

质子交换膜燃料电池单体电压均衡性研究综述

戴朝华¹, 史青¹, 陈维荣¹, 李艳昆², 刘志祥¹, 李奇¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 610031;

2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东省 青岛市 266111)

A Review of the Single Cell Voltage Uniformity in Proton Exchange Membrane Fuel Cells

DAI Chaohua¹, SHI Qing¹, CHEN Weirong¹, LI Yankun², LIU Zhixiang¹, LI Qi¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China;

2. CSR Qingdao Sifang CO., LTD, Qingdao 266111, Shandong Province, China)

ABSTRACT: The single cell voltage uniformity of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack is one of the key factors and main technical parameters for the design, manufacture and operation control because the voltage uniformity reflects and affects the output performance and lifetime of PEMFCs. Due to the single cell voltage uniformity dominated by several factors, the existing uniformity researches were overviewed from six aspects, including the evaluation methods, the materials and structures, the operational parameters, loads, system control and life cycle. Meanwhile, the influence mechanisms of the above-mentioned six aspects on the voltage uniformity were summarized in detail. Finally, the corresponding suggestions and prospects were made for the future development of the fuel cell uniformity researches which will benefit the developments and applications of vehicle fuel cell technologies in China.

KEY WORDS: hydrogen energy; proton exchange membrane fuel cell; single cell voltage uniformity; performance; durability

摘要: 质子交换膜燃料电池单体电压均衡性直接反映并影响整个电堆的性能和寿命, 因此是燃料电池系统设计、制造及其运行控制的关键因素与重要技术指标。由于燃料电池电堆的单体电压均衡性受多种因素制约, 该文从单体电压均衡性的评价方法、材料与结构、运行参数、负载、系统控制、寿命周期等6个方面, 对现有燃料电池单体电压均衡性研究进行综述, 并对其均衡性影响机理进行归纳总结。最后, 对燃料电池电压均衡性研究的未来发展做了相应建议和展望, 希望对我国车载燃料电池技术的发展与应用有所裨益。

关键词: 氢能; 质子交换膜燃料电池; 单体电压均衡性; 性能; 耐久性

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177138, 51307144); 国家科技支撑计划项目(2014BAG08B01)。

The National Natural Science Foundation of China (51177138, 51307144); National Key Technology R&D Program (2014BAG08B01)。

0 引言

车用燃料电池耐久性是制约其商业化的主要技术挑战之一^[1-2]。现有研究表明, 车辆动态工况是引起车载燃料电池寿命降低的最主要原因之一^[3]。由于在动态工况下, 燃料电池单体电池性能及电压之间存在严重的不一致特性, 甚至出现反极化现象。若单体性能差异过大, 电堆的性能会受状态最差的单体所制约, 存在木桶效应^[4], 影响整个电堆的稳定性和寿命。局部单体电压过低, 电化学反应加快, 将导致局部电流密度过高, 引起局部出现“热点”, 导致电池永久损坏甚至引发安全问题^[5-6]。因此, 燃料电池单体电压均衡性是反映燃料电池运行性能和寿命的重要指标^[7], 在车载燃料电池领域受到越来越多的关注。

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 单体均衡性是由多个因素共同作用导致的, 表现出复杂的多尺度动态耦合特性。以解决会引起燃料电池单体电压不一致的水淹问题为例, 由于 PEMFC 运行参数, 如水热管理、气体流量、增湿程度、电流密度等都对水淹具有影响, 并且各因素之间存在着复杂的非线性耦合性, 单纯脉冲排气法解决水淹的效果并不理想^[8], 需要结合氢气循环泵、背压阀、空压机及其旁路阀、甚至气体加湿、热管理系统、负载电流请求管理等, 实现多尺度耦合控制。由此可见, 燃料电池系统单体电压一致性十分复杂, 非常有必要对此开展系统深入研究。

但是, 目前国内外研究主要集中在开路和稳态下单体电压一致性的实验测试^[7,9-14], 仍缺乏系统深

入的相关研究,尤其是对车载燃料电池动态一致性及其建模、控制等的相关研究还很少,很有必要对燃料电池单体均衡性的现有研究进行梳理、总结和归纳,推动相关研究发展进程,这也是本文的初衷。本文首先对电压均衡性的评价指标和方法进行介绍;然后,对影响单体电压均衡性的因素进行归纳和分析,包括:电堆材料与结构、运行参数、负载、辅助系统及控制策略、寿命周期等。最后,总结了单体电压均衡性的影响机理,并对车载燃料电池电压均衡性研究的发展趋势进行总结与展望。

1 单体电压均衡性的评价方法

目前,评价 PEMFC 单体电压均衡性的方法有很多种,主要包括如下4种。

1.1 单体电压波动率

单体电压波动率是单体电压的相对标准偏差,即单体标准偏差与单体电压平均值的比值:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (V_j - \bar{V})^2}{N \bar{V}^2}} \quad (1)$$

式中: N 为单体个数, $V_j (j=1, 2, \dots, N)$ 为单体电压; \bar{V} 为单体平均电压。

电压波动率越大,说明单体电压偏移电压平均值越大,电压均衡性越差;反之,说明单体电压偏移平均值越小,电压均衡性越好。

1.2 单体电压均方根值

单体电压均方根值反映了各单体电压的离散程度,是各单体电压偏离平均电压距离的平均值:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} \quad (2)$$

单体电压均方根值越大,说明单体电压波动越大;相反,说明单体电压波动越小。

1.3 单体电压波动幅值

单体电压波动幅值反映单体电压波动的大小,是单体最大电压 V_{\max} 与单体最小电压 V_{\min} 的差值:

$$\Delta V = V_{\max} - V_{\min} \quad (3)$$

单体电压波动幅值越大,说明单体均衡性越差;反之,单体均衡性越好。但是,单体电压波动幅值相同,其单体电压均衡程度不一定相同。

1.4 图形法

图形法即将电堆中所有单体电池的电压数值绘制成折线图,直观查看单体电压的分布情况,从而反映单体电压的均衡性。目前,图形法很难应用

于信息化、自动化系统,而且当电堆中单体数较大且电压较为接近时,很难准确定量判断。

2 电堆材料与结构设计对单体电压均衡性的影响

燃料电池单体电压分布的差异性是客观存在的,但是这种差异可以通过提高电堆材料与结构的设计水平,改善其传导性以及温度、气流分布的均匀性,从而使电压均衡性得到优化。王诚等^[15]系统地梳理了近几年车用燃料电池质子交换膜、催化层、气体扩散层、双极板关键材料部件的研究进展和成果,并分类进行了简要评述,表明未来车用燃料电池关键材料和部件的创新研究,应结合实际车况下的衰减机理和失效给出对应策略。而其衰减机理与失效都与其单体电压均衡性息息相关,有着密不可分的联系。

质子交换膜与催化层可构成三合一膜电极组件,进一步与气体扩散层可构成五合一膜电极组件。膜电极是 PEMFC 的核心部件,是能量转换的多相物质传输和电化学反应场所,决定着 PEMFC 的性能、寿命以及成本。对于膜, Fang-Bor Weng 等^[16]对 Nafion 117 和 112 进行了比较,发现当使用 Nafion 112 (其质子传导性更好),即使在更低的温度和气体化学计量系数下,都具有更好的均衡性,且在进气口为逆向时更均衡稳定。对于催化剂,目前普遍采用 Pt 或 Pt 合金,为扩大其活化表面积,往往将纳米级的 Pt 催化剂颗粒附着到碳粒上,称为 Pt/C 催化剂,再将碳粒粘附在作为气体扩散层的碳纸或碳布上;或直接将 Pt 颗粒作为涂层,粘附到质子交换膜表面。Pt 颗粒的流失、迁移、团聚和长大均会造成催化层的活性面积减小^[17],导致单体性能衰减,表现出不一致的性能,影响其电压均衡。P. Ferreira-Aparicio 等^[18]研究了 Pt 衰减与电势的关系,其研究表明,在开路电压(如 0.95 V)下 Pt 的衰减比负荷时(如 0.75 V)的衰减更大;并在 1.0~0.6 V 的电压区间进行 10000 次循环的加速测试之后,通过透射电子显微镜观察到 Pt 颗粒长大。

对于气体扩散层, Litster^[19]指出通过憎水处理后, Pt 附载较低且利用率高,离催化层和质子交换膜更近,能有效防止分层现象发生,更重要的是其性能得到提升。通常一个由许多单体组成的电堆就是将许多膜电极组件夹在双极流场板之间,双极流场板的主要作用是分隔并均匀导入反应气体、收集并传导电流、支撑膜电极、促进散热和排水等。

王海鹏等^[20]归纳了目前常见的石墨、金属以及复合材料等双极板的研究进展,认为最具潜力的是金属材料,但金属板由于密度高、质量大、容易被腐蚀和表面钝化,会导致内阻急剧增大,因此金属表面改性是制作金属双极板材料的最佳途径。

双极流场板的结构设计会导致单体内部气体分布的不均匀,进而导致电流密度的分布不均,产生局部过热、膜溶胀以及水淹等现象,从而引起单体性能的衰减或失效,使单体电压产生较大的波动,导致电压均衡性恶化。

