新型空间MPPT技术仿真分析及设计

为最大限度地利用太阳阵输出的能量，采用最大功率点跟踪技术，对空间飞行器上太阳阵的工作点进行调整。由于空间电源对控制系统的动态特性及控制范围要求较高，基于传统的升压和降压电路，提出一种新型高效升降压拓扑电路，采用电压电流扰动算法，用硬件电路实现太阳阵的最大功率点跟踪。通过Simulink仿真及搭建硬件电路试验的结果表明，该MPPT控制电路能快速、准确地追踪最大功率点，可靠性较高且动态性能良好。

陈　强　黄云辉　龚跃玲／武汉理工大学自动化学院

陈　强／硕士研究生

关键词／Keywords
空间飞行器·
最大功率点跟踪·
升降压拓扑·
电压电流扰动·

0　引言

飞行器对电源系统的性能和可靠性指标要求很高[1]。不同于直接能量传输（DET）方式，最大功率跟踪（MPPT）方式自动调整太阳阵的工作点，可实现最大功率跟踪控制，从而实现能量平衡和最大化利用。

目前，国内关于空间电源MPPT技术的研究大多停留在原理分析和仿真验证。文献[2]在微小卫星电源控制器的设计中，采用的控制电路为Super Boost变换器，更适合全调节母线结构，缺点是电路只能工作在太阳阵电压低于母线电压的情况。文献[3]提出了一种基于DET电源系统的MPPT控制技术，在提高能量转换效率的同时，增大了母线的输出能力，但是设计困难并不适用于空间电源。在MPPT控制算法方面，文献[4]提出了一种结合变步长扰动和滞环比较法优点的新型变步长MPPT算法，在一定程度上抑制了系统的振荡和误判现象，但算法实现过程复杂，响应速度较慢。

本文对空间MPPT电源系统拓扑结构及相关算法进行研究，提出新型MPPT拓扑结构及算法电路，用硬件电路实现控制系统的功能，并对其进行仿真和试验验证，为国内空间电源技术的发展奠定了基础。

1　电池输出特性研究

空间探测任务环境变化剧烈，太阳电池输出功率受光照强度、温度等环境因素影响，输出的最大功率变化较大。光照条件和温度变化对太阳电池$I-V$曲线的影响如图1、图2所示。随着光照强度的增加，其开路电压变化不大，但开路电流会有较大变化，输出功率与最大功率也会随之改变；随温度升高时，电池的开路电压明显下降，短路电流稍微增加，输出功率和所能输出的最大功率会随着温度的递增而减小。

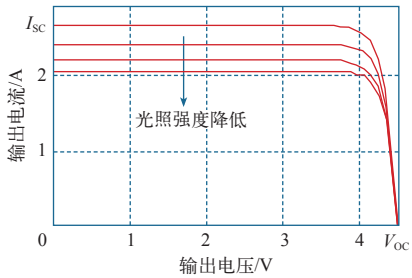

图1　光照变化对太阳电池的影响

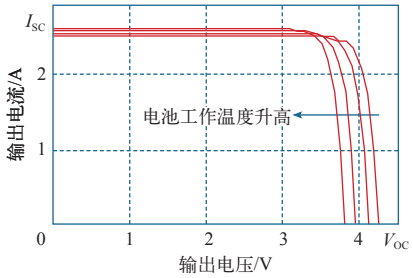

图2　温度变化对太阳电池的影响

2 MPPT拓扑研究

2.1 新型升降压拓扑

MPPT拓扑结构本质上是一个用作阻抗匹配的DC/DC电路，而太阳阵能否工作在最大功率点取决于太阳阵和负载的等效阻抗是否相匹配。在短时间内，可将太阳阵和DC/DC电路视为线性电路，前者等效为直流电源，后者等效为负载[5]。通过采样太阳阵的输出电压和电流，经过运算和控制，调节DC/DC电路的等效阻抗（DC/DC变换器的占空比），与太阳阵内阻进行动态匹配，实现太阳阵的最大功率跟踪[6]。

目前为止，MPPT拓扑技术只有升压变换器和降压变换器得到应用，这两种方式的共同缺点是产生了严重的能量传输损耗，从而降低了MPPT技术的优势[7]。本文提出一种新型升降压拓扑，使其同时具有升压模式、DET模式和降压模式，太阳阵电压在任何工况下均更接近于母线电压，传输效率将更接近于DET模式[8]。新型高效升降压拓扑电路如图3所示。

