

一种改进的质子交换膜燃料电池系统动态模型

周 苏^{1,2,3}, 高昆鹏¹, 支雪磊¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 中德学院, 上海 200092; 3. 同济大学 浙江学院, 浙江 嘉兴 314051)

摘要: 在已有的质子交换膜燃料电池系统模型基础上添加气体扩散层模型和膜电极组件动态模型, 研究膜中水含量的动态特性。仿真结果表明, 系统动态模型改进之后其输出性能与实验值误差较小, 能够反映外部操作条件变化对电池内部电化学反应和物料传递过程的影响, 膜中水含量和输出性能的动态响应过程更加接近实际情况, 相关信息可用于间接控制膜中水含量和优化系统。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 膜中水含量; 动态模型; 操作条件

中图分类号: TP15

文献标志码:

An Improved Dynamic Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems

ZHOU Su^{1,2,3}, GAO Kunpeng¹, ZHI Xuelei¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Sino-German Postgraduate School, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Zhejiang College, Tongji University, Jiaxing 314051, China)

Abstract: To investigate dynamical behaviors of membrane water content in a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), a dynamic system model was established, consisting of a gas diffusion layer (GDL) and a membrane electrode assembly (MEA). The simulation results show that there is a small difference between the outputs of modified PEMFC system model and experimental data. The dynamic influence of the water content on stack voltage is plausible under more realistic operating condition. The effect of manipulating variables on chemical reaction and transfer process can also be refluxed by the modified PEMFC system model which can be used to control and analyze the membrane water content and optimize a PEMFC system.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; water content; dynamic model; operating condition

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 系统主要由电堆及其辅助部件组成^[1], 是未来可用于车辆动力和固定电站的一种清洁发电装置。由于质子交换膜内水含量对质子传导能力和电堆寿命有较大影响, 而目前的传感器技术不易在系统运行时动态获取膜中水含量, 难以实现膜中水含量的实时控制, 所以 PEMFC 商业化应用依然存在一些瓶颈。

Janssen 等^[2]和 Springer 等^[3]研究了质子交换膜中水迁移机理和电渗拉力系数对膜中水迁移的影响。Okada 等^[4]和 Chen 等^[5]分别研究了膜中水迁移特性并分析了主要影响因素。Pukrushpan 等^[6]针对车用 75 kW 级 PEMFC 系统建立了动态模型, 该模型包括空压机、进气歧管等主要部件。国内周苏等较早将 3 步催化反应机理和膜中水含量动态模型应用于 PEMFC 电堆建模, 取得了较为满意的仿真结果^[7-9]; 2013 年建立了车用 45 kW 级 PEMFC 发动机系统模型并进行了操控变量敏感性分析。何海婷等^[10]和张竹茜等^[11]考虑了气-液在扩散层的传递现象, 分别应用 Fick 定律和毛细压力梯度描述气体传输和液态水传输过程, 应用 RC 等效电路模型模拟电化学特性, 并对电堆进行了相关试验研究。贺建军等^[12]通过分析燃料电池性能的几个主要影响因素, 即电化学电动势、活化极化过电压、欧姆极化过电压、浓度极化过电压与双层电荷层作用, 建立了相关模型并对其进行了参数辨识。孙红等^[13]建立了一个稳态等温两相流模型, 研究了膜中水迁移过程和水含量。何广利等^[14]建立了一个二维传质模型, 用于分析扩散层和催化层内的水分布。

PEMFC 系统呈典型的非线性动态特征, 其包含的物理及化学过程, 如气体在流道内的传递、气体在气体扩散层 (gas diffusion layer, GDL) 内的传递、电化学双层电容效应和膜中水传输等, 都对 PEMFC

收稿日期: 2014-06-26

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划 (2008AA050403); 高等学校创新引智计划 (B08019); 上海市重点学科建设项目 (B303)

