

数字式光伏阵列模拟器的设计研究

全球性的能源危机迫使越来越多的国家开始重视新能源的研究，光伏发电作为其中很重要的一种也得到了广泛研究。但是，由于光伏电池造价高，导致研究成本很高，不利于其初期的研究。因此，很有必要设计一种成本较低，能够代替实际光伏电池阵列来进行各种光伏实验的太阳能电池模拟器。

本文所设计的太阳能电池模拟器以 BUCK 电路为基础，采用 ARM 控制，并加入了电流 PI 控制方式来改善系统动态性能和稳态精度。此外，本文还采用四折线法来对光伏电池阵列的特性曲线进行分段拟合，并进行了仿真验证。

1 系统设计目标

1.1 太阳能电池板伏安特性曲线

图 1 所示是太阳能电池板输出 I-U 特性曲线随日照、温度的变化情况。太阳能电池板模拟器需要能够模拟出不同温度、不同光照下的各种曲线，换言之，模拟器最终要能够模拟出许多条曲线。但是，某一时间下，日照强度和温度是一定的，在此时间下，输出曲线也只有一条符合要求。设计时可根据设定的日照强度和温度来计算确定输出哪一条曲线。实际做法是将不同日照、不同温度下的曲线计算出来后将其离散化，并以数据表的形式存入 ARM 控制器中。存入的曲线越多，所能覆盖的温度日照范围越广。

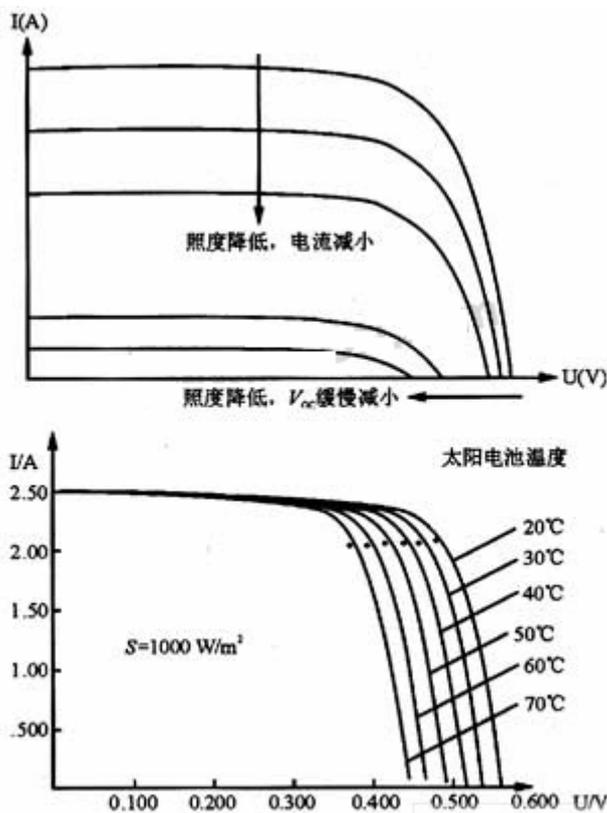


图1 太阳能电池输出I-U特性随日照温度的变化

1.2 太阳能电池板的工程数学模型

电池板出厂时都会给出短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压这四个参数 (ISC、VOC、Im 和 Vm)，而且四个参数符合下列公式：

$$I_L = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{V}{C_2 V_{oc}}} - 1)] \quad (1)$$

其中： I_L 和 V_L 分别一定条件下的电流和电压。

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) e^{\frac{-V_m}{C_2 V_{oc}}} \quad (2)$$

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)\right]^{-1} \quad (3)$$

这样，就可将太阳能电池板的 I-U 特性曲线转换为便于工程计算的形式。

式 (1) 描述的是标准照度 ($S_{ref}=1000 \text{ W} / \text{m}^2$) 和标准温度 ($T_{ref}=25 \text{ }^\circ\text{C}$) 下的 I-U 曲线。一般情况下 (照度 S，温度 T) 的 I-U 方程可按照以下方法进行计算：

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (4)$$

$$\Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \quad (5)$$

然后根据以下公式算出一般情况下的 I_{sc} 、

V_{oc} 、 I_m 和 V_m ：

$$I_{sc} = I_{sc} \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (6)$$

$$V_{oc} = V_{oc} (1 - \gamma \Delta T) \ln (1 + \beta \Delta S) \quad (7)$$

$$I_m = I_m \frac{S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \quad (8)$$

$$V_m = V_m (1 + \gamma \Delta T) \ln (1 + \beta \Delta S) \quad (9)$$

其中，系数 α 、 β 、 γ 的典型值为： $\alpha=0.0025/^\circ\text{C}$ ， $\beta=0.5$ ， $\gamma=0.00288/^\circ\text{C}$ 。

