

激光供能无人机光伏接收器效率优化方法

刘晓光, 华文深, 刘 恂, 郭 彤

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 激光供能无人机(LPUAV)通过激光无线能量传输进行实时能量补给,大幅提升无人机续航时间。但激光束能量分布不均匀,导致光伏接收器效率低下。通过推导串并联光伏组件在不均匀光照条件下的输出方程,针对 $I-V$ 、 $P-V$ 曲线、光伏电池效率及组件整体效率进行对比研究,着重分析了串并联组件效率与光照不均匀度的关系及内在机理。研究表明,并联旁路二极管的串联组件在不均匀光照下存在多峰现象,且光伏电池易受影响而偏离最大功率点,导致组件整体效率降低,而并联组件受不均匀光照影响较小,但组件电压较低。其次搭建激光无线能量传输的实验装置,进行了不均匀激光辐照下激光无线能量传输的初步研究,并对比了串并联组件的输出特性。研究结果验证了通过优化电路连接方式以提高光伏接收器效率的可行性。

关键词: 效率优化; 光伏接收器; 不均匀光照; 电路连接

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0306002

Methods to improve efficiency of photovoltaic receiver for laser powered unmanned aerial vehicle

Liu Xiaoguang, Hua Wenshen, Liu Xun, Guo Tong

(Electronic & Optical Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Endurance time of laser powered unmanned aerial vehicle (LPUAV) is prolonged significantly for energy supply. But non-uniform laser spot leads to serious power loss of photovoltaic receiver. Output characteristic models of series and parallel photovoltaic module were derived firstly. Based on the models, output characteristics of photovoltaic module, e.g. $I-V$ and $P-V$ curves, efficiency of photovoltaic cells and module, were analyzed. The relationship between efficiency and non-uniformity of illumination was also studied. The result indicates photovoltaic cell diverges from its maximum power point which leads to efficiency drop of series photovoltaic module. On the contrary, parallel connection with low voltage is less influenced by non-uniform illumination. An experiment was also conducted to study laser wireless power transmission. Output characteristics of series and parallel photovoltaic module were measured and analyzed correspondingly. The feasibility of improving efficiency of photovoltaic receiver by designing a suitable circuitry connection is proved.

Key words: efficiency improvement; photovoltaic receiver; non-uniform illumination; circuitry connection

收稿日期: 2015-07-09; 修订日期: 2015-08-08

作者简介: 刘晓光(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光无线能量传输方面的研究。Email: graduatelxg@163.com

导师简介: 华文深(1967-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电技术和光学信息处理方面的研究。Email: huawensh@126.com

0 引言

电动无人机以其体积小、质量轻、便于操作、隐蔽性强等优点,在情报获取、战场监视等方面发挥重大作用,得到广泛应用。但电动无人机往往面临机载蓄电池容量有限、续航时间短的问题,极大地限制其效能的发挥。同时由于无法进行“空中加油”,如何延长电动无人机续航时间的问题变得突出。

为提升电动无人机续航能力,激光无线能量传输技术得到重视,但是由于激光光斑能量的不均匀分布而引起的光伏接收器的能量损失严重,实验测得能量损失可高达 78%^[1],极大地限制了激光无线能量传输技术的实际应用。通过对光伏接收器的电路连接进行改进可提高其效率^[2]。

2013 年激光动力公司采用激光无线能量传输技术在室内将无人机的续航时间提高 24 倍,并进行了 500 m 距离的外场实验,验证了激光供能无人机的可行性^[3],但是相应技术细节并未得以公布。目前,国内针对激光无线能量传输技术的研究相对较少,研究内容多是针对激光辐照单体光伏电池^[4-6],光伏接收器的设计研究更为罕见。因此,有必要开展相关的技术研究。

目前,在激光无线能量传输系统中,常见的光伏接收器主要有三种,分别为:平板型、会聚型和光伏眼^[7-8]。由于电动无人机通常体积小、载荷有限,而会聚型光伏接收器和光伏眼结构复杂、体积和质量大、对跟踪设备的要求高,因此,文中将针对平板型光伏接收器进行研究。

