

## 激光与光电子学进展

## 基于可见光的无线传能系统仿真与设计

朱学贵\*, 周阳, 张淮清, 余文超

重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044

**摘要** 针对火箭点火、无线传感等中距离、强电磁干扰环境下的供电问题,设计了一种可见光无线传能系统,利用可见光实现数米距离的无线能量供给。通过光学仿真软件建立了可见光无线传能系统的光学模型,分析了光源轴向离焦量、平凸透镜位移对光能利用率、光斑均匀性、光电转换效率的影响,并确定了系统的实验参数,为实现更大功率、更远距离、更高效的可见光无线传能和变距离传输自动装置提供了依据。实验测试结果表明,使用反光和聚光透镜组合,大幅减少了光束散射,有效提高了可见光无线传能系统的能量传输效率。该系统有助于解决当前无线供电米级以上的中距离盲区,以低成本解决部分极端环境下更换电池不便、电磁干扰严重情况时的小功率装置供电问题。

**关键词** 光学设计; 无线能量传输; 可见光; 光伏效应

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221569

## Simulation and Design of Wireless Energy Transmission System Based on Visible Light

Zhu Xuegui\*, Zhou Yang, Zhang Huaiqing, Yu Wenchao

State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** Aiming at the power supply problem in medium-distance and strong electromagnetic interference environments such as rocket ignition and wireless sensing, a visible light wireless energy transmission system is designed, which uses visible light to achieve wireless energy supply at a distance of several meters. The optical model of the visible light wireless energy transmission system was established by the optical simulation software, the influence of the axial defocus of the light source and the displacement of the plano-convex lens on the light energy utilization rate, the uniformity of the spot, and the photoelectric conversion efficiency were analyzed, and the experimental parameters of the system were determined, which provides a basis for the realization of higher-power, longer-distance, and higher-efficiency visible light wireless energy transmission and variable-distance transmission automatic devices. Experimental results show that the use of a combination of reflective and condensing lenses greatly reduces beam scattering and effectively improves the energy transmission efficiency of the visible light wireless energy transmission system. The system helps to cover the the meter-level blind area, and provide the power supply at a low cost for the low power devices in some extreme environments where battery replacement is inconvenient and electromagnetic interference is serious.

**Key words** optical design; wireless energy transmission; visible light; photovoltaic effect

## 1 引言

无线能量传输(WPT)技术<sup>[1-2]</sup>是一种无需线缆即可对目标进行能量供应的新型技术,在工业、医疗、航空航天、物联网、交通和智能家居等方面具有巨大应用潜力,成为近年来热门研究方向。根据能量传输机理不同,无线传能的主要方式<sup>[3]</sup>可分为电磁感应式传能、

磁谐振式传能、微波传能和激光传能。电磁感应式传能可在厘米级距离实现高效率( $>90\%$ )传能,但传能距离有限且不适合同时对多个目标供能。磁谐振式传能可在米级距离内进行高效率、高功率密度的能量传输,但对负载变化比较敏感,易导致发射线圈和接收线圈频率不一致。微波方式可实现远距离、大功率无线传能,但存在发散角大、功率密度低和微波辐射安全性

收稿日期: 2022-05-11; 修回日期: 2022-06-06; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

通信作者: \*zhuxuegui@cqu.edu.cn

的问题。激光传能的特点是准直性好、能量密度高,但对定位精度要求很高且设备价格昂贵,不适宜小功率多点应用场景。

随着我国航天技术的快速发展、动力系统规模的增加和电驱技术的广泛应用,火箭的用电功率需求大幅提升,火箭的供电呈现智能化、无缆化的趋势。火箭发射前,需与地面测发系统连接,由地面系统提供电力,目前供电主要采用脱插接口有线连接方式。火箭点火前,脱插自动断开与地面系统的有线连接,如果脱落不正常,将导致摆杆不能摆开、电缆断裂并损坏设备,影响火箭正常发射。而且,有线连接增加了火箭系统的重量,减小了发射有效载荷。因此,利用无线传能方式给火箭供电具有一定应用前景。

