

# 燃料电池综合特性实验仪

燃料电池以氢和氧为燃料，通过电化学反应直接产生电力，能量转换效率高于燃烧燃料的热机。燃料电池的反应生成物为水，对环境无污染，单位体积氢的储能密度远高于现有的其它电池。因此它的应用从最早的宇航等特殊领域，到现在人们积极研究将其应用到电动汽车，手机电池等日常生活的各个方面，各国都投入巨资进行研发。

1839 年，英国人格罗夫 (W. R. Grove) 发明了燃料电池，历经近两百年，在材料，结构，工艺不断改进之后，进入了实用阶段。按燃料电池使用的电解质或燃料类型，可将现在和近期可行的燃料电池分为碱性燃料电池，质子交换膜燃料电池，直接甲醇燃料电池，磷酸燃料电池，熔融碳酸盐燃料电池，固体氧化物燃料电池 6 种主要类型，本实验研究其中的质子交换膜燃料电池。

燃料电池的燃料氢 (反应所需的氧可从空气中获得) 可电解水获得，也可由矿物或生物原料转化制成。本实验包含太阳能电池发电 (光能 - 电能转换)，电解水制取氢气 (电能 - 氢能转换)，燃料电池发电 (氢能 - 电能转换) 几个环节，形成了完整的能量转换，储存，使用的链条。实验内含物理内容丰富，实验内容紧密结合科技发展热点与实际应用，实验过程环保清洁。

能源为人类社会提供动力，长期依赖矿物能源使我们面临环境污染之害，资源枯竭之困。为了人类社会的持续健康发展，各国都致力于研究开发新型能源。未来的能源系统中，太阳能将作为主要的一次能源替代目前的煤，石油和天然气，而燃料电池将成为取代汽油，柴油和化学电池的清洁能源。

## 实验目的

- 1、了解燃料电池的工作原理
- 2、观察仪器的能量转换过程：  
光能→太阳能电池→电能→电解池→氢能(能量储存)→燃料电池→电能
- 3、测量燃料电池输出特性，作出所测燃料电池的伏安特性 (极化) 曲线，电池输出功率随输出电压的变化曲线。计算燃料电池的最大输出功率及效率
- 4、测量质子交换膜电解池的特性，验证法拉第电解定律
- 5、测量太阳能电池的特性，作出所测太阳能电池的伏安特性曲线，电池输出功率随输出电压的变化曲线。获取太阳能电池的开路电压，短路电流，最大输出功率，填充因子等特性参数

## 实验原理

### 1、燃料电池

质子交换膜 (PEM, Proton Exchange Membrane) 燃料电池在常温下工作，具有启动快速，结构紧凑的优点，最适宜作汽车或其它可移动设备的电源，近年来发展很快，其基本结构如图 1 所示。

目前广泛采用的全氟磺酸质子交换膜为固体聚合物薄膜，厚度 0.05~0.1mm，它提供氢离子 (质子) 从阳极到达阴极的通道，而电子或气体不能通过。

催化层是将纳米量级的铂粒子用化学或物理的方法附着在质子交换膜表面，厚度约 0.03mm，对阳极氢的氧化和阴极氧的还原起催化作用。

膜两边的阳极和阴极由石墨化的碳纸或碳布做成，厚度 0.2~0.5mm，导电性能良好，其上的微孔提供气体进入催化层的通道，又称为扩散层。

商品燃料电池为了提供足够的输出电压和功率，需将若干单体电池串连或并联在一起，流场板一般由导电良好的石墨或金属做成，与单体电池的阳极和阴极形成良好的电接触，称为双极板，其上加工有供气体流通的通道。教学用燃料电池为直观起见，采用有机玻璃做流场板。