第一作者: 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的建模、仿真及控制。

E-mail: suzhou@tongji.edu.cn

的输出性能和寿命产生直接或间接影响。本文以 Pukrushpan 等^[6]建立的 PEMFC 系统模型为基础,嵌入 GDL 内气体传递、电化学双层电容效应和膜中水含量动态模型,用于分析 PEMFC 系统主要操作条件对电堆内部质子交换膜中水含量的影响。

1 PEMFC 系统动态模型

根据图 1 所示的车用 PEMFC 系统结构建立了 PEMFC 系统动态模型。其中,空压机模型、阴极供气/排气歧管模型以及阴/阳极气体通道模型采用 Pukrushpan 等^[6]提供的相关数据建立,而 GDL 模型、MEA(membrane electrode assembly)模型和电堆电压模型则为添加或改进的模型。

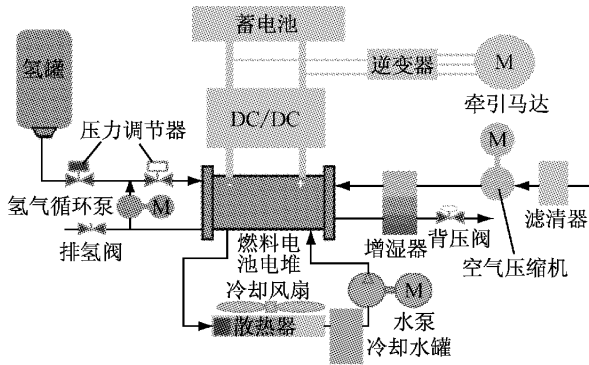


图 1 车用 PEMFC 系统结构示意图^[1]

Fig.1 Schematic diagram of a vehicle's PEMFC system^[1]

1.1 空压机模型

空压机为燃料电池提供电化学反应所需的空气流量和空气压力。根据力矩平衡方程,可得到以下空压机动态模型:

$$J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = (N_{cm} - N_{cp}) \quad (1)$$

式中: J_{cp} 为空压机转动惯量; ω_{cp} 空压机转速; N_{cm} 为空压机电机输入转矩; N_{cp} 为空压机需求转矩。

$$N_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (2)$$

式中: η_{cm} 为空压机电机机械效率; k_t , R_{cm} 和 k_v 为空压机电机常数; v_{cm} 为空压机电机转速。

$$N_{cp} = \frac{c_p T_{atm}}{\omega_{cp} \eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp,out} \quad (3)$$

式中: c_p 为空气比定压热容; T_{atm} 为环境温度; η_{cp} 为空压机效率; p_{sm} 为空压机出口空气压力; p_{atm} 为环境压力; γ 为空气比热比; $W_{cp,out}$ 为空压机出口空气流量。

1.2 阴极供气歧管模型

阳极采用高压储氢方式,可快速调节氢气流量。

因此,只考虑阴极供气歧管模型,描述进堆空气压力 p_{sm} 动态过程的数学方程如下:

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{RT_{sm}}{V_{sm}} (W_{cp,out} - W_{sm,out}) \quad (4)$$

式中: R 为理想气体常数; T_{sm} 为进堆空气温度; V_{sm} 为入堆管路体积; $W_{sm,out}$ 为进堆空气流量。

1.3 阴/阳极气体通道模型

在阴极气体通道内,气体成分有氧气、氮气和气态水(不考虑冷凝的液态水和其他组分)。根据质量守恒,可得到以下电堆内氧气质量 m_{O_2} 的动态平衡方程:

$$\frac{dm_{O_2}}{dt} = W_{O_2,in} - W_{O_2,out} - W_{O_2,react} \quad (5)$$

式中: $W_{O_2,in}$ 为电堆入口氧气流量; $W_{O_2,out}$ 为电堆出口氧气流量; $W_{O_2,react}$ 为氧气在电堆内的消耗速率。

