

## 激光无线能量传输接收系统二次聚光研究

孟祥翔, 申景诗, 石德乐, 郭春辉, 吴世臣, 程 坤, 徐 波

(山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 为了克服激光无线能量传输接收系统中聚焦光斑能量分布不均匀、光斑形状不匹配的缺陷, 设计并加工了一种梯形二次聚光器。依据边缘光线理论分析了梯形二次聚光器的设计原理, 利用 Tracepro 软件进行了仿真, 采用直角梯形拼接的方法加工成梯形二次聚光器。在激光无线传能系统中对梯形二次聚光器进行了实验研究, 对比了菲涅耳透镜单次聚光和与梯形二次聚光器组合聚光时对激光电池效率的影响。实验得出, 在激光电池接收功率一致的情况下, 菲涅耳透镜与梯形二次聚光器组合产生的聚焦光斑能使激光电池的转换效率值提高 6%~7%; 在计入二次聚光器损耗后, 激光电池的转换效率值提高 2%~3%。结果表明: 梯形二次聚光器的使用可以提升激光无线传能系统接收端的性能。

**关键词:** 激光无线传能; 方形光斑; 均匀照明; 光电效率

**中图分类号:** V423.44 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0705001

## Secondary concentration of laser wireless power transmission receiving system

Meng Xiangxiang, Shen Jingshi, Shi Dele, Guo Chunhui, Wu Shichen, Cheng Kun, Xu Bo

(Shandong Institute of Aerospace Electronics Technology, Yantai 264000, China)

**Abstract:** In order to overcome the defect that the energy distribution is non-uniform and the shape of the spot does not match with the PV cells in the laser wireless power transmission receiving system, a trapezoid secondary concentrator was designed and processed. Based on edge ray principle, the design method of trapezoid secondary concentrator was analyzed and simulated by Tracepro software. And a trapezoid secondary concentrator was processed by four right angled trapezoid mirrors. Then the effect of the trapezoid secondary concentrator was studied through laser wireless power transmission system. The photoelectric conversion efficiency of PV cells under Fresnel lens single concentrator and combining with the trapezoid secondary concentrator was compared. Experimental results indicate that the value of photoelectric conversion efficiency of united concentrators was improved about 6%–7% compared with Fresnel lens single concentrator under the same received power of PV cells. If adding the loss of the secondary concentrator, the value of photoelectric conversion efficiency of united concentrators was improved about 2%–3%. It indicates that the trapezoid secondary concentrator could enhance the performance of laser wireless power transmission receiving system.

**Key words:** laser wireless power transmission; square spot; uniform illumination; photoelectric efficiency

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA7046305)

作者简介: 孟祥翔(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要从事激光光学系统方面的研究。Email: mengxx326@126.com

## 0 引言

无线能量传输技术是一种在无接触连接的情况下实现电能输送的技术<sup>[1-3]</sup>。激光无线传能系统利用光电效应,结合高精度光束指向瞄准技术,以高能量激光束作为能量载体,对远端用电设备进行非接触能量传输,是长距离无线传能的主要手段,在航天器应急维护、全天候月面探测、长航时无人机供电、空间太阳能发电站等领域有广泛的应用前景。

目前,国内外相继开展了利用激光无线传能系统驱动小车、远距离无人机充电、驱动太空电梯等实验研究<sup>[4-10]</sup>,同时开展了大量基于激光无线传能的空间太阳能电站<sup>[5]</sup>论证。总体电-电效率是激光无线传能系统的关键指标,决定系统总体电-电效率的主要因素包括发射端激光器的电光转换效率和接收端光电池的光电转换效率。在接收端,此前的激光无线传能系统研究中多采用光电池平铺<sup>[11]</sup>或一次聚光<sup>[3]</sup>形式。光电池平铺式质量轻,对充电设备结构影响小。但在远距离情况下,接收端光斑直径会达到数米量级,此时若采用平铺方式接收光能,光电池数量会达到数千个。比如,在山东航天电子技术研究所此前的研究中<sup>[11]</sup>,接收端采用光电池平铺的方式,由于激光光斑分布不均匀,单个平铺光电池的输特性不同,使得接收效率降低,需以激光光斑的能量分布特性为依据排布光电池,进行复杂的串并联设计,在直径约 200 mm 的圆内排布了 224 片光电池,不仅后续电路十分复杂,而且光电池占空比低。相比平铺方式,采用一次聚光器可以显著提高接收端的聚光比,增加光电池接收面上的照度,避免光电池平铺方式带来的复杂电路,但是针对圆形光斑入射的一次聚光器,其聚焦光斑也是圆形,且呈高斯分布,与方形光电池片形状不能完全匹配,部分光敏面不能被照射到,降低了光电池的转换效率。

