

# 无人机远程激光充电技术的现状和发展

周玮阳 金科

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

**摘要:** 高空长航时无人机是未来无人机的发展方向之一。目前最具发展前景的高空长航时无人机是太阳能动力无人机。但是由于太阳光的间歇性,限制了太阳能动力无人机的续航时间。因此,为进一步延长无人机的续航时间,应用激光代替太阳光对无人机进行非接触的远程供电将是未来的研究热点。对于无人机激光远程供电系统来说能量传递的效率是影响其实际应用的重要因素之一。文中首先阐述了无人机激光远程供电系统的概念和应用背景,然后对影响无人机激光远程供电系统效率的关键因素(激光器、太阳能电池板和大气环境)进行了分析总结,并针对这些因素的影响提出了保证系统效率的方式方法。最后指出无人机激光远程供电系统要继续发展所面临的问题和挑战。

**关键词:** 无人机;激光;太阳能电池

**中图分类号:** TM46      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2013)06-0784-08

## Status and Trends of Laser Powered Unmanned Aerial Vehicles

Zhou Weiyang, Jin Ke

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The high altitude and long endurance unmanned aerial vehicle(UAV) is one of the future directions of UAVs. Solar-powered UAVs have demonstrated interesting capabilities for high altitude and long endurance. However, current solar-powered UAVs are extremely light and fragile and have small payloads. The concept of UAVs with photovoltaic (PV) cells powered by a laser beam has been demonstrated and the laser beam powered UAV concept is esteemed a revolutionary technology for the high altitude and long endurance UAVs. The concept and application backgrounds of laser powered UAVs are introduced. Meanwhile, the current situation and tendencies of lasers and PVs which are used to build a laser powered UAV are discussed. As a laser beam passes through the atmosphere, several effects combine to reduce the amount of energy that actually arrives at UAV. The methods for overcoming this problem are also mentioned. Finally, the most important challenges which the laser powered UAVs will face are pointed out.

**Key words:** unmanned aerial vehicles; laser; photovoltaic cells

近年来,由于无人机在执行监视、侦察和攻击等任务中表现出的灵活性、高效性和持续性的特点,它成为了现代战争中各方军事力量的“倍增器”。为了适应未来战争的需求,进一步提高无人机的作战效能,各国都在积极发展新型的无人机,

而高空长航时无人机则是无人机未来的发展方向之一。

通过十多年的发展,太阳能动力无人机被认为是最具发展前景的高空长航时无人机型。一方面,太阳能动力无人机靠电动机拖动,不会因高空空气

**基金项目:** 国家自然科学基金(51377080)资助项目;江苏省自然科学基金杰出青年基金(BK20130036)资助项目;高等学校博士学科点专项科研基金(133218110015)资助项目;航空科学基金资助项目

**收稿日期:** 2013-08-15; **修订日期:** 2013-10-15

**通信作者:** 金科,男,教授,博士生导师, E-mail: jinke@nuaa.edu.cn。

稀薄受到影响,所以飞得更高。另一方面,太阳能动力无人机主要由太阳能发电获得飞行动力,配合机上的储能装置,其续航时间相比传统无人机更长。图 1 为传统无人机和太阳能动力无人机的极限飞行参数。从图中可知,太阳能动力无人机“Helios Prototype”和“Zephyr”分别以 29 532 m 的飞行高度和 14 d 24 min 的续航时间创造了现役无人机的飞行记录<sup>[1-2]</sup>。

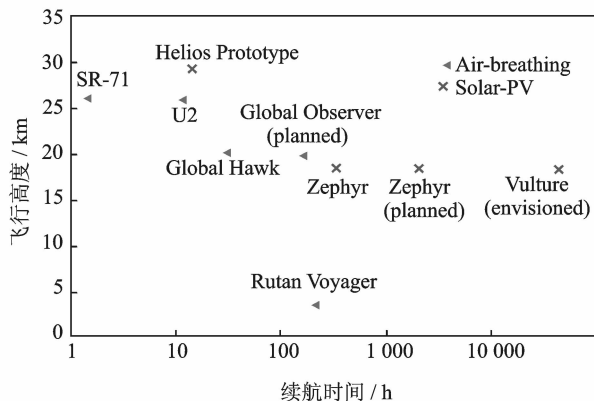


图 1 无人机的飞行极限参数

尽管太阳能动力无人机能实现高空长航时的飞行,但由于机上限制了太阳能电池板的面积,太阳能所能提供的功率较小,因此目前太阳能动力无人机的载荷普遍较小,执行任务比较单一。另外由于太阳光的间歇性,夜晚太阳能动力无人机只能依靠机上的储能设备飞行,而这些储能设备往往占到整机总重的 30%~40%,限制了高空长航时无人机的进一步发展。可见太阳光并非理想的能量来源。

