

质子交换膜燃料电池性能优化实验研究

丁靖 曹涛锋 林鸿 母玉同 陶文铨

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘要 质子交换膜燃料电池是一种能量转换装置, 具有效率高、噪音低、无污染等优点。本文使用正交实验法和方差分析法研究了流场板结构、运行温度、阴阳极相对湿度和阴阳极流量对电池性能的影响, 并对电池性能进行了优化。性能指标采用最大功率和最高效率。研究结果表明, 流场板结构和运行温度对最大功率有显著影响, 流场板结构和阳极流量对最高效率有显著影响。对所研究的电池下列组合可得最优性能: 蛇形流场板-运行温度 70°C-阴极相对湿度 0%-阳极相对湿度 100%-阴极流量 0.263 SLPM-阳极流量 0.525 SLPM。

关键词 质子交换膜燃料电池; 正交实验; 方差分析

中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2014)09-1826-05

Experimental Optimization of the PEM Fuel Cell Performance

DING Jing CAO Tao-Feng LIN Hong MU Yu-Tong TAO Wen-Quan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiao tong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The proton exchange membrane fuel cell, which has the advantages of high efficiency, low noise and free from pollution, is a kind of energy conversion facility. In this paper, the DOE (design of experiment) method and the variance analysis are applied to investigate the effect of flow field structure, operating temperature, cathode and anode relative humidity, and cathode and anode flow rate on the performance of the fuel cell, and to optimize the performance of the fuel cell. The maximum power and the highest efficiency are chosen as the performance indicators. The experimental results show that the flow field structure and the operating temperature have a significant effect on the maximum power while the flow field structure and the anode flow rate have a significant effect on the highest efficiency. For the fuel cell studied, the optimum combination of the above factors is, serpentine flow plate, operating temperature at 70°C, cathode relative humidity at 0%, anode relative humidity at 100%, cathode flow rate at 0.263 SLPM and anode flow rate at linebreak 0.525 SLPM.

Key words proton exchange membrane fuel cell; design of experiment; variance analysis

0 引言

质子交换膜燃料电池的性能受到很多参数的影响。根据参数在运行过程中能否进行改变可将参数分为两大类, 即运行参数和设计参数。运行参数指在运行过程中能改变的参数, 如温度、压力、湿度、流量等; 设计参数指在运行过程中不能改变的参数, 如催化剂含量、扩散层孔隙率、流场板结构等。Carton 等^[1]研究了蛇形流场板、平行流场板和迷宫流场板对燃料电池电流、电压、功率和效率的影响, 研究结果表明蛇形流场板的性能优于其他两种流场板。Nishimura 等^[2]研究了反应气体流量、相对湿度和流道间距对电池温度分布的影响, 研究

发现加大流量和减小流道间距能提高电池温度分布的均匀性。Hu 等^[3]研究了催化剂涂层膜 (Catalyst-coated membrane) 对燃料电池性能的影响, 研究表明催化剂涂层膜的催化剂利用率比憎水膜的催化剂利用率高。

影响质子交换膜燃料电池性能的因素有十多个, 如果对这十余个参数采用常规方法逐一研究其对性能的影响, 需要耗费大量时间和资源。采用正交实验法, 能以较少的实验次数获得与全因素实验很接近的实验结果, 减少时间和资源的投入^[4]。不少学者们采用正交实验法进行了有关的研究。Kaytakoglu

收稿日期: 2014-01-12; 修订日期: 2014-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51136004); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No.G2011CB707203)