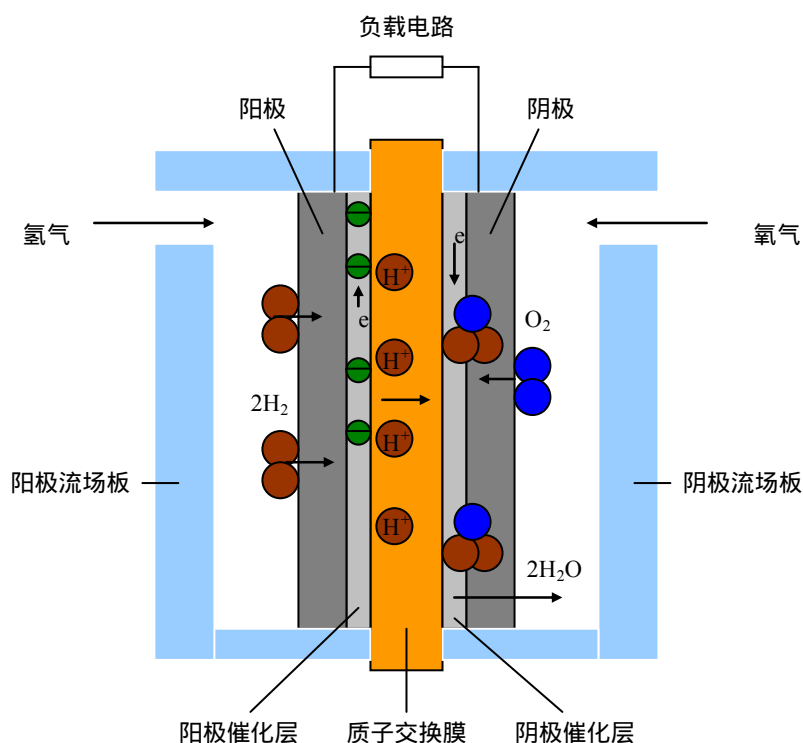


图 1 质子交换膜燃料电池结构示意图

进

入阳极的氢气通过电极上的扩散层到达质子交换膜。氢分子在阳极催化剂的作用下解离为 2 个氢离子，即质子，并释放出 2 个电子，阳极反应为：



氢离子以水合质子  $\text{H}^+ (n\text{H}_2\text{O})$  的形式，在质子交换膜中从一个磺酸基转移到另一个磺酸基，最后到达阴极，实现质子导电，质子的这种转移导致阳极带负电。

在电池的另一端，氧气或空气通过阴极扩散层到达阴极催化层，在阴极催化剂的作用下，氧与氢离子和电子反应生成水，阴极反应为：



阴极反应使阴极缺少电子而带正电，结果在阴阳极间产生电压，在阴阳极间接通外电路，就可以向负载输出电能。总的化学反应如下：



(阴极与阳极：在电化学中，失去电子的反应叫氧化，得到电子的反应叫还原。产生氧化反应的电极是阳极，产生还原反应的电极是阴极。对电池而言，阴极是电的正极，阳极是电的负极。)

## 2、水的电解

将水电解产生氢气和氧气，与燃料电池中氢气和氧气反应生成水互为逆过程。

水电解装置同样因电解质的不同而各异，碱性溶液和质子交换膜是最好的电解质。若以质子交换膜为电解质，可在图 1 右边电极接电源正极形成电解的阳极，在其上产生氧化反应  $2\text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ 。左边电极接电源负极形成电解的阴极，阳极产生的氢离子通过质子交换膜到达阴极后，产生还原反应  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$ 。即在右边电极析出氧，左边电极析出氢。

作燃料电池或作电解器的电极在制造上通常有些差别，燃料电池的电极应利于气体吸纳，而电解器需要尽快排出气体。燃料电池阴极产生的水应随时排出，以免阻塞气体通道，而电解器的阳极必须被水淹没。

## 3、太阳能电池

太阳能电池利用半导体 P-N 结受光照射时的光伏效应发电，太阳能电池的基本结构就是一个大面积平面 P-N 结，图 2 为 P-N 结示意图。

P 型半导体中有相当数量的空穴，几乎没有自由电子。N 型半导体中有相当数量的自由电子，几乎没有空穴。当两种半导体结合在一起形成 P-N 结时，N 区的电子（带负电）向 P 区扩散，P 区的空穴（带正电）向 N 区扩散，在 P-N 结附近形成空间电荷区与势垒电场。势垒电场会使载流子向扩散的反方向作漂移运动，最终扩散与漂移达到平衡，使流过 P-N 结的净电流为零。在空间电荷区内，P 区的空穴被来自 N 区的电子复合，N 区的电子被来自 P 区的空穴复合，使该区内几乎没有能导电的载流子，又称为结区或耗尽区。

