

质子交换膜燃料电池分布参数模型数值仿真研究进展

翟 双¹, 周 苏^{1, 2, 3}, 陈凤祥¹, 张传升¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804; 3. 同济大学 中德学院, 上海 200092)

摘要: 对比了 3 类质子交换膜燃料电池数学模型(分布参数模型、集总参数模型和混合参数模型)的特点及应用范围, 从相关的守恒方程及数值计算方法、重要参数的数值特征、研究内容、仿真区域和模型验证等方面总结了分布参数模型的研究进展。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 数值仿真; 分布参数模型; 集总参数模型; 混合参数模型

中图分类号: TK91

文献标识码: A

Advance in Numerical Simulation of Distributed Parameter Model for PEMFCs

ZHAI Shuang¹, ZHOU Su^{1, 2, 3}, CHEN Fengxiang¹, ZHANG Chuansheng¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Sino-German Postgraduate School, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An analysis was made of three models for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) such as the distributed parameter model, the lumped parameter model and the mixed parameter model in terms of their characteristics and application. A review was made on the recent development of the distributed parameter models from five aspects including the conservation equations and their related computing methods; the characteristics of some important parameters; the research range; the development of simulated region and model verification.

Key words: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); numerical simulation; distributed parameter model; lumped parameter model; mixed parameter model

化装置之一, 可广泛运用于交通、固定发电厂及可移动电源等。质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 具有低噪音、低操作温度和高效率等特点, PEMFC 发动机是新能源汽车的理想动力系统。经过数十年的研究, PEMFC 技术在材料、系统集成及控制等方面取得了长足进步。与其他工程问题一样, PEMFC 系统的数值仿真在系统设计与匹配、优化和辅助实验研究等方面发挥了不可替代的作用。

目前, PEMFC 的数学模型可以分为下述 3 类。第一类是分布参数模型^[1]。该类模型基于质量、动量、组分和电荷等守恒方程, 可以描述电池内部压力场、速度场、组分浓度、电场和液态水等的空间分布。但是, 该类模型主要针对稳态工况, 较少涉及可能引起电堆故障的特殊工况。另外, 该类模型往往没有考虑外部辅助单元(如空压机、增湿器和冷却装置等)对电堆性能的影响。第二类是集总参数模型^[2]。该类模型主要用于描述和分析燃料电池(堆)的动态响应。集总参数模型由于仿真用时较短、操控方便, 故常被用于动态仿真分析和控制设计。集总参数模型不能提供燃料电池内重要物理量空间分布的信息, 不适用于研究燃料电池流场结构设计、优化等问题。第三类是混合参数模型或协同仿真模型^[3], 即分布参数模型描述燃料电池(堆), 集总参数模型描述系统各辅助单元并为燃料电池(堆)空间模型提供动态边界条件。混合参数模型能够描述电堆实际运行时其内部重要物理变量的动态空间分布。

1 PEMFC 分布参数模型

燃料电池分布参数模型主要以相关的守恒方程为基础, 涉及数值计算方法、重要参数的数值特征、研究内容、仿真区域和模型验证等方面的研究内容。

燃料电池被认为是 21 世纪最有前途的能量转

收稿日期: 2011-04-11

基金项目: 高等学校创新引智计划(B08019); 上海市重点学科建设项目(B303); 国家自然科学基金(61104077, 11101311)

第一作者: 翟 双(1983—), 男, 博士生, 主要研究方向为车用燃料电池建模、仿真与控制。E-mail: zhaishuang412@163.com

通讯作者: 周 苏(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新型车辆动力系统, 燃料电池系统建模、仿真及控制。Email: suzhou@tongji.edu.cn

1.1 相关的守恒方程及数值计算方法

PEMFC的研究是跨学科的,涉及材料学、传热质学、电化学和系统控制等内容. PEMFC的工作机理受质量守恒、动量守恒、组分守恒、能量守恒和电荷守恒等的约束,相应的数学模型可用以下微分方程表达^[1]:

$$\frac{\partial(\rho\psi)}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{v}\psi) = \nabla(\Gamma\nabla\psi) + S_\psi \quad (1)$$

方程(1)从左至右顺序出现的4项分别为瞬态项、对流项、扩散项和源项,其中 ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ψ 为求解变量; t 为时间, s ; \mathbf{v} 为速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; Γ 为广义扩散系数; S_ψ 为 ψ 对应的源项.

