

质子交换膜燃料电池数值模拟的研究进展

胡桂林, 林 江

(浙江科技学院 轻工学院, 杭州 310023)

摘 要: 通过数值模拟研究燃料电池的特性不仅可以获得许多实验测量难以得到的数据信息和工作机理,而且可以减少实验所用的费用,并大大缩短电池的设计周期。对现有的质子交换膜燃料电池(PEMFC)数学模型按照维数、复杂程度等特征进行了简要的回顾,对国内外发展 PEMFC 数学模型的主要研究工作和最新的进展予以简单评述和比较,指出了到目前为止所建立的模型存在的不足和未来模型的发展方向。

关键词: 燃料电池; 质子交换膜; 数值模拟

中图分类号: TM911.4

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2006)03-0165-06

Advance in Numerical Simulation of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

HU Gui-lin, LIN Jiang

(School of Light Industry, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Data information and operation mechanism of fuel cell, which can be obtained difficultly by experiment, sometimes even can't be obtained by experiment, can be got through numerical simulation. The experimental expense can be decreased and the design cycle can be shorted greatly by numerical simulation. The present mathematical models for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) are concisely reviewed according to model characteristics such as dimension, complexity. The main research and up-to-the-minute progress for PEMFC mathematical model all over the world is briefly reviewed and compared. At last, the deficiency of the present model and development direction of future model is pointed out.

Key words: fuel cell; proton exchange membrane; numerical simulation

能源是国民经济发展的动力,环境保护已成为人类社会可持续发展战略的核心,两者对于当今时代来说都具有十分重要而深远的意义。随着地球上一次能源日趋枯竭和环境污染日益严重,洁净高效的能源利用方式逐渐成为未来能源开发和利用的主

流方向。燃料电池由于具有高效、清洁、低噪音、可靠性高以及比功率高等优点,愈来愈广泛地受到各国政府与大公司的重视,被认为是 21 世纪首选的洁净、高效的发电技术。在各类燃料电池中,质子交换膜燃料电池(PEMFC)以其独有的特性而最有希望

收稿日期: 2006-05-08

作者简介: 胡桂林(1975—),男,江西南昌人,副研究员,博士后,主要从事燃料电池的数值模拟、湍流直接模拟和气固两相流模拟的研究。

成为未来汽车和便携式电子设备等的动力源,它工作电流大、比能量高、能量效率高、冷启动时间短等,其研究也成为诸类燃料电池研究大潮中的主流,并有望最快实现商业化。

由于燃料电池内的环境是高度反应性的,因此,很难在电池运行时进行许多详细的在线测量工作。为了更好地了解电池内复杂的流动结构、化学组分的传递过程、优化水/热管理以及缩短电池的设计和优化周期,这些信息常需要通过建立数学模型和数值模拟工作来寻求。采用数学模型对发生在 PEMFC 中的物理化学过程进行描述,旨在从理论上阐述电池内的传热、传质和电极动力学过程及其对电池性能的影响,从而为优化燃料电池的结构参数和运行工况提供可靠的理论基础。通过数值模拟研究燃料电池的特性不仅可以减少实验所用的费用,降低电池的生产成本,而且可以获得许多实验测量难以得到的数据信息和工作机理,并大大缩短电池的设计周期。

为了更好地明晰机理从而优化燃料电池系统,国内外许多研究者进行了 PEMFC 的建模和计算机模拟研究。从发展的历程来看,经历了模型由简单的一维半电池数学模型逐渐发展为复杂的三维全电池数学模型,且模型所研究的电池特性也越来越复杂。

1 一维数学模型

一维数学模型对 PEM 燃料电池模拟提供了初步的基础,是发展二维、三维模型的基础,具有计算简单等特点;然而由于维数的限制,它只能表征简单的电池结构,而且一维数学模型不能模拟沿流动方向的反应物减少和产物的累积以及集电肋条(Current Collectors)对反应物传递的影响。