作者简介: 丁靖 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事质子交换膜燃料电池的研究。

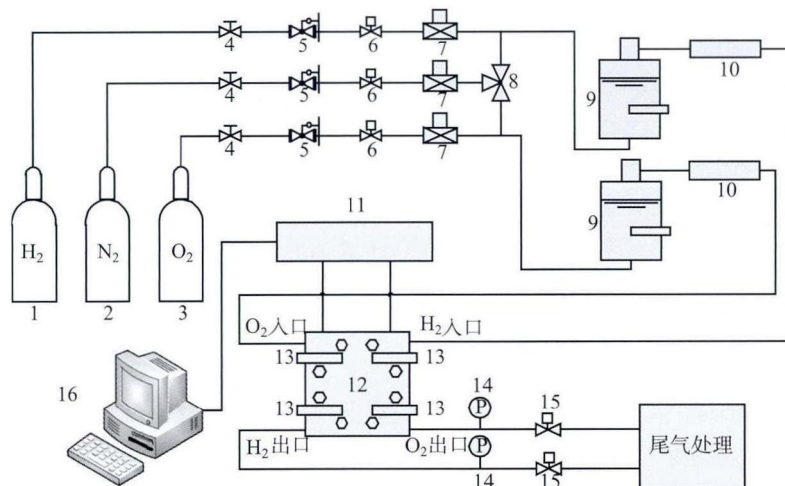
等^[5]采用正交实验法研究了电池温度、运行压力、阴阳极相对湿度和阴阳极化学计量比流量对质子交换膜燃料电池性能的影响,并且通过优化参数来提高燃料电池的最大功率。Wu等^[6]先采用正交实验法研究了运行温度、运行压力、阴阳极相对湿度和阴阳极化学计量比流量对燃料电池性能的影响,并对参数进行初步优化,再利用神经网络法进一步对参数进行优化。

燃料电池的性能同时受到运行参数和设计参数的影响,然而,前人的研究多集中在运行参数对电池性能的影响,没有同时考虑设计参数的影响。鉴于此,本文同时研究了运行参数和设计参数,所选择的运行参数为电池温度、气体流量和相对湿度,设计参数为流场板结构。本文使用正交实验法和方差分析法研究了这些参数对电池性能的影响,并对电池性能进行优化。同时研究运行参数和设计参数,具有两方面意义。一方面,能比较两类参数对电池性能的影响大小,为电池性能的优化提供有价值的参考信息;另一方面,与分别对不同设计参数的燃料电池进行正交实验的情况相比,把设计参数作为正交实验的因子,能够大量减少实验次数,节约成本。

1 实验系统

1.1 燃料电池测试系统

本文使用美国 ARBIN 公司生产的燃料电池测试系统,测试系统如图 1 所示。测试系统由气体供应装置、温度控制装置、流量控制装置、压力控制装置、加湿装置、电子负载和数据采集系统构成。



1. 氢气瓶; 2. 氮气瓶; 3. 氧气瓶; 4. 柱塞阀; 5. 减压阀; 6. 电动阀; 7. 流量计; 8. 三通阀; 9. 加湿器; 10. 加热器; 11. 电子负载; 12. 燃料电池; 13. 电池加热棒; 14. 压力传感器; 15. 背压阀; 16. 电子计算机

图 1 燃料电池测试系统

Fig. 1 Schematic diagram of fuel cell experimental setup

1.2 燃料电池

实验中使用杜邦公司生产的 Nafion NRE212 质子交换膜,有效面积为 50 cm^2 ,催化剂为碳载铂,用量为 0.5 mg/cm^2 。气体扩散层使用上海河森电气有限公司生产的 HCP135 碳纸气体扩散层,带自增湿填充层,厚度为 0.32 mm ,密度为 0.87 g/cm^3 。反应气体采用纯氢气和纯氧气。气体流动方向沿水平方向,氢气和氧气反向流动。本文研究三种不同结构形式的流场板,分别为平行流场板、蛇形流场板和组合流场板,如图 2 所示。

2 实验方法

本文使用正交实验法对质子交换膜燃料电池的性能进行优化。性能评价指标为最大功率和最高效率,控制因子分别为流场板结构、运行温度、阳极流量、阴极流量、阳极相对湿度和阴极相对湿度。其中,流场板结构属于设计参数,其余的都属于运行参数。表 1 给出了各个控制因子的水平设置情况。实验使用正交表 $L_{18}(3^7)$ 。表 2 给出了实验安排与实验结果。

