文章编号:1001-5078(2015)10-1189-05

·激光应用技术·

激光供能无人机光伏接收器设计原则

刘晓光[1],华文深[1],杨 佳[2],郭 彤[1]
(1. 军械工程学院电子与光学工程系,河北 石家庄 050003;
2. 中国人民解放军第66046部队,河北 石家庄 050003)

摘 要:小型电动无人机在情报获取、战场监视等方面发挥着重要作用,但续航时间短的问题严重限制其效能的发挥。为解决该问题,采用激光无线能量传输技术为飞行中的无人机进行充电,大幅提高其续航时间,增强作战效能。光伏接收器作为能量转换器件,是系统设计需要考虑的核心器件之一。以电动无人机激光供能系统结构原理为基础,针对小型电动无人机的特点,提出在设计光伏接收器时所应满足的具体性能要求,并对影响光伏接收器设计的五个主要因素:系统工作模式,光伏电池,接收器结构布局,散热系统和角度衰减系数进行分析,为光伏接收器的设计提供基础研究。

关键词:激光;无线能量传输;无人机;光伏接收器
中图分类号:TN249 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2015.10.009

Photovoltaic receiver design for laser powered unmanned aerial vehicle

LIU Xiao-guang[1], HUA Wen-shen[1], YANG Jia[2], GUO Tong[1]
(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;
2. Unit 66046, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Small unmanned aerial vehicle(UAV) powered by electricity plays an important role in modern war, including intelligence acquisition, battlefield reconnaissance and so on. But short operation time severely constricts its application. To solve the problem, laser wireless power transmission is adopted to refuel the UAV in flight. Photovoltaic receiver converting optical energy into electricity is one of the key components of the system. Based on the principle of laser powered UAV and the feature of small UAV powered by electricity, the performance requirements of photovoltaic receiver are proposed. Correspondingly, five main factors influencing design of photovoltaic receiver are analyzed, such as operation mode, photovoltaic cell, structure and layout of receiver, cooling system and angle attenuation coefficient. It provides a reference for design of photovoltaic receiver.

Key words: laser; wireless power transmission; unmanned aerial vehicle; photovoltaic receiver

1 引 言

无人机在现代战争中发挥的作用日趋明显,世界各军事强国均对无人机技术开展了广泛的研究。作为无人机家族的重要组成部分,电动无人机由于体积小,重量轻,便于携带操作,隐蔽性强,在战术乃至战役层面发挥的作用日趋显著。目前,无人机装备较为普遍的美国、以色列等国家均部署大量电动无人机[1]。但是,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。

作者简介:刘晓光(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光无线能量传输技术。E-mail:graduatelxg@163.com
收稿日期:2015-01-31;**修订日期**:2015-03-09

激光无线能量传输技术通过将激光束作为能量传输的载体,光伏接收器实现光电转换,以达到能量远距离无线传输的目的。通过该技术对无人机在飞行过程中充电,将极大地延长无人机的巡航时间。美日等国均对激光供能无人机进行相关研究[2-3]。美国激光动力公司更是实现了无人机连续 48 h 的飞行,创造了电动无人机飞行时间的记录[4-5]。由于光伏接收器是整个系统最为关键的器件之一,本文从光伏接收器的任务需求出发,对影响光伏接收器设计的五个方面问题进行分析研究,为后续设计奠定了基础。

2 结构分析

激光供能无人机的工作原理图如图 1 所示。

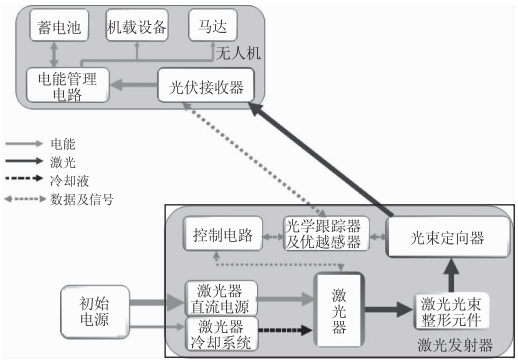


图 1 激光供能无人机原理图

Fig. 1 Principle of laser powered unmanned aerial vehicle

从图 1 中可以看出,无人机的激光供能系统主要分为两大部分:地面系统和机载系统。地面系统以激光器为核心,作为能量源。机载系统以光伏接收器为核心构成能量转换和存储系统。光伏接收器的作用是为无人机提供飞行动力和机载设备工作所需的电能。设计光伏接收器,在选材和设计过程中应满足以下方面:

