

# 一种低输入电压的微型太阳能充电器

杨 炆<sup>1,2</sup>, 刘 青<sup>2</sup>, 王子才<sup>1</sup>, 张 华<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 深圳航天科技创新研究院, 广东 深圳 518057)

**摘 要:** 分析了移动便携式太阳能发电应用中太阳能电池阵列受照情况的特点及其对有效输出功率的影响, 指出该类应用中应尽可能减少阵列的串联数, 增加并联数以减少部分遮挡或受照不均匀造成的功率损失。针对这一需求, 采用 LT8490 控制器, 设计了一款具有最大功率点跟踪功能的升降压太阳能充电模块, 通过分析控制器的工作原理, 提出了一种拓展输入电压下限的方法, 使其能更好地解决移动便携式应用中减少串联数导致阵列输出电压较低的问题。实验测试表明, 该方法可行有效, 设计的微型太阳能充电模块能满足移动便携式应用中太阳能电池阵列串联数较少、输出电压较低的要求。

**关键词:** 便携式太阳能充电; 最大功率点跟踪; Buck-Boost 拓扑

中图分类号: TM921.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200898

中文引用格式: 杨炆, 刘青, 王子才, 等. 一种低输入电压的微型太阳能充电器[J]. 电子技术应用, 2021, 47(4): 121-125.

英文引用格式: Yang Yang, Liu Qing, Wang Zicai, et al. Low input voltage small form factor solar power charging module[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(4): 121-125.

## Low input voltage small form factor solar power charging module

Yang Yang<sup>1,2</sup>, Liu Qing<sup>2</sup>, Wang Zicai<sup>1</sup>, Zhang Hua<sup>2</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shenzhen Academy of Aerospace Technology, Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** This paper analyzes the characteristics of solar array illumination in mobile and portable solar power generation applications and its impact on output power. It is pointed out that in such applications, the number of solar cells in series should be reduced as much as possible, and the number of parallel connections should be increased to reduce partial shading or non-unified illumination. In response to this demand, the LT8490 controller is used to design a Buck-Boost solar charging module with Maximum Power Point Tracking (MPPT) function. A method to extend the lower limit of the input voltage is proposed to make it better to solve the problem of lower array output voltage caused by reducing the number of solar cells in series. Experimental tests show that the method is feasible and effective. The proposed solar power charging module can meet the requirements of fewer solar cells in series and lower output voltage in mobile and portable applications.

**Key words:** portable solar power charging; maximum power point tracking; Buck-Boost topology

### 0 引言

太阳能发电, 也称光伏发电, 是利用半导体材料的光伏效应, 吸收太阳光中光子的能量并转换为电能, 是一种易于获取、清洁环保的可再生能源。近年来, 随着新型太阳能电池的出现以及传统太阳能电池生产工艺的改进, 太阳能电池的转换效率在不断提高<sup>[1]</sup>, 且生产成本也在逐步降低, 与之配套的电力电子设备方案日趋成熟可靠。在光伏发电补贴政策力度逐渐减弱的大环境下, 光伏装机容量仍在快速增加, 也从侧面说明光伏发电经济性能已趋近于传统发电方式<sup>[2-3]</sup>。

除了用于并网发电, 太阳能发电由于其使用限制较少且随处可见, 在个人消费电子、户外探险、单兵装备场合作为户外能源补充具有显著优势。目前光伏发电的电

源变换器研究主要集中在单台几千瓦到百千瓦量级, 对于移动便携式应用中需要的几十瓦到百瓦级的电源变换器研究较少。并网光伏发电中, 太阳能电池安装在固定的地点, 其受照情况稳定, 即使附近有遮挡物, 其遮挡阴影也是规律性缓慢变化的, 可通过太阳能电池阵列的合理配置降低遮挡影响<sup>[4-5]</sup>, 并采用最大功率点跟踪方法使太阳能电池阵列持续以最大功率输出<sup>[6-7]</sup>。在移动便携式应用中, 存在光照情况变化频繁、太阳能电池阵列易受随机遮挡等特点。对此, 已有研究团队研发了一些针对性的产品<sup>[8-9]</sup>。

