, in}} - T_{\text{rad, cool, out}}) \quad (11)$$

式中: $m_{\text{cool, in, rad}}$ 为散热器中冷却液质量; $\dot{m}_{\text{air, rad}}$ 为空气流经散热器的质量; $\dot{m}_{\text{cool, rad}}$ 为散热器中冷却液的流量; C_{air} 为空气的比热容; T_{amb} 为环境温度; $T_{\text{rad, air, out}}$ 为空气流经散热器温度; $T_{\text{rad, cool, in}}$ 为散热器入口冷却液温度。

2.3.3 气/气增湿器

增湿器采用管壳型气/气增湿器, 其具体结构如图2所示^[16]。空压机输出的干燥空气经中冷器冷却后进入气/气增湿器内的 Nafion 膜管道, 电堆阴极出口排出的湿气流经壳内。干燥空气被加湿后进入燃料电池堆。

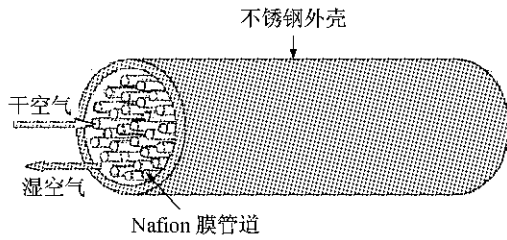


图2 管壳型气/气增湿器结构示意图

Fig.2 Demonstrative structure of a shell-and-tube type gas-to-gas membrane humidifier

气/气增湿器膜两侧的温差较小, 建立其模型主要根据质量守恒原理。膜两侧湿度差是水分子由膜管外向膜管内扩散的主要原因, 因此, 膜扩散系数和两侧气体湿度差决定了水蒸气传递的通量。水蒸气传递通量一般可表述为

$$\frac{dm_{v, \text{trans}}}{dt} = \dot{m}_{\text{diff, mem, shell}} - \dot{m}_{\text{diff, mem, tube}} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{\text{diff, mem, i}} = 2M_{\text{H}_2\text{O}}AD_w(c_i - c_{\text{middle}})/L_{\text{mem}} \quad (13)$$

式中: $\dot{m}_{\text{diff, mem, shell}}$ 和 $\dot{m}_{\text{diff, mem, tube}}$ 分别是膜管外和膜管内的水质量流量; 下标 i 表示管侧或者壳侧; A 为膜

的面积; L_{mem} 为膜的厚度; $M_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的摩尔质量。式中管侧、壳侧和膜中的水浓度分别为 $c_{\text{tube}} = \rho_{\text{dry, mem}} \cdot \lambda_{\text{tube}}/M_{\text{mem}}$; $c_{\text{shell}} = \rho_{\text{dry, mem}} \lambda_{\text{shell}}/M_{\text{mem}}$; $c_{\text{middle}} = (c_{\text{tube}} + c_{\text{shell}})/2$; $\rho_{\text{dry, mem}}$ 为膜干燥时的密度; M_{mem} 为膜的摩尔质量; λ_{tube} 为管侧的水含量; λ_{shell} 为壳侧的水含量; D_w 为膜扩散系数, 可由

$$D_w = D_\lambda \exp[2416(1/313 - 1/T_{\text{mem}})] \quad (14)$$

计算获得; T_{mem} 为膜的温度; 膜的经验扩散系数 D_λ 是膜中水含量 λ_{mem} 的函数

$$D_\lambda = \begin{cases} 10^{-6}, & \lambda_{\text{mem}} < 2 \\ 10^{-6}[1 + 2(\lambda_{\text{mem}} - 2)], & 2 \leq \lambda_{\text{mem}} \leq 3 \\ 10^{-6}[3 - 1.67(\lambda_{\text{mem}} - 3)], & 3 < \lambda_{\text{mem}} < 4.5 \\ 1.25 \times 10^{-6}, & \lambda_{\text{mem}} \geq 4.5 \end{cases} \quad (15)$$

