

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.03.009

质子交换膜燃料电池平行流场优化

邱成, 鲁聪达, 文东辉

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

摘要:质子交换膜燃料电池平行流场因其较小的压降和较多分支流道会使整个流场中的反应气体流动很不均匀,产生了较差的流动特性,也会使电池的电化学反应不够充分进而严重影响电池的输出功率,所以需要平行流场的几何结构进行优化,从而得到较好的流动特性。文章采用一种基于动量和质量守恒的数值解析法对电池流场结构进行数值优化,并且优化结果用三维计算流体动力学进行模拟并证明优化是有效的,优化后的流场能够最终消除流场的流动不均匀性并得到流动均匀的流场,使得电池的整体性能得以提高。

关键词:燃料电池;解析法;平行流场;流动均匀性

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)03-0035-04

Optimization of Straight-Parallel Flow Field for Proton Exchange Membrane Fuel Cells

QIU Cheng, LU Congda, WEN Donghui

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Straight-parallel flow field of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) causes the poor flow because of its lowest pressure drop and branch channel between the traditional gas-distributor plane. It gives rise to the problem of severe flow distribution in the flow field. As a consequence, the mass transfer and electrochemistry reaction for the PEMFCs flow field in insufficient process significantly influences the output power of fuel cells, and it is necessary to optimize the geometric construction of parallel flow field to obtain a better flow distribution. So an analytical method based on mass and momentum conservation was proposed to numerical optimization for the flow field of fuel cells. And the results released from this solution were validated by computing from the three-dimensional computational fluid dynamics simulations, CFD. The optimized results can eliminate the misdistribution, and an even flow distribution can be achieved. And a higher whole performance is improved.

Key words: fuel cells; analytical method; straight-parallel flow field; even flow distribution

质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一种能够把氢气和氧气通过化学反应转换成电能和水的电化学装置。在各种类型的燃料电池当中,PEMFC能够在低于100℃的条件下产生相当大的功率密度,使PEMFC很适合安装在可移动的设备上。流场是加工在双极板上的沟槽,流场的结构形式及尺寸决定了反应物与生成物在流场内的流动状态,流场结构是双极板的设计关键。流场的设计应该使电极整个活性区域上都能得到充足的反应燃料,同时能够及时排除生成物(水),并

保证燃料电池性能良好且稳定^[1-2]。在4种典型流场中(平行流场,点状流场,蛇形流场,交指型流场),平行流场从加工和制造角度来讲是最简单的流场。传统CFD优化方法需花费较多的计算资源,文中采用解析法对平行流场进行优化,得到较为均匀的压降和质量流量分布,进而提高电池性能。

1 数值模型基本假设

- 1) 流动特性如密度和黏度是常数。
- 2) 温度对电池的影响直接是通过自化学反应和

收稿日期:2013-09-10;修回日期:2013-09-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175472);浙江省杰出青年科学基金(R1111149)

作者简介:邱成(1986),男,浙江象山人,硕士研究生,主要研究方向为燃料电池。通信作者:鲁聪达,博士,教授,博士生导师, E-mail:lcd@zjut.edu.cn

相变,间接是通过热浮力。相比于压降来自流体密度的热浮力是很小的,流体密度对流动分布的影响可以忽略,因为大多燃料电池系统是由较小的流道的歧管组成的,而且在较小的温度范围内进行的,所以电池可以近似看成等温的条件下操作^[3-4]。

3) 反应气体是在不能渗透的流道中流动,忽略流道和电极之间的质量流动,对于模型的简化来说是很重要的假设^[5]。

4) 传统的平行流场,在较小雷诺系数下分流和汇流的压降损耗系数和拐弯损失系数可以忽略。

2 控制方程

Z 型平行流场如图 1 所示,由一个入口总流道,出口总流道(也叫做汇流流道)以及连接这两个流道的数条纵向平行流道组成。在入口处给定一个质量流率条件下,研究每条平行流道中的质量流量和进出口的总体压降。在分析过程中将采用一个质量和压力平衡方程去对流场进行数值计算。质量和压力平衡方程是基于控制体积的偏微分方程,是从 Bassiouny 和 Martin^[6-7]模型推导出来的。

