



**ZKY-RLDC-2**  
**新能源实验系统**  
**实验指导及操作说明书**

**成都世纪中科仪器有限公司**  
**四川世纪中科光电技术有限公司**

地址：四川省成都经济技术开发区南二路309号 邮编：610100

电话：(028) 85247006 85213812 传真：(028) 85247006

网址：WWW.ZKY.CN

E-mail: [ZKY@ZKY.Cn](mailto:ZKY@ZKY.Cn)

2015-11-30

## 新能源实验系统

电池行业是 21 世纪的朝阳行业，发展前景十分广阔。该新能源实验系统涵盖燃料电池和太阳能电池两大新能源。

### 燃料电池

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。

### 太阳能电池

在电池行业中，最没有污染、市场空间最大的应该是太阳能电池，太阳能电池的研究与开发越来越受到世界各国的广泛重视。照射在地球上的太阳能非常巨大，大约 40 分钟照射在地球上的太阳能，便足以供全球人类一年的能量消费。可以说，太阳能是真正取之不尽、用之不竭的能源。而且太阳能发电干净，不产生公害。所以太阳能发电被誉为最理想的能源。从太阳能获得电力，需通过太阳能电池进行光电变换来实现。它同以往其它电源发电原理不同，具有无枯竭危险，无污染，不受资源分布地域的限制等特点。

随着技术的进步与产业规模的扩大，太阳能发电的成本在逐步降低，而资源枯竭与环境保护导致传统电源成本上升。太阳能发电在价格上已可以与传统电源竞争，加之国家产业政策的扶持，太阳能应用具有光明的前景。

太阳能发电有离网运行与并网运行 2 种发电方式。

并网运行是将太阳能发电输送到大电网中，由电网统一调配，输送给用户。此时太阳能电站输出的电能必需与电网电能同频率、同相位，并满足电网安全运行的诸多要求。大型太阳能电站大都采用并网运行方式。

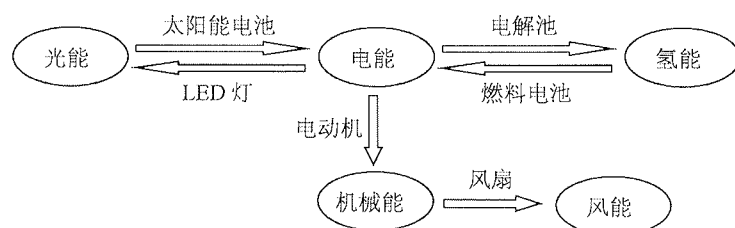
离网运行是太阳能系统与用户组成独立的供电网络。由于光照的时间性，为解决无光照时的供电，必需配有储能装置，或能与其它电源切换、互补。中小型太阳能电站大多采用离网运行方式。本实验相当于离网型应用系统。

能源为人类社会发展提供动力，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. 了解燃料电池和太阳能电池的工作原理

## 2. 观察实验中涉及到的能量转换过程:



3. 测量质子交换膜电解池的特性, 验证法拉第电解定律
4. 测量燃料电池输出特性
5. 测量太阳能电池输出特性
6. 失配及遮挡对太阳能电池输出的影响实验
7. 太阳能电池对储能装置两种方式充电实验
8. 太阳能电池直接带负载实验
9. 加 DC-DC 匹配电源电压与负载电压实验
10. DC-AC 逆变与交流负载实验
11. 太阳能电池与燃料电池的组合实验

## 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。

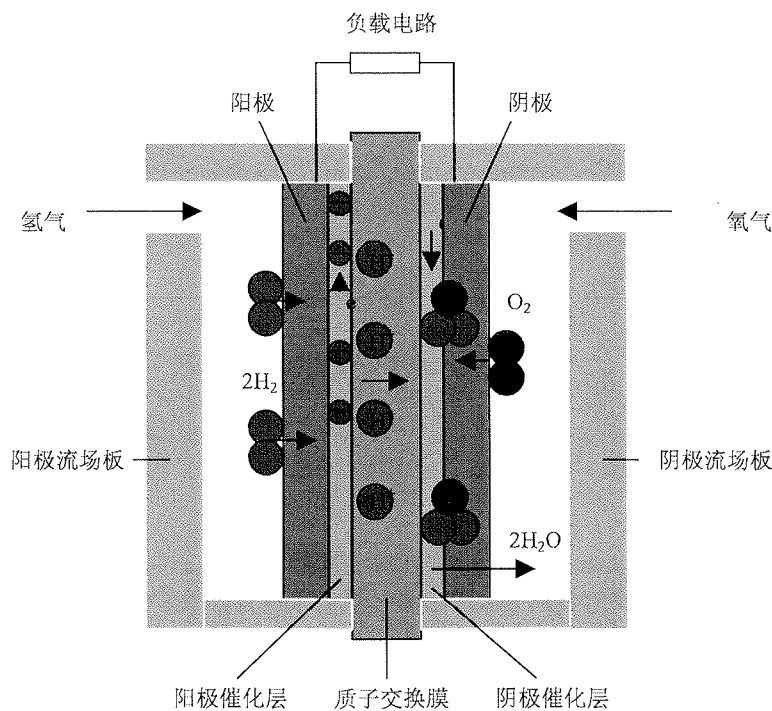


图 1 质子交换膜燃料电池结构示意图

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。

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  $\text{H}^+ (\text{nH}_2\text{O})$  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, 在阴极催化层的作用下, 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 PN 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 PN 结, 图 2 为 PN 结示意图。