当光电池受光照射时，部分电子被激发而产生电子 - 空穴对，在结区激发的电子和空穴分别被势垒电场推向 N 区和 P 区，使 N 区有过量的电子而带负电，P 区有过量的空穴而带正电，P-N 结两端形成电压，这就是光伏效应，若将 P-N 结两端接入外电路，就可向负载输出电能。

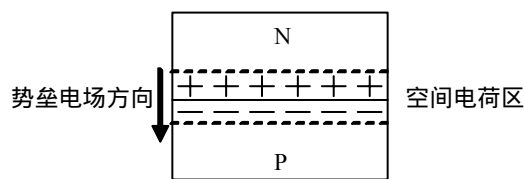


图 2 半导体 P-N 结示意图

## 仪器介绍

仪器的构成如图 3 所示。

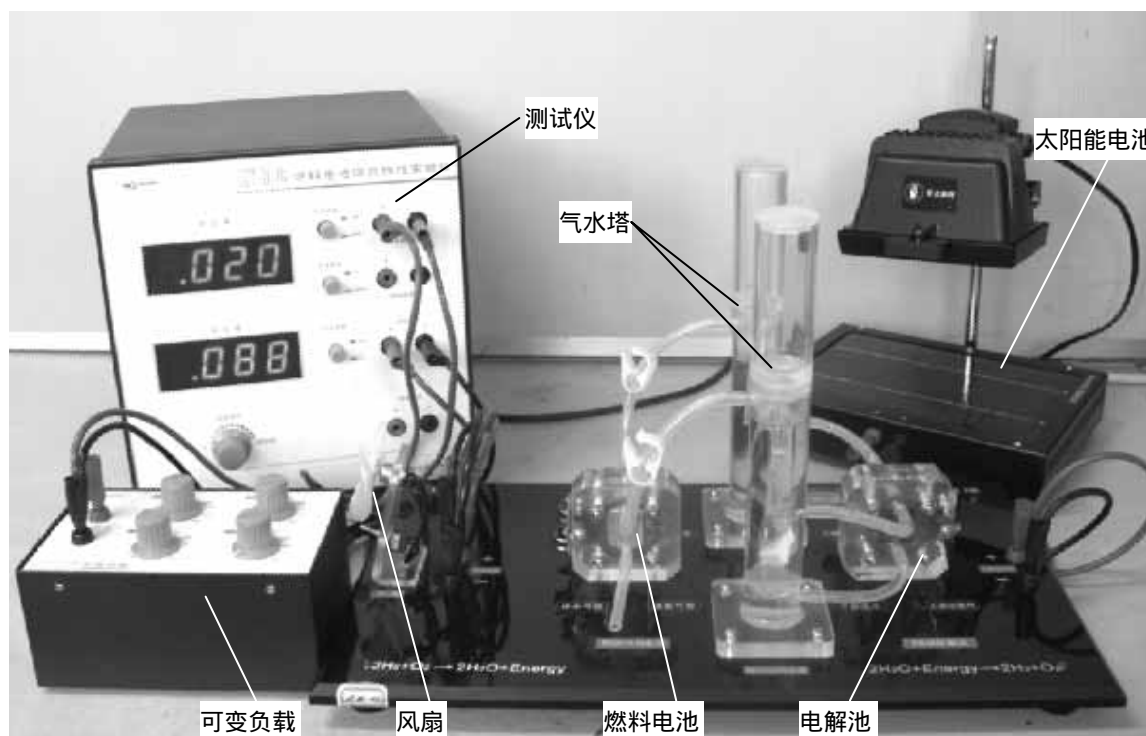


图 3 燃料电池综合实验仪

燃料电池，电解池，太阳能电池的原理见实验原理部分。

质子交换膜必需含有足够的水分，才能保证质子的传导。但水含量又不能过高，否则电极被水淹没，水阻塞气体通道，燃料不能传导到质子交换膜参与反应。如何保持良好的水平衡关系是燃料电池设计的重要课题。为保持水平衡，我们的电池正常工作时排水口打开，在电解电流不变时，燃料供应量是恒定的。若负载选择不当，电池输出电流太小，未参加反应的气体从排水口泄漏，燃料利用率及效率都低。在适当选择负载时，燃料利用率约为 90%。