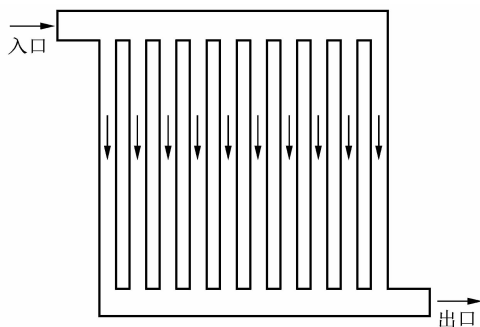


图 1 Z 型平行流场

Figure 1 Z-type straight-parallel flow field

入口和出口处流道控制体积如图 2 所示。

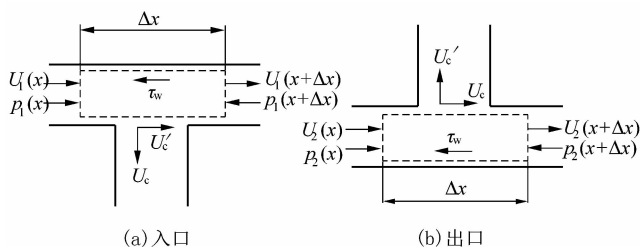


图 2 控制体积

Figure 2 Control volume

入口控制体质量平衡方程为

$$\rho F_1 U_1 = \rho F_1 \left(U_1 + \frac{dU_1}{dX} \cdot \Delta X \right) + \rho F_c U_c \quad (1)$$

其中: ρ 为流体的密度, F_1 和 F_c 分别表示入口总流道和

纵向流道的横截面积, U_1 表示控制体积的入口处的速度, U_c 表示纵向流道的速度。令 $\Delta X = N/L_1$,其中 N 表示平行流道的流道数, L_1 表示入口总流道的长度,则方程(1)可以简化成

$$F_1 \left(\frac{dU_1}{dX} \right) = - \frac{N}{L_1} F_c U_c \quad (2)$$

动量平衡方程为

$$F_1 - \left(P_1 + \frac{dP_1}{dX} \cdot \Delta X \right) F_1 - \tau_w P_h \Delta X = \rho F_1 \left(U_1 + \frac{dU_1}{dX} \cdot \Delta X \right)^2 - \rho F_1 U_1^2 + \rho F_c U_c U'_c \quad (3)$$

其中: P_1 是控制体积入口处的压力, P_h 表示入口横截面周长, τ_w 表示流道壁面的切应力, U'_c 表示纵向流道在入口总流道的分速度。

Boersma 和 Sammes^[8-9]在湍流状态下的模型是忽略了摩擦项而保持了惯性项。对于层流保持摩擦项忽略了惯性项,则动量方程可以表示为

$$\frac{d}{dX} (\rho U_1 U_1) = - \frac{dP_1}{dX} - \frac{P_i f \rho U_1^2}{2 F_1} \quad (4)$$

其中 P_i 表示入口总流道的润湿周长。

出口控制体质量平衡方程为

$$\rho F_2 U_2 = \rho F_2 \left(U_2 + \frac{dU_2}{dX} \cdot \Delta X \right) - \rho F_c U_c \quad (5)$$

其中: F_2 为出口总流道横截面积, U_2 表示控制体积的出口处的速度。令 $\Delta X = N/L_2$,其中 N 表示平行流道的流道数, L_2 表示出口总流道的长度,则方程(5)可以简化成

$$F_2 \left(\frac{dU_2}{dX} \right) = - \frac{N}{L_2} F_c U_c \quad (6)$$

动量平衡方程为

$$F_2 - \left(P_2 + \frac{dP_2}{dX} \cdot \Delta X \right) F_2 - \tau_w P_e \Delta X = \rho F_2 \left(U_2 + \frac{dU_2}{dX} \cdot \Delta X \right)^2 - \rho F_2 U_2^2 - \rho F_c U_c U'_c \quad (7)$$

其中: P_2 是控制体积出口处的压力, τ_w 表示的壁面的切应力, U'_c 表示纵向流道在出口总流道的分速度, P_e 表示出口总流道的润湿周长。

3 流场尺寸优化

由于平行流场的压降比较小,会引起流动不均匀,从前面分析可以知道纵向流道的宽度,深度以及总流道的深度对流场的流动特性的影响是最大的,所以就从这三方面入手对流场进行优化。同时为了制造方便,进出口总流道的尺寸保持相同,且纵向流道的尺寸和相互的间距都保持不变,流道的初始几何尺寸如图 3 所示。

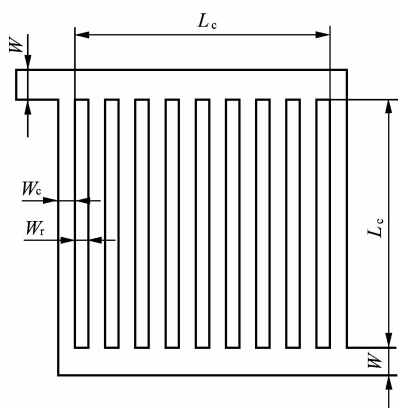


图3 平行流场形状尺寸图

Figure 3 Geometry chart of straight-parallel flow field

图中的 L_c , W_c , L , W , W_r 分别表示进出口总流道的长度, 总流道的宽度; 纵向流道的宽度和长度; 以及两条流道之间的岸宽。燃料电池的活化面积 $A = L(2W + L_c)$, d 和 d_c 分别是进出口总流道和纵向流道的深度。所以流道数: $N = (L + W_r) / (W_c + W_r)$ 。