本文首先分析移动便携式光伏发电中阴影遮挡造成的影响以及减少该影响所应采用的太阳能电池阵列配置方式, 并据此设计适用的电源变换器总体方案。采

用 LT8490 作为控制器,设计了一款具有最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 功能的微型太阳能充电模块,提出了一种拓展 LT8490 输入电压下限的方法,最终通过实验测试,验证了该方法的可行性。

## 1 太阳能电池阵列配置和电源变换器方案

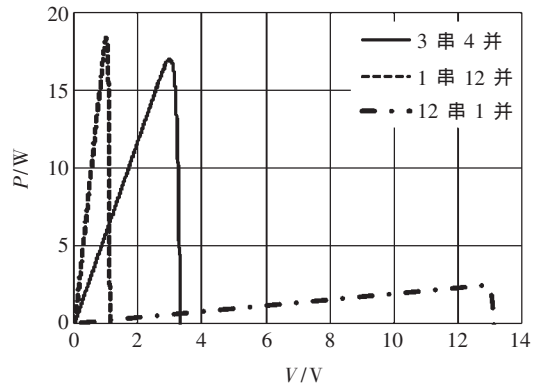
### 1.1 太阳能电池配置方案

在典型的光伏并网发电应用中,会将上百片太阳能电池片串联起来组成模组,再将数个模组串联起来向电源变换器提供数百伏的输入电压——较高的输入电压意味着同等功率下更低的电流和损耗。当太阳能电池阵列中个别电池片受到遮挡时,输出功率的损失比例并不直接等于遮挡面积的比例<sup>[10-13]</sup>。为了避免串联电路中个别电池片受遮挡时,由于其电流下降而导致整个串联电路输出电流受到钳制,影响输出功率,通常会在电池片正负极反向并联二极管,使得未受遮挡的电池片产生的电流可以通过该旁路二极管流过。每一片太阳能电池均配置旁路二极管会大幅增加模组生产的复杂度和成本,实际工程中,考虑硅电池片的反向击穿电压,通常每 20 至 30 片电池片跨接一个旁路二极管<sup>[14-15]</sup>。

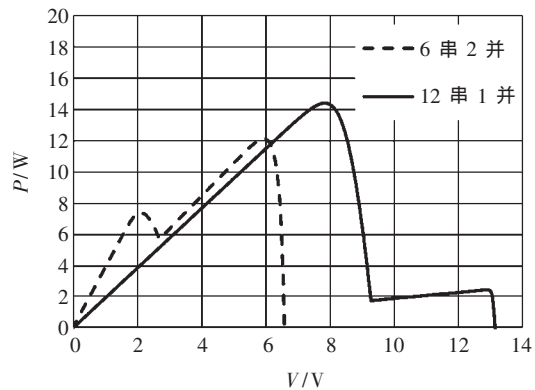
在移动便携式太阳能发电应用中,由于太阳能电池的位置、朝向、受部分遮挡情况都可能快速变化,而且这类应用中太阳能电池串联数并不会太多,因此,为避免受照较弱或被遮挡的太阳能电池片抑制整个串联的电池串发电,需要使用旁路二极管,且每个旁路二极管跨接的电池片数量不能太多。图 1 给出了 12 片太阳能电池片组成的阵列,按照不同的串并联以及旁路二极管配置方式互连,当一片电池片受到遮挡时,整个阵列的 P-V 特性曲线。从曲线对比中可以看出,当串联数较高时,单片遮挡即会导致输出功率的大幅度下降,图 1(a)中,12 串 1 并的配置方案功率损失约为 89%;旁路二极管的引入可以大幅减少部分遮挡对太阳能电池阵列总输出功率的影响,图 1(b)采用每 3 片电池片跨接 1 个旁路二极管的方案,在 12 串 1 并的情况下,功率损失为 34%。但是,在串联数较低,即将更多的电池片并联一起的情况下,即使不使用旁路二极管,由于受遮挡电池片只影响其所在串联回路,不对其他回路造成影响,因此阵列总功率损失甚至比配置了旁路二极管的方案还要低。因此,在移动便携式太阳能发电应用中,采用低串联数、高并联数、无旁路二极管的配置方案,尽管电流增大导致后级功率变换器的转换效率会有所降低,但仍可在复杂多变的光照条件下输出更多的功率,同时不配置旁路二极管也降低了生产制造复杂度。

