

# 太阳能电池特性及应用实验仪

电池行业是 21 世纪的朝阳行业，发展前景十分广阔。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。

## 实验目的

- 1、了解并掌握太阳能发电系统的组成及工程应用
- 2、测量太阳能电池输出伏安特性
- 3、失配及遮挡对太阳能电池输出的影响实验
- 4、太阳能电池对储能装置两种方式充电实验
- 5、太阳能电池直接带负载实验
- 6、加 DC-DC 匹配电源电压与负载电压实验
- 7、DC-AC 逆变与交流负载实验

## 实验原理

离网型太阳能电源系统如图 1 所示。

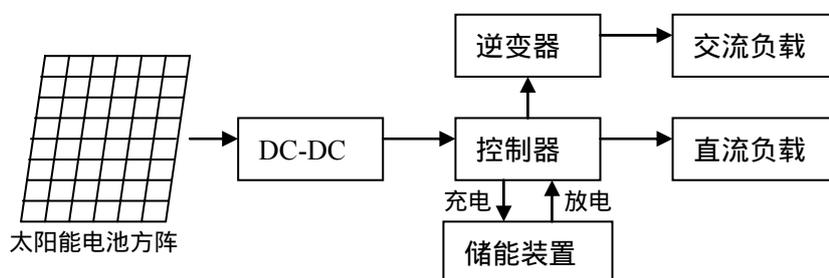


图 1 太阳能光伏电源系统

太阳能电池的原理及相关实验内容请参考本公司“ZKY-SAC- 太阳能电池特性实验仪”实验指导书。

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 2 所示。

图2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：

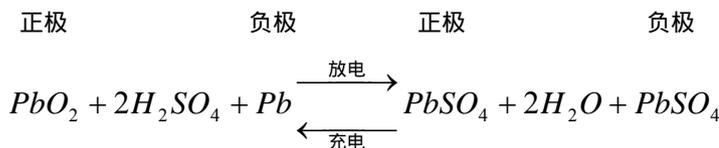
当电源电压与负载电压不匹配时，通过 DC-DC 调节负载端电压，使负载能正常工作。

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。

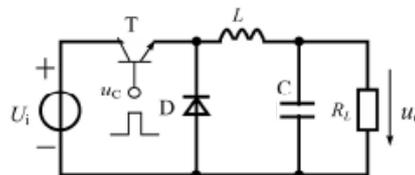


图 2a Buck (降压) 电路

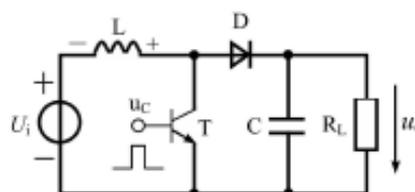


图 2b Boost (升压) 电路

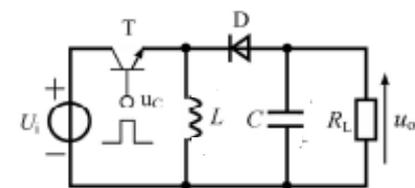


图 2c Buck-Boost (升降压) 电路

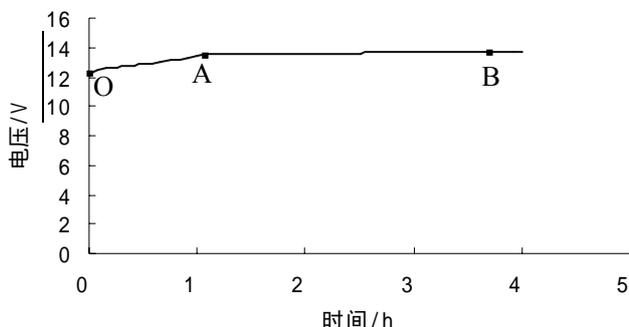


图 3a 蓄电池充电特性曲线

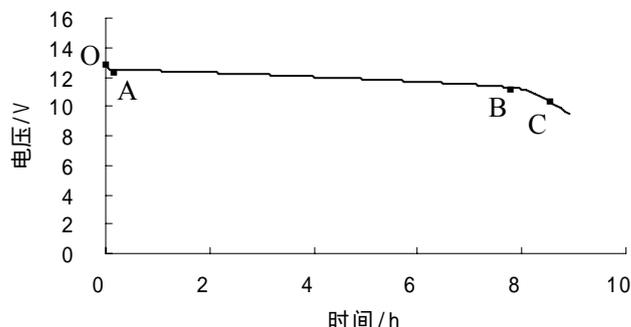


图 3b 蓄电池放电特性曲线

图 3a 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3b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。