而 λ_{mem} 又是膜中水活度 a_{mem} 的函数

$$\lambda_{\text{mem}} = \begin{cases} 0.043 + 17.81a_{\text{mem}} - 39.85a_{\text{mem}}^2 + 36a_{\text{mem}}^3, & 0 < a_{\text{mem}} \leq 1 \\ 14 + 1.4(a_{\text{mem}} - 1), & 1 < a_{\text{mem}} \leq 3 \\ 16.8, & a_{\text{mem}} \geq 3 \end{cases} \quad (16)$$

$$a_{\text{mem}} = (a_{\text{shell}} + a_{\text{tube}})/2 = (P_{v, \text{shell}}/P_{\text{sat, shell}} + P_{v, \text{tube}}/P_{\text{sat, tube}})/2 \quad (17)$$

式中: $P_{v, \text{shell}}$ 为壳侧水蒸气的压力; $P_{\text{sat, shell}}$ 为壳侧的饱和水蒸气压力; $P_{v, \text{tube}}$ 为管侧水蒸气的压力; $P_{\text{sat, tube}}$ 为管侧的饱和水蒸气压力。

3 结果分析与讨论

3.1 系统模型的验证

$U-I$ 曲线被广泛用于验证电堆模型计算输出电压的准确性。在本研究中所建立的 45 kW 级 PEMFC 发动机系统模型的准确性将通过电池的 $U-I$ 曲线验证。如图3所示, 模型的仿真值和实验值之间的误差小于 5%, 表明所建立的系统级模型具

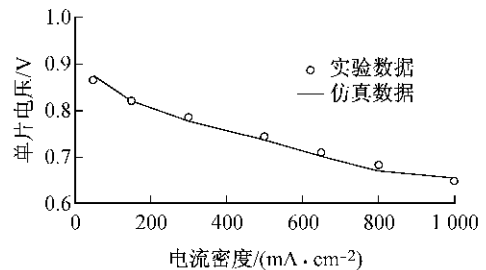


图3 模型仿真值和实验值的对比

Fig.3 Comparison of the simulation and experimental data

有较高的准确性,能够反映系统操控变量对输出性能的影响。

3.2 操控变量敏感性分析

利用经过实验验证的 PEMFC 发动机系统模型,结合表 1 列出的 3 个典型工况,本文分析了在给定电流密度下操控变量对 PEMFC 发动机系统性能的影响。冷却液入堆温度、空气过量系数和阴极入口空气压力选为系统的操控变量,因为:① 这 3 个变量对 PEMFC 发动机系统性能影响较大,从而构成因果系统;② 这 3 个操控变量通过相应的传感器可直接测量,选用合适的闭环反馈控制能够对这 3 个操控变量进行动态调节。

图 4 显示,在电流密度为 $150 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下冷却液入堆温度和空气过量系数对阴极入口空气相对湿度影响较大。随着这 2 个操控变量的增加,阴极入口空气相对湿度降低。分析原因为:① 冷却液入堆温度的提高使阴极入口处饱和水蒸气压力提高;② 空气过量系数的增加,会降低水蒸气的分压。当提高阴极入口空气压力时,入口空气相对湿度增加。仿真结果表明,所选 3 个操控变量的范围对电池电压影响不大。分析图 4 中操控变量对系统净输出功率以及效率的影响,只有空气过量系数影响较大。空气过量系数变大,空压机消耗的功率变大,使系统净输出功率和效率变小。因此,在此工况下,空气过量系数的选取尤为重要。

如图 5 所示,提高冷却液入堆温度和空气过量

系数都会使阴极入口空气相对湿度以及系统净输出功率下降。因为阴极入口空气相对湿度下降较为明显,影响到电池电压输出。由于提高冷却液入堆温度和空气过量系数使系统净输出功率和电堆总输出功率同时下降,所以这 2 个操控变量变化对系统效率影响不大。在此电流密度下,阴极入口空气压力的提高会使阴极入口空气相对湿度和系统净输出功率上升。因此,在额定工况下,为提高系统效率,所选的 3 个操控变量应控制在合理的范围内。