王乐萍^[21]总结了点状、网状、多孔体、平行沟槽、蛇形等目前典型流场设计的优缺点,其结构形状如图1所示。点状(如图1(a))结构简单,反应气流很难达到较高的线速度,不利于排出液态水,因此很少采用。多孔体流场(如图1(b))和网状流场(如图1(c))在反应气体通过时,易形成局部湍流而有利于扩散层的传质,减小浓差极化。但因为其反应气体的分布并不均匀,因此仅可用于低电流密度的小电池或单体的设计。平行流场(如图1(d))具有较低的流体阻力,要求减小每个流道中的质量流,并以更小的压降来提供更多的均匀气体分配。若以空气作为氧化剂,当连续工作时,阴极所产生的水在长时间工作后形成累积,阻塞部分流道,导致剩余流道反应气体的重新分配,且各流道中的水量可能各不相同,这将导致气体分配不均,出现单体电压下降及不稳定、不一致现象。这种设计的另一个问题是流道短,方向变化少,结果是流道中的压降低,但管道系统中的压降和对分配歧管装置中的压降可能相对较高,导致靠近歧管装置入口处的最初少数几个电池将比靠近歧管装置末尾处的各电池拥有更大的流量,从而出现单体电池电压不一致现象。蛇形流道(如图1(e))在反应气体进出口的两端具有较大的压差,因此具有较佳的排水性能。其缺点是流经整个流道时反应物被耗尽,因此必须提供适当数量的气体,以避免过度的极化损失。当燃料电池长时间工作时,阴极生成的水不断积累,需要及时排出流道。当在燃料电池电极表面进行流体分配时,这种设计是比较有效的。不过,同时可能会因为流道比较长而引起大的压力损失。多蛇形流场相对单蛇形流场来说,大大降低了压力损失。但是这种设计的每个流道较长,因此单体电池内每个流道的气体浓度分布很不均匀,可适度增加流道数目而形成多通道蛇形流场,如图1(f)所示。多通道蛇形流场是由 Nam 等^[22]提出用于改善特定单体电池

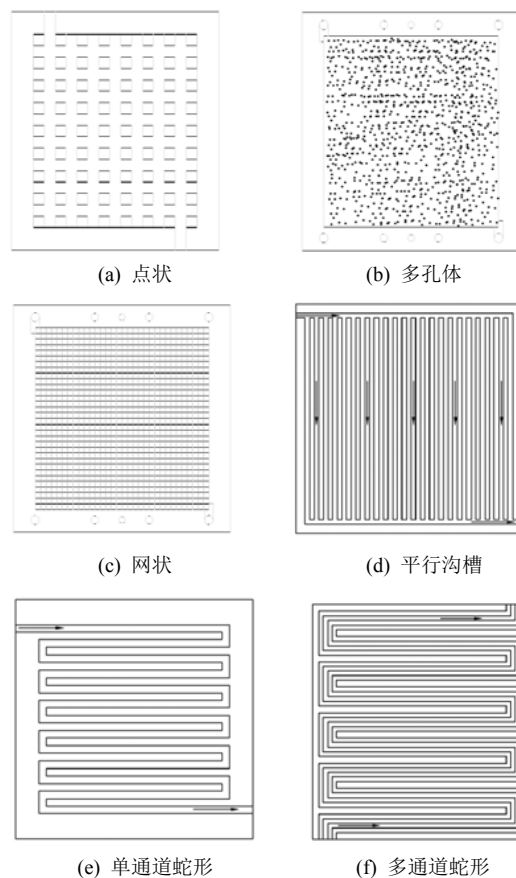


图1 PEMFC 典型流场设计

Fig. 1 Typical flow field design of PEMFC

区域的对流,结果表明,相比于传统蛇形流场结构,流场中几个连续的流道可以限制压降,也不会由于水的积累而影响阴极表面的反应活性,为高对流强度下的均衡起到了显著效果。

此外, Zhixiang Liu^[23]提出通过优化流场设计来实现更好的单体水管理:在入口处,更多的平行流道可使气体流速慢下来,增加水含量;出口区域,减少流动通道可加速流量,有利于排水。Shimpalee 等^[24]的研究表明,通道截面尺寸随通道路径长度变化,其性能和流场的均匀性具有相同的反应区,且在固定的条件下,较浅的流道出口比较浅的流道进口具有更加均匀的流场分布^[25]。针对由于反应效率低导致平行通道流体分布不均的问题, Zhang W 等^[26]建立了“Z”型和“U”型进气方式的优化模型,优化结果表明,通过改变通道的几何尺寸可以使单体气流的分布更为均匀。Mingruo Hu 等^[27]对比了“Z”型与“U”型的进气结构,对于“U”型,不同的单体进气口与出气口的压差是不同的,且进气口和出气口在同一个端板上,因此集成进气口和出气口的一端气体更多;而“Z”型结构的进气口和出气口在不同的端板上,电堆内单体进出口的压差值分布更为均匀,其电压均衡性优于“U”型进气方式。Kloessa

等^[28]和 Chen 等^[29]开发了仿生流道设计(采用叶片设计和肺设计),通过数值模拟和实验测试表明,在相同的操作条件下相比传统的并行流场设计,仿生设计能更好地改善性能,其原因是由于通过叶子或肺的设计,从进口到出口压降较低,扩散到气体扩散层的气流更均匀。Xinting Wang 等^[30]设计了一种新的双极板,用液压油进行密封,通过提高电堆有效活化面积上的压力分布并使之分布更加均匀,有效提高电池的性能。李桦^[31]在传统进气方式基础上提出一种分流式进气方式,通过一条副流道将干燥的阴极反应气体分为两部分,一部分直接通入阴极流道后期的某个固定位置,以降低阴极流道后期的液态水含量,另一部分则经过完全加湿后,直接通入阴极流道,以满足流道前期膜的保湿要求,通过调节分流流量以及副流道进气位置可以改善局部电流密度分布的均匀性,提高单体电压均衡性。

Hong Liu 等^[32]研究了不同的分叉流道对其气流分配均匀性能的影响,结果表明尖角分叉流道不能均匀分配气流,而圆角分叉流道则具有更均匀的气流分布。同时还比较了相同雷诺数下,直角、尖角、圆角等3种流场的气流分布均匀性;随着雷诺数的增加,流道之间的速度差异都变得更大,其中圆角流场的均匀性明显优于尖角,两者的流场形状实物图与 CFD 图如图 2 所示,对应流量均衡性如图 3 所示。由于偶数通道分叉影响其气流实际线速度的对称性,因此在流到下一个分叉点前,有着 90°转角区域的流场结构更加有利于获得对称性更好的线速度,且流道从 90°后转向下一个分支流的直线段长度与宽度对均匀性分布有很大的影响。通常较长的流道有利于气流分布的均匀性,流道上游的

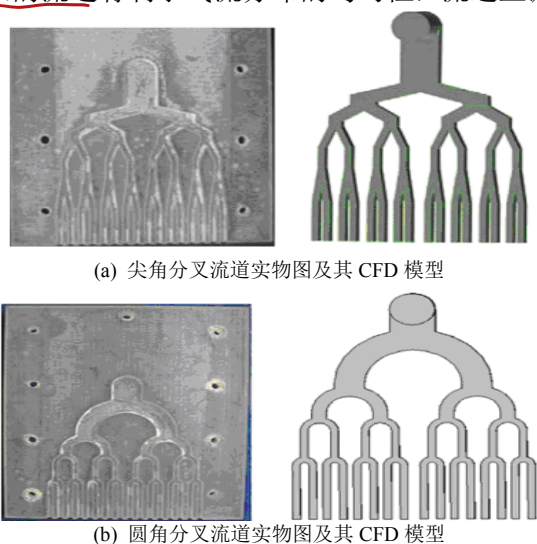


图2 分叉流道实物图及其 CFD 模型

Fig. 2 Physical maps and CFD of bifurcation flow

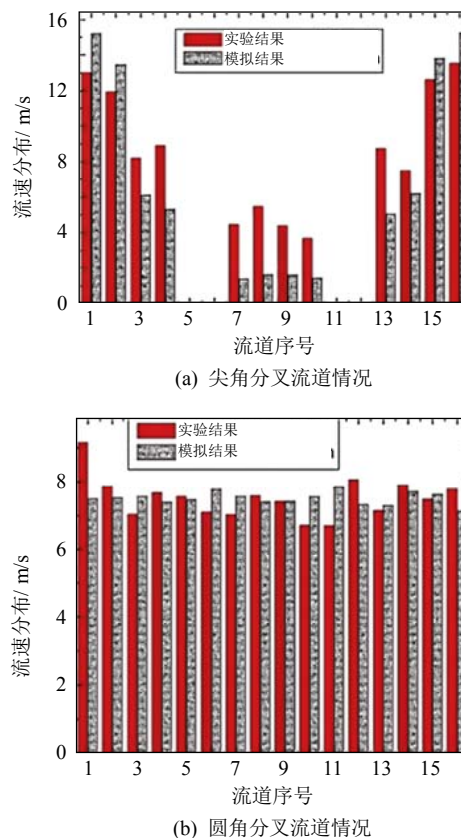


图3 分叉流道的流速均衡性

Fig. 3 Velocity uniformity of bifurcation flow

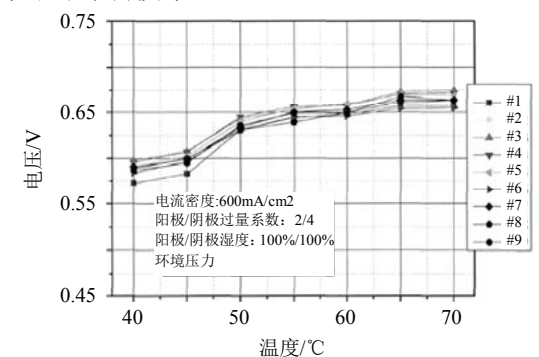
雷诺数大于下游,就要求上游流道长度和宽度的比例更大。由于曲率对流道的 90°转角区域和转角有影响,曲率越小,其相对压力损失较低,有利于气流分布的均匀性。

