

ZKY-GFFD
光伏发电原理应用实验平台
实验指导及操作说明书

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（龙泉驿区）南二路 309 号 邮编：610100

电话：(028) 61430706 61430729 传真：(028) 64082508

网址：WWW.ZKY.CN E-mail: ZKY@ZKY.CN

2020-05-10

光伏发电原理应用实验平台

能源短缺和地球生态环境污染已经成为人类面临的重大问题。本世纪初进行的世界能源储量调查显示,全球剩余煤炭只能维持约 216 年,石油只能维持 45 年,天然气只能维持 61 年,用于核发电的铀也只能维持 71 年。另一方面,煤炭、石油等矿物能源的使用,产生大量的 CO_2 、 SO_2 等温室气体,造成全球变暖,冰川融化,海平面升高,暴风雨和酸雨等自然灾害频繁发生,给人类带来无穷的烦恼。

广义地说,太阳光的辐射能、水能、风能、生物质能、潮汐能都属于太阳能,它们随着太阳和地球的活动,周而复始地循环,几十亿年内不会枯竭,因此我们把它们称为可再生能源。太阳的光辐射可以说是取之不尽、用之不竭的能源。每年到达地球的辐射能相当于 49000 亿吨标准煤的燃烧能,是目前人类耗能的几万倍。太阳能不但数量巨大,用之不竭,而且是不会产生环境污染的绿色能源,所以大力推广太阳能的应用是世界性的趋势。

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。

实验目的

1. 了解并掌握太阳电池的原理及结构,太阳能发电系统的组成及工程应用
2. 太阳电池特性测量
 - a) 测量太阳电池组件输出伏安特性,得出开路电压,短路电流,最佳工作电压,最佳工作电流,最大输出功率,填充因子,能量转换效率等参数
 - b) 电池组件串联与并联特性比较实验
3. 环境因素对太阳能电池输出的影响
不同光强下太阳电池输出伏安特性测量
4. 最大功率点跟踪器(MPPT)功能实验
 - a) MPPT 自动调节与手动调节的比较实验
 - b) 太阳电池直接输出与加 MPPT 输出比较实验
5. 太阳能控制器功能实验
 - a) 蓄电池充电或蓄电池过充保护实验
 - b) 蓄电池放电或蓄电池过放保护实验
 - c) 太阳能路灯控制实验
6. 离网太阳能系统搭建及实验
 - a) 直流负载实验
 - b) 离网逆变器交流负载(阻性,容性,感性)实验及波形测量
7. 并网太阳能系统搭建及实验
 - a) 并网逆变器交流负载(阻性,容性,感性)实验及并网逆变器 MPPT 功能展示
 - b) 并网逆变器孤岛效应保护实验
8. 设计性思考—设计户用太阳能系统

实验原理

1. 太阳能光伏发电系统

太阳能光伏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直流电经并网逆变器转换成与电网同电压，同频率，同相位的交流电，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。离网型太阳能电源系统如图 1 所示。

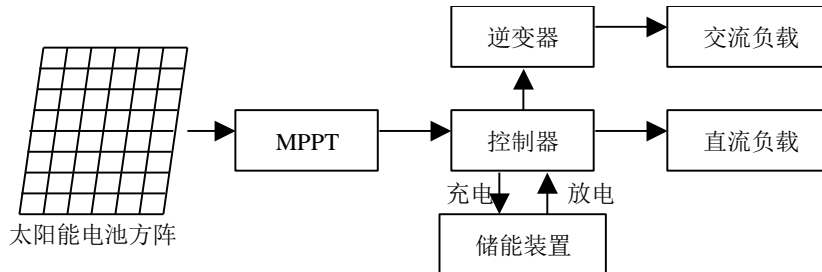


图 1 离网型太阳能电源系统

2. 太阳能电池原理及结构

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。

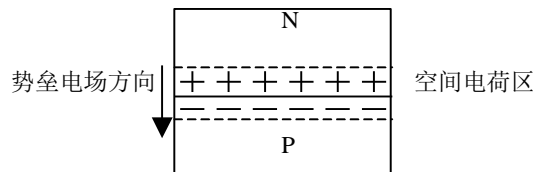


图 2 PN 结示意图

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，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。

3. 太阳电池及组件的制备

太阳电池可分为硅太阳能电池，化合物太阳能电池，聚合物太阳能电池，有机太阳能电池等。硅是地壳中分布最广的元素，含量高达 25.8%，单晶硅，多晶硅，非晶硅为目前最常用的太阳电池材料。下面以单晶硅太阳电池为例，简要介绍太阳电池及组件的制备。

用多晶硅做原料，用提拉法生产直径 150 或 200mm 的硅单晶圆棒，再切成边长 125 或 156mm 的带圆角准方形硅单晶锭，最后切割成厚度几百微米的准方形硅单晶片。

硅片经清洗，制绒（减小硅表面反射）等表面处理，用扩散的方法制做 PN 结，再经制做电极，腐蚀周边（防止 PN 结短路造成漏电流过大），蒸镀减反射膜等工序，制成的电池片如图 3 所示。

电池光照面的上电极通常制成栅线状，各栅线相互连接。这有利于对光生电流的收集，并使电池有较大的受光面积。栅状电极通常用银或铝做浆料，用丝网印刷的方法印制，再经烧结形成。下

电极布满电池的背面以减小电池的内阻。

单片太阳能电池开路电压约为 0.6 伏，工作电压接近 0.5 伏，输出功率约为 1 瓦。

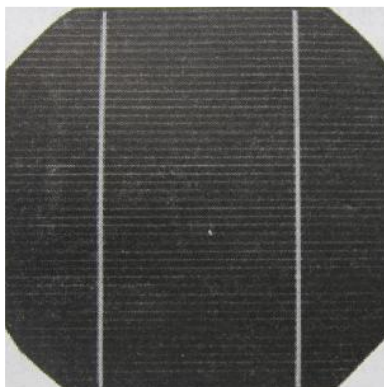


图 3 单晶硅太阳能电池片

太阳能电池片需经串并联并封装成组件后，才可实际应用。首先，单片电池不能满足一般用电设备的电压、功率要求，需要若干电池进行串联或并联。其次，电池片薄而易碎，易腐蚀，需封装解决这些问题。

图 4 为常见的组件结构。玻璃既支撑太阳能电池片，又能让光线通过。TPT 是一种复合材料，具有耐腐蚀，抗老化能力及良好的绝缘性能。EVA 是一种特殊的胶膜，具有很高的透光性，在高温下融化，将玻璃，电池片，TPT 密封粘结在一起。封装好的组件再装上铝边框，就构成可用于实际的太阳能电池组件。

实验室用的小功率太阳能电池，常常将太阳能电池片切成若干小片，串联后表面用胶密封。

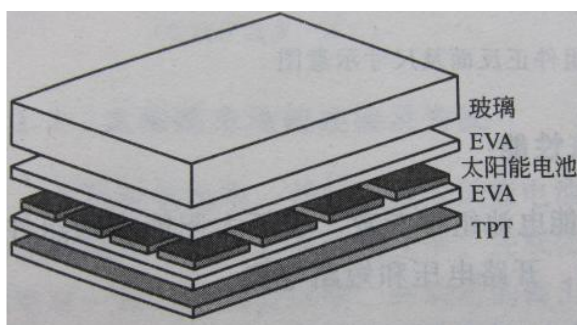


图 4 太阳能电池组件结构

4. 太阳能电池特性

在一定的光照条件下，改变太阳能电池负载电阻的大小，测量其输出电压与输出电流，得到输出伏安特性，如图 5 实线所示。

负载电阻为零时测得的最大电流 I_{sc} 称为短路电流。负载断开时测得的最大电压 U_{oc} 称为开路电压。输出电压与输出电流的最大乘积值称为最大输出功率 P_{max} 。

太阳能电池的输出功率为输出电压与输出电流的乘积。同样的电池及光照条件，负载电阻大小不一样时，输出的功率是不一样的。若以输出电压为横坐标，输出功率为纵坐标，绘出的 P-U 曲线如图 5 点划线所示。

填充因子 FF 定义为：

$$F \cdot F = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (1)$$

填充因子是表征太阳能电池性能优劣的重要参数，其值越大，电池的光电转换效率越高，一般的硅光电池 FF 值在 0.75~0.8 之间。

转换效率 η 定义为：

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{\max}}{S \cdot E} \times 100\% \quad (2)$$

P_{in} 为入射到太阳能电池表面的光功率， S 为光垂直照射到太阳能电池板上的面积， E 为照射到太阳能电池板上的光强。

理论分析及实验表明，在不同的光照条件下，短路电流随入射光功率线性增长，而开路电压在入射光功率增加时只略微增加，如图 6 所示。

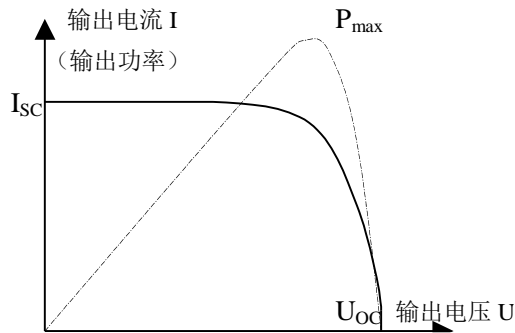


图 5 太阳能电池的输出特性

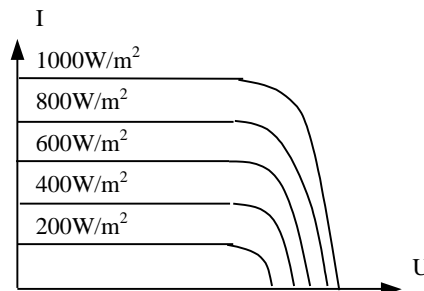


图 6 不同光照条件下的 I-V 曲线

5. 光伏发电系统的重要组成部分介绍

DC-DC 与 MPPT(Maximum Power Point Tracking)