图 6 显示了电流密度为 $1000 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下系统操控变量对 PEMFC 发动机系统性能的影响。与图 4 和图 5 中的结果相比,电池电压、阴极入口空气相对湿度和系统效率受操控变量的影响更大。在大电流密度情况下,为了维持电堆正常工作,对辅助系统的能力提出了更高的要求,操控变量的改变对辅助系统功率消耗有较大影响。

模型仿真结果表明,为了获得较好的系统输出性能,在系统允许的合理范围内应适当降低冷却液入堆温度和空气过量系数,提高阴极入口空气压力。

3.3 动态仿真结果分析

在所建立模型的基础上,以图 7 所示的需求电流为输入,得到了相关的动态仿真结果。图 8 给出了电堆电压和电堆温度随电流的动态变化。因为没有控制干预,电堆温度有较大的波动。为了使电堆温度保持在合理范围内,必须对电堆冷却系统进行有效控制。

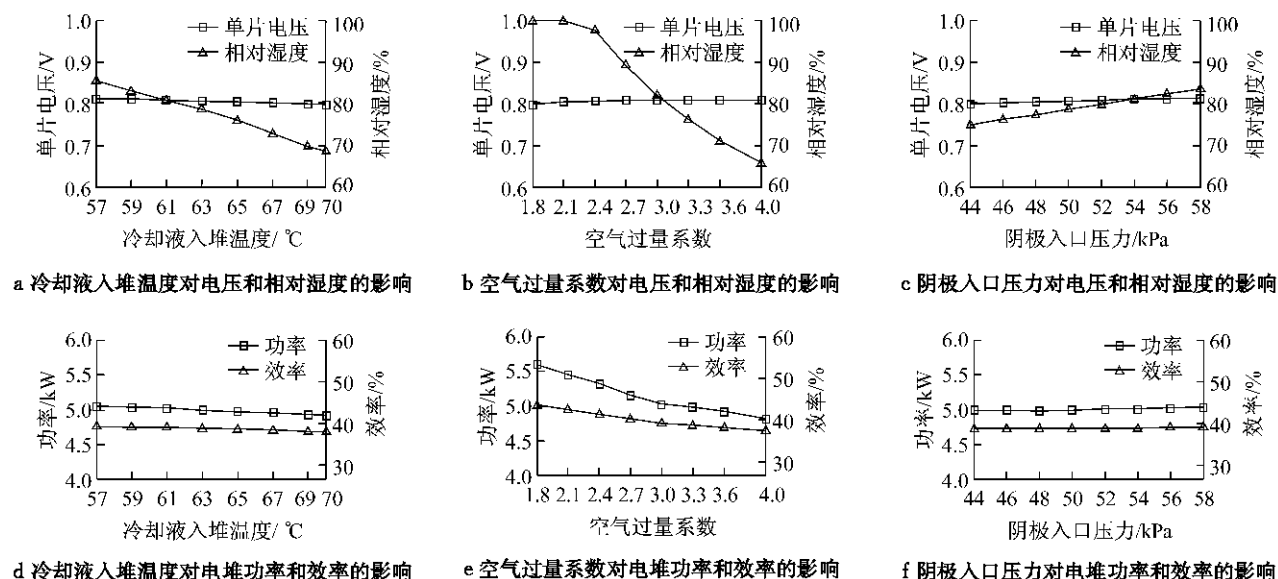


图 4 电流密度为 $150 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下系统操控变量对 PEMFC 发动机系统性能的影响

Fig. 4 The effect of manipulating variables on performances of PEMFC engine system under $150 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$

