

# 质子交换膜燃料电池建模与控制研究进展

CRISALLE Oscar Dardo, 韩 闯, 吴莉莉, 支长义

( 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001 )

**摘 要:** 针对质子交换膜燃料电池的建模与控制问题, 概述了基于极化曲线和参数维度的经验模型和机理模型, 分析了基于电化学反应、温度、压力等因素的电化学稳态模型和动态模型, 介绍了基于神经网络辨识、群集智能算法和支持向量机等智能方法模型, 对质子交换膜燃料电池的现有智能控制策略进行了总结, 最后指出: 利用群集智能算法同时优化质子交换膜燃料电池的模型参数和环境参数将是建模的一个发展方向, 预测广义 Hamilton 理论等也可被尝试用于质子交换膜燃料电池建模的研究中, 同时融合新算法的智能控制策略将成为质子交换膜燃料电池控制的研究趋势。

**关键词:** 质子交换膜燃料电池; 建模; 智能控制

**中图分类号:** TP29; TM911.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.06.012

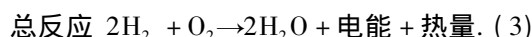
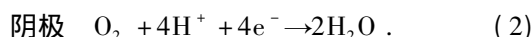
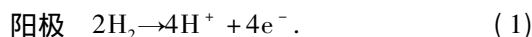
## 0 引言

近年来, 新的清洁能源逐渐引起人们的重视。质子交换膜燃料电池因工作温度低、启动快、结构简单、无污染等优点, 被尝试应用于混合动力汽车、可移动动力设备、混合能源系统和分布式发电系统中, 应用前景广阔, 研究意义重大<sup>[1]</sup>。笔者主要探究质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 在建模和控制方面的研究进展, 介绍了 PEMFC 的基本原理、组成结构和相关特性; 综述了 PEMFC 建模和控制策略, 包含经验模型、机理模型、稳态模型、动态模型和智能方法模型以及智能控制和组合控制策略; 分析了各种思路、方法和技术的特点, 展望了 PEMFC 建模与控制的研究趋势和发展方向。

## 1 PEMFC 简介

PEMFC 由质子交换膜、电极、电催化剂、双极板、流场通道等构件组成。PEMFC 具有阴极和阳极两个电极, 分别为氧化剂和燃料的临时寄存场所, 氢气由燃料电池的阳极流道进入, 在催化剂作用下发生反应, 生成氢离子和电子, 氢离子经由质子交换膜到达阴极, 电子经过外电路流向阴极, 然

后和阴极的氧气和氢离子发生反应生成水。电极反应方程式如下<sup>[2]</sup>:



温度和反应气体的压力是影响 PEMFC 性能的最主要因素。正是由于温度和压力对电池性能影响较大, PEMFC 的建模方法才扩展至考虑温度影响的热模型和考虑阴极阳极压力的动态模型; 同时, 反应气体的湿度、燃料利用率、电流密度等对 PEMFC 的性能也有一定影响。

## 2 PEMFC 模型

### 2.1 经验模型

对于 PEMFC 的建模, 最早是从基于电池电压和电流密度极化曲线的 PEMFC 经验模型研究开始的。刘鹤<sup>[2]</sup>在前人关于中小电流密度和大电流密度极化曲线的基础上对 PEMFC 的经验模型做了改进, 并用 SIMULINK 仿真验证了改进的经验模型能够较好地反应 PEMFC 电流密度和电压的关系。而经验模型是基于电池电压和电流密度极化曲线建立的, 未对燃料电池内部的具体参数进行分析, 所以经验模型不适合具体分析燃料电

收稿日期: 2015-05-30; 修订日期: 2015-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61473266)

作者简介: CRISALLE Oscar Dardo (1958—), 男, 美国盖恩斯维尔人, 郑州大学特聘教授, 博士, 博士生导师, 主要从事燃料电池的设计与优化运行等研究。

通信作者: 韩闯 (1991—), 男, 河南驻马店人, 郑州大学硕士研究生, E-mail: zdhhan@126.com.