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 7 所示。

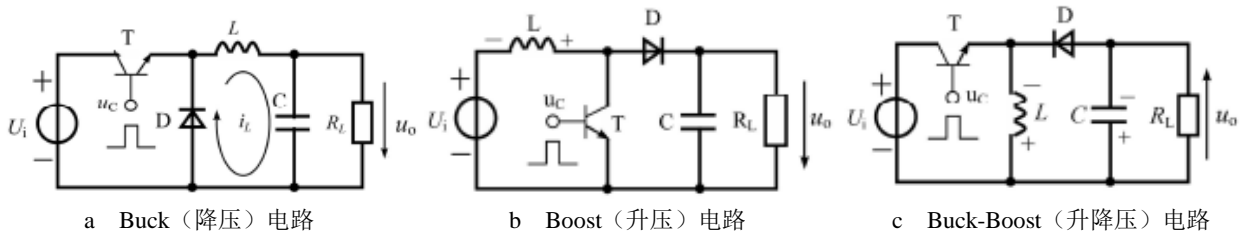


图 7 最基本的 DC-DC 变换电路

图 7 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。

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(MPPT)。国内外对太阳能电池的最大功率跟踪提出过多种方法，如定电压跟踪法，扰动观察法，功率回授法和增量电导法等，本仪器配置的 MPPT 采用扰动观察法。

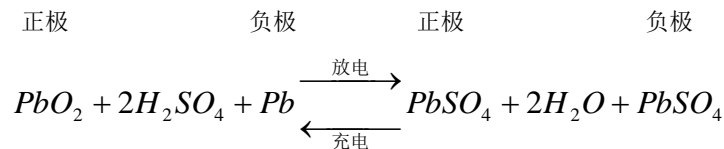
控制器

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，控制器具有过充过放保护功能。

蓄电池

光伏系统最常用的储能装置为蓄电池。

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。

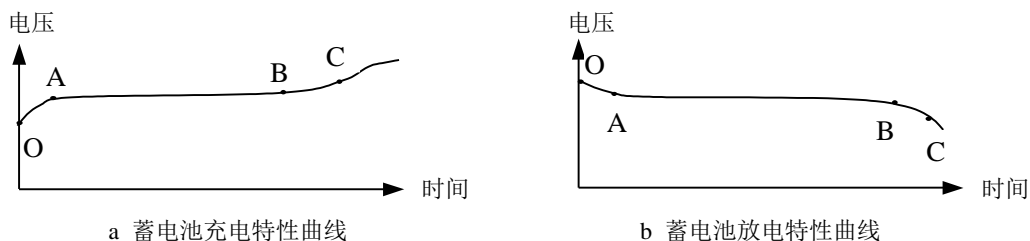


图 8 蓄电池的充放电特性曲线

图 8a 为蓄电池充电特性曲线。OA 段电压快速上升。AB 段电压缓慢上升，且延续较长时间。BC 段为充电末期，达到 C 点应立即停止充电。

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 8b 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。

逆变器

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。

按使用条件，可分为离网逆变器与并网逆变器。

离网逆变器，按名称来看，是不与电力电网连在一起的。太阳能电池组件将发的电力储存在蓄电池内，再经过离网逆变器将蓄电池内的直流电转换成交流 220V 给负载应用供电。

并网逆变器，就是将太阳能电池板输出的直流电直接逆变成高压馈入电网，而不必经过蓄电池储存。并网逆变器必须要考虑与电网的连接安全，如必须与电网同相位、同频率，抗孤岛等特殊情况的应变能力，不能对电网造成污染，如谐波问题等。为防止孤岛效应的发生，在电网断开时，并网逆变器检测到电网断开信号，便立即停止工作，并网逆变器不再对输出端的交流负载供电。

电子负载

电子负载是利用电子元件吸收电能并将其消耗的一种负载。其中的电子元件一般为功率场效应管，绝缘栅双极型晶体管等功率半导体器件。由于采用了功率半导体器件替代电阻等作为电能消耗的载体，使得负载的调节和控制易于实现，能达到很高的调节精度和稳定性，还具有可靠性高，寿命长等特点。

电子负载有恒流、恒压、恒阻、恒功率模式等工作模式，本仪器配置的电子负载为恒压模式。在恒压工作模式时，将负载电压调节到某设定值后即保持不变，负载电流由电源输出决定。

6. 孤岛效应及其危害

所谓“孤岛效应”是指，在电网故障或中断的情况下，太阳能光伏发电系统足以继续独立供电给负载的现象。而孤岛现象的发生，将对维修人员、电网或负载造成诸多不良影响：

- 1) 当电网发生故障或中断后，由于太阳能光伏发电系统持续独立供电给负载，将使维修人员在进行修复时，安全受到威胁。
- 2) 当电网发生故障或中断时，由于太阳能光伏发电系统失去电网作为参考信号，造成系统的输出电流、电压及频率，出现漂移而偏离电网频率，产生不稳定的情况，且可能含有较大的电压与电流谐波成分。若为及时将太阳能光伏发电系统脱离负载，将会使得某些对频率敏感的负载损坏。
- 3) 当电网恢复瞬间，由于电压相位不同，可能发生较大的冲击电流，造成相关设备损坏。且当电网恢复供电时，可能会发生同步的问题。

- 4) 若太阳能光伏发电系统与电网连接为三相系统，当孤岛现象发生时，将形成缺相供电，影响用户端的三相负载。

由于上述孤岛效应所造成的影响，可以知道孤岛效应的防治对于太阳能光伏发电系统的重要性。因此，孤岛效应的防治是必要的。孤岛现象的检测方法根据技术特点，可以分为三大类：被动检测方法、主动检测方法和开关状态监测方法(基于通讯的方法)。

实训平台

光伏发电原理应用实验平台正面整机照片如图 9。



图 9 光伏发电原理应用实验平台整机正面照片

各组件介绍如下：

温度光强表：监测太阳能电池板表面的温度和监测入射到太阳能电池板表面的辐照强度(W/m^2)，简称光强。温度测量范围： $-20\sim 99.9^\circ\text{C}$ 。光强测量范围： $0\sim 2500 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

光强探测器：用于测量电池板上的光强及光强分布（在图 9 中未予显示）。

电流源：输出大于 0.3A （以具体输出情况为准）直流电源，用于研究控制器对蓄电池的过充和过放保护实验。

1、2 号直流电压电流表：用于直流电学信号的测量。电压测量范围为 $0\sim 200\text{V}$ ，电流测量范围为 $0\sim 10\text{A}$ 。

1、2 号交流电压电流表：用于测量逆变器（离网逆变器和并网逆变器）输出的电压和电流以及负载电压电流值。最大测量电压为 $\text{AC } 400\text{V}$ ，最大测量电流为 $\text{AC } 500\text{mA}$ 。

太阳能电池转接板：通过该转接板改变太阳能电池板组的连接方式，来完成太阳能电池板串并联实验。为连线方便，转接板内部已将上电池板的红色接头和下电池板的黑色接头对应接到输出端

的红黑接头上（见图 10）。

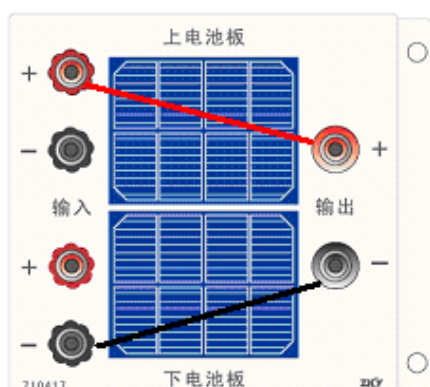


图 10 太阳能电池转接板内部连线示意图

最大功率跟踪器：如图 11，MPPT 输入电压范围为 12~45V。系统开机默认模式为自动跟踪模式，长按“自动/手动”按钮可以进行最大功率自动跟踪和手动跟踪之间的切换。

- 1) 自动跟踪模式下：在找到最大功率点后，显示数据仍为跳变值，输入电压显示为围绕一个中心点左右跳动，输入功率大小为“小→大→小”在变化，这样的显示为正常，读数的时候读取电压跳变的中心值，功率显示的最大值。
- 2) 手动跟踪模式下：开机默认为自动模式，长按“自动/手动”按钮先将模式切换到手动模式，按功率调节“▲”按钮，将功率点调节到最低点后，从最低点调节“功率调节”的“▲或▼”按钮，使得显示屏上输入功率值达到最大，即完成了手动寻找最大功率点。

