

# 关于太阳能电池阵模拟器的设计

## 1 引言

太阳能 (Solar Energy)，一般是指太阳光的辐射能量，在现代一般用作发电。自地球形成生物就主要以太阳提供的热和光生存，而自古人类也懂得以阳光晒干物件，并作为保存食物的方法，如制盐和晒咸鱼等。但在化石燃料减少下，才有意把太阳能进一步发展。太阳能的利用有被动式利用（光热转换）和光电转换两种方式。太阳能发电一种新兴的可再生能源。目前，在航天电源领域内，绝大多数卫星电源均使用太阳能电池作为其动力核心。卫星电源的性能直接影响到卫星的性能和工作寿命，对卫星的正常运行和使用也有重大的影响。因此，为了提高电源系统的性能和可靠性，对卫星电源系统进行仿真和测试评估具有十分重要的意义。

卫星的空间工作条件恶劣且复杂，温度范围大，日照条件变化迅速，且太阳能电池方阵处于高能粒子辐射下，在地面上无法采用实际的太阳能电池方阵来再现卫星在空间轨道中的工作状态，因此需要采用太阳能电池模拟器 (Solar Array Simulator, 简称 SAS) 来模拟太阳能电池阵在空间的工作状况。SAS 是卫星电源模拟器的重要组成部分，其主要任务是真实地遵循太阳能电池方阵在各种复杂空间条件下的实际输出特性曲线，在卫星的地面测试阶段代替太阳能电池方阵为卫星上的各分系统供电。

## 2 太阳能电池的数学模型

根据太阳能电池原理和图 1 所示的实际测量结果建立了多种模型，用于太阳能电池的测试和应用研究。事实证明，这些模型具有足够的工程精度。

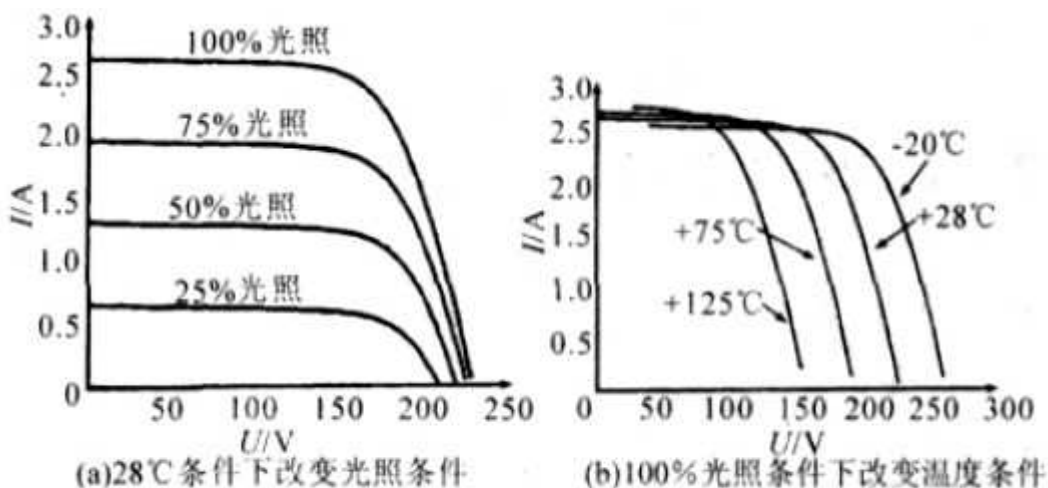


图 1 太阳能电池阵的实测 I-U 曲线特性

## 2.1 单指数模型

图 2 示出太阳能电池的等效电路。

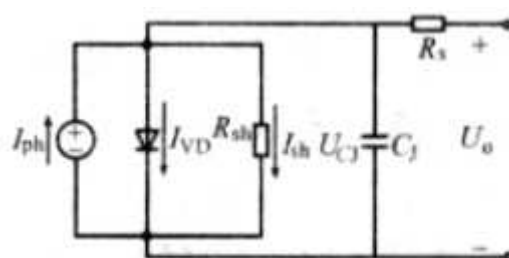


图 2 太阳能电池等效电路

- 图中
- $I_{ph}$ ——光生电流
  - $U_j$ ——结电容电压
  - $I_{VD}$ ——太阳能电池的暗电流,包括 n 区、p 区的扩散电流和结区的复合电流
  - $U_o$ ——太阳能电池的输出电压
  - $R_s$ ——太阳能电池的串联电阻,一般为几十毫欧~几百毫欧
  - $R_{sh}$ ——太阳能电池并联电阻,为几百欧姆~几千欧姆