无线传感器网络(WSN)是由多个传感器节点组成的实时监测网络系统,它利用低功耗、小尺寸的无线传感器实现对监测区域的信息获取,目前广泛应用于工农业、军事领域的环境监测等领域。无线传感器节点的供能问题<sup>[4]</sup>是制约无线传感器技术发展的一个关键因素:铺设传统电力线对其进行充电会大幅提高成本,且在高电压、强磁场等恶劣环境下传统电力线无法

铺设、难以进行能量供给;使用电池对传感器节点进行供电会受到许多限制,如电池需定期更换、成本较高等,而且很多场合电池不便更换;利用移动基站采集能量有限,且受到基站距离限制;利用环境能为无线传感器供电的自供能技术也会在环境能源匮乏的场合无法提供足够能量。因此,可考虑用无线能量传输技术对无线传感器网络进行主动供能。

针对中距离、强电磁干扰等恶劣环境下的火箭点火问题及无线传感器等小功率装置供电问题,本文提出一种可见光无线能量传输系统,利用可见光作为能量载体实现数米距离的无线能量供给,有助于弥补当前无线供电米级以上的中距离盲区。

## 2 基本原理

本文设计的可见光无线传能系统,原理是利用短弧氙灯发出波长主要为 400~780 nm 之间的可见光,经过椭球面聚光镜聚光、平凸透镜准直,使光束传输数米距离到光伏电池上,再通过光伏效应和最大功率点跟踪技术进行光电能量转换,系统结构框图如图 1 所示。

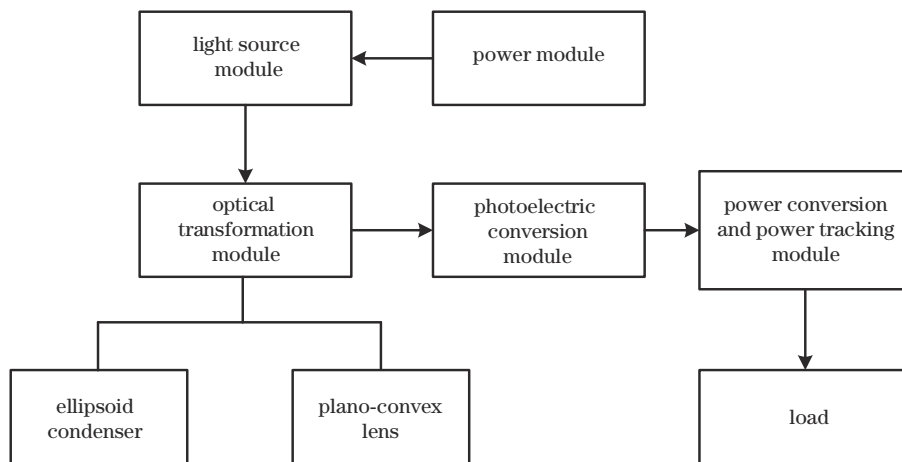


图 1 可见光无线传能系统结构框图

Fig. 1 Structure block diagram of visible light wireless energy transmission system

## 3 光学系统设计

通过分析氙灯光源和椭球面聚光镜、准直镜的光学特性,并使用光学仿真软件 TracePro 对可见光无线传能系统的光学系统进行仿真设计与分析,以实现数米距离内无线能量传输的目标,光束传输路径如图 2 所示。



图 2 可见光无线传能系统的光学传输模型

Fig. 2 Optical transmission model of visible light wireless energy transmission system

### 3.1 光学元件设计

短弧氙灯<sup>[5-7]</sup>作为太阳模拟器最常用的光源,具有匹配太阳光谱、光谱质量稳定、输出功率高的优点,常用于模拟太阳光辐照特性。本文所设计的可见光无线传能系统,使用光伏电池进行光电能量转换,因此选择短弧氙灯作为光源比较合适。由于 TracePro 光源库中没有氙灯模型,因此需要对氙灯进行建模。本文对光源的建模思路<sup>[8]</sup>如下:利用氙灯发光功率密度最高点在阴极附近的特性将氙灯发光区域分为核心区与非核心区,核心区代表阴极斑,具有氙灯 70% 的辐照功率,非核心区具有 30% 的辐照功率。用光源嵌套的方法模拟氙灯能量的空间分布,氙灯模型的能量分配如表 1 所示。实际氙灯的配光曲线如图 3 所示。