### 1.2 拓扑选择与电源变换器方案

多结太阳能电池的单片开路电压虽然较高,但由于成本原因,多用于航天或聚光式光伏发电<sup>[16]</sup>。单结太阳能电池的开路电压通常为 0.5~1.1 V,在串联数较少的情况下,电源变换器的输入电压也会很低,需采用具有



(a) 无旁路二极管



(b) 每 3 片太阳能电池跨接 1 个旁路二极管

图 1 不同配置方式下的太阳能电池阵列 P-V 曲线

升压能力的功率拓扑。同时,考虑到实际使用中对多种太阳能电池模组的适配性,以及单节锂电池系统中的电池电压可能低于输入电压,所以选择四开关 Buck-Boost (Four Switches Buck-Boost, FSBB) 升降压拓扑, Buck 与 Boost 级联后共用电感,具有升降压功能。其拓扑如图 2 所示。

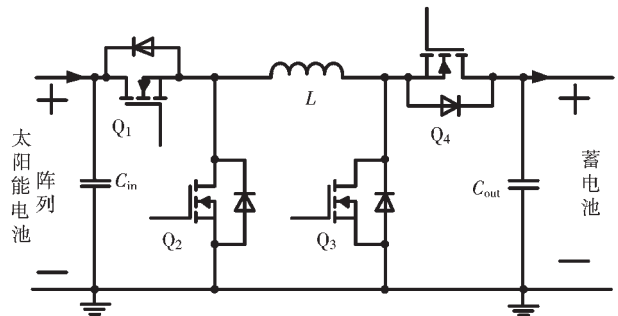


图 2 升降压串联调节式同步 Buck-Boost 拓扑

根据变换器四个开关管的开关状态不同,变换器有三种工作模式:降压模式、升压模式、升降压模式。当输入电压显著高于输出电压时,变换器运行于降压模式。开关管  $Q_4$  一直工作在导通状态,  $Q_3$  管一直工作在断开状态,仅通过  $Q_1$ 、 $Q_2$  的开关动作实现端口电压的调节。  $Q_1$ 、 $Q_2$  驱动信号互补,该模式下电路完全等效于同步 Buck

电路,电感电流连续,轻载时电路处于强制连续模式。变换器输出电压和输入电压关系满足:

$$V_{out} = D_1 \cdot V_{in} \quad (1)$$

式中,  $V_{out}$  为输出电压;  $D_1$  为开关管  $Q_1$  驱动信号占空比;  $V_{in}$  为输入电压。

当输出电压显著高于输入电压时,变换器运行于升压模式。开关管  $Q_1$  一直工作在导通状态,  $Q_2$  管一直处于断开状态,仅通过  $Q_3$ 、 $Q_4$  的开关动作实现端口电压的调节。  $Q_3$ 、 $Q_4$  驱动信号互补,该模式下电路完全等效于同步 Boost 电路,电感电流连续。变换器输出电压和输入电压关系满足:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D_3} \quad (2)$$

式中,  $D_3$  为开关管  $Q_3$  驱动信号占空比。

当输入电压接近输出电压时,变换器进入降压-升压模式。四个开关管均处于开关状态,  $Q_1$ 、 $Q_2$  驱动信号互补和  $Q_3$ 、 $Q_4$  驱动信号互补的前提下,分析电感的伏秒平衡关系,变换器输出电压和输入电压关系满足:

$$V_{out} = \frac{D_1}{1-D_3} V_{in} \quad (3)$$

该拓扑结合了同步 Buck 电路和同步 Boost 电路,可实现升降压;仅有一个磁性器件,电路结构简单,功率变换效率高,且将二极管替换为 MOS 管,降低了导通损耗;电路结构完全对称,可实现能量的双向流动。