气水塔为电解池提供纯水（2 次蒸馏水），可分别储存电解池产生的氢气和氧气，为燃料电池提供燃料气体。每个气水塔都是上下两层结构，上下层之间通过插入下层的连通管连接，下层顶部有一输气管连接到燃料电池。初始时，下层近似充满水，电解池工作时，产生的气体会汇聚在下层顶部，

通过输气管输出。若关闭输气管开关，气体产生的压力会使水从下层进入上层，而将气体储存在下层的顶部，通过管壁上的刻度可知储存气体的体积。两个气水塔之间还有一个水连通管，加水时打开使两塔水位平衡，实验时切记关闭该连通管。

风扇作为定性观察时的负载，可变负载作为定量测量时的负载。

测试仪面板如图 4 所示。测试仪可测量电流，电压。若不用太阳能电池作电解池的电源，可从测试仪供电输出端口向电解池供电。实验前需预热 15 分钟。

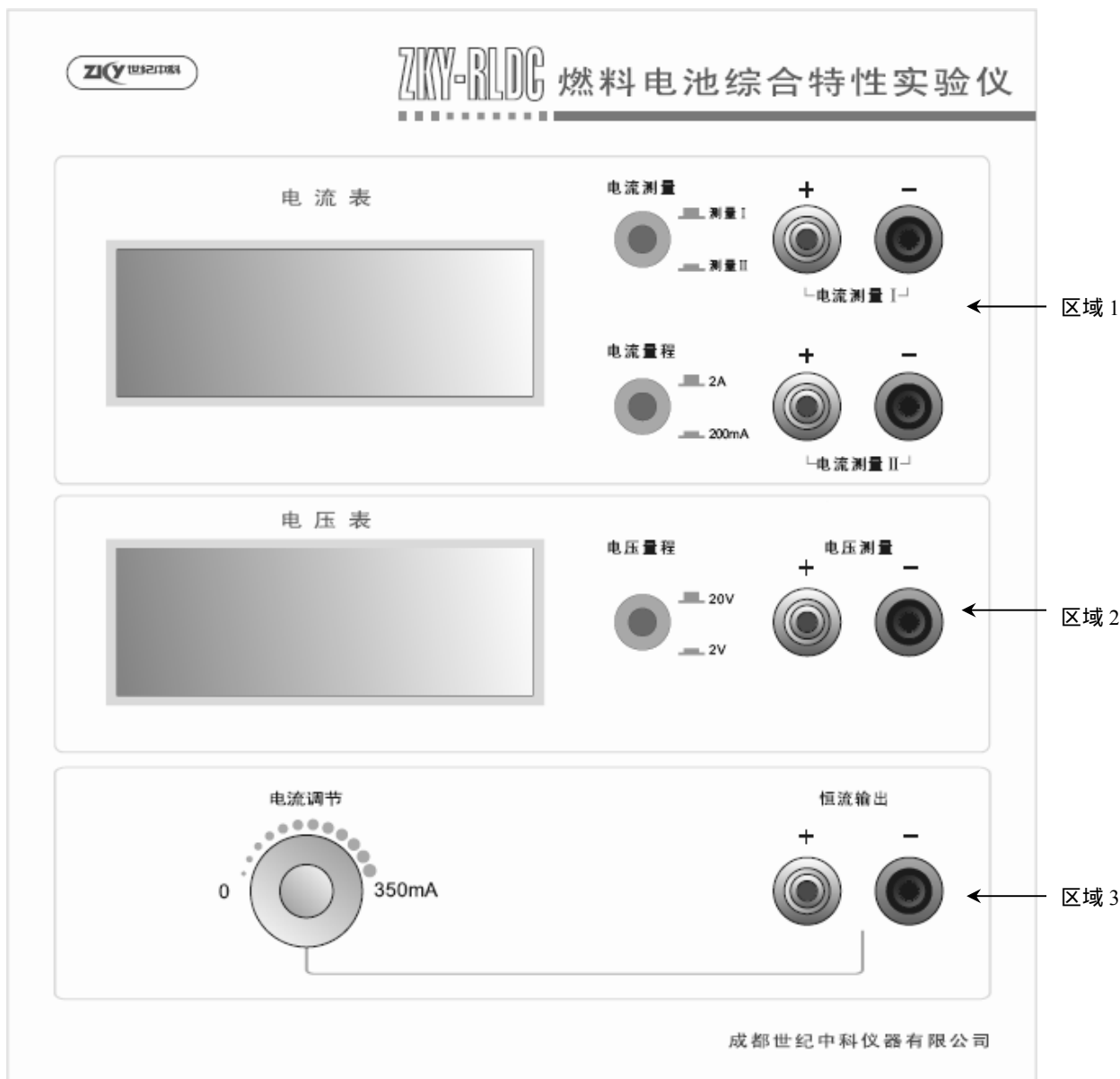


图 4 燃料电池测试仪前面板示意图

如图 4 所示为燃料电池实验仪系统的测试仪前面板图。

区域 1——电流表部分：做为一个独立的电流表使用。其中：

两个档位：2A 档和 200mA 档，可通过电流档位切换开关选择合适的电流档位测量电流。

两个测量通道：电流测量 I 和电流测量 II。通过电流测量切换键可以同时测量两条通道的电流。

区域 2——电压表部分：做为一个独立的电压表使用。共有两个档位：20V 档和 2V 档，可通过电压档位切换开关选择合适的电压档位测量电压。

区域 3——恒流源部分：为燃料电池的电解池部分提供一个从 0 ~ 350mA 的可变恒流源。

## 实验内容与步骤

### 1、质子交换膜电解池的特性测量

理论分析表明，若不考虑电解器的能量损失，在电解器上加 1.48 伏电压就可使水分解为氢气和氧气，实际由于各种损失，输入电压高于 1.6 伏电解器才开始工作。

电解器的效率为：

$$\eta_{\text{电解}} = \frac{1.48}{U_{\text{输入}}} \times 100\% \quad (4)$$

输入电压较低时虽然能量利用率较高，但电流小，电解的速率低，通常使电解器输入电压在 2 伏左右。