(1)单体光伏电池光电转换效率高,对入射激光的功率特性和温度特性好。

(2)光伏接收器具有与无人机相称的体积重量,电能输出效率高。

(3)散热系统散热性能良好,功耗较低,体积重量小。

(4)角度效率衰减系数小。

为了达到以上要求,在进行光伏接收器设计时,应该充分考虑五个方面的内容:系统的工作模式,光伏电池的选择,接收器的结构布局,散热系统和角度衰减系数。

3 关键因素分析

3.1 工作模式

激光供能无人机的工作模式决定了整个系统的不同结构设计。其工作模式主要有两种:实时供能和补充式供能。实时供能要求激光发射系统实时跟踪无人机,无人机的飞行动力和机载负荷的电力来源均来自于实时提供的激光能量。只有在雨雪雾天或云彩遮挡无法进行激光充电时,利用机载本身携带的蓄电池提供电力。补充式供能则是在接受到无人机发出的蓄电池电能过低需要充电时才进行充电的工作模式。在这种工作模式在激光发射装置不需要实时跟踪无人机,在正常情况下,无人机正常工作所需要的电能来源于机载蓄电池供电。只有在充电过程中,其电力来源为激光能量。

在实时供能的工作模式下,激光束需要实时辐照光伏接收器,这不仅对跟踪系统的跟踪提出较高的要求,而且对激光器的散热、寿命以及光伏接收器的散热系统设计均提出挑战。同时,在战场条件下,激光束长时间照射将大大增加暴露自身的几率,但这种方式能够为飞行动力提供大功率的电能输出。补充式供能只需要在供能期间对无人机进行精确定位跟踪。这将大大降低对激光发射装置的性能要求,同时也有利于延长激光器的使用寿命和光伏接收器的散热。从使用成本、可行性以及隐蔽性等诸多方面来看,补充式充电是激光供能无人机工作模式的最佳选择。

3.2 光伏电池

光伏电池是设计光伏接收器的基础。在选择光伏电池时,应以实用高功率激光器为基础,着重考虑激光的功率特性、温度特性和波长响应特性对光伏电池的影响。功率特性和温度特性衡量的是光伏电池输出与入射激光功率、光伏电池温度之间关系。考虑波长响应特性时,还要考虑相应波长激光的大气传输特性。目前,高功率激光器技术发展迅速,尤其是半导体激光器在功率、体积以及光伏电池响应率方面均有较好表现,能够提供有效的高功率激光辐照。

最常用的光伏电池有硅电池,砷化镓电池,薄膜

电池。硅电池成本较低,能够实现大面积的铺设,但其转换效率相对较低。同时温度特性较差,随着温度的升高,其效率下降严重。而在高功率激光照射下,光伏电池温度必然升高。同时,硅电池的峰值响应波长在950 nm左右,该波段在大气中传输,衰减严重[6],不适合作为供能来源。砷化镓电池的光电转换效率较高,温度特性好。在现有激光器波长800 nm附近,有光电转换效率达60%的报道[7]。但普通的硅电池和砷化镓电池随激光功率的升高而效率下降较为严重。其主要原因在于电池设计所针对的是太阳光等光强较弱的情况,在高功率激光辐照下,光伏电池在高注入条件下工作,性能受到串联内阻、复合电流等电池内在参数影响严重[8]。同时,砷化镓电池的使用成本也比较高。薄膜电池体积重量的优势有利于电动无人机有效载荷有限的实际条件。但是,目前薄膜电池的光电转换效率较低,转换效率过低必然需要以提高激光功率,延长充电时间等为代价,这将对系统结构性能提出更高要求。因此,光伏电池的最佳选择是基于选定的激光工作波长,设计能够承受高功率激光辐照的高性能光伏电池。