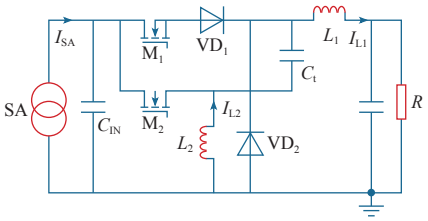

图3　新型高效升降压拓扑

2.2 工作模式分析

（1）Buck模式

当太阳阵运行电压大于母线电压（$V_{SA}>V_{BUS}$）时，变换器工作于Buck模式，此时，开关管M_2关断，M_1处于开关状态，以占空比D_{R1}进行调节。M_1导通时，二极管VD_1导通，VD_2截止，太阳阵向负载供电，电感L_1储能，电容C_t先释放能量，再储存能量。M_1关断时，二极管VD_2导通，VD_1截止，电感L_1经VD_2续流，向负载供电，L_2经VD_2释放能量，电容C_t储存能量。当电路工作于稳态条件下，分别对电感、电容应用伏秒平衡和电荷平衡原理，得到

$$V_{BUS}=V_{Ct}=D_{R1}V_{SA} \tag{1}$$

式中，V_{Ct}为电容C_t两端电压。

（2）Super－Boost模式

当太阳阵运行电压小于母线电压（$V_{SA}<V_{BUS}$）时，变换器工作于Super－Boost模式，开关管M_1开通，二极管VD_2截止，M_2处于开关状态，以占空比D_{R2}进行PWM调节。M_2导通时，二极管VD_1截止，太阳阵在电容C_t的作用下向负载供电，C_t释放能量，电感L_1、L_2储能。M_2关断时，二极管VD_1导通，太阳阵通过电感L_1向负载供电，电感L_1续流，向负载释放能量；电感L_2经太阳阵释放能量，为电容C_t充电。当电路处于稳态，分别对电感、电容应用伏秒平衡和电荷平衡原理，得到

$$V_{Ct}=V_{BUS} \tag{2}$$

$$V_{SA}=(1-D_{R2})gV_{BUS} \tag{3}$$

（3）DET模式

当太阳阵运行电压等于母线电压（$V_{SA}=V_{BUS}$）时，变换器工作于DET模式，M_1始终开通，M_2始终关断，二极管VD_1导通，VD_2截止，电感L_1、L_2不再起作用，电容C_t吸收二极管VD_1的交流纹波电流。此时能量直接传输到负载，传输效率等于DET模式。

3 MPPT算法研究

空间飞行器的电源系统对可靠性要求较高，由于太空辐照的存在，电源系统多采用硬件电路设计实现，硬件电路实现MPPT控制的优点主要是反应速度快，动态好，控制范围大。目前民用和航天中常用的MPPT算法有扰动观察法和电导增量法等，这些算法的核心思想是将功率或者电导增量值作为扰动判据，但算法中存在大量乘除法，导致硬件电路难以实现算法，无法满足航天器电源系统高可靠性的要求。因此，本文提出一种基于电压电流扰动的MPPT算法。

交错扰动法同样需要采样太阳电池阵的电压和电流，但是不需要计算功率，而是交错对电压和电流施加一个固定比例的扰动量，电压电流扰动算法追踪太阳阵工作点的过程如图4所示，实时采样太阳阵电压信号和电流信号，电压、电流各

扰动一次为一周期，其趋势是“向后一小步向前一大步”，太阳阵电压将逐渐趋近于最大功率点电压，并最终在最大功率点处作微小扰动。

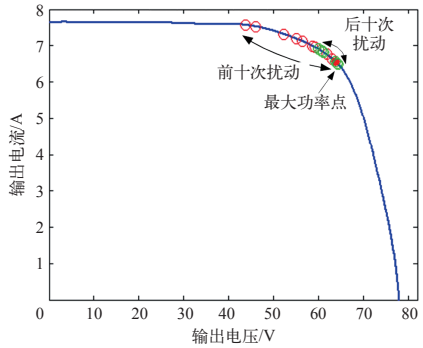

图4　电压、电流扰动算法追踪太阳阵工作点过程图

基于电压、电流的扰动思想进行了MPPT算法的硬件电路设计，如图5所示。将前一时刻的电压、电流通过电容接通和关断，实现电压、电流的记录，并与实时采样的电压、电流值进行比较输出逻辑信号，通过触发器输出相应的控制信号，最后通过积分器，将高低电平转化为连续变化的MPPT基准信号，控制太阳阵电压。

