

基于傅里叶拟合的PEMFC温度建模仿真

高一方^{1,2}, 陈唐龙¹, 吴赞松^{1,2}, C.Y.Ling³, 韩 明²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 淡马锡理工学院清洁能源研究中心, 淡滨尼 529757;

3. 新加坡国立大学化学与生物分子工程学院, 肯特岗 117576)

摘 要: 建模是控制设计的基础, 根据质子交换膜燃料电池温度控制的需要, 建立基于傅里叶拟合的经验模型。利用 Matlab/Simulink 仿真平台对建立的模型进行仿真分析。仿真和实验测试结果表明: 该模型输出结果与实测数据吻合较好, 证明模型的有效性和可操作性, 有助于电池实际温度控制的策略研究。

关键词: 燃料电池; 傅里叶拟合; 温度建模; 仿真; 控制

中图分类号: TM911.48

文献标识码: A

0 引 言

燃料电池作为一种高效无污染的新型能源技术, 由于其能够直接将存储在燃料与氧化剂中的化学能等温、高效率、零排放地转化为电能的特点, 被称为 21 世纪的绿色环保能源^[1]。其中, 质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 具有上述燃料电池的共同特点外, 还具有功率密度高、启动快速、开关可循环及结构简单等突出优点。PEMFC 发展至今在军事、交通等领域已有广泛运用, 在未来以氢为主的环保时代将成为家庭使用的主要能源^[2]。

PEMFC 产生的能量中有 40%~60% 的能量耗散为热能, 必须及时排出, 以维持电池工作温度的恒定, 否则将导致电池温度不断升高, 电解质膜脱水、收缩甚至破裂, 将严重影响 PEMFC 的性能和系统的安全^[3]。但是当温度较低时, 又不利于化学反应进行, 且水的饱和蒸气压较低, 水主要以液态形式存在, 易导致“水淹”, 造成反应气体难以到达催化层, 致使 PEMFC 的输出性能较差。由于温度对于 PEMFC 的系统安全及输出性能都有极为重要的影响。因此有必要提出一种有效的电池温度模型用于实际的控制方案中, 以实现电池性能的最佳

输出。

本文提出采用傅里叶函数建立阴极开放式 PEMFC 单电池温度特性的经验模型, 然后运用 Matlab/Simulink 对该模型进行仿真。通过仿真与实验结果的比较, 证明该模型能较准确地对电池的性能进行预测和评价, 有利于实际温度的控制。本文研究可为后续电池堆或大电池系统的温度控制和最大输出功率点跟踪提供理论指导, 有助于 PEMFC 的分析、控制和优化设计。

1 实验数据采集

1.1 实验平台

实验平台如图 1 所示, 采用新加坡淡马锡理工学院清洁能源研究中心自主设计开发的阴极开放式 PEMFC 单电池系统。阳极氢气 (纯度为 99.9%) 由高压储气罐经减压阀供给进气, 设定压力为 0.1 MPa。采用 LHDA0533115H 型电磁阀对阳极氢气尾气进行间歇式排气, 排气周期为 10 s, 每次排气持续时间为 0.2 s。经实验证实, 该排气周期能有效防止阳极发生水淹。阴极氧气采用微型低压空气泵不断吸入空气供给, 使阴极流场形成微弱负压环境 (模拟了阴极开放式燃料电池池堆的运行方式)。散热风

收稿日期: 2016-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(61134001; 51177137; U1234203); 国家高技术研究发展(863)计划(2011AA11A102)

通信作者: 高一方(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事燃料电池控制与算法、燃料电池系统建模、新能源系统应用等方面的研究。

swjtugao@sina.com

扇为 DELTA 公司的 PFB0412EHN 型叶片风机, RS 公司的加热垫 (12 V, 2.5 W), HB 公司的 TEC1-12703 型半导体制冷片, 调节该风机工作电压、运用加热垫还有半导体制冷片可控制燃料电池的工作温度。电池所处外部环境温度为 25 ℃。