为此无人机远程激光充电的概念被提出,利用可控的激光代替太阳光为无人机提供持续的飞行动力。一旦这一概念被全面应用,将对未来无人机乃至其他飞行器的长航时飞行,甚至为实现“无限飞行”带来革命性影响<sup>[3-6]</sup>。

## 1 激光无线传输能量的优势

表 1 为激光和太阳光的特性对比。通过比较可以发现激光比太阳光在能量传输上更具优势。首先激光的照射时间和角度可人为控制,这样可为无人机提供 24 h 不间断的电力,而且通过控制激光的入射角度,可以保证太阳能电池始终输出最大功率,从而能大大减少机上的储能设备,相应的无人机的有效载荷将增加,无疑将增加无人机的作战效能<sup>[7-9]</sup>。

其次激光的光照强度是太阳光的 500 倍,对于太阳能电池(目前太阳能电池能已能承受 1 000 倍

的光照强度)来说光照越强不仅输出功率越大而且光电转换效率更高。在考虑其他因素的影响下,太阳能电池在激光照射下将比在太阳光照射下多输出 1 倍的电能。换句话说,机上太阳能电池板的尺寸可相应地缩减,这对于微型飞行器、微小卫星等器件的充电具有重要的应用价值。

表 1 激光与太阳光特性对比

特性	太阳光	激光
照射时间	50%(夜晚无阳光)	100%
照射角度	随时间、季节变化	角度可人为控
光照强度	1 kW/m <sup>2</sup> 左右	500 kW/m <sup>2</sup>
波长	波长范围长	波长范围窄

另外,当激光波长与太阳能电池材料的带隙宽度匹配时,其光电转换效率明显高于太阳光下的转换效率。图 2 为不同太阳能电池材料在不同波长的激光照射下的光电转换效率图。从图 2 可知,为实现转换效率最大化,可选用 GaAs 的太阳能电池和波长为 800 nm 左右的激光<sup>[10]</sup>。

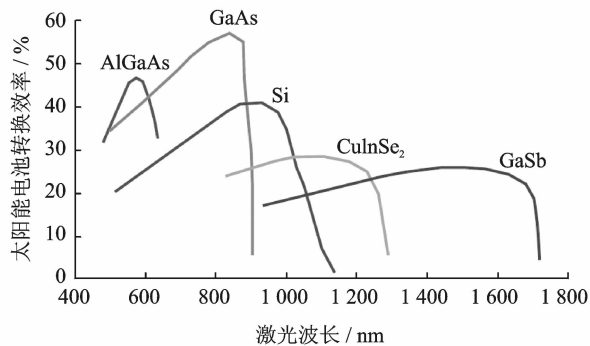


图 2 太阳能电池转换效率同其材料和激光波长的关系

除了利用激光为无人机提供远距离的能量传输外,微波技术也能实现远距离的非接触能量传输<sup>[11-12]</sup>。尽管微波在大气传输时能量损耗仅为 2%。但其发射和接收系统的体积是激光式的 10 倍<sup>[13-15]</sup>。显然利用激光对无人机进行远程非接触电能传输是目前最好的选择。

## 2 激光远程充电系统

激光远程充电系统是涵盖多种领域的综合性技术,其关键技术问题主要有两个方面:(1)远距离激光的发射与接收技术,(2)激光接收端的捕获和自动跟踪瞄准技术<sup>[16-20]</sup>。

图 3 为激光远程充电系统结构图,系统主要由激光发射端和激光接收端两部分组成。在激光发射端,激光器将电网或蓄电池中的电能转换成激光

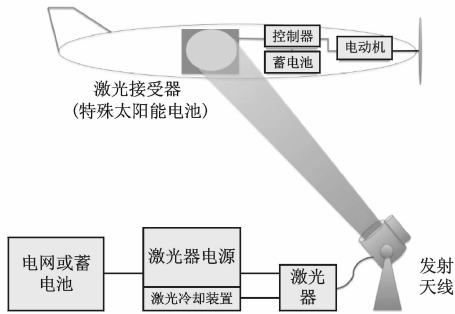


图3 激光远程充电系统

发射出去。而在激光接收端,太阳能电池在高光照强度下将激光转化成电能。可见要实远距离激光的发射和接收,激光器和太阳能电池的性能是非常重要的。近年来,随着激光器的发射功率不断增大,太阳能电池的光电转换率不断提高,使得激光远程电能传输技术逐渐得到发展<sup>[21-22]</sup>。

在为无人机充电之前,系统首先建立起系统收发两端之间的激光链接<sup>[15-16]</sup>。当激光链接建立起来之后,才开始增加激光功率为无人机充电。在此期间发射端根据接收端反馈信息不断调整姿态,以完成对无人机实时跟踪充电。可见捕获和自动跟踪瞄准技术是实现无人机激光远程充电的前提<sup>[23]</sup>。

