

文章编号: 1002-0446(2003)02-0123-04

# 质子交换膜燃料电池在无缆水下机器人上的应用研究

袁学庆<sup>1</sup> 燕奎臣<sup>1</sup> 洪有陆<sup>2</sup> 孙德尧<sup>2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016; 2. 中国科学院大连化学物理研究所 大连 116023)

**摘要:** 质子交换膜燃料电池(PEMFC)作为一种新兴的能源,在汽车和航天器上已经获得成功的应用,本文针对水下环境和 PEMFC 的特点,对 PEMFC 在无缆水下机器人(UUV)上试验应用的关键技术进行讨论。

**关键词:** 质子交换膜燃料电池(PEMFC);无缆水下机器人(UUV);能源

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## PEMFC APPLIED RESEARCH ON UNTETHERED UNDERWATER VEHICLES

YUAN Xue-qing<sup>1</sup> YAN Kui-chen<sup>1</sup> HONG You-lu<sup>2</sup> SUN De-yao<sup>2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023)

**Abstract:** Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is considered as newly developed energy, it is already applied to automobile and airspace shuttle. This paper discusses key technologies of PEMFC application for untethered underwater vehicles (UUV), combined underwater environment with the characteristics of PEMFC.

**Keywords:** proton exchange membrane fuel cell, untethered underwater vehicles (UUV), energy

### 1 引言(Introduction)

海洋面积大约占地球表面积的 2/3,其中蕴涵着丰富的资源,随着科学技术的发展,人类的探索焦点逐渐从外层空间转向内层空间.为了进一步开发海洋的矿产、石油、生物等资源,无缆水下机器人(UUV)已成为探索和开发海洋的主要载体.UUV 是各种高技术的集成体,涉及造船、流体、导航、通讯、传感器、能源、控制等技术,本文主要讨论 UUV 上使用 PEMFC 所涉及的问题.

### 2 UUV 常用能源(General energy for UUV)

UUV 自身携带能源,和支持母船之间没有脐带电缆连接,因此在水下的活动范围可以不受支持母船的限制,作业灵活,但 UUV 携带的能源却限制了其在水下工作时间的长短,因此能源对 UUV 来讲是非常重要的.除一次和二次电池可作为 UUV 的直接能源外,燃料电池、斯特林发动机、闭式柴油发动机(CCDE)、放射性同位素电池(RI)、原子能、太阳能都

有可能作为 UUV 的能源.由于放射性同位素电池和原子能的应用技术受某些条件限制、斯特林发动机和闭式柴油发动机产生噪音和振动,因此在 UUV 上很少采用.而 PEMFC 能够直接将化学能转换为电能,不受卡诺循环的限制,具有较高的效率;没有传动部件,不产生噪音和振动;不对海洋环境造成污染等优点,因此较适合作为 UUV 的能源.表 1 列举近几年 UUV 的型号及其使用能源情况.

在应用 PEMFC 作为 UUV 的能源时,首先应考虑到水下环境特点,PEMFC 采用氟磺酸型固体聚合物为电解质, $Pt/C$  或  $Pt-Ru/C$  为电催化剂,氢气或净化重整氢气为燃料,空气或纯氧气为氧化剂,以带有气体流动通道的石墨或金属板为双极板.阳极催化层中的氢气在催化剂作用下发生电极反应: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ ,产生的电子经外电路到达阴极,氢离子经电解质膜到达阴极,氧气与氢离子及电子在阴极发生反应生成水,即: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ ,生成的水通过电极随反应尾气排出.

表 1 UUV 的型号及其使用能源方式  
Table 1 Energy comparison of different UUV

能源方式	UUV 型号及制造年代
铅酸电池	EAVE III (1987); AE 1000 (1992); Phoenix (1992); ABE (1992) Ocean Voyager II (1993); PURL (1993); Umihico (1994); Explorer (1994); ODIN II (1995); Epaulard (1995); AUV-HM1 (1998)
银锌电池	Typhonus (1990); Odyssey II (1993); CR-01 (1995); Theseus II (1996); VORAM (1997); SIRENE (1998); SAUVIM (1998); CR-02 (2000)
镍镉电池	Theseus (1992); OTTER (1994)
闭式柴油机	R-one (1995)
碱性锰电池	Autosub (1995)
燃料电池	ARCS (1996)
碱性锂电池	REMUS (1997)
锂离子电池/燃料电池	Urashima (1997)
太阳能电池	Solar AUV-A/B (1998)
锂离子电池	Seahorse (1998); EXPLORER'S (1998);