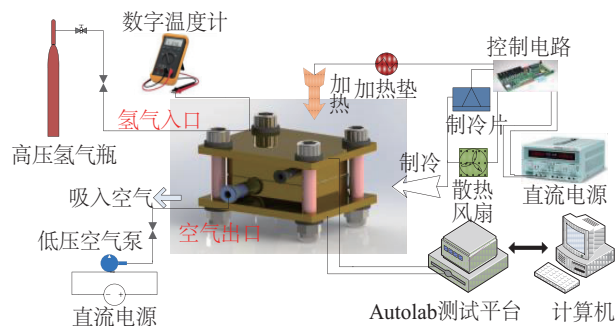


图1 实验平台结构框图

Fig. 1 Structure diagram of experimental platform

1.2 数据采集

实验数据是从 Autolab 电化学测试平台 (Metrohm 公司产) 中采集的。设置 PEMFC 工作在恒压模式 (constant voltage, CV), 然后调节 PEMFC 工作温度, 通过对 Nova1.9 数据采集软件的设置, 将对应的电流密度数据保存到计算机中。图 2 为所得原始数据图形曲线。

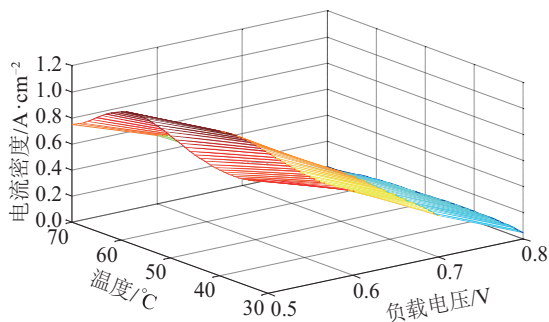


图2 原始数据曲线

Fig. 2 Curve of original data

2 经验模型建立

目前 PEMFC 的模型分为机理模型和经验模型: 机理模型考察参量较多, 模型需要多个方程联立求解, 模型机理复杂, 不适合实际控制研究; 经验模型相对简单, 无需考虑电池内部的结构参数, 依据采集的数据拟合出方程, 可据此用于实际的控

制, 改进电池的输出性能。现阶段 PEMFC 建模与仿真大多是以机理模型为基础展开的^[4-7], 难以应用于实际的控制。王斌锐等^[8]和卫东等^[9]从分析负载特性的角度提出相关温度控制的方案, 但都是针对特定的供电对象, 具有一定的局限性。近年来, 针对封闭式水冷型燃料电池温度特性的建模和控制研究, 取得了大量成果^[10-12], 但对于阴极开放式空冷型燃料电池温度特性的建模仿真研究较少。

数据拟合作为一种从离散数据中找出变量之间关系的有效工具, 不仅能解决许多非确定关系中的很多问题, 还能更好优化确定性关系中的一些问题。目前数据拟合已用于工程技术与科学研究中的许多领域, 特别是在模型建立与控制策略研究中应用颇多, 相应的拟合方法层出不穷^[13]。

由于 PEMFC 涉及流体力学、电化学、控制科学等多学科分支, 同时目前电池的热管理模型主要涉及原件加工、材料结构、装配工艺等, 提出的可用于控制的经验模型较少。已有的机理模型涉及气体组分、压力、湿度、反应物浓度等多种因素, 使其表达式过于复杂, 不适合实际控制策略的研究设计^[14-16]。为此, 本文绕开 PEMFC 电池内部复杂性, 从表现的外部输出特性出发, 提出一种基于傅里叶拟合的 PEMFC 温度经验模型。

2.1 基于傅里叶拟合的模型

由于傅里叶变换算法效率较高, 速度也较快, 经过傅里叶变换表示的曲线具有良好的保真度, 因此该算法在科研项目、计算机程序设计中得到广泛应用^[17]。经傅里叶变换, 对曲线进行拟合的表达式如式(1)所示:

$$f(t) = a_0 + \sum_{i=1}^m (a_i \cos(i \cdot \omega \cdot t) + b_i \sin(i \cdot \omega \cdot t)) \quad (1)$$

式中, a_0 、 a_i 、 b_i 、 ω ——傅里叶函数的不定系数; m ——傅里叶拟合的次数; t ——温度。

矩阵形式可表达为 $AX = Y$ 。其中,

$$X = [a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_m, b_m] \quad (2)$$

$$Y = [f(t_1), f(t_2), \dots, f(t_n)] \quad (3)$$

则:

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\omega t_1) & \sin(\omega t_1) & \cos(2\omega t_1) & \sin(2\omega t_1) & \cdots & \cos(m\omega t_1) & \sin(m\omega t_1) \\ \cos(\omega t_2) & \sin(\omega t_2) & \cos(2\omega t_2) & \sin(2\omega t_2) & \cdots & \cos(m\omega t_2) & \sin(m\omega t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\omega t_n) & \sin(\omega t_n) & \cos(2\omega t_n) & \sin(2\omega t_n) & \cdots & \cos(m\omega t_n) & \sin(m\omega t_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