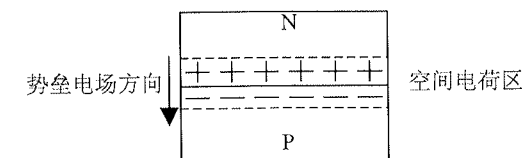


图 2 PN 结示意图

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 PN 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 PN 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 PN 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。

当太阳能电池受光照射时,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, PN 结两端形成电压,这就是光伏效应,若将 PN 结两端接入外电路,就可向负载输出电能。

#### 4. 离网型太阳能电源系统

离网型太阳能电源系统如图 3 所示。

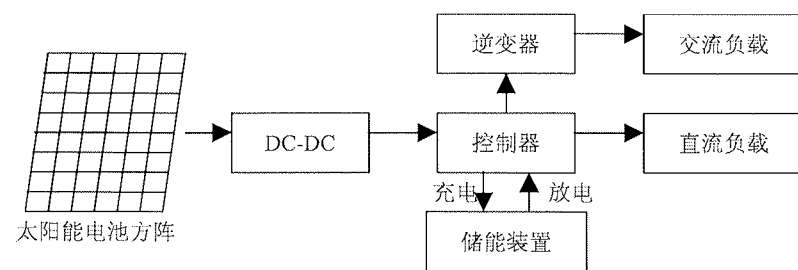


图 3 太阳能光伏电源系统

控制器又称充放电控制器,起着管理光伏系统能量,保护蓄电池及整个光伏系统正常工作的作用。当太阳能电池方阵输出功率大于负载额定功率或负载不工作时,太阳能电池通过控制器向储能装置充电。当太阳能电池方阵输出功率小于负载额定功率或太阳能电池不工作时,储能装置通过控制器向负载供电。蓄电池过度充电和过度放电都将大大缩短蓄电池的使用寿命,需控制器对充放电进行控制。

本系统为训练学生能力,由学生自己完成各种测量线路连接,进行充放电实验及带负载实验,没配备控制器。

DC-DC 为直流电压变换电路,相当于交流电路中的变压器,最基本的 DC-DC 变换电路如图 4 所示。

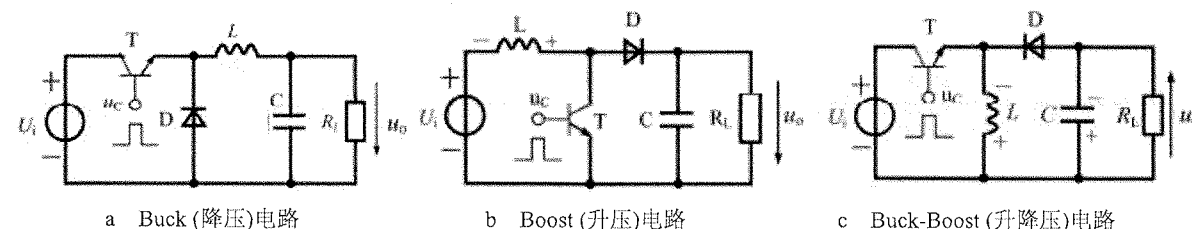


图 4 最基本的 DC-DC 变换电路

图 4 中,  $U_i$  为电源, T 为晶体闸流管,  $u_c$  为晶闸管驱动脉冲, L 为滤波电感, C 为电容, D 为续流二极管,  $R_L$  为负载,  $u_o$  为负载电压。调节晶闸管驱动脉冲的占空比,即驱动脉冲高电平持续时间与脉冲周期的比值,即可调节负载端电压。

DC-DC 的作用为:

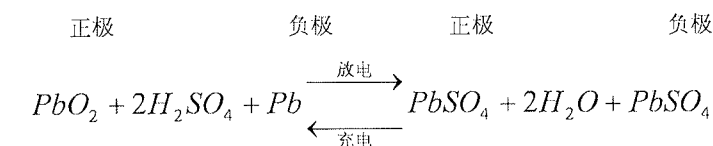
当电源电压与负载电压不匹配时,通过 DC-DC 调节负载端电压,使负载能正常工作。

通过改变负载端电压,改变了折算到电源端的等效负载电阻,当等效负载电阻与电源内阻相等时,电源能最大限度输出能量。

若取反馈信号控制驱动脉冲,进而控制 DC-DC 输出电压,使电源始终最大限度输出能量,这样的功能模块称为最大功率跟踪器。

光伏系统常用的储能装置为蓄电池与超级电容器。

蓄电池是提供和存储电能电化学装置。光伏系统使用的蓄电池多为铅酸蓄电池,充放电时的化学反应式为:



蓄电池放电时,化学能转换成电能,正极的氧化铅和负极的铅都转变为硫酸铅,蓄电池充电时,电能转换为化学能,硫酸铅在正负极又恢复为氧化铅和铅。

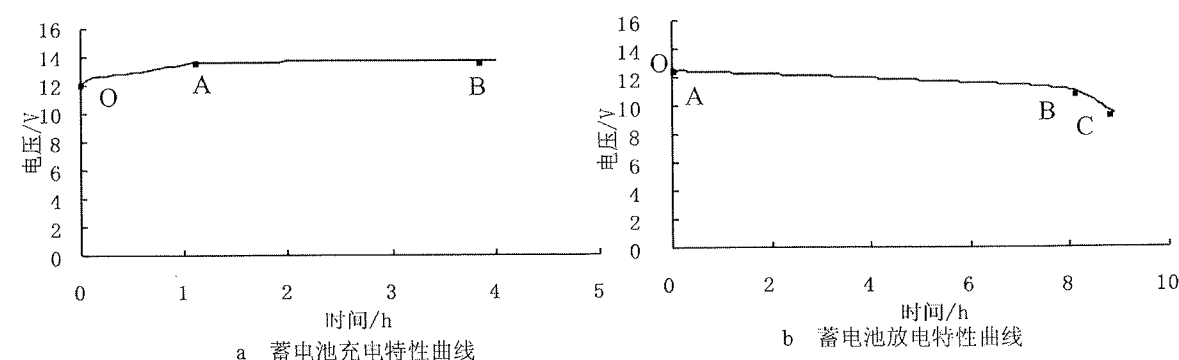


图 5 蓄电池的充放电特性曲线

图 5a 为蓄电池恒压充电时的充电特性曲线。OA 段电压快速上升。AB 段电压缓慢上升,且延续较长时间。接近 13.7V 可停止充电。

蓄电池充电电流过大,会导致蓄电池的温度过高和活性物质脱落,影响蓄电池的寿命。在充电后期,电化学反应速率降低,若维持较大的充电电流,会使水发生电解,正极析出氧气,负极析出氢气。理想的充电模式是,开始时以蓄电池允许的最大充电电流充电,随电池电压升高逐渐减小充电电流,达到最大充电电压时立即停止充电。

图 5b 为蓄电池放电特性曲线。OA 段电压下降较快。AB 段电压缓慢下降,且延续较长时间。C 点后电压急速下降,此时应立即停止放电。

蓄电池的放电时间一般规定为 20 小时。放电电流过大和过度放电(电池电压过低)会严重影响电池寿命。

蓄电池具有储能密度(单位体积存储的能量)高的优点。但有充放电时间长(一般为数小时),充放电寿命短(约 1000 次),功率密度低的缺点。

超级电容器通过极化电解质来储能,它由悬浮在电解质中的两个多孔电极板构成。在极板上加电,正极板吸引电解质中的负离子,负极板吸引正离子,实际上形成两个容性存储层,它所形成的双电层和传统电容器中的电介质在电场作用下产生的极化电荷相似,从而产生电容效应。由于紧密的电荷层间距比普通电容器电荷层间的距离小得多,因而具有比普通电容器更大的容量。

当超级电容所加电压低于电解液的氧化还原电极电位时,电解液界面上电荷不会脱离电解液,超级电容器为正常工作状态。如电容器两端电压超过电解液的氧化还原电极电位时,电解液将分解,为非正常状态。超级电容充电时不应超过其额定电压。

超级电容器的充放电过程始终是物理过程,没有化学反应,因此性能是稳定的。与利用化学反应的蓄电池不同,超级电容器可以反复充放电数十万次。

超级电容具有功率密度高(可大电流充放电),充放电时间短(一般为数分钟),充放

电寿命长的优点。但比蓄电池储能密度低。

若将蓄电池与超级电容并联作蓄能装置，则可以在功率和储能密度上优势互补。

逆变器是将直流电转换为交流电的电力变换装置。

逆变电路一般都需升压来满足220V常用交流负载的用电需求。逆变器按升压原理的不同分为低频、高频和无变压器3种逆变器。

低频逆变器首先把直流电逆变成50Hz低压交流电，再通过低频变压器升压成220V的交流电供负载使用。它的优点是电路结构简单，缺点是低频变压器体积大、价格高、效率也较低。

高频逆变器将低压直流电逆变为高频低压交流电，经过高频变压器升压后，再经整流滤波电路得到高压直流电，最后通过逆变电路得到220V低频交流电供负载使用。高频逆变器体积小、重量轻、效率高，是目前用得最多的逆变器类型。

无变压器逆变器通过串联太阳能电池组或DC-DC电路得到高压直流电，再通过逆变电路得到220V低频交流电供负载使用。这种逆变器在欧洲市场占主导地位，由于在发电与用电电网间没有变压器隔离，在美国禁止使用。

按输出波形，逆变器分为方波逆变器，阶梯波逆变器和正弦波逆变器3种。

方波逆变器只需简单的开关电路即能实现，结构简单，成本低。但存在效率较低，谐波成分大，使用负载受限制等缺点。在太阳能系统中，方波逆变器已经很少应用了。

阶梯波逆变器普遍采用PWM脉宽调制方式生成阶梯波输出。它能够满足大部分用电设备的需求，但它还是存在约20%的谐波失真，在运行精密设备时会出现问题，也会对通讯设备造成高频干扰。