3.3 接收器结构布局

目前,光伏接收器的结构形式主要有三种:平板型光伏接收器,会聚型光伏接收器和光伏眼[9-10],如图2所示。

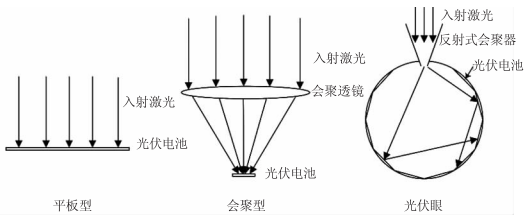


图2 三种常见光伏接收器

Fig. 2 Three kinds of photovoltaic receiver

平板型光伏接收器结构最为简单,呈平面结构。这种接收器结构简单,对跟踪精度的要求也较低。会聚型光伏接收器通过采用会聚透镜,将入射激光会聚在小面积的光伏电池上。提高了光照强度,降低了光伏电池的使用面积,极大地降低了成本,但同时散热系统的要求也比较高,结构较为复杂,体积重量都比较大。同时,对于激光发射装置的跟踪精度要求高。光伏眼通过将入射激光“囚禁”在相对密闭的空腔内,能够实现在光伏电池表面被反射激光的重复利用,提高整体的效率。但是其结构的密闭性,在高功率激光辐照下,散热问题将变得突出;同时,由于光伏眼开口大小的限制,对激光发射装置的跟踪精度要求很高。

在光伏接收器的设计中还必须要考虑激光光强不均的问题。该问题的来源主要是激光束本身能量分布的不均性和大气的影响。通常采用的激光束为高斯光束,光束本身存在能量分布不均的问题。激光在大气中传输,不仅面临大气折射、气溶胶散射吸收等造成功率损失的问题,而且大气湍流作用下,由于随机相位的叠加,造成激光束能量分布的随机性[11],甚至影响激光束照准精度[12]。在中弱湍流条件下,激光束将呈现近高斯分布,而在强湍流作用下,高斯光束将被彻底破坏,呈现极不均匀的能量分布。激光能量分布的不均性对光伏接收器的影响在于电能输出效率的降低。在串联支路中,支路电流受限于光生电流最小的光伏电池。在并联支路中,支路电压取决于电压最小的光伏电池。采用旁路二极管和阻塞二极管来提高输出功率的情况下,将会造成接收器输出的多峰特性。此时,需要引入最大功率点追踪电路,增加了系统复杂性。在上述三种光伏接收器中,平板型和会聚型均面临这种问题。但是在光伏眼中,通过将腔体内表面设计为朗伯面,或者通过对反射式会聚器进行设计,能够实现相对均匀的光照,从而避免激光光强分布不均的问题。

3.4 散热系统

在高功率激光辐照下,光伏电池的温度将会迅速升高,降低光伏电池的效率,同时也是光伏电池物理损伤的主要原因[13]。影响光伏电池温度的因素包括有效的激光入射功率,光伏电池的材料结构,风速,环境温度和散热系统的性能[14]。通过对激光能量建立能量守恒关系式如式(1)所示:

$$C_{PV}\frac{dT_{PV}}{dt} = Q_{in} - P_{out} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{cond} \quad (1)$$

其中,C_{PV} 为光伏电池的热容;T_{PV} 为光伏电池的温度;Q_{in} 为入射到光伏电池表面的激光功率;P_{out} 为

电能输出功率；Q_{conv} 、Q_{rad} 、Q_{cond} 分别为光伏电池通过对流、辐射和传导的散热。确定合理的参数取值，对激光辐照下光伏电池温度变化的规律进行仿真研究。研究表明光伏电池的温度与有效的入射激光功率成线性关系，而风速的增大，环境温度的降低能够有效降低光伏电池的温度。针对具体的工作环境，需要对激光辐照下光伏电池进行必要的应力分析，确定其最大工作温度和光伏电池所能承受的最大温度，并采取合适的散热措施。光伏电池温度在激光辐照下的温度模型和应力变化模型是散热系统设计的基础。

3.5 角度衰减系数

定义角度衰减系数来衡量激光在非正入射条件下，光伏接收器的效率损失程度。角度衰减系数的大小在一定程度上影响了系统的有效作用距离。在不能保证正入射时，在相同条件下，角度衰减系数越小，系统的工作距离越大。