3.1 数值优化设计目标函数

这里对于衡量流场中流道中气体流动的均匀性函数为^[10]

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (m_{ci} - \bar{m}_c)^2}}{N\bar{m}_c} \quad (8)$$

其中: m_{ci} 为第 i 条纵向流道的质量流量, $\bar{m}_c$ 为纵向流道平均质量流量。由于是从 0 变化到 1 表示流道中气流的流动均匀性程度。当 $\Gamma = 0$ 时, 表示所有的流道有相同的质量流量, 当 $\Gamma = 1$ 时, 表示一个或者更多的流道中的质量流量为零。所以 Γ 越小表明流道流动均匀性越好, 优化目标是通过调整 3 个变量: 总流道的深度 d 和纵向流道的深度 d_c , 宽度 W_c 来使 Γ 得到最小。

3.2 数值优化设计变量和设计约束

就如前面分析知道, 总流道的深度 d 和纵向流道的深度 d_c , 宽度 W_c 对流场的压降和流场的流动均匀性有较大的影响, 优化的主要变量就是上述 3 个变量, 为了研究方便预先固定流场一些参数: 燃料电池的活化面积 $A = 0.25 \text{ m}^2$, 入口处质量 $M_{in} = 3.6 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 具体尺寸如表 1 所示。

表1 流场初始尺寸

Table 1 Original geometry of flow field

N/条	L_c/m	W_c/m	d_c/m	W/m	d/m	L/m	$U_{in}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
10	0.044	-	-	0.003	-	0.05	$930.22 \times 10^{-6}/d$

注: “-”表示待优化的数值

为了加工方便进出口总流道的尺寸保持相同, 纵向流道的尺寸相同且相邻流道之间的间距保持均匀, 主要约束尺寸为

$$0.0001 \leq d_c, d \leq 0.0005$$

$$0.001 \leq W_c \leq 0.00482$$

3.3 分析结果和讨论

使用高性能计算软件 MATLAB 来进行流道尺寸的优化设计。经过 fmincon 函数优化分析得到最优解

$$W_c = 0.001 \text{ m}, d_c = 0.0001 \text{ m}, d = 0.0005 \text{ m}$$

$$\text{目标函数 } \Gamma = 9.1455 \times 10^{-4}$$

3.4 CFD 验证

为了验证解析法优化的结果的正确性, 将优化后的尺寸与 CFD 软件 Fluent 数值模拟的结果进行比较, 如图 4 所示。

图 4 各分图分别表示优化前后流场的特性, 也就是优化前后的速度分布图和压力分布图(用速度分布图来替代质量流量图, 因为两者是成正比的且只与流场的尺寸大小有关, 所以可以等效的用速度分布图来替代质量流量分布图)。比较两张图可以发现经过解析法优化后的流场的速度在每条流道中分布均匀而且每条流道中的压降也很均匀, 整个流场的流动特性都明显比优化前要好得多, 说明了这种解析数值优化时有效的。

4 结语

文中通过解析法计算了流场中的流动特性, 分析了流场的宽度和深度对流场的压降和质量流量的影响, 并且通过 CFD 验证得到较好的优化效果。但因为目前所使用的解析法数值模型只适用层流条件下, 所以燃料电池的数值模拟过程中都是假设流道中的流体是层流的, 该模型有效。但是该模型忽略了摩擦项, 虽然在较小的雷诺数的流体流动时流体与流道壁的摩擦并不是很大, 但是在质量流量较大的情况下还是要考虑摩擦所带来的影响。这个就有待以后对流场中摩擦给整个流场的流动特性的影响进行研究分析。

参考文献:

- [1] 熊济时. 质子交换膜燃料电池的流场结构优化与新型流场研究 [D]. 湖北: 武汉理工大学, 2006.
- [2] KUMAR A, REDDY R G. Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2003, 113(1): 11-18.
- [3] HONTANON E, ESCUDERO M J, BAUTISTA C, et al. Optimization of flow-field in polymer electrolyte membrane fuel cells using computational fluid dynamics techniques [J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1/2): 363-368.