文中提出采用二次聚光器改善激光无线能量传输系统接收端光电池的转换效率,设计加工了梯形二次聚光器,并与菲涅耳透镜组合聚光,进行了实验对比验证。

## 1 设计原理

梯形二次聚光器有实心 and 空心两种,实心梯形

二次聚光器是利用玻璃与空气之间的全反射原理聚光,也称为积分棒,入射面和出射面一致的方形积分棒多在投影仪照明系统中作匀光器使用;空心梯形二次聚光器是依靠内壁上的高反射膜进行聚光,设计依据是反射定律和边缘光线原理。边缘光线原理是指梯形二次聚光器入射端最边缘最大入射角度的光线,经梯形二次聚光器后,若在出射端最边缘以最大出射角出射,则该边缘光线以内的所有光线经梯形二次聚光器后都会从出射端边缘光线以内出射。梯形二次聚光器的设计原理<sup>[12]</sup>如图 1 所示。

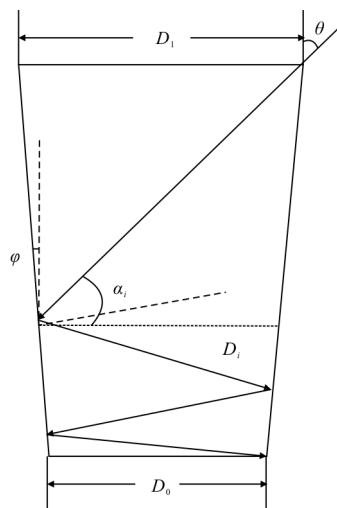


图 1 梯形二次聚光器原理图

Fig.1 Schematic diagram of trapezoid secondary concentrator

图 1 中: $D_1$  为梯形聚光器入射端口径, $D_0$  为出射端口径,在激光无线传能系统中对应光电池的大小; $\varphi$  为梯形聚光器反射面倾角; $\theta$  为边缘光线入射角,与一次聚光器的 NA 对应; $\alpha_i$  为边缘光线第  $i$  次反射时的入射光线与水平方向夹角, $D_i$  为边缘光线第  $i$  次反射时对应的底面口径。由反射定律可以推得第  $i+1$  次反射时对应底面口径为:

$$D_{i+1} = D_i \prod_{j=1}^i \left( \frac{1 - \tan \varphi \tan \alpha_j}{1 + \tan \varphi \tan \alpha_j} \right) \quad (1)$$

式中: $\alpha_i = \frac{\pi}{2} - \theta - 2(i-1)\varphi$  且  $\alpha_i \geq 0$ 。

在设计梯形二次聚光镜时,首先根据一次聚光器的 NA 确定  $\theta$ ,根据反射次数  $i$  求出  $\alpha_i$  的表达式,反射次数决定出射端口光斑的均匀性,但受梯形二次聚光器长度限制,反射次数不宜过多;再将  $\alpha_i$ 、入

射端口径  $D_1$ 、出射端口径  $D_0$  代入公式 (1), 利用 MATLAB 软件计算出反射面倾角  $\varphi$ , 判断  $\alpha_i$  值是否合理, 进而求出梯形二次聚光器高度和反射面长度。

## 2 模拟仿真

实验所用的一次聚光器为非涅耳透镜, 焦距为 160 mm, 入射光直径 190 mm, 由此计算出  $\theta=30.7^\circ$ ; 选取反射次数  $i=3$ ; 四片 GaAs 光电池串联组成  $2 \times 2$  阵列, 尺寸为 21 mm $\times$ 21 mm, 入射端口定为 30 mm $\times$ 30 mm; 代入公式(1), 可求得梯形二次聚光器反射面倾角  $\varphi=2.39^\circ$ , 此时  $\alpha_3=49.74^\circ > 0$ , 计算得到梯形二次聚光器高度为 107.83 mm。利用计算所得参数在机械软件中建模, 所设计梯形二次聚光器如图 2 所示。

