质子交换膜燃料电池建模与控制的综述

文泽军[1,2]，闵凌云[3]，谢翌[1,3]，夏凌超[1]，张财志[1,3,4]

（1.重庆大学汽车工程学院，重庆400044；2.同济大学汽车学院，上海201804；3.重庆自主品牌汽车协同创新中心，重庆400044；4.重庆大学机械传动国家重点实验室，重庆400044）

摘要：概述了质子交换膜燃料电池系统的工作原理和组成，分析了基于机理的一维、二维、三维PEMFC模型和智能方法模型，介绍了包括模糊控制、自适应模糊控制、自适应模糊PID控制、预测控制和神经网络控制的国内外研究成果。最后得出融合了基于“黑箱”理论的建模方法和基于燃料电池内部复杂机理建模优点的复合模型是未来PEMFC建模的研究发展方向，将智能控制加入到传统控制策略中或者多种智能控制形成的组合控制策略来控制单电堆和多电堆是未来PEMFC控制的研究趋势。

近几年来，由于环境问题和能源危机，燃料电池成为了热点的研究方向。其中主要以氢气作为燃料的质子交换膜燃料电池（PEMFC）研究最多，因为其具有启动时间短、比功率高、平均寿命长和工作温度低等特点，且是汽车新型动力能源的一个重要发展方向[1-3]。本文首先对PEMFC系统的原理与组成进行了简单的介绍；然后主要概述了PEMFC建模与控制策略，并进行了各自特点的分析和比较；最后展望了质子交换膜燃料电池建模与控制策略的发展方向。

1 PEMFC系统简介

1.1基本原理

PEMFC的核心部件包括阳极，阴极，电解质，其中电解质用于隔离阳极的燃料与阴极的氧化剂，防止其直接接触。基本原理如图1所示，阳极持续通入氢气作为燃料，在催化剂的作用下发生氧化反应，生成氢离子和电子，氢离子经过电解质到达阴极准备与氧气结合生成水，而电子则通过外电路从阳极流到阴极[4]，氢气和氧气经过上面的电化学反应后，得到了电能而生成水和热[5]。

