

基于正交试验的低压燃料电池性能

常国峰,倪淮生,许思传

(同济大学 汽车学院,上海 200092)

摘要: 通过对低压质子交换膜燃料电池的正交试验研究,得到如下结论:氢气的湿度与氢气的当量比对于燃料电池性能的影响较小,相对于空气的湿度、当量比以及燃料电池的工作温度而言,可以不予考虑;空气当量比对燃料电池性能的影响在 5 个运行参数中是最复杂的.它不是有固定的影响效果,而是随着工况点的变化,随着燃料电池电流大小的变化,而发生较大的变化.随着电流的增大,空气当量比对燃料电池性能的影响也增大,当电流达到较高水平时(本试验中电流达到 120A 之后),这种影响会下降.

关键词: 低压; 质子交换膜; 燃料电池; 正交试验

中图分类号: TM 911.4

文献标识码: A

Studies on Low-pressure PEM Fuel Cell with Orthogonal Test

CHANG Guofeng¹, NI Huaisheng¹, XU Sichuan¹

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on studies of low-pressure proton exchange membrane (PEM) fuel cell with orthogonal test, a conclusion is drawn that the effects on fuel cell performance by hydrogen humidity and equivalent proportion are so small that they can be neglected compared to the effects of air humidity, air equivalent proportion and fuel cell operating temperature. The effect on fuel cell performance by air equivalent proportion, the most complicated one among the five operating parameters of fuel cell, changes with the working condition of fuel cell. With the increasing of current, the effect on fuel cell performance by air equivalent proportion is strengthening. When the current reaches a higher level (120A), the impact will be weakened.

Key words: low-pressure; proton exchange membrane; fuel cell; orthogonal test

燃料电池发动机^[1-3]作为一种新型动力源,由于高效、低排放等优点,已逐渐成为最有可能替代内燃式发动机的车载发动机,目前已成为世界各大汽车商和研究机构的研发重点.同时,和传统的化学反应条件相比,燃料电池发动机所处的环境比较恶劣,汽车周围空气的温度、压力和湿度等条件随着地域、季节的变化范围很大;而燃料电池电堆对工作条件要求又比较苛刻.上述这些特点使得在进行燃料电池发动机开发时,各分系统之间的匹配和优化就显得非常重要.

在燃料电池运行过程中,需要控制很多参数,以让燃料电池能够工作在最佳的状态,但是由于工作原理的截然不同,燃料电池工作中需要控制的参数也不尽相同,很多科研工作者都在做燃料电池性能方面的研究:John Ho Koh 等^[4]对质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)中的压力和流量分布进行了数值模拟,同时研究了气体流量对电池性能的影响. Ganesh Mohan 等^[5]研究了反应气体在 PEMFC 中的分布不均等问题;在温度对 PEMFC 性能影响研究的基础上^[6-7],对电池工作压力,气体流量影响 PEMFC 性能的规律进行了试验分析和理论验证. 吴玉厚等^[8]研究了操作参数如背压、输入气体流量、输入气体加湿温度和电池温度等对 PEMFC 伏安特性和功率密度的影响; Wang Lin 等^[9]对 PEMFC 进行了参数试验,得到了不同参数下的电池性能变化趋势. 正交试验方法是利用正交表可科学地安排与分析多因素试验的方法,目前公开文献中尚未发现其在燃料电池性能研究中的应用.

1 试验方法和试验方案

在燃料电池运行过程中,就像传统发动机需要控制进气量、进气温度、喷油量等一样,也需要控制

收稿日期: 2009-08-31

基金项目: 上海市重点学科建设项目(B303)

作者简介: 常国峰(1976—),男,讲师,工学博士,主要研究方向为新能源动力系统. E-mail: changguofeng@tongji.edu.cn

很多参数,以让燃料电池能够工作在最佳的状态,但是由于工作原理的截然不同,燃料电池工作中需要控制的参数也不尽相同,需要用正交试验来分析各个参数对燃料电池性能的影响.

1.1 燃料电池运行参数

目前车用燃料电池多为 PEMFC,其工作温度影响到内部的温度分布以及催化剂效率,为一个重要参数.