池的模型.

## 2.2 机理模型

为了反映 PEMFC 的内部特性、传递现象,研究者提出基于空间维数变量划分的一维、二维、三维分布参数机理模型.

一维数学模型结构简单、建模方便,但由于维数限制只能模拟简单的电池结构,因此不能揭示 PEMFC 内部结构本质.其中,Kulikovsky<sup>[3]</sup>考虑水热和蒸汽传输等物理化学过程建立了一维稳态模型.二维模型则在一维模型的基础上考虑电池内部的水热管理问题.基于此模型考虑不同的条件对电池性能的影响,Lei 等<sup>[4]</sup>和 Chaudhary 等<sup>[5]</sup>建立了 PEMFC 的二维模型,探究基于此模型膜的含水量和温度对电池性能的影响.之后,随着大规模燃料电池的逐渐使用,研究者开始关注以气体流道和流体分布为基础的 PEMFC 三维模型.郭玉宝等<sup>[6]</sup>提出了 PEMFC 的三维稳态数值模型,主要是基于其物理模型和控制方程来探究不同的扩散层孔隙率对其出口处含水量、电流密度、气体浓度等的影响.

## 2.3 电化学稳态模型

电化学稳态模型是 PEMFC 建模中最常见的模型,常用于探究电流密度、阴极阳极压力、温度、膜的含水量等对输出电压稳态性能的影响.模型是基于电化学理论计算出总电压和每部分的过电压建立的,公式为<sup>[7-8]</sup>

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{con}} \quad (4)$$

式中:  $E_{\text{nernst}}$  为能斯特电动势;  $\eta_{\text{act}}$  是活化过电压;  $\eta_{\text{ohm}}$  是欧姆过电压;  $\eta_{\text{con}}$  是浓差过电压.

Bizon 等<sup>[7]</sup>、Zhan 等<sup>[8]</sup>都建立了含 PEMFC 的混合能源系统模型,其中 PEMFC 的稳态模型是基于公式(4)建立,并对系统的能量管理进行了控制.燃料电池因自身特性常被应用于混合能源发电或分布式能源发电.电化学稳态模型是 PEMFC 最常用的建模方法之一,其建模方法简单且易于对燃料电池进行性能分析.但在实际的反应过程中,燃料电池内部的环境温度、阴极阳极气体流量和负载等都是动态变化的,所以有必要进一步探究其动态模型.

## 2.4 动态模型

根据 PEMFC 的性能影响因素可知,温度和反应气体压力的变化对于 PEMFC 的性能有较大的影响;所以,建立基于阳极、阴极气体流道压力和基于温度的热模型对研究 PEMFC 的动态性能具有重要的意义.

### 2.4.1 电化学动态模型

上述研究中电化学稳态模型并未考虑燃料电池状态变化的过程性,而实际反应过程中外电路负载或系统输入发生变化时,PEMFC 的两极分别聚集通过薄膜流入的氢离子和未通过薄膜暂时不能通过外电路的电子,就形成了双层电荷效应,这种特性和电容十分类似.基于这个过程建立电化学动态模型的特性方程为<sup>[9]</sup>

$$\frac{dV_{\text{act}}}{dt} = \frac{i}{c} - \frac{V_{\text{act}}}{R_{\text{act}}C} \quad (5)$$

式中:  $R_{\text{act}}$  为活化电阻.

贺建军等<sup>[9]</sup>分析了 PEMFC 中电化学反应中的活化极化过电压、欧姆极化过电压、浓度极化过电压和双层电荷作用,建立了输入为阴极阳极的流量和温度、输出为电压的动态模型,用仿真结果和实际结果进行对比.结果表明:该模型更好地描述了电池内部的反应过程,建模效果更好,具有较好的使用价值,为进一步研究 PEMFC 控制器设计、分布式发电、混合能源等问题奠定了基础.