电堆内氮气质量 m_{N_2} 的动态平衡方程可表示如下:

$$\frac{dm_{N_2}}{dt} = W_{N_2,in} - W_{N_2,out} \quad (6)$$

式中: $W_{N_2,in}$ 为电堆入口氮气流量; $W_{N_2,out}$ 为电堆出口氮气流量。

类似的,电堆内阴极水质量 $m_{w,ca}$ 的动态平衡方程为

$$\frac{dm_{w,ca}}{dt} = W_{v,ca,in} - W_{v,ca,out} + W_{v,ca,gen} + W_{v,mem} \quad (7)$$

式中: $W_{v,ca,in}$ 为电堆阴极入口气态水流量; $W_{v,ca,out}$ 为电堆阴极出口气态水流量; $W_{v,ca,gen}$ 为电堆反应产生气态水流量; $W_{v,mem}$ 为通过膜传递的水流量。

在阳极气体通道,气体成分有氢气和气态水,不考虑其他气体成分。根据质量守恒,可以得到以下电堆内氢气质量 m_{H_2} 的动态平衡方程:

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = W_{H_2,in} - W_{H_2,out} - W_{H_2,react} \quad (8)$$

式中: $W_{H_2,in}$ 为电堆入口氢气流量; $W_{H_2,out}$ 为电堆出口氢气流量; $W_{H_2,react}$ 为氢气在电堆内的消耗速率。

类似的,电堆阳极水质量 $m_{w,an}$ 的动态平衡方程如下:

$$\frac{dm_{w,an}}{dt} = W_{v,an,in} - W_{v,an,out} - W_{v,mem} \quad (9)$$

式中: $W_{v,an,in}$ 为电堆阳极入口气态水流量; $W_{v,an,out}$ 为电堆阳极出口气态水流量。

1.4 阴/阳极 GDL 模型

GDL 位于气体通道与催化层之间,有导电和导热、支撑 MEA 等作用,其性能影响整个燃料电池性

能.此外,应用 Nernst 公式或 Butler-Volmer 公式计算电压时,需要氧气或氢气在催化层中的浓度值或分压值.因此,有必要建立 GDL 模型用于计算这些量.在 GDL 建模过程中,应用 Maxwell-Stefan 方程计算反应气体在催化层中的浓度.由 Maxwell-Stefan 方程的一般数学描述,得

$$-\nabla x_i = \frac{RT}{p} \sum_{i \neq j} \frac{x_j N_i - x_i N_j}{D_{ij}^{\text{eff}}} \quad (10)$$

式中: ∇ 为梯度算子; x_i, x_j 分别为气体 i, j 的摩尔分数; T 为气体温度; p 为气体压力; N_i, N_j 分别为气体 i, j 的摩尔通量; D_{ij}^{eff} 为气体 i 与 j 的相互扩散有效系数.

在燃料电池中,气体浓度梯度在 GDL 上有 3 个方向,其中从气体通道到 MEA 方向的浓度梯度对燃料电池的性能产生较大影响.本文建立的 GDL 模型只考虑从气体通道到 MEA 的方向.式(10)中气体浓度梯度 ∇x_i 可由以下公式得到:

$$\nabla x_i \approx \frac{x_{i,\text{MEA}} - x_{i,\text{ch}}}{d_{\text{GDL}}} \quad (11)$$

式中: $x_{i,\text{MEA}}$ 为气体 i 在 MEA 中的摩尔分数; $x_{i,\text{ch}}$ 为气体 i 在气体通道中的摩尔分数; d_{GDL} 为 GDL 层的厚度.