逆变器是将直流电变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

实验装置如图 4 所示，由太阳能电池组件，实验仪和测试仪 3 部分组成。图 5 为测试仪面板图。测试仪是为太阳能电池实验的基本型配套的，基本型与应用型共用一个测试仪。本实验只用测试仪的电压，电流表。

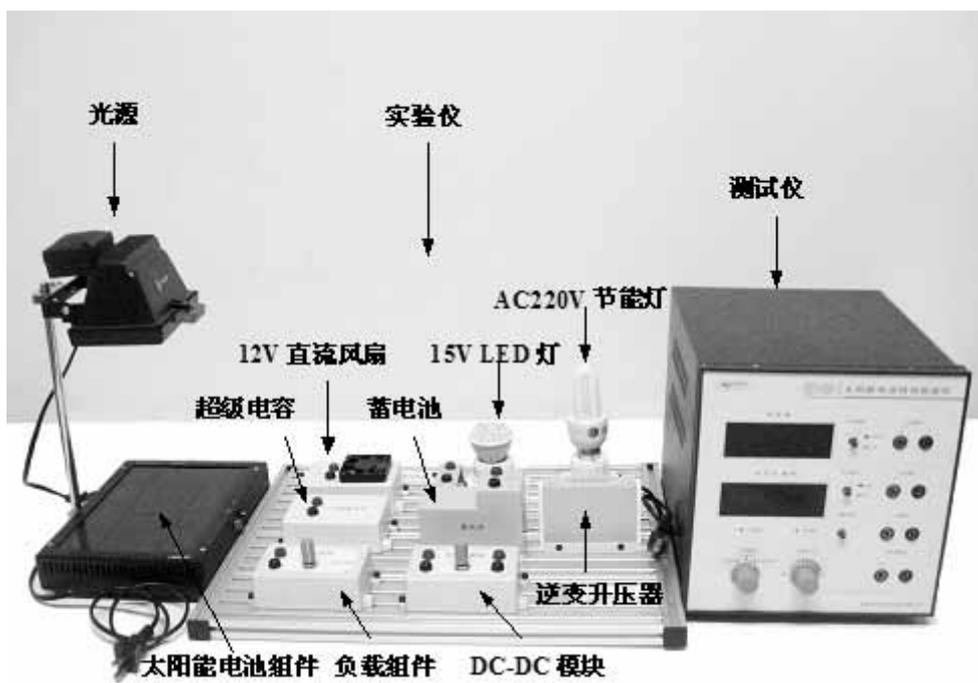


图 4 太阳能电池应用实验装置



图 5 测试仪面板图

## 实验内容及步骤

### 实验前准备

由于蓄电池充电时间需要约 4 小时，实验前用测试仪上的电压表测量蓄电池电压，若电压低于 11.5 伏，用配置的充电器给蓄电池充电，充电与使用蓄电池可同时进行，电压充至 13.5 伏时停止充电。

#### 1、测量太阳能电池输出伏安特性

光源调节至离电池最远。在光照不变的条件下，改变负载电阻的阻值，太阳能电池输出的电压电流随之改变。太阳能电池具有图 6 所示的输出伏安特性。负载电阻为零时的电流称为短路电流，即伏安特性曲线与纵轴的交点。负载电阻断开时的电压称为开路电压，即伏安特性曲线与横轴的交点。

太阳能电池的输出功率为电压与电流的乘积，在伏安特性曲线的不同点，输出的功率差异很大。在实际应用中，应使负载功率与太阳能电池匹配，以便输出最大功率，充分发挥太阳能电池功效。

按图 7 接线，以负载组件作为太阳能电池的负载。实验时先将负载组件逆时针旋转到底，然后顺时针旋转负载组件旋钮，记录太阳能电池的输出电压  $U$  和电流  $I$ ，并计算输出功率  $P_0=U \times I$ ，填于表 1 中。

表 1 太阳能电池输出伏安特性

输出电压 $V(V)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10.5	11	11.5	12	
输出电流 $I(mA)$															
输出功率 $P_0(mW)$															

按表 1 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，该太阳能电池最大输出功率多少？最大功率点对应的输出电压和电流是多少？

#### 2、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、并联后的输出总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。