表 1 氙灯模型的能量分配

Table 1 Energy distribution of xenon lamp model

Light-emitting area	Area shape	Volume / mm <sup>3</sup>	Irradiation power / W	Power ratio / %
Core area	Cylinder	1.00	98	70
Non-core area	Cylinder	10.05	42	30

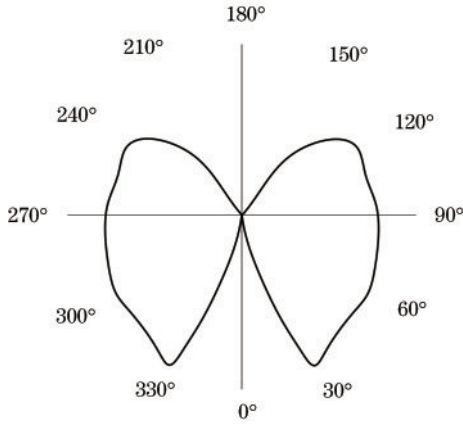


图 3 短弧氙灯的配光曲线

Fig. 3 Light distribution curve of short arc xenon lamp

根据实际氙灯的配光曲线,在 TracePro 的 Surface Source Property Generator 中,对氙灯的发光表面的发光光束空间角度分布进行设置,使得模型的光源特性与实际氙灯的光源特性一致。氙灯发光角度分布设置如图 4 所示,建立氙灯的三维(3D)模型如图 5 所示。

本文采用的椭球面聚光镜内表面镀有光学冷反光

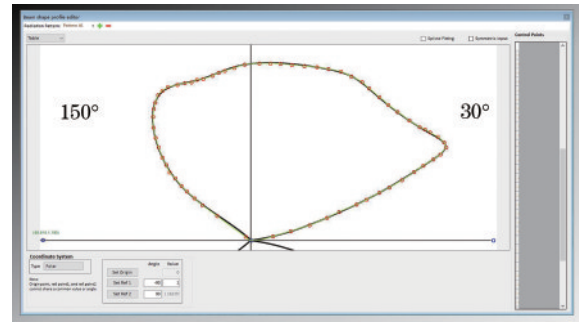


图 4 氙灯发光角度分布设置

Fig. 4 Xenon lamp luminous angle distribution setting

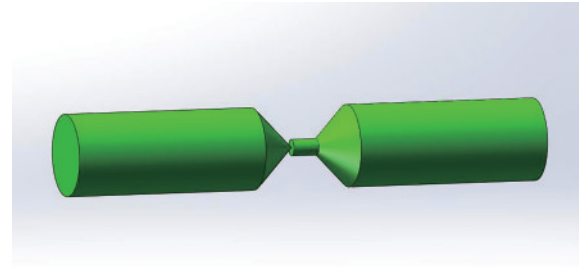


图 5 氙灯三维模型

Fig. 5 Xenon lamp 3D model

干涉膜,对可见光具有高反射率(>93%),对红外光具有高透射率(>75%),因此光源发出的光经聚光镜反射后主要为可见光(波长范围 400~780 nm)。在 TracePro 中建立椭球面聚光镜和平凸透镜的模型,主要参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 椭球面聚光镜主要参数

Table 2 Main parameters of ellipsoid condenser

unit: mm

First focal length $f_1$	Second focal length $f_2$	Exit pupil diameter	Vertex opening diameter	Height	Thickness
14	165	90	18	53	2

表 3 平凸透镜主要参数

Table 3 Main parameters of plano-convex lens unit:mm

Diameter	Focal length	Height	Edge thickness
150	310	24	4.5

### 3.2 氙灯轴向离焦的仿真分析

根据椭球镜的光学性质<sup>[9]</sup>,位于椭球镜第一焦点处的光源发出的光束经聚光镜反射后会聚在第二焦点处,聚光原理如图 6 所示。椭球镜第二焦平面处的辐照度分布会影响目标接收面的辐照度和辐照均匀性,可通过对氙灯进行轴向离焦<sup>[10]</sup>来改变第二焦平面处辐照分布。因氙灯发光形式的复杂性,难以通过理论计算得到其空间位置与光斑辐照度分布的关系,故采用 TracePro 软件模拟分析氙灯轴向离焦对光斑辐照度分布的影响。