因式(4)中 $m \leq [n/2]$, 因此用最小二乘法求解, 得到的最小二乘解为:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (5)$$

由式(5)即可求出傅里叶拟合方程中的不定系数。

对于 PEMFC 傅里叶建模来说, 输出为电流密度, 输入为温度和电压。即:

$$J = f(t, u) \quad (6)$$

式中, J —— 电流密度; u —— 电压。

经过实验验证, 当 $m=3$ 时, 模型拟合度较高, 各评判标准即可满足控制策略的精度要求。若再增加拟合次数, 函数表达式会越复杂, 不利于实际的控制。最终得到的拟合表达式如式(7)~式(11)所示:

$$J = f(a_0) + \sum_{i=1}^3 (f(a_i) \cos(i \cdot f(\omega_i) \cdot t) + f(b_i) \sin(i \cdot f(\omega_i) \cdot t)) \quad (7)$$

其中,

$$f(a_0) = a'_{i0} + a'_{i1} \cos(u \cdot f(\omega_i)) + \xi_i \sin(u \cdot f(\omega_i)) \quad (8)$$

$$f(a_i) = a_{i0} + a_{i1} \cos(u \cdot f(\omega_i)) + \gamma_i \sin(u \cdot f(\omega_i)) \quad (9)$$

$$f(b_i) = \beta_{i0} + \beta_{i1} \cos(u \cdot f(\omega_i)) + \delta_i \sin(u \cdot f(\omega_i)) \quad (10)$$

$$f(\omega_i) = \varphi_{i0} + \varphi_{i1} \cos u + \varepsilon_i \sin u \quad (11)$$

式中, a'_{i0} 、 a'_{i1} 、 ξ_i 、 a_{i0} 、 a_{i1} 、 γ_i 、 β_{i0} 、 β_{i1} 、 δ_i 、 φ_{i0} 、 φ_{i1} 、 ε_i —— 所得表达式的拟合系数, 该系数是在已有经验模型下运用最小二乘法计算所得, 分别代表模型中常数项、幅值的大小, 无明确物理意义。

2.2 拟合模型评判标准

用于判断曲线拟合的优劣主要有以下几个指标:

1) 误差平方和:

$$SSE = \sum_{i=1}^k w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (12)$$

2) 标准差:

3) 校正可决系数:

$$AR = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^k w_i (y_i - \bar{y})^2} \cdot \frac{k-1}{k-p} \quad (14)$$

式中, k —— 采集数据个数; w_i —— 权重系数; y_i —— 实际输出值, 在此表示 PEMFC 电流密度; \hat{y}_i —— 实际输出的估计值; \bar{y} —— 实际输出值的均值; p —— 包含常数项在内的方程总项数。

以上 3 个判断指标中, 误差平方和 SSE 用来判断模型的精准性与参数的合理性, SSE 越接近于零, 表明该模型的精准度越高、参数也更加合理; 标准差 $RMSE$ 越接近零, 则证明模型参数估计值与真实值偏差越小; 校正可决系数 AR 表示模型拟合程度的好坏, 取值范围为 $[0, 1]$, 越接近 1 表示该模型的拟合度越高, 同时也包含了自变量个数对所建模型的影响^[18]。

2.3 模型拟合

图 3 为通过对实测数据拟合得到的各工作电压下的温度-电流密度曲线, 可看出拟合曲线与实验所得数据一致。可很好地反映不同电压下温度与电流密度的关系。同时, 不同工作电压下的各判断指标如表 1 所示。

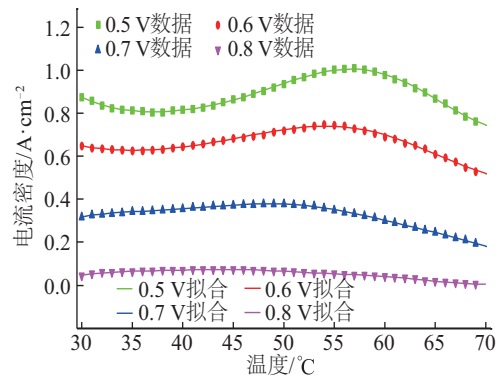


图3 不同电压下拟合模型结果

Fig. 3 Result of model fitting at different load voltage

表 1 不同工作电压的判断指标			
Table 1 Judgement index of different working voltage			
工作电压/V	SSE	RMSE	AR
0.5	2.80×10^{-5}	9.35×10^{-4}	0.9979
0.6	5.83×10^{-5}	1.35×10^{-3}	0.9993
0.7	6.64×10^{-4}	4.56×10^{-3}	0.9928
0.8	3.01×10^{-4}	3.07×10^{-3}	0.9983