目前欧美等发达国家都已开展了对于无人机远程激光充电系统的研究,其中代表性的工作有:2003年美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)马歇尔空间飞行中心的科学家利用波长940 nm输出功率500 W的强激光照射贴在微型飞行器表面的三结Ga:In:P2光电池,为与激光器相距15 m远的微型飞机传输电力,使输出功率为6 W的微型电动机正常工作,带动飞机飞行。2006年,NASA的工程师利用激光驱动一辆小型的“漫游者”小车。在这次试验过程中,工程师们设计了一套跟踪系统,保证了激光时刻锁定小车。这次试验的传输距离达到250 m。直到2012年,美国的洛克希德·马丁公司成功将激光远程充电系统应用于现役无人机上<sup>[24-25]</sup>。

### 3 激光器

激光器的种类很多。为了实现无人机远距离(实际应用中设计要求至少达40 km)的电能传输,激光器的输出光功率不仅要足够大,还需满足其他的条件。假设激光经过距离 $L$ 照射到无人机上的光强为 $\Phi$ ,且 $\Phi$ 至少要大于 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ ,则有

$$\varphi = \frac{R_{\text{source}} A_{\text{source}} \eta_{\text{tran}}}{L^2} \quad (1)$$

式中: $A_{\text{source}}$ 为激光束射出时的面积,与激光器上光学镜头的大小有关; $\eta_{\text{tran}}$ 为激光在大气中的传输效率; $R_{\text{source}}$ 为激光的辐射率对于激光器来说,其辐射率可由式(2)算得

$$R_{\text{source}} = \frac{P}{\lambda^2 B_x B_y} \quad (2)$$

式中: $P$ 为激光功率; $\lambda$ 为激光波长; $B$ 为反应光束质量的无量纲数。

为实现无人机激光远程充电,按最低要求取 $\Phi = 1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ , $L = 40\ \text{km}$ 。根据式(1)可得 $R_{\text{source}} A_{\text{source}}$ 至少为

$$R_{\text{source}} A_{\text{source}} = 1.6 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{sr} \quad (3)$$

已知目前光学镜头的直径最大为10 m,即 $A_{\text{source}} \approx 75\ \text{m}^2$ ,由此可以求得激光器辐射率的极限值。当然在更多情况下使用的镜头直径在1 m左右( $A_{\text{source}} \approx 0.8\ \text{m}^2$ )。因此结合式(3)可以选取到合适的激光器,如表2所示。

表2 可选择的激光器性能

类型	波长/ nm	效率/ %	辐射率 $R_{\text{source}} /$ ( $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )
半导体激光(10 kW)	850	50	$1 \times 10^{10}$
光纤激光器(20 kW)	1 060	25	$1.4 \times 10^{13}$
薄片激光器(25 kW)	1 060	25	$2.4 \times 10^{15}$
二极管泵浦碱金属 蒸汽激光器(48 W)	795	25 -40	$6 \times 10^{15}$

从表中可看出,二极管泵浦固体激光器(Diode-pumped solid-state lasers, DPSSLs)无论是在输出功率还是在辐射率 $R_{\text{source}}$ 方面均能满足激光远程充电的要求(表中光纤激光器和薄片激光器均属于二极管泵浦固体激光器)。其中目前商用光纤激光器的功率已达50 kW,且光电转换效率超过25%。但光纤激光器的功率越大,其辐射率 $R_{\text{source}}$ 越小。尽管如此,光纤激光器仍然能满足激光远程充电的要求。薄片激光器相比于光纤激光器更易实现高功率输出(如100 kW甚至更高),而且在大功率输出的情况下仍能保持较高的辐射率 $R_{\text{source}}$ 。因此薄片激光器更适合激光远程充电的场合。值得注意的是DPSSLs所产生的激光波长大于1 000 nm,由图2可知对于目前普遍采用Si和GaAs做材料的太阳能电池板来说,在这个波长段内其光电转换效率还很低。因此,在选用DPSSLs为激光发射器的远程充电场合下,需选用其他材质和工艺的太阳能电池板。如现在已商用的硒钢铜

(Copper indium selenide, CIS) 太阳能电池 (在波长  $\lambda=1\ 060\ \text{nm}$  处的光电转化效率为  $17\%\sim 20\%$ ) 以及尚未商业化需要定制的钢镓砷 (Indium gallium arsenides, InGaAs) 太阳能电池板 (在波长  $\lambda=1\ 060\ \text{nm}$  处的光电转化效率可达  $50\%$ )<sup>[26-27]</sup>。

