

基于 ROLS 算法的 RBF 神经网络燃料电 池电特性建模

苗 青, 曹广益, 朱新坚

(上海交通大学 燃料电池研究所, 上海 200030)

摘 要:提出了一种基于 ROLS 算法的 RBF 神经网络辨识建立直接甲醇燃料电池(DMFC)电特性模型的新方法。以电池的工作温度为输入量, 电池的电压/电流密度为输出量, 利用 1200 组实验数据作为训练和测试样本, 建立了在不同工作温度下, 电池的电压/电流密度动态响应模型。仿真结果表明采用 RBF 神经网络辨识建模的方法是有效的, 建立的模型精度较高。

关 键 词:直接甲醇燃料电池; RBF 神经网络辨识;
ROLS 算法

中图分类号: TM911; TP183 文献标识码: A

1 引 言

直接甲醇燃料电池(DMFC)是一种将甲醇和氧气的化学能通过电极反应直接转换成电能的发电装置^[1]。

DMFC 的电特性主要由它的极化曲线描述, 即电池的输出电压和电流密度曲线。根据实验可知, 影响 DMFC 电特性的因素为: (1)各组成元件的材料、结构及其参数; (2)元件的加工和装配工艺; (3)电池的工作参数(气体的组分、湿度、流率、压力、电池温度和负载等); (4)电池的运行环境^[2~5]。自 20 世纪 80 年代起, 国内外的研究人员基于上述影响因素, 运用电化学、流体动力学以及物理学守恒定律等知识建立了一些比较完善的数学模型, 但是, 这些模型表达式复杂, 精度较低, 难以满足工程上对 DMFC 系统控制设计特别是实时控制的需要。

基于上述分析, 提出了以电池工作温度为输入量, DMFC 的电压/电流密度为输出量, 根据实验的输入输出数据用 RBF 神经网络辨识建立 DMFC 的电压/电流密度模型。

2 DMFC 的特性分析

根据对 DMFC 的动态特性的分析, DMFC 的电压/电流密度模型可描述为:

$$\begin{cases} E(t) = \Phi[E(t), I(t), T(t), C_{\text{CH}_3\text{OH}}, P_{\text{O}_2}] \\ I(t) = \Psi[E(t), I(t), T(t), C_{\text{CH}_3\text{OH}}, P_{\text{O}_2}] \\ T(t) = f[T(t), V_{\text{CH}_3\text{OH}}, V_{\text{O}_2}] \end{cases} \quad (1)$$

其中: $E(t)$ —电压矢量; $I(t)$ —电流密度矢量; $T(t)$ —温度变化矢量; $C_{\text{CH}_3\text{OH}}$ —阳极甲醇浓度; $V_{\text{CH}_3\text{OH}}$ —阳极甲醇的流速; V_{O_2} —阴极氧气的流速; P_{O_2} —阴极氧气压力。由实验可知, 燃料电池的工作温度主要是由阳极甲醇的流速和阴极氧气的流速进行控制, 电池系统的实际输入为 $C_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 、 $V_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 、 V_{O_2} 和 P_{O_2} , 但为了充分说明燃料电池工作温度对电池电压和电流密度的影响, 我们设神经网络模型的输入矢量为电池工作温度 $T(t)$, 输出矢量为电池电压 $E(t)$ 、电流密度 $I(t)$, 并使 $C_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 、 P_{O_2} 保持恒定。

模型辨识的要求: 在给定的不同工作温度下, 能够动态模拟出电池电压/电流密度的变化曲线, 即完成输入矢量到输出矢量的动态映射。辨识模型可用一个非线性差分方程来描述^[4~6]:

$$\begin{cases} E(k+1) = \Phi[E(k), I(k), T(k), C_{\text{CH}_3\text{OH}}, P_{\text{O}_2}] \\ I(k+1) = \Psi[E(k), I(k), T(k), C_{\text{CH}_3\text{OH}}, P_{\text{O}_2}] \\ T(k) = f[T(k), V_{\text{CH}_3\text{OH}}, V_{\text{O}_2}] \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2004-12-20; 修订日期: 2005-04-10