### 2.4.2 阳极、阴极气体流道模型

根据理想气体状态方程和质量守恒定律,对 PEMFC 的阳极气体氢气和阴极气体氧气列出对应方程分别为<sup>[10]</sup>

$$\frac{V_{\text{H}_2}}{RT} \cdot \frac{dP_{\text{H}_2}}{dt} = q_{\text{H}_2}^{\text{in}} - q_{\text{H}_2}^{\text{out}} - q_{\text{H}_2}^{\text{r}} \quad (6)$$

$$\frac{V_{\text{O}_2}}{RT} \cdot \frac{dP_{\text{O}_2}}{dt} = q_{\text{O}_2}^{\text{in}} - q_{\text{O}_2}^{\text{out}} - q_{\text{O}_2}^{\text{r}} \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{H}_2}$  和  $P_{\text{O}_2}$  分别代表氢气和氧气的压力;  $q_{\text{H}_2}^{\text{in}}$  和  $q_{\text{O}_2}^{\text{in}}$  分别代表氢气和氧气的输入流量;  $q_{\text{H}_2}^{\text{out}}$  和  $q_{\text{O}_2}^{\text{out}}$  分别代表氢气和氧气的输出流量;  $q_{\text{H}_2}^{\text{r}}$  和  $q_{\text{O}_2}^{\text{r}}$  分别代表氢气和氧气反应消耗的气体流量.

在 PEMFC 反应内部,阳极和阴极的气体流量与压力总是动态变化的,通过建立气体流道模型可以更好地反应 PEMFC 内部气体的流动行为. Yang 等<sup>[10]</sup>详细分析了 PEMFC 的动态模型,分别计算了阴极阳极的输入输出以及反应消耗的流量,并用 MATLAB 进行了仿真,最后探究了含 PEMFC 并网系统的低电压和故障穿越问题.

### 2.4.3 热模型

温度是影响 PEMFC 性能的重要参数,过高的温度可能熔化或者烧坏质子交换膜;同样,温度过低化学反应速度变慢,催化剂效率变低,扩散层效率降低.所以,基于温度建立热模型对于保持 PEMFC 工作在最优状态十分重要.根据能量守恒定律可得<sup>[11]</sup>

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{elec}} - W_{\text{stack}} - W_{\text{loss}} - W_{\text{cool}} \quad (8)$$

式中:  $W_{\text{tot}}$  是 PEMFC 释放的总能量;  $W_{\text{elec}}$  是输出的电能;  $W_{\text{stack}}$  是存储在电池内部的能量;  $W_{\text{loss}}$  是散失在空气中的能量;  $W_{\text{cool}}$  是冷却系统吸收的能量。

基于温度的角度建立 PEMFC 的热模型在整个 PEMFC 的建模中较为常见, 建模的依据是能量守恒定律, 实时动态更新系统的温度传递给相关的其他 PEMFC 系统子模型, 实现在线实时动态调整, 提高了系统建模的可靠性。郭爱等<sup>[11]</sup> 用 PEMFC 为机车提供动力源, 建立了燃料电池机车温度系统的动态模型, 考虑了散热器风量和管路压力, 利用热力学第一定律, 建立了温度系统状态方程。

### 2.5 智能方法模型

随着智能控制理论的发展, 智能方法逐渐被应用到 PEMFC 的建模中。基于神经网络、智能优化算法、支持向量机等策略的 PEMFC 模型较好地描述了 PEMFC 各变量之间的关系, 且模型中的未知参数易于辨识。

神经网络模型被称为黑箱模型, 将其应用于燃料电池的建模中能够精确描述 PEMFC 各变量之间的复杂关系, 易于实施控制算法。Puranik 等<sup>[12]</sup> 建立了基于二层递归神经网络的 PEMFC 模型, 其中输入为温度、电流、阴极阳极压力, 输出为电压, 并进一步研究了这种模型下燃料电池的稳态性能、暂态性能和基于噪声的鲁棒性。李大宇等<sup>[13]</sup> 提出了一种新的引导型粒子群算法, 并将其应用到 PEMFC 的建模中, 比较了混合神经网络算法、级联相关神经网络算法、级联相关-引导型粒子群算法的预测误差和相对误差, 发现混合神经网络误差最小, 对 PEMFC 输出电压的预测最精确。