表 2 中的半导体激光器 (Semiconductor lasers) 相较于其他激光器有着体积小、重量轻、转换效率高 (效率大于  $50\%$ )、结实耐用 (工作周期大于  $20\ 000\ \text{h}$ ) 等优点。并且其激光波长在  $800\ \text{nm}$  左右, 对于目前普遍采用 Si 和 GaAs 做材料的太阳能电池板来说, 在这个波长段内其光电转换效率较高, 可达  $50\%$  左右。单从这些优点来看, 半导体激光器相较于上述的 DPSSLs 更适合无人机远程充电的场合。但是在现有技术条件下半导体激光器的辐射率不高, 为了达到式 (3) 的条件, 需要直径  $100\ \text{m}$  的光学镜头, 这显然不符合实际情况。因此, 尽管在美国 NASA 的一些前期验证实验中采用的都是半导体激光器, 但在目前看来用半导体激光器发射出的激光经过长距离的传输, 光束质量会变差, 还不能用在给实际无人机远程激光充电的场合。不过随着技术的进步半导体激光器仍然具有不俗的竞争力<sup>[28-31]</sup>。

二极管泵浦碱金属蒸汽激光器 (Diode-pumped alkali laser, DPAL) 被认为是应用于激光远程充电场合最具前景的激光器。它结合了 DPSSLs 和半导体激光器的优点。一方面其输出功率很高 (理论上可达几百千瓦的水平) 而且在高功率下其辐射率也很大, 另一方面其激光波长在  $800\ \text{nm}$  左右, 采用 Si 和 GaAs 材料的太阳能电池板就能达到很高的光电转换效率。但是目前二极管泵浦碱金属蒸汽激光器尚在研发阶段, 输出功率还很低, 未能商业化<sup>[32-33]</sup>。

## 4 太阳能电池板

如上文所提到, 为在激光接收端太阳能电池能获得较高的光电转换效率, 需根据太阳能电池的材料对应的选择合适的激光器。然而对于目前大多数商用太阳能电池来说, 在强激光的照射下会使它们过热而损坏。为了解决这个问题, 美国 NASA 研制出了一种垂直多结太阳能电池<sup>[34-35]</sup>。其在结构上与普通太阳能电池有所不同, 导致这种光伏电池能够承受高光强的激光照射, 并且具有很高的光电转换的效率和较大的输出电压。图 4 所示为垂直多结光伏电池的  $V-I$  曲线图, 图中  $1\ \text{sun}$  为标准太阳光强, 即  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 。从图中可以看出垂直

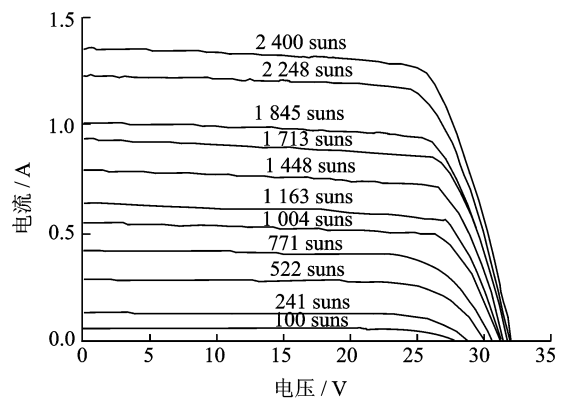


图 4 垂直多结光伏电池的  $V-I$  曲线图

多结光伏电池能够承受的最大光强约为  $2\ 400$  倍的标准太阳光强。垂直多结太阳能电池在入射激光波长为  $1\ 000\ \text{nm}$  左右时具有很高的光电转换效率, 理论值最高可达  $60\%$ , 实际中一般在  $20\%\sim 25\%$  左右。然而这种太阳能电池由于结构的原因, 当照射在其表面上的光强不一致时, 会导致其输出电流的降低, 为实际应用带来了麻烦。

除了太阳能电池板的材料和结构对其光电转换效率有着影响外, 太阳能电池板的温度也影响着其转换效率的高低, 一般来说, 温度越高, 其转换效率越低<sup>[36-37]</sup>。由于高能量密度的激光照射在太阳能电池板上会有一部分激光不能及时转化成电能而变成大量的热, 致使太阳能电池板温度升高甚至过热, 从而限制了太阳能电池的输出功率。因此太阳能电池板的散热问题就不得不考虑。图 5 和图 6 为在光照强度  $\Phi=5\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$  的激光照射下 CIS 太阳能电池板和 InGaAs 太阳能电池板的温度与无人机飞行高度和马赫数的关系。图中随着马赫数的增加, 由于空气对流作用加剧, 太阳能电池板的温度也随着下降。此外, 由于低空空气温度较高, 高空空气稀薄、空气对流作用不强的原因, 导致无人机飞行在  $10\ \text{km}$  的高空处, 其上的太阳能电池板温度相较于其他高度也比较低。为了让太阳能电池工作在理想环境下, 给太阳能电池安装散热装置必不可少。当然如果让太阳能电池自然风冷, 在给定高度和马赫数的情况下, 为了控制太阳能电池板上的温度在一个合适的范围, 可以改变照射在太阳能电池板上激光的光照强度, 从而使其有最大的输出功率。图 7 和图 8 为 CIS 太阳能电池板和 InGaAs 太阳能电池板在理想的光照强度下, 输出功率的最大值同飞行高度和马赫数的关系。由于普通太阳能电池板在太阳光的照射下, 每平米的普通太阳能电池板最大可输出  $200\sim 300\ \text{W}$  的