当 $\psi=1$ 时,式(1)表示质量守恒方程

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{v}) = S_m \quad (2)$$

式中:源项 S_m 为电化学反应区域(阳极和阴极的催化层)内反应组分质量的消耗或产生速率.

当 $\psi=\mathbf{v}$ 时,式(1)表示动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{v}\mathbf{v}) = \nabla(\mu\nabla\mathbf{v}) + S_v \quad (3)$$

式中:源项 S_v 为动量在多孔介质中的变化率. 在气体扩散层应用 Darcy 定律,源项 S_v 可用下式表示^[1]:

$$S_v = -\frac{\mu}{K}\mathbf{v} \quad (4)$$

式中: μ 为粘度系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; K 为渗透系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

当 $\psi=Y_i$ (组分质量分数)时,式(1)表示组分守恒方程

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{v}Y_i) = \nabla(D_i\nabla Y_i) + S_{Y_i} \quad (5)$$

式中:源项 S_{Y_i} 表示组分(氧气、氢气或水)在催化层内的消耗或产生速率.

当 $\psi=T$ (温度)时,式(1)表示能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{v}T) = \nabla\left(\frac{k}{c_p}\nabla T\right) + S_T \quad (6)$$

式中: k 为热传导系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; c_p 为比定压热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; S_T 为温度方程的源项,表示 PEMFC 作功时,由各种过电位引起的产热速率. Ju H 和 Basu S 等^[4-5]在单相模型中,研究了 PEMFC 不同热源类型的情况并将单相模型扩展,建立了包含相变热的两相非等温模型.

当 $\psi=\varphi_{\text{H}^+}$ 或 φ_{e^-} (质子或电子电势)时,式(1)表示质子/电子守恒方程. 与流体动态过程相比,电化学反应时间很短,可以不考虑瞬态项,质子/电子守

恒方程简化为

$$\nabla(\sigma\nabla\varphi_{\text{H}^+}) + S_{\varphi_{\text{H}^+}} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla(\kappa\nabla\varphi_{\text{e}^-}) + S_{\varphi_{\text{e}^-}} = 0 \quad (8)$$

式(7),(8)中: σ 和 κ 分别为质子传导率和电子传导率, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$. 早期模型中的电荷守恒方程仅考虑了质子的传递,忽略了集电肋条和扩散层电阻造成的欧姆电压降以及由此产生的热量. 在模型求解时,只能以电压作为边界条件. Meng H 等^[6]将电子守恒方程引入之后,电流也可以作为边界条件,使得电堆数值仿真更接近于真实运行环境. 以电流和以电压作为边界条件的差异性研究表明,仅用伏安曲线不足以验证模型^[1].

水的动态空间分布求解同样涉及到上述5类守恒方程. PEMFC在正常工作时,水的相态可以是气态或气液混合态,对应的模型被称为单相模型或两相模型. 单相模型被广泛使用于早期的数值仿真^[4]. 在反应气体相对湿度较低和电池内没有液态水的情况下,单相模型足够准确. 但是,为了保证较高的质子传导率,入口反应气体一般都是增湿的;当 PEMFC 在室温或冰点温度下启动时,气体的饱和温度一般低于 PEMFC 工作温度,故在启动过程中易生成液态水甚至缩水;PEMFC 在较高的电流下工作时,反应生成的水较多^[1]. 为了克服单相模型的局限性,近年来的一个研究热点就是水的气液混合态两相模型,具有代表性的工作可以分为以下3类.

(1) Wang C Y 等建立的 M^2 模型(多相混合物模型)^[1, 7]为

$$\frac{\partial(\epsilon C_{\text{H}_2\text{O}})}{\partial t} + \nabla(\gamma_c\mathbf{v}C_{\text{H}_2\text{O}}) = \nabla(\Gamma(\text{H}_2\text{O})\nabla C_{\text{H}_2\text{O}}) + S_{\text{H}_2\text{O}} \quad (9)$$

式中: ϵ 为孔隙率; $C_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; γ_c 为对流修正系数; $\Gamma(\text{H}_2\text{O})$ 为水的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $S_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的源项, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. 需要指出的是,式(9)中的速度为气液混合物的速度,其中气体速度、液体速度和混合物速度的关系在文献^[7]中有详细的推导. 这种处理方法便于模型的求解.

