

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005360

# 激光异物清理系统的光束发射系统设计\*

姜来 周洁 杨静琦 马喆  
(中国航天科工二院未来实验室 北京 100854)

**摘要:** 高压电网长距离传输线路经常飘落缠绕风筝塑料等异物需要及时清理,而人工异物清除方法存在较大安全隐患。激光具有发散角小、方向性高、高亮度的特点,是远距离非接触式电网异物清除的有效手段。为此在实验室搭建激光毁伤测试系统,测量典型电网异物清除阈值,依据测量结果设计了一种适用于户外使用的固定焦距光束发射系统,系统由3片分离式球面镜片组成,成像质量达到衍射极限,结构简单紧凑,长度仅有272 mm,重量小于48 g。根据设计结果,通过优化设计光源到透镜的距离,可实现系统在20~200 m工作距离调整。最终,采用物理光学传播功能模拟系统实际的使用情况,系统在发射基模高斯光束时,在各工作距离下光斑直径均小于9 mm,达到异物清除阈值,可实现对各类电网异物的有效清除。

**关键词:** 异物清除;光束发射系统;球面镜;衍射极限

中图分类号: TN24 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.2

## Beam emission system design of laser foreign body remover device

Jiang Lai Zhou Jie Yang Jingqi Ma Zhe  
(X LAB, The Second Academy of CASIC, Beijing 100854, China)

**Abstract:** High-voltage power lines are often wrapped in plastics and kites which need to be removed in time, however the existing manual removal methods exist potential safety hazard. Taking the advantage of small divergence angle, good directivity and high brightness of laser, foreign matter can be effectively and contactless cleaned up. The laser damage test system has been built to measure the damage threshold of typical foreign matters. According to the results of the experiment, a fixed focal length beam emission system has been designed, which consists of three separate spherical mirrors with simple and compact structure. The length of the system is 272 mm, and the weight is 48 g. The working distance of the system can be adjusted by changing the length between the laser source and lens. The system reaches the diffraction limit on the image quality. Base on the design, the system can remove foreign matters at distances from 20~200 m through optimizing the distance from the source to the lens. Simulation result shows that a fundamental Gaussian beam emitted by the system at difference distance has a target diameter less than 9 millimeters, ensuring the effectiveness of the system.

**Keywords:** foreign matter removal; beam emission system; spherical mirror; diffraction limit

## 0 引言

高压电线容易附着缠绕风筝、塑料袋、尼龙绳等异物,异物在雷雨大风等天气下会引发高压线路短路或损坏,造成供电网络瘫痪,带来巨大的经济损失<sup>[1-5]</sup>。为避免缠绕异物对高压电线造成不良影响,需及时清理高压电线上的异物,传统方法多为人工爬上杆塔进行清理、绝缘斗臂车升空摘取、无人机喷火清除等,存在安全隐患。激光具有发散角小、方向性高的特点,将激光发射并汇聚到远距离的目标,

当激光功率密度达到一定程度后可对目标进行烧蚀,保障了异物清理过程人员的安全,基于激光技术的电网异物清理系统应运而生。

光束发射系统是电网异物清理系统的重要组成部分,将激光光束汇聚到电网上的异物并对其进行烧蚀。发射系统设计主要分为反射式<sup>[6-9]</sup>和透射式两种<sup>[10-11]</sup>,反射式系统主要应用于卫星通信等大型高能激光系统,为保证系统性能镜面往往采用非球面,加工装调难度大,成本高;透射式系统为保证系统具备一定范围的作用距离,需采用变焦结

收稿日期:2020-11-15

\* 基金项目:国家自然科学基金(61179029)项目资助

• 26 •

构,传统的变焦系统由变倍组和补偿组组成,调焦时两组移动方向和移动速度不一定相同,调焦过程依靠复杂的变焦凸轮结构来保证,系统复杂成本高,此外自由度较大稳定性不高,为运输带来了不便。电网异物清理系统需要一种成本低、结构简单且稳定性高的光学发射系统。

为此,本文提出了一种定焦光束发射系统,系统由 3 片分离式球面透镜组成,结构简单、紧凑,成本低,由于 3 片透镜全部固定没有相对位移,其稳定性较于定焦透镜更高,便于运输。此外,系统可通过调整光源到透镜的距离实现工作距离的调节,实现 20~200 m 距离范围内异物的清理。