$I_{ph}$  取决于太阳能电池各工作区的半导体材料性质和电池几何结构参数以及入射光强、表面反射率、前后表面复合速度、材料吸收系数等。由于器件的瞬时响应时间相比于绝大多数光伏系统的时间常数显得微不足道,因此分析中可忽略结电容。设定图中所示的电压、电流为正方向,由固体物理理论和全电路欧姆定律即可推出目前常用的单指数形式的太阳能电池模型:

$$\begin{aligned}
 I &= I_{ph} - I_{VD} - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU_{Cj}}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{U_{Cj}}{R_{sh}} \\
 &= I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left[\frac{q(U + IR_s)}{AKT}\right] - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中

$I_0$ ——二极管反向饱和电流

$q$ ——电子电荷

$I$ ——电池的输出电流

K——波尔兹曼常数

T——绝对温度

A——二极管品质因子（曲线因子），一般  $A=1\sim 2$ ；

## 2.2 双指数模型

在单指数模型中，在不同的电压范围内，决定 IVD 的因素也不同。当电压较高时，IVD 主要由电中性区的注入电流决定；当电压较低时，IVD 主要由空间电荷区的复合电流决定。为了提高模型精度，可以综合考虑这两种情况，在等效电路中用两个参数不同的二极管来产生这两个电流，如图 3 所示。

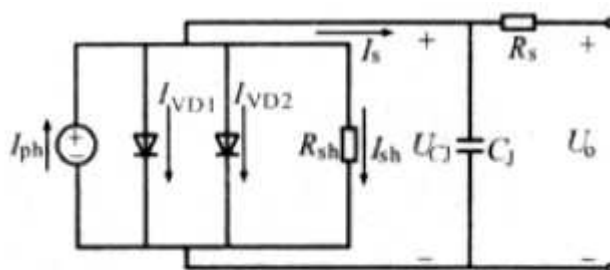


图 3 太阳能电池双指数模型

两个二极管产生的暗电流 IVD1, IVD2 可分别表示成一个指数式的形式，这就是双指数太阳能电池理论模型，其表达式为：

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp \left[ \frac{q(U + IR_s)}{A_1 KT} - 1 \right] \right] - I_{02} \left[ \exp \left[ \frac{q(U + IR_s)}{A_2 KT} - 1 \right] \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

式中

$I_{01}, A_1$ ——电中性区的饱和电流及完整性因子

$I_{02}, A_2$ ——空间电荷区的饱和电流及完整性因子

该模型不仅考虑了  $R_s$  和  $R_{sh}$  对太阳能电池性能的影响，而且用指数的形式概括地表示了不同机制下产生的 IVD，并将不同电压范围内的 IVD 决定因素也考虑在内，因而具有更高的精度。

### 2.3 工程应用的模型

上述单指数和双指数模型是基于物理原理的最基本的解析表达式,已被广泛应用于太阳能电池的理论分析中。但由于表达式中的参数,包括  $I_{ph}$ ,  $I_0$ (或  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ),  $R_s$ ,  $R_{sh}$  和  $A$ (或  $A_1$ ,  $A_2$ ) 与电池温度和日射强度都有关,确定起来十分困难,因此不便于工程应用,在太阳能电池供应商向用户提供的技术参数中也不包括这些参数。

工程用模型强调的是实用性与精确性的结合。

实际应用中,在设计各种系统时,考虑到数字仿真和模拟时的动态反应速度及计算工作量,必须尽可能在工程精度允许的条件下简化模型。

工程用太阳电池的模型通常要求仅采用供应商提供的几个重要技术参数,如短路电流  $I_{sc}$ 、开路电压  $U_{oc}$ 、最大功率点电流  $I_m$ 、最大功率点电压  $U_m$ 、最大功率点功率  $P_m$ ,就能在一定的精度下复现阵列的特性,并便于计算机分析。