3 运行参数对单体电压均衡性的影响

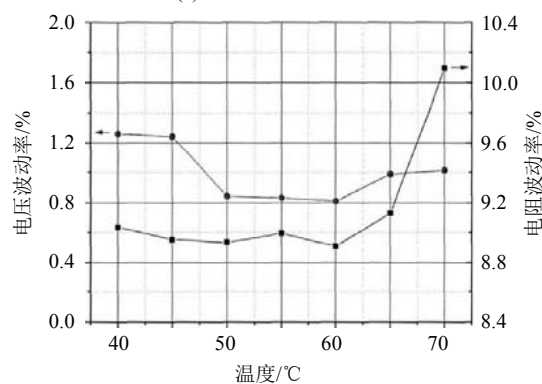
3.1 温度对单体电压均衡性的影响

由于活化能和各种物质传输从某种程度上都依赖于温度,很显然温度对燃料电池的性能有显著的影响。Hong Sun 等^[33]发现温度分布是不均匀的,对于高温 PEMFC 而言,是沿着反应物流动的方向温度降低。Wenhua H. Zhu^[9]发现距 PEMFC 堆空气进口处最远的单体电压较其平均电压低,主要是由于气体的分配不均、水淹和电堆的反应温度过低所造成的。H. I. Lee 等^[34]和 S. Giddey 等^[10]发现电堆中间的单体温度较两边的高,前者是通过研究了一个无加热装置的电堆各单体的温度,认为温度是引起电堆单体电压不均衡的主要原因。Yong Hun Park 等^[11]和 Jer-Huan Jang 等^[35]在实验中也发现了中间处的单体电压最低的情况,认为是由于中间温度高使电解质膜变得干燥,另外一方面是由于各单体间的气体的分配不均。Wenhua H. Zhu^[9]还发现靠近空压机的单体与其他单体电压相比压降更大,其原因

可能是由于气体分布或空压机侧反应温度更低引起的。Paul Rodatz 等^[36]也认为单体电压变化与电池温度分布紧密相关,尤其是会影响电堆内传质:不均匀的温度分布会增大流道中的冷却液和空气所受的阻力,导致膜电阻变化并形成局部热点。M. Perez-Page 等^[37]研究了单体电压均衡性与温度的关系,结果表明当燃料电池堆工作温度 70℃ 时,其单体的电压分布相比于 40℃ 变得更加均衡,其原因是温度增加后质子交换膜的电导率增加,有利于物质传输。齐基^[38]测试了电堆温度逐渐升高时单体均衡性的变化情况,如图 4 所示。随着温度升高,单体电压均衡性先逐渐变好,这主要是由于电堆温度的升高,质子交换膜的电导率增加,电堆各单体电池内阻的差异性减小;当温度继续升高到一定值后,单体均衡性又逐渐变差,可能是由于温度的分布不均,有的单体膜处于失水状态,引起内阻的波动较大。针对温度分布不均,R.G.Fellows^[39]提出了一种在负载变化时,调整冷却水的流量来减小温度分布不均匀的专利技术。



(a) 温度对单体电压的影响



(b) 温度对电压波动率的影响

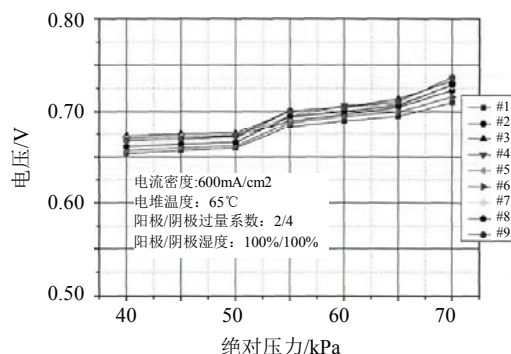
图 4 温度对单体电压均衡性的影响

Fig. 4 Effect of temperature on cell voltage uniformity

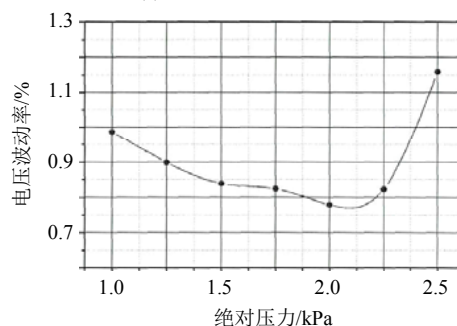
3.2 压力对单体电压均衡性的影响

压力对电堆单体电压均衡性影响很大:一方面,随着反应气体压力的增加,电堆进出口间的压力差减小,能够改善反应气体的传质,减小浓度损失,使各单体电池的电压分布更加均匀;另一方面,

当反应气体的压力达到一定值时,电堆进出口间的压力差减小会影响气体的线速度,不利于电池内过量的液态水的排出,从而使单体的电压分布不均匀。Jer-Huan Jang 等^[40]通过测试 54 和 85 kPa 下的单体电压,发现提高压力能够缓解单体电压的波动。C.A.Reiser^[41]通过使用一个或多个风机来增加进口空气的压力,从而改善反应气体的传质,使单体电压更加均匀。P.C. Ghosh^[42]观察到随着进口压力的增加,出口附近的单体性能变好,单体电压从 586 mV 上升到 635 mV。Tatyana V. Reshetenko^[43]通过 EIS 数据证实了压力对电池性能与过电压的影响,由于压力增加后减小其活化过电压、浓差过电压与扩散过电压,所以单体与电堆整体性能及其均匀性都有所提高,但是同时出口区域在高电流密度下可能引起性能损失甚至造成电池退化问题。齐基等^[38]研究了不同反应气体的进口压力与单体均衡性的关系如图 5 所示,单体电压随着反应气体进口压力的升高而增加,这主要是由于进口压力升高能够改善反应气体通过电极扩散层向催化层的传质,减小浓度极化,但当压力增加到一定值后单体电压均衡性又急剧恶化。



(a) 压力对单体电压的影响



(b) 压力对电压波动率的影响

图 5 压力对单体电压均衡性的影响

Fig. 5 Effect of pressure on cell voltage uniformity

3.3 湿度对单体电压均衡性的影响

反应气体的湿度直接影响质子交换膜的湿润状态:当湿度较低时,质子交换膜干燥,质子导通能力低,电化学反应进行困难;当反应气中水汽含

量充足时,电导率增加,电压均衡性变好。Jang等^[35]发现电压偏差值会随着燃料湿度的增加而减小,是因为燃料的湿度增加会减小单体内部的阻值,特别是在电堆中间的单体。D.T. Santa Rosa^[44]检测单体电压分布时发现第一片单体电压明显低于其他单体,是由于通入干燥氢气第一片单体内部的湿度条件低于其它单体电池。Francesco Urbani等^[45]研究了调节阴阳极湿度对于电池性能的影响,结果表明相较于调节阳极湿度,阴极湿度对输出性能有更为显著的影响,且在70%的相对湿度下电池性能最优。D. Natarajan等^[46]通过增加加湿温度,导致电池内部电极发生水淹,性能下降。齐基^[38]的测试表明,随着湿度的增加,电压均衡性先变好后变坏,如图6所示。当湿度增加时,电解质膜得到充分的水合,电导率增加,电压均衡性变好,当湿度继续增加时,一方面由于温度的分布不均,引起各单体间湿度的差异,单体电压分布变得不均匀;另一方面可能由于单体内部的水管理失衡而出现水淹现象,使单体电压的分布变得不均匀。马晓军等^[47]对空冷式 PEMFC 进行湿度动态控制,通过让湿度在阈值范围内周期性变化,解决了燃料电池内部湿度均匀性的问题。