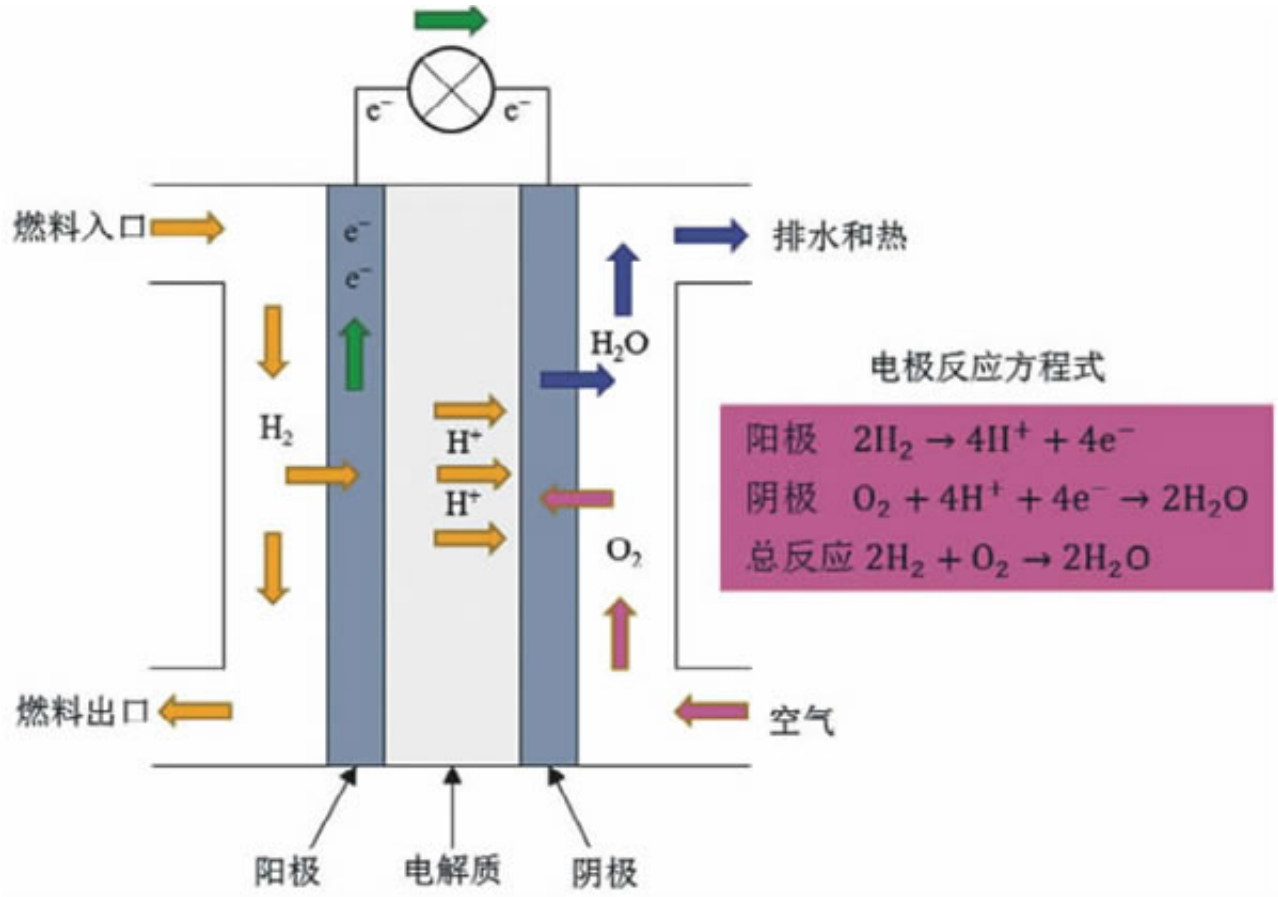

图 1　PEMFC 工作原理图

1.2系统组成

PEMFC系统是由许多子系统构成的复杂系统，各个子系统之间既独立又需要相互联系，为确保系统的稳定运行，必须保证每个子系统都正常工作。PEMFC的核心部分是燃料电池堆，它通常由多个燃料电池的单电池串联而成。为了维持燃料电池的正常工作，燃料电池系统还包括由控制单元、多种传感器和减压阀等组成的控制子系统和辅助子系统。图2所示为一个典型的PEMFC供电系统结构图，其中包含反应气体（氢气与氧气）的压力和流速控制系统、电堆的温度和湿度控制系统、气体排放及循环控制系统和电压变换等系统组成[6]。