Verbrugge 等^[1]发展和分析了一个一维的数学模型,用来模拟离子交换膜中瞬态的离子和溶剂传输。模型分别用 Nernst-Planck 方程和动量方程来描述离子和溶剂的传递过程,他们通过无量纲分析得出了一些非常重要的无量纲参数。Bernardi 等^[2]提出了一个 PEMFC 的一维、等温的数学模型。分别用 Darcy 定律和 Schlögl 方程来描述气体扩散层与催化层和膜中的动量传输过程。研究的区域包括阴极气体扩散层、催化层和质子交换膜,由于阳极的极化较小,因此模型中没有予以考虑。为了确定质子交换膜的含水量与离子传导率之间的定量关系,Springer 等^[3]进行了非常重要的实验研究,得到了

目前 PEMFC 数学模型仍广泛应用的经验关系式。为了阐明燃料电池阴极中的传质过程和规律,Rho 等^[4]分别用不同的混合物: O_2/He , O_2/Ar 和 O_2/H_2 作为阴极反应物进行了实验分析,并建立了一个一维稳态的数学模型。该模型没有考虑高电流密度下液体水滴的形成,而水滴的形成会导致在阴极支撑层的液膜产生,从而提高传质阻力。因此,该模型对高电流密度下产生的传质限制情况不是很适合。后来,Jaouen 等^[5]提出了一个一维稳态的聚结体模型(Agglomerate Model),通过模型研究了 PEMFC 阴极中的传质限制。模型考虑了以下过程:氧还原反应的 Tafel 动力学,质子的迁移,氧在聚结体(Agglomerate)中的扩散,以及三元气体混合物 $H_2/O_2/H_2O$ 在活化层和扩散层孔中的扩散。

2 二维数学模型

对于反应物沿流道逐渐减少和生成物的积累,或是更详细的解释反应物在支撑层中的传递,一维数学模型就显得无能为力。因此,许多研究者开始了更为复杂的二维数学模型研究,有沿流道方向的二维纵切面方向和横切流道的二维横截面方向两种,其中前者的研究较为多见,而后者主要应用到交叉梳状流道结构的研究。

Fuller 等^[6]对膜电极组件提出了一个稳态的、准二维的数学模型用来研究燃料电池的水热管理,以及质子交换膜燃料电池中的燃料利用率。与以前其他的模型不同的是,他们使用了浓溶液理论(Concentrated Solution Theory)。他们认为催化表面产生的水以气态的形式,这对于催化层中没有水的冷凝时是有效的,因而,此模型不能估算支撑层中的淹渍现象。Nguyen 等^[7]发展了一个 PEMFC 的二维稳态的水热管理模型。在这一模型中考虑了液体水含量对离子传导率的影响,以及气体扩散层和组分沿流动方向的变化,但没有详细研究膜和催化层的情况。后来,Yi 等^[8]对模型予以改进,用来研究不同电池设计和运行工况对 PEMFC 性能的影响。Kazim 等^[9]和 Yi 等^[10]分别对电极中的单组分、多组分传递提出了一个二维的稳态模型,目的是研究交叉梳状型流道结构 PEMFC 空气阴极中的水动力和多组分传输及其对电池性能的影响,然而,该模型不能估计系统中存在液态水的影响。Gurau 等^[11]发展的二维、非等温数学模型首次提出了耦合在流道和扩散层中流动和传输方程的统一方法。他

们综合研究了 PEMFC 中的传输现象,阐明了多维模型在了解燃料电池的内部状况(如氧气和水的分布)有效性。然而,他们的模型将催化层看成是无限薄的,不能估计催化层中传输限制导致的过电位。Zhou 等^[12]提出了一个考虑压力和相变效应的二维稳态单体 PEMFC 模型,刻画了进气湿度和相变对电池性能的影响。

3 三维数学模型

虽然一维和二维数学模型对于小的单电池是有效的,它们对大规模电池的可用性,特别是在高的燃料利用率的情况下是非常有限的。三维的数学模型由于计算的复杂性等因素,使得研究人员进行三维建模和数值模拟工作相对较少。