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2003AA517020)

作者简介: 苗 青(1975-), 男, 河北邯郸人, 上海交通大学博士研究生。

3 基于 RBF 神经网络的 DMFC 辨识结构和 学习算法

本文采用文献[7~9]中的正规化正交最小二乘算法(ROLS),并将该算法扩展到 DMFC 电特性建模方面。基于 RBF 神经网络的 DMFC 辨识系统结构如图 1 所示。下面将详细叙述多输入多输出情况下的 ROLS 算法。

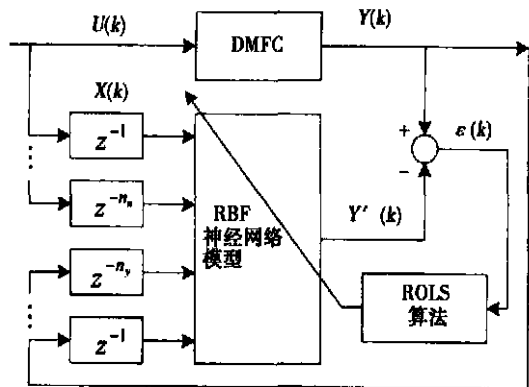


图 1 基于 RBF 神经网络的 DMFC 辨识结构

多输入多输出系统可表示为如下线性回归方程^[7~9]：

$$Y = F + E = \Phi W + E \quad (3)$$

其中：

$$F = [f_1, f_2 \dots f_{m-1}, f_m] \quad (4)$$

$$E = [e_1, e_2, \dots e_{m-1}, e_m] \quad (5)$$

$$W = [w_1, w_2, \dots w_{m-1}, w_m] \quad (6)$$

$$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots \Phi_{n-1}, \Phi_n] \quad (7)$$

对回归矩阵 Φ 进行正交分解得：

$$\Phi = BA \quad (8)$$

定义：

$$AW = Q \quad (9)$$

则：

$$Y = BAW + E = BQ + E \quad (10)$$

因此,知道 A, Q 的值,便可由式(9)求得 RBF 网络模型的权重向量 W 。

4 RBF 神经网络模型的训练与测试

4.1 模型训练过程

本文采用 MATLAB 中的神经网络工具箱执行网络的训练和仿真。首先,参考燃料电池研究所研发的 DMFC 单电池实验数据与文献[10]所提供的实验数据,并选择其中的 1200 组在不同工作温度下的电压/电流密度响应值作为神经网络的训练和测试数据。其次,采用文献[4~5]中的标准化公式对这些实验数据进行标准化处理,使所有输入和输出数据均落入(0, 1)的范围中。最后采用文献[4~5, 11]中的平方误差和公式,选取隐层节点数为 80 个。

4.2 模型仿真结果

在不同电池的工作温度下,通过比较由神经网络计算得到的离散电压/电流密度值与电池实际电压/电流密度值,本文得到 DMFC 电特性仿真结果如图 2 所示。由仿真结果可知,RBF 神经网络模型能够动态地模拟 DMFC 的实际电压/电流密度曲线,最大误差不超过 $0.002 \text{ A}^{[2~3]}$ 。

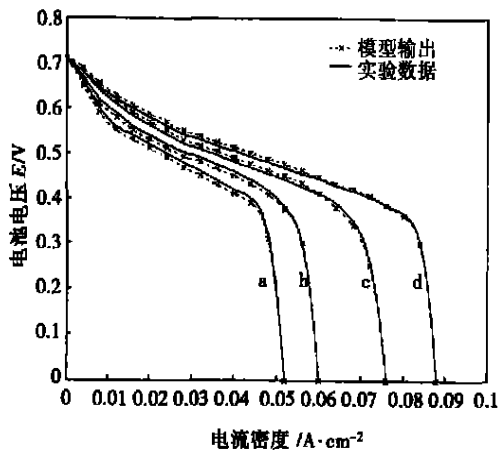


图 2 基于 RBF 神经网络的不同工作温度下 DMFC 的电压/电流密度辨识效果(a: $T=343.15 \text{ K}$; b: $T=348.15 \text{ K}$; c: $T=353.15 \text{ K}$; d: $T=358.15 \text{ K}$)