1 理论推导

平板型光伏接收器的基本组成单元是以串并联结构为基础的光伏组件,因此,对光伏组件输出特性的研究是研究光伏接收器输出特性的基础。

1.1 光伏电池的等效电路模型

光伏电池的输出特性可由式(1)所示的方程表示:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right] - 1 \right\} - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I_{ph} 为光生电流; I_0 为反向饱和电流; R_s 、 R_{sh} 分别为寄生串联电阻和并联电阻; T 为温度; q 为电子电量; n 为理想因子; k 为玻尔兹曼常数。通常,光伏电池的并联电阻很大,因此,忽略式(1)第三项,式(1)可

简化为:

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right] - 1 \right\} \quad (2)$$

1.2 不均匀光照下串并联组件的输出特性方程

串联组件的光伏电池在受到不均匀光照时,各个光伏电池接收的光强不同,光生电流大小不同。串联组件的电流受限于光生电流最小的光伏电池,导致能量的损失和“热斑”现象,甚至造成光伏电池的损坏。因此,需要在光伏电池两端连接旁路二极管,提高效率并防止“热斑”现象的发生。而在并联光伏组件中,在每个支路分别串联阻塞二极管以防止支路间光强差异可能造成的电流倒流。如图 1 所示。

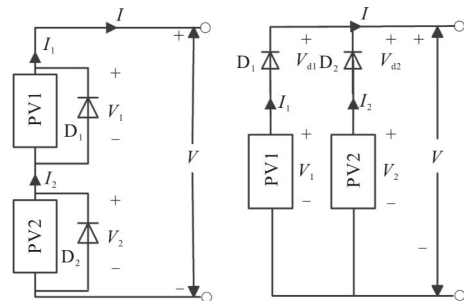


图 1 光伏电池的串联组件和并联组件

Fig.1 Series PV module and parallel PV module

假设通过二极管的电流为 I_d , 有:

$$I_d = I_{0d} \left\{ \exp\left(\frac{-qV_d}{n_d kT}\right) - 1 \right\} \quad (3)$$

式中: V_d 为二极管两端的电压; I_{0d} 为二极管的反向饱和电流; n_d 为二极管理想因子。当 PV1 接收的光强 E_1 大于 PV2 接收的光强 E_2 时,PV1 的光生电流 I_{ph1} 大于 PV2 的光生电流 I_{ph2} 。由于串联组件电流与通过各个光伏电池的电流相等,因此,当外接电阻较小,组件电流 $I > I_{ph2}$ 时,旁路二极管 D_2 被导通,只有 PV1 向外输出功率。此时,组件电流满足:

$$I = I_{ph1} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V + V_d + IR_s)}{nkT}\right] - 1 \right\} \quad (4)$$

变换后可得:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph1} - I}{I_0} + 1\right) - IR_s - V_d \quad (5)$$

当组件电流减小,满足 $I < I_{ph2}$ 时,旁路二极管 D_2 承受反向电压,处于截止状态。此时,PV1 和 PV2 同时向外输出功率。组件的电压 V 由 V_1 和 V_2 同时构成,满足:

$$V = V_1 + V_2 = \frac{nkT}{q} \left[\ln\left(\frac{I_{ph1} - I}{I_0} + 1\right) + \ln\left(\frac{I_{ph2} - I}{I_0} + 1\right) \right] - 2IR_s \quad (6)$$

对于并联组件而言, 假设 PV1 接收的光强大于 PV2 接收的光强, 即 $E_1 > E_2$, 则 PV1 的开路电压 V_{oc1} 大于 PV2 的开路电压 V_{oc2} 。当组件两端的电压 $V > V_{oc2}$ 时, 阻塞二极管 D_2 反向截止, 仅 PV1 向外输出功率, 组件电流满足:

$$I = I_1 = I_{ph1} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_1 + I_1 R_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (7)$$

由基尔霍夫电压定律可知, 组件电压满足:

$$V = V_1 + V_{d1} = V_2 + V_{d2} \quad (8)$$

式中: V_{d1} 、 V_{d2} 分别为二极管 D_1 、 D_2 两端的压降。当组件两端的电压满足 $V < V_{oc2}$ 时, 两个二极管均导通, PV1 和 PV2 同时向外输出功率, 组件的电流为两条支路的电流之和, 即:

$$I = I_1 + I_2 \quad (9)$$

其中,
$$I_2 = I_{ph2} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V_2 - I_2 R_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (10)$$