## 1 电网异物清理系统的光束发射系统

### 1.1 系统工作原理

图 1 所示为基于激光技术的电网异物清理系统,其主要结构为光纤激光器和光束发射系统组成。系统的工作流程为:光纤激光器生成功率激光,发射系统将激光进行扩束、发射并聚焦到异物上,对异物进行烧蚀。

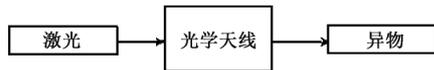


图 1 电网异物清理系统

### 1.2 设计输入

考虑到整个系统的便携性与实用性,电网异物清理系统选用工业级 250 W 的光纤激光器,其输出的高斯光束光腰直径 20  $\mu\text{m}$ ,发散角全角为 120 mrad,中心波长为 1 080 nm。

发射系统主要功能将激光进行扩束、发射并聚焦到异物上,若异物上光斑照射面积为  $S$ ,发射激光功率为  $P$ (单位 W),则照射异物的功率密度可用式(1)表示<sup>[12]</sup>。

$$I = \frac{P}{S} \quad (1)$$

式中:激光辐照的功率密度  $I$  单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$ ,设激光刚好开始烧蚀异物时的功率密度  $I$  为激光对该异物的清除阈值。

为探究电网异物的毁伤功率密度阈值,在实验室搭建了激光毁伤测试系统,测试激光对典型电网悬挂异物如风筝布、风筝线、气球、塑料袋等毁伤功率密度阈值,毁伤测试系统主要由 1 080 nm 光纤激光器、聚焦透镜、光功率计以及典型待测试电网异物组成,光功率计可测量激光功率和激光光斑直径。

在实验中,1)测量待测目标位置处激光功率密度,具体做法如图 2 所示,激光器输出激光的光纤头、透镜以及光功率计三者位置固定,调整激光器输出功率,测量此时激光功率密度值。2)如图 3 所示,将激光功率计移走,使得激光直接照射异物,测试异物在此功率密度的激光辐照下的是否出现烧蚀现象。若未发生烧蚀现象,重复上述步骤并增加

激光器输出功率,直至异物出现烧蚀现象并记录此时异物烧蚀的功率密度阈值。

实验结果表明,典型异物如风筝布、风筝线、气球、塑料袋等的有效毁伤功率密度阈值在 200  $\text{W}/\text{cm}^2$  左右。

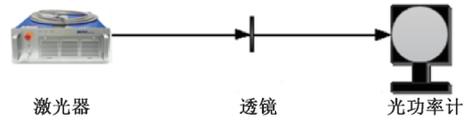


图 2 激光功率测量实验系统

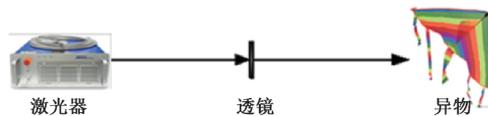


图 3 激光毁伤异物实验系统

根据式(1)计算,对于固定功率 250 W 光纤激光器,目标毁伤功率密度 200  $\text{W}/\text{cm}^2$  左右,若发射系统将光束聚焦在异物上的光斑直径为 1.3 cm 及以下即可实现对典型异物的有效毁伤。

因此可将光束聚焦在异物上最大光斑直径 1.3 cm 作为光束发射系统的设计输入参数。对于发射系统,高斯光束光腰直径 20  $\mu\text{m}$  可视作物方高度  $y$ ,光斑直径 1.3 cm 可视为像方高度  $y'$ ,根据垂轴放大率公式<sup>[13]</sup>:

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (2)$$

式中: $\beta$  为垂轴放大率; $y'$  为像方高度; $y$  为物方高度,可知系统的垂轴放大率为 650。

此外,垂轴放大率公式还可表示为:

$$\beta = \frac{l'}{l} \quad (3)$$

式中: $l$  表示物方距离; $l'$  表示像方距离。

根据实际应用环境,电网异物的距离在 20~200 m 之间,选取最远的 200 m 作为像方距离,根据高斯公式:

$$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1 \quad (4)$$

式中: $f$  表示物方焦距; $f'$  表示像方物距,可以求得发射系统的焦距  $f'$  应高于 307.7 mm,考虑到系统的冗余选取焦距  $f' = 340$  mm。

### 1.3 系统的设计

根据 1.2 节获得了一些光束发射系统设计的输入,此外考虑到系统的实用性,光学系统应该具有紧凑、便携的特点,因此设计前将系统的长度限定在 30 cm 之内,光学系统的最大口径  $< 5$  cm。至此,获得了光束发射系统的全部设计输入,如表 1 所示。