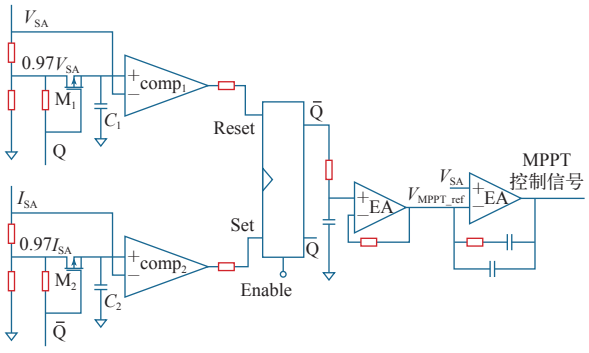

图5　MPPT算法硬件电路原理图

4　MPPT控制电路分析与验证

基于以上理论分析，在Simulink平台下搭建MPPT控制电路仿真图。主功率电路采用高效升降压电路，搭建温度和光照强度可变的太阳阵数学模型，并依据图5的硬件电路图搭建MPPT算法模型。利用搭建的仿真电路，在不同温度和光照条件下，验证所设计的MPPT硬件电路跟踪最大功率点的能力。

4.1　温度不变，光照强度变化

当太阳阵温度为20 ℃，太阳阵上光照强度从1 000 W/m^{2}变化到600 W/m^{2}时，算法追踪到的太阳阵输出电压、电流和输出功率如图6所示。从图6中可以看出，随着光照强度的减小，MPPT算法能很快追踪到最大功率点，最大功率点的太阳阵输出电压几乎不变，输出电流减小，对应的输出功率减小，符合太阳阵的输出特性曲线。并且在光照强度变化时，MPPT控制电路的动态性能良好。

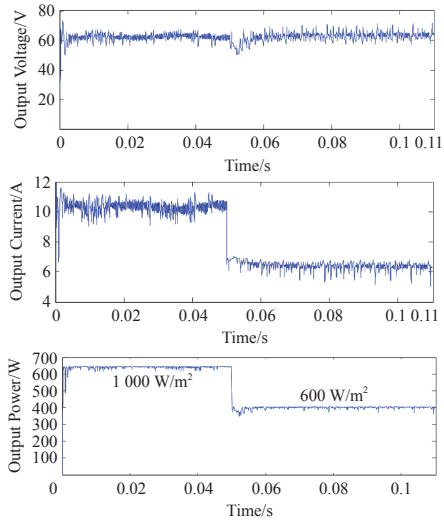

图6　太阳阵输出电压、电流和功率曲线一

4.2　光照强度不变，温度变化

当光照强度为1 000 W/m^2，太阳阵温度从20 ℃变化到30 ℃时，算法追踪到的太阳阵输出电压、电流和输出功率如图7所示。从图7中可以看出，随着温度的升高，MPPT算法追踪到的太阳阵输出电压减小，输出电流几乎不变，对应的输出功率减小，符合太阳阵的输出特性曲线。所设计的MPPT算法在光照强度不变、温度变化时能准确追踪到太阳阵的最大功率点。

在上述仿真分析的基础上，根据高效升降压电路的原理和电压电流扰动算法，本文设计并搭建了500 W硬件试验电路，如图8所示。其中包括太阳阵、MPPT硬件控制电路、稳压源及电子负载等电路和设备，太阳阵先后设置为50 V/2 A和54 V/3 A，负载参数可调。MPPT电路正确连线并通电后，通过改变太阳阵的输出电压和电流，观察MPPT控制电路的追踪效果。