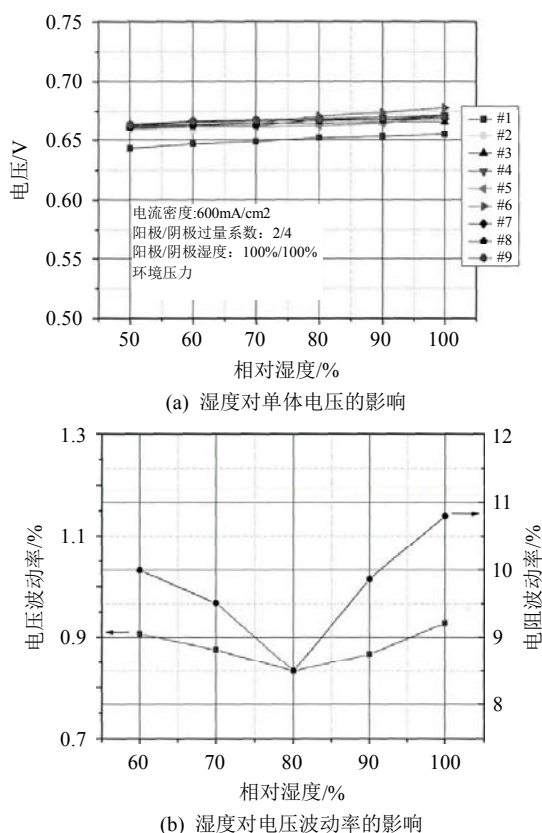


图6 湿度对单体电压均衡性的影响

Fig. 6 Effect of humidification on single cell voltage uniformity

3.4 气体流速对单体电压均衡性的影响

气体流速与单体内的水气传输息息相关,提高气体流速能使有效到达催化剂层的气体量增多,气体利用率与气体浓度提高,使电化学反应更充分,提高单体电压。Zhixiang Liu等^[22]测试了单体电流分布对于空气计量系数变化的依赖,实验发现气流速率提高,气体入口区域的单体电流密度降低,而电堆中部与靠近出口区域电流密度增加。在电堆内发生水淹的区域内,较大的空气流量将改善液态水的排除和减轻 MEA 水淹现象。但对于没有发生水淹的区域,较大的空气流量将加快膜的干燥,因此对电池的性能存在一个最佳的空气流量。Cheng Wang等^[48]测试了不同气体流速对5kW PEMFC电堆的影响,表明通过提高空气流速可以提升电堆的性能。P.C. Ghosh^[42]也同样观察到空气过量系数增加促使电池性能更加均匀,尤其是单体出口区域。而 Tatyana V. Reshetenko^[43]观察了氢气过量系数在低电流密度下对单体性能仅有轻微的影响,但在高电流密度下入口处和出口处的单体性能降低,是由于阴极到阳极的氮穿越引起的质量传输过电压增大。Jer-Huan Jang等^[35]研究了不同气体过量系数对单体电压均衡性的影响,发现其电压均衡性与输出性能都会随着阴极空气过量系数的增加而提高,但是相较于阴极,提高阳极氢气过量系数对单体和电堆性能的影响不明显。G. Squadritol等^[49]研究一个10片的短堆在两种不同空气流速下单体电压均衡性的情况如图7所示,当空气的流速从0.522m³/s增加到0.624m³/s时,单体电压的分布变得更加均匀。这是由于不合理的进气速度会引起电堆中各单体的气体流量分布不均匀,导致电压均衡性恶化。

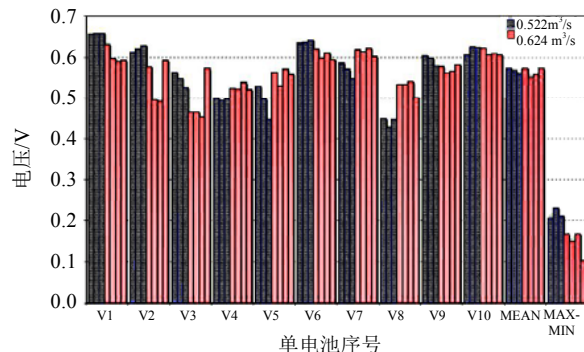


图7 空气流速对单体电压均衡性的影响

Fig. 7 Effect of gas velocity on single cell voltage uniformity

3.5 阴阳极压差对单体电压均衡性的影响

现有大多数动力型 PEMFC 电堆,会要求电堆阳极和阴极气体入口压力保持平衡,或阳极氢气入

口的压力要稍高于阴极空气入口的压力值。S.S. Kocha 等^[50]发现在电堆运行时, 保持稍大的阳极氢气与阴极空气入口压差, 有利于减小电堆内部的氮穿越速率, 防止氢气浓度的不均衡。TaeJoo Kim 等^[51]发现随着压力差的增加, 电堆的电化学性能也有所提升, 但是当压力差继续增加时, 气体的流速会下降, 因此对于电堆性能而言存在一个最佳压差。Yankun Li^[52]测试了 PEMFC 电堆在不同阳极与阴极气体入口压力差值下单体电压的分布状态如图 8 所示, 随着阳极与阴极入口气体压差每增大 10 kPa, 电堆内单体电压小幅提升 0.7 mV, 其单体电压波动率随压差增大而减小, 说明在电堆安全运行条件下, 保持一个稍大的阴阳极入口压差, 有利于提升 PEMFC 电堆单体电压均衡性能。

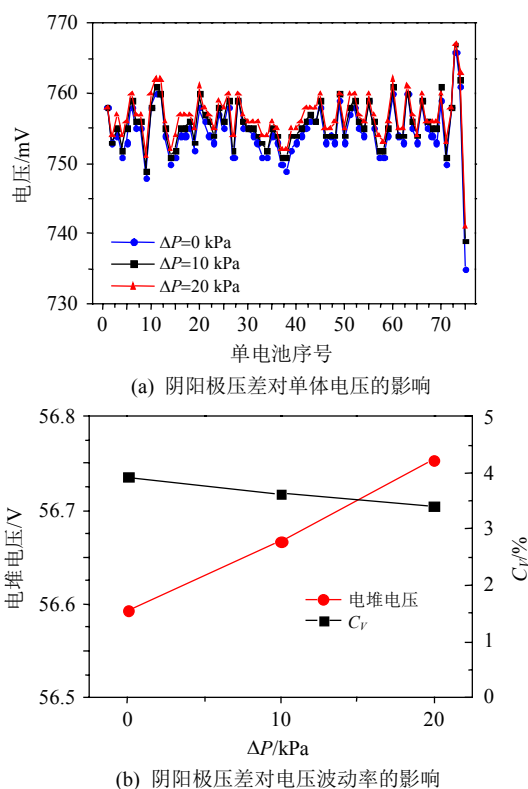


图 8 阴阳极压差对单体电压均衡性的影响
Fig. 8 Effect of pressure difference on single cell voltage uniformity

4 负载对单体电压均衡性的影响

4.1 负载大小对单体电压均衡性的影响

由于燃料电池堆中存在活化极化、欧姆极化、浓差极化 3 种现象, 各单体电压随着负载电流密度增加而减小, 同时大负载下电堆内部反应物质分布不均匀、温度分布不均匀导致单体电压波动较大, 电压偏差值会随着电流密度的增加而增加^[3,10,24,37,52]。M. Pérez-Page^[53]测试了由 40 个单体组成的 2.89 kW 电堆的电压变化, 发现电压偏差值

会随着电流密度的增加而增加, 其原因是由于水生成的速率高会导致水淹。Svein O. Morner^[54]指出, 22 片单体电堆在电流密度高于 0.08 A/cm^2 时, 电压变化为 $\pm 0.6 \text{ V}$, 而电流密度低于 0.08 A/cm^2 时则为 $\pm 0.2 \text{ V}$ 。

Paul Rodatz^[36]测试了由 100 片单体组成的 6 kW 电堆在不同电流负载下的单体电压如图 9 所示, 可以明显观察到在低电流负载时(电流密度为 0.34 A/cm^2), 单体电压偏差很小, 单体电压波动率仅为 5%; 随着电流负载的增大, 单体电压减小, 且电压均衡性开始下降, 电压波动明显变大。S. Giddey 等^[10]检测了 15 片电池组成的 1 kW 电堆在满载状态下(电流密度为 0.54 A/cm^2)下的电压偏差为 16%。F. Philipps 等^[55]发现电压最低值决定了电堆的最大输出功率, 为了使电堆在实际应用中安全工作, 单体电压不应低于安全阈值。Wenhua H. Zhu 等^[9]对 800 W 的 10 片单体 NEXA 电堆进行评价, 当电堆无外部负载运行时, 其平均电压可达到 0.862 V; 而当电堆以 800 W 功率输出时, 整个单体电压平均值下降 0.2 V 左右, 而且存在单体电压最低至 0.566 V; 如果将单体从最低电压提升到平均电压水平, 其潜在功率水平增加了 11.3%。

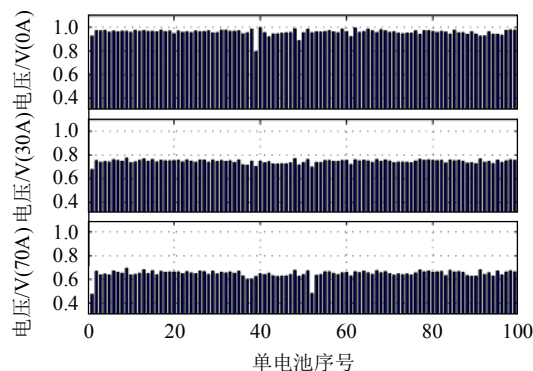


图 9 不同负载大小对对单体电压均衡性的影响

Fig. 9 Effect of current levels on single cell voltage uniformity

4.2 动态加载方式对单体电压均衡性的影响

在实际运行过程中, 由于 PEMFC 电堆输出出现大幅电流波动, 会造成电堆内部出现短时的燃料或空气饥饿, 使电压均衡性严重恶化, 对电堆产生永久性破坏。研究不同的动态加载方式, 对于单体电压均衡性有十分重要的意义。