正弦波逆变器的优点是输出波形好，失真度很低，能满足所有交流负载的应用，它的缺点是线路相对复杂，价格较贵。在太阳能发电并网应用时，必须使用正弦波逆变器。

## 实验仪器

仪器的构成如图 6 所示，包括燃料电池、太阳能电池实验装置和测试仪三部分。

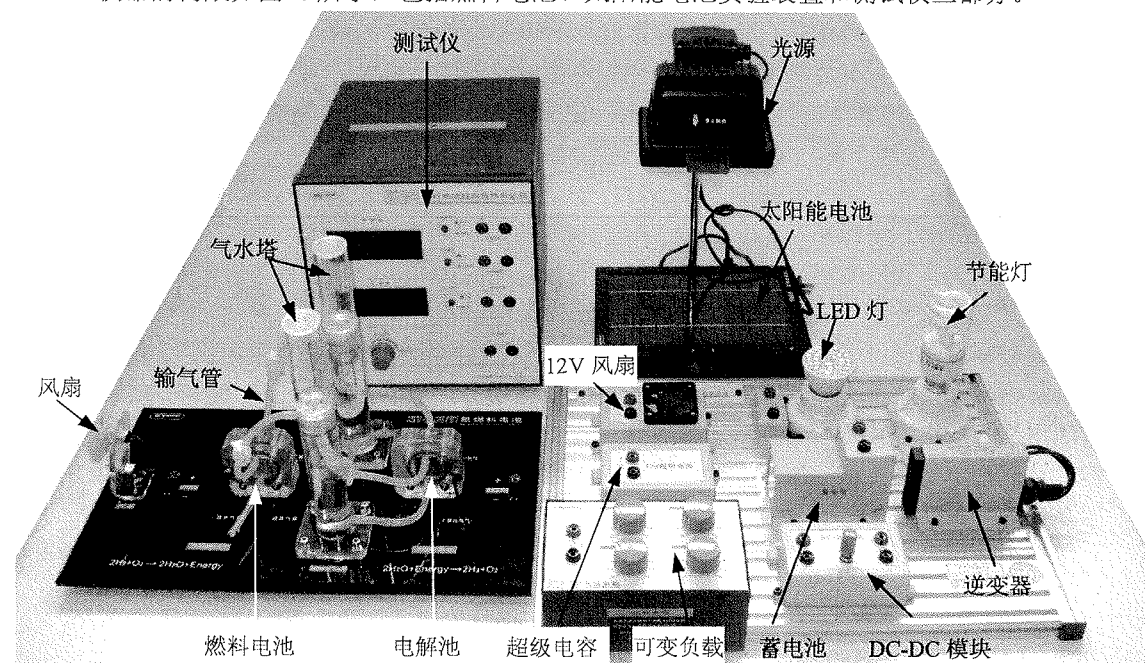


图 6 新能源实验系统实物图

燃料电池部分：

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（二次蒸馏水），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，切记实验时必须关闭该连通管。