2 仿真分析

假设光伏电池 PV1 接收的光强为 1000 W/m^2 , PV2 接收的光强为 500 W/m^2 , 忽略二极管的功耗, 对不均匀光照下的光伏组件输出特性进行分析。

2.1 串联组件

图 2 给出串联光伏组件及组件中光伏电池的 $I-V$ 与 $P-V$ 曲线。

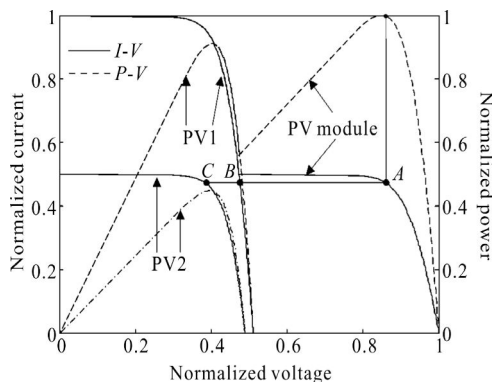


图 2 串联组件不均匀光照下输出特性曲线

Fig.2 Output characteristics of series PV module under non-uniformity illumination

从图中可以看出, 在不均匀光照条件下, 串联光伏组件的伏安特性曲线呈现多峰特性。当光伏组件在最大输出功率点 A 时, PV1 和 PV2 的输出功率点分别对应 B 和 C。此时, 二者均明显偏离了各自的最大功率输出点, 造成能量损失。为了能更好地描述光

伏组件在不均匀光照下, 由于组件中光伏电池偏离最大功率点造成的功率损失, 定义光伏组件的电路效率 η 为组件在不均匀光照条件下输出的最大电功率与光伏组件中所有光伏电池的最大可输出电功率之和的比, 如式(11)所示:

$$\eta = \frac{P_M}{\sum_{i=1}^N P_i} \times 100\% \quad (11)$$

式中: P_M 为光伏组件在不均匀光照条件下输出的最大电功率; P_i 为第 i 个光伏电池的最大可输出电功率; N 为光伏电池的个数。以 PV2 接收光强与 PV1 接收光强的比值衡量光强分布的均匀度 α , 图 3 给出串联组件的电路效率与光照均匀度的关系。

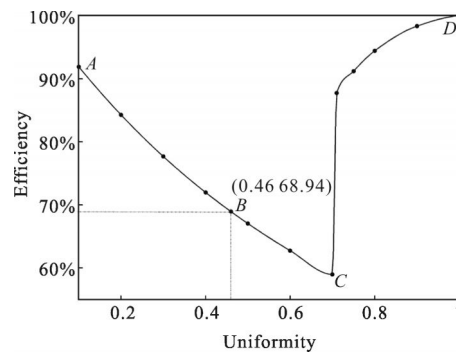


图 3 串联组件电路效率与均匀度的关系

Fig.3 Circuitry efficiency of series PV module verse uniformity

从图中可以看出, 当光照均匀度约为 0.7 时, 功率损失最大, 电路效率最低为 58.97%。在 AB 段, 光照均匀度较差, 仅 PV1 向外输出功率, PV2 消耗功率。PV2 接收的光强越大, 意味着其消耗的功率越大, 则组件的电路效率越低。BC 段, 光照均匀度提高, PV1 和 PV2 同时向外输出功率。但 PV1 偏离自身的最大功率点, 光照均匀度越大, PV1 偏离最大功率点越远, 损失的功率越大, 电路效率越低。CD 段, PV1 和 PV2 接收光强的均匀度较高, 随均匀度提高, 光伏电池逐渐趋近于自身的最大功率点, 电路效率上升。均匀辐照时, 不存在损失, 电路效率最大为 100%。在多峰存在的情况下, 为了保证光伏组件工作在最大功率点, 须采用最大功率点追踪算法对其进行追踪^[9]。