另外,进行工作时,参加反应的气体是氢气和氧气,但是一般燃料电池汽车很少有采用供给纯氧来参加反应的,总是直接采用供应空气的方法;另外,由于质子交换膜燃料电池的特殊性,供应的气体都需要进行必要的加湿,以保证质子交换膜的正常工作;燃料电池供应的反应气体并不是全部消耗的,因

此,在燃料电池各种参数中,与燃料电池工作状态相关的参数有:

(1) 燃料电池工作温度

(2) 空气相关参数

温度:加湿后,燃料电池空气入口温度;流量(当量):燃料电池空气入口流量;压力:燃料电池空气入口压力,背压控制;湿度:燃料电池空气入口湿度.

(3) 氢气相关参数

温度:加湿后,燃料电池氢气入口温度;流量(当量):燃料电池氢气入口流量;压力:燃料电池氢气入口压力,减压阀控制;湿度:燃料电池氢气入口湿度.

此次试验所采用的质子交换膜燃料电池,一共由 480 片单电池组成,共分为 4 组.表 1 为它的基本工作参数:

表 1 燃料电池基本工作参数
Tab.1 Basic operating parameters of fuel cell

单电池数量/个	最大稳定输出功率/kW	电压/V	电流/A	能量转化效率/%	燃料类型	环境温度/℃	相对湿度/%	工作温度/℃	工作压力
480	40	310~480	0~200	>50	气态氢	0~50	0~95	40~65	常压

1.2 测试平台

测试平台的主要参数(见表 2)范围为:水热管理

系统主要实现冷却循环和水热平衡的功能.

表 2 测试平台参数
Tab.2 Test platform parameters

冷却水流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	冷却水温 度/℃	冷却水压力/ MPa	空气流量/ (g·s ⁻¹)	空气温度/ ℃	空气压力/ MPa	空气湿度/ %	氢气流量/ (g·s ⁻¹)	氢气温度/ ℃	氢气压力/ MPa	氢气湿度/ %
6~10	20~70	0.1~0.4	0~180	-5~80	0.09~0.32	0~100	0~4	20~80	0.1~0.32	20~100

该 100 kW 级燃料电池测试平台的构建对于燃料电池发动机的研发具有相当重要的意义和帮助,它可以对燃料电池发动机的电堆和各辅助部件进行测试.

1.3 正交试验参数表

燃料电池运行中可以调节以及需要调节的参数总共包括:燃料电池温度、反应气体(空气和氢气)的温度、压力和湿度.对于这次低压电堆的正交试验需要从中挑选出全部或部分参数进行试验,并且根据燃料电池的原理以及在文献中提及的其他燃料电池性能试验成果的基础上,进一步分析并确定各个参数的试验水平,以得到正交试验的最终设计.试验水平见表 3.

根据试验的参数个数及相应的水平数,此次正交试验将使用正交表 L18(3⁷).由于所涉及的参数总共为 5 个,因此将仅仅占用到正交表中的前 5 列,

剩余的 2 列空白列在进行试验数据处理时,可以作为两个误差列来使用(见表 4).

表 3 低压燃料电池正交试验水平
Tab.3 Orthogonal test levels of low-pressure fuel cell

因素	空气湿度/%	氢气湿度/%	空气当量	氢气当量	燃料电池工作温度/℃
水平一	65	65	2.0	1.4	50
水平二	80	80	2.5	1.7	55
水平三	95	9	3.0	2.0	60

本次低压燃料电池正交试验,拟选取 5 个比较具有代表性的工况点进行试验,这些工况点分别为:10,50,90,120 和 150 A.如果条件允许的话,增加工况点,进行更多次的试验,有利于结果精度的提高.

根据以上所定的工况点,可以计算出各工况点的空气和氢气流量值.计算得到试验中的氢气供应量见表 5.

