

# 利用2450型触摸屏数字源表， 实现太阳能电池I-V特性分析

## 概述

太阳能电池或光伏(PV)电池是从光源中吸收光子然后释放电子的器件，当太阳能电池与负载相连时，可以引起电流流动。太阳能电池研究人员和制造商努力实现尽可能高的效率，同时损失最小。因此，太阳能电池与光伏材料的电气特性成为研究开发和制造过程中的一部分。对太阳能电池进行电流-电压(I-V)特性分析对推导有关其性能的重要参数至关重要，包括最大电流( $I_{max}$ )和电压( $V_{max}$ )、开路电压( $V_{oc}$ )、短路电流( $I_{sc}$ )以及效率( $\eta$ )。

利用吉时利2450型触摸屏数字源表，可以轻松生成这些I-V特性，该仪器可以提供电流和电压源和测量。由于2450型仪器具有4象限源能力，它可以吸收高达1.05A @ 21V的电池电流作为施加电压的函数。本应用笔记说明怎样利用2450型触摸屏数字源表来简化太阳能电池的I-V特性分析，如图1所示。特别是，本应用笔记介绍了怎样通过仪器前面板进行I-V测试，包括怎样生成图表，以及将数据保存至USB闪存。应用笔记还详细说明了怎样通过总线实现测量自动化。



图1 2450型触摸屏数字源表与太阳能电池的连接

## 太阳能电池

图2给出太阳能电池的等效电路模型，它由光感应电流源( $I_L$ )、生成饱和电流的二极管 [ $I_S(e^{qV/kT}-1)$ ]、串联电阻( $r_s$ )以及分流电阻( $r_{sh}$ )组成。

串联电阻源自金属接触电阻、电池前面板的欧姆损耗、杂质浓度和结深。串联电阻是一个重要参数，因为它降低了

电池的短路电流和最大输出功率。从理想角度看，串联电阻应当是零欧姆。分流电阻表示沿电池边缘的表面泄漏或晶体缺陷引起的损耗。从理想角度看，分流电阻应当无穷大。

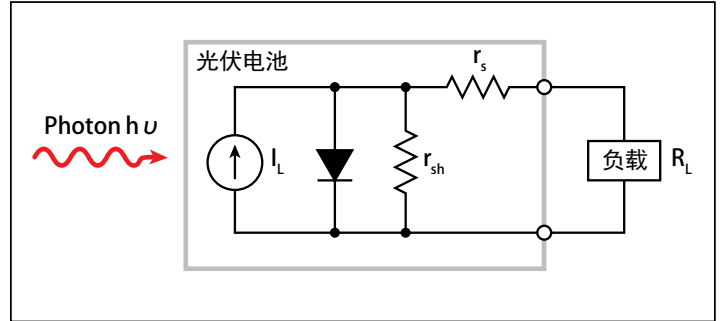


图2 光伏电池的理想等效电路

如果负载电阻( $R_L$ )与照明太阳能电池相连，那么总电流变成：

$$I = I_S (e^{qV/kT} - 1) - I_L$$

其中， $I_S$  = 二极管饱和电流

$I_L$  = 光生电流

有几个参数用来描述太阳能电池的效率，包括最大功率点( $P_{max}$ )、短路电流( $I_{sc}$ )和开路电压( $V_{oc}$ )。图3说明这些参数点，这是照明太阳能电池的典型正向偏压I-V曲线。最大功率点( $P_{max}$ )是电池最大电流( $I_{max}$ )与电压( $V_{max}$ )的乘积，电池在此处的功率输出最大。这一点位于曲线的“拐点”。