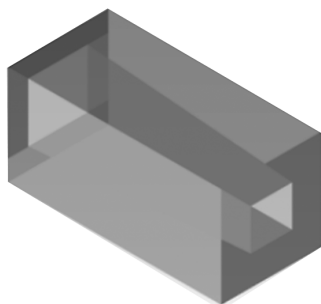


图 2 梯形二次聚光器模型图

Fig.2 Model of trapezoid secondary concentrator

加入焦距为 160 mm 的非涅耳透镜作为一次聚光器, 与梯形二次聚光器组合聚光, 在 TracePro 软件中进行光线追迹, 如图 3 所示。

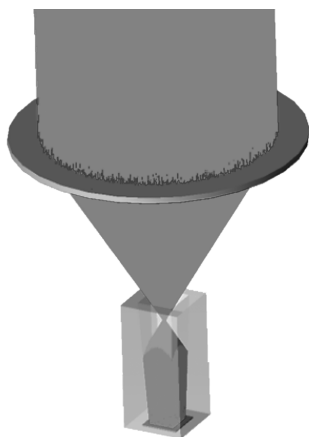


图 3 组合聚光光线追迹图

Fig.3 Ray trace for united concentrators

在梯形二次聚光器出射端设置接收面, 追迹 50 万条光线后, 接收面上光斑如图 4 所示。可见, 梯形二次

聚光器的加入, 将聚焦光斑整形成与光电池阵列一致的方形光斑, 并且均匀性得到很大改善。

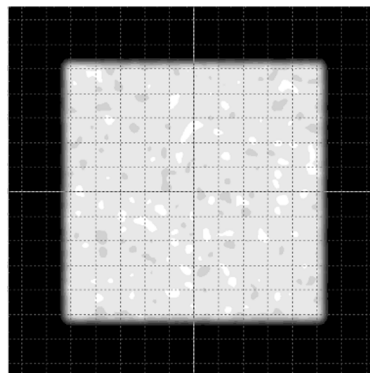


图 4 梯形二次聚光器出射端口光斑照度分布

Fig.4 Illuminance distribution at exit end of trapezoid secondary concentrator

## 3 实验与结果

在实验验证阶段, 采用四片直角梯形反射镜胶合成验证性梯形二次聚光器, 制作过程如图 5 所示。相比直接使用等腰梯形反射镜胶合, 可以降低反射镜加工难度和成本。

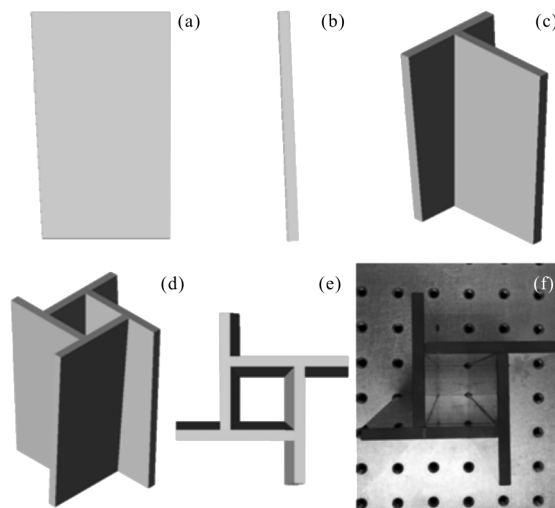


图 5 验证性梯形二次聚光器制作过程

Fig.5 Manufacturing process of confirmatory trapezoid secondary concentrator

直角梯形反射镜的斜边倾角与梯形二次聚光器反射面倾角一致, 见图 5(a); 将第一片直角梯形反射镜靠在工装上, 使该反射镜倾斜角为  $\varphi$ , 见图 5(b); 以第一片直角梯形反射镜的斜边为基准, 以入射端口径和出射端口径为位置依据, 将第二片反射镜与之

胶合,见图 5(c);按照该方法,依次将第三、第四片直角梯形反射镜胶合,见图 5(d);图 5(e)为该验证性梯形二次聚光器的上视图;图 5(f)为该验证性梯形二次聚光器的实物图。

图 6 为激光无线传能实验示意图。激光器出射激光由光纤导出,经过准直透镜准直,入射到一次聚光器菲涅耳透镜上,再经过梯形二次聚光器汇聚在光电池上。图中虚线为不使用梯形二次聚光器时,直接由一次聚光器菲涅耳透镜聚焦在光电池上的情况。