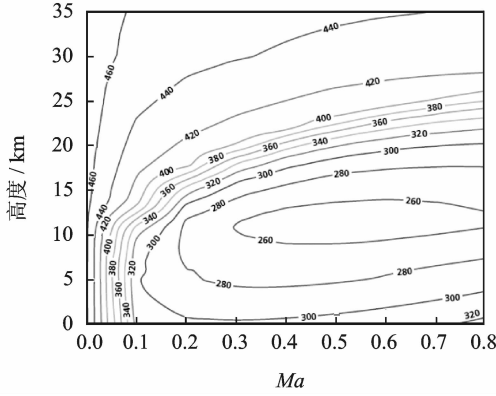


图5 CIS太阳能电池板的平均温度

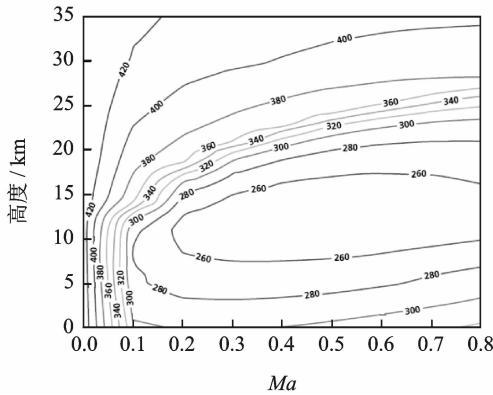


图6 InGaAs太阳能电池板的平均温度

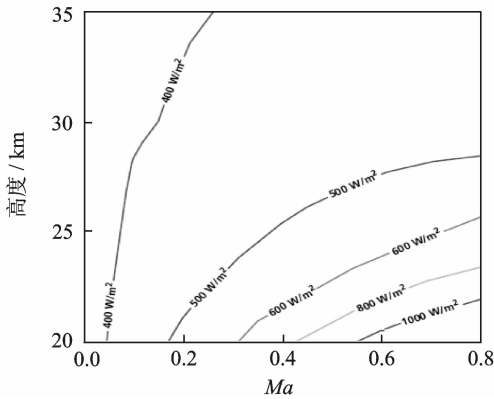


图7 GIS太阳能电池板的最大输出功率

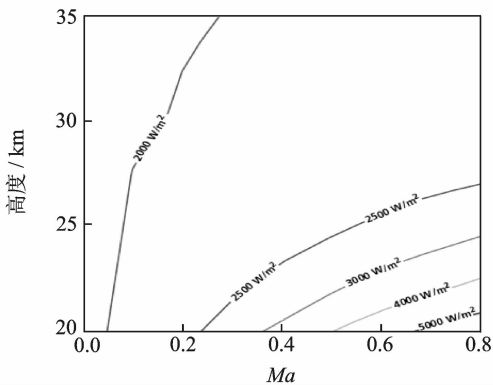


图8 InGaAs太阳能电池板的最大输出功率

功率(考虑照射角度的关系)。因此从图中可看出,每平米的 CIS 太阳能电池板在激光的照射下其最大的输出功率是普通太阳能电池板最大输出功率的两倍,每平米的定制 InGaAs 太阳能电池板在激光的照射下其最大的输出功率是普通太阳能电池板最大输出功率的 10 倍<sup>[38-39]</sup>。

## 5 激光在大气中的传播

在地对空的激光远程充电系统的能量传输过程中,由于低空大气中的气体分子、水雾、雪、霾、气溶胶等粒子会引起对光的吸收、散射,从而造成能量的损失。为此必须考虑激光在各种情况下的传输特性<sup>[40-42]</sup>。

大气对激光的吸收主要是由大气中的二氧化碳与水蒸气造成的。但是,这两种吸收因素都有自身的吸收频谱,对不同波长的激光吸收系数也不同,在一定的范围内吸收减弱,此时称为大气窗口。因此,对于水蒸汽,为取得不错的穿透传输效果,应避免其吸收中心波长 0.9, 1.1, 1.4, 1.9, 2.3, 6.3  $\mu\text{m}$ ; 同样,对于二氧化碳应避免其吸收中心波长 2.7, 4.3, 1.5  $\mu\text{m}$ 。因此,为避免激光电力传输过程中激光传输的损失过大,应避开水蒸气和二氧化碳的吸收中心,选择合适波长的激光。