2.2 并联组件

图 4 给出在不均匀光照条件下并联组件的 $I-V$ 与 $P-V$ 曲线。

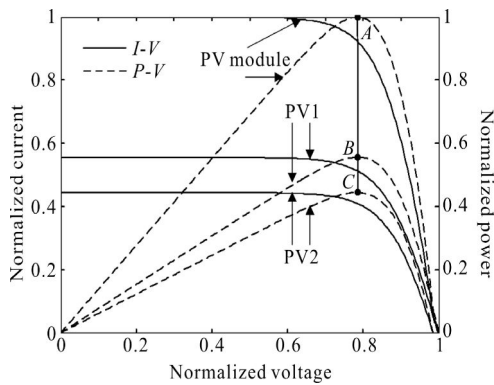


图 4 并联组件输出特性曲线

Fig.4 Output characteristics of parallel PV module

从图中可以看出,在不均匀光照下,并联组件的功率曲线没有多峰现象。原因在于光伏电池开路电压与光强呈对数关系,受光强影响小。当组件工作在最大功率点时,PV1 和 PV2 的输出功率点均接近各自的最大功率点,电路效率高。但是,并联组件输出电压较低,输出电流大,会加剧电阻损耗。图 5 给出并联组件电路效率与光照均匀度的关系。

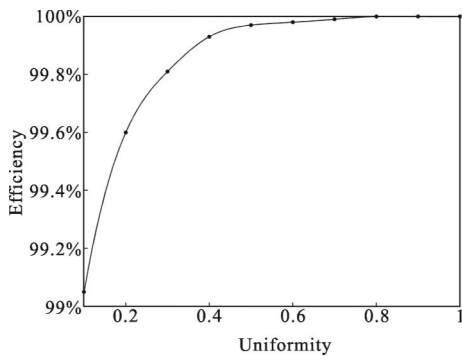


图 5 并联组件电路效率与均匀度的关系

Fig.5 Circuitry efficiency of parallel PV module versus uniformity

从图中可以看出,不均匀光照下并联光伏组件的电路效率始终保持在 99% 以上。随光照均匀度的提高,并联组件的电路效率单调上升。

3 实验

采用 4 片 52 mm×32.5 mm 多晶硅电池组成的光伏组件进行实验研究。实验采用光纤耦合半导体激光器作为光源,工作波长 940 nm,输出近高斯光束经准直扩束辐照光伏组件。数据采集卡采集电路信号,环境温度为 20 ℃,如图 6 所示。图中左下角所示为光伏组件的空间排布及激光光斑。硅光伏电池电压较低,基于其反向特性分析并联组件中接收光强较

弱的光伏电池承受反向电压很小,不会达到雪崩击穿的过程^[10],阻塞二极管表现为消耗功率,因此在并联组件中不串联阻塞二极管^[11]。在串联光伏组件中,每一个光伏电池两端均并联旁路二极管。