鉴于单指数模型已足以精确描述太阳能电池的伏安特性,下面将在单指数模型的基础上,通过忽略  $(U+IR_s)/R_{sh}$  项和设定  $I_{ph}=I_{sc}$ ,得到工程实用的太阳能电池模型。忽略  $(U+IR_s)/R_{sh}$  项,是因为在通常情况下  $R_{sh}$  较大,有几百到几千欧,该项远小于光电流;设定  $I_{ph}=I_{sc}$ ,是因为在通常情况下  $R_s$  远小于二极管正向导通电阻。

此外,定义:

①开路状态下,  $I=0$ ,  $U=U_{oc}$ ;

②最大功率点时,  $U=U_m$ ,  $I=I_m$ 。

据此,太阳能电池的  $I-V$  方程可简化为:

$$I=I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp \left( \frac{U}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

在最大功率点时,  $U=U_m$ ,  $I=I_m$ , 可得:

$$I_m=I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[ \exp \left( \frac{U_m}{C_2 U_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

由于在常温条件下  $\exp[U_m/(C_2 U_{oc})] \gg 1$ , 因此可忽略式中的“-1”项,解出:

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left( \frac{-U_m}{C_2 U_{oc}} \right) \quad (5)$$

注意到开路状态下，当  $I=0$  时， $U=U_{oc}$ ，于是有：

$$0 = I_{sc} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left( \frac{-U_m}{C_2 U_{oc}} \right) \left[ \exp\left( \frac{1}{C_2} \right) - 1 \right] \right\} \quad (6)$$

可见，该模型只需输入太阳电池通常的技术参数  $I_{sc}$ ， $U_{oc}$ ， $I_m$ ， $U_m$ ，即可求出  $C_1$  和  $C_2$ 。从  $I_{sc}$ ， $U_{oc}$ ， $I_m$ ， $U_m$  的变化中可体现出光照强度和电池温度的变化。工程应用中可通过实测曲线来设置这 4 个参数，亦可通过近似的函数来描述这组参数的变化。通常可近似认为  $I_{sc}$ ， $U_{oc}$  分别随温度和光照强度呈线性变化。

### 3 太阳能电池阵模拟器的设计

#### 3.1 总体结构

太阳阵模拟器本质上是一个电源，其输出端的  $I-U$  特性曲线能够模拟太阳电池的  $I-U$  曲线特性。模拟器带有与计算机接口，可根据计算机给定的太阳能电池阵特征参数进行设定。

为了较真实地模拟实际电源系统，并使仿真系统具备测试功能，太阳阵模拟器要以太阳能电池电路为基本单位，以多个模块并联的形式构成。对于卫星电源系统，一般每个卫星拥有两个太阳翼，每个太阳翼有多个同种或不同种太阳能电池阵列并联构成，同时由于输出调节的需要，每个支路模块还分为上、下两段。因此，模拟器的设计应以每个分段为模块，通过多个模块的串并联实现对卫星电源阵的模拟。图 4 示出太阳能电池模拟器的系统框图。