风扇作为定性观察时的负载。

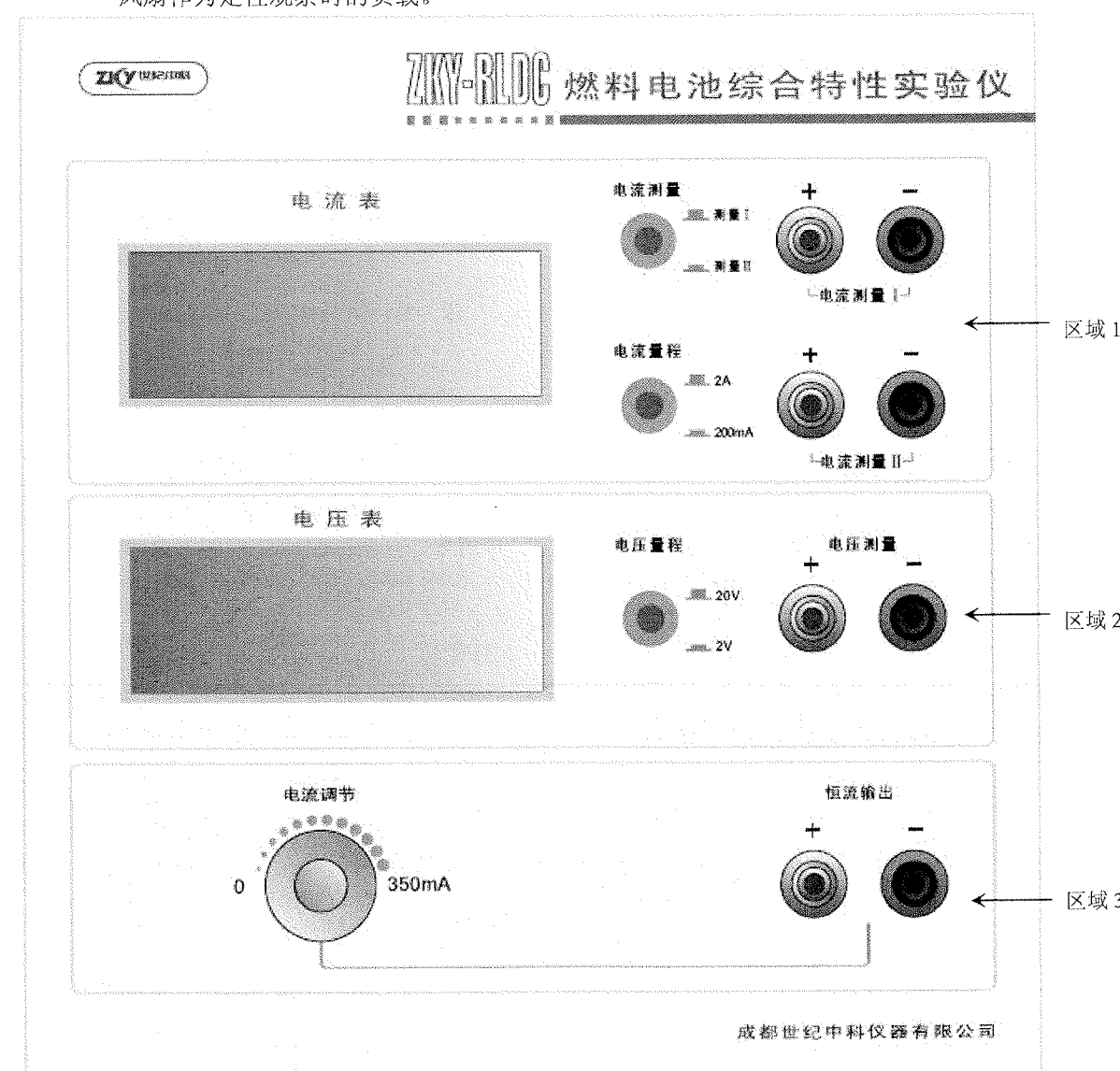


图 7 测试仪面板图

测试仪面板如图 7 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。

注：太阳能电池和燃料电池共用一台测试仪。

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，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交替测量并观察两条通道的电流。

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。

太阳能电池部分：

各部件的基本参数如下：

太阳能电池 单晶硅太阳能电池，标称电压 12V，标称功率 4W

光源 150W 碘钨灯

可变负载 0.1~999.9Ω

直流风扇 12V，1W

LED 灯 直流 15V，0.4W

DC-DC 升降压 DC-DC，输入 5~35V，输出 1.5~17V，1A

超级电容 2.3F，11V

蓄电池 12V，1.3AH（安时）

逆变器 DC12V~AC220V，100W

交流负载 节能灯，5W

## 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 1.48V 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 1.6V 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℃，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：

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

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：

$$V_{\text{氢气}} = \frac{373.15 + T}{273.15} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{It}{2F} \times 22.4(\text{L}) \quad (6)$$

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：

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

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。

将测试仪的电流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），让电解池迅速产生气体。当气水塔下层的液面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、电压及产生一定氢气的时间，记入表 1 中。

表 1 电解池的特性测量

室温 T: ____℃ 当地海拔 h: ____m						
输入电流 I(A)	输入电压(V)	时间 t(s)	电量 It(C)	氢气产生量 测量值(mL)	氢气产生量 理论值(mL)	测量值与理 论值的相对 误差
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 8 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。

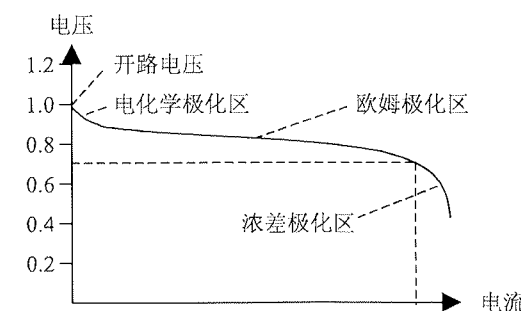


图 8 燃料电池的极化特性曲线

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：

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

某一输出电流时燃料电池的输出功率相当于图 8 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。

燃料电池输出特性测量原理如图 9：

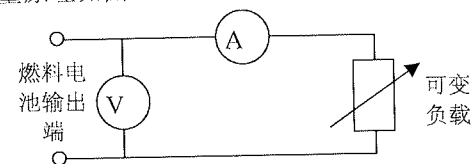


图 9 燃料电池输出特性测量原理图

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，电压量程切换至 2V。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（若电流  $\geq 200\text{mA}$  需切换量程）。

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 0.5 $\Omega$ ，输出电流高于 240mA 后，每次调节减小电阻 0.2 $\Omega$ ，每测量一点的平衡时间稍长一些（约需 1 分钟）。稳定后记录电压电流值。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。

表 2 燃料电池输出特性测量

														电解电流: 300mA
输出电压(mV)		900	875	850	825	800	775	750	725	712	700	675	625	...
输出电流(mA)	0													
输出功率(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？最大功率输出时对应的效率是多少？

### 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 10 所示。

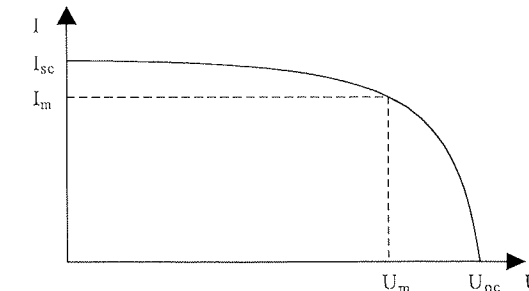


图 10 太阳能电池输出伏安特性曲线

$U_{oc}$  代表开路电压， $I_{sc}$  代表短路电流，图 10 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：

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}} \quad (9)$$

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。

打开光源预热 5min，待光照稳定。按图 11 接线，测量太阳能电池的开路电压和短路电流于表 3。

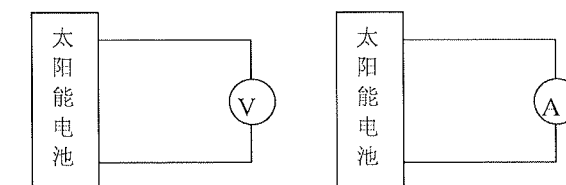


图 11 太阳能电池开路电压（左图）和短路电流（右图）测量连线图

表 3 太阳能电池的开路电压和短路电流

开路电压 $U_{oc}$ (V)	
短路电流 $I_{sc}$ (mA)	