4.2.1 加载频率对单体电压均衡性的影响

在动态加载实际操作过程中, 电堆不能实现大幅的阶跃加载, 也难以连续线性增长, 因此只能以一定频率逐步增长幅值来实现大幅阶跃。在此阶段氧气浓度在恢复与消耗的循环中不断动态变化, 造

成电压均衡的波动,氧气浓度的恢复需要一定的时间,因此加载频率与氧气浓度恢复的程度紧密相关。Yankun Li^[52]测试了不同加载频率下电堆单体电压均衡性如图 10 所示,在相同加载时长内实现从 40A 到 200A 的加载,且此组实验未固定每一步频率动作下的加载幅值。在高频加载状态下,电压波动率曲线较为平缓,电流变化平缓则电堆电压波动率 C_V 也更趋近于平滑变化。在相对低频的加载状态下,出现较大加载幅度时都会伴随着 C_V 尖峰。针对加载频率而言,单体电压均衡性随着电流加载频率的降低而不断恶化,说明在相同的加载时长内实现相同电流增量,一个较高的加载频率,可减小每一步的加载幅值,是电压均衡性维持稳定变化的良好保证。

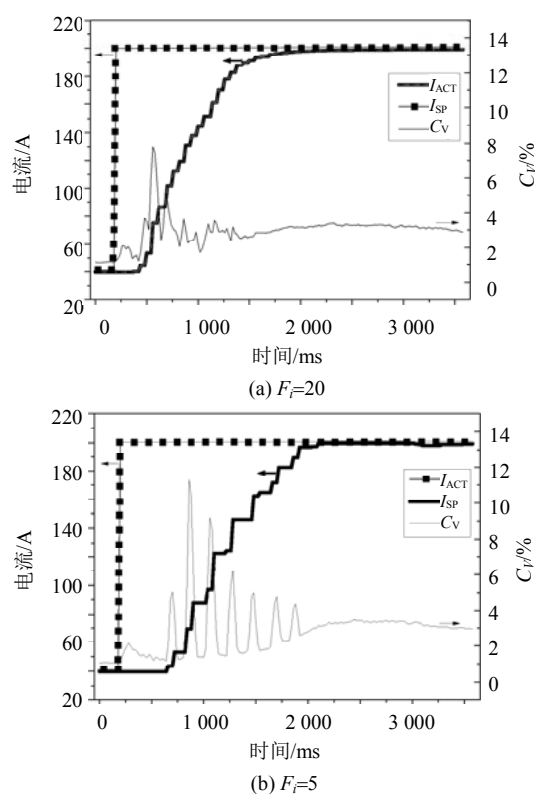


图 10 不同加载频率对电压波动率的影响

Fig. 10 Effect of load frequency on voltage fluctuation rate

同时, Yankun Li^[52]固定了加载幅值 I_s , 来测试此时加载频率对电压均衡性的影响, 如图 11 所示, 可以看到此时加载速度由加载频率 F_i 决定。随着加载频率 F_i 不断增大, 电堆加载速度也逐渐加快, 响应速度较快。电压曲线变化较为平滑, 此时的加载频率对整个电堆的输出电压动态响应的影响无明显变化, C_V 有了较大变化。 C_V 在加载的全过程都有明显的增大, 尤其是在电流加载的开始和结束阶段, C_V 增幅更加明显, 电堆电压均衡性变差。

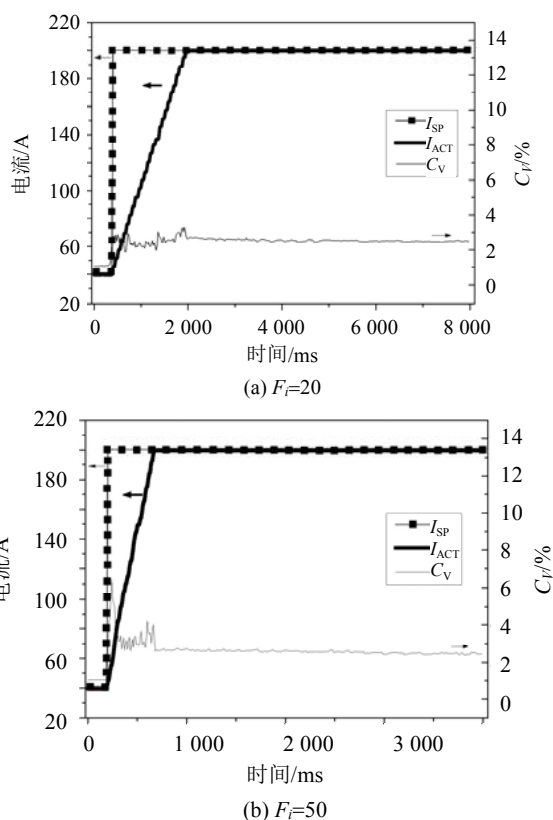


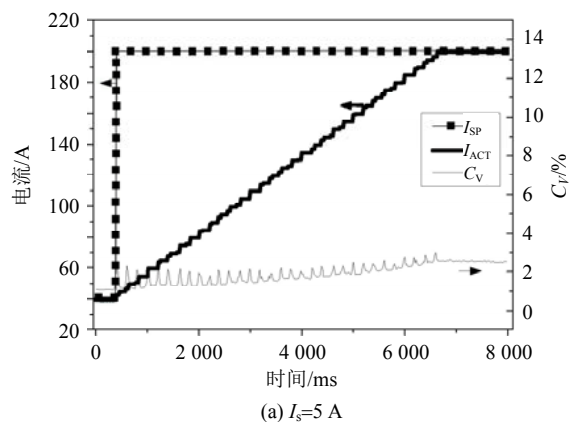
图 11 加载幅值固定时加载频率对电压波动率的影响

Fig. 11 Effect of load frequency on voltage fluctuation rate with constant current variation amplitude

4.2.2 加载幅值对单体电压均衡性的影响

同上所述, 在加载过程中氧气浓度被消耗, 加载频率与氧气浓度恢复的时间间隔相关, 那么加载幅值则决定每次加载所消耗的氧气浓度, 同样影响了氧气浓度恢复的程度。Yankun Li^[52]将固定加载频率 F_i 为 5 Hz, 分别测试加载幅值 I_s 为 5 A 和 10 A 时电堆的动态特性, 如图 12 所示。

可以看到当 F_i 固定后, I_s 的大小决定着电堆的加载速度。当 I_s 由 5 A 变为 10 A 时, 加载时间缩短为原来的 1/2, 对电堆电压的影响并不明显。 C_V 随着电流的增大呈现不断上升的趋势; 在电流变化的瞬间, C_V 突变出现一个尖峰, 待电流稳定时, 峰值消失; 当 F_i 一定时, C_V 随着 I_s 的增大而增大, 当



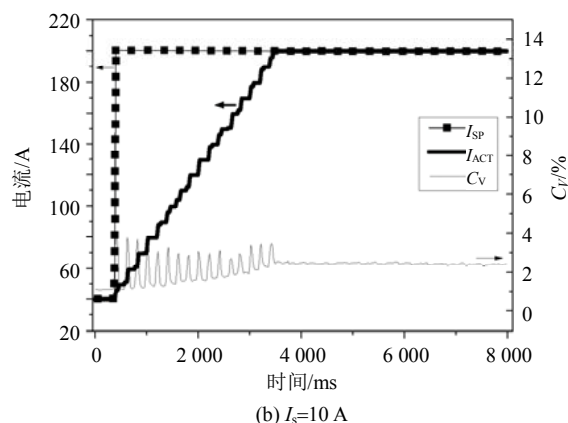


图 12 加载幅值对电压波动率的影响

Fig. 12 Effect of load amplitude on voltage fluctuation rate

电流加载到相同值附近时, I_s 为 10 A 时的 C_v 大约是 I_s 为 5 A 时的 2 倍。

4.2.3 加载速率对单体电压均衡性的影响

Pasquale Corbo 等^[14]针对 20 kW 燃料电池, 以 25 A/s 提升电流, 10 s 时, 单体电压最小接近 0.2 V、最大在 0.7 V 左右, 两者相差近 0.5 V。P. Corbo 等^[56]还以 30 kW 的燃料电池动力列车为研究对象, 在动态试验台上研究其不同的加速斜坡下(分别是 150 W/s 和 1500 W/s)电堆的性能, 如图 13 所示, 以电压波动率衡量其电压均衡性, 测试中电压波动率 C_v 大多数时候都低于 1%, 但在加速阶段某些单体波动率峰值达到 2.2%, 单体电压会低于 0.55 V, 但没有电池电压低于 0.4 V, 可以认为 0.4 V 是一个可靠的操作阈值, 仅仅能维持几秒钟。实验证明当