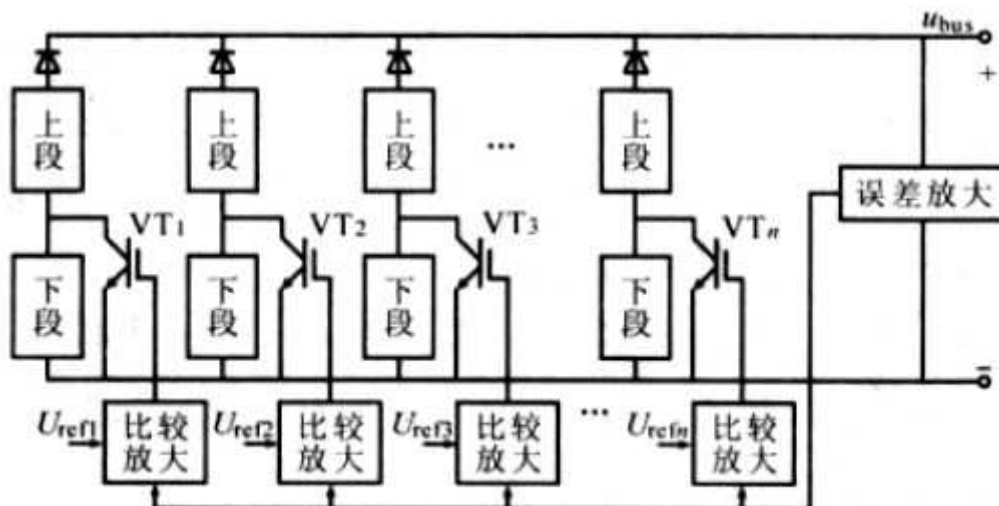


图 4 太阳能电池阵模拟器系统框图

每个支路由两个模拟器模块组成，上段和下段之间接分流调节器，每个支路通过隔离二极管接到直流母线上。要求每个模块的状态可以单独设置，以模拟太阳能电池阵光照不均匀的状态以及某些支路出现故障的状态；同时还可以快速更新所有支路的工作条件，以便在环境变化时进行快速模拟。

### 3.2 I-U 特性曲线生成模块

图 5 示出设计每个模块的结构。



图 5 太阳能电池模块结构图

考虑到实际工作环境可能比较恶劣，且温度和日照条件均变化较快，因此采用模拟器件来实现曲线的生成电路，以加快响应速度。通过高精度 D/A 将接收到的数字参数给定转换为模拟值给定。

根据太阳能电池的数学模型，太阳能电池的输出 I-U 曲线是在一个恒定电压下减去一个二极管的 I-U 特性曲线，对此，可采用如图 6 所示的太阳能电池输出 I-U 曲线模拟电路进行模拟。

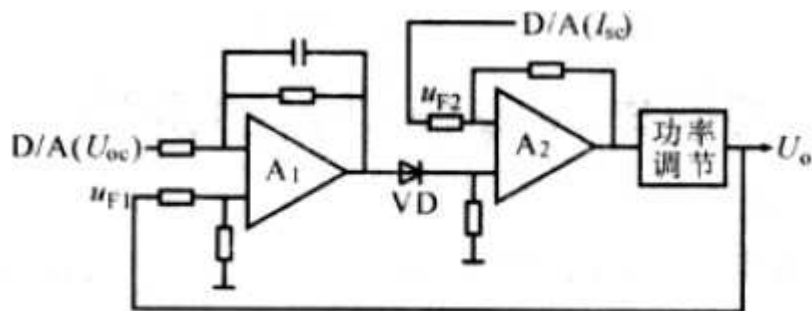


图6 太阳电池输出 I-U 曲线模拟电路

由图可见，输入包括开路电压和短路电流的给定，由这两个参数就能确定太阳能电池的工作状态。

太阳能电池的非线性特性主要由模拟器件来实现，不同的曲线对应着不同特性的二极管和其他电阻电容参数的选择。

开路电压和短路电流由外界环境条件所决定。

根据太阳能电池的工程模型，短路电流近似等于太阳能电池的光电流，主要由光照条件所决定，而开路电压则近似为电池温度的一个线性函数。因此，光照条件和电池温度就可以简单地通过这两个参数的设置得到反映。

可以看出，当反馈电压小于给定的  $U_{oc}$  的参考值，放大器 A1 输出为负，二极管由于反偏截止，A2 的输出就只能由  $I_{sc}$  决定，整个电路输出电流就为短路电流。当反馈电压增大，能使 A1 的输出为正，二极管正偏导通，A2 的输入则随二极管电流的增大而增大，输出则随之减小。由于二极管的电压电流是指数关系，利用这一关系进行设计，使电流的减小量作为输出电压的函数，并通过选择合适特性的二极管，就能很好地模拟太阳电池阵的 I-U 曲线。

### 3.3 功率输出部分

采用图 7 所示的功率放大电路，对前面产生的输出特性进行放大，电路采用了电流负反馈的形式，通过简单的调节来跟踪模拟器的输出电流。电路设计上采用了 P 沟道的 MOSFET，设计成输入越大，输出电流越小的形式，这样整个电路的输出电流将随二极管压降的增大而减小。当所需的输出功率较大时，可以采用一组该电路进行并联，由于 MOSFET 的负温度系数特性，实现了输出时的自然均流。同时在负载上并联了电容  $C_o$ ，以模拟太阳能电池的节电容。为了保证每个 MOSFET 支路不因短路而发生故，需在每个 MOSFET 支路上安装一定容量的保险丝，以确保整个模拟器的安全。太阳电池阵模拟器的每个主阵支路模块拥有支路输出、抽头点输出和功率地 3 个对外功率接口端子。