表 1 因子水平

Table 1 Levels of factors

控制因子	描述	水平 1	水平 2	水平 3
A	流场板结构	蛇形	组合	平行
B	运行温度/ $^{\circ}\text{C}$	50	70	60
C	阴极相对湿度/%	0	100	50
D	阳极相对湿度/%	100	50	0
E	阴极流量/SLPM	0.263	0.438	0.350
F	阳极流量/SLPM	0.700	0.525	0.875

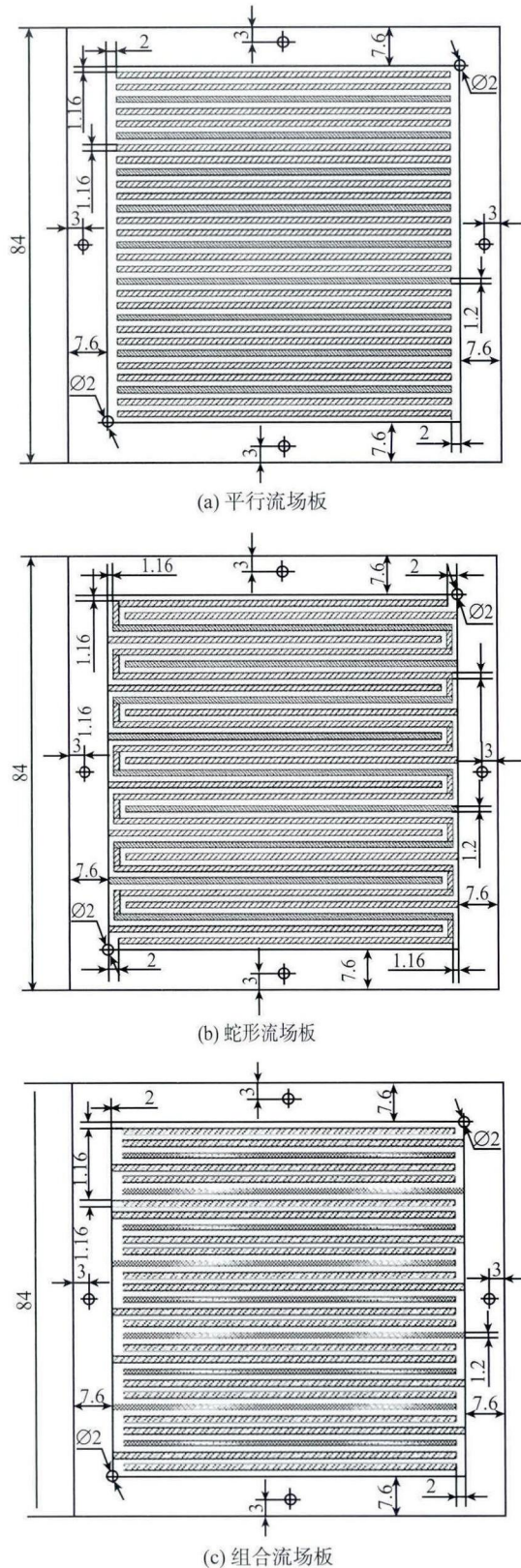


图2 流场板结构

Fig. 2 Structure of flow fields

根据正交表对电池进行测试,得到不同参数设置下的最大功率和最高效率。其中,电池效率的计

算公式如下

$$\varepsilon_{\text{fuel}} = \frac{P}{\Delta \hat{h} \times v_{\text{fuel}}} \quad (1)$$

式中, P 是燃料电池的功率/W; $\Delta \hat{h}$ 是实际工作条件(温度、压力)下化学反应 $\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$ 的反应焓/ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; v_{fuel} 是燃料的实际摩尔流量/ $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 。使用方差分析法对实验数据进行处理,并使用显著性检验判断控制因子对电池性能的影响是否显著。