按图 12 接线，以可变电阻作为太阳能电池的负载。实验时先将可变负载阻值调为最小，然后逐渐增大电阻值，记录太阳能电池的输出电压  $U$  和电流  $I$  于表 4，并计算输出功率  $P=U \times I$ ，填于表 4 中。

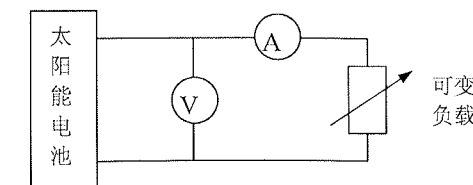


图 12 太阳能电池输出伏安特性测量连线图

表 4 太阳能电池输出伏安特性测量

输出电压 U(V)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	...
输出电流 I(mA)															
输出功率 P(mW)															

按表 4 数据绘制所用太阳能电池的输出伏安特性曲线。

以输出电压为横坐标，输出功率为纵坐标，作太阳能电池输出功率与输出电压关系曲线。

在实验的光照条件下，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？

#### 4. 失配及遮挡对太阳能电池输出的影响实验

太阳能电池在串、并联使用时，由于每片电池电性能不一致，使得串、并联后的输出功率小于各个单体电池输出功率之和，称为太阳能电池的失配。

太阳能电池由于云层，建筑物的阴影或电池表面的灰尘遮挡，使部分电池接收的辐照度小于其它部分，这部分电池输出会小于其它部分，也会对输出产生类似失配的影响。

太阳能电池并联连接时，总输出电流为各并联电池支路电流之和。在有失配或遮挡时，只要最差支路的开路电压高于组件的工作电压，则输出电流仍为各支路电流之和。若有某支路的开路电压低于组件的工作电压，则该支路将作为负载而消耗能量。

太阳能电池串联连接时，串联支路输出电流由输出最小的电池决定。在有失配或遮挡时，一方面会使该支路输出电流降低，另一方面，失配或被遮挡部分将消耗其它部分产生的能量，这样局部的温度就会很高，产生热斑，严重时烧坏太阳能电池组件。

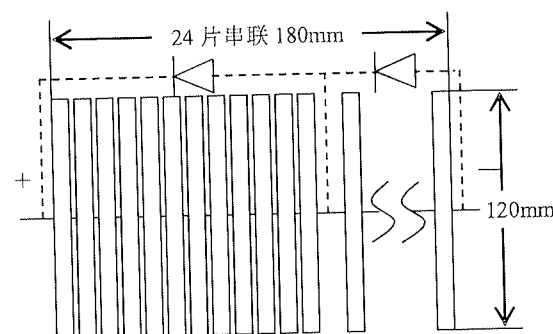


图 13 太阳能电池的连接示意图

由于即使部分遮挡，也会对整个串联电路输出产生严重影响。在应用系统中，常常在若干电池片旁并联旁路二极管，如图 13 中虚线所示，这样，若部分面积被遮挡，其它部分仍可正常工作。本实验所用电池未加旁路二极管。

由太阳能电池的伏安特性可知，太阳能电池在正常的工作范围内，电流变化很小，接近短路电流，电池的最大输出功率与短路电流成正比，故在测量遮挡对输出的影响时，可按图 11（右图）测量遮挡对短路电流的影响。

表 5 遮挡对太阳能电池输出的影响

遮挡条件	无遮挡	纵向遮挡			横向遮挡		
遮挡面积	0	10%	20%	50%	25%	50%	75%
短路电流 (mA)							

纵向遮挡（遮挡串联电池片中的若干片）对输出影响如何？工程上如何减小这种影响？

横向遮挡（遮挡所有电池片的部分面积，等效于遮挡并联支路）对输出影响如何？

注：长时间纵向遮挡对电池片有一定损坏，实验时做完纵向遮挡实验应及时取走遮挡物。

#### 5. 太阳能电池对储能装置两种方式充电实验

本实验对比太阳能电池直接对超级电容充电和在太阳能电池后加 DC-DC 再对超级电容充电。说明不同充电方式下充电特性的不同及充电方式对超级电容充电效率的影响。

本实验所用 DC-DC 采用输入反馈控制，在工作过程中保持输入端电压基本稳定。若太阳

能电池光照条件不变，并调节 DC-DC 使输入电压等于太阳能电池最大功率点对应的输出电压，即可实现在太阳能电池的最大功率输出下的恒功率充电。

理论上，采用最大功率输出下的恒功率充电，太阳能电池一直保持最大输出，充电效率应该最高。在目前系统中，由于太阳能电池输出功率不大，而 DC-DC 本身有一定的功耗，致使两种方式充电效率（以从同一低电压充至额定电压所需时间衡量）差别不大，但从测量结果可以看出充电特性的不同。

按图 14a，将负载组件接入超级电容放电，控制放电电流小于 150mA，使电容电压放至低于 1V。

按图 14b 接线，做太阳能电池直接对超级电容充电实验。充电至 11 伏时停止充电。

将超级电容再次放电后，按图 14c 接线，先将电压表接至太阳能电池端，调节 DC-DC 使太阳能电池输出电压为最大功率电压（由实验 1 确定）。然后将电压表移至超级电容端（此时不再调节 DC-DC 旋钮），做加 DC-DC 后对超级电容充电实验，充电至 11 伏时停止充电。