注：MPPT 输入电压不能超过 50V，否则将导致 MPPT 严重损坏。若 MPPT 跟踪不到最大功率，则按下“自动/手动”两次，让 MPPT 重新进行自动跟踪。

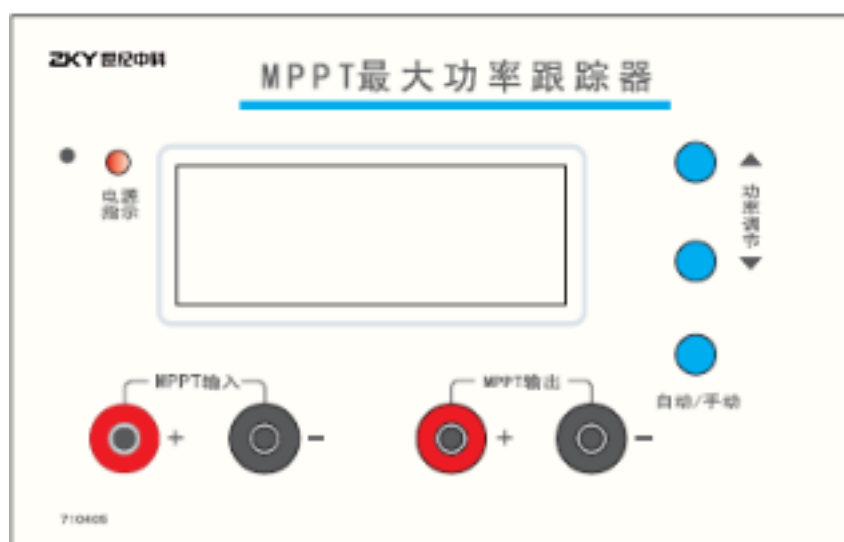


图 11 MPPT 最大功率跟踪器面板示意图

MPPT 负载盒：为 3 个独立的 20Ω/30W 的阻性负载，当太阳能电池板的输出功率较大时，将三个阻性负载并联使用。

蓄电池：本实验系统采用 12V 7AH 的铅酸蓄电池。其循环充电电压为 14.4~15.0V，浮充充电电压为 13.5~13.8V，起始电流小于 2.1A，最大充电电流为 1.75A。

直流电子负载：直流电子负载是利用电子元件吸收电能并将其消耗的一种负载。其中的电子元

件一般为功率场效应管，绝缘栅双极型晶体管等功率半导体器件。由于采用了功率半导体器件替代电阻等作为电能消耗的载体，使得负载的调节和控制易于实现，能达到很高的调节精度和稳定性，还具有可靠性高，寿命长等特点。

直流电子负载有恒流模式，恒压模式，恒阻模式，恒功率模式等工作模式，我们测量太阳能电池板输出时采用恒压模式。在恒压工作模式时，将负载电压调节到某设定值后即保持不变，负载电流随太阳能电池板的输出改变而改变。

其自身工作电源为 DC12V。输入最大电压为 DC50V，最大输入电流为 DC3A，输入最大功率为 30W。

电子负载属于有源器件，首次给电子负载接上 9V 电源时，电子负载两端电压恒定在 14V 左右，顺时针旋转电子负载调节旋钮，电压增大，逆时针旋转时，电压减小。

注：使用时注意其使用范围，以免造成损坏。严禁将该直流电子负载用于本系统实验之外的其它用途。

直流负载：8W/12V 和 30W/12V 直流灯各一个（直流灯的额定功率以实际情况为准），用于研究太阳能控制器特性和太阳能直流应用使用。

交流负载盒：包含阻性负载（25W 白炽灯一个，白炽灯的额定功率以实际情况为准）、容性负载（电容一个）、感性负载（风扇一个），外加一个 5W 节能灯（使用时置于阻性负载底座上），以及采集交流负载的电压和电流信号波形的接口，需外接双踪示波器。用于研究太阳能控制器特性和太阳能交流应用实验。

太阳能控制器：

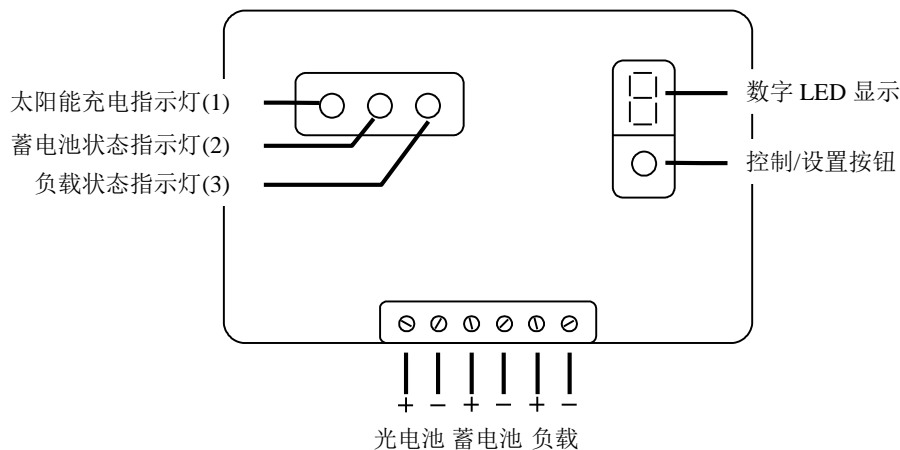


图 12 太阳能控制器面板示意图

控制器指示灯说明

指示灯	现象	说明
太阳能充电指示灯 (1)	绿色常亮	充电电路正常
	绿色闪烁	系统过电压
蓄电池状态指示灯 (2)	绿色常亮	蓄电池电压在正常范围
	绿色闪烁	蓄电池充满
	橙黄色	蓄电池电压降低到欠压
	红色	蓄电池电压降低到过放电电压，此时控制器将自动关闭输出
负载状态指示灯 (3)	常亮	负载开通
	红色慢闪	负载电流超过了控制器 1.25 倍的额定电流 60 秒，或负载电流超过了控制器 1.5 倍的额定电流 5 秒
	快闪	负载或负载侧出现短路故障，此时控制器将立即关闭输出

注：各“+、-”极不要反接。

控制器的工作模式设置：

设置方法：按下控制/设置按键持续 5 秒，模式（MODE）显示数字 LED 闪烁，松开按键，每

按一次转换一个数字，直到 LED 显示的数字为所选模式对应的数字即停止按键，等到 LED 数字不闪烁即完成设置。

- 1) 纯光控模式 (0): 当没有阳光时, 光强降到启动点, 控制器延时 10min 确认启动信号后, 开通负载, 负载开始工作; 当有阳光时, 光强升到启动点, 控制器延时 10min 确认关闭输出信号后, 关闭输出, 负载停止工作。
- 2) 光控+延时方式 (1-9, 0.-5.): 启动过程同前。当负载工作到设定的时间就关闭负载, 时间设定见工作模式设置表。
- 3) 通用控制方式 (6.): 作为一般通用控制器使用 (即通过按键控制负载的接通或关断)。
- 4) 调试方式 (7.): 用于系统调试使用, 与纯光控模式相同, 只取消了判断光信号控制输出的 10min 延时, 保留其他所有功能。无光信号时接通负载, 有光信号时关断负载, 方便安装调试时检查系统安装的正确性。

控制器工作模式设置表

LED 显示	工作模式	LED 显示	工作模式	LED 显示	工作模式
0	光控开+光控光	6	光控开+6 小时延时关	2.	光控开+12 小时延时关
1	光控开+1 小时延时关	7	光控开+7 小时延时关	3.	光控开+13 小时延时关
2	光控开+2 小时延时关	8	光控开+8 小时延时关	4.	光控开+14 小时延时关
3	光控开+3 小时延时关	9	光控开+9 小时延时关	5.	光控开+15 小时延时关
4	光控开+4 小时延时关	0.	光控开+10 小时延时关	6.	通用控制方式
5	光控开+5 小时延时关	1.	光控开+11 小时延时关	7.	调试模式

控制器常见故障现象及处理方法

现象	处理方法
指示灯和显示屏都无显示	检查蓄电池是否连接正确, 连接是否可靠
当有光照到太阳电池板时, 绿色充电指示灯(1)不亮	检查太阳电池板两端接线是否正确, 接触是否可靠
充电指示灯(1)闪烁	系统电压超压。蓄电池开路, 检查蓄电池是否连接可靠; 或充电电路损坏
负载指示灯(3)亮, 但无输出	检查用电器是否连接正确、可靠
负载指示灯(3)快闪, 且无输出	输出短路, 检查输出线路, 移除所有负载后, 按一下开关按键, 30 秒后控制器恢复正常输出
负载指示灯(3)慢闪, 且无输出	负载功率超过额定功率, 请减少用电设备, 按一下按键, 30 秒后控制器恢复输出
指示灯(2)为红色, 且无输出	蓄电池过放, 充足电后自动恢复使用