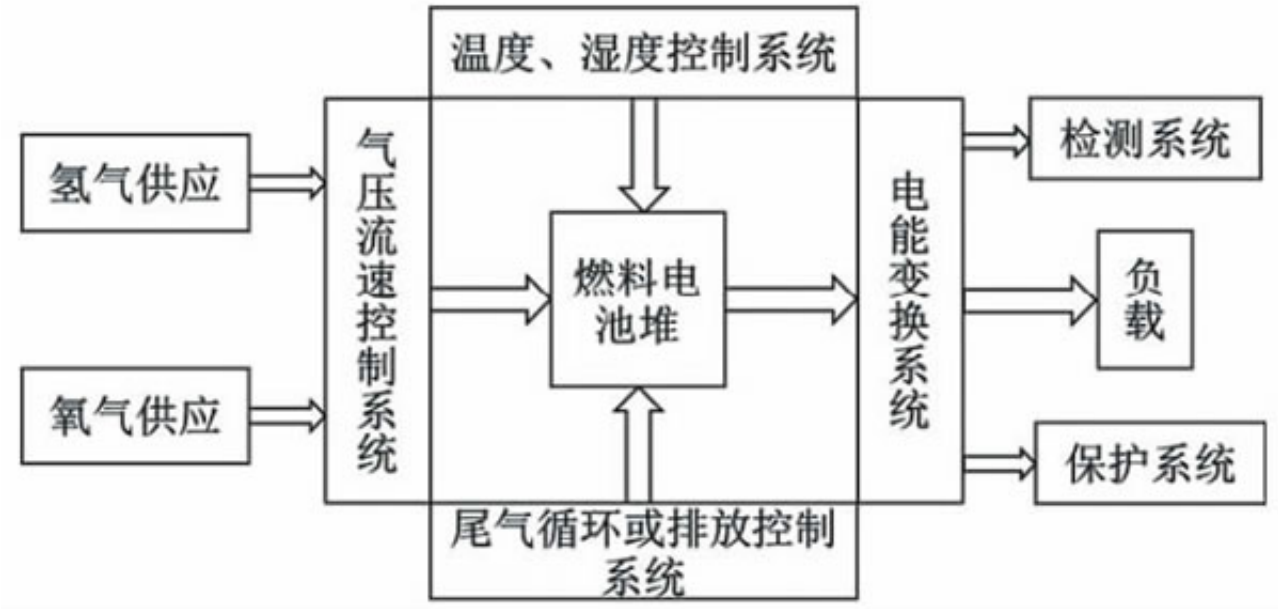

图 2　PEMFC 供电系统框图

2 PEMFC模型

2.1一维模型

一维模型比较简单，一般只考虑燃料电池阳极到阴极一个方向上的气体流动和质量变换，把反应过程看作仅在一条直线上进行，忽略了其他方向的参数变化，所以不能完全反映电池内部的动态变化。一维模型的常用建模理论是采用Ste-fan-Maxwell方程描述多组分的扩散传递；用Butler-Volmer方程描述电极反应的动力学；用Nerbst-Planck方程简化膜中质子的传输；用Schlogl方程描述水的传输[7-8]。J.J.Baschuk等[9]基于燃料电池工作机理建立一维等温输出模型，模型考虑了膜电极和催化层上的物理和电化学过程，分析了水淹现象对燃料电池性能的影响。Kulikovsky[10]考虑了热量传输水蒸气传输和电化学过程建立了一维稳态输出物理模型。邵庆龙等[11]建立了考虑温度的一维热传输动态模型，模型中首先假设PEMFC电堆的热量由电化学反应而生产的热量、加湿反应气体而引入的热量，而忽略了电池堆内阻的发热（因内阻较小），得到了在无冷却系统条件下负载电流和输入气体流量对电堆温度的影响。Bernardi和Verbrugge通过建立含水化PSA聚合物电解质膜、活跃的催化剂和气体扩散层的一维模型来研究阴极水对燃料电池正常工作的重要意义[12]。虽然一维模型与燃料电池实际工作情况可能存在较大的差别，但是可以减少计算量。

2.2二维模型

PEMFC的二维模型在一维模型的基础上，再考虑了垂直于气体流动方向的物理过程，也即研究的范围从直线上转变到了平面上，因此可以更好地描述燃料电池系统[13]。Nguyen等[14]建立了基于热和质量传递稳态二维PEMFC模型，该模型由膜两侧的通道组成，其中一个用于阳极，另一个用于阴极，并且考虑了水和气态反应物穿过膜和沿着流动通道的质量传输和从固相到气相的热流。Fuller等[15]建立了稳态的二维模型，并研究了燃料电池中的水热管理，并详细讨论了温度对燃料电池性能的影响。二维模型虽然比一维模型复杂，但是整个模型的求解量增加不是很大，然而其结果可以较好地反映燃料电池中的水热传递过程[13]。总之，二维模型可以很好地研究燃料电池中的多种问题。