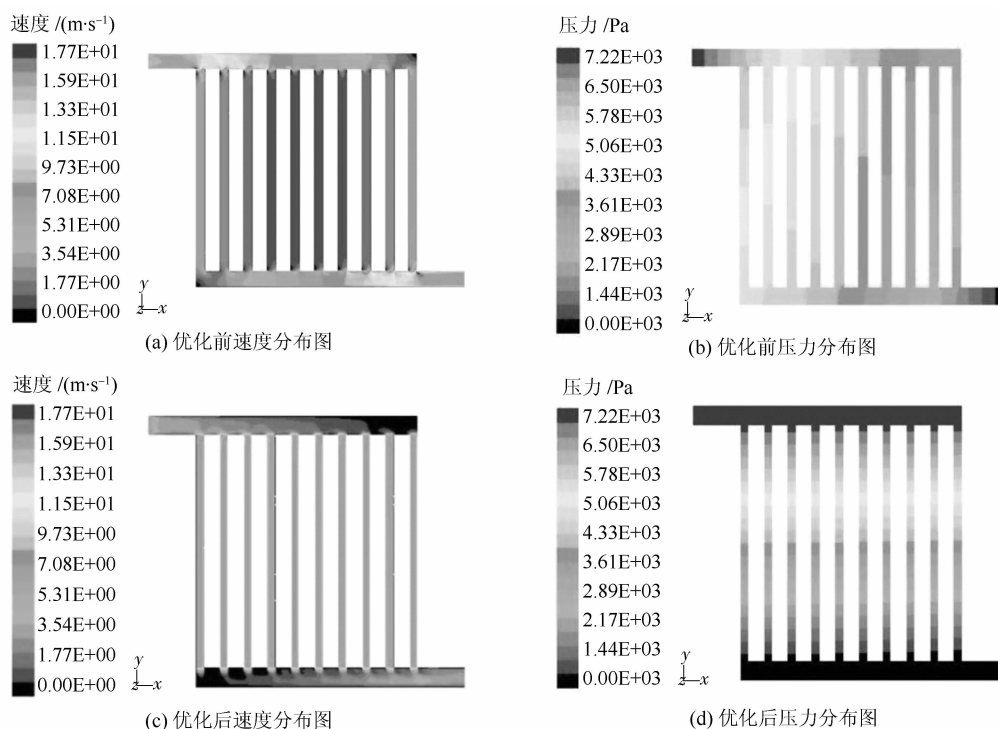


图4 CFD数值分析图

Figure 4 CFD numerical analysis diagram

- [4] YOON Y G, LEE W Y, PARK G G, et al. Effects of channel and rib widths of flow field plates on the performance of a PEMFC [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30 (12): 1363 - 1366.
- [5] LEE K K, HONG G K. Investigation of gas flow characteristics in proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22 (8): 1561 - 1567.
- [6] BASSIOUNY M K, MARTIN H. Flow distribution and pressure drop in plate heat exchangers: I U-type arrangement [J]. Chemical Engineering Science, 1984, 39 (4): 693 - 700.
- [7] BASSIOUNY M K, MARTIN H. Flow distribution and pressure drop in plate heat exchangers: II Z-type arrangement [J]. Chemical Engineering Science, 1984, 39 (4): 701 - 704.
- [8] BOERSMA R J, SAMMES N M. Computational analysis of the gas-flow distribution in solid oxide fuel cell stacks [J]. Journal of Power Sources, 1996, 63 (2): 215 - 219.
- [9] BOERSMA R J, SAMMES N M. Distribution of gas flow in internally manifolded solid oxide fuel cell stacks [J]. Journal of Power Sources, 1997, 66 (1/2): 41 - 45.
- [10] HONTANON E, ESCUDERO M J, BAUTISTA C, et al. Optimization of flow-field in polymer electrolyte membrane fuel cells using computational fluid dynamics techniques [J]. Journal of Power sources, 2000, 86 (1/2): 363 - 368.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

台达电源治理方案打造安全可靠医疗用电

医疗仪器为大众提供优良医疗服务的同时,却也因为仪器高负载特性,造成大量谐波污染,从而影响电网与电源质量。电压与电流波动对医疗仪器中的电子组件产生干扰,造成设备损坏或误动作,可能导致监控数据误差、断层影像错误、放射剂量失准、仪器过度放电、甚至会因电子手术刀起火等因素出现人命关天的事故。

台达集团凭借在电力电子领域多年的专业经验,为吉林某大型教研医院提出医疗系统专用供电电解决方案,即采用4部台达APF2000系列有源电力滤波器,分别安装于该医院的四大主要变压器端,以并联方式接入电网,通过电流互感器实时检测电网的三相电流波形,得知需要补偿的谐波电流成分后,APF2000立即产生反向电流输入供电系统,有效补偿谐波。治理后电流波形恢复为正常的正弦波,电压畸变率由1%降低至0.6%,电流畸变率由14.2%降到4.3%。确保医疗仪器运作稳定可靠,使医护人员能够进行正确治疗,病患得到完善的医疗照顾。

台达电源治理解决方案与产品,已成功应用于如厨具制造、汽车制造、交通控制、冶金制造及医疗领域等多元行业。台达将不断致力于产品研发与技术创新,为用户提供高稳定性、高可靠性、高安全性的产品。

(任彩玲)