控制器技术指标

总额定充电电流	10A
总额定负载电流	10A
系统电压	24V/12V AUTO
过载、短路保护	1.25 倍额定电流 60 秒、1.5 倍额定电流 5 秒时, 过载保护动作; ≥3 倍额定电流时, 短路保护动作
空载损耗	≤6mA
充电回路压降	不大于 0.26V
放电回路压降	不大于 0.15V
超压保护	17V; ×2/24V
工作温度	-35℃~+55℃
提升充电电压	14.6V; ×2/24V (仅当出现过放电时调用, 维持时间 10min)
直充充电电压	14.4V; ×2/24V (维持时间 10min)
浮充电压	13.6V; ×2/24V (维持时间: 直至降到充电返回电压时动作)
充电返回电压	13.2V; ×2/24V
温度补偿	-5mV/°C/2V (提升、直充、浮充、充电返回电压补偿)
欠压电压	12.0V; ×2/24V
过放电压	11.1V—放电率补偿修正的初始过放电压(空载电压); ×2/24V
过放返回电压	12.6V; ×2/24V
控制方式	充电为 PWM 脉宽调节

控制器的供电端口为蓄电池端, 故欲让控制器工作, 首先得连接蓄电池, 然后连接太阳能电池

或负载；欲停止控制器工作时，应先断开太阳能电池和负载，然后断开蓄电池。

并网接口： 并网光伏发电系统与市电的连接口。

并网逆变器： 左端的直流输入口处红色端子：连接直流正极；所有的黑色端子：连接直流负极。输出接到并网接口的插线板上。自带 MPPT 最大功率跟踪以及孤岛效应检测。技术指标参见下表。

注：非专业人员请勿拆机，输出端为 AC 220V 高压，使用时注意安全。

离网逆变器： 左端的直流输入口处红色端子：连接直流正极；黑色端子：连接直流负极。技术指标参见下表。

逆变器技术指标

并网逆变器技术指标		离网逆变器技术指标	
DC 电压范围	10.5V~28V	直流电压	12V
最大输入电流	15A	直流电压范围	10-15VDC
AC 输出功率	200W	额定功率	300W
反压保护	保险丝	输出波形	正弦波
AC 标准电压范围	90V-140V/180V~260VAC	输出频率	50Hz or 60Hz
AC 频率范围	45Hz~53Hz/55Hz~63Hz	过载	输出关闭
相位差	<1%	过压	15.5V
孤岛效应保护	VAC; fAC	过热	输出自动关闭
输出短路保护	限流	保险丝	短路

太阳能电池板： 太阳能电池板采用 25W_p 单晶硅 A 级片两块。其中单块太阳能电池板的开路电压 $U_{oc}=20\pm 1V$ ，短路电流： $I_{sc}=1.5\pm 0.1A$ 。

注：本实验平台系统的所有红色端子连接正极；所有的黑色端子连接负极。

实验内容及操作步骤

1. 太阳能电池特性测量

太阳能电池组件输出特性测量

本实验主要是让学生了解太阳能电池作为一个电源的基本特性，理解太阳能电池片光电转换的原理，掌握电池片基本特性参数，学会电池板基本特性的测试方法。太阳能电池板作为电源，它是一个直流源，但它不是恒流源，也不是恒压源。输出特性随着负载在发生变化。

实验步骤：

- 保持太阳能电池输出端开路。将太阳能电池板受光面正对光源，光源与电池板距离选取适当（使得电池板最大输出功率为 25W 左右，严禁超过 30W，参考距离 60cm 左右处），打开电源开关，各电压电流表、温度光强表、光源和散热风扇通电，光源预热约 20 分钟，待光源和电池板温度比较稳定后进行实验。若电池板温度高于 50°C（一般太阳能电池工作温度范围为：-25~+85°C），则可以将光源稍微远离电池板，待温度低于 50°C 并再次稳定后，记录此时光源与电池板的距离和电池板温度。至于电池板最大输出功率的快速确定方法为：按图 19 连接电路，由于 MPPT 能快速自动找到太阳能电池板输出的最大功率，故调节光源与电池板的距离，使得在某一距离处 MPPT 显示的稳定的输入功率在 25W 左右。
- 将手持式光强探测器的光探头放在太阳能电池板受光面指定坐标位置（见图 13），将光探头测量到的各处的光强 E 记入表 1。由于从光源发出的并非平行光，且电池板输出为各电池片串联的结果（即各电池片输出电流相等），所以电池板的输出能力取决于各电池片中光照最弱的输出情况，故在求太阳能电池光电转换效率时（见式(2)），使用光强最小值计算。
- 按图 14(b)接线，将测得的短路电流值记录到表 2 中序号为 1 的位置（对应电压为 0）。
- 按图 15 接线，调节电子负载两端电压至约 1V，然后每升高 1V 记录一次太阳能电池板输出的电压电流值于表 2 中，最后一个电压（实为开路电压 U_{oc} ，对应电流为 0）数值间隔不足 1V 的，以实际数值记录。

注：电子负载属于有源器件，首次给电子负载接上电源时，电子负载电流为零，然后逆时针旋

转电子负载调节旋钮直到电流不为零。可以通过调节电子负载改变并稳定电子负载两端电压，顺时针旋转时电压增大，逆时针旋转时电压减小，旋转越快，电压改变越大，反之，电压改变越小。须注意：在电子负载接上电源后，若实验中无要求，请不要随意旋转电子负载调节旋钮，因为当电子负载两端电压等于开路电压后，若继续顺时针旋转调节旋钮，电子负载两端电压不会再继续增加，但此时，若想降低电子负载两端电压，须逆时针旋转相同的圈数后，才能从开路电压往下降。

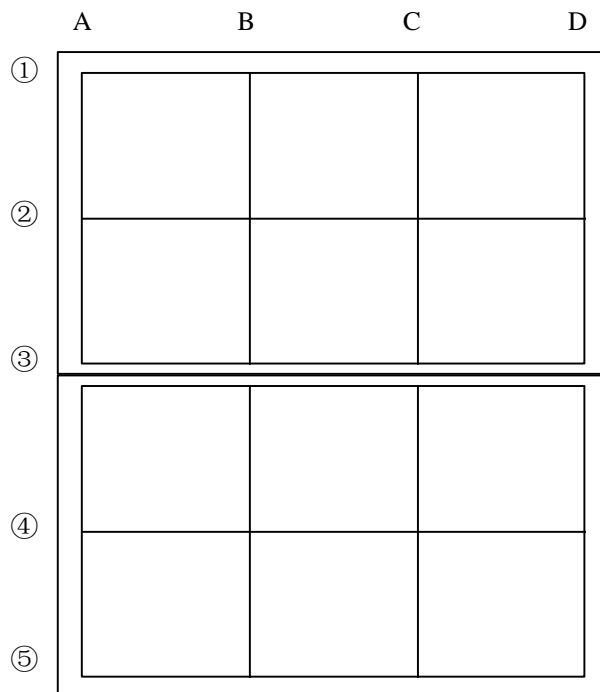


图 13 太阳能电池板外观结构示意图

表 1 太阳能电池表面各处的光强值

光源与电池板距离： ___cm 温度： ___°C

光强值(W/m ²)	A	B	C	D
①				
②				
③				
④				
⑤				

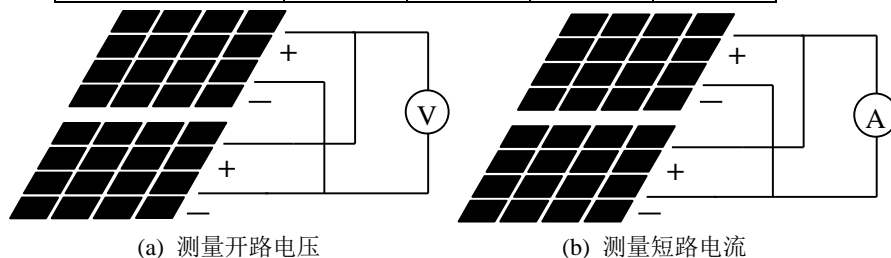


图 14 太阳能电池板开路电压和短路电流测量原理示意图

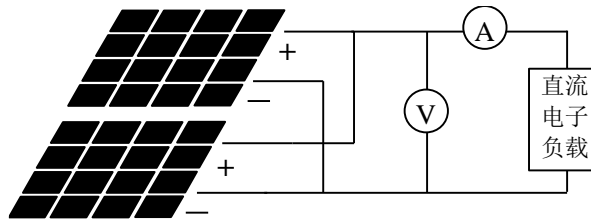


图 15 太阳能电池板输出特性测量示意图

表 2 太阳能电池板输出伏安特性数据

环境温度：____°C 最小光强值：____W/m²

序号	电压(V)	电流(A)	功率(W)	序号	电压(V)	电流(A)	功率(W)
1	0			12			
2				13			
3				14			
4				15			
5				16			
6				17			
7				18			
8				19			
9				20			
10				21			
11				22			

按表 2 数据以电压为横坐标，电流为纵坐标，绘制太阳能电池的输出伏安特性 $I-U$ 曲线，并与图 5 作比较。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 $P-U$ 曲线，并与图 5 作比较。

从 $P-U$ 曲线图中找出最大输出功率点 (U_m, I_m)，其中 U_m 、 I_m 为最大功率点对应的最佳工作电压和最佳工作电流，最大输出功率 $P_m=U_m \cdot I_m$ 。计算填充因子 $FF=P_m/(U_{oc} \cdot I_{sc})$ 和转换效率 $\eta=P_m/(E \cdot S)$ ，其中 S 为电池板有效光照面积（已给出）。将最大输出功率等参数记入表 3。