2.3三维模型

三维的PEMFC模型将研究范围扩展到了三维空间中，不仅考虑了流道内的物质传递，还考虑了流道与扩散层的传质过程[4]。Dutta等[16]通过Navier-Stocks方程提出了一个平行通道的三维模型，对于不同的入口条件，研究了膜厚度，电池电压和水的流动方向对电流密度的影响，同时还通过分析横流平面中的速度分布来描述质量消耗行为。Khajeh-Hossei-ni-Dalasm等[17]
开发了PEMFC的三维瞬态两相等温模型，充分研究了液态水形成的时间变化和影响以及启动条件下的气相传输。模型是基于氧气，液态水和气态水均满足连续性方程，动量守恒方程，质量守恒方程推导得到，公式如下：

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t}+\nabla\cdot(\varepsilon\rho\vec{V})=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho\vec{V})}{\partial t}+\nabla\cdot(\varepsilon\rho\vec{V}\vec{V})=-\varepsilon\nabla P+\nabla\cdot(\varepsilon\mu\nabla\vec{V})-\frac{\varepsilon^2\mu}{K}\vec{V} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_1 s)}{\partial t}+\nabla\cdot(\varepsilon\rho_1\vec{V}_1)=\varepsilon\dot{m}_1 \tag{3}$$

式中：ε 为孔隙率；ρ 为两相混合物的密度；$\vec{V}$ 为混合物的速度矢量；P 为总压力；μ 为混合物的动力粘度；K 为混合物的绝对磁导率；ρ_1 为液体水的密度；s 为液体的饱和度；$\vec{V}_1$ 为液体水的速度矢量。

三维模型基本可以反映PEMFC的稳定工作性能且较为成熟，可以用于设计PEMFC的控制系统，缺点是计算量根据研究的对象不同可能增加很大。

2.4智能模型

人工智能方法来建立PEMFC的模型开始受到广泛关注。在PEMFC模型中存在许多的参数需要辨识，因此基于人工神经网络、支持向量机和智能优化算法的智能模型可以对模型中的参数进行较好的辨识。

人工神经网络模型是将质子交换膜燃料电池看作是一个黑箱，在经过大量数据的训练下，可以很好地反映输入量与输出量之间的关系，但是不知道电池内部的具体工作机制，所以无法分析其中一个具体参数对系统的影响。Paclisan等[18]建立了基于神经网络的PEMFC模型，可用于振动环境下的PEM-
FC系统，并对神经网络结构进行优化。结果显示神经网络结构的优化对于模型的精度非常重要。Da Costa Lopes等[19]在多电堆PEMFC系统中使用神经网络模型来预测每个电堆的状态，从而控制其在最大效率处工作。

机器学习中的支持向量机主要用于分类器的设计，它可以利用少量的样本信息获得较优的结果，所以也用于PEMF
C系统建模。Li等[20]
提出了基于SVR的非线性、多变量PEMFC模型，研究了工作条件对PEMFC系统性能的影响，还将EIA-
PSO算法用于调整模型的参数。

由于神经网络和支持向量机都只是研究系统输入和输出自己的关系，而不关心系统本身的规律，所以不能反映电池内部的工作原理，因此许多研究者又提出了基于智能优化算法进行参数辨识的燃料电池机理模型。其中模拟退火、粒子群、遗传算法等都有用于PEMFC模型的参数辨识。改变模型不仅可以具体分析电池内部的某个参数，还可以对系统进行优化。

3控制策略

PEMFC是一个强非线性、多耦合性、大滞后和有约束的多输入多输出时变系统，其中需要控制的变量有湿度、温度、流量、压力、负载等，所以它是一个非常复杂的控制系统。目前常用的控制策略包括模糊控制、自适应模糊控制、自适应模糊PID控制、预测控制、神经网络控制等。

3.1模糊控制

模糊控制以模糊数学的基本理论和思想为基础，模糊控制的运算过程如图3所示。模糊控制算法不依赖于完整数学模型，设计者需对系统有较清楚的了解，然后建立模糊规则来实现系统输入输出变量之间的复杂控制关系，从而使系统控制变得简单。因PEMFC是一个复杂系统而难于得到简单精确的模型，因此模糊控制器常常用于燃料电池控制系统中。