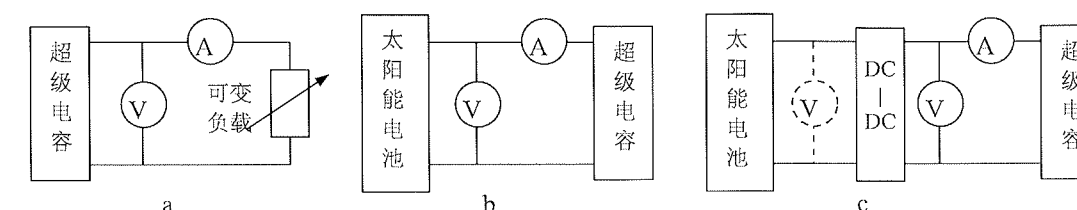


图 14 超级电容放电 (a)，直接对超级电容充电 (b)，加 DC-DC 后对超级电容充电 (c) 实验

表 6 两种充电情况下超级电容的充电特性

时间(min)	直接对超级电容充电			加 DC-DC 后对超级电容充电		
	充电电压(V)	充电电流(mA)	充电功率(mW)	充电电压(V)	充电电流(mA)	充电功率(mW)
0.5						
1.0						
1.5						
2.0						
2.5						
3.0						
3.5						
4.0						
4.5						
5.0						
5.5						
6.0						
6.5						
7.0						
7.5						
8.0						
8.5						
9.0						
10.0						

由表 6 数据绘制两种充电情况下超级电容的 U-t、I-t、P-t 曲线，了解两种方式的充电特性，根据所绘曲线加以讨论。

#### 6. 太阳能电池直接带负载实验

太阳能电池输出电压与直流负载工作电压一致时，可以将太阳能电池直接连接负载。

若负载功率与太阳能电池最大输出功率一致，则太阳能电池工作在最大输出功率点，最大限度输出能量。

若负载功率小于太阳能电池最大输出功率，则太阳能电池工作电压大于最佳工作电压，实际输出功率小于最大输出功率。此时控制器会将太阳能电池输出的一部分能量向储能装置



充电,使太阳能电池回归最佳工作点。

若负载功率大于太阳能电池最大输出功率,则太阳能电池工作电压小于最佳工作电压,实际输出功率小于最大输出功率。此时控制器会由储能装置向负载提供部分电能,使太阳能电池回归最佳工作点。

本实验模拟负载功率大于太阳能电池最大输出功率的情况,观察并联超级电容前后太阳能电池输出功率和负载实际获得功率的变化,说明上述控制过程。

按图 15,断开超级电容,记录并联超级电容前,太阳能电池输出电压电流,计算输出功率  $P=UI$ ,数据填入表 7。

将充电至约 11V 的超级电容并联至负载,由于超级电容容量较小,我们可看到负载端电压从 11V 一直下降,在实际应用系统中,只要储能器容量足够大,下降速率会非常慢。当超级电容电压降至接近太阳能电池最佳工作电压时,记录太阳能电池的相应参数入表 7。

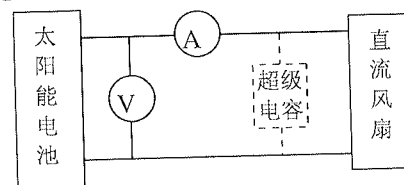


图 15 太阳电池直接连接负载接线图

表 7 太阳电池直接带负载实验

并联超级电容前太阳能电池输出情况			并联超级电容后太阳能电池输出情况		
电压 $U_1(V)$	电流 $I_1(mA)$	功率 $P_1(mW)$	电压 $U_2(V)$	电流 $I_2(mA)$	功率 $P_2(mW)$

并联超级电容后太阳能电池输出是否增加? 计算太阳能电池输出增加率  $(P_2-P_1)/P_1$ , 试以太阳能电池输出伏安特性解释输出增加的原因。

若负载电阻不变,负载获得功率与电压平方成正比。计算负载功率增加率  $(U_2^2-U_1^2)/U_1^2$ , 若该增加率大于太阳能电池输出增加率,多余的能量由哪部分提供?

### 7. 加 DC-DC 匹配电源电压与负载电压实验

太阳能电池输出电压与直流负载工作电压不一致时,太阳能电池输出需经 DC-DC 转换成负载电压,再连接至负载。本实验比较太阳能电池输出电压与直流负载工作电压不一致时,加不加 DC-DC 对负载获得功率的影响,说明若不加 DC-DC,负载无法正常工作。

测量未加 DC-DC 时(不接入图 16 中虚线部分),负载的电压、电流,计算负载获得的功率,记入表 8。接入 DC-DC 后,调节 DC-DC 旋钮使输出最大(电压,电流表读数达到最大),测量此时负载的电压、电流,计算负载获得的功率记入表 8。注:LED 灯的额定电压为 15V。

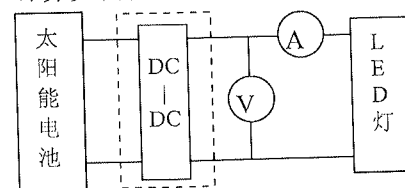


图 16 加 DC-DC 匹配电压接线图

表 8 加 DC-DC 匹配电源电压与负载电压实验

加 DC-DC 前负载获得功率			加 DC-DC 后负载获得功率		
电压 $U_1(V)$	电流 $I_1(mA)$	功率 $P_1(mW)$	电压 $U_2(V)$	电流 $I_2(mA)$	功率 $P_2(mW)$