为保证系统结构简单稳定,选用 3 片分离式物镜定焦镜头作为初始结构,根据表 1 的设计要求,使用光学设计软件 Zemax 进行优化设计,具体步骤为:

表 1 光束发射系统设计的具体参数

参数	目标
Wave length/nm	1 080
Entrance diameter/ $\mu\text{m}$	20
Exit diameter/cm	<1.3
Effective focal length/mm	340
Divergence/mrad	60
Work distance/m	20~200
System maximum size/mm	50
System maximum length/mm	300

1)选取 3 片分离式物镜,考虑到光源能量较大,3 片镜子中离光源最近的一片透镜选用凹镜将入射光束发散,其他两片透镜为凸镜,系统的焦距为 340 mm,入瞳直径为 50 mm;

2)将上述结构设为初始结构,优化时采用反向设计,即实际使用时的出射光束的方向在设计时为入射方向;

3)将系统的波前和有效焦距设为目标函数,优化系统的曲率;

4)调整透镜的厚度、距离、透镜的尺寸,调整后继续步骤 3),尽量使系统紧凑、便携。

经过优化,最终得到了有效焦距为 340.8 mm,工作距离 190 mm 的,口径为 42 mm 的球面光束发射系统,如图 4 所示。

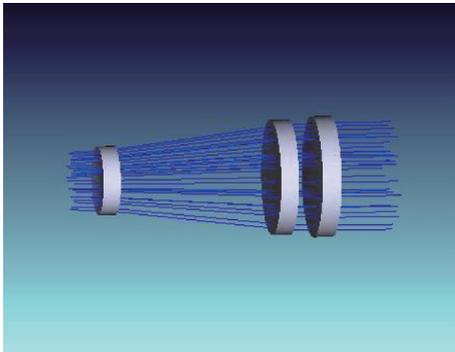


图 4 光束发射系统

## 2 设计结果

经过 1.3 所述对系统进行优化,最终得到如表 2 所示的系统结构,经计算整个系统的总重量仅为 47.5 g。

图 5 所示为光束发射系统的调制传递函数(modulation transverse function)曲线<sup>[14-15]</sup>,实际调制传递函数曲线与衍射极限曲线重合,成像质量优异。光发射系统如图 6 所示。

根据式(2)~(4),系统改变物方距离,其像方距离和像的大小(本文为光斑大小)也会改变,通过调节光源到第一片镜子之间的距离  $L$ ,可以改变相应的像方距离  $Z$  和像的

表 2 光束发射系统的具体参数

平面类型	曲率/mm	厚度/mm	玻璃	半口径/mm
1 Standard	215.28	8	Silica	12
2 Standard	-606.15	6		12
3 Standard	177.44	8	Silica	20
4 Standard	Infinity	55		20
5 Standard	-205.84	5	Silica	21
6 Standard	106.77	190		21

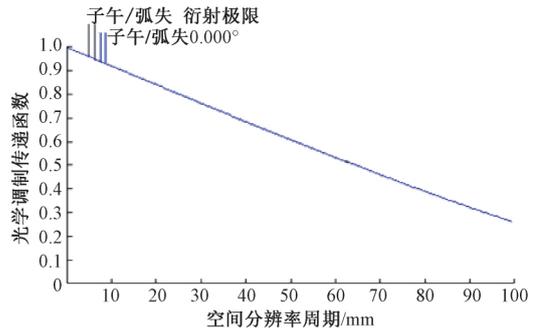


图 5 光束发射系统的调制传递函数

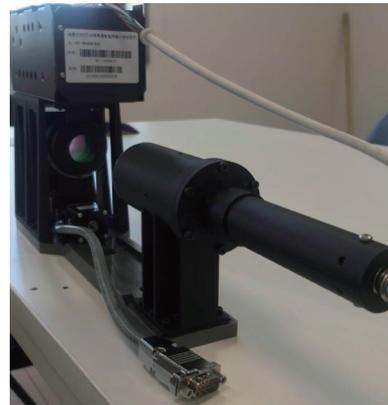


图 6 初步加工的光束发射系统实物

大小。根据系统结构,求得像方距离  $Z$  随光源到第一片镜子之间的距离  $L$  之间的对应关系,并绘制了相应的变化曲线(方形标志),同时为了方便系统使用,对该曲线进行了拟合(圆形标志)。拟合得到的方程如式(5)所示。实际曲线和拟合曲线的结果如图 7 所示,从图 7 中可以看出对于 20~200 m 的发射系统的调节范围为 5.4 mm 左右。

$$Z = 126.5L^{-1.021} + 190 \tag{5}$$

通过几何追迹模拟了不同距离处的光斑直径,视场设为物方高度为 0.7 以及 10  $\mu\text{m}$ ,发散角半角设为 60 mrad,图 8 所示为 20、50、100、150、180 以及 200 m 几个典型作用距离下的足迹分析。此外绘制了光斑直径随像面距离的变化曲线,如图 9 所示,光斑在 200 m 处最大为 13 mm 左右,