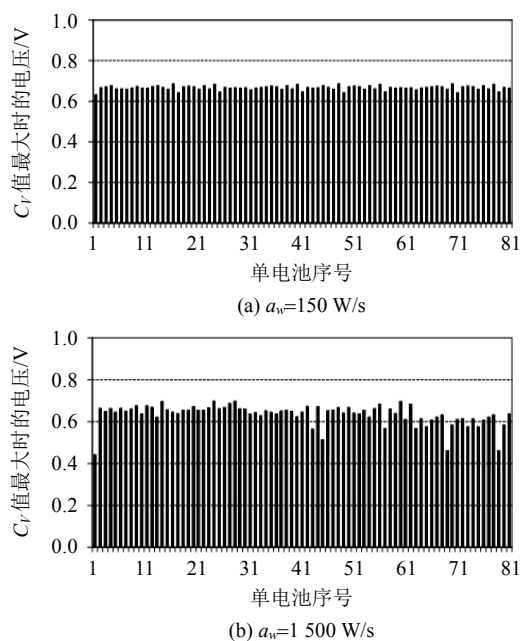


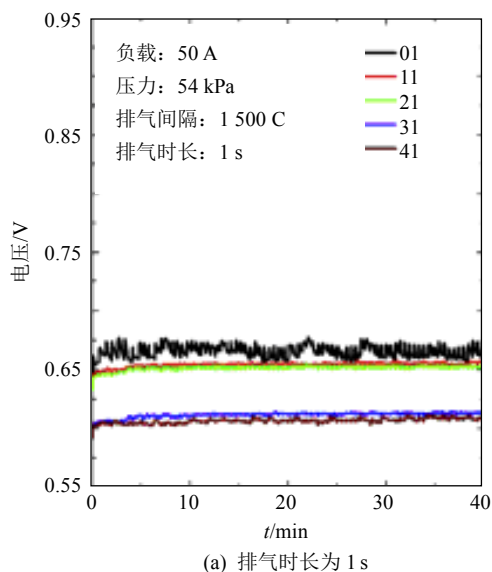
图 13 加载速率对对单体电压均衡性的影响

Fig. 13 Effect of load acceleration slope on single cell voltage uniformity

电压波动率 $C_v < 2.5\%$, 电池具有较好的动态性能, 燃料电池可以满足 1500 W/s 的加速度斜坡。

5 系统控制对单体电压均衡性的影响

对于 PEMFC 系统控制, 目前国内外学者主要以提高系统效率为目标开展了大量研究^[57], 通过建立 PEMFC 电堆、单体、空气供应子系统等多尺度稳态、动态模型^[58], 采用正交试验法等手段分析了操作参数对单电池或电堆效率和动态响应的影响, 研究了各种控制方法的仿真或实验效果, 但面向单体电压均衡性的系统控制研究较少。燃料电池电堆的运行, 必须有控制系统以及供气系统、冷却系统等辅助系统共同运转, 才能使其运行安全合理, 因此整个系统及其控制策略都对单体电压均衡性有着至关重要的影响。Paul Rodatz 等^[36]研究了不同的氢气供应方式对电压的影响, 表明相较于氢气循环与阳极密封的方式, 脉冲式氢气供应方式所得到的电池输出性能更优。P. Corbo 等^[56]采用气体净化策略, 每次排气后氢气压强下降使电池湿润, 有轻微的电压恢复。Jer-Huan Jang 等^[40]通过对比不同氢气排气持续时长与排气间隔时间, 发现增大排气时间间隔, 单体电压会减小, 而增加排气持续时长, 如图 14 所示, 单体电压有所提升, 且单体电压均衡性有所改善。Yankun Li^[52]提出了一种计及电压均衡的 PEMFC 恒定加载幅值与加载频率的加载控制策略, 可以较好地抑制电堆加载过程中的电压波动率尖峰, 提升电堆的使用寿命。Yong Hun Park 等^[11]通过对比电堆采取空冷方式与无冷却方式下的功率曲线与极化曲线表明, 电堆冷却系统会显著提高电堆的性能。王珂等^[59]通过不同风速下的燃料电池阻抗谱分析, 表明由于风扇控制系统对温度和湿度



(a) 排气时长为 1 s

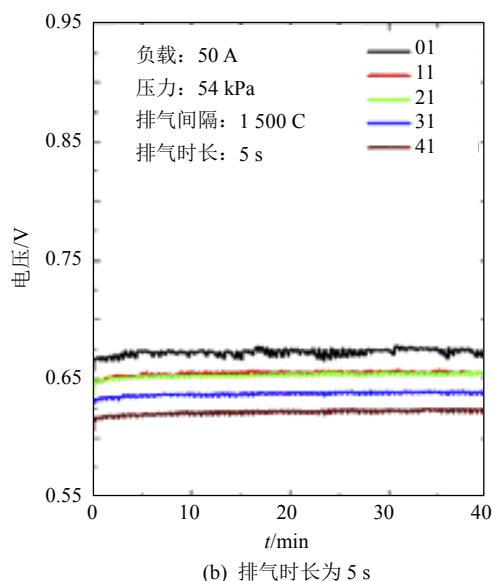


图 14 排气时长对单体电压均衡性的影响
Fig. 14 Effect of purge duration time on single cell voltage uniformity

有综合的影响, 风速过高过低都会导致电堆一致性性能下降。朱星光等研究了不同风扇工作模式对空气流速和工作温度的影响^[60], 从而间接地看出不同风扇工作模式会对单体均衡性产生影响。Jer-Huan Jang 等^[35]还研究了不同的装配压力下的电堆, 单体的性能差距会随装配压力的增大而增大, 导致电压均衡性恶化。文献^[61]开展了改善电池耐久性的多目标控制仿真研究, 其涉及的目标, 包括输出功率和最小化氧气和氢气分压差。文献^[14]给出了兼顾系统效率和单体电压一致性的控制策略, 但仅仅是针对空压机进行了管理。

6 寿命周期对单体电压均衡性的影响

由于燃料电池电堆在实际使用中的环境与工况复杂, 随着运行时间的增加会对单体造成不一致的性能衰减, 其衰减程度不同影响其电压均衡性。研究表明, 虽然大电流比小电流具有更差的一致性, 但燃料电池寿命初期, 开路和稳态下单体电压一致性较好^[14], 而寿命后期, 单体一致性变差, 个别单体电压很低甚至接近于零^[7,13]。Wang 等^[48]测量出 5 kW 电堆在开路时单体平均存在 7% 的平均偏差。Pucheng Pei^[62]在空载、动态加载、高负载循环和启停循环条件下完成 500 小时寿命试验后, 单体电压均衡性恶化, 如图 15 所示, 导致电堆的输出性能下降。Ph.Mocoteguy^[63]对 HT-PEMFC 电堆进行 650h 的寿命测试, 其单体电压均衡性明显恶化, 主要是由于电堆中各单体所处的环境差异导致其单体性能衰减程度不同。王诚等^[2]归纳分析了燃料电

池关键材料及部件的性能衰减机制, 及其应对性能衰减的新材料、新技术与系统控制策略等耐久性最新研究进展, 最后对燃料电池失效机制及其缓解研究提出了新的指向。这对于提升燃料电池耐久性具有指导意义, 而这间接改善了单体的衰减速率, 使单体电压均衡性更加稳定。

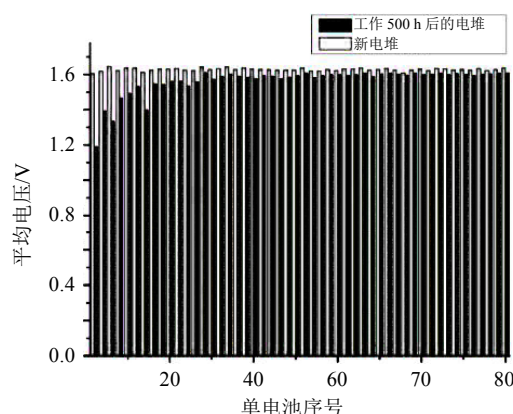


图 15 运行时间对单体电压均衡性的影响
Fig. 15 Effect of working time on single cell voltage uniformity

7 结论与展望

由于车载燃料电池的车辆负载工况复杂, 加之采用的燃料电池串联多达几十、甚至数百个单体电池, 导致单体电压动态不一致问题突出, 严重影响电堆性能和寿命。影响燃料电池单体均衡性的原因主要归纳如下:

- 1) 单体内部的流场结构决定单体内部的流量、压力的分布不均衡, 其材料选择影响其耐久性即衰减速率的不一致, 导致电压分布不均;
- 2) 单体电压分布与电堆内温度的分布紧密相关, 尤其是会影响电堆内所有的传质, 不均匀的温度分布会增大流道中的冷却液和空气所受的阻力, 导致膜电阻变化并在局部放热, 形成“热点”, 使电压均衡性严重恶化;
- 3) 湿度过高或气体流速过低以及电堆内压力过大可能引起的反应气流不均匀分布, 会导致流道内气流阻力变化, 会造成气体扩散电极的腐蚀, 以及排水不畅引发的“水淹”现象;
- 4) 负载大小及其加载方式使电堆输出保持在高电流密度下, 消耗氧气过快, 造成氧气浓度下降, 由于氧气浓度恢复速度有限, 造成“氧饥饿”;
- 5) 气体供应方式、冷却方式、排气策略、气体净化策略的不同所引起温度、流量和压力的分布不均衡;
- 6) 在寿命测试过程中, 由于各单体单元性能

衰减的速率不一致, 单体电压不均衡;

7) 电堆中客观存在的制造误差与装配误差, 造成单体性能的不均衡。

对于未来的燃料电池单体电压均衡性研究, 除了材料与结构需要进一步研究之外, 对于广大用户来说, 基于车辆动态工况的燃料电池动态一致性演化规律、影响机理以及运行控制等的系统深入研究更为迫切, 具体研究内容包括:

1) 面向控制的燃料电池动态一致性实验分析与建模。

既有的一致性研究主要集中在稳态且没有考虑各影响因素的多尺度动态耦合, 同时没有考虑一致性对各子系统控制对象动作的动态响应, 与各子系统及燃料电池整体系统的实际控制运用存在一定差距。为此, 在既有研究基础上, 通过对水管理、热管理、反应气管理、电管理等各子系统的相关控制对象的动态调节, 考虑操作参数的初始状态、变化速度和变化幅度, 分析各操作参数对一致性的动态多尺度耦合影响, 揭示各操作参数动态变化对一致性的影响规律, 建立面向控制的一致性对各操作参数数学模型。

单体电压反转(负电压)会在阳极产生氢气形成局部“热点”, 造成电池不可逆损坏甚至引发安全问题。鉴于此, 为了系统控制过程中有效避免反极化现象, 需要求解电压反转动态边界条件, 建立面向控制的负电压边界数学模型和避免反极化的安全裕度数学模型。

2) 车辆动态循环工况下燃料电池一致性的演化机理分析。

单体电压不一致性问题产生的机理是由于燃料电池内部水、温度、气体扩散等的不均匀性, 而水、温度、反应气体的时空分布又受负载电流请求、反应气体供应系统、冷却系统、加湿系统等多尺度动态耦合影响。因此, 需要针对车辆动态循环牵引工况, 通过实时监测燃料电池温度、压力、气体流量、湿度、电堆电压、电堆电流、单体电压等参数的变化, 开展车辆启动、停机、加速、减速、怠速、紧急停车、低温启动等典型工况和动态循环工况下的燃料电池一致性演化机理分析, 求解有轨电车动态工况下, 空压机、氢气调节阀、背压阀、排气阀、氢气循环泵、加湿器、冷却泵、冷却风扇、请求电流等控制对象动态调节与燃料电池一致性动态响应的多尺度耦合关系, 为燃料电池系统控制提供依据。

3) 车载燃料电池系统的协调控制方法。

对于面向商业化应用的燃料电池车辆, 既要求系统能量有效利用、提高运行效率, 又要求燃料电池具有尽量长的服役寿命。因此, 需要结合燃料电池单体电压一致性数学模型以及安全裕度数学模型, 以及车辆动态循环工况下燃料电池一致性的演化机理, 构建以燃料电池最佳一致性、最佳效率, 同时兼顾空气/氢气压力及压力差、电堆温度、电堆湿度等波动最小为控制目标, 以空压机、氢气调节阀、背压阀、排气阀、氢气循环泵、加湿器、冷却泵、冷却风扇、输出电流等为控制对象的控制系统。

传统火、水等发电系统的爬坡特性已有明确研究结论, 但燃料电池、特别是大功率燃料电池的爬坡特性还有待深入研究。需要分析基于动态一致性的大功率燃料电池爬坡特性, 求解具有环境自适应性、不同工况和载重配置下的“合理运行空间”约束范围, 并开展基于一致性和基于效率的控制变量灵敏度分析, 构建车辆动态循环工况下, 各控制对象的时序协调控制规则, 研究燃料电池系统协调控制方法, 使得在满足车辆动力需求条件下, 燃料电池系统能够高效、安全运行。

参考文献

- [1] 衣宝廉, 侯明. 车用燃料电池耐久性的解决策略[J]. 汽车安全与节能学报, 2011, 2(2): 91-100.
Yi Baolian, Hou Ming. Solutions for the durability of fuel cells in vehicle applications[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2011, 2(2): 91-100(in Chinese).
- [2] 王诚, 王树博, 张剑波, 等. 车用燃料电池耐久性研究[J]. 化学进展, 2015, 27(4): 424-435.
Wang Cheng, Wang Shubo, Zhang Jianbo, et al. The durability research on the proton exchange membrane fuel cell for automobile application[J]. Progress in Chemistry, 2015, 27(4): 424-435(in Chinese).
- [3] Pei P C, Chen H C. Main factors affecting the lifetime of proton exchange membrane fuel cells in vehicle applications: A review[J]. Applied Energy, 2014, 125: 60-75.
- [4] 翁元明, 林瑞, 唐文超, 等. 燃料电池堆单片电压一致性研究进展[J]. 电源技术, 2015, 39(1): 199-202.
Weng Yuanming, Lin Rui, Tang Wenchao, et al. Development of individual cell voltage uniformity of fuel cell stack[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(1): 199-202(in Chinese).
- [5] 汪飞杰, 杨代军, 张浩, 等. 1.5kW 质子交换膜燃料电池堆动态工况响应特性[J]. 化工学报, 2013, 64(4): 1380-1386.
Wang Feijie, Yang Daijun, Zhang Hao, et al. Response

- features of a 1.5kW proton exchange membrane fuel cell stack for dynamic cycle[J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(4): 1380-1386(in Chinese).
- [6] Verma A, Pitchumani R. Effects of operating parameters on the transient response of proton exchange membrane fuel cells subject to load changes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(33): 19024-19038.
- [7] Dubau L, Castanheira L, Chatenet M, et al. Carbon corrosion induced by membrane failure: The weak link of PEMFC long-term performance[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(36): 21902-21914.
- [8] 宋满存, 裴普成, 曾夏, 等. PEMFC 水淹的阳极气体压力降变化特征预警技术[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 340-346.
- Song Mancun, Pei Pucheng, Zeng Xia, et al. Flooding prediction based on characteristics of hydrogen pressure drop in PEMFC[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 340-346(in Chinese).
- [9] Zhu W H, Payne R U, Cahela D R, et al. Uniformity analysis at MEA and stack levels for a Nexa PEM fuel cell system[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 128(2): 231-238.
- [10] Giddey S, Ciacchi F T, Badwal S P S. Design, assembly and operation of polymer electrolyte membrane fuel cell stacks to 1 kWe capacity[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 125(2): 155-165.
- [11] Park Y H, Caton J A. Development of a PEM stack and performance analysis including the effects of water content in the membrane and cooling method[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 179(2): 584-591.
- [12] Ahn S Y, Shin S J, Ha H Y, et al. Performance and lifetime analysis of the kW-class PEMFC stack[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 106(1-2): 295-303.
- [13] Moçotéguy P, Ludwig B, Steiner N. Influence of ageing on the dynamic behaviour and the electrochemical characteristics of a 500 We PEMFC stack[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(19): 10230-10244.
- [14] Corbo P, Migliardini F, Veneri O. Experimental analysis of a 20kWe PEM fuel cell system in dynamic conditions representative of automotive applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(10): 2688-2697.
- [15] 王诚, 王树博, 张剑波, 等. 车用质子交换膜燃料电池材料部件[J]. *化学进展*, 2015, 27(2-3): 310-320.
- Wang Cheng, Wang Shubo, Zhang Jianbo, et al. The key materials and components for proton exchange membrane fuel cell[J]. *Progress in Chemistry*, 2015, 27(2-3): 310-320(in Chinese).
- [16] Weng F B, Jou B S, Li C W, et al. The effect of low humidity on the uniformity and stability of segmented PEM fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 181(2): 251-258.
- [17] Zhang S S, Yuan X Z, Hin J N C, et al. A review of platinum-based catalyst layer degradation in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 588-600.
- [18] Ferreira-Aparicio P, Gallardo-López B, Chaparro A M, et al. Physico-chemical study of the degradation of membrane-electrode assemblies in a proton exchange membrane fuel cell stack[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(9): 4242-4250.
- [19] Litster S, Mclean G. PEM fuel cell electrodes[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 130(1-2): 61-76.
- [20] 王海鹏, 王海人, 屈钧娥, 等. 质子交换膜燃料电池双极板的研究进展[J]. *材料研究与应用*, 2014, 8(4): 211-214, 218.
- Wang Haipeng, Wang Hairen, Qu June, et al. Research progress on bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Materials Research and Application*, 2014, 8(4): 211-214, 218(in Chinese).
- [21] 王乐萍. 基于正交试验的质子交换膜燃料电池(PEMFC)流场板 CFD 分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- Wang Leping. A CFD analysis of proton exchange membrane fuel cell(PEMFC) flow field plate based on orthogonal test[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009(in Chinese).
- [22] Nam J H, Lee K J, Sohn S, et al. Multi-pass serpentine flow-fields to enhance under-rib convection in polymer electrolyte membrane fuel cells: design and geometrical characterization[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 188(1): 14-23.
- [23] Liu Z X, Mao Z Q, Wu B, et al. Current density distribution in PEFC[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 141(2): 205-210.
- [24] Shimpalee S, Greenway S, Van Zee J W. The impact of channel path length on PEMFC flow-field design [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(1): 398-406.
- [25] Shimpalee S, Lilavivat V, Van Zee J W, et al. Understanding the effect of channel tolerances on performance of PEMFCs[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(19): 12512-12523.
- [26] Zhang W G, Hu P, Lai X M, et al. Analysis and optimization of flow distribution in parallel-channel configurations for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 931-940.
- [27] Hu M G, Sui S, Zhu X J, et al. A 10kW class PEM fuel cell stack based on the catalyst-coated membrane(CCM) method[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(8): 1010-1018.