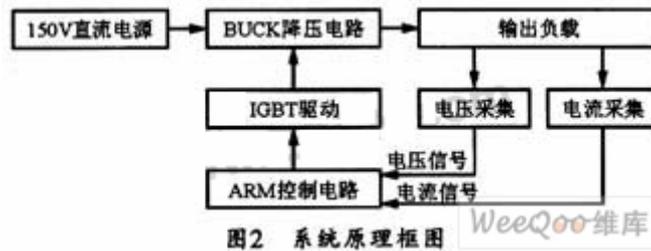
这样，将求得的 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 和 V_m ，取代式 (1) (2) (3) 的 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 和 V_m ，就可以得到一般情况下的 I-U 特性曲线。

首先算出一般情况与标准情况下的温度差 ΔT 和相对照度差 ΔS ：

2 系统原理及控制策略

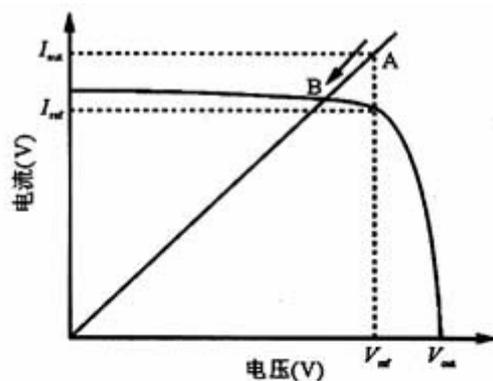
2.1 系统原理

本系统的原理框图如图 2 所示，其中直流稳压电源可提供 150 V 的恒定电压输出，然后通过 BUCK 降压电路把电压加在输出负载上，以实时采集负载两端的电压和电流，再经过控制电路的控制算法改变 BUCK 电路的 PWM 占空比，以把输出电压和电流控制在预想的 I-U 曲线上。

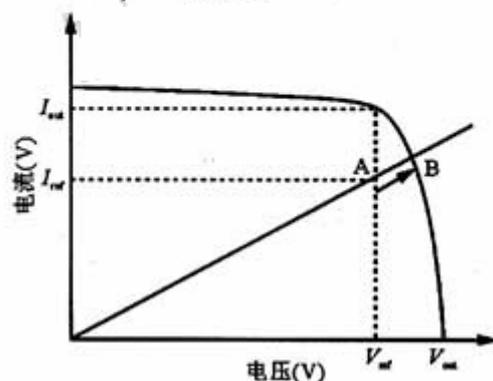


2.2 系统控制策略

由于在某一环境条件下，电池板的输出伏安特性曲线只有确定的一条，这样，采集系统输出的电压电流，就可以得到输出负载的大小。其负载线与输出 I-U 曲线会有一个交点，这个点就是工作点，也就是图 3 中的 B 点。这一工作点将对应一个电流和一个电压。调节 BUCK 电路的 PWM 占空比，可使输出电压电流变换为工作点处的电压电流，从而达到调节的目的。



(a) 输出工作点调节之一



(b) 输出工作点调节之二

图3 输出工作点调节图

具体调节时，若采集的电压电流对应的负载工作点在（点 A），曲线外时，可以减小占空比 D 。以减小输出电压，从而使工作点沿负载线向 B 点移动，此时 B 点就是想要的工作点；而当采集的电压电流对应的负载工作点在（点 A），曲线内部时，则可增大占空比 D ，从而增大输出电压，使工作点沿负载线向 B 点移动。由于负载为阻性，所以，基于电压和基于电流的调节是等效的。本文由于输出电压的惰性，设计时采用了基于电流的调节方式。

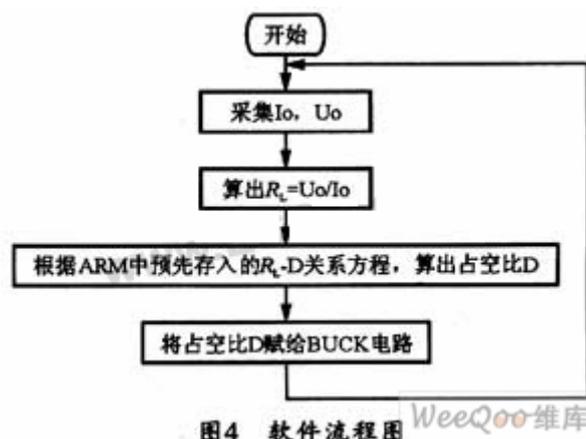
当外部环境不变，也就是太阳能电池板的输出曲线不变时，若负载变化，则马上可以得到新的负载工作点，这样，按照以上方法调节占空比，也可使负载工作点沿负载线方向移动到我们想要的曲线上。