智能优化算法的应用越来越广泛, 使用智能优化算法可以优化 PEMFC 中的模型参数和环境参数等, 基于此可以建立更加精准的 PEMFC 模型。Cheng 等<sup>[14]</sup>、Zhang 等<sup>[15]</sup> 分别使用自适应差分进化算法和 RNA 遗传算法对 PEMFC 模型中的模型参数进行了优化, 结果表明两种算法均提高了 PEMFC 建模的准确性。

基于统计学习理论的支持向量机方法具有训练时间短、全局优化性能好、适应性强等优点, 也被广泛应用于 PEMFC 的建模中。Li 等<sup>[16]</sup> 利用改进的粒子群算法优化支持向量机模型, 结果表明: 优化后的 PEMFC 模型表现出更好的动态性能。

## 3 PEMFC 控制策略

PEMFC 的控制策略包含传统控制、智能控制、组合控制等, 被控变量包含气体流量、压力、温度、输出电压、输出功率、效率等。由于 PEMFC 是非线性、时变、多输入多输出的复杂控制对象, 传统 PID 控制不能很好地解决复杂控制对象的控制问题, 所以智能控制策略被逐渐广泛应用。

### 3.1 PEMFC 的预测控制

PEMFC 预测控制是根据电池模型的历史信息和未来输入来预测未来输出, 通过反馈校正调整预测模型和控制器的参数达到提高系统稳态性能和动态性能的控制目标, 预测控制的实时跟踪保证了其控制的精准性。于亚笛等<sup>[17]</sup> 将广义预测控制 (GPC) 应用于基于模糊神经网络辨识的 PEMFC 模型中, 并与其他控制策略比较, 结果表明: 预测控制在跟踪负荷上优于其他控制器, 但预测控制的快速性和鲁棒性相对较差。

### 3.2 PEMFC 的模糊控制

PEMFC 模糊控制是在燃料电池模糊模型的基础上, 通过建立模糊规则库并设计模糊控制器实现模糊推理来完成的, 模糊控制整体表现出较好的控制效果, 但模糊化主要靠经验获得具有不确定性, 且稳态精度不高。Fan 等<sup>[18]</sup> 将自适应模糊控制器应用于 PEMFC 的动态模型中, 利用双模糊控制器来稳定负载变化, 自适应模糊控制器反应迅速, 表现出较强的鲁棒性。

### 3.3 PEMFC 的神经网络控制

PEMFC 神经网络控制通过选择合适的结构和算法, 经过训练和学习使被控系统达到所要求的稳态和动态性能, 且有较强的自学习能力。鉴于 PEMFC 模型的非线性和不确定性, 越来越多的学者利用神经网络控制燃料电池。杨忠君等<sup>[19]</sup> 研究了基于 PEMFC 数学模型的神经网络控制器设计问题, 通过调节输入气体的流量控制 PEMFC 输出功率的稳定。仿真结果表明: 对于负载的突变, 神经网络控制器能够平滑过渡到恒定功率, 表现出较强的学习能力和鲁棒性。

### 3.4 PEMFC 的组合控制

组合控制是指将传统控制和智能控制中的模糊控制、神经网络控制等相互结合形成的具有更强控制功能的新策略, 也可以是智能控制方法之间的结合。

#### 3.4.1 PEMFC 的模糊 PID 控制

PEMFC 的模糊 PID 控制是利用模糊控制策

略整定燃料电池 PID 控制器的比例系数、积分时间常数和微分时间常数,来获得最佳的 PID 控制效果。这种控制策略在提高系统的实时性、稳态性能等方面优于传统 PID 控制,适用于 PEMFC 这种复杂非线性系统的控制。Marzooghi 等<sup>[20]</sup>设计了含有功率转换装置的 PEMFC 模糊 PI 控制系统和固体氧化物燃料电池的模糊 PI 控制系统来减弱输出功率的波动,并与传统 PI 控制器进行对比,结果表明:模糊 PI 控制器表现出更好的动态性能。