(2) VOF(volume of fluid)模型. VOF 模型通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分来模拟 2~3 种不能混合的流体的运动状态,涉及液态水体积分数的动力学方程是^[8]

$$\frac{\partial(\epsilon s_1 \rho_1)}{\partial t} + \nabla(s_1 \rho_1 \mathbf{v}_1) = S_\rho \quad (10)$$

式中: s_1 为液态水的体积分; ρ_1 为液态水的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; \mathbf{v}_1 为液态水的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; S_ρ 为液态水

的源项, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.

(3) 饱和度模型. 该类模型是将水蒸气的饱和度和 s 作为求解变量^[3], 即

$$\frac{\partial(\epsilon s \rho_1)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_1 \frac{K s^3}{\mu_1} \frac{dp_c}{ds} \nabla s \right) = S_s \quad (11)$$

式中: K 为渗透系数, m^2 ; μ_1 为粘度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p_c 为多孔介质中毛细管力, N ; S_s 为饱和度 s 的源项, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. 通过饱和度 s 及其对多孔介质孔隙率 ϵ 的影响可以反映电堆内部水淹程度.

但是, 到目前为止, 上述 3 类两相流模型还没有实现在全电池区域范围的仿真, 大部分工作假定流道内不存在液态水. 因此, 对燃料电池的两相流和液态水在电堆内的传递过程仍有待进一步的研究. 另外, 系数非线性、各变量强耦合和求解计算量大是 PEMFC 分布参数模型的特点. 因此, 有必要研究开发高效的数值计算方法. 迄今为止的数值计算方法主要是有限差分法、有限元法和有限体积法. 早期的一维模型主要采用有限差分法进行求解^[9], 有限元法也被广泛应用于分布参数模型的求解^[10], 有限体积法则是目前最常用的方法^[11].

经过数十年的发展, PEMFC 分布参数模型日趋完善, 但是, 尚有一些工作有待进一步的研究. 例如, 拓展两相流模型的求解区域, 增大模型的应用范围; 对模型涉及的间断系数问题寻求有效的求解方法; 采用并行或其他高效计算方法解决大功率电堆模型的仿真计算问题.

1.2 重要参数的数值特征

PEMFC 模型中的守恒方程涉及质子交换膜的性能参数、表征催化层/扩散层组分传输能力的参数和双极板的物理属性等.

质子交换膜必须有较高的质子传导率、较低的气体(氢气、氮气和氧气)渗透率和一定的机械强度, 并且电化学反应发生时具有一定的物理化学稳定性. 质子传导率是描述质子交换膜性能的一个重要参数. Springer 等修正的质子传导率 κ 与温度 T 和膜水含量 λ 的关系式^[12]被广泛使用.

$$\kappa = (0.5139\lambda - 0.326) \exp \left[1.268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (12)$$

膜内水含量 λ 与水活度 a 之间的函数关系^[12-13]为

$$\lambda = \begin{cases} 0.043 + 17.81a + 39.85a^2 + 36.0a^3 & 0 < a \leq 1 \\ 14 + 1.4(a - 1) & 1 < a < 3 \\ 16.8 & a \geq 3 \\ 22 & \text{存在液态水} \end{cases} \quad (13)$$

导致质子传导率与水活度之间呈强非线性关系, 这也是上述模型不易求解的原因之一. 膜内水由阴极到阳极的反扩散系数 $D(\lambda)$ 和质子迁移导致的电拽力系数 n_d 与膜内水含量的关系由下述公式表示^[13]:

$$D(\lambda) = \begin{cases} 3.10 \times 10^{-3} \lambda (\exp(0.28\lambda) - 1) \exp\left(-\frac{2436}{T}\right) & 0 < \lambda < 3 \\ 4.17 \times 10^{-4} \lambda (161 \exp(-\lambda) + 1) \exp\left(-\frac{2436}{T}\right) & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$n_d = 2.5\lambda/22 \quad (15)$$

催化层是电化学反应发生的场所, 也是反应气体、质子和电子的传输通道. 表述其反应速率的参数是交换电流密度^[14]

$$i_0 = i_0^{\text{ref}} a_c L_c \left(\frac{p_r}{p_0^{\text{ref}}} \right)^\gamma \exp \left[-\frac{E_c}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_{\text{ref}}} \right) \right] \quad (16)$$

式(16)涉及到参考交换电流密度 i_0^{ref} 、比表面积 a_c 、催化剂的搭载量 L_c 、反应组分的压力 p_r 、参考压力 p_0^{ref} 、压力系数 γ 、活化能 E_c 、气体常数 R 、温度 T 和参考温度 T_{ref} 等. 研究发现, PEMFC 性能不仅与铂金负载量有关, 还与铂金催化剂的利用率有关.