对于平板型光伏接收器而言，在激光正入射条件下，光电转换效率最高。在斜入射条件下，能量损失的主要原因在于激光在光伏电池表面反射造成有效光强衰减。在一定角度入射条件下，辐照光伏电池的实际有效光强由公式(2)给出[15]：

$$E = \alpha E_0 \cos\theta \tag{2}$$

其中，E 为辐照光伏电池的有效激光强度；E_0 为激光器出射光强；α 为光伏电池盖板透射系数；θ 为激光入射角度。

从式(2)可以看出，在斜入射条件下，辐照光伏电池的激光强度与入射角度呈余弦关系。激光束斜入射进一步造成激光能量分布的不均性，加剧光伏接收器的效率损失。而会聚型光伏接收器对于激光入射角度的要求更高。由于入射激光需要经过会聚透镜进行聚焦，在激光斜入射时，必定造成激光光斑偏离光伏电池，光伏电池接收的激光功率下降，造成严重的能量损失[9]。对于光伏眼而言，激光斜入射不会加剧能量分布不均的影响[10]。但是，为了避免角度盲区，只有为光伏眼安装相应的跟踪设备，与激光束进行相对对准，才能保证系统的正常工作，这就增加了系统的复杂程度。

4 结 论

针对小型电动无人机体积较小载荷有限的特点，提出光伏接收器的性能要求，并分析了影响光伏接收器设计的五个方面问题。在设计光伏接收器时首先应根据具体的工作模式，选择高性能的光伏电池。在设计光伏接收器的结构布局时，消除光强分布不均和激光入射角度的影响，并根据激光辐照下的光伏接收器的温度模型，确定合理的散热系统。

参考文献：

[1] FAN Lijing. Review of american and israeli min-UAVs [J]. Aeronautical Science & Technology, 2007, 3: 13 – 16. (in Chinese)
范丽京. 美国、以色列小型无人机发展概览[J]. 航空科学技术, 2007, 3: 13 – 16.

[2] Richard Mason. Feasibility of laser power transmission to a high-altitude unmanned aerial vehicle[R]. TR-898-AF. Santa Monica, USA: Rand Corporation, 2011.

[3] Nobuki Kawashima, Kazuya Takeda, Kyoichi Yabe. Application of the laser energy transmission technology to drive a small airplane[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(supplement): s109 – s110.

[4] LI Xiuqian. Laser power beaming for UAVs [J]. Laser Journal, 2013, 34(4): 18 – 19. (in Chinese)
李修乾. 无人机激光充电技术研究[J]. 激光杂志, 2013, 34(4): 18 – 19.

[5] YANG Yewei, LI Xiaojiang, ZHANG Donglai. Research on laser energy transmission technology based on fractionated spacecraft[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(2): 126 – 130. (in Chinese)
杨业伟, 李小将, 张东来. 基于分离模块航天器的激光输能技术研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(2): 126 – 130.

[6] Geoffrey A Landis. Photovoltaic receivers for laser beamed power in space[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1): 105 – 112.

[7] QIAO Liang, YANG Yannan. Experimental research of laser wireless power transmission efficiency [J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 590 – 594. (in Chinese)
乔良, 杨雁南. 激光无线能量传输效率的实验研究[J]. 激光技术, 2014, 38(5): 590 – 594.

[8] M A Mosalam Shaltout, M M El-Nicklawy, A F Hassan, et al. The temperature dependence of the spectral and effi-

ciency behavior of Si solar cell under low concentrated solar radiation[J]. Renewable Energy,2000,21:445 – 458.

[9] 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.

[10] Ugur Ortabasi, 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.

[11] WU Lin, YING Jiaju, GENG Biao. Effect on laser propagation in the atmospheric turbulence[J]. Laser & Infrared,2008,38(10):975 – 977. (in Chinese)
武琳,应家驹,耿彪. 大气湍流对激光传输的影响[J]. 激光与红外,2008,38(10):975 – 977.

[12] LÜ Hong, GAO Ming. Effect of the beam spreading on the laser pointing in far-field[J]. Laser & Infrared,2010,40(2):120 – 123. (in Chinese)
吕宏,高明. 远场激光瞄准过程中光束扩展的影响分析[J]. 激光与红外,2010,40(2):120 – 123.

[13] QIU Dongdong, WANG Rui, CHENG Xiangai, at al. Mechanisms research oncontinuous wave laser induced damage to solar cells[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011,38(3):0302006 – 1 – 0302006 – 4.

[14] Diego Torres Lobera, Seppo Valkealahti. Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions[J]. Solar energy,2013,93:183 – 194.

[15] CUI Peng, QIE Yipeng, YIN Xingyue, et al. Impact of large light angle on solar array and its verification[J]. Chinese Journal of Power Sources,2014,38(9):1637 – 1639,1685. (in Chinese)
崔鹏,郤毅鹏,尹兴月,等. 大光照角入射对太阳电池阵的影响分析与验证[J]. 电源技术,2014,38(9):1637 – 1639,1685.