### 3.4.2 PEMFC 的神经网络 PID 控制

PEMFC 的神经网络 PID 控制是利用神经网络的学习方法自动在线调节电池的 PID 控制器参数,相比传统的 PID 控制,大大提高了系统的可靠性。卫国爱等<sup>[21]</sup>使用 RBF 神经网络来整定 PID 控制器参数,同时对 PEMFC 的压力进行控制。结果表明:基于 RBF 神经网络的 PID 控制器响应时间快,具有更好的动态性能。

### 3.4.3 PEMFC 的模糊神经网络控制

PEMFC 的模糊神经网络控制采用神经网络对模糊规则和隶属度函数进行调整,通过反复调整达到更优的控制目标。模糊神经网络同时兼有神经网络和模糊控制逻辑的优点,特别适用于 PEMFC 这种时变性、大滞后、不确定的对象。吴昆<sup>[22]</sup>利用模糊神经网络控制系统实现对 PEMFC 温度的控制,结果表明:该控制系统具有良好的鲁棒性、动态特性和抗干扰能力。

## 4 总结与展望

PEMFC 的建模从最初的基于经验模型逐渐发展为基于参数维度的一维、二维、三维模型;而后,又从电化学反应的角度建立了稳态模型和基于温度压力的动态模型;最后,随着智能算法的普遍应用,基于智能方法的模型被广泛应用于燃料电池的研究中。从发展趋势的角度看,由于 PEMFC 模型的温度、压力等内部因素的实时变化,动态模型更能反映其内部特点。在对模型内部不确定参数进行辨识时,群集智能优化算法具有显著的效果,如采用群集智能算法优化 PEMFC 相关的模型参数和环境参数,建立更加精确的模型。考虑到 PEMFC 电化学反应的复杂性,基于黑箱的神经网络模型将是 PEMFC 建模的另一发展趋势。再者,随着预测理论的逐渐应用,可考虑利用经验模态分解、回声状态网络等方法建立 PEMFC 的预测模型,实时预测燃料电池的输出信息。除此

之外,一些新的控制理论和优化方法也可以应用到 PEMFC 的建模中,如考虑到 PEMFC 是能量耗散型对象,可建立基于广义 Hamilton 理论的 PEMFC 模型,这些也将是笔者后期的研究方向。

PEMEC 模型本身的不确定性、环境参数的复杂性使 PEMFC 系统的数学模型不够完善,因此,基于精确模型的传统控制策略不能实现对 PEMFC 的有效控制。基于智能控制策略的强学习能力和强鲁棒性特点,智能控制策略能实现对 PEMFC 系统负载和外部参数变化的跟踪控制;同时,融合了智能控制和传统控制的组合控制将成为 PEMFC 控制的另一研究方向。最后,笔者认为,从 PEMFC 输入和输出需求之间的矛盾来研究其多目标控制问题,应用智能控制策略和智能算法实现 PEMFC 燃料消耗最少能量利用率最高,也将成为 PEMFC 控制新的研究趋势。