气体在 GDL 中摩尔分数可近似表达为

$$x_i \approx \bar{x}_i = \frac{1}{2} (x_{i,\text{MEA}} + x_{i,\text{ch}}) \quad (12)$$

根据上述的简化方法,并将公式(10)~(12)应用于燃料电池阴阳两侧的 GDL,得

$$-\frac{x_{i,\text{MEA}} - x_{i,\text{ch}}}{d_{\text{GDL}}} = \frac{RT_{\text{st}}}{p} \sum_{\substack{i \neq j \\ i=\text{vapor}, \text{O}_2, \text{N}_2 \\ j=\text{vapor}, \text{H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2}} \frac{\bar{x}_j N_i - \bar{x}_i N_j}{D_{ij}^{\text{eff}}} \quad (13)$$

式中: T_{st} 为电堆温度.氢气或氧气的摩尔通量可根据法拉第定律计算,氮气摩尔通量为零,而水蒸气摩尔通量则与 MEA 中质子交换膜模型相耦合.

1.5 MEA 模型

MEA 主要包括质子交换膜和催化层,其中催化层被视为无厚度的界面.文献[6]提出的 PEMFC 系统模型没有考虑膜中水含量的动态特性,从而不能够表征膜中水含量对电堆性能的影响.本文依据 Springer 等[3]提出的膜中水传递机理(图 2)建立 MEA 动态模型.

膜中水含量 λ 的动态方程为

$$d_m \frac{\rho_{\text{m,dry}}}{M} \frac{d\lambda}{dt} = j_{\text{v,m}}^{\text{A}} - j_{\text{v,m}}^{\text{C}} \quad (14)$$

式中: d_m 为膜的厚度; $\rho_{\text{m,dry}}$ 为膜在干燥条件下的密

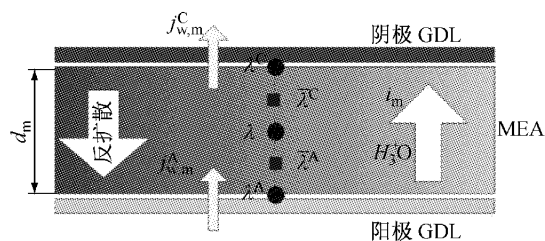


图 2 质子交换膜建模示意图

Fig.2 Schematic diagram of a PEMFC modeling

度; M 为膜的等效摩尔质量;膜阳/阴极侧水的摩尔通量 $j_{\text{v,m}}^{\text{A}}$ 和 $j_{\text{v,m}}^{\text{C}}$ 的动态平衡方程如下[3]:

$$j_{\text{v,m}}^{\text{A}} = -\frac{\rho_{\text{m,dry}}}{M} D_m (\lambda, T_{\text{st}}) \frac{\lambda - \lambda^{\text{A}}}{0.5 d_m} + n_d (\lambda) \frac{I_{\text{st}}}{A_{\text{fc}} F} \quad (15)$$

$$j_{\text{v,m}}^{\text{C}} = -\frac{\rho_{\text{m,dry}}}{M} D_m (\lambda, T_{\text{st}}) \frac{\lambda^{\text{C}} - \lambda}{0.5 d_m} + n_d (\lambda) \frac{I_{\text{st}}}{A_{\text{fc}} F} \quad (16)$$

式(15),(16)中: D_m 为水在膜中的扩散系数; λ 为质子交换膜中水含量; λ^{A} 为膜阳极侧水含量; λ^{C} 为膜阴极侧水含量; n_d 为每摩尔电子所携带的水的摩尔数; I_{st} 为电堆电流; A_{fc} 为电池的有效面积; F 为法拉第常数.

在催化层模型中,氢气活化过电势较低,模型只考虑阴极的电化学反应动力学和双层电容效应.

阴极侧电容量 C_{dl}^{C} 的动态方程为

$$C_{\text{dl}}^{\text{C}} \frac{d\eta^{\text{C}}}{dt} = 2F r^{\text{C}} - \frac{I_{\text{st}}}{A_{\text{fc}}} \quad (17)$$

式中: η^{C} 为阴极过电势; r^{C} 为单位面积反应速率.

$$r^{\text{C}} = \frac{J}{F} \left(\frac{C_{\text{O}_2,\text{MEA}}}{C_{\text{O}_2}^{\text{ref}}} \right) \exp \left(-\frac{\alpha^{\text{C}} F}{RT_{\text{st}}} \eta^{\text{C}} \right) \quad (18)$$

式中: J 为单位面积交换电流密度; $C_{\text{O}_2,\text{MEA}}$ 为催化层氧浓度; $C_{\text{O}_2}^{\text{ref}}$ 为标准状态下的氧浓度; α^{C} 为阴极电荷迁移系数.