表2 实验安排与实验结果

Table 2 Orthogonal array

实验号	A	B	C	D	E	F	最大功率/W	最高效率/%
1	1	1	1	1	1	1	20.388	13.73
2	1	2	2	2	2	2	20.813	18.73
3	1	3	3	3	3	3	18.528	10.00
4	2	1	1	2	2	3	18.206	10.31
5	2	2	2	3	3	1	19.867	13.41
6	2	3	3	1	1	2	19.916	17.91
7	3	1	2	1	3	2	9.266	8.32
8	3	2	3	2	1	3	11.556	6.24
9	3	3	1	3	2	1	10.842	7.31
10	1	1	3	3	2	2	16.511	14.83
11	1	2	1	1	3	3	21.259	11.48
12	1	3	2	2	1	1	18.046	12.17
13	2	1	2	3	1	3	18.071	9.74
14	2	2	3	1	2	1	20.134	13.59
15	2	3	1	2	3	2	17.004	15.73
16	3	1	3	2	3	1	9.709	6.54
17	3	2	1	3	1	2	9.780	8.80
18	3	3	2	1	2	3	8.472	4.57

3 实验结果分析

3.1 最大功率

最大功率方差分析如表3所示。流场板结构的F值(118.415)大于其临界值 $F_{0.1}(2.763)$, 运行温度的F值(4.725)也大于其临界值 $F_{0.1}(2.763)$, 证明流场板结构和运行温度均对最大功率有显著影响。

图3给出了不同控制因子水平下最大功率的变化情况,同时显示了数据的置信度范围。三种流场板结构中,蛇形流场板的功率最高,组合流场板的功率稍低,平行流场板的功率最低。这是因为,最大功率通常出现在电流密度较大的阶段,此时电池内部电化学反应很快,阴极产生大量液态水,如果液态水不能及时排走,会阻碍反应气体与催化剂接触,降低电池功率,此时流场板的排水性能成为决定最大功率高低的关键因素。由于蛇形流场板的排水性能最好,组合流场板次之,平行流场板最差,因此出现了前述的现象。当运行温度改变时,运行温度越高,最大功率越高。这是因为,运行温度升高,电化学反应加快,单位时间内更多的化学能转化成电能,

因此燃料电池输出的功率增大。当阴极相对湿度改变时,相对湿度越高,最大功率越低。这是因为,如前所述,最大功率出现时,阴极产生大量液态水,阻碍反应气体与催化剂接触,如果阴极相对湿度升高,阻碍更加严重,会进一步降低最大功率。当阳极相对湿度改变时,相对湿度越高,最大功率越高。这是因为,液态水主要在阴极产生,阳极产生的液态水很少,如果阳极相对湿度升高,质子交换膜靠近阳极一侧能够得到更好的湿润,降低质子交换膜的欧姆电阻,提高最大功率。当阴极流量改变时,最大功率变化很小。这是因为,阴极流量是按照理论上燃料电池输出 1 A/cm^2 电流密度所需要的氧气消耗量乘以化学计量比计算出来的,实验中燃料电池最大电流密度也是 1 A/cm^2 左右,也就是说,阴极流量非常充足。在这种情况下,增加或者适当减小阴极流量不会对最大功率产生明显影响,即最大功率对阴极流量不敏感。当阳极流量改变时,最大功率的变化也很小。这也是因为阳极流量非常充足,最大功率对阳极流量不敏感。

表 3 不同控制因子水平下最高效率的变化情况

Table 3 Variance analysis of the maximum power

控制因子	平方和	自由度	方差	F 值	$F_{0.1}$
A	333.473	2	166.737	118.415	2.763
B	13.306	2	6.653	4.725	2.763
C	0.737	2			
D	2.994	2			
E	0.704	2		合并	
F	2.706	2			
误差	11.165	5			
误差(合并)	18.305	13	1.408	$S=1.187$	
总和	365.084	17			