Dutta 等^[13]发展了一个直流道 PEMFC 的三维数学模型,研究了流动的三维分布和电流密度在质子膜上的二维分布。后来,Dutta 等^[14]又发展了一个相似的关于 S 形流道(Serpentine Channel)结构 PEMFC 的三维数学模型,通过计算估计了通道间的传质。Berning 等^[15]提出了一个三维综合、非等温、稳态 PEMFC 数学模型,模型研究了一个完整的电池,用 Darcy 定律描述了扩散层中流体的流动。除相变外,模型考虑了几乎所有主要的传输现象。通过 CFD 商用软件对模型进行了计算。为了比较交叉梳状流道和传统直流道 PEMFC 三维的流动和电化学特性,以及它们的输出性能,Um 等^[16]提出了一个统一的三维数学模型。研究表明,交叉梳状流道的结构强制混合物从电极中通过,在电极内形成强烈的对流,从而加快了反应物到达催化层和生成物离开催化层的速率,最终提高了电池性能。Hu 等^[17]也进行了三维交叉梳状流道和传统直流道 PEMFC 的数值模拟研究,并定量分析和比较了两者的传质特性和输出性能。

4 水热管理和两相流数学模型

维持适当的膜的水合程度是保证 PEMFC 正常运行和较高的电池性能的必要条件,因此,对 PEMFC 进行适当的水热管理是主要的关心问题之一。前面介绍的许多研究工作同时也对 PEMFC 的水热管理问题进行了适当的讨论。

Yi 等^[18]首次在论文中描述了交叉梳状型流道燃料电池与传统燃料电池相比的优点。作者从空气阴极产生的电流密度方面研究了流动分散器的设计

参数对 PEMFC 性能的影响。葛善海等^[19]提出了一个关于 PEMFC 水管理的二维稳态的数学模型,系统地研究了增湿情况、电池温度和质子膜厚度等条件对膜中水分布和水传递的影响,并提出了提高电池性能的几个有效措施。

Yi^[20]应用对流和毛细压力扩散机理描述气体多孔电极的液体传输,提出了一个交叉梳状流道 PEMFC 的二维、两相流多组分传递模型,研究了气相和液相水动力学对以空气为阴极反应物的 PEMFC 性能的影响,并对交叉梳状流道 PEMFC 进行了运行工况和设计参数的数值模拟分析。后来,He 等^[21]对此模型进行了改进,将基于质量浓度的守恒方程改为了基于摩尔浓度的守恒方程,应用模型研究了不同电极和流道设计参数对 PEMFC 阴极性能的影响。Natarajan 等^[22]发展了一个描述 PEMFC 阴极特性的二维、两相流、多组分的瞬态模型,研究结果表明,液态水的传输对电池的性能有很重要的作用,特别是在电流密度较高的情况下。

Berning^[15]提出了 PEMFC 的三维多相流 CFD 数学模型,模型考虑了包括相变和传热在内的三维传输过程。气体扩散层中的液态水传输通过黏性项和毛细压力项来模拟,所以可以模拟气体扩散层内液态水的量,这和 He 等^[21]的模型是相似的。与 Berning 的建模方法不同的是,Shimpalee 等^[23]在考虑水的相变时,将液态的水看成是气体混合物的一部分,这一简化使模型很容易在诸如 Fluent 这样的商用软件上实现计算,却没有很好地考虑气液两相水之间的相互作用和影响。胡军等^[24]对采用常规流场的 H₂-Air PEMFC 的阴极扩散层建立了二维两相流数学模型,利用该模型计算了阴极扩散层内各组分浓度、液态水饱和度等的分布,分析了扩散层中 H₂O 的传递方式及各组分浓度分布的特点。

与前面不同的是,Wang 等^[25]基于“多相混合物”提出了一个 PEMFC 阴极的两相流动和传输模型;分析和数值研究了质子交换膜燃料电池空气阴极中反应物和产物的两相流动和传输现象。由于模拟中假定温度为常数,因此带有很大的局限性。后来,You 等^[26]在 Wang 等^[25]的基础上进行了进一步的发展,提出了一个更为全面的 PEMFC 二维、两相流和多组分模型。通过研究水热管理对两相流的影响,他们发现电流密度、电池温度、阳极和阴极的加湿温度都会影响阴极的两相流动特性。在二维的基础上,Hu 等^[27]建立了一个三维的两相流模型。最