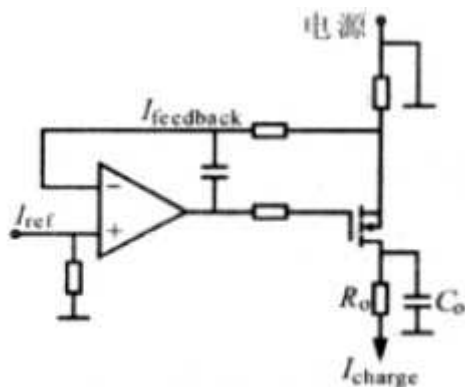


图7 功率放大电路

#### 4 实验结果

根据上述太阳能电池单体模型仿真电路,进行了 I-U 特性曲线的 Pspice 仿真及实际电路测试。在测试中,每组实验采样 60 个点,然后拟合作出曲线图。图 8 示出光照条件和温度条件变化时电池的 I-U 特性曲线波形。

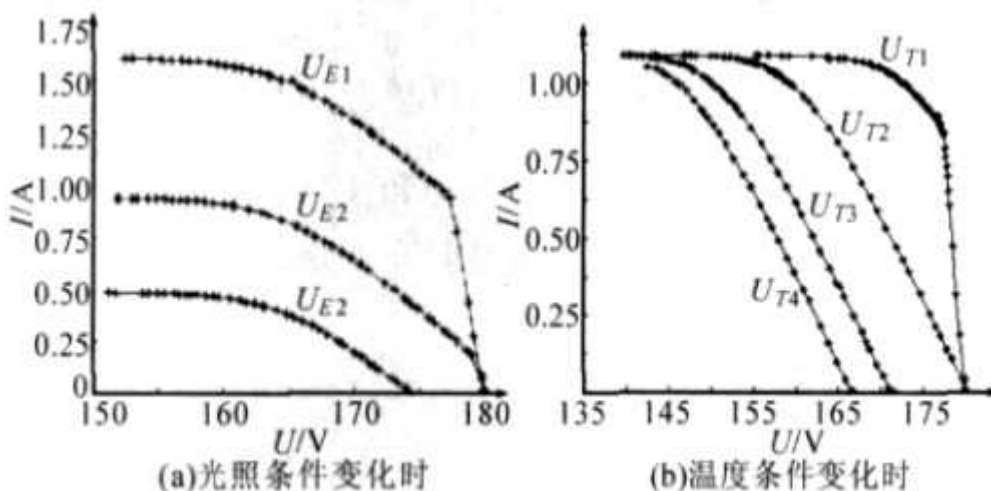


图8 光照和温度变化时电池的I-U特性实验结果

(1)光照条件变化时的电池 I-U 特性参数设定:温度参考电压  $U_T = -5.11V$ ;光照参考电压  $U_{E1} = 3.54V$ ,  $U_{E2} = 2.06V$ ,  $U_{E3} = 1.08V$ 。不同  $U_E$  对应不同的光照条件。

由图 8a 可见,  $U_T$  固定不变,随着  $U_E$  在实验中,对两台逆变器的连线阻抗设置了一定差值,图 5 示出两台逆变器并联,接入交流母线时输出电流  $i_o$  的实验波形。实验结果显示,在逆变器进入并联系统时,瞬时均流性能较好,动态响应很快,并很快进入稳态,并联系统的环流非常小。两台逆变器在输出阻抗不均的条件下,仍能保持较好的均流特性,并联时逆变器的输出电压保持了很好的正弦度,在逆变器接入交流母线时,并联逆变器能迅速实现均流。



## 5 结论

现在，太阳能的利用还不是很普及，利用太阳能发电还存在成本高、转换效率低的问题，但是太阳能电池在为人造卫星提供能源方面得到了应用。

本文所提出的控制器不仅具有良好的负载特性和输出特性，并且在并联中具有较强的参数适应性、良好的动态响应性能和均流性能。