1.6 阴极排气歧管模型

在阴极排气歧管内,气体成分有氮气、氧气和水蒸气.根据理想气体状态方程,可以得到出堆管路压力 p_{m} 的计算公式

$$\frac{dp_{\text{m}}}{dt} = \frac{RT_{\text{m}}}{V_{\text{m}}} (W_{\text{ca,out}} - W_{\text{m,out}}) \quad (19)$$

式中: T_{m} 为进堆气体温度; V_{m} 为出堆管路体积; $W_{\text{ca,out}}$ 为电堆阴极出口空气流量; $W_{\text{m,out}}$ 为出堆管路出口空气流量.

1.7 电堆电压模型

PEMFC 电堆的输出电压 E_{st} 可由以下方程表示:

$$E_{\text{st}} = n_{\text{cell}} (E_{\text{ocv}} + \eta^{\text{C}} - \eta_{\text{ohm}}) \quad (20)$$

式中: n_{cell} 为电堆片数; E_{ocv} 为电池开路电压; η_{ohm} 为电池欧姆损失。

2 结果分析与讨论

在 Matlab/Simulink 环境下实现了改进后的 PEMFC 系统模型,并利用 ode23s 求解器进行了仿真计算. 仿真条件如下:电堆温度设为恒温 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,电堆阴阳极入口气体相对湿度为 80% ,阴阳极入口气体温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,质子交换膜阴阳极两侧水含量初始值为 7.2 ,采用开环前馈控制调节空压机的空气流量. 以图 3 所示的需求工况电流为输入,改进后的 PEMFC 系统模型电压输出值与实际系统的电压输出值的对比结果如图 4 所示. 改进后的 PEMFC 系统模型的输出电压误差小于 3% ,电堆输出电压的仿真值在电流发生阶跃时的动态响应与实验值的动态变化趋势一致,表明所建立的 PEMFC 系统模型具有较高的准确性和适用性,能够用于分析和验证电堆电流和电堆温度对电堆膜中水含量的影响。

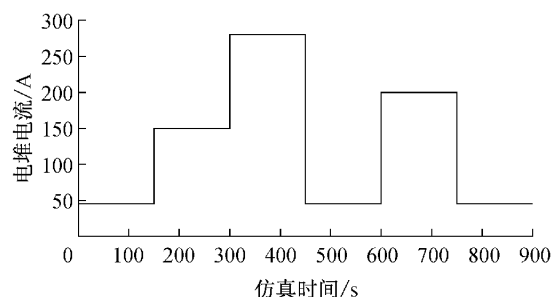


图3 需求工况电流

Fig.3 Load cycle of required current

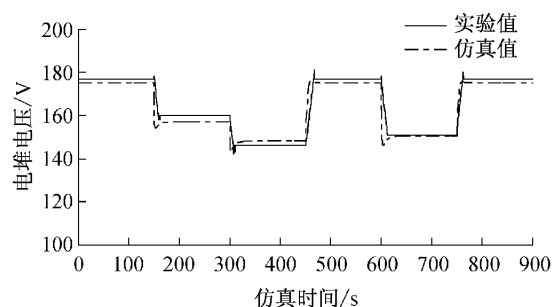


图4 电池电压输出的实验值和仿真值

Fig.4 Comparison of output voltage between simulation and experiment

Romero 等^[15]和 Benziger 等^[16]利用实验手段研究膜中水含量的动态变化,发现膜中水含量响应时间约为 50 s . 图 5 为改进模型计算得到的膜中水含量阶跃响应过程,其响应时间也约为 50 s . 因此,改