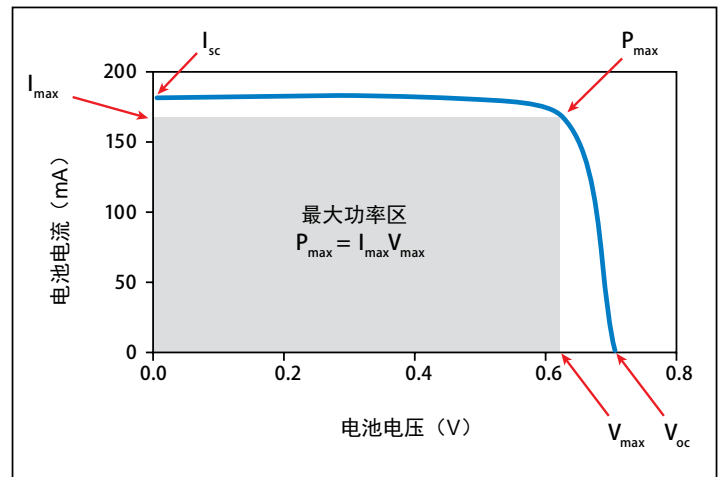


图3 太阳能电池的典型正向偏压I-V特性

## 2450型仪器作为电子负载

如图4所示，当负载与照明太阳能电池的输出相连时，电流将流动。当照明太阳能电池与2450型仪器的输出端相连时，该数字源表源测量单元（SMU）仪器将吸入电流。换句话说，2450型仪器将成为负载。因此，测量的电流是负值。

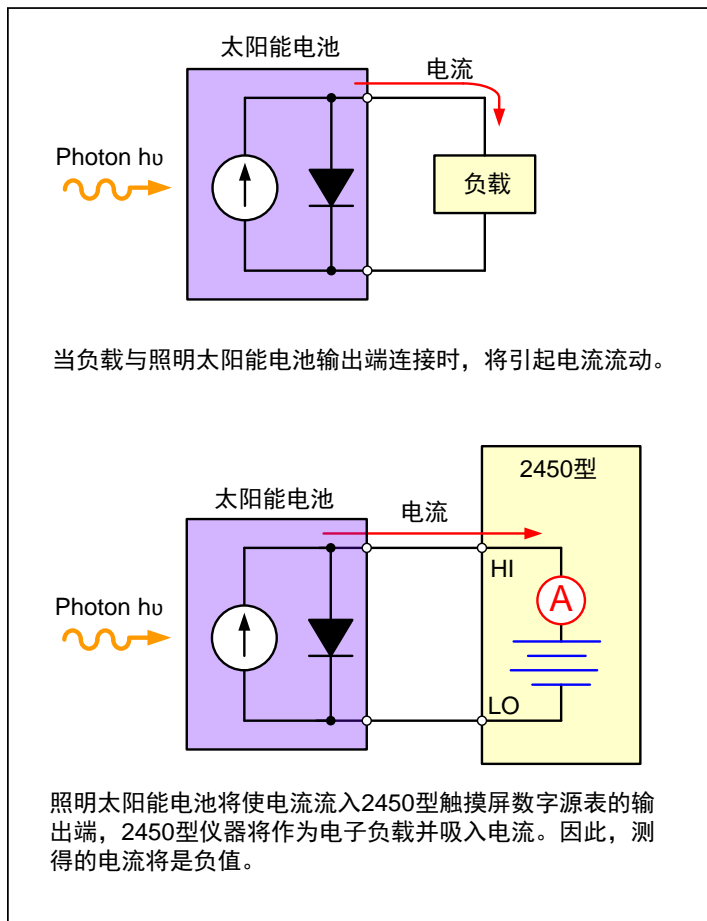


图4 与照明太阳能电池连接时，2450型仪器将作为电子负载

## 2450型仪器与太阳能电池连接

图5给出太阳能电池与2450型仪器的连接。这里采用4线连接，以消除引线电阻的影响。当引线 with 太阳能电池连接时，注意：Force LO和Sense LO端与电池阴极端相连，Force HI和Sense HI端与电池阳极端相连。尽可能使连接靠近电池，以消除太阳能电池端子电阻对测量准确度的影响。