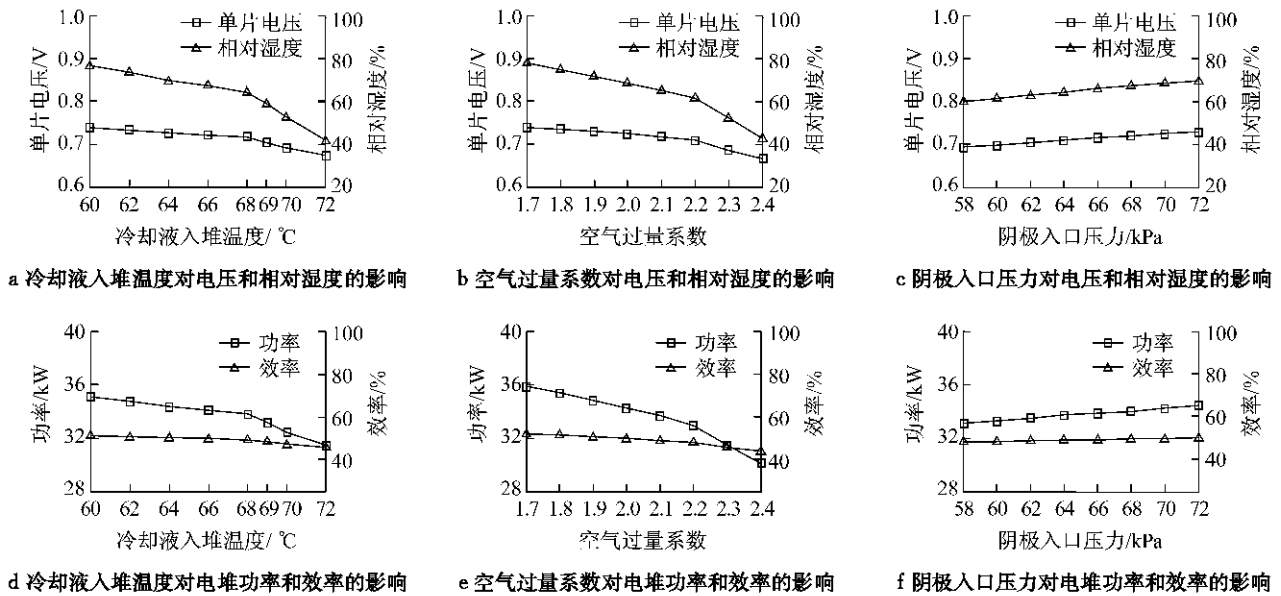
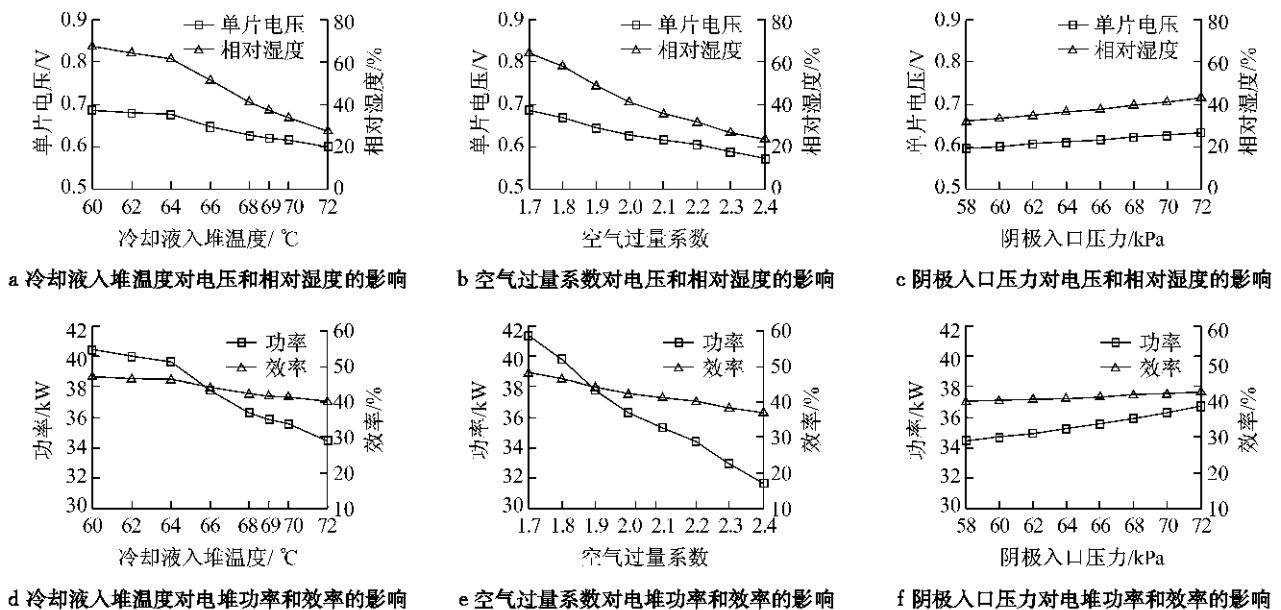
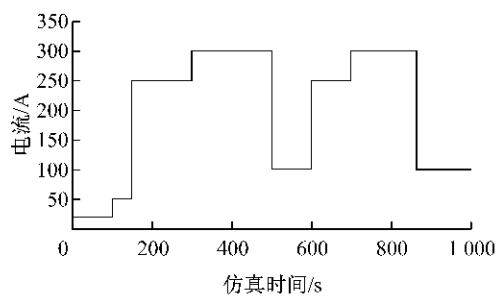
图5 电流密度为 $800 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下系统操控变量对 PEMFC 发动机系统性能的影响Fig.5 The effect of manipulating variables on performances of PEMFC engine system under $800 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 图6 电流密度为 $1000 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下系统操控变量对 PEMFC 发动机系统性能的影响Fig.6 The effect of manipulating variables on performances of PEMFC engine system under $1000 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 