在激光传输的过程中如果遇到云层的阻挡,激光将很难穿透云层给无人机供电,为此如果云层范围不大,无人机可在激光源上空寻找云层之间的缝隙进行充电。如果云层范围太大,无人机则必须降低高度到云层之下进行充电。如果无人机受限于任务要求不能随意更改航线或是降低高度的话,则无人机必须依靠机上的储能设备来提供电力执行各种任务。因此储能设备的容量对保证无人机在云雨天完成各种任务至关重要。执行任务所在地的云量对决定储能设备的容量大小是不可缺少的数据。文献[1]以台北和巴格达两地为例,根据当地的云量信息估算了机上储能设备的容量。文中假定天空云量占 8 成时无人机就不能通过激光进行充电。图 9 和图 10 为指定的两地分别在 2 h 和 6 h 内天空云量占八成时的概率。从图 9 可看出如果储能设备能为无人机提供 2 h 的电力,那么在台湾整年的时间里和巴格达的冬季,无人机有 50% 的概率连续飞行 2 d。如果是在巴格达的夏季,无人机将有 50% 的概率连续飞行 2 周的时间。另外从图 10 中可知,如果储能设备能为无人机提供 6 h 的电力,那么无人机在这两地将有 50% 的概率连续飞行 3 到 5 d(如果在巴格达夏季连续飞行

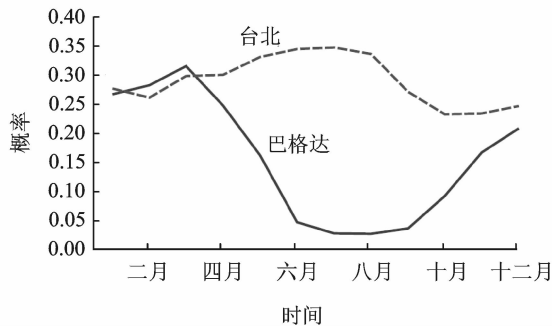


图9 2小时内云量占八成时的概率

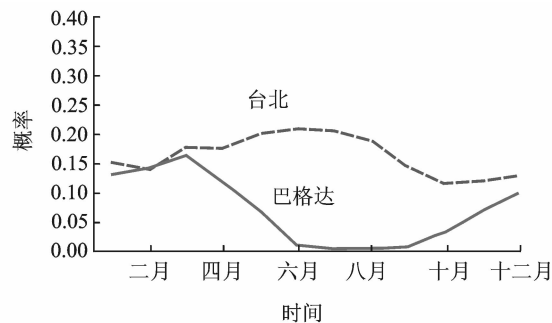


图10 6h内云量占八成时的概率

的天数将更长)。显而易见储能设备的容量越大,无人机续航时间越长,但机上的有效载荷将越少。因此综合考虑下,目前无人机上的储能设备一般为无人机提供6h的电力。由于在12km以上的高空,有95%以上的概率是无云遮挡的环境。为了避免低空大气环境对激光的吸收和散射以及云层的阻挡,可将地面上的激光发射装置移植到机载平台上。这样空对空的激光远程充电系统将有更远的能量传输距离,当然这种传输能量的方式增加了收发两端跟踪瞄准的难度。

## 6 无人机激光远程充电系统面临的挑战

无人机激光远程充电技术的研究只经历了十多年的发展。研究初期受激光器和太阳能电板性能的限制,该技术发展缓慢,直到最近才由美国人应用到实际无人机上去。但是无人机激光远程充电系统仍然面临着挑战<sup>[43-46]</sup>。

首先是系统的捕获和自动跟踪瞄准技术问题。在激光远程充电的过程中,由于接收端太阳能电池板的面积较小,要求发射端的功率确实到达太阳能电池板上,这就需要精确对准。因此在系统传递功率之前要通过激光进行对准。然而进行对准的信标光在大气传输的时候,会因大气的闪烁等原因引起光斑的漂移,造成跟踪上的误差。

其次激光传输过程中的安全问题。由于传输的激光功率较大,在传输过程中易对飞鸟等其他物体造成伤害。为此在充电系统中加入保证安全的子系统必不可少。当该子系统检测到激光传输路径上有其他物体阻挡时,应立即关闭系统并停止传输能量。

除此之外还有发射端光学元件的设计问题。激光器的发射角一般比较大,经过远距离的传输射在发生端的光斑会比较大,为了让激光能量全部照射在太阳能电池板上,就必须使用光学元件对激光的发射光束进行准直。对于大功率的激光器,仅使用单透镜系统进行准直,效率较低,同时准直效果也不太理想,准直后往往形成椭圆形,这样的光斑能量分散。为此必须设计更加复杂的光学元件系统。

## 7 结论

综上所述,以现有的技术条件,如果应用激光远程充电系统为无人机提供持续的动力,将使无人机超越现役飞行器的飞行记录,将飞得更高、续航时间更长。用激光充电的无人机较目前高空长航时的太阳能动力无人机相比,保守估计将多携带4倍的有效载荷以及提升80%的飞行高度(夜间飞行高度)。