在本节中,将光伏电池板置于椭球镜的第二焦平面处,定义光能利用率为第二焦平面处光伏电池接收的辐照功率与光源发出的辐照功率的比值。以 0.5 mm 为

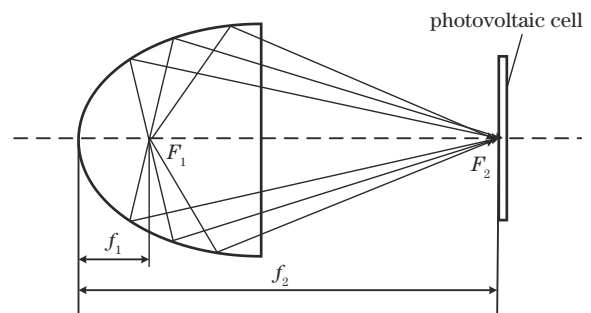


图 6 聚光原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of concentrating principle

步长对氙灯进行轴向离焦模拟,取椭球镜聚光方向为正,反之则为负,接收面上的光能利用率及光斑半径随光源离焦量的变化情况如图 7 所示。

从图 7 可以看出:光源轴向离焦量在 -3~+6 mm 之间时,光能利用率保持在 0.75 以上的较高水平;当负向离焦量超过 3 mm 或正向离焦量超过 6 mm 时,光

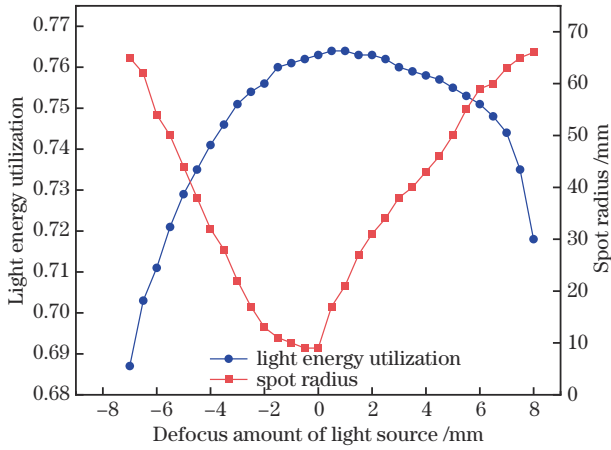


图7 光能利用率、光斑半径与光源离焦距的关系

Fig. 7 Relationship among light energy utilization, spot radius, and defocus amount of light source

能利用率开始迅速下降,这是由于离焦量增大导致部分光线经反射后没有入射到接收面上。还可以看出,氙灯位于第一焦点处时光斑会聚效果最好,随着轴向离焦量的增大,光斑半径整体呈线性增加。结合可见光无线传能系统要求,要保持光能利用率在较高水平,同时光斑面积应能全覆盖光伏电池,否则辐照严重不均,造成光电转换效率低下。