通过表 1 可得出傅里叶拟合模型精度较高、模型参数估计值与真实值偏差较小。校正可决系数在各工作电压下都接近于 1,表明拟合曲线与实际数据吻合度接近于 100%。同时也由于傅

里叶函数响应速度相对较快,更利于实际燃料电池的控制。

3 实验仿真

3.1 Simulink 仿真

集成于 Matlab 的 Simulink 模块提供了一个交互式的图形化环境及可定制模块库,可对各种环境下的时变系统进行设计、仿真、执行和测试。图 4 为根据傅里叶模型搭建的 Simulink 仿真模块图。仿真中,采用 PEMFC 工作电压作为输入,可得到不同工作电压下的温度-电流密度曲线。

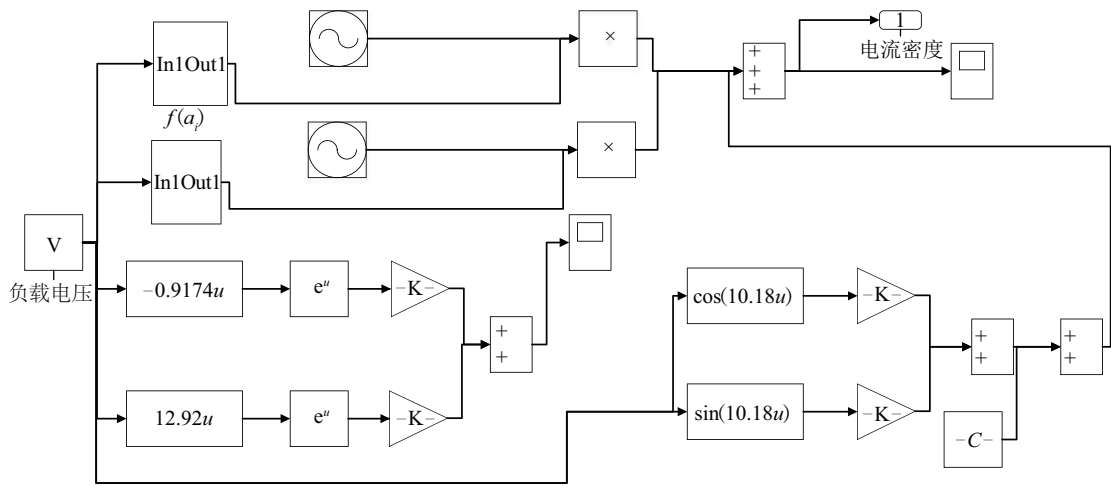


图 4 傅里叶拟合模型 Simulink 仿真模块
Fig. 4 Simulation module of Fourier fitting model

3.2 仿真验证

通过图 4 仿真模块可得到任何工作电压下的温度-电流密度曲线。为了验证该经验模型的有效性,利用前面所述的实验平台,在进气压力、排气周期、环境温度等不变的条件下,控制风机、半导体制冷片和加热垫的工况来调节 PEMFC 的工作温度,得到电池在工作电压为 0.55、0.65 V 下的温度、电流密度数据。并与通过仿真模块所得曲线进行对比,得到的结果如图 5 所示。

从图 5 可看出,工作电压在 0.55 V 下仿真曲线与实测数据吻合较好,0.65 V 下虽然仿真结果跟实测数据有一定误差,但若考虑控制电池的最佳温度区在最大电流密度的 90% 以上时^[19],该误差可忽略。通过实测数据与仿真曲线的验证比较,证明该