表 3 太阳能电池组件输出特性测量结果

光强最小值 $E(W/m^2)$	受光面积 $S(m^2)$	最大输出功率 $P_m(W)$	开路电压 $U_{oc}(V)$	短路电流 $I_{sc}(A)$	最佳工作电压 $U_m(V)$	最佳工作电流 $I_m(A)$	填充因子 FF	转换效率 η
	0.28							

太阳能电池组件串联与并联特性比较实验

本实验主要是让学生理解太阳能电池板不同的连接方式对输出的影响。

保持光源与太阳能电池板的距离不变，将单块太阳能电池板和串并联方式下的输出的开路电压和短路电流记于表 4 中。并串联测量原理示意图分别见图 16 和图 17。

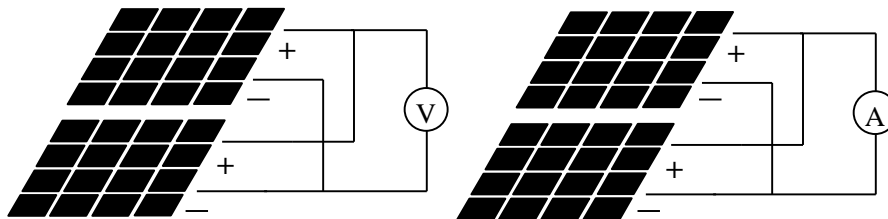


图 16 并联时太阳能电池板开路电压和短路电流测量原理示意图

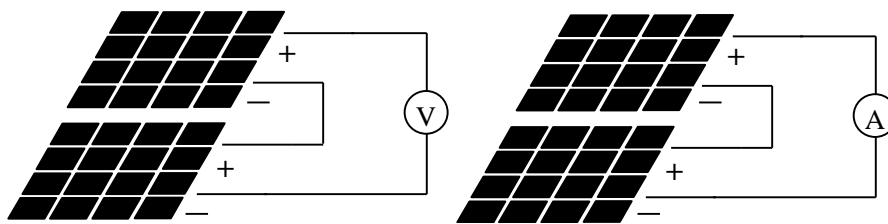


图 17 串联时太阳能电池板开路电压和短路电流测量原理示意图

表 4 不同连接方式下，太阳能电池板的输出测量

	开路电压 U_{oc} (V)	短路电流 I_{sc} (A)
上电池板		
下电池板		
两块串联		
两块并联		

比较不同的连接方式下，太阳能电池输出特性的异同。

2. 环境因素对太阳能电池板输出的影响

本实验主要是让学生了解光源因素对太阳能电池片的基本参数的影响。实际情况下外部因素很多，实验条件下关注的主要是光强因素。

不同光强下太阳能电池输出伏安特性测量

改变太阳能电池板与光源距离（等价于改变光源强度），测试电池板输出伏安特性曲线（具体做法参考实验 1）。至少完成 3 个数据组（例如：60cm，65cm，75cm 等），绘制不同距离下（即不同光强）的太阳能电池板的输出伏安特性曲线，并找出最大功率点记于表 5 中。

表 5 不同光照强度下太阳能电池的输出伏安特性测量

光源与板距离：___cm 光强：___W/m²

序号	电压(V)	电流(A)	功率(W)	序号	电压(V)	电流(A)	功率(W)
1				12			
2				13			
3				14			
4				15			
5				16			
6				17			
7				18			
8				19			
9				20			
10				21			
11				22			

光源与板距离：___cm 光强：___W/m²

序号	电压(V)	电流(A)	功率(W)	序号	电压(V)	电流(A)	功率(W)
1				12			
2				13			
3				14			
4				15			
5				16			
6				17			
7				18			
8				19			
9				20			
10				21			
11				22			

光源与板距离：___cm 光强：___W/m²

序号	电压(V)	电流(A)	功率(W)	序号	电压(V)	电流(A)	功率(W)
1				12			

2				13			
3				14			
4				15			
5				16			
6				17			
7				18			
8				19			
9				20			
10				21			
11				22			

.....

表 6 不同光强下太阳能电池片的输出情况

距离(cm)				...
光强(W/m ²)				
短路电流(A)				
最大输出功率(W)				

根据表 5 实验数据作出不同光强下太阳能电池的输出伏安特性曲线。根据表 6 数据作太阳能电池板短路电流与光强的关系曲线、最大输出功率与短路电流的关系曲线，总结其规律。

3. 最大功率跟踪器 (MPPT) 功能实验

本实验是让学生理解太阳能电池板最大功率点跟踪的作用和工作原理，学习并掌握太阳能电池的最大输出功率点跟踪的方法。

MPPT 手动调节与自动调节的比较实验

按图 18 示意图完成连线，其中负载由 MPPT 负载盒中的三个 20Ω 电阻并联。MPPT 最大功率跟踪器开机默认为自动模式，长按“自动/手动”按钮先将模式切换到手动模式，按功率调节“▲”按钮，将功率点调节到最低输入电压 12.0V 后，从最低点按“功率调节”的“▲或▼”按钮，每升高 0.5V 记录下屏幕上显示的输入电压值和输入电流值，以及输入功率，找到输入功率最大时，即完成了手动寻找最大功率点。

注：由于本实验中 MPPT 输入电压范围为 12~45V，故手动调节从输入电压 12V 开始向上调节

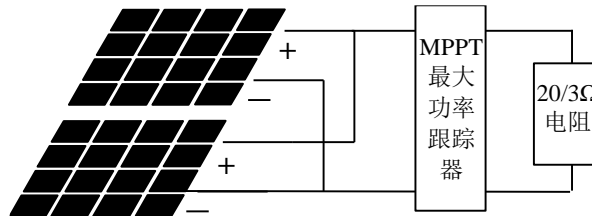


图 18 最大功率跟踪 MPPT 原理实验接线示意图

表 7 手动寻找最大功率点过程记录

序号	输入电压 (V)	输入电流 (A)	输入功率 (W)	序号	输入电压 (V)	输入电流 (A)	输入功率 (W)
1				9			
2				10			
3				11			
4				12			
5				13			
6				14			
7				15			
8				16			

长按“自动/手动”按钮先将模式切换到自动模式，显示数据为跳变值，输入电压显示为围绕一个中心点左右跳动，输入功率大小为“小→大→小”在变化，这样的显示为正常，读数的时候读取电压跳变的中心值，功率显示的最大值。比较两种模式下测出的最大功率点。

表 8 两种调节模式下太阳能电池板输出的最大功率点记录

参量	最佳工作电压 U_m (V)	最佳工作电流 I_m (A)	最大输出功率 P_m (W)
----	------------------	------------------	------------------

手动调节			
自动调节			

太阳能电池直接输出与加 MPPT 输出比较实验

此实验意在说明 MPPT 在实现太阳能电池最大功率跟踪的同时，由于自身能耗较小能让负载获得更高的功率，且不同负载获得的功率大小相近。

按图 19 连接电路。负载分别为 MPPT 负载盒中三个 20Ω 电阻并联和 $30\text{W}/12\text{V}$ 直流灯。将加 MPPT 前后各负载的电压电流值记入表 9。

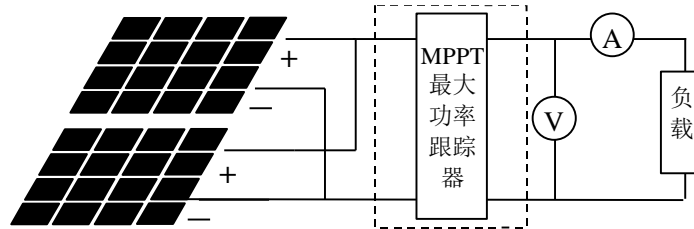


图 19 太阳能电池直接输出与加 MPPT 输出比较实验电路图

表 9 加 MPPT 前后负载的电学参量

负载	加 MPPT 前			加 MPPT 后		
	电压(V)	电流(A)	功率(W)	电压(V)	电流(A)	功率(W)
20/3Ω 电阻						
30W/12V 灯						

比较同一负载，加 MPPT 前后获得的功率情况；比较不同负载，加 MPPT 前获得的功率差异和加 MPPT 后获得的功率差异。试分析原因。

4. 太阳能控制器功能实验

太阳能控制器的作用是使太阳能电池和蓄电池安全可靠地工作，以获得最高效率并延长蓄电池的使用寿命。通过控制器对蓄电池充放电条件加以限制，防止蓄电池过充电、过放电。另外，还应具有负载短路保护、电池板反接保护、路灯控制、延时控制等功能。

该实验是让学生理解太阳能控制器的作用和工作原理，熟悉太阳能控制器的实训操作，理解配置控制器的必要性和重要性。

蓄电池充电或蓄电池过充保护实验

蓄电池充电实验（方案一）：由于直接用太阳能电池对蓄电池进行充电需要约 9 小时，所以当实验时间比较充裕时，可以按图 20(a) 做蓄电池的充电实验。太阳能电池的短路电流约 1.5A ，实验过程中使用的 7AH 铅酸蓄电池的最大充电电流为 1.75A ，因此可以用太阳能电池板直接对蓄电池充电。对蓄电池进行充电，每隔 10 分钟记录一次电压、电流值。