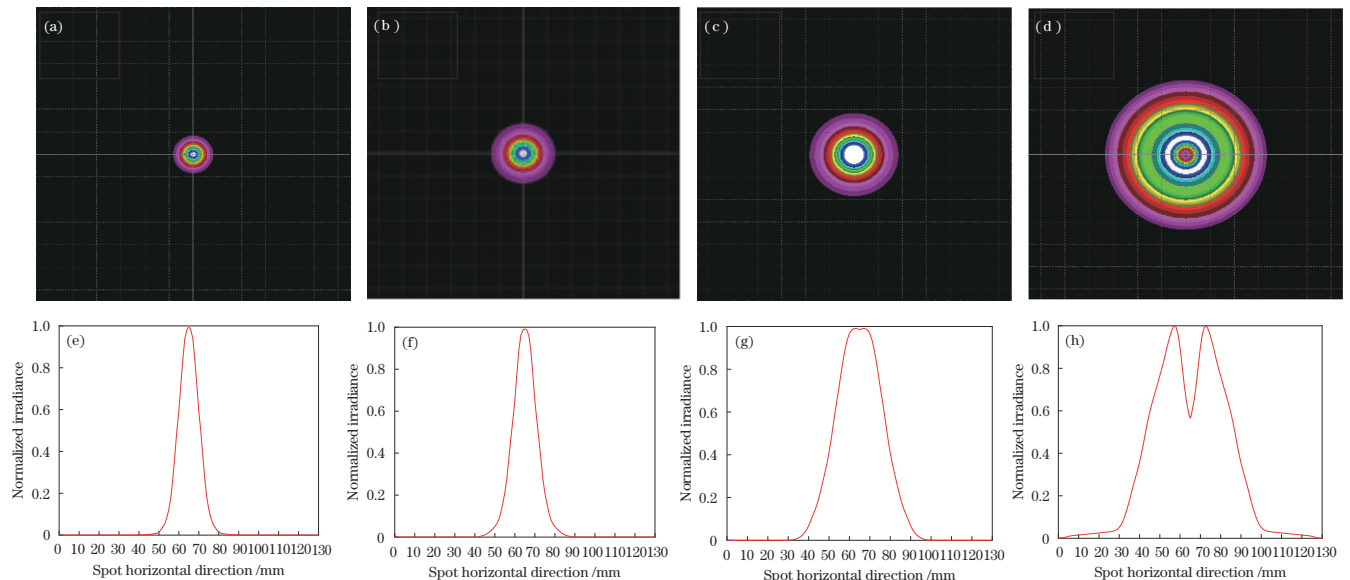
依次选取轴向离焦量 $-1\text{ mm}$ 、 $-2\text{ mm}$ 、 $-3\text{ mm}$ 、 $-4\text{ mm}$ 时接收面上的光斑及其径向能量分布,如图8所示。

从图8可以看出:当负向离焦量较小时,光斑能量呈高斯分布、中心处能量高,这是由椭球镜的聚光特性所致;当负向离焦量增大至 $3\text{ mm}$ 时,能量峰值曲线较

平稳、中心处能量分布较均匀,这种光斑有利于提高光电转换效率,且由图7可知,此时光能利用率较高;当负向离焦量继续增大至 $4\text{ mm}$ 时,接收面会产生一个中心与外部辐照度低、中间辐照度高的凹形分布光斑,这是因为偏离第一焦点的光源发射的部分光线经椭球镜反射后不再会聚于第二焦点处,而是落在第二焦点前方或后方,使得接收面中心辐照度较低、光斑的能量分布不均匀,且此时光能利用率降低。因此,当接收面位于第二焦平面处时,调节氙灯负向离焦量为 $3\text{ mm}$ 有利于获得能量分布较均匀的光斑,且光能利用率较高。

### 3.3 可见光无线传能系统的光学系统仿真分析

在上一节中仅使用椭球镜对光束进行会聚,由此得到的光束发散角较大,会造成光伏电池接收的辐照功率较低,可见光传能的传输距离受到很大限制。本节利用平凸透镜对光束聚光和准直,将透镜放置于椭球镜前方,调节平凸镜位置使椭球镜反射光斑与平凸镜大小一致,并保持氙灯、椭球镜和平凸透镜三者同轴,光学传输模型如图2所示。在本节中,为便于叙述,定义平凸透镜、光伏电池等元件相对于椭球镜顶点的距离为各元件的位置,定义光能利用率为光伏电池接收的辐照功率与光源发出的辐照功率的比值。在TracePro中模拟光伏电池接收面在不同位置变化时,有、无透镜光能利用率的变化趋势,结果如图9所示。可以看出,当接收面位置在 $0.5\sim 2\text{ m}$ 范围内时,有平凸透镜情况下光能利用率明显高于无平凸透镜。当可见光传播 $1\text{ m}$ 距离时,没有平凸透镜的情况下光能利用率接近零,而在有平凸透镜时仍有 $25\%$ 左右的光能利用率,说明该平凸透镜对光束有较好的会聚效果,有