事实上，当负载不变，环境变化（也就是曲线变化）时，仍可按照事先存人的曲线数据把新的曲线调出来，然后与负载比较来得到新的工作点，之后仍按照以上方法调节占空比，使负载工作点沿负载线方向移动到我们想要的曲线上。

3 算法实现流程

采用数据表查表法时，程序在逼近工作点的过程通常需要一定时间，因为算法本身需要一个步进量，步进量的大小选取也是个问题，且方法复杂。而采用四折线法来实时计算工作点则具有计算量小，执行时间短等优点。

由太阳能电池板输出的伏安特性曲线可以看出，开路点和短路点处的曲线都比较平滑，故可用四条折线来模拟。在这四条折线的方程曲线中，某一负载电阻 R_L 必然与这四条折线的一条相交。这样，就可以直接构造负载电阻 R_L 与输出电流的关系方程，进而得到负载电阻 R_L 与所需占空比 D 的关系方程。因此，在程序中只需计算一个除法和一个加法运算就可以得到所需的占空比 D ，实现起来简便易行。同样，如果需要多组曲线，只需构造多组折线方程预先存入 ARM 中就可以了。其程序执行流程图图 4 所示。



4 SIMULINK 仿真结果分析

为了提高系统的响应速度，减小稳态误差，本设计在电流反馈中使用了 PI 控制。其控制框图如图 5 所示。根据本文的控制策略，从测得的输出电压电流可以得到输出负载 R_L ，进而得到参考电流 I_{ref} 。将该电流与实际输出电流相减再送入 PI 控制器中，然后用 PI 输出控制调节占空比，进而使实际输出电流与 I_{ref} 一致。

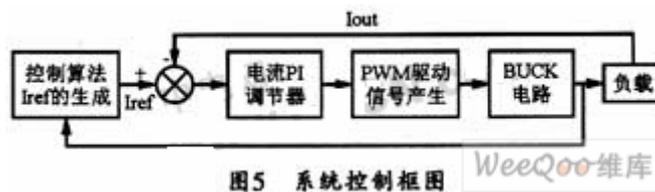


图 6 是用 SIMUUNK 工具构造的仿真模型。用该系统模拟的太阳能电池板的最大输出功率为 120 W。由 150 V 直流电源提供输入，经 BUCK 降压电路后加在负载 R_L 上。再将测得的负载两端电压除以电流，就可得到输出负载 R_L 的值。为了避免繁琐的计算，提高系统的响应速度，可以将打算输出的电池板的 I-U 曲线拟合成 R_L - I_{ref} 关系曲线。再做成 Lookup Table 数据表。这样，通过查表就很容易得到参考电流 I_{ref} 。如果想要拟合不同日照温度下的电池板的 I-U 曲线，只要把 LookupTable 的值进行相应的更换就可以了。