扩散层是提供反应气体和电子的通道, 可将催化层产生的电化学反应热量和液态水及时排出, 同时在结构上支撑催化层和质子交换膜^[15]. 借助于仿真模型, 可以优化设计扩散层结构, 以满足上述通道、排水和散热的要求. 另外, 研究施加在双极板上的封装压力对扩散层孔隙率和结构的影响, 也是 PEMFC 模型研究的热点之一. 双极板与扩散层的接触电阻率和封装压力之间的半经验公式为^[16]

$$\omega = A \bar{p}^B \quad (17)$$

式中: ω 为界面接触电阻率; \bar{p} 为界面表观压力; A 和 B 是根据实验曲线得到的拟合参数.

扩散层因封装压力导致的孔隙率变化为

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0 - 1 + e^{\epsilon_v}}{e^{\epsilon_v}} \quad (18)$$

式中: ϵ_0 为初始孔隙率; e^{ϵ_v} 为体积材料形变.

PEMFC 的双极板通常采用石墨和金属两种材料. 石墨双极板因其体积较大、耐用性差、制造成本将逐渐被金属双极板取代^[15]. 如何提高金属双极板的耐腐蚀性能, 是需要关注的一个问题.

基于上述的分布参数模型, 研究者们从以下几个方面对 PEMFC 性能开展了深入细致的研究.

(1) 不同流场结构对 PEMFC 的影响. Sun W 等^[17]研究了二维情况下流道宽度与长度比变化对阴

极催化层内电化学反应的影响. Shimpalee S 等^[18]研究了车用和基站运行环境对蛇形流道长/宽/高比例的不同要求以及不同的进气方式对 PEMFC 性能的影响; Arato E 等^[19]详细讨论了流场结构和气体压力分布的关系; Khajeh-Hosseini-Dalasm N 等^[20]研究了阴极催化层结构参数变化对 PEMFC 性能的影响.

(2) 不同操作条件对 PEMFC 性能的影响. Seddiq M 等^[21]研究了温度和压力变化对 PEMFC 性能的影响. Wang L 等^[22]通过实验与模型相结合的方法研究了不同的入口气体温度、电堆温度、压力以及这些物理变量对 PEMFC 性能的耦合影响. Sun P T 等^[23]研究了在低温条件下 PEMFC 的热传递特性和热应力对 PEMFC 性能的影响.

(3) 典型工况下 PEMFC 的特性. Wang Y 等^[24-25]研究了电压发生阶跃变化时电流密度的动态响应,从机理上分析了膜内含水量和阴阳两极水传递的关系,并讨论了电流密度发生阶跃变化时电压的动态响应. Meng H^[26]指出, PEMFC 电压在负载阶跃变化过程中出现的“overshoot”和“undershoot”现象与液态水阻塞气体传输通道密切相关. Mao L 等^[27]应用动态三维多相模型模拟了 PEMFC 冷启动工况下($<0^{\circ}\text{C}$)内部水的结冰过程,并考虑了操作条件变化对 PEMFC 启动过程的影响;他们还基于能量守恒研究了一 $20\sim 10^{\circ}\text{C}$ 环境下的冷启动策略^[28]. Tajiri K 等^[29]借助非等温多相模型研究了升高操作温度对 PEMFC 冷启动的影响. Yang X G 等^[30]研究了恒电压模式下冷启动的特性. Tajiri K 等^[31]基于“gas purge”模型研究了“purge”对 PEMFC 内液态水吹扫的作用. 周苏等^[32]建立了一种可以体现单池差异性的一维电堆模型,并详细分析了电堆内重要物理量(温度、水含量和输出电压等)在特殊工况下(如启动、制动和怠速等)的动态特性.