模型是有效和可操作的,能够较准确地为最佳温度的控制和最大功率的跟踪提供依据。

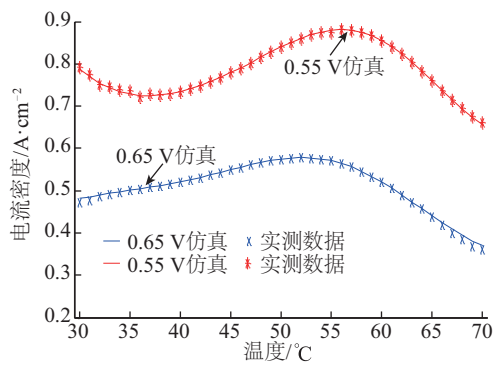


图 5 实测数据与仿真曲线对比
Fig. 5 Comparison of measured data and simulation curve

3.3 最佳工作温度、功率密度曲线

利用模型仿真所得的数据,可追踪该电池的最

佳工作温度和最大功率密度,为燃料电池的最佳输出提供可靠依据。运用分治算法和矩阵乘积算法对仿真所得数据进行处理,得到如图 6 所示的 PEMFC 在不同工作电压下的最佳工作温度和功率密度曲线。

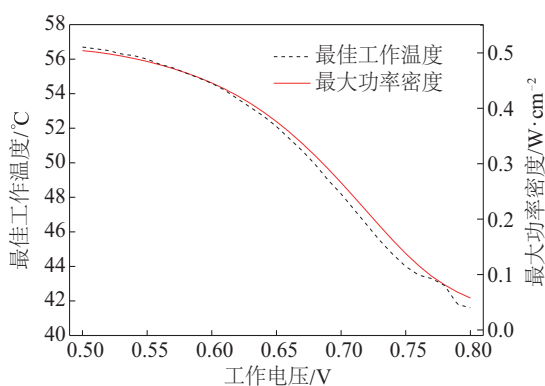


图6 不同电压下的最佳工作温度与功率密度曲线

Fig. 6 Curves of optimum operating temperature and power density at different voltage

由图 6 可看出:1)工作电压在 0.5~0.56 V 时,此时功率密度稳定较大,最佳工作温度范围为 55.7~56.7 °C,然后随着电压的增大,功率密度、最佳工作温度曲线下下降速度明显加快,因此若考虑控制电池的最佳温度区在最大电流密度的 90%以上时,可控制温度在 54.9~56.7 °C 内变化,对应的功率密度范围为 0.45~0.50 W/cm²。2)最大功率密度曲线与最佳工作温度有一定的跟随关系。这是因为当电池工作于一个恒定电压时,燃料电池最大功率密度为工作电压与最大电流密度的乘积,而最大电流密度又与最佳工作温度密切相关。当燃料电池工作温度高于最佳温度时,质子交换膜会由于高温严重失水,致使膜内阻大幅增大,导致 PEMFC 电流密度急剧下降;而当电池工作温度低于最佳温度时,催化剂活性、气体扩散速率等都较低,因此电化学反应速率也低,输出的电流密度会减小。所以,此种条件下,温度直接影响电流密度大小,进而影响功率密度的大小,因此控制好温度对实现燃料电池的最大功率输出有至关重要的影响。由于本文模型能快速准确计算出最佳温度,以确保电池最大功率密度等性能,因而可有效应用于 PEMFC 温度控制系统的设计中。

4 结 论

本文提出一种基于傅里叶拟合的 PEMFC 温度经验模型,有效地避开了系统内部机理的复杂性,有利于对 PEMFC 进行最佳工作条件的设计与控制。运用 Matlab/Simulink 对该模型进行仿真,通过实验验证表明该仿真模型可有效地预测不同电压下温度与电流密度关系,可为后续电池堆或大电池系统的温度控制和最大输出功率点跟踪提供理论指导。同时对该模型精度的进一步提高,将有助于温度的精准控制,为未来 PEMFC 的冷启动中电池保护提供一定的经验、指导。

[参考文献]

- [1] 衣宝廉. 燃料电池——原理·技术·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 5—25.
- [1] YiBaolian. Fuelcell-principle, technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003, 5—25.
- [2] 毛宗强. 燃料电池[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005, 47—167.
- [2] Mao Zongqiang. Fuel cell[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005, 47—167.
- [3] 崔东周, 肖金生, 潘 牧, 等. 质子交换膜燃料电池水, 热, 气管理[J]. 电池, 2005, 34(5): 373—375.
- [3] Cui Dongzhou, Xiao Jinsheng, Pan Mu, et al. Water, heat and gas management of proton exchange membrane fuel cell[J]. Battery Bimonthly, 2005, 34(5): 373—375.
- [4] Larminie J, Dicks A. Fuel cell systems explained[M]. New York: Wiley, 2000, 11—18.
- [5] Wang Caisheng, Nehrir M H, Shaw S R. Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 442—449.
- [6] Berning T, Lu D M, Djilali N. Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2002, 106(1-2): 284—294.
- [7] Baschuk J J, Li Xiaoguo. Modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degrees of