图7 工况需求电流

Fig.7 Load cycle of the required current

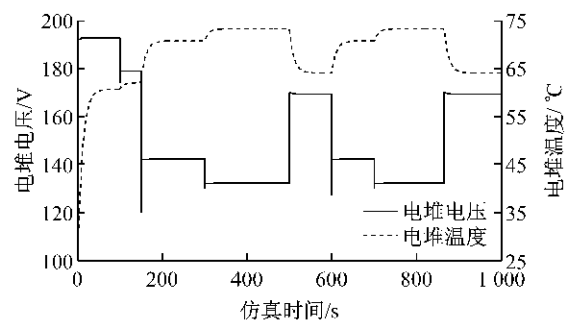


图8 电堆电压、温度随电流的变化

Fig.8 Stack voltage and temperature under the load cycle

4 结论

针对一套车用 45 kW 级 PEMFC 发动机系统,应用机理与试验的建模方法建立了系统级模型。燃料电池堆建模过程中引入误差补偿项,完善了电堆电压计算模型并提高了精度。

通过仿真研究,分析了不同电流密度条件下系统操控变量对 PEMFC 发动机系统性能的影响,给出了在 3 种典型电流密度下系统操控变量调节的依据。仿真结果表明,为了获得较好的系统输出性能,应适当地降低冷却液入堆温度和空气过量系数,而应提高阴极入口空气压力。从系统的动态分析中可知,为了保持电堆温度在合理范围内,必须对电堆冷却系统进行有效的控制。建立的系统级模型能够为 PEMFC 发动机系统控制器设计和系统优化提供理论参考,同时能够为车用 PEMFC 发动机系统部件选型和系统集成方案验证提供可行性分析。

参考文献:

- [1] Varigonda S, Kamat M. Control of stationary and transportation fuel cell systems; progress and opportunities [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, 30(12): 1735.
- [2] Bernardi D M, Verbrugge M W. Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte [J]. *AIChE Journal*, 1991, 37(8): 1151.
- [3] Amphlett J C, Baumert R M, Mann R F, et al. Performance modeling of the ballard mark IV solid polymer electrolyte fuel cell, II. empirical model development [J]. *Journal of Electrochemical Society*, 1995, 142(1): 9.
- [4] Pukrushpan J T, Stefanopoulou A G, Peng H. Control of fuel cell power systems—principles, modeling, analysis and feedback design [M]. London: Springer-Verlag, 2004.
- [5] Gelfi S, Stefanopoulou A G, Pukrushpan J T, et al. Dynamics of low-pressure and high-pressure fuel cell air supply systems [C/CD] // *Annual American Control Conference*, Denver: ACC, 2003.
- [6] ZHOU Su. H₂ fuel cell stack performance studies based on a dynamical model [J]. *Journal of Qingdao University*, 2004, 19(1): 78.
- [7] 陈海蓉,周苏. 基于质子交换膜动态特性的 PEM 燃料电池建模与仿真[J]. *青岛大学学报:工程技术版*, 2010, 25(1): 1.
CHEN Hairong, ZHOU Su. Modeling and simulation of a PEMFC based on the dynamic characteristics of membrane [J]. *Journal of Qingdao University: Engineering & Technology Edition*, 2010, 25(1): 1.
- [8] 周苏,张传升,陈凤祥. 车用高压 PEMFC 系统的建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(7): 1469.
ZHOU Su, ZHANG Chuansheng, CHEN Fengxiang. Modeling and simulation of high-pressure automobile PEMFC power system [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(7): 1469.
- [9] 张建琴,刘向,路林吉,等. 氢-空气质子交换膜燃料电池系统建模分析[J]. *电源技术*, 2010, 134(8): 775.
ZHANG Jianqin, LIU Xiang, LU Linji, et al. Modeling and analysis of a hydrogen/air PEM fuel cell system [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2010, 134(8): 775.
- [10] 贺建军,孙超. 质子交换膜燃料电池的建模与分析[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2010, 41(2): 566.
HE Jianjun, SUN Chao. Modeling and simulation analysis of proton exchange membrane fuel cell [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2010, 41(2): 566.
- [11] 卫爱国,全书海,苏林,等. 燃料电池空压机的建模及仿真[J]. *空军雷达学院学报*, 2010, 24(3): 200.
WEI Aiguo, QUAN Shuhai, SU Lin, et al. Modeling of air compressor with fuel cell and its simulation [J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2010, 24(3): 200.
- [12] 李曦,曹广益,朱新坚. 基于系统辨识的 PEMFC 温度非线性建模与预测[J]. *中国机械工程学报*, 2005, 16(10): 873.
LI Xi, CAO Guangyi, ZHU Xinjian. Nonlinear temperature modeling and prediction of PEMFC based on system identification [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(10): 873.
- [13] 谷靖,卢兰光,欧阳明高. 燃料电池系统热管理子系统建模与温度控制[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2007, 47(11): 2036.
GU Jing, LU Languang, OUYANG Minggao. Thermal management subsystem model and temperature control for fuel cells [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(11): 2036.
- [14] 李云燕,胡传荣. 实验设计及数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
LI Yunyan, HU Chuanrong. Experiment design and data processing [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [15] James R Welty, Charles E Wicks, Robert E Wilson. 动量、热量和质量传递原理[M]. 马紫峰,吴卫生,译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
James R W, Charles E W, Robert E W. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer [M]. Translated by MA Zifeng, WU Weisheng. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [16] Park S K, Choe S Y, Choi S H. Dynamic modeling and analysis of a shell-and-tube type gas-to-gas membrane humidifier for PEM fuel cell applications [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(9): 2273.