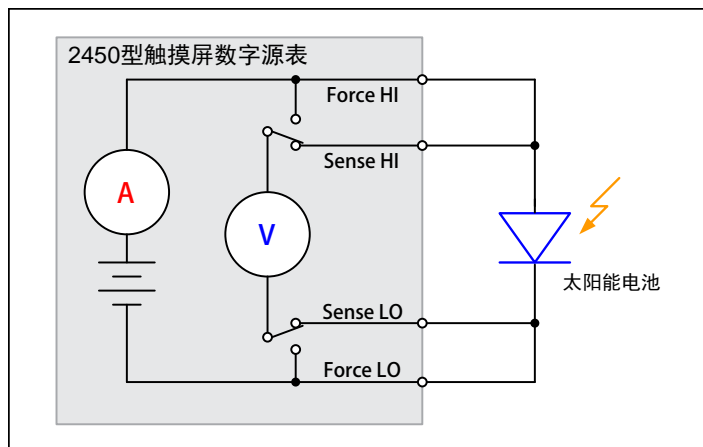


图5 太阳能电池与2450型仪器连接示意图

## 利用用户界面生成、绘制和保存 I-V扫描的三个步骤

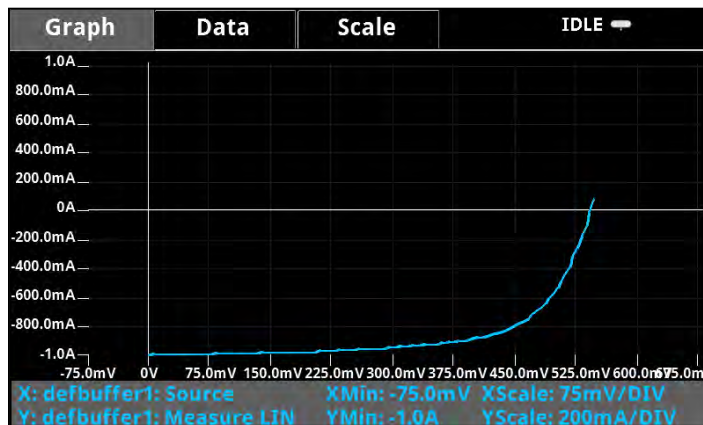
通过仪器前面板或总线，可以实现太阳能电池的I-V扫描。只需按压几个重要按键，即可生成测试、绘制图表并将数据保存至USB闪存。这里给出生成电压扫描、绘制图表并将数据保存至USB闪存三个简易步骤。

### 步骤1：生成和执行I-V扫描

步骤	重要按键
仪器复位至默认状态	菜单键→管理系统→复位
设置电压源并测量电流	主页按键→功能按键→提供电压源，测量电流
设置4线检测	菜单键→测试设置→检测模式→4线检测
配置扫描参数	菜单键→源扫描 • 设置期望的启动、停止和阶跃电压 • 向下滚动，设置电源限幅 • 按压Generate（生成），建立扫描
执行扫描	主页按键→按压TRIGGER键

### 步骤2：浏览图表

为了以图表形式浏览数据，请先按压MENU按键，然后按压Graph按钮。将自动显示I-V扫描图表。要想重复图表，只需按下TRIGGER按键。



### 步骤3: 将数据保存至USB闪存

为了将I-V数据保存至USB闪存, 首先插入USB闪存, 按压MENU按键, 选择Data Buffers, 按压期望的缓冲区, 然后按SAVE TO USB。输入文件名。数据将以.csv格式保存。随后, 还可以下载至电子数据表, 并进行分析。



图6 将数据保存至USB闪存

### 利用程控编程, 实现I-V测量自动化

通过灵活的LAN、USB或GPIB接口, 利用SCPI或测试脚本本处理器(TSP®)指令可以对2450型仪器进行程控。下面利用多晶硅太阳能电池, 说明怎样对2450型仪器进行编程, 实现太阳能电池I-V特性测试自动化。对于本次具体测试, 将2450型仪器扫描电压范围设置为0V~0.56V, 56个阶跃(步长5mV), 并以4线配置形式, 测量作为结果的电流。在附录A中给出执行本次测试的TSP代码, 在附录B中给出执行本次测试的SCPI代码。图7给出根据测试结果绘制的电池I-V特性曲线。注意, 对太阳能电池的测试是在光照(开灯)和黑暗(关灯)条件下进行的。如同前面的讨论, 在开灯条件下测得的电流是负值, 因为2450型仪器吸入电流。如果需要, 曲线可以转化为电子数据表。