表 4 低压燃料电池正交试验表
Tab.4 Orthogonal test data table of
low-pressure fuel cell

试验	空气湿度/%	氢气湿度/%	空气当量	氢气当量	燃料电池工作温度/℃
1	65	65	2.0	1.4	50
2	65	80	2.5	1.7	55
3	65	95	3.0	2.0	60
4	80	65	2.0	1.7	55
5	80	80	2.5	2.0	60
6	80	95	3.0	1.4	50
7	95	65	2.5	1.4	60
8	95	80	3.0	1.7	50
9	95	95	2.0	2.0	55
10	65	65	3.0	2.0	55
11	65	80	2.0	1.4	60
12	65	95	2.5	1.7	50
13	80	65	2.5	2.0	50
14	80	80	3.0	1.4	55
15	80	95	2.0	1.7	60
16	95	65	3.0	1.7	60
17	95	80	2.0	2.0	50
18	95	95	2.5	1.4	55

表 5 各工况下的氢气流量
Tab.5 Hydrogen flow rates of different conditions

电流值/A	各当量比下的氢气流量/(g·s ⁻¹)			
	1.0	1.4	1.7	2.0
10	0.05	0.07	0.09	0.10
50	0.25	0.35	0.43	0.50
90	0.45	0.64	0.77	0.91
120	0.60	0.85	1.03	1.21
150	0.76	1.06	1.29	1.51

计算得到试验中的空气供应量见表 6.

2 试验数据及分析

2.1 试验数据

根据以上设计的正交试验表,在按照正交试验

表 6 各工况下的空气流量
Tab.6 Air flow rate of different conditions

电流值/A	各当量比下的空气流量/(g·s ⁻¹)			
	1.0	2.0	2.5	3.0
10	1.71	3.43	4.28	5.14
50	8.57	17.14	21.42	25.70
90	15.42	30.84	38.56	46.27
120	20.56	41.13	51.41	61.69
150	25.70	51.41	64.26	77.11

设计表调整参数后,便可以通过电子负载(迪卡龙)的设备记录电压值了.表 7 中便为本次低压燃料电池正交试验第 1 个工况点(10 A)的试验结果记录.对于 50,90,120,150 A 的正交试验数据,由于篇幅的原因这里不再给出.

表 7 低压燃料电池正交试验工况点一(10 A)试验结果记录

Tab.7 Test result records of low-pressure fuel cell
orthogonal tests at condition point 10 A

试验	空气湿度/%	氢气湿度/%	空气当量	氢气当量	燃料电池工作温度/℃	电压/V
1	65	65	2.0	1.4	50	384.47
2	65	80	2.5	1.7	55	390.96
3	65	95	3.0	2.0	60	395.32
4	80	65	2.0	1.7	55	391.42
5	80	80	2.5	2.0	60	396.94
6	80	95	3.0	1.4	50	393.07
7	95	65	2.5	1.4	60	396.85
8	95	80	3.0	1.7	50	393.44
9	95	95	2.0	2.0	55	391.87
10	65	65	3.0	2.0	55	392.98
11	65	80	2.0	1.4	60	392.49
12	65	95	2.5	1.7	50	389.35
13	80	65	2.5	2.0	50	389.90
14	80	80	3.0	1.4	55	395.02
15	80	95	2.0	1.7	60	392.90
16	95	65	3.0	1.7	60	397.13
17	95	80	2.0	2.0	50	387.46
18	95	95	2.5	1.4	55	393.33

2.2 试验数据的方差分析

10,50,90,120 和 150 A 工况下的正交试验数据的方差见表 8~表 12.

表 8 10 A 工况点正交试验方差分析

Tab.8 Variance analysis of orthogonal tests at condition point 10 A

方差来源	离差平方和	自由度	均方(MS)	F 值	修正 F 值	临界值	显著性	优方案
空气湿度/%	22.16	2	11.08	9.27	12.58	$F_{0.01}(2,11)=7.21$ $F_{0.05}(2,11)=3.98$ $F_{0.10}(2,11)=2.86$	***	3
氢气湿度/%	1.25	2	0.63	0.53				2
空气当量	59.27	2	29.64	24.80	33.66		***	3
氢气当量	0.06	2	0.03	0.03				1
燃料电池工作温度/℃	96.08	2	48.04	40.19	54.57		***	3
总和	187.19	17						
误差	8.37	7	1.20					
修正误差	9.68	11	0.88					

注:“***”表示 $F>F_{0.10}(2,11)$,下同.