蓄电池过充保护实验（方案二）：在实验时间不充裕时，欲做控制器对蓄电池的过充保护实验，可按图 21(a) 进行。调节电子负载，使电压表显示为 13.0V ，然后每隔 0.2V 增加电压，记录电压电流值于表 10。记录实验数据的同时注意太阳能控制器的指示灯状态，当指示灯 2 变为绿色闪烁时，为充满状态。

蓄电池放电或蓄电池过放保护实验

实验前应先调整太阳能控制器的工作模式为“6.”，具体调整方法见实验仪器中的控制器说明部分。在工作模式为“6.”时，控制器上的按钮为开关功能，控制负载端的通断。

蓄电池放电实验（方案一）：由于用 $8\text{W}/12\text{V}$ 灯对蓄电池进行放电需要很长时间，所以当实验时间比较充裕时，可以按图 20(b) 做蓄电池的放电实验。对蓄电池进行放电，每隔 10 分钟记录一次电压、电流值。

蓄电池过放保护实验（方案二）：在实验时间不充裕时，欲做控制器对蓄电池的过放保护实验，可按图 21(b) 进行，负载为 2 个（或 3 个，视控制器蓄电池端口电压大小而定） 20Ω 电阻串联。调

节电子负载，使电压表显示为 12.0V，然后按下控制器上的按钮使负载端导通。每隔 0.2V 减小电压，记录对应电流值于表 11。

记录实验数据的同时注意太阳能控制器的指示灯状态，当指示灯 2 变为橙黄色时，为欠压状态，当指示灯 2 变为红色时，为过放状态，同时负载指示灯 3 熄灭，此时控制器控制负载端关闭以避免蓄电池过放。

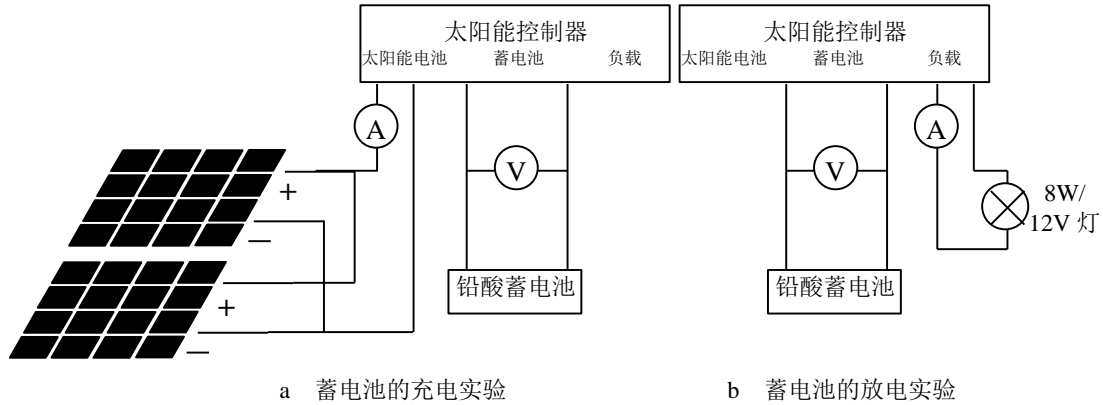


图 20 蓄电池的充放电实验

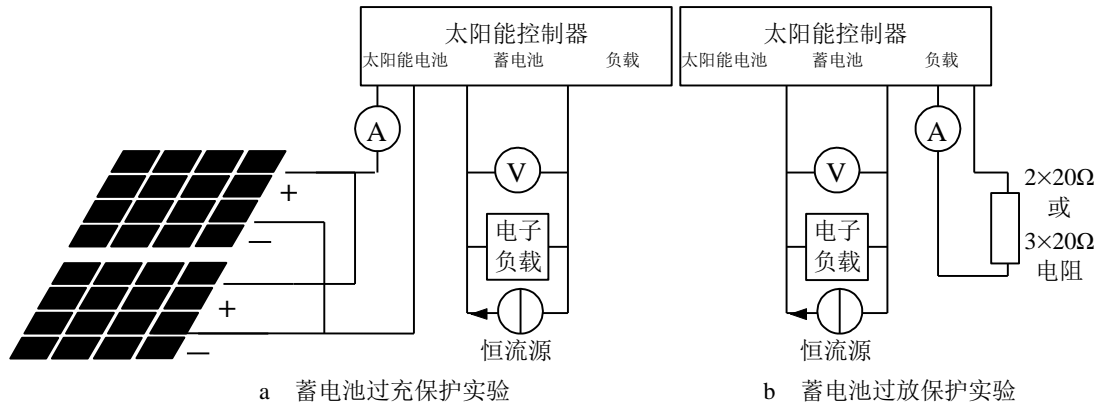


图 21 蓄电池的过充和过放保护实验

表 10 控制器对蓄电池的过充保护实验

电压(V)								
电流(A)								
指示灯 2 状态								

表 11 控制器对蓄电池的过放保护实验

表 11 控制器对蓄电池的过放保护实验

电压(V)								
电流(A)								
指示灯 2 状态								
指示灯 3 状态								

太阳能路灯控制实验

所谓太阳能电池路灯控制是指：当有光照射到太阳能电池板上时，太阳能电池输出电能，控制器负载端处于关闭状态，太阳能电池将电能储存在蓄电池中；当无光照射到太阳能电池板上时，太阳能电池几乎没有能量输出，控制器负载端处于导通状态，同时蓄电池对负载供电。比如太阳能路灯白天不亮，到了晚上当光照强度很低时路灯才亮。

按图 22 接线，将控制器工作模式设置为“7.”（调试方式），此模式下，控制器上的按钮不再是

开关功能，其负载端的通断不再通过按键实现，故实验时不再需要按键。

一般，太阳能电池开路电压随光强成近似对数关系。当光强很小时，若继续减小光强，开路电压将迅速减小。当控制器工作在“7.”调试方式模式时，控制器检测太阳能电池端口电压，等同于检测外界光强。

当太阳能电池端口电压较高时，控制器判断外界并非黑夜，控制器控制负载端关断，负载灯不亮，太阳能电池对蓄电池充电；当太阳能电池端口电压低于蓄电池端口电压但又不是很低时，由于太阳能电池和蓄电池之间连接着二极管，并不会发生电流倒流，太阳能电池输出电流为零，同时负载端仍然关断；当太阳能电池端口电压低于某一电压时，控制器判断外界为黑夜，同时控制负载端导通，蓄电池对负载供电，负载灯开始工作。

实验时，先断开电子负载，记录太阳能电池端口电压和蓄电池、负载端的电流，并观察充电指示灯（1）和负载指示灯（3）的状态。然后接入电子负载，调节电子负载，使得太阳能电池端口电压由高到低，当太阳能电池端口电压低于某一电压值时，负载灯变亮，记录此时的太阳能电池端口电压和蓄电池、负载端的电流，并观察充电指示灯（1）和负载指示灯（3）的状态变化，将实验数据记入表 12。试说明两种实验条件下能量的流动方向。

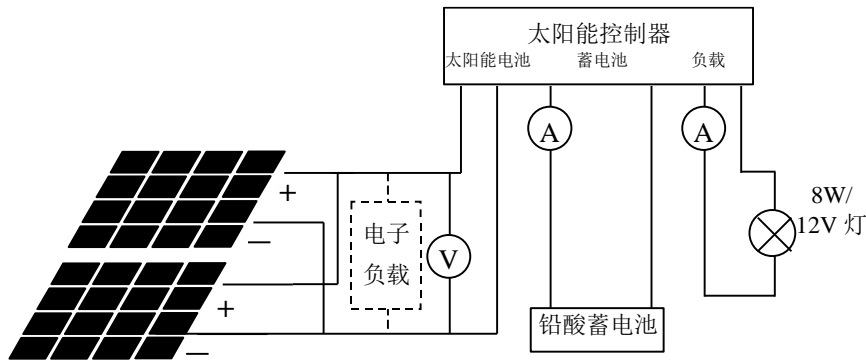


图 22 太阳能路灯控制实验

表 12 太阳能电池路灯控制实验

实验条件	太阳能电池端口电压(V)	负载灯的状态(亮/灭)	指示灯的状态(亮/灭)		蓄电池电流 I(A)	负载电流 I(A)
			指示灯 1	指示灯 3		
断开电子负载						
调节电子负载使得太阳能电池端口电压较低						

5. 离网太阳能系统搭建及实验

直流负载实验

该实验欲说明的是：当负载功率较小时，太阳能电池将多余的能量储存在蓄电池中；当负载功率较大时，太阳能电池输出的能量无法满足负载工作需求时，蓄电池将进行放电，以此来满足负载工作需求。

按图 23 连线。直流负载分为“8W/12V”灯和“30W/12V”灯（各直流灯的额定功率以实际情况为准），分别接入两种直流负载，观察控制器各端口的电压电流读数，记入表 13，并说明能量的流动方向。**注：因为 MPPT 液晶显示屏上已能读出 MPPT 的输出电压电流，故不再在接太阳能电池端口接电压电流表**