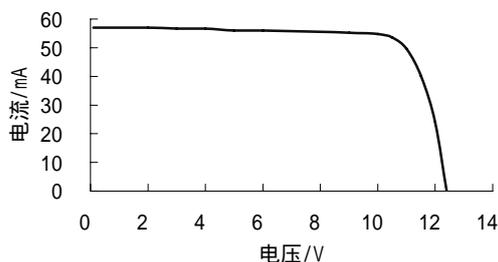


图 6 太阳能电池输出伏安特性

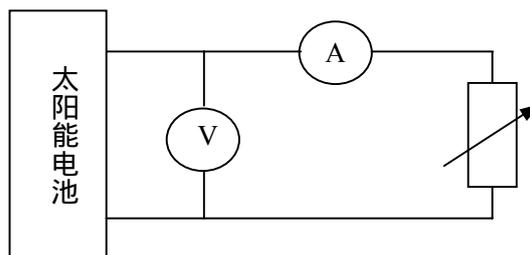


图 7 测量太阳能电池输出伏安特性接线图

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。

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 8 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 9 测量遮挡对短路电流的影响。

表 2 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？

### 3、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 10a，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 10b 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 10c 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

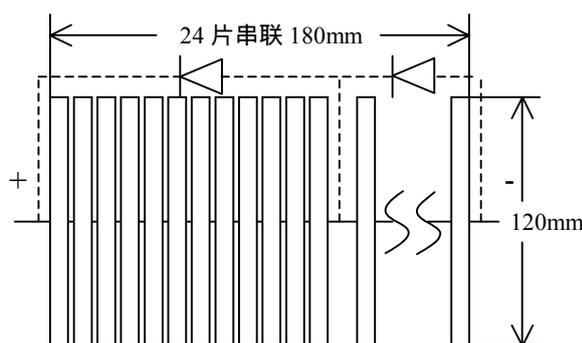


图 8 太阳能电池连接示意图

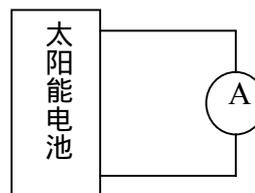


图 9 测量遮挡对短路电流的影响

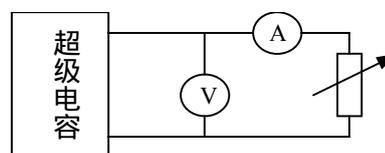


图 10a 超级电容放电

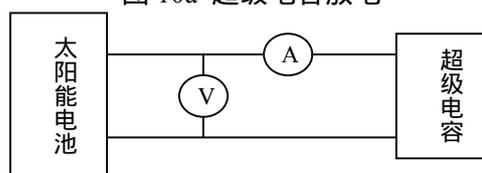


图 10b 太阳能电池直接充电

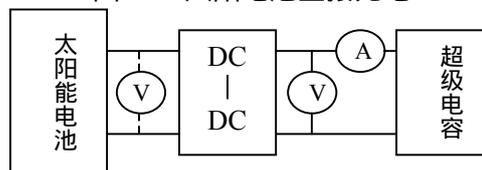


图 10c 加 DC - DC 充电

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。

表 3 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)
0.0						
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						

由表 1 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。

#### 4、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 11, 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 4。

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 4。

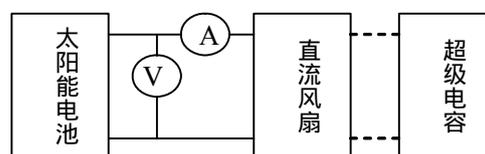


图 11 太阳电池直接连接负载接线图

表 4 太阳能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 $(V_2^2-V_1^2)/V_1^2$ ，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？

#### 5、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 (不接入图 12 中虚线部分)，负载的电压、电流，计算负载获得的功率，记入表 5。

接入 DC-DC 后，调节 DC-DC 的调节旋钮使输出最大 (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 5。

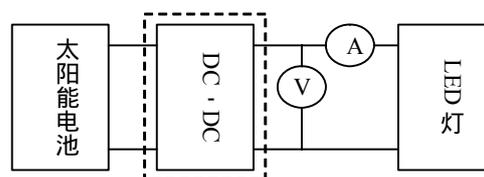


图 12 加 DC-DC 匹配电压接线图

表 5 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。

#### 6、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 13 接线，节能灯点亮。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 6。

表 6 交流负载时太阳能电池输出与总输出

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

画出逆变器输出波形，根据实验原理部分所述，判断该逆变器类型。

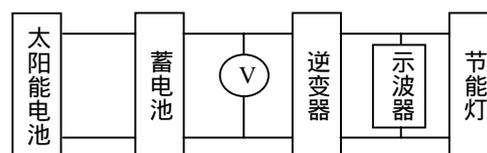


图 13 交流负载实验接线图