下表为所设计硬件电路在不同太阳阵曲线

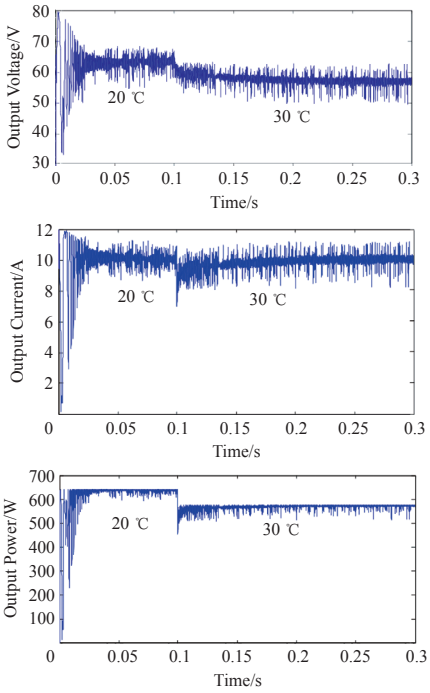

图7　太阳阵输出电压、电流和功率曲线二

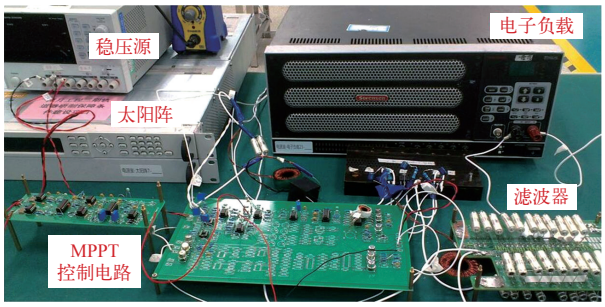

图8　硬件试验电路接线图

下，经过MPPT控制电路追踪到的太阳阵输出电压、电流以及动态相应时间。五组数据T_1～T_5分别是在电路运行时从万用表上测得的输出电压和电流，响应时间则是在示波器上读取到的太阳阵输出电压变化时，输出端的电压信号过渡到稳态时的时间。由试验数据可知，新型高效升降压MPPT控制电路追踪到的最大功率点准确度可达98%，高于传统MPPT控制电路的太阳阵转换效率（90%左右），动态响应时间为80 ms，具有准确度高、响应时间快等优点。

表　最大功率追踪试验数据

Data	V_{mppt}：50 V　I_{mppt}：2 A	V_{mppt}：54 V　I_{mppt}：3 A
T_1	49.021 6 V　2.025 A	53.540 1 V　3.019 6 A
T_2	49.394 7 V　2.003 5 A	53.348 7 V　3.031 A
T_3	49.236 0 V　2.007 A	53.621 5 V　3.013 4 A
T_4	48.929 0 V　2.026 5 A	53.781 8 V　3.007 8 A
T_5	48.177 0 V　2.028 0 A	54.013 9 V　3.025 6 A
准确度(%)	98	98
响应时间/ms	60	80

5　结束语

基于对空间环境中太阳阵输出$I-V$曲线的研究及空间飞行器电源系统的最大功率跟踪技术和相关算法的阐述和分析，设计并实现了一种采用硬件电路、基于高效升降压拓扑和电压电流扰动算法的MPPT控制电路。仿真结果和硬件电路的试验表明，新型高效升降压MPPT控制电路能够快速地追踪到太阳阵的最大功率点，具有良好的动态响应特性且跟踪准确度可达到98%。

参考文献

[1] 赵敏，王骞，李铁才，等．空间电源最大功率跟踪控制仿真分析 [J]．计算机仿真，2016，33 (2)：99-102．

[2] 孙瑞梅．基于FPGA的微小卫星电源系统MPPT控制方法研究 [D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015．

[3] 赵国伟，韩献堂．高轨大功率卫星电源系统的MPPT技术 [J]．电源技术，2016，40 (8)：1675-1678．

[4] 刘军，王得发，薛蓉．光伏发电系统MPPT控制方法的研究及改进 [J]．电子测量技术，2016，39 (5)：10-13．

[5] 潘洪亮，郭海元，岳继光，等．小信号模型Superbuck变换器控制系统设计 [J]．科学技术与工程，2015，15 (31)：61-66．

[6] 林文立，张晓峰，杜青，等．串联型MPPT空间电源系统稳定性技术 [J]．中国空间科学技术，2014，34 (4)：53-58．

[7] 苗狄．空间MPPT仿真验证平台及环路参数设计 [J]．电子技术与软件工程，2015，32 (15)：61-62．

[8] 史更新，王晔，刘体钊，等．基于MPPT技术的电源控制器工程化研究 [J]．电源技术，2017，44 (2)：282-285．

（收稿日期：2018－02－02）EA