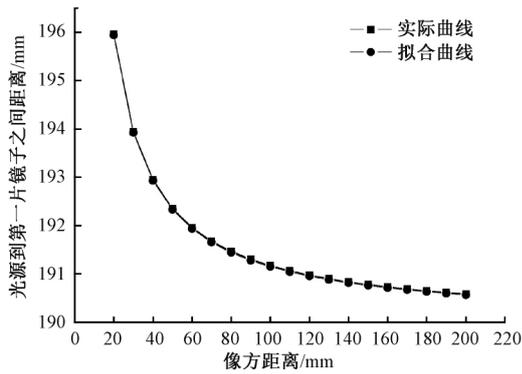


图 7 像方距离  $Z$  随光源到第 1 片镜子之间距离  $L$  的实际曲线(方形标志)以及拟合曲线(圆形标志)

在其他距离光斑直径在 2~13 mm 之间。

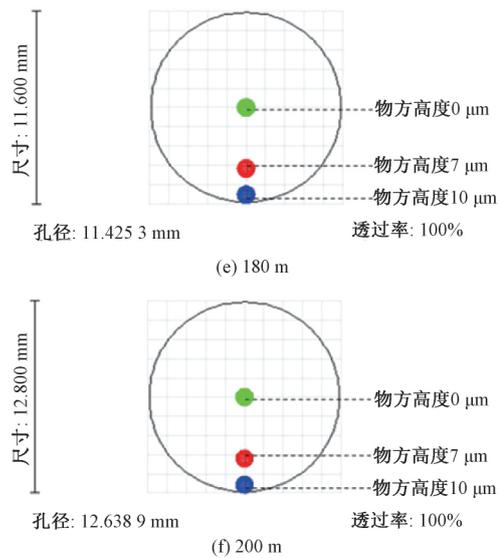
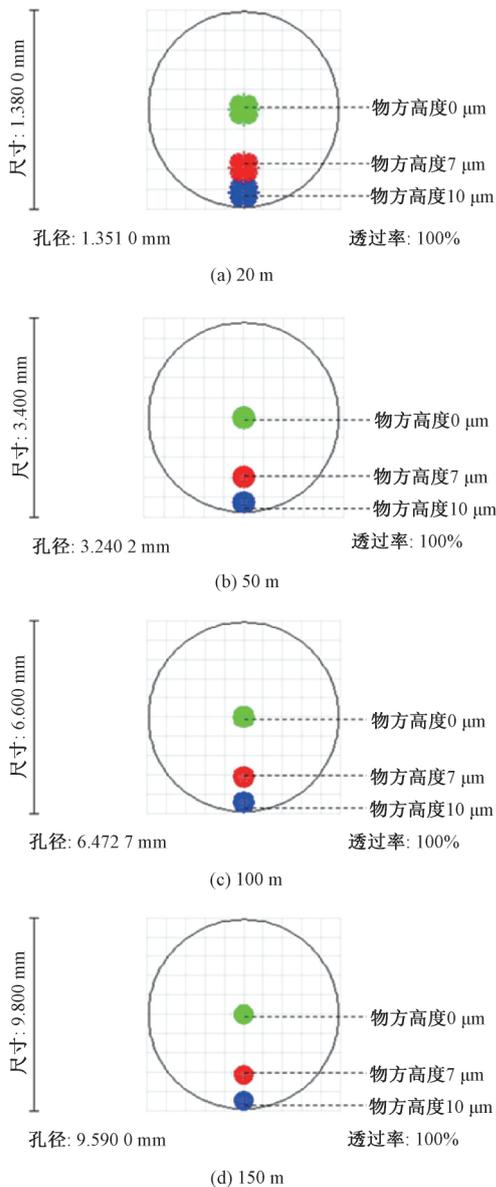


图 8 光束发射系统发射光腰直径  $20 \mu\text{m}$ , 发散角半角为  $60 \text{ mrad}$ , 视场为物方高度为  $0, 7$  以及  $10 \mu\text{m}$ , 在  $20, 50, 100, 150, 180$  以及  $200 \text{ m}$  处的光斑直径