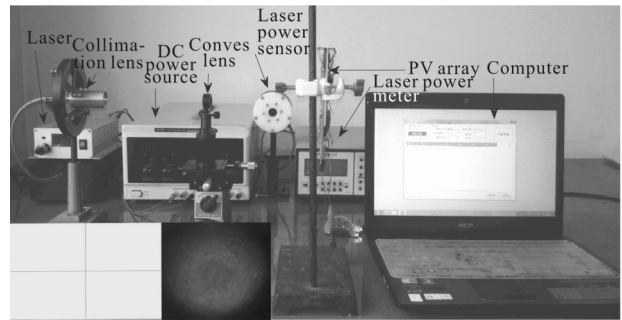


图 6 激光无线能量传输实验装置图

Fig.6 Experiment setup of laser wireless power transmission

实验中保持激光功率及光斑与光伏组件相对位置不变,测得光伏组件的输出特性曲线如图 7 所示。

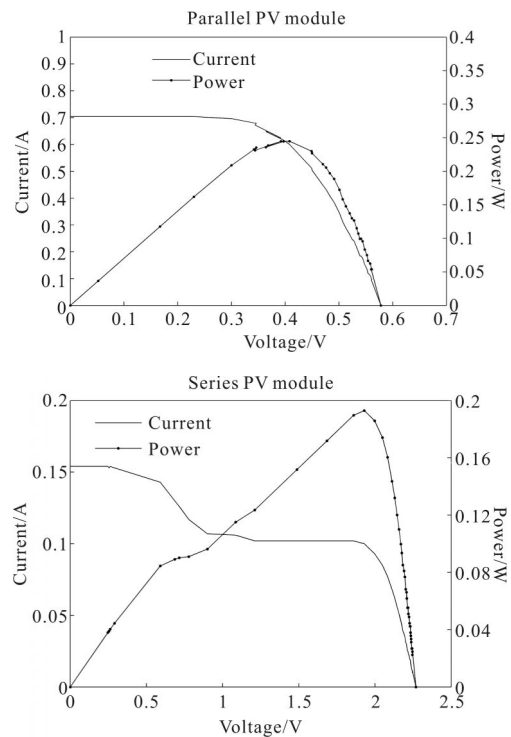


图 7 实验测量光伏组件输出特性曲线

Fig.7 Experimentally measured output characteristics of photovoltaic modules

从图 8 可以看出,由于激光光斑能量的不均匀分布,串联组件输出特性曲线出现波动,其功率也低于并联组件,并联组件的输出特性曲线则较为平滑。实验中辐照光伏组件的激光功率为 1.2 W,实验测得并

联组件和串联组件输出的最大功率分别为 0.245 W 和 0.193 W, 组件总效率分别为 20.42% 和 16.08%。测量 4 片光伏电池的最大可输出功率之和为 0.252 W, 因此并联组件与串联组件电路效率分别为 97.22% 和 76.59%。

4 结论

基于不均匀光照条件下串并联光伏组件输出方程和实验研究, 为了提高激光无线能量传输系统光伏接收器的效率, 在光照不均匀度较高的情况下, 利用并联组件受光强不均匀性影响小的特点, 保证组件效率。在光照不均匀度较低的情况下, 采用串联组件可以在较高效率的前提下, 提高输出电压。实验验证了激光无线能量传输技术及通过优化连接方式提高效率的可行性。

参考文献:

- [1] Marcus D Smith, Henry W Brandhorst. Support to a wireless power system design[R]. Air Force Research Laboratory, 2011.
- [2] Bogushevskaya V A, Zhalnin B V, Zayats O V, et al. An experimental investigation of the feasibility of using silicone and gallium arsenide solar batteries on space vehicles for receiving energy of laser infrared emission [J]. *Thermal Engineering*, 2012, 59(13): 975–980.
- [3] Shane McGlaun. Lockheed Martin Stalker UAV powered by laser light for 48 hours[EB/OL]. [2012-07-12]. <http://www.dailytech.com/article.aspx?newsid=25156>.
- [4] He Tao, Yang Suihui, Zhang Haiyang, et al. Experiment of space laser energy transmission and conversion with high efficiency [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0317001. (in Chinese)
- [5] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiang'ai, et al. Damage effect of monocrystalline silicon solar cells under ultrashort pulse laser illumination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 112–115. (in Chinese)
- [6] Tian Xiuqin, Xiao Si, Tao Shaohua, et al. Damage threshold research of monocrystalline silicon solar cells under femtosecond laser illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 676–680. (in Chinese)
- [7] Daniel E Becker, Richard Chiang, Catherine C Keys, et al. Photovoltaic concentrator based power beaming for space elevator application[C]//Beamed Energy Propulsion, Proceedings of the 6th International Symposium, 2010, 271: 271–281.
- [8] Ugur Ortobasi, Herbert W Friedman. Power sphere: a novel photovoltaic cavity converter using low bandgap TPV cells for efficient conversion of high power laser beams to electricity [C]//Thermophotovoltaic Generation of Electricity, 6th Conference, 2004, 142: 142–152.
- [9] Yan Liyang, Xu Di, Ge Aiming. Novel maximum power point tracking method under non-uniform insolation conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2173–2180. (in Chinese)
- [10] Tian Qi, Zhao Zhengming, Deng Yi, et al. Simulation and experimental study about reverse model of photovoltaic cells [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(23): 121–128. (in Chinese)
- [11] Daniel E Raible, Brian R Fast, Dragos Dinca, et al. Comparison of square and radial geometries for high intensity laser power beaming receivers [C]//IEEE, International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2011: 312–317.