根据法拉第电解定律，电解生成物的量与输入电量成正比。在标准状态下（温度为零 °C，电解器产生的氢气保持在 1 个大气压），设电解电流为 I，经过时间 t 生产的氢气体积（氧气体积为氢气体积的一半）的理论值为：

$$V_{\text{氢气}} = \frac{It}{2F} \times 22.4 \text{升} \quad (5)$$

式中  $F = eN = 9.65 \times 10^4$  库仑/摩尔为法拉第常数， $e = 1.602 \times 10^{-19}$  库仑为电子电量， $N = 6.022 \times 10^{23}$  为阿伏伽德罗常数， $It/2F$  为产生的氢分子的摩尔（克分子）数，22.4 升为标准状态下气体的摩尔体积。

若实验时的摄氏温度为 T，所在地区气压为 P，根据理想气体状态方程，可对（5）式作修正：

$$V_{\text{氢气}} = \frac{273.16 + T}{273.16} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{It}{2F} \times 22.4 \text{升} \quad (6)$$

式中  $P_0$  为标准大气压。自然环境中，大气压受各种因素的影响，如温度和海拔高度等，其中海拔对大气压的影响最为明显。由国家标准 GB4797.2-2005 可查到，海拔每升高 1000 米，大气压下降约 10%。

由于水的分子量为 18，且每克水的体积为  $1 \text{cm}^3$ ，故电解池消耗的水的体积为：

$$V_{\text{水}} = \frac{It}{2F} \times 18 \text{ cm}^3 = 9.33It \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \quad (7)$$

应当指出，（6），（7）式的计算对燃料电池同样适用，只是其中的 I 代表燃料电池输出电流， $V_{\text{氢气}}$  代表燃料消耗量， $V_{\text{水}}$  代表电池中水的生成量。