1.3 仿真区域

PEMFC 数学模型已从一维模型、二维模型扩展到三维模型,其仿真区域已经由最初的典型区域扩展到整个单电池^[33],现在越来越多的研究开始转向燃料电池堆的三维建模与仿真.

三维堆模型研究主要关注单池间差异性和反应气体空间分布等问题. Shimpalee S 等^[34]建立了一个包含 6 片单池的 PEMFC 堆模型,考虑了操作条件和电堆结构对 PEMFC 堆性能的影响. Mustata R 等^[35]比较了“U”型和“Z”型结构电堆内的气流分布.

Karimi G 等^[36]研究了 PEMFC 堆内阴极的水淹现象. Chen C H 等^[37]主要考察了电堆内主进气管道内的气体分布和压降变化情况. Zhai S 等^[38]根据电堆内温度分布的不一致性阐述了单池之间的差异性. Zhou B 等^[39]考虑了电堆内液态水存在位置对电堆性能的影响. Adzakpa K P 等^[40]建立了 PEMFC 堆的三维热力学模型,分析了空气冷却导致的相对湿度差异对电堆内温度分布的影响.

1.4 模型验证

对比仿真和实验获取的伏安曲线,是传统的模型验证方法. Wang C Y^[1]通过具体实例指出,仅靠伏安曲线验证模型是不充分的. Mench M M 等^[41]分别通过实验测量了 PEMFC 内的电流分布并用于验证其单相 PEMFC 模型的正确性. Hu M 等^[42]提出,要在 3 种不同的工况下比较仿真与实验获取的伏安曲线并根据两者之间的吻合程度验证模型. Lum K W 等^[43]提出,要通过对比电流密度和组分浓度的变化趋势来验证模型的正确性. Min C H 等^[44]提出了 3 步骤验证法,即 ① 对比仿真数据和实验数据的伏安曲线;② 分析电池内的局部电流密度分布;③ 对比阴极的活化过电位与电流密度曲线. 另外,也可以借助于热成像仪和热电偶等仪器测量电堆温度分布验证模型有关热过程的结果.

2 结语

基于相关守恒定律建立的分布参数模型,可以优化 PEMFC(堆)流场结构、操作条件等,也可从机理上分析典型工况下 PEMFC 的特性. 但是,尚有一些涉及分布参数模型的研究工作有待开展和深化. 例如,① 优化适合 PEMFC(堆)整个区域的多相流模型;② 优化 PEMFC 封装结构和运行操作条件;③ 在混合模型协同仿真平台下研究不同控制策略对电堆内物理变量动态空间分布的影响;④ 研究 PEMFC 堆三维仿真求解的并行和其他高效计算方法.

参考文献:

- [1] Wang C Y. Fundamental models for fuel cell engineering [J]. Chemical Reviews, 2004, 104: 4727.
- [2] 周苏,张传升,陈凤祥. 车用高压质子交换膜燃料电池系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1469.
- ZHOU Su, ZHANG Chuangsheng, CHEN Fengxiang. Modeling and simulation of high-pressure automobile PEMFC power system [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(7): 1469.