进模型表征的膜中水含量动态过程与文献[15-16]的实验结果基本一致。

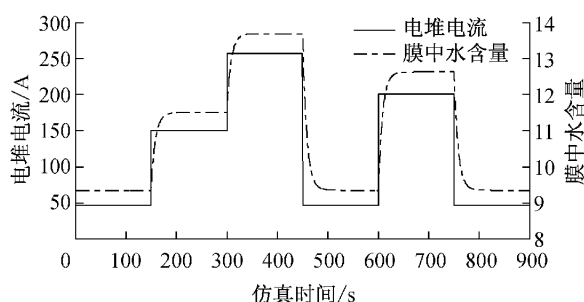


图5 膜中水含量随电堆电流的动态变化

Fig.5 Membrane water content at load cycle

图 6 是改进模型计算得到的膜中水含量与电堆电流的静态特性. 由图 6 可知,质子交换膜中的水含量随着电堆电流增大而升高. 增大电堆电流可以提高电化学反应速度,使阴极生成的水分增加,在电堆其他操作条件变化不大的情况下,导致膜中水含量增加. 这一仿真结果与文献[13]中的实验结果相同. 通过以上分析可知,所建立的 PEMFC 模型能够正确反映膜中水含量的动态响应,并准确反映了膜中水含量与电堆电流之间的关系。

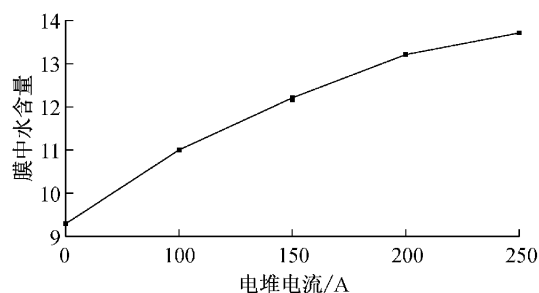


图6 膜中水含量与电堆电流的静态特性

Fig.6 Static characteristic between stack current and membrane water content

如图 7 所示,当电堆温度发生变化时,电堆膜中水含量动态响应与图 5 基本一致. 图 8 的仿真结果表明,随着电堆温度的升高,膜中水含量的动态响应稍有加快. 这是由于随着电堆温度的提高,电堆电化学反应加快,电堆阴极侧生成水的速率加快,质子交换膜中的水含量可以更快达到平衡. 由图 9 可知,电堆温度升高,使电堆阴阳极两侧的气体相对湿度降低,导致质子交换膜中的水含量相应降低. 这一仿真结果与文献[13]中的实验结果相同. 通过以上仿真分析可知,所建立的 PEMFC 系统模型可以用来分析膜中水含量与电堆温度之间的关系。