近, Sun 等^[28] 又对 You 等^[26] 的模型进行了进一步的改进和完善, 并通过不同工况的实验研究验证了模型的正确性, 数值模拟分析了温度和压力等对组分传输和电池性能的影响。最近, You 等^[29] 又在文献^[26] 的基础上进一步进行了发展, 模型综合考虑了整个电池内的两相流现象, 并耦合研究了电池内的电流密度、电位、流动和组分等多物理现象的传递过程, 数值模拟研究的结果很好地得到了自己实验结果的验证。

胡桂林等分别对直流道^[30] 和“蛇形”流道^[31] 建立了三维两相流模型, 直流道的研究中较好地考虑了电荷在电池内的传递及电动力学与传质之间的耦合, 而“蛇形”流道的研究进行了整个单电池的计算, 考虑了传热的影响。

5 动态模型

PEMFC 由于具有低温下快速启动的特点, 越来越有希望成为未来城市交通运输工具(电动汽车等)和便携电子设备等的首选动力装置。因此, 详细了解电池的瞬态过程已成为一个重要的研究方向, 这对于控制器的设计和优化变工况下电池动态响应性能等十分重要。例如: 在汽车的启动、停车、加速和减速等过程中, 电池经常处于动态变化过程。在这方面, 主要是下面一些研究人员和工作组进行了一些有意义的工作: Amphlett 等^[32] 和 Wöhr 等^[33] 主要研究了电池温度的动态响应情况, 而后者的模型不但可用于单电池的研究, 而且可用于电池堆的研究; Van Bussel 等^[34] 提出了一个二维动态的模型来确定运行工况对电池性能的作用。模型计算了不同时刻电流密度的分布情况, 较好地模拟了电池的极化情况。Um 等^[35] 发展了一个 PEMFC 的瞬态、多维的数学模型, 报道了电池电压阶越变化时电流密度响应的瞬态模拟结果。Wang 等^[36] 发展了三维、非稳态数学模型, 计算了许多过程的时间常数, 分析了电压和进气湿度等阶越变化后特性参数等随时间的变化; Van Zee 工作组进行了 PEMFC 的动态模拟, 模拟了储气罐尺寸和氢的稀释^[37], 以及化学计量系数^[38] 等对电池动态响应的影响, 并且实验研究了动态变化 CO 浓度下的电池性能^[39]。Xue 等^[40] 发展了一个系统的 PEMFC 动态模型, 模型可以考虑温度、气体流动等的混合效应, 特别是系统的瞬态行为。采用 SIMULINK 对系统模型进行了求解, 并进行了单电池实验研究来校正数值研究。

6 PEMFC 研究存在问题

1) 建立的大多数模型都是一维或二维的数学模型, 且只考虑电极和流道内水是以单相气态形式存在的情况。复杂的三维电池数学模型报道相对较少, 而且这些模型一般都做了较多假设, 且大多数都是通过商用软件(如 Fluent 和 CFX 等)来求解, 商用软件的通用性较强, 但对于 PEMFC 内的一些特殊情况和详细特性难以做到很好的刻画, 对电池内的传热过程的描述存在较大的缺陷或者就没有考虑。

2) 由于在阴极的催化层发生氧的还原反应产生水, 而且水会在电渗力的作用下随质子从阳极迁移到阴极, 当水蒸气过饱和后, 在电池的阴极侧有可能发生水的淹渍现象, 也即多孔中充有液态的水, 特别是在高电流密度的情况下更容易发生这种情况。在液态和气态水共存于电极多孔层和流道中时, 气液两相流动和传输的研究已变得越来越重要。针对该现象建立合理的两相流模型和进行数值分析, 对于更加真实地反映电池内发生各种物理化学过程非常必要, 但目前的研究报道略显不足。

3) 当电池用作交通工具等的电源时, 经常要处于变工况的运行状态下, 对电池进行动态模拟来详细了解电池的动态特性不仅对电池控制器等的设计是必要的, 对优化电池的工作性能也具有十分重要的意义, 目前这方面的研究报道相对较少。