表 9 50 A 工况点正交试验处理方差分析

Tab.9 Variance analysis of orthogonal tests at condition point 50 A

方差来源	离差平方和	自由度	均方(MS)	<i>F</i> 值	修正 <i>F</i> 值	临界值	显著性	优方案
空气湿度/%	16.03	2	8.02	10.99	14.48	$F_{0.01}(2,11)=7.21$ $F_{0.05}(2,11)=3.98$ $F_{0.10}(2,11)=2.86$	***	3
氢气湿度/%	0.58	2	0.29	0.40				1
空气当量	67.73	2	33.86	46.41	61.19		***	3
氢气当量	0.40	2	0.20	0.28				2
燃料电池工作温度/℃	125.99	2	63.00	86.34	113.83		***	3
总和	215.84	17						
误差	5.11	7	0.73					
修正误差	6.09	11	0.55					

表 10 90 A 工况点正交试验处理方差分析

Tab.10 Variance analysis of orthogonal tests at condition point 90 A

方差来源	离差平方和	自由度	均方(MS)	<i>F</i> 值	修正 <i>F</i> 值	临界值	显著性	优方案
空气湿度/%	22.35	2	11.18	6.66	9.13	$F_{0.01}(2,11)=7.21$ $F_{0.05}(2,11)=3.98$ $F_{0.10}(2,11)=2.86$	***	2
氢气湿度/%	0.36	2	0.18	0.11				3
空气当量	252.23	2	126.11	75.13	103.02		***	3
氢气当量	1.36	2	0.68	0.40				3
燃料电池工作温度/℃	46.36	2	23.18	13.81	18.93		***	3
总和	334.41	17						
误差	11.75	7	1.68					
修正误差	13.47	11	1.22					

表 11 120 A 工况点正交试验处理方差分析

Tab.11 Variance analysis of orthogonal tests at condition point 120 A

方差来源	离差平方和	自由度	均方(MS)	<i>F</i> 值	修正 <i>F</i> 值	临界值	显著性	优方案
空气湿度/%	31.21	2	15.61	7.10	8.95	$F_{0.01}(2,9)=8.02$ $F_{0.05}(2,9)=4.26$ $F_{0.10}(2,9)=3.01$	***	2
氢气湿度/%	0.31	2	0.15	0.07				3
空气当量	225.81	2	112.90	51.34	64.72		***	3
氢气当量	4.86	2	2.43	1.11	1.39			2
燃料电池工作温度/℃	43.04	2	21.52	9.79	12.34		***	3
总和	320.63	17						
误差	15.39	7	2.20					
修正误差	15.70	9	1.74					

注:“***”表示 $F>F_{0.10}(2,9)$.

表 12 150 A 工况点正交试验处理方差分析

Tab.12 Variance analysis of orthogonal tests at condition point 150 A

方差来源	离差平方和	自由度	均方(MS)	<i>F</i> 值	修正 <i>F</i> 值	临界值	显著性	优方案
空气湿度/%	27.76	2	13.88	4.79	6.43	$F_{0.01}(2,11)=7.21$ $F_{0.05}(2,11)=3.98$ $F_{0.10}(2,11)=2.86$	**	2
氢气湿度/%	1.86	2	0.93	0.32				3
空气当量	229.75	2	114.87	39.65	53.25		***	3
氢气当量	1.59	2	0.79	0.27				2
燃料电池工作温度/℃	49.47	2	24.74	8.54	11.47		***	3
总和	330.71	17						
误差	20.28	7	2.90					
修正误差	23.73	11	2.16					

注:“**”表示 $F_{0.10}(2,11)<F<F_{0.05}(2,11)$.

3 数据分析

首先讨论一下各个试验参数对于燃料电池性能的影响大小. 在试验结果中, 对于燃料电池性能的影响大小可以由计算得到的 F 值来确定. 通过试验结果可以看到, 氢气湿度与氢气当量对于燃料电池性能的影响始终较小, 影响很不显著; 空气湿度的影响略大一些, 燃料电池工作温度的影响更大一些, 空气湿度与燃料电池温度的影响在电流升高时, 相对变化较小, 影响比较稳定; 空气当量对于燃料电池性能的影响在不同工况下的大小有很大的变化, 空气湿度、燃料电池工作温度以及空气当量对于燃料电池性能的影响是显著的, 其中, 以空气湿度的影响为最小.