图8 负向离焦对光斑的影响。(a)~(d)负向离焦 $1\text{ mm}$ 、 $2\text{ mm}$ 、 $3\text{ mm}$ 、 $4\text{ mm}$ 时接收面的光斑;(e)~(h)负向离焦 $1\text{ mm}$ 、 $2\text{ mm}$ 、 $3\text{ mm}$ 、 $4\text{ mm}$ 时光斑径向的能量分布Fig. 8 Effect of reverse defocusing on the light spot. (a)~(d) Spot on receiving surface when negative defocus is  $1\text{ mm}$ ,  $2\text{ mm}$ ,  $3\text{ mm}$ , and  $4\text{ mm}$ ; (e)~(h) radial energy distribution of light spot with negative defocus of  $1\text{ mm}$ ,  $2\text{ mm}$ ,  $3\text{ mm}$ , and  $4\text{ mm}$

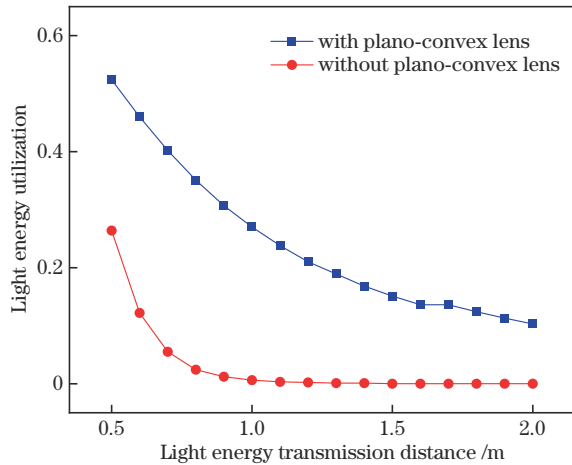


图9 有、无平凸透镜光能利用率的对比

Fig. 9 Comparison of light energy utilization rate with and without plano-convex lens

助于提高光伏电池接收到的光能。

根据 3.2 节的仿真分析结果,本节将氙灯置于轴向离焦 -3 mm 的位置,对平凸透镜位置进行调试,以提高系统的能量传输效果。将平凸透镜选取 6 个位置放置,分别为 0.35、0.40、0.45、0.50、0.55、0.60 m,测试不同接收距离下系统的光能利用率,仿真结果如图 10 所示。

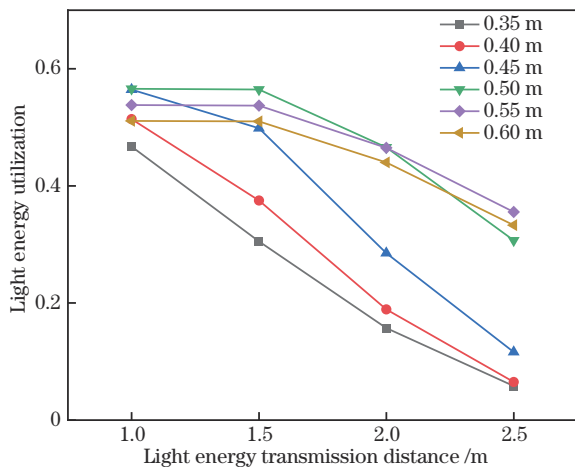


图 10 光能利用率与传输距离的关系

Fig. 10 Relationship between light energy utilization and transmission distance

从图 10 可以看出:当平凸透镜位置为 0.35、0.40、0.45 m 时,随着传能距离增大,系统光能利用率下降较快,在传能 2.5 m 时光能利用率已下降到 20% 以下;当平凸透镜位置为 0.50、0.55、0.60 m 时,随着传能距离增大,系统光能利用率下降较慢,可在一定传能距离内保持较高的光能利用率。因此,对于本文所要设计的可见光无线传能系统,将平凸透镜置于 0.50 m 位置附近可使光能利用率最高。