目前适合激光远程充电系统的激光器为DPSSLs,相应的系统中太阳能电池板应对应选择CIS太阳能电池板,或者性能更好的InGaAs太阳能电池板(需定制)。尽管诸如半导体激光器和二极管泵浦碱金属蒸汽激光器受限于目前的技术还不能成功应用在激光远程充电系统中,但仍然被认为是未来适用于激光远程充电系统的理想激光器。

激光远程充电系统中的太阳能电池板在自然风冷的条件下,由于受到温度对其光电转换效率的限制,每平米的太阳能电池板大约能输出2000~3000W的功率,是太阳光照射在太阳能电池板上所能输出功率的10倍。如果给太阳能电池板增加散热装置,太阳能电池板的输出功率还将进一步提高。

低空大气环境会使激光能量在传输过程中有所损耗,特别是云层的阻挡会使无人机无法通过激光获得动力。因此为应对变幻莫测的大气环境,在无人机上搭载一定的储能设备必不可少。储能设备的容量大小对无人机的表现起着重要的作用,一般采用的储能设备需提供6h的电力给无人机。

激光远程充电的概念不仅可以应用在无人机

上,还可以拓展为通信中转站、传感网络、野战部队、前沿阵地等提供电力支持。而目前国内关于激光远程充电的研究还鲜有报道,所以展开以无人机为切入点的激光远程充电系统关键技术的研究,无论是对国民生活还是国防军事都有显著的意义和实用价值。

#### 参考文献:

- [1] Mason R. Feasibility of laser power transmission to a high altitude unmanned aerial vehicle[R]. TR-898-AF. Santa Monica, USA: RAND Corporation, 2011.
- [2] Simpson A D, Rawashdeh O A, Smith S W, et al. BIG BLUE: High-altitude UAV demonstrator of mars airplane technology[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Bigsky, MT: IEEE Press, 2005:4461-4471.
- [3] Edmund J. Laser power transmission[J]. NASA Johnson Space Center, 1992, 12(1):33-39.
- [4] Hecht J. Photonic power delivery: Photonic power conversion delivers power via laser beams[J]. Laser Focus World, 2006, 42(10): 113-117.
- [5] Hoffman J M. How to get fuel to future interplanetary vehicles: Beam it up to them with lasers[J]. Penton Publishing, 2007, 79(5): 78-88.
- [6] Cheng K W E, Lu Y. Development of a contactless power converter[C]// Proceedings of IEEE ICIT. New York, USA: IEEE Press, 2002:786-791.
- [7] Semke W, Schultz R, Dvorak D, et al. Utilizing UAV payload design by undergraduate researchers for educational and research development[C]// Proceedings of ASME. New York, USA:[s. n.], 2007: 468-473.
- [8] Blackwell T. Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC[C]// Proceedings of AIP. Troy, New York: Beamed Energy Propulsion, 2005:766.
- [9] Nayfeh T H, Fast B, Raible D E, et al. High intensity laser power beaming architecture for space and terrestrial missions [C]// Proceedings of AFRL/NASA Advanced Space. New York, USA: AFRL/NASA Advanced Space Propulsion Workshop, 2010: 233-240.
- [10] Andreev V, Khvostikov V, Kalinovsky V, et al. High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming[C]// Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, JP: IEEE Press, 2003:761-764.
- [11] 戴卫力, 费峻涛, 肖建康. 无线电能传输技术综述及应用前景[J]. 电气技术, 2010, 7(1): 1-6.
- [12] Dai Weili, Fei Juntao, Xiao Jiankang. Summary of wireless power transmission technology and application prospects[J]. Electrical Technology, 2010, 7(1): 1-6.
- [13] Jenn D C, Vitale R L. Wireless power transfer for a micro remotely piloted vehicle[C]// Proceedings of ISCAS. Monterey, CA: IEEE International Symposium, 1998:590-593.
- [14] Song B M, Kratz R, Gurol S. Contactless inductive power pickup system for Maglev applications[C]// Proceedings of IEEE IAS. Pittsburgh, PA, USA: IEEE Press, 2002:1586-1591.
- [15] Boys J T, Hu A P, Covic G A. Critical Q analysis of a current-fed resonant converter for ICPT applications[J]. Electronics Letters, 2000, 36(17): 1440-1442.
- [16] Wang C S, Grant A C, Oskar H S. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 148-157.
- [17] Ortobasi U, Friedman H P. A photovoltaic cavity converter for wireless power transmission using high power lasers[C]// Proceedings of IEEE Photovoltaic Energy Conversion. L A, USA: IEEE Press, 2006: 366-369.
- [18] Nayfeh T H, Fast B, Raible D E, et al. Comparison of square and radial geometries for high intensity laser power beaming receivers[C]// Proceedings of IC-SOS. Santa Monica, CA: IEEE Press, 2011: 312-317.
- [19] Arnon S, Rotman S R, Kopeika N S. Performance limitations of free-space optical communication satellite networks due to vibrations: Direct detection digital mode[J]. SPIE/Optical Engineering, 1997, 36(11): 3148-3157.
- [20] Arnon S, Rotman S R, Kopeika N S. Beamwidth and transmitter power adaptive to tracking system performance for free-space optical communication [J]. Applied Optics, 1997, 36(11): 605-610.
- [21] Masten M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1):47-64.
- [22] Daniel E R. High intensity laser power beaming for wireless power transmission[D]. Cleveland, USA: Cleveland State University, 2008.
- [23] 李适民, 黄维玲. 激光器件原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