Abtahi等 [21]
设计了用于PEMFC系统水管理的模糊控制器。其输入的参数为压力、速率和温度，而燃料电池的功率密度作为控制参数。在设计控制器时，将压力和温度都分为五个等级，从而构建模糊控制规则表，初步实验结果证明该方法有效。

Adisorn等 [22]
提出了一种针对基于模糊控制的PEMFC氢气和氧气流速控制系统，比较了由仿真自动生成的流速和由模糊控制生成的流速得到的控制系统具有较好的性能，并指出电流输出必须与外部负载成比例变化才能满足需求，最后通过实验分析得到该控制器比手动控制性能更佳。

图 3　模糊控制框图

3.2自适应模糊控制

针对PEMFC系统物理参数的变化（如性能衰减），许多学者对模糊控制进行了改善，使得模糊规则库可以在控制的过程中不断修改优化，从而使得控制系统具有更强的学习能力和自适应能力，具有很好的稳定性和鲁棒性。Benchouia
NE等[23]
提出了管理氢气与氧气输入的自适应模糊控制。控制器通过调整输入气体的流量来达到燃料电池输出最大功率。最后，通过在噪声环境下进行仿真并与传统PID控制策略进行比较，结果显示自适应模糊控制比传统PID具有更好的鲁棒性。

3.3自适应模糊PID控制

自适应模糊控制有时会出现不好的震荡现象，而传统的PID控制又不适用于非线性的系统，因此把两者结合起来得到自适应模糊PID控制，通过模糊控制，对PID的三个参数进行在线修改，实现PID参数的自整定，原理如图4所示。

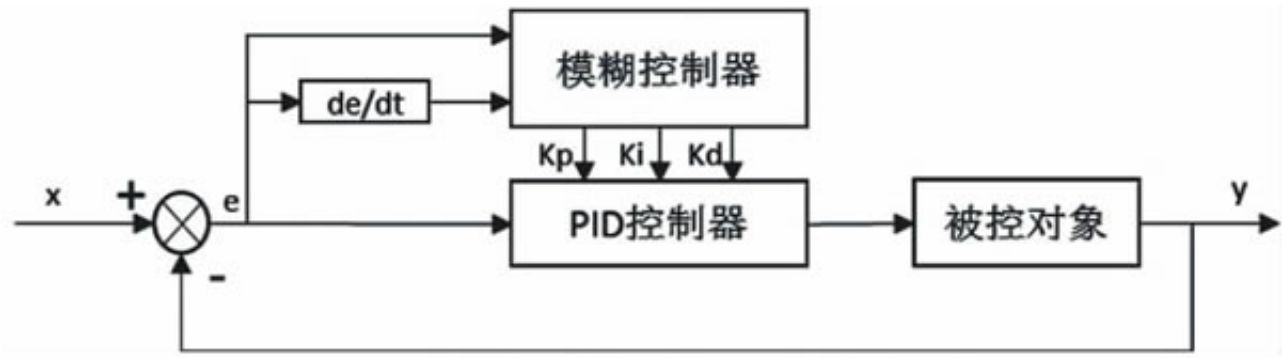

图 4　自适应模糊 PID 控制原理图

Hamed等[24]使用自适应差分演化算法建立了用于PEMFC进气系统的模糊PID控制，其中模糊控制器用于前馈控制和PID控制器作为反馈控制器，从而实现控制器参数的实时优化，并达到最大输出功率的跟随。最后，在各种干扰下进行仿真实验，得出自适应模糊PID控制方案优于其他对比方案。向金凤等[25]提出了一种针对燃料电池冷却系统的模糊PID复合控制系统，可以对PID的三个控制参数进行在线整定，从而对风扇进行优化控制，实验结果得出该控制系统具有超调量小、响应迅速、稳态精度高等优点，相比传统的PID控制器能够更好地适应PEMFC环境的复杂变化。