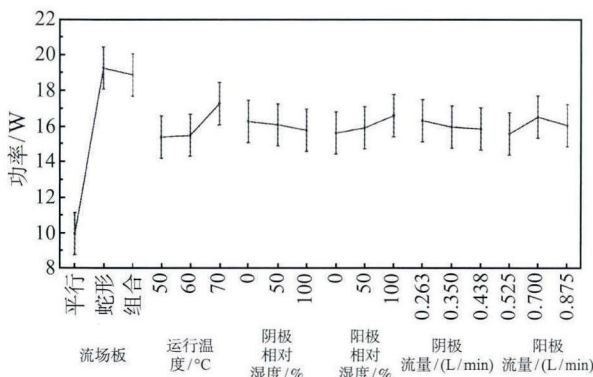


图 3 不同控制因子水平下最大功率的变化情况

Fig. 3 Maximum power of different levels of control factors

的 F 值 (23.684) 大于其临界值 $F_{0.1}(2.763)$, 证明流场板结构和阳极流量对最高效率有显著影响。

表 4 最高效率方差分析

Table 4 Variance analysis of highest efficiency

控制因子	平方和	自由度	方差	F 值	$F_{0.1}$
A	0.01654	2	0.00827	45.709	2.763
B	0.00072	2			
C	0.00007	2		合并	
D	0.00029	2			
E	0.00015	2			
F	0.00857	2	0.00428	23.684	2.763
误差	0.00112	5		合并	
误差(合并)	0.00235	13	0.00018	$S=0.0134$	
总和	0.02746	17			

图 4 给出了不同控制因子水平下最高效率的变化情况。三种流场板结构中,蛇形流场板的效率最高,组合流场板的效率稍低,平行流场板的效率最低。这是因为,根据公式 (1),最高效率与功率、流量以及反应焓有关,使用蛇形流场板会提高功率,却不会改变流量和反应焓,因此效率得到提高。当阳极流量改变时,阳极流量越小,最高效率越高。这是因为,实验中燃料电池功率对阳极流量不敏感,当阳极流量减小时,功率基本不变,在这种情况下,效率会随着阳极流量的减小而升高。当阳极流量改变时,阳极流量越小,最高效率越高。这是因为,实验中燃料电池功率对阳极流量不敏感,当阳极流量减小时,功率基本不变,在这种情况下,效率会随着阳极流量的减小而升高。其他控制因子都通过影响最大功率来间接影响最高效率,因此它们对最高效率的影响规律与最大功率基本一致,在此不再赘述。

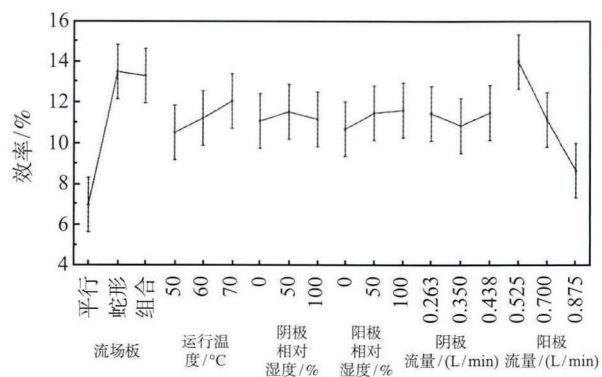


图 4 不同控制因子水平下最高效率的变化情况

Fig. 4 Highest efficiency of different levels of control factors

3.2 最高效率

最高效率方差分析如表 4 所示。流场板结构的 F 值 (45.709) 大于其临界值 $F_{0.1}(2.763)$, 阳极流量

3.3 性能优化

流场板结构和运行温度对最大功率影响显著,其他因子的影响很小。当流场板为蛇形流场板 (A_1)、

运行温度为 70°C(B₂) 时, 最大功率最优。

流场板结构和阳极流量对最高效率影响显著, 其他因子的影响很小。当流场板为蛇形流场板(A₁)、阳极流量为 0.525 SLPM(F₂) 时, 最高效率最优。

将最大功率与最高效率的最优因子相结合, 并以提高最大功率为目标设置其他因子水平, 得到最终的最优因子组合是 A₁(蛇形流场板)B₂(运行温度 70°C) C₃(阴极相对湿度 0%) D₁(阳极相对湿度 100%) E₁(阴极流量 0.263 SLPM)F₂(阳极流量 0.525 SLPM)。