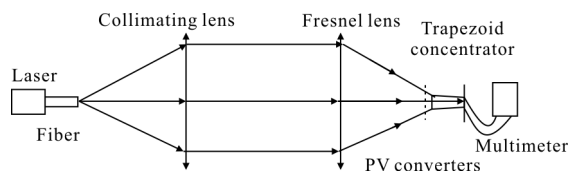


图 6 激光无线传能二次聚光实验示意图

Fig.6 Schematic diagram of secondary concentrating experiment of laser wireless power transmission

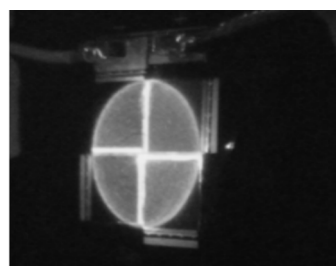
实验中,激光器波长为 808 nm,功率可调;光纤 NA=0.22,芯径 200 μm;准直透镜焦距 430 mm,出射口径 190 mm。实验中所用菲涅耳透镜、光电池参数均与第 2 节一致。该实验旨在验证接收系统的梯形二次聚光器产生光斑对光电池效率的影响,对传能距离不做要求。

将光电池放在图 6 所示的虚线位置,测得激光电路上入射激光功率为  $P$ 。前后移动 GaAs 光电池组位置,用万用表实时测量短路电流  $I_s$  和开路电压  $V_o$ ,当  $I_s$  最大时停止移动电池位置,光斑如图 7 所示。加入梯形二次聚光器,将 GaAs 光电池组置于梯形二次聚光器出光口,调节相对位置,用万用表实时测量短路电流  $I'_s$  和开路电压  $V'_o$ ,当  $I_s$  最大时停止调节,此时梯形二次聚光器出光口光斑如图 8 所示。一次聚光和二次聚光时光电池转换效率值的比较可由下式得出:

$$\eta = \frac{V'_o I'_s}{V_o I_s} - 1 \quad (2)$$

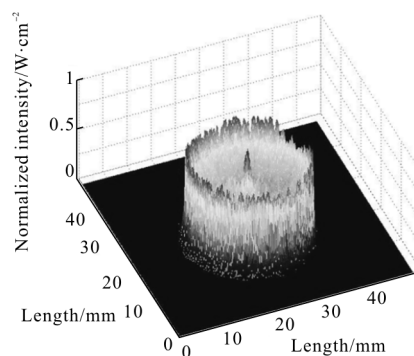
由于使用同一光电池组,入射光功率相同,开路电压基本一致,在公式(2)中默认为填充因子一致。

对比图 7 和图 8 可知:菲涅耳透镜一次聚光光斑为圆形,在边缘和中心光强较大,中部圆环光强较弱,分布很不均匀;菲涅耳透镜和梯形二次聚光器的光斑为方形,光强分布均匀性得到很大改善。图 7 中照射在激光电路上光斑,中间的“十”字亮线是由激光电路上缝隙反射造成的,在梯形二次聚光时也会出现。



(a) 实际光斑图

(a) Actual spot diagram

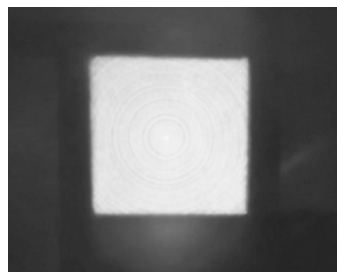


(b) 照度三维分布图

(b) 3D distribution of illumination

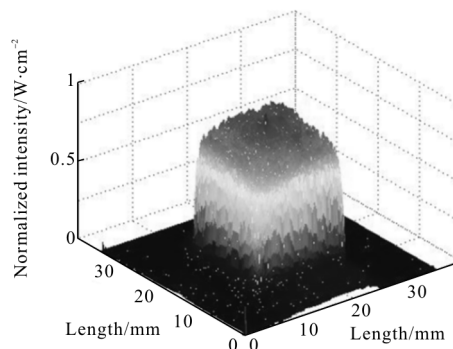
图 7 菲涅耳透镜聚光光斑

Fig.7 Spot of Fresnel lens



(a) 实际光斑图

(a) Actual spot diagram



(b) 照度三维分布图

(b) 3D distribution of illumination

图 8 梯形二次聚光器出射光斑

Fig.8 Spot at exit end of trapezoid secondary concentrator

表 1 为保持二次聚光时光电池入射功率与一次聚光入射功率一致时的测量结果;表 2 为计入二次聚光器损耗的测量结果。对比结果显示,光电池入射光功率分别为 8.5、10.6、12.1 W, 在保持光电池入射光功率在一次聚光和二次聚光相同时,二次聚光光电池转换效率值提升约 6%~7%; 在计入二次聚光损耗后,二次聚光光电池转换效率值提升 2%~3%, 该值可以通过在二次聚光器反射面上镀高反膜进一步提高。