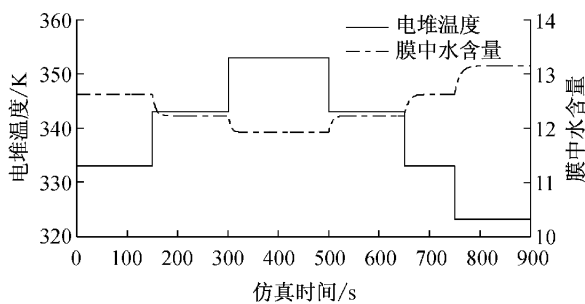


图7 膜中水含量随电堆温度的动态变化

Fig.7 Membrane water content at stack temperature

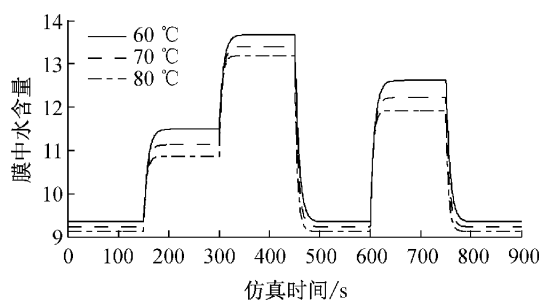


图8 不同电堆温度情况下膜中水含量随电堆电流的动态变化

Fig.8 Membrane water content at load cycle at different stack temperatures

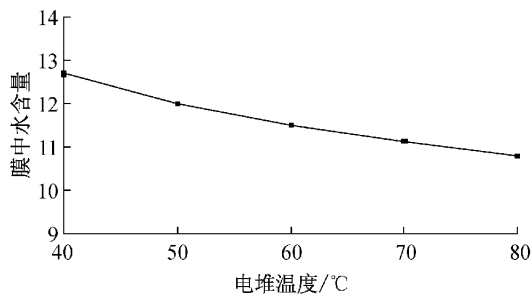


图9 膜中水含量与电堆温度的静态特性

Fig.9 Static characteristic between stack temperature and membrane water content

3 结论

针对已有 PEMFC 系统模型的不足,在改进的 PEMFC 系统模型中添加 GDL 模型和 MEA 动态模型.通过仿真分析可以得出如下结论:

(1) 改进的 PEMFC 系统模型得到的膜中水含量随电堆电流和电堆温度变化的动态特性更接近实际情况.

(2) 膜中水含量随着电堆电流的提高而升高.在大电流情况下,为了使电堆尽量不出现水淹的情况,可以适当降低电堆阴极入口气体的相对湿度.

(3) 膜中水含量随着电堆温度的提高而降低.

在电堆运行温度较高时,可以通过提高电堆阴极入口气体的相对湿度来提高膜中水含量,从而改善电堆性能.

以上结论表明,改进的 PEMFC 系统模型具有较高的准确性和适用性,能够反映外部操作条件变化对电池内部电化学反应和物料传递过程的影响,膜中水含量和输出性能的动态响应过程更加接近实际,相关信息可用于间接控制膜中水含量和优化系统.

参考文献:

- [1] 周苏,纪光霁,马天才,等.车用质子交换膜燃料电池系统技术现状[J].汽车工程,2009,31(6):489.
ZHOU Su, JI Guangji, MA Tiancai, *et al.* The state of the art of PEMFC for automotive application [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(6):489.
- [2] Janssen G J M, Overvelde M L J. Water transport in the proton-exchange-membrane fuel cell: measurements of the effective drag coefficient[J]. Journal of Power Sources, 2001, 101(1):117.
- [3] Springer T E, Zawodzinski T A, Gottesfeld S. Polymer electrolyte fuel cell model[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1991, 138(8):2334.
- [4] Okada T, Xie G, Gorseth O, *et al.* Ion and water transport characteristics of nafion membranes as electrolytes [J]. Electrochimica Acta, 1998, 43(24):3741.
- [5] Chen F, Su Y, Soong C, *et al.* Transient behavior of water transport in the membrane of a PEM fuel cell[J]. Journal of the Electrochemical Chemistry, 2004, 566(1):85.
- [6] 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.
- [7] Zhou S. H₂ fuel cell stack performance studies based on a dynamical model [J]. Journal of Qingdao University, 2004, 19(1):78.
- [8] 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, 2010, 25(1):1.
- [9] 高昆鹏,章桐,黄晨东,等.45 kW 质子交换膜燃料电池发动机建模与仿真[J].同济大学学报:自然科学版,2013,41(2):264.
GAO Kunpeng, ZHANG Tong, HUANG Chendong, *et al.* Modeling and simulation of a 45 kW proton exchange membrane fuel cell engine [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(2):264.
- [10] 何海婷,贾力,张竹茜.质子交换膜燃料电池动态特性仿真[J].工程热物理学报,2009,30(7):1119.
HE Haiting, JIA Li, ZHANG Zhuqian. Modeling and simulation of PEM fuel cell dynamic behaviors [J]. Journal of Engineering