3.1 氢气

对于 5 个不同的工况点:

氢气湿度的 F 值分别为: 0.53, 0.40, 0.11, 0.07, 0.32; 氢气当量的 F 值分别为: 0.03, 0.28, 0.40, 1.39, 0.27.

这样的对于燃料电池性能(标准为输出电压)的影响力, 与其他 3 个参数比较下来, 可以说是非常小的, 因此, 可以得到的结论是: 氢气的湿度与氢气的当量比对于燃料电池性能的影响较小, 相对于空气的湿度、当量比以及燃料电池的工作温度而言, 可以不予考虑.

上述的结论与理论分析的结果一个非常吻合, 另一个则有较大的出入.

首先, 关于氢气当量比的影响不大, 这与理论分析比较吻合. 由于氢气侧使用的是纯氢气, 因此氢气流量的变化只对于氢气燃料的供应量有直接关系, 而流量的变化对于氢气的分压力影响几乎没有; 在供应了足够进行氢氧反应的氢气量之后, 供应量的增大与燃料电池性能的关系就很小, 而与燃料电池性能有较大关系的氢气分压力在氢气流量变化时, 变化也不大, 因此间接的对于燃料电池性能的影响也很小. 因此, 氢气当量的试验结果与以上的理论分析结果相当一致.

其次, 关于氢气湿度的影响不大, 这与理论分析的有较大出入. 根据理论分析中所认为的, 由于质子在穿透质子交换膜从阳极到阴极的迁移过程中需要与水结合, 会将水由阳极氢气侧带到阴极空气侧, 因此阳极氢气侧的水会由于不断地迁移而减少, 因此氢气侧的加湿很重要, 而阴极空气侧相对来说, 由于水从阳极迁移到阴极以及在阴极侧氢氧反应生成水

这两部分的补充, 加湿要求相对较低. 但是从试验结果看, 阴极侧加湿的影响远大于阳极氢气侧的加湿. 因此, 对于该试验可以认为可能是由于以下原因造成的:

(1) 由于该燃料电池是一个低压燃料电池, 功率密度较小, 故氢氧反应进行的速度不快, 又由于质子迁移带动的水迁移流量并不大, 同时由于水分布在质子交换膜两侧存在一定的梯度, 也会由阴极侧向阳极侧发生反扩散, 因此在阳极到阴极的水迁移与阴极向阳极的水扩散速度相差不大的情况下, 并没有在阳极氢气侧发生较严重的脱水问题.

(2) 由于相似的原因, 在氢气侧加湿条件变化的情况下, 水由于分布梯度造成的扩散会由于水分分布梯度的变化而调整, 这在一定程度上对阳极氢气侧的湿度状况形成了一种反馈控制, 即湿度加大时, 水会更更多地从阳极侧渗透到阴极侧, 而在湿度降低时, 水则会更多地由阴极侧渗透到阳极, 因此大大地减少了由于阳极氢气侧的加湿条件变化造成的燃料电池性能的变化.

(3) 由于氢气侧的流量要远小于空气的流量, 因此, 由于气体加湿而携带的水量也远小于空气, 这就造成在影响水的分布梯度时, 氢气侧携带的水的影响要远比空气侧所携带水的影响小.

所以, 正交试验中所得到的试验结果与之前的理论分析有较大的区别. 在没有较可靠的水分分布理论之前, 很难对湿度究竟如何在燃料电池内部产生影响有更可靠的分析.

3.2 空气

对于 5 个不同的工况点, 空气当量比的 F 值分别为: 33.66, 61.19, 103.02, 64.72, 53.25.

通过以上数据可以看到, 空气当量比对燃料电池性能的影响在 5 个运行参数中最复杂的. 它不是有固定的影响效果, 而是随着工况点的变化, 随着燃料电池电流大小的变化, 而发生较大的变化. 总体的趋势是, 随着电流的增大, 空气当量比对燃料电池性能的影响也增大; 但是也可以看到, 当电流达到较高水平时(本试验中电流达到 120A 之后), 这种影响还是下降了. 这样的试验结果, 可以从以下几个方面来解释.