3.4预测控制

PEMFC预测控制是一种基于滚动优化和反馈校正的计算机优化控制算法，与传统PID控制不同，它不仅利用过去与当前的偏差值，而且还通过预测模型得到未来的偏差值，采用滚动优化来保证当前的最优控制策略可以使得未来的一段时间内偏差值e达到最小。Golbert等[26]提出的基于模型预测的PEMFC控制系统考虑了电流、电压、反应气体的温度和流速等因素，结果显示不能通过带有积分作用的线性控制器来稳定正常操作范围内的有效增益，但基于简化模型的非线性模型预测控制器却能使用优化控制来满足功率需求，最后仿真结果表明基于模型预测的控制比自适应控制器具有更好的性能和更强的鲁棒性。于亚笛等[27]在基于Takagi-Sugeno（T-S）算法建立的PEMFC模型基础上，开发了广义预测控制策略，对燃料电池的输出功率进行了较好的控制，并与基于ITAE指标的PID控制器和LQG控制器进行了比较，仿真实验说明在负载跟踪、鲁棒性和克服扰动方面具有较满意的控制性能。Ai Guo等[28]针对燃料电池热管理建立了基于状态空间的预测控制系统，该策略不仅可以在各种条件下准确追踪温度参考值，还可以降低风扇和冷却泵消耗的寄生功率。

3.5神经网络控制

神经网络控制是一种模拟人脑工作的控制策略，首先它需要确定合适的结构和算法，然后通过大量的实验数据训练系统，即不断地调整不同神经元之间的突触权重，使网络的真实输出与希望输出尽可能一致，最后获得一个自学习能力很强的控制系统。Hatti等[29]通过在神经网络的输出中引入延迟线设计了一个用于PEMFC系统的动态神经网络控制器，分析了控制的稳定性和跟踪误差，表明动态神经网络控制策略较优。Chemsi等[30]基于人工神经网络反向传播的PEMFC控制算法提出了用于普通居民使用的质子交换膜燃料电池的控制系统，它通过维持DC输出电压与参考电压基本一致，从而控制纹波系数在3.2%以下，交流电压的THD在低于3%。

4总结与展望

本文综述了质子交换膜燃料电池系统的建模和控制策略。在建模方面，综述了一维模型到三维模型的相关研究成果，以及引入智能算法的智能建模方法。从未来的发展方向来看，结合基于“黑箱”理论的建模方法和基于燃料电池内部复杂机理建模优点的复合模型可以对参数进行准确的识别，也便于控制的实现。在控制方面，仅仅利用一种传统的控制方法已经不能满足PEMFC系统的需求，将智能控制加入到传统控制策略中或者多种智能控制策略相结合形成的组合控制策略，如模糊PID、模糊神经网络等将是重要的研究方向。当前，PEMFC的建模和控制策略已有许多成熟的技术，但进一步保证单电堆和多电堆的功率稳定输出的条件下，尽量减少燃料消耗的稳定、最优、快速、鲁棒控制系统是未来的研究和发展趋势。

参考文献：

[1] LILE J R D, ZHOU S. Theoretical modeling of the PEMFC catalyst layer: A review of atomistic methods[J]. Electrochimica Acta, 2015, 177: 4-20

[2] 刘春娜. 燃料电池技术最新进展[J].电源技术,2015,39(3):445-446.

[3] XU L, FANG C, HU J, et al. Parameter extraction and uncertainty analysis of a proton exchange membrane fuel cell system based on Monte Carlo simulation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017,42(4):2309-2326.

[4] 黄际乐. 5 kW 质子交换膜燃料电池系统的建模与控制[D].南宁：广西大学，2012.

[5] 梁宝臣, 田建华. 质子交换膜燃料电池(PEMFC)的原理及应用[J]. 天津理工大学学报, 2001，3:21-24.