确认气水塔水位在水位上限与下限之间。

将测试仪的电压源输出端串连电流表后接入电解池，将电压表并联到电解池两端。

将气水塔输气管止水夹关闭，调节恒流源输出到最大（旋钮顺时针旋转到底），让电解池迅速的产生气体。当气水塔下层的气体低于最低刻度线的时候，打开气水塔输气管止水夹，排出气水塔下层的空气。如此反复 2~3 次后，气水塔下层的空气基本排尽，剩下的就是纯净的氢气和氧气了。根据表 1 中的电解池输入电流大小，调节恒流源的输出电流，待电解池输出气体稳定后（约 1 分钟），关闭气水塔输气管。测量输入电流，电压及产生一定体积的气体的时间，记入表 1 中。

表 1 电解池的特性测量

输入电流 I (A)	输入电压 (V)	时间 t (秒)	电量 It (库仑)	氢气产生量 测量值 (升)	氢气产生量 理论值
0.10					
0.20					
0.30					

由 (6) 式计算氢气产生量的理论值。与氢气产生量的测量值比较。若不管输入电压与电流大小，氢气产生量只与电量成正比，且测量值与理论值接近，即验证了法拉第定律。

## 2、燃料电池输出特性的测量

在一定的温度与气体压力下，改变负载电阻的大小，测量燃料电池的输出电压与输出电流之间的关系，如图 5 所示。电化学家将其称为极化特性曲线，习惯用电压作纵坐标，电流作横坐标。

理论分析表明，如果燃料的所有能量都被转换成电能，则理想电动势为 1.48 伏。实际燃料的能量不可能全部转换成电能，例如总有一部分能量转换成热能，少量的燃料分子或电子穿过质子交换膜形成内部短路电流等，故燃料电池的开路电压低于理想电动势。

随着电流从零增大，输出电压有一段下降较快，主要是因为电极表面的反应速度有限，有电流输出时，电极表面的带电状态改变，驱动电子输出阳极或输入阴极时，产生的部分电压会被损耗掉，这一段被称为电化学极化区。

输出电压的线性下降区的电压降，主要是电子通过电极材料及各种连接部件，离子通过电解质的阻力引起的，这种电压降与电流成比例，所以被称为欧姆极化区。

输出电流过大时，燃料供应不足，电极表面的反应物浓度下降，使输出电压迅速降低，而输出电流基本不再增加，这一段被称为浓差极化区。

综合考虑燃料的利用率（恒流供应燃料时可表示为燃料电池电流与电解电流之比）及输出电压与理想电动势的差异，燃料电池的效率为：

$$\eta_{\text{电池}} = \frac{I_{\text{电池}} \cdot U_{\text{输出}}}{I_{\text{电解}} \cdot 1.48} \times 100\% = \frac{P_{\text{输出}}}{1.48 \times I_{\text{电解}}} \times 100\% \quad (8)$$

某一输出电流时燃料电池的输出功率相当于图 5 中虚线围出的矩形区，在使用燃料电池时，应根据伏安特性曲线，选择适当的负载匹配，使效率与输出功率达到最大。

实验时让电解池输入电流保持在 300mA，关闭风扇。

将电压测量端口接到燃料电池输出端。打开燃料电池与气水塔之间的氢气、氧气连接开关，等待约 10 分钟，让电池中的燃料浓度达到平衡值，电压稳定后记录开路电压值。

将电流量程按钮切换到 200mA。可变负载调至最大，电流测量端口与可变负载串联后接入燃料电池输出端，改变负载电阻的大小，使输出电压值如表 2 所示（输出电压值可能无法精确到表中所示数值，只需相近即可），稳定后记录电压电流值。

负载电阻猛然调得很低时，电流会猛然升到很高，甚至超过电解电流值，这种情况是不稳定的，重新恢复稳定需较长时间。为避免出现这种情况，输出电流高于 210mA 后，每次调节减小电阻 0.5Ω，输出电流高于 240mA 后，每次调节减小电阻 0.2Ω，每测量一点的平衡时间稍长一些（约需 5 分钟），稳定后记录电压电流值。