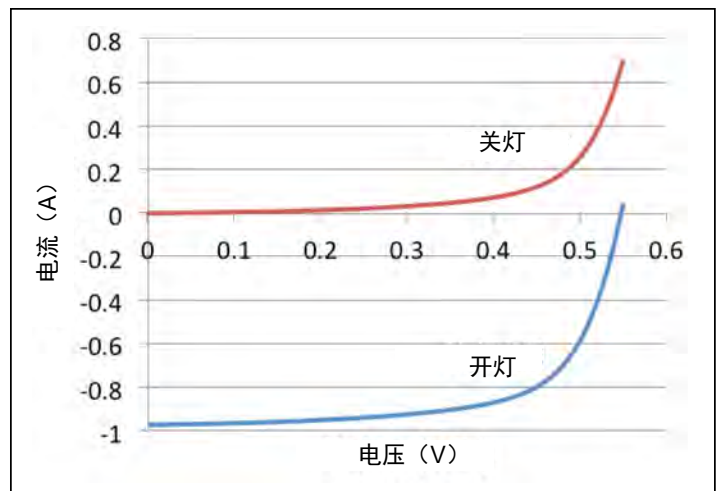


图7 2450型仪器生成的太阳能电池I-V扫描

除了通过总线实现I-V测量自动化, 2450型仪器还可以在其用户界面显示推算的最大功率( $P_{max}$ )、短路电流( $I_{sc}$ )、开路电压( $V_{oc}$ ), 以及用户推导计算的其他值。请看在2450型仪器显示屏上呈现的大字体、易读太阳能电池参数, 如图8所示。



图8 2450型仪器显示屏显示最大功率( $P_{max}$ )、短路电流( $I_{sc}$ )和开路电压( $V_{oc}$ )

## 附录A: TSP代码实例

以下TSP代码实例的设计目的是在吉时利仪器的测试脚本建立器(TSB)软件上运行。TSB是2450型仪器包含的一款软件工具。为了在其他编程环境使用,您必须更改TSP代码实例。

在这个实例中,电压扫描范围是0V~0.56V,56个阶跃,并测量作为结果的电流。电流和电压读数存储在缓冲区(defbuffer1)内。

```
-- 定义扫描点数
num = 56

-- 仪器复位,并清除缓冲区
reset()

-- 设置元和测量函数
smu.measure.func = smu.FUNC_DC_CURRENT
smu.source.func = smu.FUNC_DC_VOLTAGE

-- 测量设置
smu.measure.terminals = smu.TERMINALS_FRONT
smu.measure.sense = smu.SENSE_4WIRE
smu.measure.autorange = smu.ON
smu.measure.nplc = 1

-- 源设置
smu.source.highc = smu.OFF
smu.source.range = 2
smu.source.readback = smu.ON
smu.source.ilimit.level = 1
smu.source.sweeplinear('SolarCell', 0, 0.55, num, 0.1)

-- 开启触发器模型,并等待其完成
trigger.model.initiate()
waitcomplete()

-- 定义初始值
voltage = defbuffer1.sourcevalues
current = defbuffer1
isc = current[1]
mincurr = current[1]
imax = current[1]
voc = voltage[1]
vmax = voltage[1]
pmax = voltage[1]*current[1]

-- 计算数值
for i = 1, num do
    print(voltage[i],current[i],voltage[i]*current[i])
    if (voltage[i]*current[i] < pmax)then
        pmax = voltage[i]*current[i]
        imax = current[i]
        vmax = voltage[i]
    end
    if math.abs(current[i]) < math.abs(mincurr)then
        voc = voltage[i]
```

```

end

end

pmax = math.abs(pmax)
imax = math.abs(imax)

print("Pmax = ", pmax, ", Imax = ", imax, ", Vmax = ", vmax, ", Isc = ", isc, ", Voc = ", voc)

-- 在2450型仪器前面板显示数值
display.changescreen(display.SCREEN_USER_SWIPE)
display.settext(0, string.format("Pmax = %.4fW", pmax))
display.settext(1, string.format("Isc = %.4fA, Voc = %.2fV", isc, voc))

```

## 附录B：SCPI代码实例

本SCPI指令序列实例旨在生成太阳能电池I-V扫描。您必须进行适当的修改，使之在您的编程环境运行。在这个实例中，电压扫描范围是0V~0.56V，56个阶跃，并测量作为结果的光伏电池电流。电流和电压读数存储在缓冲区（defbuffer1）内。

SCPI指令	说明
*RST	仪器复位
SENS:FUNC "CURR"	设置测量电流
SENS:CURR:RANG:AUTO ON	开启测量自动量程
SENS:CURR:RSEN ON	开启4线检测模式
SOUR:FUNC VOLT	设置源电压
SOUR:VOLT:RANG 2	将电压源限幅设置为2 V
SOUR:VOLT:ILIM 1	将电流源限幅设置为1 A
SOUR:SWE:VOLT:LIN 0, 0.55, 56, 0.1	将扫描电压设置为0~0.55V，56个阶跃，间隔100ms
:INIT	启动扫描
*WAI	等待扫描完成
TRAC:DATA? 1, 56, "defbuffer1", SOUR, READ	从缓冲区获得源值和测量值