在搜索和跟踪太阳能电池阵列最大功率点的过程中,太阳能输出功率会存在波动,需要在电源变换器输出级配置能量缓冲池,以保证负载能获得一个较为稳定的电压。一般可将充电电池连接到变换器输出端实现能量缓冲的功能。系统总体方案如图 3 所示。

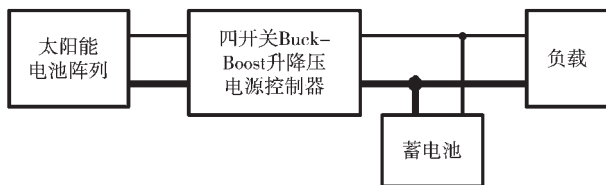


图 3 移动便携是太阳能充电系统总体方案

## 2 电源变换器电路设计

### 2.1 支持 MPPT 的升降压控制器原理与设计

LT8490 是 Analog Devices 公司在其 LT8705 同步四开关 Buck-Boost 控制器的基础上,加入适用于光伏面板的 MPPT 算法逻辑,利用多路 ADC 转换器对输入输出端口的电压和电流进行采样,通过一路 PWM 对输入工作点电压进行控制的高集成小型化光伏充电控制器。

LT8490 采用扰动观察法持续进行 MPPT,为了解决光伏面板受部分遮挡时 P-V 曲线存在多个峰值的问题,控制逻辑每隔 180 s 进行一遍全输入范围扫描,寻找最大功率点,一次扫描耗时约 2 s,弥补了扰动观察法在多个高功率点时可能陷入局部极大功率点的弊端。

其内部采用四个误差放大器按“或”的关系对输入输出的电压、电流进行控制,输出端口可以方便地实现恒流恒压控制,这种方式使其适用于大部分种类电池的充电。尤其是对目前最为常用的锂电池,可以做到电量低时恒流快速充电,电量升高后转恒压充电防止造成电池容量的不可逆损失。同时,LT8490 内部 ADC 可通过电芯上的 NTC 电阻感知电芯温度,对充电终压进行补偿。

由于没有内置功率 MOSFET 管,LT8490 在极小的 QFN 封装(7 mm×11 mm×0.75 mm)里实现了上述功能,为成品功率变换器的微型化以及散热设计带来了便利,同时也能方便地针对具体应用对功率管进行选型。

LT8490 的输入电压反馈网络及片内处理电路如图 4 所示。  $R_{FB1}$  与  $R_{FB2}$  组成的电阻分压网络,分压后通过 FBIN 管脚送入 LT8490 与内部 1.205 V 参考电压作比较,形成输入电压闭环控制回路。进行 MPPT 的时候,片内控制逻辑通过 FBIW 管脚输出幅值为 3.3 V 的 PWM 波,经过  $R_{DAC1}$  和  $R_{DAC2}$  注入到电阻分压网络,从而改变输入电压(即太阳能电池阵列电压)稳态工作点。当输入电压闭环控制达到稳态后,FBIN 管脚电压约为 1.205 V,忽略 FBIN 和 FBIR 管脚上的漏电流,根据基尔霍夫电流定律,流过  $R_{FB1}$ 、 $R_{FB2}$  和  $R_{DAC2}$  的电流之和为零,即:

$$\frac{V_{in}-1.205}{R_{FB1}} + \frac{3.3D_{IW}-1.205}{R_{DAC1}+R_{DAC2}} - \frac{1.205}{R_{FB2}} = 0 \quad (4)$$