表1 入射功率一致时测试结果

Tab.1 Test results under the same received power

Parameter	Test value		
Received power, P/W	8.5	10.6	12.1
$I_s/A$	1.105	1.382	1.556
$V_o/V$	4.238	4.237	4.228
$I_s'/A$	1.179	1.48	1.66
$V_o'/V$	4.235	4.24	4.213
$\eta$	6.6%	7.16%	6.3%

表 2 计入二次聚光损耗时测试结果

Tab.2 Test results adding the loss of the secondary concentrator

Parameter	Test value		
Received power, P/W	8.5	10.6	12.1
$I_s/A$	1.105	1.382	1.556
$V_o/V$	4.238	4.237	4.228
$I_s'/A$	1.130	1.421	1.597
$V_o'/V$	4.235	4.246	4.226
$\eta$	2.19%	3%	2.59%

## 4 结 论

文中提出将梯形二次聚光器应用在激光无线传能接收系统中提高激光电池转换效率。介绍了梯形二次聚光器的设计方法,利用 Tracepro 软件进行了模拟仿真,采用四片直角梯形反射镜制作了验证性梯形二次聚光器。实验对比了仅采用菲涅耳透镜的一次聚光系统与菲涅耳透镜和梯形二次聚光器组合而成的二次聚光系统对激光电池转换效率值的影响。实验结果表明,保持光电池入射光功率在一次聚光和二次聚光相同

时,二次聚光光电池转换效率值提升约 6%~7%; 在计入二次聚光损耗后,二次聚光光电池转换效率值提升 2%~3%。由此可见,该聚光方式将会在大功率远距离激光无线能量传输中起到重要作用。

## 参考文献:

- [1] Brown W C. The history of wireless power transmission[J]. *Solar Energy*, 1996, 56(1): 3221.
- [2] Mijin Choi, Jung-Ryul Lee, Chan-Yik Park. Development of a laser-powered wireless strain gauge device using a continuous-wave laser and photovoltaic cell [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 27 (17): 2333-2343.
- [3] He Tao, Yang Suhui, Miguel Angel Munoz, et al. High power high efficiency laser power transmission at 100 m using optimized multi-cell GaAs converter [J]. *Chin Phys Lett*, 2014, 31(10): 104203.
- [4] Li Zhenyu, Shi Dele, Shen Jingshi, et al. Laser wireless power transmission technology [J]. *Space Electronic Technology*, 2013(3): 71-76. (in Chinese)
- [5] Nobuki Kawashima, Kazuya Takeda. Laser energy transmission for a wireless energy supply to robots [J]. *Robotics and Automation in Construction*, 2008, 10: 373-380.
- [6] Yang Shangfei, Lin Longxin. Key technology and application prospect of laser beaming motivation [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 477-481. (in Chinese)
- [7] Chen Qi, Zhang Dechen, Zhu Dandi, et al. Design and experiment for realization of laser wireless power transmission for small unmanned aerial vehicles [C]//SPIE, 2015, 9671: 96710N.
- [8] Liu Xiaoguang, Hua Wenshen, Liu Xun, et al. Factors influencing efficiency of laser wireless power transmission system for micro-unmanned aerial vehicles[C]//SPIE, 2014, 9294: 929403.
- [9] Victor Victorovich Apollonov. Laser source for wireless power transmission in space [J]. *Open Access Library Journal*, 2015, 2: e1931.
- [10] Wang Li, Hou Xinbin. Key technologies and some suggestions for the development of space solar power station [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2014, 31 (4): 343-350. (in Chinese)
- [11] Zhang Jiande, Guo Chunhui, Yu Hongfei. Research on receiver device for laser power transmission [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(1): 13-17. (in Chinese)
- [12] Zhang Li. Design of Fresnel concentrating optical system with high homogeneity of energy distribution [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2013: 32-38. (in Chinese)