- [3] Zhai S, Sun P T, Chen F X, et al. Collaborative simulation for dynamical PEMFC power systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(16): 8772.
- [4] Ju H, Meng H, Wang C Y. A single-phase, non-isothermal model for PEM fuel cells [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48: 1303.
- [5] Basu S, Wang C Y, Chen K S. Phase change in a polymer electrolyte fuel cell [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2009, 156(6): B748.
- [6] Meng H, Wang C Y. Electron transport in PEFCs [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004; 151 (3) A358.
- [7] Pasaogullari U, WANG C Y. Two-phase modeling and flooding prediction of polymer electrolyte fuel cells [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2005, 152 (2): A380.
- [8] Le A D, Zhou B. A general model of proton exchange membrane fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 182 (1): 197.
- [9] Yan W M, Chen F L, Wu H Y, et al. Analysis of thermal and water management with temperature-dependent diffusion effects in membrane of proton exchange membrane fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 129(2): 127.
- [10] Sun P T, Zhou S, Hu Q, et al. A novel automated finite element program generation and its application to PEM fuel cell simulation [J]. *Communications in Computational Physics*, 2012, 11: 65.
- [11] Siegel C. Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. *Energy*, 2008, 33: 1331.
- [12] Springer, T E, Zawodzinski T A, Gottesfeld S. Polymer electrolyte fuel cell model [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1991, 138 (8): 2334.
- [13] Zawodzinski T A, Springer T E, Davey J, et al. A comparative study of water uptake by and transport through ionomeric fuel cell membranes [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1993, 140: 1981.
- [14] Barbir F. PEM fuel cells: theory and practice [M]. London: Elsevier, 2005.
- [15] 周苏, 纪光霁, 马天才, 等. 车用质子交换膜燃料电池系统技术现状 [J]. *汽车工程*, 2009, 31(6): 489.
- ZHOU Su, JI Guangji, MA Tiancai, et al. The state of the art of PEMFC for automotive application [J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(6): 489.
- [16] Zhou P, Wu C W. Numerical study on the compression effect of gas diffusion layer on PEMFC performance [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 170(1): 93.
- [17] Sun W, Peppley B A, Karan K. Modeling the influence of GDL and flow-field plate parameters on the reaction distribution in the PEMFC cathode catalyst layer [J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 144(1): 42.
- [18] Shimpalee S, Van Zee J W. Numerical studies on rib & channel dimension of flow-field on PEMFC performance [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(7): 842.
- [19] Arato E, Pinna M, Costa P. Gas-phase mass-transfer resistance at PEMFC electrodes Part 2. Effects of the flow geometry and the related pressure field [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 158(1): 206.
- [20] Khajeh-Hosseini-Dalasm N, Kermani M J, Moghaddam D G, et al. A parametric study of cathode catalyst layer structural parameters on the performance of a PEM fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35 (6): 2417.
- [21] Seddiq M, Khaleghi H, Mirzaei M. Parametric study of operation and performance of a PEM fuel cell using numerical method [J]. *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International English Edition*, 2008, 27(2): 1.
- [22] Wang L, Husar A, Zhou T H, et al. A parametric study of PEM fuel cell performances [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2003, 28(2): 1263.
- [23] Sun P T, Zhou S. Numerical studies of thermal transport and mechanical effects due to thermal-inertia loading in PEMFC stack in subfreezing environment [J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2011, 8 (1): 011010.
- [24] Wang Y, Wang C Y. Transient analysis of polymer electrolyte fuel cells [J]. *Electrochimica Acta*, 2005, 50: 1307.
- [25] Wang Y, Wang C Y. Dynamics of polymer electrolyte fuel cells undergoing load changes [J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 51: 3924.
- [26] Meng H. Numerical investigation of transient responses of a PEM fuel cell using a two-phase non-isothermal mixed-domain model [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 171: 738.
- [27] Mao L, Wang C Y, Tabuchi Y. A multiphase model for cold start of polymer electrolyte fuel cells [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2007, 154 (3): B341.
- [28] Mao L, Wang C Y. Analysis of cold start in polymer electrolyte fuel cells [J]. *Journal of The Electrochemical Society*. 2007, 154(2): B139.
- [29] Tajiri K, Tabuchi Y, Kagami F, et al. Effects of operating and design parameters on PEFC cold start [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 165: 279.
- [30] Yang X G, Tabuchi Y, Kagami F, et al. Durability of membrane electrode assemblies under polymer electrolyte fuel cell cold-start cycling [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2008, 155(7): B752.
- [31] Tajiri K, Wang C Y, Tabuchi Y. Water removal from a PEFC during gas purge [J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53: 6337.
- [32] 周苏, 李壮运, 翟双, 等. PEMFC 电堆建模及特殊工况动态分析[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(7): 1121.
- ZHOU Su, LI Zhuangyun, ZHAI Shuang, et al. Modeling of a PEMFC stack and dynamic analyses under special working conditions [J]. *Actaenergie Solaris Sinica*, 2011, 32 (7): 1121.
- [33] 林鸿, 陶文铨. 质子交换膜燃料电池的三维数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(1): 41.
- LIN Hong, TAO Wenquan. Three-dimensional numerical simulation of polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(1): 41.
- [34] Shimpalee S, Ohashi M, Van Zee J W, et al. Experimental and numerical studies of portable PEMFC stack [J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54: 2899.
- [35] Mustata R, Valiño L, Barreras F, et al. Study of the distribution of air flow in a proton exchange membrane fuel cell stack [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 192: 185.