比较加 DC-DC 前后负载获得的功率变化并加以讨论。

### 8. DC-AC 逆变与交流负载实验

当负载为 220 伏交流时,太阳能电池输出必需经逆变器转换成交流 220 伏,才能供负载使用。

由于节能灯功率(5W)远大于太阳能电池输出功率,由太阳能电池与蓄电池并联后给节能灯供电。

按图 18 接线,用电压表测量逆变器输入端直流电压,用示波器测量逆变器输出端电压及波形,记入表 9。然后断开蓄电池,将示波器换成节能灯,再接通电路,交流负载节能灯点亮。【注:严禁在不加信号衰减器的情况下,将示波器探头直接接在逆变器输出端,否则可能对示波器造成损坏。必须使用本实验仪配备的示波器连接线(见图 17),该示波器接线的一端两孔插头已内置 33 倍信号衰减器,实验时连接线一端接逆变器输出端,另一端接示波器。求逆变器输出端交流电压时应在示波器显示的电压数值的基础上乘以 33】。

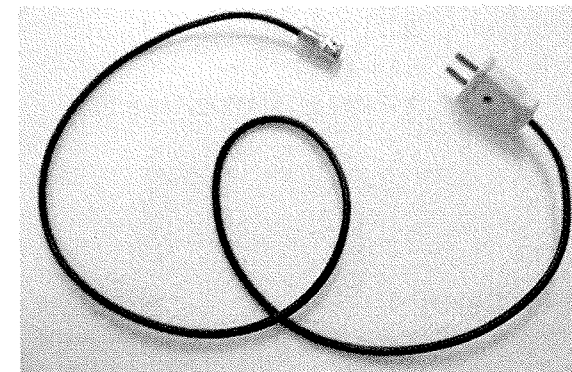


图 17 示波器连接线(插头一端已内置 33 倍信号衰减器)

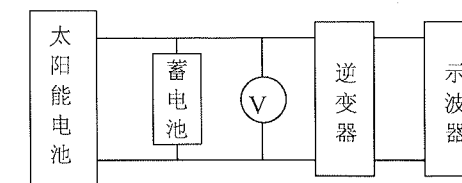


图 18 交流负载实验接线图

表 9 逆变器功能说明实验

逆变器输入直流电压(V)	逆变器输出交流电压(V)	逆变器输出波形

画出逆变器输出电压波形,根据实验原理部分所述,判断该逆变器类型。

### 9. 太阳能电池与燃料电池组合实验

在熟悉太阳能电池的输出特性及 DC-DC 的最大功率跟踪功能以后,可利用太阳能电池输出的电能来电解去离子水,从而可将太阳能电池与燃料电池结合起来,以燃料电池的风扇作为最终负载,实现如下能量的转化过程:

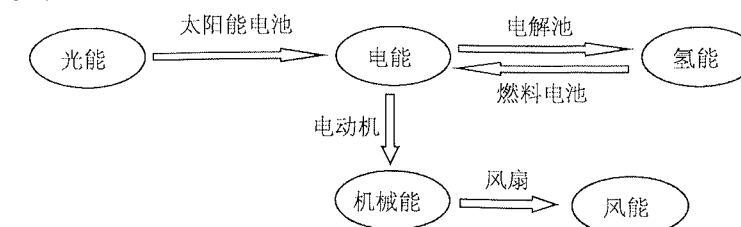


图 19 太阳能电池与燃料电池组合实验中涉及到的能量转化过程示意图

该实验为能量转化过程的演示实验，其电路连接如图 20。实验前，关闭两输气管的止水夹和风扇开关，打开光源，调节 DC-DC 旋钮使燃料电池输入电流达到最大，实现太阳能电池最大功率输出（光能→电能）。实验时电解池产生的断断续续的气泡累积在气水塔中并储存起来（电能→氢能），待五分钟后，氢气和氧气浓度足够，打开止水夹，让氢气和氧气在燃料电池中充分混合产生电能（氢能→电能），打开风扇开关，风扇开始转动（电能→机械能→风能）。

注：由于电路上会产生能量损耗，太阳能电池输出的电能并不能全部用于风扇转动，又因为太阳能电池输出功率较小，无法使风扇连续转动，实验时，须先关闭风扇和止水夹，待太阳能电池输出的能量储存在燃料电池中足够多时，再打开风扇。

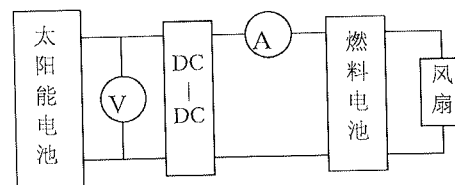


图 20 太阳能电池与燃料电池组合实验

## 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。
14. 太阳能应用实验中的各部分组件，使用前请注意其电压、电流、功率要求，切勿超出其额定使用范围。
15. 长时间串联遮挡对电池片有一定损坏，实验时做完串联遮挡实验应及时取走遮挡板。
16. 示波器连线须使用仪器配套的连接线，否则可能对示波器造成损坏。