5 结 论

本文采用 RBF 神经网络辨识方法,建立了一个 DMFC 电特性的非线性模型。由仿真结果可知,基于 RBF 神经网络辨识的方法实现 DMFC 这类复杂非线性系统的建模是完全可行的,建立的电特性模型能够动态地模拟 DMFC 的实际电压/电流密度曲线。同时研究结果对 DMFC 控制系统的建模和控制设计具有一定的实用意义。

参考文献:

- [1] 汪国雄,孙公权,辛勤等.直接甲醇燃料电池[J].物理,2004,33(3):165-169.
- [2] SCOTT K, ARGYROPOULOS P, SUNDMACHER K. A model for the liquid feed direct methanol fuel cell[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 1999, 477: 97-110.
- [3] 邵庆龙,曹广益,朱新坚.基于模糊辨识的PEMFC电特性模型[J].系统仿真学报,2004,16(4):813-816.
- [4] SHEN CHENG, CAO GUANGYI, ZHU XINJIAN. Nonlinear modelling of MCFC stack based on RBF neural networks identification[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2002, 10: 109-119.
- [5] 沈承.熔融碳酸盐燃料电池发电系统建模与智能控制策略研究[D].上海:上海交通大学,2003.
- [6] 卫东,曹广益,朱新坚.基于神经网络辨识的质子交换膜燃料电池建模[J].系统仿真学报,2003,15(6):817-819.
- [7] CHEN S, CHNG E S, AIKADHIMI K. Regularized orthogonal least squares algorithm for constructing radial basis function networks[J]. *International Journal of Control*, 1996, 64(5):829-837.
- [8] CHEN S, BILLINGS S A. Representation of non-linear systems the NARMAX model[J]. *International Journal of Control*, 1989, 49(3):1013-1032.
- [9] CHEN S, HONG X, HRRIS C J. Sparse multioutput radial basis function network construction using combined locally regularised orthogonal least square and D-optimality experimental design[J]. *IEE Proc Control Theory Appl*, 2003, 150(2):139-146.
- [10] ARGYROPOULOS P, SCOTT K, SHUKLA A K, *et al.* A semi-empirical model of the direct methanol fuel cell performance part I model development and vification[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 123(2):190-199.
- [11] AI AMOUDI A, ZHANG L. Application of radial basis function network for solar-array modeling and maximum power-point predication[J]. *IED Pro-Gener Transm Distrib*, 2000, 147(5):310-316.

新技术

叶片传热的测量和估算

据《ASME Journal of Turbonmachinery》2004年1月号报道,美国NASA Glenn研究中心和美国GE公司研究人员对于具有 127° 转折角和130mm轴向弦长的跨音速涡轮转子叶片进行详细的传热测量和估算。数据是对于一组4个出口雷诺数得到的,最大雷诺数为 2.50×10^6 ,其它值为50%、25%和15%最大值。检查了三个理想的出口压比,包括设计点压比1.443;另外两个压比设计值分别为-25%和+20%。检查了三个入口气流角,包括设计点和 $\pm 5\%$ 非设计工况角。

测量是在具有高度三维叶片通流的直列叶栅内进行,高度三维通流是由高的气流转折和厚的进口附面层产生的。进口扰动是利用安装在风洞内的矩形紊流网格产生。

研究工作的目的是把用于叶型外部传热的三维估算模拟能力延用到发动机特定的条件,这些条件包括叶片形状、雷诺数和马赫数。使用围绕低导热系数叶片缠绕的薄膜加热器,利用稳态技术得到测量数据。使用经过校准的液晶测量表面温度。这些结果表明了强烈的二次旋涡流动、层流到紊流过渡对传热的影响,也表明了滞止区域内详细的传热情况。