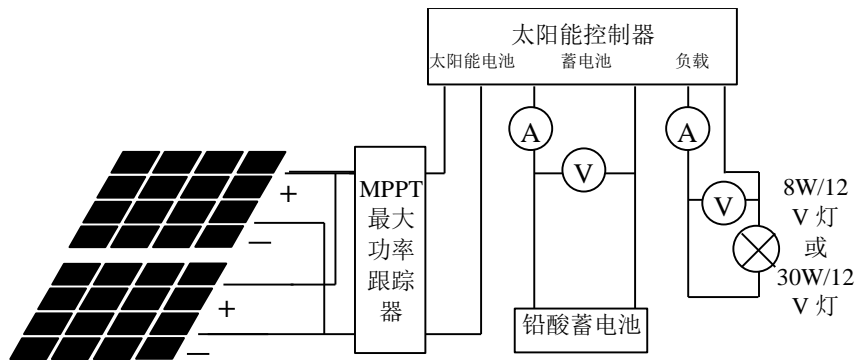


图 23 离网太阳能系统直流负载实验

表 13 太阳能电池直流负载实验

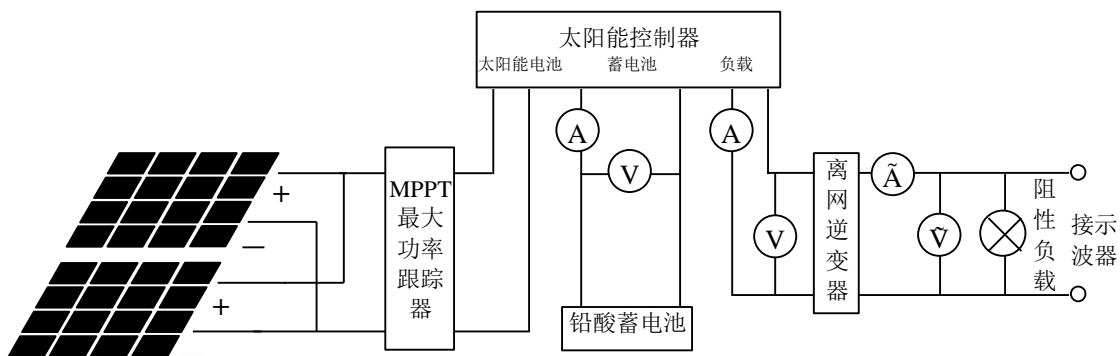
负载	太阳能电池端口			蓄电池端口			负载端口		
	U(V)	I(A)	P(W)	U(V)	I(A)	P(W)	U(V)	I(A)	P(W)
8W/12V									
30W/12V									

离网逆变器交流负载（阻性、容性、感性）实验及波形测量

本实验为了解逆变器和交流负载整体的功率大于或小于电池板最大输出功率时，蓄电池对电池板输出能量的补充或存储功能；了解不同类型的交流负载（阻性、容性、感性）的电压、电流波形以及电压电流之间的相位关系。

按图 24 连接电路，其中交流负载为 25W 白炽灯，关闭感性和容性负载开关，打开阻性负载开关，记录蓄电池端的电压电流值以及负载端的电压电流值于表 14 中，记录交流负载的波形以及相位差于表 15 中（注：本实验平台不提供示波器，示波器需用户自备）。关闭阻性负载开关，取下 25W 白炽灯，以 5W 节能灯替换，打开阻性负载开关，记录蓄电池端的电压电流值以及负载端的电压电流值于表 14 中。关闭阻性负载开关，打开感性负载或容性负载开关，观察其波形及相位差。将实验现象或数据记入表 15 中。

注：①由于控制器负载端的电压与蓄电池端电压基本一致，而蓄电池在充放电时电压在变化，所以读取实验数据时应快速读取；②由于容性负载功耗很小，太阳能电池的能量绝大部分都存入蓄电池中，导致蓄电池电压迅速增大直至达到过充保护电压，此时 MPPT 显示的最大输入功率不断变化，原因是 MPPT 跟踪频率低于 MPPT 输出端的变化频率，导致 MPPT 不断重新跟踪。若遇到这种情况，可以先用大功率的阻性负载对蓄电池进行放电一段时间，再开始实验。



a 阻性负载

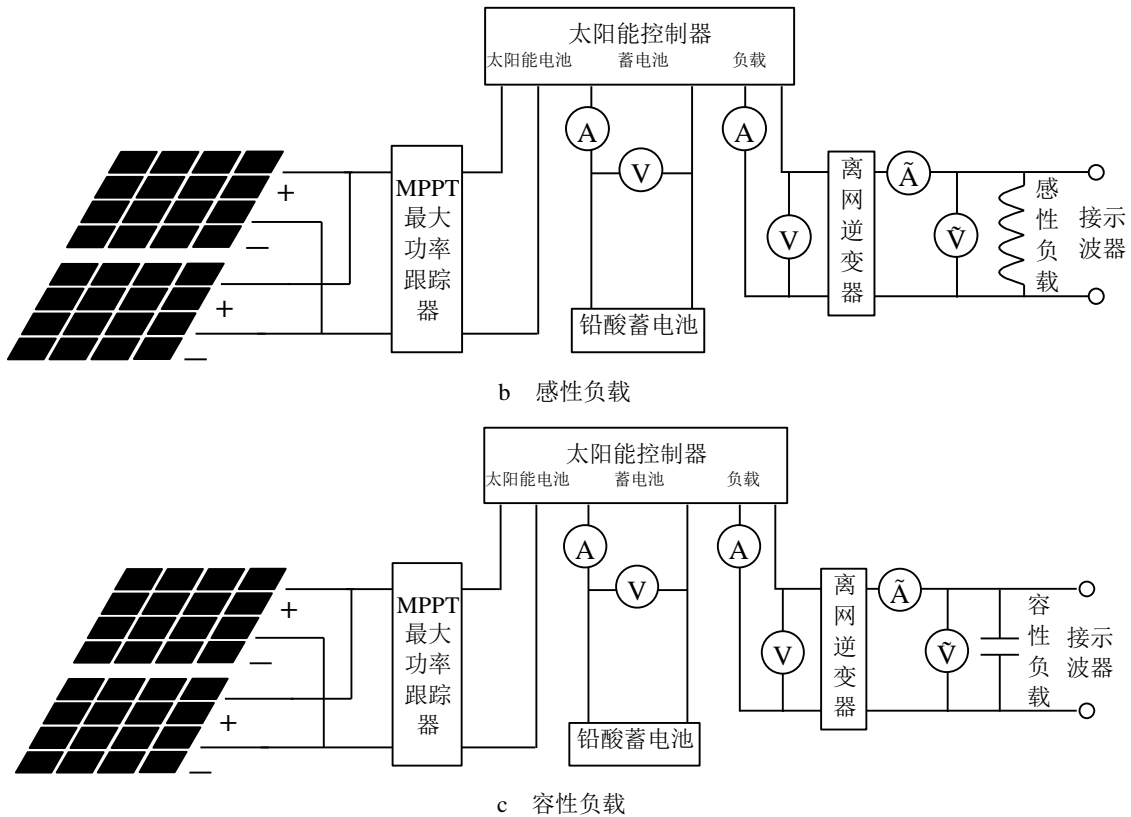


图 24 离网逆变器交流负载(阻性、容性、感性)实验及波形测量

表 14 不同功率的交流负载实验

交流负载	蓄电池端			负载端		
	电压(V)	电流(A)	功率(W)	电压(V)	电流(A)	功率(W)
5W 节能灯						
25W 白炽灯						

分析不同功率的负载情况下，试说明蓄电池对电池板输出能量的补充或存储功能。

表 15 离网逆变器交流负载(阻性、容性、感性)实验及波形测量

交流负载类型	交流电压电流相位差
阻性负载	
感性负载	
容性负载	

6. 并网太阳能系统搭建及实验

该实验主要展示的是并网发电在太阳能光伏发电系统中的作用和特点，通过实验让学生对并网发电有更深入的理解。

与离网太阳能发电系统相比，并网发电系统具有以下优点：

- 1) 所发电能馈入电网，以电网为储能装置。当用电负荷较大时，太阳能电力不足以提供的电能由市电提供。而负荷较小时，或用不完电力时，就可将多余的电力传给市电。该系统省掉了蓄电池，从而扩张了使用的范围和灵活性，提高系统的平均无故障时间和蓄电池的二次污染，并降低了造价。
- 2) 分布式建设，就近就地分散供电，进入和退出电网灵活，既有利于增强电力系统抵御战争和灾害的能力，又有利于改善电力系统的负荷平衡，并可降低线路损耗。

太阳能并网对电网的影响：

1) 对电能质量的影响

分散电源接入电网会造成电压波动与闪变以及谐波。大型光伏发电系统启动或者光伏发电系统的输出突然变化或发生较大的变化都会引起电压的波动与闪变。由于光伏发电系统作为分散电源本身就是个谐波源而且部分的分散电源经过逆变器接入电网，于是产生谐波在所难免。