式中,  $D_{IW}$  为 FBIW 管脚上的 PWM 波占空比。

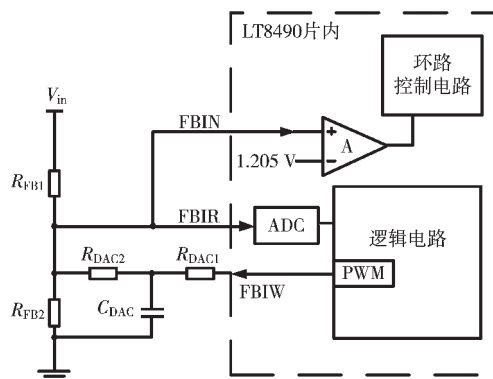


图 4 LT8490 输入电压反馈网络及片内处理电路

由此可得,输入电压  $V_{in}$  与占空比  $D_{IW}$  的关系为:

$$V_{in} = (1.205 - 3.3D_{IW}) \frac{R_{FB1}}{R_{DAC1} + R_{DAC2}} + 1.205 \left( \frac{R_{FB1}}{R_{FB2}} + 1 \right) \quad (5)$$

LT8490 进行最大功率点扫描和跟踪时,  $D_{IW}$  在 0% 至 100% 之间变化,根据电阻网络的阻值配置,输入电压也将在设定的范围内随动,同时,片上逻辑通过 VINR 和 IIR 管脚监视拓扑输入电压和电流,从而确定最大功率点。

LT8490 的输出电压反馈网络及片内处理电路与输入电压类似,片上逻辑通过 FBOW 管脚输出 PWM 波控制输出电压,实现蓄电池预充电、恒压充电、浮充以及充

电电压温度补偿功能。

## 2.2 拓展 LT8490 输入电压下限

LT8490 数据手册中给出的工作时输入电压范围是 6~80 V, 输出电压范围是 1.3~80 V。为适应移动便携式太阳能发电应用中太阳能电池阵串联数较少、输入电压低的需求, 本文提出一种旁路供电的方法拓展 LT8490 输入电压下限。其原理框图如图 5 所示。

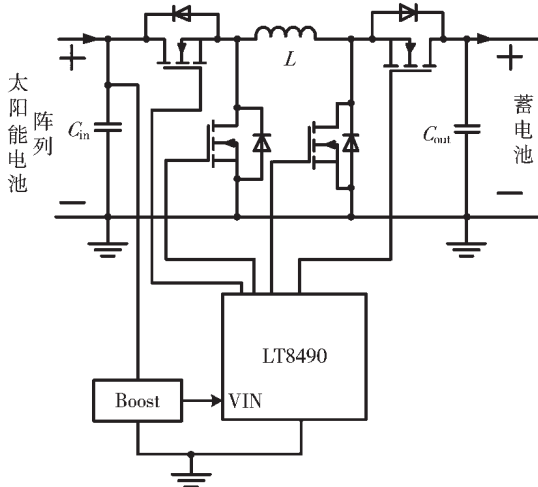


图 5 输入电压下限拓展原理框图

根据 LT8490 内部框图, 其供电管脚  $V_{IN}$  将连接到片内 6.35 V 的线性稳压器, 产生 INTV<sub>CC</sub> 电压供片内使用, 并进一步通过两个片内稳压器产生更低的电压供片内控制逻辑电路使用。改变原来把太阳能电池阵列输出电压连接到  $V_{IN}$  管脚的方案, 将太阳能电池阵列输出电压通过一个小功率高效升压电路, 升至 10 V 后连接到  $V_{IN}$  为片内的控制电路、逻辑电路等提供工作电压, 从而使得 LT8490 在输入电压低于 6 V 时仍可正常工作。根据前面分析的 LT8490 工作原理, 拓展输入电压下限后, 根据以下两式配置输入电压反馈控制网络:

$$V_{inMAX} = 1.205 \left( \frac{R_{FB1}}{R_{DAC1} + R_{DAC2}} + \frac{R_{FB1}}{R_{FB2}} + 1 \right) \quad (6)$$

$$V_{inMIN} = 1.205 \left( \frac{R_{FB1}}{R_{FB2}} + 1 \right) - 2.095 \frac{R_{FB1}}{R_{DAC1} + R_{DAC2}} \quad (7)$$