- Thermophysics, 2009, 30(7):1119.
- [11] 张竹茜,贾力. 质子交换膜燃料电池动态特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(8):1399.
ZHANG Zhuqian, JIA Li. Experimental study of PEM fuel cell dynamic behaviors [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(8):1399.
- [12] 贺建军,孙超. 质子交换膜燃料电池的建模与仿真分析[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.
- [13] 孙红,栾丽华,吴铁军,等. 质子交换膜中的传质分析[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(2):255.
SUN Hong, LUAN Lihua, WU Tiejun, *et al.* Mass transfer in proton exchange membrane [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(2):255.
- [14] 何广利,丁信伟,由宏新,等. 常规流场下各向异性扩散层对质子交换膜燃料电池(PEMFC)性能影响[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(6):818.
HE Guangli, DING Xinwei, YOU Hongxin, *et al.* The effect of anisotropic diffusion layer on the performance of PEMFC with conventional flow field [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2005, 19(6):818.
- [15] Romero C T, Merida W. Water transport through proton exchange membranes [J]. Advanced in Materials Research, 2007, 15-17: 310.
- [16] Benziger J, Chia E, Kamas E, *et al.* The stirred tank reactor polymer electrolyte membrane fuel cell [J]. AIChE Journal, 2004, 50(8): 1889.

~~~~~

(上接第 858 页)

- [16] 胡晓峰,周孝清,卜增文. 基于室外风环境 CFD 模拟的建筑规划设计[J]. 建筑与结构设计, 2007(4):14.  
HU Xiaofeng, ZHOU Xiaoqing, BU Zengwen. Architecture layout based on CFD simulation of wind environment outdoor [J]. Architectural and Structural Design, 2007(4):14.
- [17] 杨建坤,张旭,刘东,等. 自然通风作用下中庭建筑热环境的数值模拟[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 26.  
YANG Jiankun, ZHANG Xu, LIU Dong, *et al.* Numerical simulation of thermal environment in atrium buildings with natural ventilation[J]. Journal of Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2005, 35(5): 26.
- [18] Min Jianqing, Xu Zibin. Multi-ventilation indoor temperature field and air quality numerical analysis[J]. Fluid Machinery, 2006(12): 29.
- [19] 张庆费,郑思俊,夏榴,等. 上海城市绿地植物群落降噪功能及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2295.  
ZHANG Qingfei, ZHENG Sijun, XIA Lei, *et al.* Noise-reduction function and its affecting factors of urban plant communities in Shanghai [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(10): 2295.
- [20] 李涛,韦佳. 论建筑设计中的自然通风[J]. 工业建筑, 2006 (S1): 97.  
LI Tao, WEI Jia. Natural ventilation in architectural design [J]. Industrial Construction, 2006 (S1): 97.
- [21] 王伟. 模拟分析学生宿舍自然通风下不同楼层的室内环境[J]. 工程建设与设计, 2013 (2): 83.  
WANG Wei. Simulation and analysis of the dormitory indoor environment of different floors under natural ventilation[J]. Construction & Design for Project, 2013 (2): 83.
- [22] 梁传志,冯国会,徐硕,等. 单体建筑高度对风压作用下自然通风的影响[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2007, 23(4): 625.  
LIANG Chuanzhi, FENG Guohui, XU Shuo, *et al.* Research into impact of buildings of different height on wind-induced natural ventilation [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2007, 23(4):625.
- [23] 李炜. 围合式布局设计探索[J]. 南方建筑, 2003(3):37.  
LI Wei. Closed layout design exploration [J]. South Architecture, 2003(3):37.
- [24] 李先庭,杨建荣,王欣. 室内空气品质研究现状与发展[J]. 暖通空调, 2000, 30(3):36.  
LI Xianting, YANG Jianrong, WANG Xin. Status and development of indoor air quality research [J]. Journal of Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2000, 30(3):36.
- [25] Molhave L. The sick buildings and other buildings with indoor climate problems [J]. Environment International, 1989, 15 (1): 65.