2) 并不能减少传统旋转机组的拥有量

由于光伏并网发电系统不具备调峰和调频能力，这将对电网的早峰负荷和晚峰负荷造成冲击。因为光伏并网发电系统增加的发电能力并不能减少电力系统发电机组的拥有量或冗余，所以电网必须为光伏发电系统准备相应的旋转备用机组来解决早峰和晚峰的调峰问题。光伏并网发电系统向电网供电是以机组利用小时数下降为代价的。这当然是发电商所不愿意看到的。

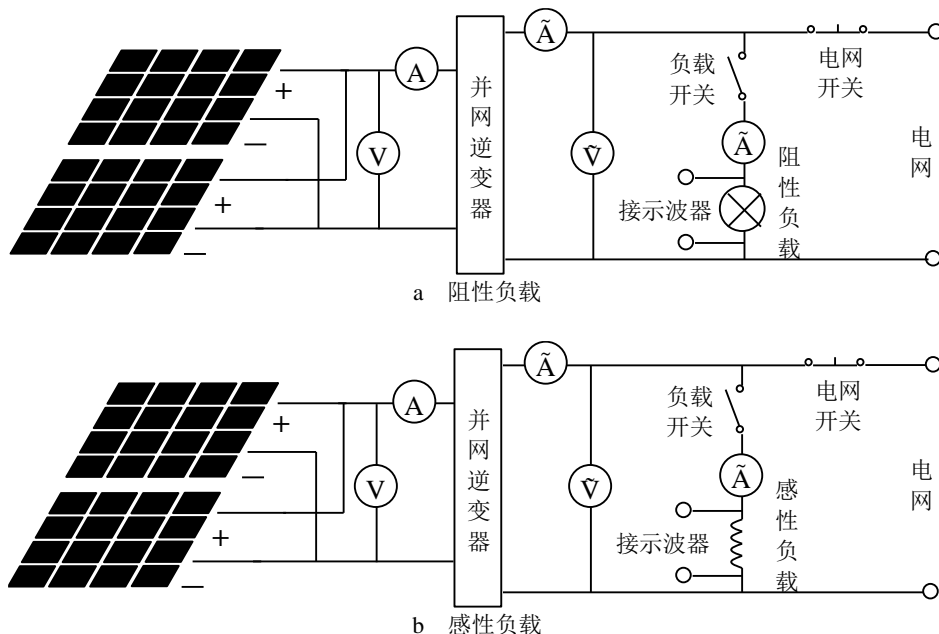
由于阳光和负荷出现的周期性，光伏并网发电量的增加并不能减少对电网装机容量的需求。当一个城市的光伏屋顶并网发电达到一定规模时，如果地理气象出现大幅变化，电网将为光伏并网发电系统提供足够的区域性旋转备用机组和无功补偿容量，来控制 and 调整系统的频率和电压。在这种情况下，电网将以牺牲经济运行方式为代价来保证电网的安全稳定运行。

并网太阳能系统交流负载（阻性、容性、感性）实验及并网逆变器 MPPT 功能展示

按图 25 搭建并网太阳能系统，通过测量并网逆变器输出端的交流电压 (\tilde{U}) 电流 (\tilde{I}_1) 和交流负载的交流电流 (\tilde{I}_2)，可知能量流动的方向。

阻性负载口选用 5W 节能灯和 25W 白炽灯时，记录 \tilde{U} 、 \tilde{I}_1 、 \tilde{I}_2 ，比较不同额定功率负载下能量的流动情况，试说明太阳能电池板输出电力与电网电力的互补关系。

交流负载为感性或容性负载时，记录太阳能电池输出的直流电压 (U) 电流 (I)，以及 \tilde{U} 、 \tilde{I}_1 、 \tilde{I}_2 ，并通过示波器观察负载的电压电流波形。若不同负载下并网逆变器输入端功率 $P_i=U \cdot I$ 相等或相近，说明并网逆变器实现了最大功率跟踪 (MPPT) 功能。



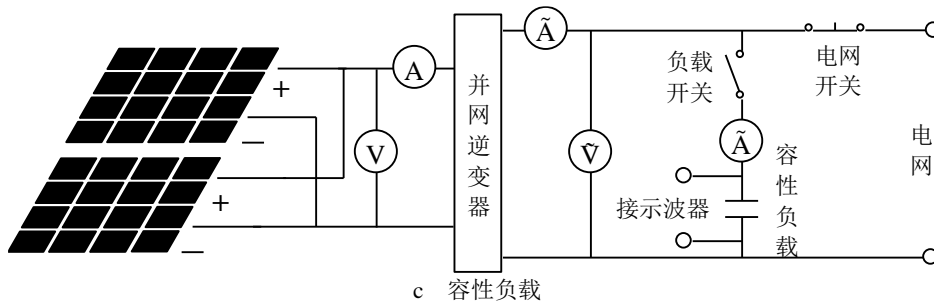


图 25 并网太阳能系统搭建及实验原理图

表 16 不同功率的交流负载实验

交流负载	逆变器输入端 (太阳能输出端)			逆变器输出端			交流负载端		
	电压(V)	电流(A)	功率(W)	电压(V)	电流(A)	功率(W)	电压(V)	电流(A)	功率(W)
5W 节能灯									
25W 白炽灯									

比较不同额定功率的负载情况下并网逆变器输出端的功率与负载功率的大小，试说明电网对电池板输出能量的补充或存储功能。比较不同负载时太阳能输出端的功率大小，试说明并网逆变器的最大功率跟踪（MPPT）功能。

表 17 并网逆变器交流负载(阻性、容性、感性)实验及波形测量

交流负载类型	交流电压电流相位差
阻性负载	
感性负载	
容性负载	

并网逆变器孤岛效应保护实验

本实验所用并网逆变器具有孤岛效应检测功能，当并网逆变器检测到电网断开后，并网逆变器将立即停止工作，这样，交流负载灯便与光伏发电系统断开，防止孤岛效应的发生（见图 26）。记录电网开关断开前后，并网逆变器输出端的电压电流变化，以及交流负载灯的亮灭状态于表 18。

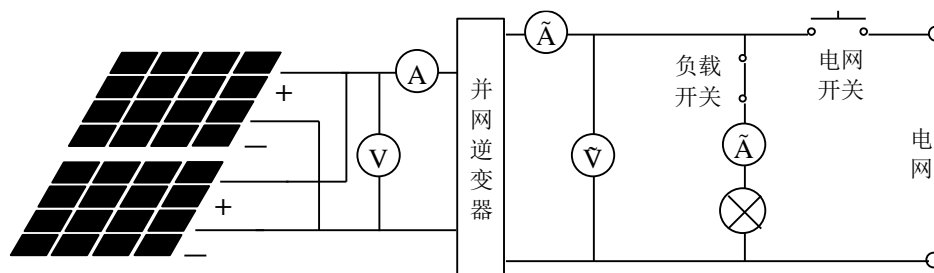


图 26 孤岛效应保护实验原理图

表 18 并网逆变器孤岛效应保护实验

	逆变器输出端		交流负载灯 状态(亮/灭)
	有效电压(V)	有效电流(A)	
与电网断开前			
与电网断开后			

7. 设计性思考—设计户用太阳能系统

可根据自己的理解，自行搭建太阳能电站应用系统，搭建时应注意：

- 1) 该系统中太阳能电池板能达到的最大输出功率为 30W 左右（温度低于 50℃），调整光源与电池板距离，若使电池板最大输出为 25W，蓄电池最大连续充放电电流为 1.75A，设蓄电池平均输出电压 12V，故蓄电池能输出或吸收的功率不应大于 21W，所以必须要求负载功率范围为 4~46W，为保护蓄电池寿命，建议负载功率范围取 8~40W，且尽量取中间值。
- 2) 严禁将太阳能电池接 MPPT 后，直接接低额定功率负载，如太阳能电池最大输出功率为 25W 时，严禁直接接额定功率低于 25W 的负载。
- 3) 离网逆变器或并网逆变器功耗约 10W，选择负载时应考虑到逆变器的功耗。
- 4) 控制器有多种控制模式，具体见控制器介绍部分，欲实现相关控制功能，须首先改变控制模式。
- 5) 逆变器输出端为 220V 交流电，使用时必须小心，勿接触高压区的金属电极。
- 6) 其他须注意的地方见“注意事项”。

注意事项

1. 连接电路时，应断开太阳能电池输出端；电路连接完成，应检查线路无误后，再连接太阳能电池输出端口。
2. 不能将光源与太阳能电池之间的距离移得太近，以免光源发出的高温烤坏电池板，电池板工作温度应低于 50℃。
3. 不要将蓄电池错接到控制器的太阳能电池端子上。
4. 严禁将直流电子负载与蓄电池并联。
5. 严禁将直流电子负载用于其它用途。
6. 严禁将太阳能电池直接接 8W/12V 直流灯，或接 MPPT 后（功率约 25W）再接 8W/12V 直流灯。
7. 高压区域操作时注意安全。
8. 各种表头使用时注意其测量范围，以免造成损坏。
9. 严禁将两个逆变器相连，否则将烧坏逆变器。
10. 本实验平台不提供示波器，示波器需用户自备
11. 实验时请注意说明书中用加粗黑体字注明“注”的地方。