## 参考文献:

- [1] 刘春娜. 燃料电池技术最新进展[J]. 电源技术, 2015, 39(3): 445-446.
- [2] 刘鹤. 质子交换膜燃料电池的建模与仿真[D]. 北京: 华北电力大学控制与计算机工程学院, 2012.
- [3] KULIKOVSKY A A. One-dimensional impedance of the cathode side of a pem fuel cell: exact analytical solution[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 126(3): 217-222.
- [4] LEI Xing, MAMLOUK M, SCOTT K. A two dimensional agglomerate model for a proton exchange membrane fuel cell[J]. Energy, 2013, 61: 196-210.
- [5] CHAUDHARY S, SACHAN V K, BHATTACHARYA P K. Two dimensional modeling of water uptake in proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(31): 17802-17818.
- [6] 郭玉宝, 朱红, 魏永生, 等. 质子交换膜燃料电池三维稳态数值模拟[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(2): 135-139.
- [7] BIZON N, OPROESCU M H, RACEANU M. Efficient energy control strategies for a standalone renewable/fuel cell hybrid power source[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 90: 93-110.
- [8] ZHAN Yuedong, GUO Youguang, ZHU Jianguo, et al. Power and energy management of grid/PEMFC/battery/supercapacitor hybrid power sources for UPS applications[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 67: 598-612.
- [9] 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 – 571.
- [10] YANG Yanxia ,LUO Xu ,DAI Chahua ,et al. Dynamic modeling and dynamic responses of grid-connected fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy , 2014 ,39( 26) : 14296 – 14305.
- [11] 郭爱 陈维荣 李奇 等. 燃料电池机车温度系统建模和控制 [J]. 系统仿真学报 ,2015 ,27( 1) : 133 – 141.
- [12] PURANIK S V ,KEYHANI A ,KHORRAMI F. Neural network modeling of proton exchange membrane fuel cell [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion , 2010 ,25( 2) : 474 – 483.
- [13] 李大字 ,刘方 ,勒其兵. 自增长混合神经网络及其在燃料电池建模中的应用 [J]. 化工学报 ,2015 ,66( 1) : 333 – 337.
- [14] CHENG Jixiang ,ZHANG Gexiang. Parameter fitting of PEMFC models based on adaptive differential evolution [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems ,2014 ,62: 189 – 198.
- [15] ZHANG Li ,WANG Ning. An adaptive RNA genetic algorithm for modeling of proton exchange membrane fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy ,2013 ,38: 219 – 228.
- [16] LI Qi ,CHEN Weirong ,LIU Zhixiang ,et al. Nonlinear multivariable modeling of locomotive proton exchange membrane fuel cell system [J]. International Journal of Hydrogen Energy ,2014 ,39( 25) : 13777 – 13786.
- [17] 于亚笛 李大字 勒其兵. 基于 Takagi – Sugeno 模型的质子交换膜燃料电池广义预测控制 [J]. 北京化工大学学报 ,2013 ,40( 3) : 104 – 108.
- [18] FAN Liping ,LI Chong ,SHI Xiaolin. Adaptive fuzzy control of a proton exchange membrane fuel cell [J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications ,2013 ,7( 1) : 41 – 49.
- [19] 杨忠君 樊立萍 宗学军 等. 质子交换膜燃料电池神经网络控制研究 [J]. 自动化仪表 ,2014 ,35( 5) : 63 – 68.
- [20] MARZOOGHI H ,RAOOFAT M. Improving the performance of proton exchange membrane and solid oxide fuel cells under voltage flicker using Fuzz-PI controller [J]. International Journal of Hydrogen Energy ,2012 ,37( 9) : 7796 – 7806.
- [21] 卫国爱 全书海 李发均 等. 基于 RBF-PID 的燃料电池空气压力控制 [J]. 武汉理工大学学报( 信息与管理工程版) ,2014 ,36( 5) : 618 – 621.
- [22] 吴昆. 质子交换膜燃料电池动态建模与控制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学自动化学院 ,2011.

## Review on Modeling and Control of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

CRISALLE Oscar Dardo , HAN Chuang , WU Lili , ZHI Changyi

( School of Electric Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China)

**Abstract:** This paper focuses on the modeling and control of Proton Exchange Membrane Fuel Cells ( PEMFC) . Empirical and mechanistic models based on polarization curves and parameter dimension are reviewed. Steady state and dynamic models , based on electrochemical reaction , temperature and pressure , among other variables , are analyzed. Intelligent models , which are based on neural-network identification , swarm-intelligence algorithm and support vector machine are introduced. The intelligent control strategies for PEMFC control are summarized. Finally , the swarm intelligence algorithm optimizing environment and model parameters of PEM-FC will be a research direction , and the new theory including prediction and Hamilton can be applied for modeling of PEMFC , meanwhile the intelligent control strategies for PEMFC based on the state-of-the-art algorithm will become a development trend.

**Key words:** PEMFC; modeling; intelligent control