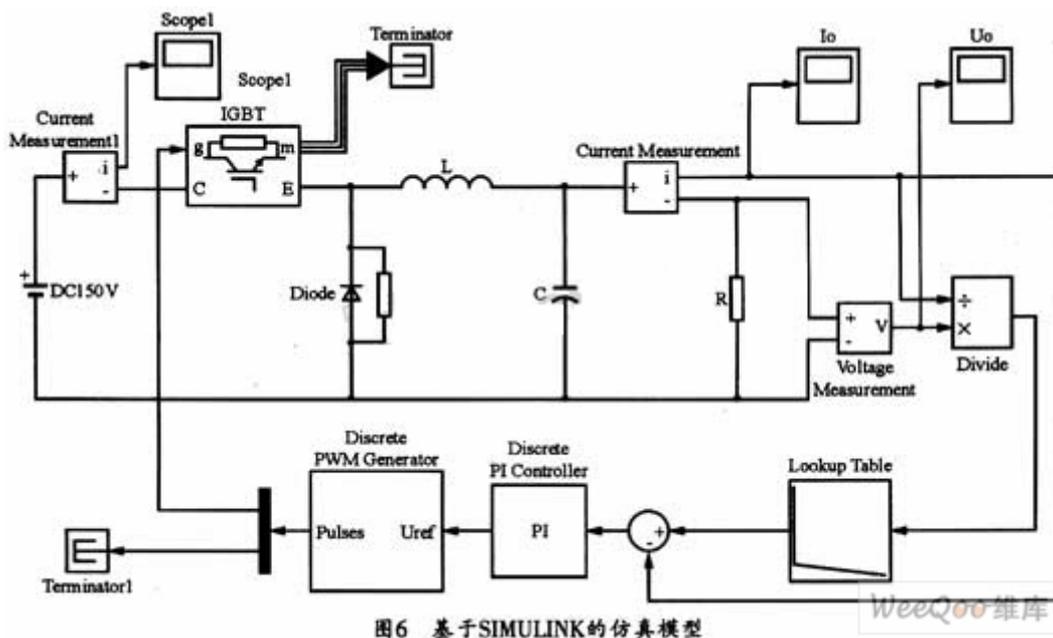


图6 基于SIMULINK的仿真模型

本文采用试凑法对 PI 控制器的参数进行了整定。首先将积分时间常数 T_i 取零，即取消积分作用，而采用纯比例控制。然后将比例增益 P 由小变到大，并观察系统响应，直至系统响应速度变快到一定范围的超调为止。之后再将积分时间常数 T_i 由大逐渐减小，使积分作用逐渐增强，这样，观察输出会发现系统的静差会逐渐减少直至消除。操作时可以反复试验几次，直到消除静差的速度满意为止。本设计最终选择 $P=200$ ， $T_i=2$ 。

根据系统电压要求及 BUCK 电路特性可以算出电感 L 取 2 mH ，电容 C 取 $100\text{ }\mu\text{F}$ ，ARM 存入的 I-U 曲线的开路电压为 40 V ，短路电流为 3 A 。当取 $R_L=24\text{ }\Omega$ 时，根据光伏电池的 I-U 曲线，系统应输出 36.54 V 电压，输出电流为 1.524 A ，仿真后得到负载两端的电压波形如图 7 所示。

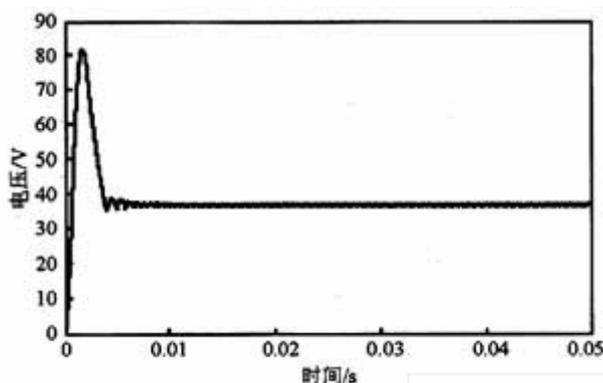


图7 负载两端电压仿真结果

由图 7 可以看出，所得到的电压电流值刚好就是想要得到的 I-V 曲线上的点。系统从开机到稳定值的动态响应时间约为 10 ms ，响应速度比较快。由于 PI 超调的作用，刚开始有一个明显的尖峰电压电流，在实际实验中，应在负载两端并联一个高耐压的小电容，以吸收尖峰电压。

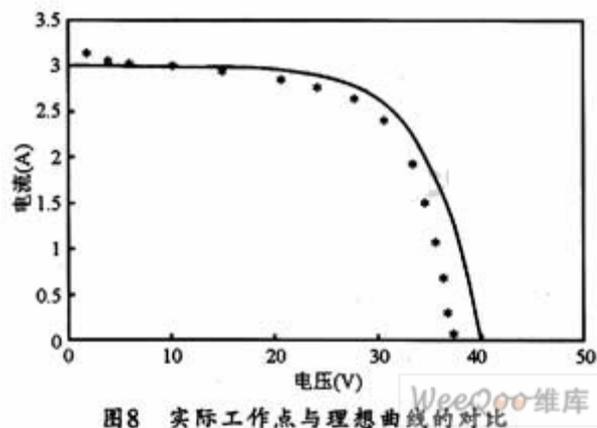


图8 实际工作点与理想曲线的对比

更换负载电阻的大小可使每个阻值对应一对电压电流值，也就是负载工作点。图8用符号‘*’表示。把这些工作点与预存的光伏电池的I-U曲线相比可知，这些工作点大致在光伏电池I-U曲线附近，其多点仿真结果如图8所示。

5 结束语

本文用SIMULINK开发出了一种新的太阳能电池阵列模拟器的仿真模型，并提出了一种基于四折线法来进行光伏电池阵列输出曲线的分段拟合方法。论证了一种用电流反馈PI控制BUCK电路做成的光伏电池阵列模拟器。由仿真结果可以看到，本系统可以较快的拟合出想要的电池阵列输出I-V曲线。可以在光伏发电系统研究中，代替实际的太阳能电池来进行实验。