在最优因子组合 A₁B₂C₃D₁E₁F₂ 下, 最大功率的预测值为

$$y_{opt} = \bar{y} + (A_1 - \bar{y}) + (B_2 - \bar{y}) \quad (2)$$

式中, \bar{y} 是实验测得的所有最大功率的平均值。有效样本容量

$$m_e = \frac{N}{1 + DOF_{opt}} \quad (3)$$

式中, N 是实验次数, DOF_{opt} 是最大功率预测公式中控制因子自由度之和。在 95% 的置信水平下, 最大功率预测值的置信区间可用 t 分布计算

$$CI = t_{\alpha}(f_e) \times \frac{S}{\sqrt{m_e}} \quad (4)$$

式中, α 是显著水平, f_e 是误差自由度, S 是合并误差的标准偏差。应用公式 (4), 最大功率预测值为 (20.394±1.329) W。采用相同的方法, 得到最高效率预测值为 16.22%±1.52%。

在最优因子组合 A₁B₂C₃D₁E₁F₂ 下进行验证实验, 实验结果如表 5 所示。

表 5 验证实验结果

Table 5 Results of confirmation experiments

实验号	最大功率/W	最高效率/%
1	17.331	14.85
2	17.991	15.14
平均值	17.661	15.00

在 95% 的置信水平下, 最大功率实验值的置信区间为

$$CI = t_{\alpha}(f_e) \times S \sqrt{\frac{1}{m_e} + \frac{1}{r}} \quad (5)$$

式中 r 是验证实验的实验次数。应用公式 (5), 最大功率实验值为 (17.661±2.223) W。采用相同的方法,

得到最高效率实验值为 15.00%±2.50%。对于最大功率和最高效率, 实验值与预测值的置信区间均有重叠部分, 说明优化是合理的。

4 结 论

本文使用正交实验法和方差分析法研究了流场板结构、运行温度、阴阳极相对湿度、阴阳极流量对质子交换膜燃料电池性能的影响, 并对电池性能进行了优化, 得到主要结论如下:

1) 流场板结构和运行温度对电池最大功率有显著影响。当流场板结构为蛇形流场板, 运行温度为 70°C 时, 电池的功率最大。

2) 流场板结构和阳极流量对电池最高效率有显著影响。当流场板结构为蛇形流场板, 阳极流量为 0.525 SLPM 时, 电池的效率最高。

3) 最优因子组合是 A₁B₂C₃D₁E₁F₂。在最优因子组合下, 最大功率的预测值为 (20.394±1.329) W, 实验值为 (17.661±2.223) W, 最高效率的预测值为 16.22%±1.52%, 实验值为 15.00%±2.50%。预测值与实验值的置信区间有重叠的部分, 说明优化是合理的。

参 考 文 献

- [1] Carton J G, Olabi A G. Design of Experiment Study of the Parameters That Affect Performance of Three Flow Plate Configurations of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. Energy, 2010, 35(7): 2796-2806
- [2] Nishimura A, Shibuya K, Morimoto A, et al. Dominant Factor and Mechanism of Coupling Phenomena in Single Cell of Polymer Electrolyte Fuel Cell [J]. Applied Energy, 2012, 90(1): 73-79
- [3] Hu M, Sui S, Zhu X, et al. A 10 kW Class PEM Fuel Cell Stack Based on the Catalyst-Coated Membrane (CCM) Method [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(8): 1010-1018
- [4] 潘丽军, 陈锦权, 王武. 试验设计与数据处理 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2008
PAN Lijun, CHEN Jinquan, WANG Wu. Experimental Design and Data Processing [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008
- [5] Kaytakoglu S, Akyalcin L. Optimization of Parametric Performance of a PEMFC [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(17): 4418-4423
- [6] Wu S-J, Shiah S-W, Yu W-L. Parametric Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance By Using the Taguchi Method and a Neural Network [J]. Renewable Energy, 2009, 34(1): 135-144