## 4 实验测试

搭建可见光无线传能系统,通过调节氙灯离焦量、平凸透镜位置,使光源发出的光经椭球镜反射、平凸透镜聚光后照射到正方形光伏电池板上,调节定电阻模式下电子负载的阻值使光伏电池输出最大电功率,实验现场如图 11 所示。测试结果表明:在使用聚光透镜的情况下,该系统在 1.5~2 m 距离内基本保持在 3.6 W 输出电功率;在不使用聚光透镜时,该系统在 1.5~2 m 距离内只能传输 0.36 W 电功率。对比聚光与不聚光的传能功率差异可知,聚光透镜在本实验中聚光作用明显,传能距离为 2 m 时可使传输功率提高至 10 倍左右,有效提高了可见光无线传能系统的能量传输效率。该系统在传能距离为 2 m 并产生最大功率时,透镜位置为 0.51 m,与 3.3 节的仿真结果比较吻合,证明了本文的光学模型构建方法的正确性。

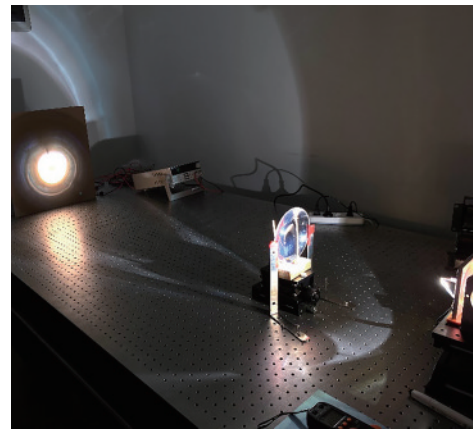


图 11 可见光无线传能系统测试

Fig. 11 Test of visible light wireless energy transmission system

## 5 结 论

本文提出了以可见光作为能量载体的中距离无线能量传输系统。通过光学系统设计,模拟并分析了氙灯轴向离焦、平凸透镜位移对接收面的光能利用率、光斑均匀性、光电转换效率的影响,为实现更大功率、更远距离、更高效率的可见光无线传能和变距离传输自动装置提供了依据。经过实验测试,所构建的系统实现了传能距离为 2 m、输出功率为 3.6 W 的无线能量传输。针对中距离、强电磁干扰等恶劣环境下的电力供应问题,本系统利用可见光实现数米距离的无线能量供给,有助于弥补当前无线供电的中距离盲区。本系统所用设备成本较低、易携带安装,具备工程实用性。为了进一步提高可见光无线传能效率和传输距离,减少光能损耗和光污染,还将进一步优化光学系统设计,开展光、热和结构耦合机理研究,及光学元件自动移位控制等方面的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547-1568.  
Xue M, Yang Q X, Zhang P C, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1547-1568.
- [2] Zhang Z, Pang H L, Georgiadis A, et al. Wireless power transfer: an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058.
- [3] 范兴明, 高琳琳, 莫小勇, 等. 无线电能传输技术的研究现状与应用综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1353-1380.  
Fan X M, Gao L L, Mo X Y, et al. Overview of research status and application of wireless power transmission technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1353-1380.
- [4] 陈韬, 朱永, 王宁, 等. 基于无线传感器网络的激光主动供能系统[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(11): 91-93, 96.  
Chen T, Zhu Y, Wang N, et al. Laser active power supply system for wireless sensor networks[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(11): 91-93, 96.
- [5] Tawfik M, Tonnellier X, Sansom C. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 802-813.
- [6] 杜志强, 张黎明, 司孝龙, 等. 大面积投影式太阳模拟器的光学设计[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0623003.  
Du Z Q, Zhang L M, Si X L, et al. Optical design of large-area projection solar simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0623003.
- [7] Esen V, Sağlam Ş, Oral B. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 77: 1240-1250.
- [8] 宋培宇. 高准直高辐照度太阳模拟器的设计与仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 38-41.  
Song P Y. Design and simulation analysis of solar simulator with high collimation and high irradiance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 38-41.
- [9] 苏拾, 孟凡琳, 张国玉, 等. 氙灯光源太阳模拟器辐照衰减器设计方法[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0208001.  
Su S, Meng F L, Zhang G Y, et al. Design method of irradiance attenuator for solar simulator of xenon lamp[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0208001.
- [10] 张嘉钰, 窦建秦, 牛虎利, 等. 太阳模拟器光源离焦对光斑的影响分析[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(6): 619-624.  
Zhang J Y, Dou J Q, Niu H L, et al. Analysis of influence on the solar simulator light source off-focus to the spot[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(6): 619-624.