(吉桂明 供稿)

ciency of the regenerated desulfurizing agent is stable. Compared with a fresh desulfurizing agent the desulfurization efficiency is slightly lower. **Key words:** flue gas desulfurization, sodium sulfite, cycle

基于ROLS算法的RBF神经网络燃料电池电特性建模= **Electric-characteristic Modeling of a Fuel Cell Based on ROLS Algorithm and RBF (Radial Based Function) Neural Network Identification Technique**[刊, 汉] / MIAO Qing, CAO Guang-yi, ZHU Xin-jian (Fuel Cell Research Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 387 ~ 389

An innovative method is presented for the electric-characteristic modeling of a direct methanol fuel cell (DMFC) through the use of ROLS algorithm-based RBF (radial based function) neural network identification technique. With the operating temperature of the cell serving as an input and the voltage/electric current density of the cell serving as an output 1200 groups of experimental data were utilized as training and test samples to set up under various operating temperatures a dynamic response model of the cell voltage/electric current density. Simulation results indicate that the modeling method by using the RBF neural network identification technique is effective with the established model featuring a relative high precision. **Key words:** direct methanol fuel cell, radial based function, neural network identification, ROLS algorithm

基于神经网络的电除尘器效率在线确定方法= **A Method for the On-line Determination of the Efficiency of a Neural Network-based Electrostatic Precipitator**[刊, 汉] / LI Da-zhong, TIAN li (North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), ZHANG Zheng-wei, et al (Datang Xu Chang Longgang Power Generation Co. Ltd., Yuzhou, Henan Province, China, Post Code: 452500) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 390 ~ 393

There exist numerous factors, which can affect the efficiency of an electrostatic precipitator. This also makes it difficult to conduct an on-line determination of the precipitator efficiency. In view of the above the authors have proposed a new method for setting up a model of electrostatic precipitator efficiency with the help of a neural network. In this kind of neural network model it is only necessary to input such operating parameters as boiler steam output, flue gas flow to be processed, ash, dust particle diameter and dust specific resistance, etc and one can readily realize the on-line determination of the electrostatic precipitator efficiency. The results of a simulation indicate that this neural network-based model has a fair effectiveness approximating to an actual system, thus providing a useful reference for the further modeling and optimized control of an electrostatic precipitator system. **Key words:** neural network, electrostatic precipitator, dust collection efficiency

辐射通道一维稳态温度场数值模拟= **Numerical Simulation of the One-dimensional Steady-state Temperature Field of a Radiation Channel**[刊, 汉] / HAN Jia-de, LU Yi-ping (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Harbin University of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150080), ZHANG Pei-ting (Heilongjiang Research Institute of Special Equipment Inspection, Harbin, China, Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 394 ~ 396

To determine the temperature distribution in a radiation-convection channel, a mathematical model was set up on the basis of energy conservation theory to reflect the heat transfer of air in a tube to a circular tube wall under radiation and convection nonlinear boundary conditions. A finite difference method is presented for solving the one-dimensional steady-state heat exchange of tube wall temperature and in-tube cooling air temperature. For the radiation heat exchange calculation adopted was a radiation heat transfer factor-based Monte Carlo method. The impact of relevant parameters on the temperature distribution in the radiation channel is analyzed. The parameters being studied include radiator surface temperature, the ratio of piping length to radius, the flow speed of cooling air in the tube, etc. The results of the calculation indicate that the surface temperature of the radiator represents a major factor influencing the maximum temperature in the radiation channel. The method under discussion can provide temperature field data for the detailed thermodynamic characteristics calculation of a radiation channel. **Key words:** radiation heat transfer, finite difference method, numerical simulation, temperature field