首先, 空气当量比对性能的影响, 根据之前的理论分析可以认为, 主要发生在浓度极化作为电池电压损失的主要控制时, 体现在氧气分压力的变化上. 所谓浓度极化也就是浓度损失, 是由燃料在使用时, 电极表面反应物的浓度发生变化而导致的. 由于气

体在流道中流动时,气体的浓度由于消耗会逐渐降低,因此会逐渐形成一个浓度梯度,即氧气份压力存在梯度.在浓度较小的地方由于氧气份压力小,会影响到燃料电池的性能,而空气当量比正是减少这种损失的相当有效的方法.

其次,随着电流的增大,气体的消耗量也随之增大,因此,所产生的浓度分布梯度也相应地增加.这样,浓度损失在燃料电池性能影响中的重要性在提高,于是,对于有效克服这种损失的空气当量比而言,其值的改变对于燃料电池性能的影响,也会随之增大.

最后,对于在大电流密度下,空气当量比的影响又有所减小,可能是由于参数之间交互的影响.由于气体流量的增加,使单位时间内气体带入电池内的水量增多,在水无法有效地排除情况下,流道中的液态凝结水,势必会影响气体在扩散层中的扩散,这对于性能的副作用,与提高流量对于性能的积极作用,相互之间抵消了一部分,使得空气的当量比对于性能的影响减小了.

4 结论

(1) 氢气的湿度与氢气的当量比对于燃料电池性能的影响较小,相对于空气的湿度、当量比以及燃料电池的工作温度而言,可以不予考虑,如表 13 所示.

表 13 低压燃料电池不同因素影响大小排序
Tab.13 Sorting by effect degree of different factors on fuel cell

电 流 值/A	不同因素				
	空气湿度	氢气湿度	空气当量	氢气当量	工作温度
10	3	4	2	5	1
50	3	4	2	5	1
90	3	5	1	4	2
120	3	5	1	4	2
150	3	4	1	5	2

(2) 空气当量比对燃料电池性能的影响在 5 运行参数中是最复杂的.它不是有固定的影响效果,而是随着工况点的变化,随着燃料电池电流大小的变化,而发生较大的变化.总体趋势是,随着电流的增大,空气当量比对燃料电池性能的影响也增大;但是也看到,当电流达到较高水平时(本试验中电流达到 120 A 之后),这种影响还是下降了.

参考文献:

[1] Moore R M, Hauer K H, Randolph G, et al. Fuel cell hardware-in-loop[J]. Journal of Power Sources, 2006(162): 302.

[2] Santarelli M G, Torchio M F. Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC [J]. Energy Conversion and Management, 2007(48): 40.

[3] Yerramall S, Davari A, Feliachi A, et al. Modeling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2003(124): 104.

[4] John Ho Koh, Hai Kyung seo, Chong G L, et al. Pressure and flow distribution in internal gas manifolds of a fuel cell stack [J]. Journal of Power Sources, 2003(115): 54.

[5] Mohan G, Prabhakara R B, Sarit Das K. Analysis of flow maldistribution of fuel and oxidant in a PEMFC[J]. Transactions of the ASME, 2004, 126(12): 262.

[6] 孙佳, 郭桦, 陈士忠, 等. 温度对 PEM 燃料电池性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(3): 518.

SUN Jia, GUO Hua, CHEN Shizhong, et al. Effect of temperature on performance of PEM fuel cell[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006, 22(3): 518.

[7] Barbir F, Gorgun H, Wang X. Relationship between pressure drop and cell resistance diagnostic tool for PEM fuel cells[J]. Journal of Power sources, 2005(141): 96.

[8] 吴玉厚, 张勇, 孙红, 等. PEM 燃料电池操作性能的试验研究 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2005, 21(4): 395.

WU Yuhou, ZHANG Yong, SUN Hong, et al. Experimental investigation of operating performance of PEM fuel cell [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2005, 21(4): 395.

[9] Wang Lin, Attlia Husar, Zhou Tianhong, et al. A parameter study of PEM fuel cell performances [J]. Inter J Hydrogen Energy, 2003(28): 1263.