- Li Shimin, Huang Weiling. Principle and design of laser devies[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [23] Eugene H. Optics fundamentals[M]. 4th Ed. Boston: Addison Wesley, 2001.
- [24] Raible D E, Dinca D, Nayfeh T H. Optical frequency optimization of a high intensity laser power beaming system utilizing VMJ photovoltaic cells[C] // Proc ICSSOS. Santa Monica, CA: IEEE Press, 2011: 232-238.
- [25] Nugent T J, Kare J T, Jordin T. Laser power beaming for defense and security applications[C] // Proc SPIE. Orlando, USA: [s. n.], 2011:14-21.
- [26] Wojtczuk S J, Steven J. Long-wavelength laser power converters for optical fibers[C] // Proc 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Anaheim, USA: IEEE Press, 1997: 971-974.
- [27] Aldair P L, Zheng Chen, Rose M. Photoelectric conversion efficiencies for InGaAs photovoltaic cells illuminated by composite selective emitters[C] // Proc 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Washington, USA: IEEE Press, 1996: 1018-1022.
- [28] 王晴. 用于半导体激光器的脉冲恒流源理论与技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.
- [29] 邓军. 半导体激光器驱动模式与可靠性研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [30] Wang Hongfang, Bradlry D. Power MOSFETs paralleling operation for high power high density converters[C] // Proceedings of Industry Applications. Tampa, FL: IEEE Press, 2006: 2284-2289.
- [31] Zhdanov, Sell J, Knize R J. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48W output power[J]. Electronics Letters, 2008, 44(9): 582-583.
- [32] Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, et al. New class of cw high-power diode-pumped alkali lasers (DPALs)[C] // Proc SPIE. Phipps: [s. n.], 2004: 256-271.
- [33] Krupke W F, Beach R J, Payne S A, et al. DPAL: a new class of lasers for cw power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths[C] // Proc AIP. Sendai, JP: US Department of Energy, 2004:385-396.
- [34] Sarfaty R, Segev G, Pozner R, et al. Vertical junction high-efficiency concentrator photovoltaic cells[C] // Proc IEEE Electrical and Electronics Engineers. Eliat:IEEE Press, 2010:421-424.
- [35] Sater B L, Sater N D. High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1 000 suns intensities[C] // Proceeding of IEEE Photovoltaic Specialists. LA, USA: IEEE Press, 2002: 1019-1022.
- [36] Woods L M, Ribelin R, Armstrong J H. Next-generation thin-film photovoltaics[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 2007, 22(10): 20-24.
- [37] Giesen A, Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: Results and scaling laws[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Mechanics, 2007, 13(3): 598-609.
- [38] Powalla M, Dimmler B, Gro K H. CIS thin film solar modules-an example of remarkable progress in PV [C] // Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Barcelona, Spain: EPSE Press, 2005: 1689-1694.
- [39] Landis G A. Photovoltaic receivers for laser beamed power in space[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1): 105-112.
- [40] Cook J R. Atmospheric propagation of high energy lasers and applications[C] // Proceedings of AIP Beamed Energy Propulsion. New York, USA: AIP Press, 2005: 766-775.
- [41] Serkan M, Kirkici H. Optical beam-shaping design based on aspherical lenses for circularization, collimation, and expansion of elliptical laser beams[J]. Applied Optics, 2008, 47(2): 230-241.
- [42] Joung C R. Atmospheric propagation of high energy lasers and applications[C] // Proceedings of International Symposium on Beamed Energy Propulsion. New York, USA: AIP Press, 2004: 58-72.
- [43] Raible D E. Free space optical communications with high intensity laser power beaming[D]. Cleveland: Cleveland State University, 2011.
- [44] Raible D E. High intensity laser power beaming for wireless power transmission[M]. Cleveland: Cleveland State University, 2008.
- [45] Steinsiek F, Weber K H, Foth W P, et al. Wireless power transmission experiment using an airship as relay system and moveable rover as ground target for later planetary exploration missions[C] // Proceedings of ASTRA. Noordwijk, Netherland: ESA Workshop, 2004: 11-20.
- [46] Richard M. Lasers for wireless power transmission [R]. California, USA: NASA, 1999.