- water flooding[J]. Journal of Power Sources, 2000, 86 (1-2): 181—196.
- [8] 王斌锐, 金英连, 褚磊民, 等. 空冷燃料电池最佳温度及模糊增量PID控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 109—114.
- [8] Wang Binrui, Jin Yinglian, Chu Leimin, et al. Temperature optimization and fuzzy incremental PID control for air-breathing proton exchange membrane fuel cell stack[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 109—114.
- [9] 卫 东, 郑 东, 郑恩辉. 空冷型质子交换膜燃料电池堆温湿度特性自适应模糊建模与输出控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(23): 114—120.
- [9] Wei Dong, Zheng Dong, Zheng Enhui. Temperature-humidity characteristics modeling and output control based on adaptive fuzzy method for proton exchange membrane fuel cell stack[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(23): 114—120.
- [10] Park J, Li Xianguo. Effect of flow and temperature distribution on the performance of a PEM fuel cell stack[J]. Journal of Power Sources, 2006, 162(1): 444—459.
- [11] Shan Yuyao, Choe Song-Yul. Modeling and simulation of a PEM fuel cell stack considering temperature effects[J]. Journal of Power Sources, 2006, 158(1): 274—286.
- [12] 刘志祥, 王 诚, 吴 兵, 等. 微型氢空质子交换膜燃料电池系统[J]. 电源技术, 2006, 30(12): 982—985.
- [12] Liu Zhixiang, Wang Cheng, Wu Bing, et al. Development of a mini H₂-air PEMFC system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2006, 30(12): 982—985.
- [13] 程正兴. 数据拟合[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986, 7—94.
- [13] Cheng Zhengxing. Data fitting[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986, 7—94.
- [14] 李 曦, 曹广益, 朱新坚. 质子交换膜燃料电池电堆温度特性的模糊建模[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(Sup 1): 187—188.
- [14] Li Xi, Cao Gangyi, Zhu Xinjian. Fuzzy modeling for PEMC stack temperature characteristic[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(Sup 1): 187—188.
- [15] 莫志军, 朱新坚, 曹广益. 质子交换膜燃料电池建模与稳态分析[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 2255—2258.
- [15] Mo Zhijun, Zhu Xinjian, Cao Guangyi. Modeling and steady-state analysis of a proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(9): 2255—2258.
- [16] 鲜 亮, 肖 建, 贾俊波, 等. 质子交换膜燃料电池冷启动模型研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1857—1863.
- [16] Xian Liang, Xiao Jian, Jia Junbo, et al. Study on cold-start modeling of proton exchange membrane fuel cell[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(12): 1857—1863.
- [17] 冷建华. 傅里叶变换[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004, 1—64.
- [17] Leng Jianhua. Fourier transform[M]. Beijing Tsinghua University Press, 2004, 1—64.
- [18] Gujarati D N, Porter D C. Basic econometrics[M]. Noida, India: Tata McGraw-Hill Education, 2012, 201—247.
- [19] 赵思臣, 王 奔, 谢玉洪, 等. 无外增湿质子交换膜燃料电池线性温度扫描实验[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(26): 4528—4533.
- [19] Zhao Sichen, Wang Ben, Xie Yuhong, et al. Linear temperature sweep experimental study on proton exchange membrane fuel cell without external humidification[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(26): 4528—4533.

TEMPERATURE MODELING AND SIMULATION OF A PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL BASED ON FOURIER FITTING

Gao Yifang^{1,2}, Chen Tanglong¹, Wu Yunsong^{1,2}, C.Y. Ling³, Han Ming²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Clean Energy Research Centre, Temasek Polytechnic, Tampines 529757, Singapore;

3. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, National University of Singapore, Kent Ridge 117576, Singapore)

Abstract: Modeling is the foundation of control design. Proper temperature control of hydrogen fuel cells is very important in ensuring good performance. In this work, Fourier fitting is first shown to have the best accuracy when compared against other empirical models. It is subsequently implemented on the Matlab Simulink platform and used to relate fuel cell temperature, voltage and optimal current density to one another. The model results have good agreement with experimental data. Lastly, the model is used to study the impact of cell voltage on optimal temperature and power density.

Keywords: fuel cell; Fourier fitting; temperature modeling; simulation; control