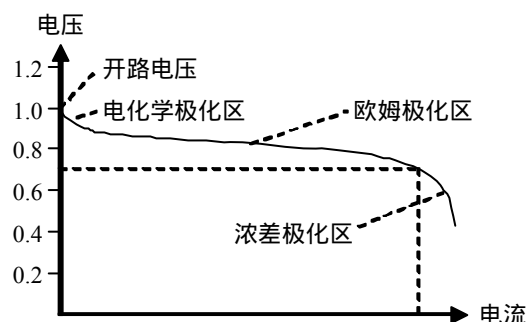


图 5 燃料电池的极化特性曲线

表 2 燃料电池输出特性的测量

电解电流 =          mA

输出电压 U (V)		0.90	0.85	0.80	0.75	0.70					
输出电流 I (mA)	0										
功率 P=U×I (mW)	0										

作出所测燃料电池的极化曲线。

作出该电池输出功率随输出电压的变化曲线。

该燃料电池最大输出功率是多少？最大输出功率时对应的效率是多少？

实验完毕，关闭燃料电池与气水塔之间的氢气氧气连接开关，切断电解池输入电源。

### 3、太阳能电池的特性测量

在一定的光照条件下，改变太阳能电池负载电阻的大小，测量输出电压与输出电流之间的关系，如图 6 所示。

$U_{oc}$  代表开路电压， $I_{sc}$  代表短路电流，图 4 中虚线围出的面积为太阳能电池的输出功率。与最大功率对应的电压称为最大工作电压  $U_m$ ，对应的电流称为最大工作电流  $I_m$ 。

表征太阳能电池特性的基本参数还包括光谱响应特性，光电转换效率，填充因子等。

填充因子 FF 定义为：

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}}$$

(9)

它是评价太阳能电池输出特性好坏的一个重要参数，它的值越高，表明太阳能电池输出特性越趋近于矩形，电池的光电转换效率越高。

将电流测量端口与可变负载串联后接入太阳能电池的输出端，将电压表并联到太阳能电池两端。

保持光照条件不变，改变太阳能电池负载电阻的大小，测量输出电压电流值，并计算输出功率，记入表 3 中。

表 3 太阳能电池输出特性的测量

输出电压 $U$ (V)												
输出电流 $I$ (mA)												
功率 $P=U \times I$ (mW)												

作出所测太阳能电池的伏安特性曲线。

作出该电池输出功率随输出电压的变化曲线。

该太阳能电池的开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$  是多少？最大输出功率  $p_m$  是多少？最大工作电压  $U_m$ ，最大工作电流  $I_m$  是多少？填充因子 FF 是多少？

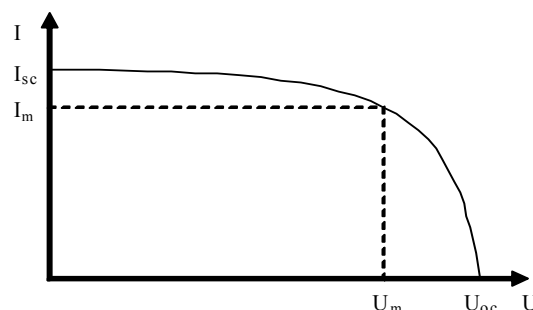


图 6 太阳能电池的伏安特性曲线

### 【注意事项】

1. 使用前应首先详细阅读说明书。
2. 该实验系统必须使用去离子水或二次蒸馏水，容器必须清洁干净，否则将损坏系统。
3. PEM 电解池的最高工作电压为 6V，最大输入电流为 1000mA，否则将极大地伤害 PEM 电解池。
4. PEM 电解池所加的电源极性必须正确，否则将毁坏电解池并有起火燃烧的可能。
5. 绝不允许将任何电源加于 PEM 燃料电池输出端，否则将损坏燃料电池。
6. 气水塔中所加入的水面高度必须在上水位线与下水位线之间，以保证 PEM 燃料电池正常工作。

7. 该系统主体系有机玻璃制成，使用中需小心，以免打坏和损伤。
8. 太阳能电池板和配套光源在工作时温度很高，切不可用手触摸，以免被烫伤。
9. 绝不允许用水打湿太阳能电池板和配套光源，以免触电和损坏该部件。
10. 配套“可变负载”所能承受的最大功率是 1W，只能使用于该实验系统中。
11. 电流表的输入电流不得超过 2A，否则将烧毁电流表。
12. 电压表的最高输入电压不得超过 25V，否则将烧毁电压表。
13. 实验时必须关闭两个气水塔之间的连通管。