### 3 质子交换膜燃料电池系统(PEMFC systems)

#### 3.1 系统组成

PEMFC 系统包括氢气和氧气循环系统、气水分离系统、排热循环系统、检测与控制系统等,其原理图如图 1 所示. 高压氢气、氧气经过减压阀变成低压力的氢气、氧气,进入燃料电池参与化学反应. 气水分离系统将尾气中气和水分分离出来,水直接进入储水罐,氢气、氧气再次循环利用. 排热循环系统通过循环水流过电池散热板将热排出. 测控系统实时监控 PEMFC 正常工作时氢气、氧气的压差和化学反应温度、单节电池工作状态、输出电流和电压.

#### 3.2 耐压舱和储气瓶

PEMFC 安装在耐压密封舱内,耐压密封舱由高强度的铝合金材料构成,采用端面径向“O”圈密封,法兰的一个端面上采用专用的连接件作为电池组氢气和氧气的进出气体、进出循环水、生成水的通道;法兰的另一个端面上安装水密接插件连接电池组的检测信号到中央处理单元以及输出动力到控制系统和推进系统.

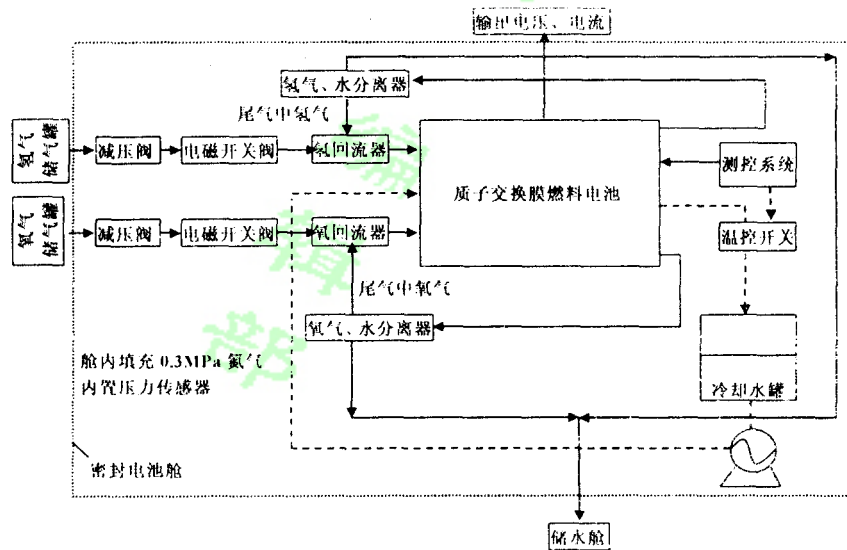


图 1 质子交换膜燃料电池系统原理图

Fig. 1 PEMFC System diagram

氢气、氧气的存储压力很高,因此储气瓶采用新研制的复合气瓶,内胆由高强度的铝合金控制,外部缠绕玻璃纤维或碳纤维用于抵抗内部气体的张力,表面喷涂复合材料用于防止海水腐蚀. 高压气嘴、气体的管路和阀件采用耐海水腐蚀的不锈钢材料制成.

有关资料表明当氢气、氧气混合达到一定浓度时会产生爆炸,为了防止氢气、氧气的泄漏,采用在密封电池舱内充装氮气的方法防止氢、氧气泄漏. 其次在密封舱内设置氢气、氧气传感器,实时检测密封舱内氢、氧气浓度,发现泄漏则关断氢气、氧气的进气阀,燃料电池停止工作.

随着 UUV 航程的增加,氢气和氧气的质量不断减少;储水舱的质量不断增加,UUV 载体平衡发生了一些变化,因此需采取平衡补偿措施来保障载体的重心、浮心位置不变.储水舱安装在载体的中轴平面内靠近载体的最低点、氢、氧储气瓶布置在载体的合适位置,这样也有利于保持载体的平衡.