4) 关于 PEMFC 的两相流数值模拟研究大多数还没有很好地考虑相变与传热之间的相互影响, 或是没有综合考虑催化层反应动力学对传质的影响, 对于单电池的三维动态数值模拟研究更是很少有报道。

7 结 语

因此, 综合考虑相变与传热/传质之间的相互影响, 进行三维两相流全电池的动态数值模拟, 详细揭示电池内复杂流动结构、热质传递过程及其对电池性能的影响, 深入研究催化层的电化学反应动力学及其与传质、电荷传递间的相互耦合, 将是今后模型发展的趋势。这是由于对 PEMFC 进行三维两相流动态模拟能更真实地反映变工况工作时电池内的各种复杂传输现象, 可以为优化电池实际运行时的性能提供有力的理论参考依据, 也更具有实际应用意义。

参考文献:

- [1] VERBRUGGE W M, HILL R F. Ion and solvent transport in ion-exchange membranes [J]. *J Electrochem Soc*, 1990, 137(3): 886-893.
- [2] BERNARDI D M, VERBRUGGE M W. Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte [J]. *AIChE J*, 1991, 37(8): 1151-1163.
- [3] SPRINGER T E, ZAWODINSKI T A, GOTTESFELD S. Polymer electrolyte fuel cell model [J]. *J Electrochem Soc*, 1991, 138(8): 2334-2342.
- [4] RHO Y W, VELEV O A, SRINIVASAN S, et al. Mass transport phenomena in proton exchange membrane fuel cells using O_2/He , O_2/Ar , and O_2/N_2 mixtures: I. experimental analysis [J]. *J Electrochem Soc*, 1994, 141: 2084-2088.
- [5] JAOUEN F, LINDBERGH G, SUNDHOLM G. Investigation of mass-transport limitations in the solid polymer fuel cell cathode: I. mathematical model [J]. *J Electrochem Soc*, 2002, 149(4): A437-A447.
- [6] FULLER T F, NEWMAN J. Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuel cells [J]. *J Electrochem Soc*, 1993, 140: 1218-1225.
- [7] NGUYEN T V, WHITE R E. A water and heat management model for proton-exchange-membrane fuel cells [J]. *J Electrochem Soc*, 1993, 140(8): 2178-2186.
- [8] YI J S, NGUYEN T V. An along-the-channel model for proton exchange membrane fuel cells [J]. *J Electrochem Soc*, 1998, 145(4): 1149-1159.
- [9] KAZIM A, LIU H T, FORGES P. Modeling of performance of PEM fuel cells with conventional and interdigitated flow fields [J]. *J Appl Electrochem*, 1999, 29: 1409-1416.
- [10] YI J S, NGUYEN T V. Multicomponent transport in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells using the interdigitated gas distributors [J]. *J Electrochem Soc*, 1999, 146(1): 38-45.
- [11] GURAU V, LIU H, KAKAC S. Two-dimensional model for proton exchange membrane fuel cells [J]. *AIChE J*, 1998, 44: 2410-2422.
- [12] ZHOU B, HUANG W, ZONG Y, et al. Water and pressure effects on a single PEM fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 155: 190-202.
- [13] DUTTA S, SHIMPALEE S, VAN ZEE J W. Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells [J]. *J Appl Electrochem*, 2000, 30: 135-146.
- [14] DUTTA S, SHIMPALEE S, VAN ZEE J W. Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell [J]. *Int J of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44: 2029-2042.
- [15] BERNING T, LU D M, DJILALI N. Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell [J]. *J Power Sources*, 2002, 106: 284-294.
- [16] UM S, WANG C Y. Three-dimensional analysis of transport and reaction in proton exchange membrane fuel cells [C]// *Proceeding of ASME fuel cells Division*. Orlando: Walt Disney World Dolphin, 2000: 738-746.
- [17] HU G L, FAN J R, CHEN S, et al. Three-dimensional numerical analysis of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) with conventional and interdigitated flow fields [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 136(1): 1-9.
- [18] YI J S, NGUYEN T V. The effect of the flow distributor on the performance of PEM fuel cells [C]// *Proceedings of the first international symposium on proton conducting membrane fuel cells*. NJ: Pennington, 1995: 66-75.
- [19] 葛善海, 衣宝廉, 徐洪峰. 质子交换膜燃料电池水传递模型[J]. *化工学报*, 1999, 50(1): 39-48.
- [20] YI J S. Characterization of reactant gases, water and heat distributions in proton exchange membrane fuel cells [D]. Ph. D. Dissertation, University of Kansas, 1998.
- [21] HE W, YI J S, NGUYEN T V. Two-phase flow model of the cathode of PEM fuel cells using interdigitated flow fields [J]. *AIChE J*, 2000, 46(10): 2053-2064.
- [22] NATARAJAN D, NGUYEN T V. A two-dimensional, two-phase, multicomponent, transient model for the cathode of a proton exchange membrane fuel cell using conventional gas distributors [J]. *J Electrochem Soc*, 2001, 148(12): A1324-A1335.
- [23] SHIMPALEE S, DUTTA S. Numerical prediction of local temperature and current density in a PEM fuel cell [J]. *Numerical Heat transfer, Part A*, 2000, 38: 111-128.
- [24] 胡军, 衣宝廉, 才英华, 等. 常规流场质子交换膜燃料电池阴极二维两相流模型[J]. *化工学报*, 2004, 55(6): 967-973.
- [25] WANG Z H, WANG C Y, CHEN K S. Two-phase

- flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cell [J]. *J Power Sources*, 2001, 94(1): 40-50.
- [26] YOU L, LIU H. A two-phase flow and transport model for the cathode of PEM fuel cells [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 2277-2287.
- [27] HU M R, GU A Z, WANG M H, et al. Three dimensional, two-phase flow mathematical models for PEM fuel cell [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(1): 1861-1882.
- [28] SUN H, LIU H, GUO L. PEM fuel cell performance and its two-phase mass transport [J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 143: 125-135.
- [29] YOU L, LIU H. A two-phase flow and transport model for PEM fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 155: 219-230.
- [30] 胡桂林, 陈松, 樊建人, 等. 质子交换膜燃料电池两相流动和传递现象的三维数值模拟[J]. *化工学报*, 2005, 56(7): 1305-1310.
- [31] 胡桂林, 樊建人, 岑可法. 复杂流道质子交换膜燃料电池单体的两相流模拟[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(3): 343-348.
- [32] AMPHLETT J C, MANN R F, PEPPELEY B A, et al. A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells [J]. *J Power Sources*, 1996, 61: 183-189.
- [33] WÖHR M, BOLWIN K, SCHNURNBERGER W, et al. Dynamic modeling and simulation of a polymer membrane fuel cell including mass transport limitations [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 1998, 23(3): 213-218.
- [34] UM S, WANG C Y, CHEN K S. Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells [J]. *J Electrochem Soc*, 2000, 147(12): 4485-4493.
- [35] VAN BUSSEL H, KOENE F, MALLANT R. Dynamic model of solid polymer fuel cell water management [J]. *J of Power Sources*, 1998, 71: 218-222.
- [36] WANG Y, WANG C Y. Transient analysis of polymer electrolyte fuel cell [J]. *Electrochimica Acta*, 2005, 50: 1307-1315.
- [37] KIM S, SHIMPALEE S, VAN ZEE J W. The effect of reservoirs and fuel dilution on the dynamic behavior of a PEMFC [J]. *Journal of Power Sources*, 2004(137): 43-52.
- [38] KIM S, SHIMPALEE S, VAN ZEE J W. The effect of stoichiometry on dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) during load change [J]. *Journal of Power Sources*, 2004(135): 110-121.
- [39] MURTHY M, ESAYIAN M, HOBSON A, et al. Performance of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Exposed to Transient CO Concentrations [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2001, 148(10): A1141-A1147.
- [40] XUE X, TANG J, SMIRNOVA A, et al. System level lumped-parameter dynamic modeling of PEM fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 133: 188-204.