式中,  $V_{inMAX}$ 、 $V_{inMIN}$  分别为 MPPT 扫描时太阳能电池阵列电压的最大值、最小值。

芯片的 VIR 管脚用于测量输入电压绝对值, 从而实现 MPPT、低功率发电模式等功能。拓展输入电压下限后, 需按比例修改 VIR 管脚连接的分压电阻网络比例, 令芯片认为输入电压大于 10 V, 以绕开片内低压保护、低功率发电模式等功能, 使得 LT8490 保持在正常工作状态。

## 3 测试结果与分析

按照本文设计制作的移动便携式低输入电压的微型太阳能充电模块外包络尺寸为 40 mm×40 mm×13 mm, 实物如图 6 所示。

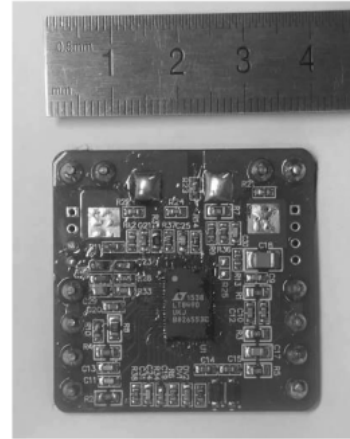


图 6 移动便携式低输入电压微型太阳能充电模块实物图

采用 Agilent E4360A 太阳能电池阵列模拟器、锂电池搭建测试平台对该充电模块进行测试, 其输入端 (即太阳能电池阵列输出端) 波形如图 7 所示。图中记录的是一次全输入范围最大功率点扫描的过程。从波形可见, 经过输入电压拓展后的 LT8490 充电模块, 输入端电压从设定的开路电压 5.5 V 逐渐变化到 2.8 V, 并最终稳定在最大功率点电压处, 在实际使用中可以减少太阳能电池阵列的串联数, 降低移动中阴影遮挡、受照不均匀造成的功率损失。

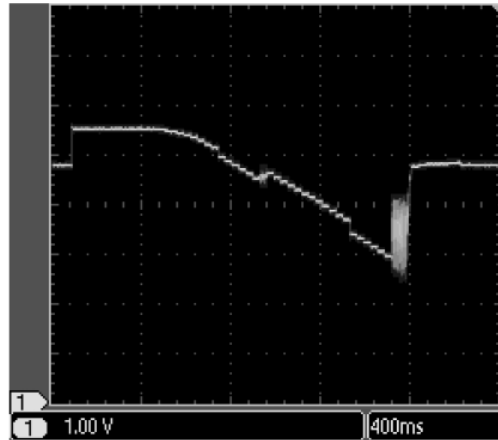


图 7 输入电压拓展的充电模块输入端电压波形 (全局扫描时)

## 4 结论

本文设计了一款采用 LT8490 控制器的太阳能充电模块, 功率部分为四开关 Buck-Boost 升降压拓扑, 可方便应用于含有电池的便携式光伏发电场合。通过分析内部工作原理, 提出了一种采用外部 Boost 电路向片内控制、逻辑电路供电并修改采样电路, 以拓展模块最低输入电压能力的方法。实测结果表明, 该方法可行有效, 可满足移动便携应用中对微型太阳能充电模块的需求。

## 参考文献

- [1] GREEN M A, DUNLOP E D, HOHL E J, et al. Solar cell efficiency tables (version 56)[J]. Progress in Photo-voltaics:



- Research and Applications, 2020, 28(7): 629–638.
- [2] 陈敏曦. 激活光伏“平价时代”[J]. 中国电力企业管理, 2018(16): 26–29.
- [3] 江华, 金艳梅, 叶幸, 等. 中国光伏产业 2019 年回顾与 2020 年展望[J]. 太阳能, 2020(3): 14–23.
- [4] RAKESH N, MALAVYA U. Maximizing the power output of partially shaded solar PV array using novel interconnection method[C]. International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications. IEEE, 2017.
- [5] SAGAR G, PATHAK D, GAUR P, et al. A Su Do Ku puzzle based shade dispersion for maximum power enhancement of partially shaded hybrid bridge-link total-cross-tied PV array[J]. Solar Energy, 2020, 204: 161–180.
- [6] FEMIA N, GRANOZIO D, PETRONE G, et al. Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 934–950.
- [7] 张永革, 石季英, 张文, 等. 复杂遮阴条件下光伏系统 MPPT 控制改进 PSO 算法仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 39–46.
- [8] 刘幸幸, 王鼎. 自动追光型便携式太阳能供电[J]. 黑龙江科技信息, 2015, 19(10): 51–52.
- [9] 范英, 华权冰, 冯德思, 等. 太阳能便携式野外供电器的设计[J]. 无锡职业技术学院学报, 2016, 15(1): 46–48.
- [10] 张臻, 沈辉, 李达. 局部阴影遮挡的太阳电池组件输出特性实验研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1): 5–12.
- [11] 戚军, 张晓峰, 张有兵, 等. 考虑阴影影响的光伏阵列仿真算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(32): 131–138.
- [12] 孟安波, 袁志坚, 徐海波, 等. 复杂阴影条件下光伏阵列的建模与仿真分析[J]. 电气应用, 2014, 33(13): 28–32.
- [13] DÍAZ-DORADO E, CIDRÁS J, CARRILLO C. Discretized model for partially shaded PV arrays composed of PV panels with overlapping bypass diodes[J]. Solar Energy, 2017, 157: 103–115.
- [14] 张明锐, 蒋利明, 欧阳丽. 局部阴影条件下光伏阵列旁路二极管和阻塞二极管的影响和作用[J]. 电气技术, 2017(8): 1–5.
- [15] 吴亚盼, 刘丁璞, 李沛泽, 等. 新型光伏组件旁路二极管功能实验方法分析[J]. 电源技术, 2020, 44(5): 714–717.
- [16] MICHA, DANIEL N, RICARDO T, et al. The influence of solar spectrum and concentration factor on the material choice and the efficiency of multijunction solar cells[J]. Scientific Reports, 2019(9): 1–13.

(收稿日期: 2020-09-11)

## 作者简介:

杨炆(1985–), 男, 博士, 主要研究方向: 电力电子技术、航天器电源系统仿真。

刘青(1985–), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 航天器电源、特种电源。

王子才(1932–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 伺服系统、复合驱动控制系统及变阻尼大摩擦系统的控制技术。

(上接第 115 页)

- [6] 吴纪芸, 陈时钦. 一种改进的 MTCNN 人脸检测算法[J]. 软件导刊, 2019, 18(12): 78–81.
- [7] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2016.
- [8] ZHANG Z, SONG Y, QI H. Age progression/regression by conditional adversarial autoencoder[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2017.
- [9] 谢娟英, 刘然. 基于深度学习的目标检测算法研究进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 1–9.
- [10] 徐培超, 陈雯柏, 陈祥凤. 多任务及 Resnet 网络在人脸多属性识别中的应用[J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39(12): 162–166.
- [11] 庄妮. 基于深度神经网络的人脸属性识别方法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [12] 肖冰, 王映辉. 人脸识别研究综述[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(8): 1–5.
- [13] 杜波. 人脸识别中光照预处理方法研究[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2005.
- [14] 刘新业. 基于人脸识别的人脸图像预处理研究[J]. 电子测试, 2008(2): 83–85.
- [15] CHAUDHARY B. Tkinter GUI application development blueprints(Second Edition)[M]. Packt, 2018.
- [16] 任进军, 王宁. 人工神经网络中损失函数的研究[J]. 甘肃高师学报, 2018, 23(2): 65–67.
- [17] 杨俊钦, 张雨楠, 林实锋, 等. 基于深度学习的人脸多属性识别系统[J]. 现代计算机(专业版), 2019(5): 54–57, 61.

(收稿日期: 2020-05-04)

## 作者简介:

王高升(1994–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机视觉、软件工程。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所