### 3.3 PEMFC 的燃料消耗

在标准状态下,根据法拉第定律计算出输出功率为 1 千瓦的 PEMFC 每小时消耗氢气和氧气的体积.可由给定电流平均密度  $I_m$  下的质量计算公式为

$$m = k_e I_m (g) \quad (1)$$

由于  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ ,其中氢和氧的电化学当量为

$$k_{e,O} = \frac{M_O}{4F} = \frac{32}{4 \times 96500} = 8.29 \times 10^{-5} (g/A \cdot s) \quad (2)$$

$$k_{e,H} = \frac{M_H}{4F} = \frac{2 \times 2}{4 \times 96500} = 1.04 \times 10^{-5} (g/A \cdot s) \quad (3)$$

$$k_{e,H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{4F} = \frac{2 \times 18}{4 \times 96500} = 9.326 \times 10^{-5} (g/A \cdot s) \quad (4)$$

其中  $F$  为法拉第常数,等于 96500;  $M$  为气体的分子量.当输出电压为 0.7V,输出功率  $P=1000w$  时的电流  $I_m$  为

$$I_m = \frac{P}{V} = \frac{1000}{0.7} = 1428.57 (A) \quad (5)$$

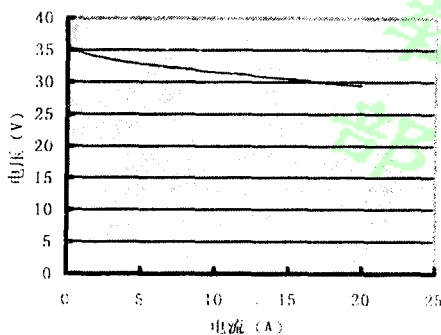


图 2 不同负载下输出电流与电压曲线  
Fig. 2 Voltage & current curve under different load

## 4 性能试验(Performance experiments)

性能试验研究的目的是逐步解决密封环境下 PEMFC 的储存、输送、减压、排热、起动方式、安全检测以及运行的可靠性和输出电压和电流是否符合 UUV 的使用要求.先后在陆地开放环境下、水中的密封环境下做了多次试验,取得大量的实验数据和

因此,消耗的氧气、氢气的质量为

$$m_o = k_{e,o} I_m = 8.29 \times 10^{-5} \times 1428.57 \times 3600 = 426.3 (g) = 13.35 (mol) \quad (6)$$

$$m_H = k_{e,H} I_m = 1.04 \times 10^{-5} \times 1428.57 \times 3600 = 53.4 (g) = 26.7 (mol) \quad (7)$$

在标准状态下氧气、氢气的体积为

$$V_o = \frac{M \times 8.314 \times 273}{1 \times 10^5} = \frac{13.35 \times 8.314 \times 273}{1 \times 10^5} = 0.303 (m^3) \quad (8)$$

$$V_H = \frac{M \times 8.314 \times 273}{1 \times 10^5} = \frac{26.7 \times 8.314 \times 273}{1 \times 10^5} = 0.606 (m^3) \quad (9)$$

计算 UUV 总的燃料消耗时,应考虑 UUV 的推进功率、控制系统电子设备(驾驶系统、导航系统、声纳和传感器系统、应急系统等)的功率、储备功率、航程和航速等因素.

### 3.4 PEMFC 的负载试验

图 2 所示为 PEMFC 在不同负载条件下输出的电压和电流的变化曲线,在未加负载时,输出电压为 38V,在输出电流为 17A 时,输出电压为 30V 左右,由此可知输出电压随负载变化较小,PEMFC 具有较强的负载能力.图 3 所示为输出功率与输出电压和电流的变化曲线.

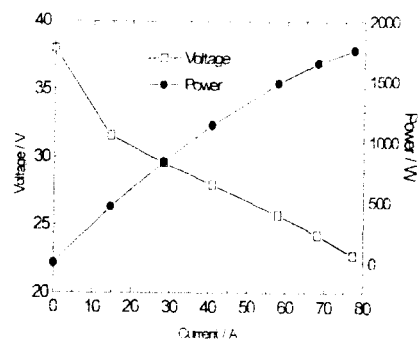


图 3 输出功率变化曲线  
Fig. 3 Output power & efficiency curve

经验.