[6] 吴团结, 范永江, 李景. PEMFC 电源系统及应用前景[J]. 电气技术, 2009(8):140-144,159.

[7] 邵庆龙, 曹广义, 朱新坚. 质子交换膜燃料电池数学模型的现状与发展[J]. 电源技术, 2003(4):404-408.

[8] 徐洪峰. 质子交换膜燃料电池数学模型评述[J]. 电源技术, 1999 (1):35-38.

[9] BASCHUK J J, LI X. Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of water flooding [J]. Journal of Power Sources, 2000,86(1/2):181-196.

[10] KA 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.

[11] 邵庆龙, 曹广益, 朱新坚. 质子交换膜燃料电池电堆动态热传输模型[J]. 上海交通大学学报, 2004(8):1300-1303.

[12] BERNARDI D M, VERBRUGGE M W. Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte[J]. AIChE Journal, 1991,37(8):1151-1163.

[13] 王瑞敏. 基于神经网络辨识模型的质子交换膜燃料电池系统建模与控制研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2008.

[14] NGUYEN T V, WHITE R E. A water and heat management model for proton-exchange-membrane fuel cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993,140(8):2178-2186.

[15] FULLER T F, NEWMAN J. Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuel cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993,140(5):1218-1225.

[16] DUTTA S, SHIMPALEE S, VAN ZEE J W. Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2000,30(2):135-146.

[17] KHAJEH-HOSSEINI-DALASM N,FUSHINOBU K, OKAZAKI K. Three-dimensional transient two-phase study of the cathode side of

a PEM fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010,35(9):4234-4246.

[18] PACLISAN D, CHARON W. Real time modelling of the dynamic mechanical behaviour of PEMFC thanks to neural networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2013,26 (2):706-713.

[19] LOPES F D C, KELOUWANI S, BOULON L, et al. Neural network modeling strategy applied to a multi-stack PEM fuel cell system [C]//Proceedings of 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Dearborn, MI, USA:IEEE, 2016.

[20] LI Q, CHEN W, LIU Z, et al. Nonlinear multivariable modeling of locomotive proton exchange membrane fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(25):13777-13786.

[21] ABTAHI H, ALI Z, SAENGRUNG A. Water management of PEM fuel cells using fuzzy logic controller system [C]//Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2005:3486-3490.

[22] THOMYA A, KHUNATORN Y. Design of control system of hydrogen and oxygen flow rate for proton exchange membrane fuel cell using fuzzy logic controller [J].Energy Procedia,2011,9:186-197.

[23] BENCHOUIA N E, DERGHAL A, MAHMAH B, et al.An adaptive fuzzy logic controller (AFLC) for PEMFC fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015,40(39):13806-13819.

[24] BEIRAMI H, SHABESTARI A Z, ZERAFAT M M. Optimal PID plus fuzzy controller design for a PEM fuel cell air feed system using the self-adaptive differential evolution algorithm [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015,40(30):9422-9434.

[25] 向金凤, 全书海. 车用 25 kW 燃料电池冷却水系统 Fuzzy-PID 控制器的研究[J]. 华中师范大学学报:自然科学版, 2004(2):179-182.

[26] GOLBERT J, LEWIN D R. Model-based control of fuel cells: (1) Regulatory control [J]. Journal of Power Sources, 2004,135 (1/2): 135-151.

[27] 于亚笛, 李大字, 靳其兵. 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:自然科学版, 2013(3):104-108.

[28] GUO A, CHEN W, LIU Z, et al. Temperature model and predictive control for fuel cells in switcher locomotive [C]//Proceedings of 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu, China: IEEE, 2016.

[29] HATTI M, TIOURSI M. Dynamic neural network controller model of PEM fuel cell system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009,34(11):5015-5021.

[30] CHEMSI M, AGBOSSOU K, CARDENAS A. Neural network backpropagation algorithm control for PEM fuel cell in residential applications [C]//Proceedings of 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Ottawa, ON, Canada:IEEE, 2016.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/163594.html