- [28] Kloess J P, Wang X, Liu J, et al. Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 188(1): 132-140.
- [29] Chen T, Xiao Y, Chen T Z. The impact on PEMFC of bionic flow field with a different branch[J]. *Energy Procedia*, 2012, 28: 134-139.
- [30] Wang X T, Song Y, Zhang B. Experimental study on clamping pressure distribution in PEM fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 179(1): 305-309.
- [31] 李桦. 一种采用新型进气方式的质子交换膜燃料电池的性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- Li Hua. The study on a new PEMFC humidification method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012(in Chinese).
- [32] Liu H, Li P W, Van Lew J. CFD study on flow distribution uniformity in fuel distributors having multiple structural bifurcations of flow channels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(17): 9186-9198.
- [33] Sun H, Xie C, Chen H, et al. A numerical study on the effects of temperature and mass transfer in high temperature PEM fuel cells with ab-PBI membrane [J]. *Applied Energy*, 2015, 160: 937-944.
- [34] Lee H I, Lee C H, Oh T Y, et al. Development of 1 kW class polymer electrolyte membrane fuel cell power generation system[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 107(1): 110-119.
- [35] Jang J H, Chiu H C, Yan W M, et al. Effects of operating conditions on the performances of individual cell and stack of PEM fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 180(1): 476-483.
- [36] Rodatz P, Büchi F, Onder C, et al. Operational aspects of a large PEFC stack under practical conditions [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 128(2): 208-217.
- [37] Pérez-Page M, Pérez-Herranz V. Effect of the operation and humidification temperatures on the performance of a PEM fuel cell stack[J]. *ECS Transactions*, 2009, 25(1): 733-745.
- [38] 齐基. PEM 燃料电池堆单片一致性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- Qi Ji. Study on individual cell voltage uniformity of PEMFC stack[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011(in Chinese).
- [39] Fellows R G. Method and system for operating fuel cell stacks to reduce non-steady state conditions during load transients. US, WO2009006310 A1[P]. 2009-01-08.
- [40] Jang J H, Yan W M, Chiu H C, et al. Dynamic cell performance of kW-grade proton exchange membrane fuel cell stack with dead-ended anode[J]. *Applied Energy*, 2015, 142: 108-114.
- [41] Reiser C A. Method and apparatus for improved delivery of input reactants to a fuel cell assembly. US, 6497971 B1 [P]. 2002-12-24.
- [42] Ghosh P C, Dohle H, Mergel J. Modelling of heterogeneities inside polymer electrolyte fuel cells due to oxidants[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(19): 8204-8212.
- [43] Reshetenko T V, Bender G, Bethune K, et al. Systematic study of back pressure and anode stoichiometry effects on spatial PEMFC performance distribution [J]. *Electrochimica Acta*, 2011, 56(24): 8700-8710.
- [44] Santa Rosa D T, Pinto D G, Silva V S, et al. High performance PEMFC stack with open-cathode at ambient pressure and temperature conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(17): 4350-4357.
- [45] Urbani F, Barbera O, Giacoppo G, et al. Effect of operative conditions on a PEFC stack performance [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(12): 3137-3141.
- [46] Natarajan D, van Nguyen T. Current distribution in PEM fuel cells. Part 1: Oxygen and fuel flow rate effects [J]. *AIChE Journal*, 2005, 51(9): 2587-2598.
- [47] 马晓军, 可荣硕, 许世蒙, 等. 质子交换膜燃料电池系统动态控制研究[J]. *兵工学报*, 2012, 33(12): 1409-1415.
- Ma Xiaojun, Ke Rongshuo, Xu Shimeng, et al. Research on dynamic control of proton exchange membrane fuel cell system[J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(12): 1409-1415(in Chinese).
- [48] Wang C, Mao Z Q, Bao F Y, et al. Development and performance of 5kw proton exchange membrane fuel cell stationary power system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30(9): 1031-1034.
- [49] Squadrito G, Barbera O, Giacoppo G, et al. Polymer electrolyte fuel cell stacks at CNR-ITAE: State of the art[J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2007, 4(3): 350-356.
- [50] Kocha S S, Yang J D, Yi J S. Characterization of gas crossover and its implications in PEM fuel cells[J]. *AIChE Journal*, 2006, 52(5): 1916-1925.
- [51] Kim T J, Kim J R, Sim C M, et al. Experimental approaches for distribution and behavior of water in PEMFC under flow direction and differential pressure using neutron imaging technique[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 600(1): 325-327.
- [52] Li Y K, Zhao X Q, Liu Z X, et al. Experimental study on the voltage uniformity for dynamic loading of a PEM fuel cell stack[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(23): 7361-7369.
- [53] Pérez-Page M, Pérez-Herranz V. Study of the

- electrochemical behaviour of a 300W PEM fuel cell stack by Electrochemical Impedance Spectroscopy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(8): 4009-4015.
- [54] Morner S O, Klein S A. Experimental evaluation of the dynamic behavior of an air-breathing fuel cell stack [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2001, 123(3): 225-231.
- [55] Philipps F, Simons G, Schiefer K. Dynamic investigation of PEFC stacks in interaction with the air supply system [J]. Journal of Power Sources, 2006, 154(2): 412-419.
- [56] Corbo P, Migliardini F, Veneri O. Dynamic behaviour of hydrogen fuel cells for automotive application [J]. Renewable Energy, 2009, 34(8): 1955-1961.
- [57] 张立炎, 潘牧, 全书海. 质子交换膜燃料电池系统建模和控制的综述[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2007, 29(4): 1-6.
- Zhang Liyan, Pan Mu, Quan Shuhai. Model and control of proton exchange membrane fuel cell: A review [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2007, 29(4): 1-6(in Chinese).
- [58] Robin C, Gerard M, Franco A A, et al. Multi-scale coupling between two dynamical models for PEMFC aging prediction[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(11): 4675-4688.
- [59] 王珂, 陈维荣, 韩明, 等. 基于电流断路法的空冷型燃料电池阻抗谱实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(29): 87-93.
- Wang Ke, Chen Weirong, Han Ming, et al. Experimental diagnosis of air breath proton exchange membrane fuel cell through current interrupt[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(29): 87-93(in Chinese).
- [60] 朱星光, 贾秋红, 陈唐龙, 等. 质子交换膜燃料电池阴极风扇系统实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(11): 47-53.
- Zhu Xingguang, Jia Qiuhong, Chen Tanglong, et al. Experimental study on characteristics of cathode fan systems of proton exchange membrane fuel cells [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(11): 47-53(in Chinese).
- [61] She Y, Baran M E, She X. Multiobjective control of PEM fuel cell system with improved durability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 127-135.
- [62] Pei P C, Yuan X, Chao P X, et al. Analysis on the PEM fuel cells after accelerated life experiment[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 3147-3151.
- [63] Moçotéguy P, Ludwig B, Scholta J, et al. Long term testing in continuous mode of HT-PEMFC based H_3PO_4 /PBI Celtec-P MEAs for μ -CHP applications[J]. Fuel Cells, 2009, 9(4): 325-348.



戴朝华

收稿日期: 2015-08-02。

作者简介:

戴朝华(1973), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事电力系统及其自动化、新能源技术与应用、智能电网等方面的教学与科研工作, daichaohua@swjtu.edu.cn;

史青(1992), 女, 硕士生, 主要从事燃料电池技术方面的研究工作, finalclover@qq.com;

陈维荣(1965), 男, 工学博士, 博士生导师, 教授, 主要从事电力系统及其自动化、燃料电池技术与应用等方面的教学与科研工作, wrchen@swjtu.edu.cn;

李艳昆(1985), 男, 工学博士, 主要从事燃料电池技术方面的研究工作, kunkun008@sina.com;

刘志祥(1976), 男, 工学博士, 研究员, 主要从事新能源技术与应用、燃料电池技术等教学与科研工作, liuzhixiang@swjtu.edu.cn;

李奇(1984), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事燃料电池技术、新能源技术、非线性控制等方面的教学与科研工作, liqi0800@163.com。

(责任编辑 车德竞)