#### 4.1 开放环境下的试验

为了检验 PEMFC 对 UUV 的支持能力,首先在陆地开放环境下进行了试验,试验原理图如图 4 所示. PEMFC 和储气瓶均放置在陆地上,其输出的动力经 UUV 的脐带电缆传递到水下 UUV, UUV 在

系泊状态下运行。

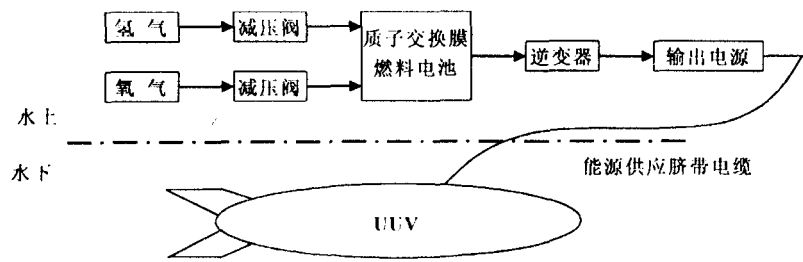


图4 PEMFC在开放环境下试验原理图

Fig. 4 PEMFC diagram under open environment

试验结果如图5所示,试验载体利用“CR-01”6000米AUV,输出电压经逆变器变为24VDC,较长时间的运行表明PEMFC经过改进可以直接应用于UUV。

#### 4.2 水中密闭环境下的试验

试验目的是检验PEMFC长时间在密闭环境运

行的可靠性.实验载体的有效负载为400w左右,电池系统安装在耐压舱内,储气瓶对称安装在试验载体上,试验曲线见图6所示. PEMFC在密封环境下连续长时间运行,其输出电压、电流、电池温度运行可靠,试验表明在密封环境下PEMFC能够满足UUV的工作需求。

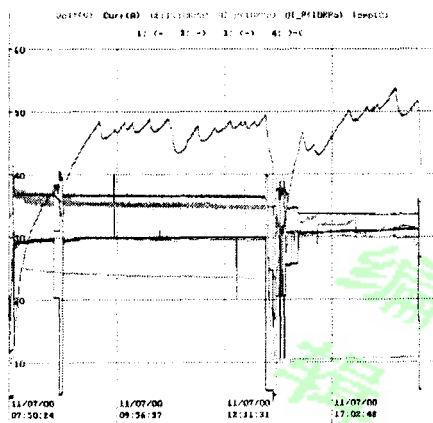


图5 PEMFC在开放环境下的运行曲线

Fig. 5 Running curve under open environment

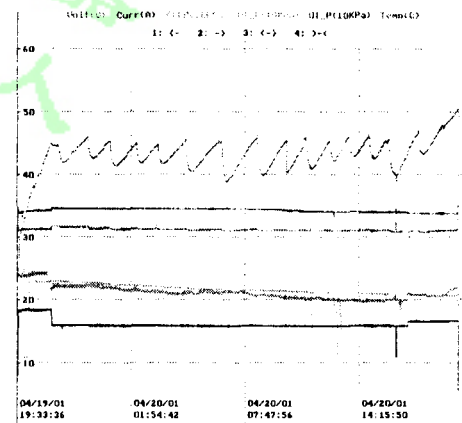


图6 PEMFC在密闭环境下的运行曲线

Fig. 6 Running curve under waterproof environment

## 5 结论(Conclusion)

本文从应用角度对PEMFC系统及其在UUV上的试验应用进行了讨论,根据试验数据提出了PEMFC在UUV上运行的改进措施,PEMFC作为一种新兴的能源,将会在远程、大深度UUV上获得越来越瞩目的应用。

### 参考文献 (References)

- [1] Albert M. Bradley, Michael D Feezor. Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles. IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, 2001, 26(4): 526-538
- [2] Taro Aoki, Takuya Shimura. Fuel Cell for Long-Range AUV. Sea Technology, 1997
- [3] Dr Stephen W Scoles. Fuel Cell Systems for Auxiliary Main

propulsion Power. 1995

- [4] Leo J M J. Blomen, Michael N. Mugerwa, Fuel Cell Systems. Plenum Press, New York, 1993
- [5] 衣宝廉. 燃料电池-高效、环境友好的发电方式. 内部资料, 2000, 43-74
- [6] 邵志刚, 衣宝廉, 侯明, 洪有陆, 孙德尧. 水下机器人用燃料电池报告, 2000, 14
- [7] 雷永泉. 新能源材料. 天津大学出版社, 2000, 174-191

### 作者简介:

袁学庆 (1970-), 男, 助理研究员, 研究领域: 水下机器人载体及能源系统设计。

燕奎臣 (1950-), 男, 研究员, 研究领域: 水下机器人总体设计, 控制技术及传感器等。

洪有陆 (1960-), 男, 工程师, 研究领域: 燃料电池设计等。