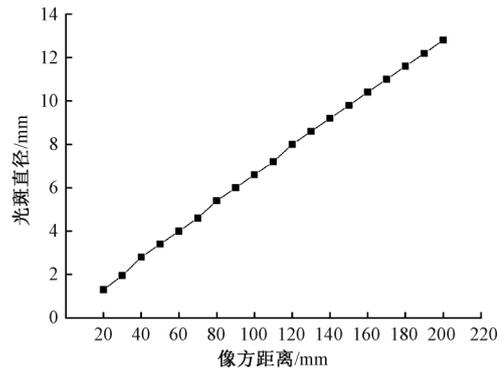
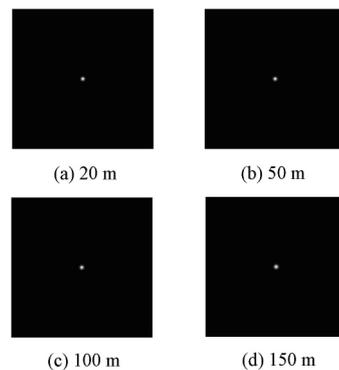


图 9 几何光学计算  $20 \sim 200 \text{ m}$  距离处的光斑直径

同时使用物理光学传播模拟光源为高斯光束经过并汇聚于焦平面上的远场光斑分布。光斑分布如图 10 所示, 图 11 为光斑直径随像面距离的变化曲线, 可以看出在  $20 \sim 200 \text{ m}$  像面处光斑直径不大于  $9 \text{ mm}$ , 系统发射基膜高斯光束的效果更好。



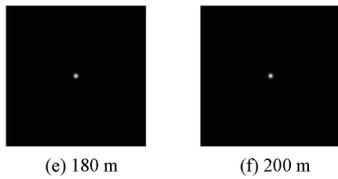


图 10 光束发射系统发射光腰直径  $20\ \mu\text{m}$  的基模高斯光束在 20、50、100、150、180 以及 200 m 处的光斑分布

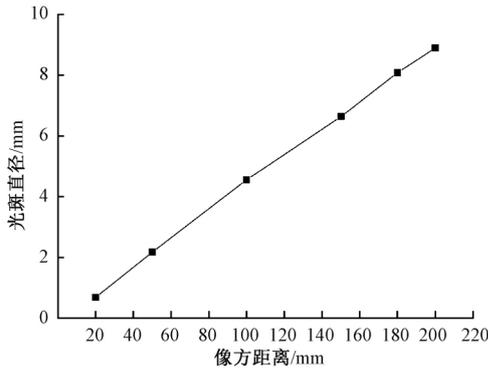


图 11 物理光学计算 20~200 m 距离处的光斑直径

### 3 结 论

本文设计了一种电网异物清理系统的光束发射系统,结构简单紧凑,长度仅有 272 mm,重量不足 48 g,系统由 3 片分离式球面镜片组成,成像质量达到衍射极限,通过几何光线追迹方法得到发射系统发射光腰直径  $20\ \mu\text{m}$ ,发散角半角为 60 mrad,中心波长为 1 080 nm 的光束,在 20~200 m 的像面距离,光斑直径均小于 13 mm;采用物理光学传播功能模拟更加实际的使用情况,系统发射基模高斯光束,在 20~200 m 的像面距离,光斑直径均小于 9 mm。综上,本文设计的光束发射系统工作距离在 20~200 m,作用范围达到 180 m,具有便携性和紧凑性等优点,使用 250 W 功率激光器,即可实现对典型异物的有效烧蚀。

### 参考文献

[1] 黄俊波,蔡澍雨,贾永祥. 基于虚拟现实技术在无人机巡检输电线路的研究[J]. 电子测量技术,2020,43(8): 38-41.

- [2] 何常根. 新疆输电线路在线监测设备供电可靠性研究[J]. 电子测量技术,2019,42(10):12-15.
- [3] 周丹红,郭昆丽. 500 kV 交流输电线路下金属体尺寸对暂态电击水平的影响研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(3):118-123.
- [4] 李晓艳,张金波,张腾龙,等. 高压铁塔接地电阻远程在线监测系统研究与设计[J]. 电子测量技术,2019,42(16):37-42.
- [5] 宋伟,左丹,邓邦飞,等. 高压输电线防震锤锈蚀缺陷检测[J]. 仪器仪表学报,2016,37(S1):113-117.
- [6] 张涛,付强,李亚红,等. 多平台激光通信组网共焦点反射式光学天线设计[J]. 光学学报,2015,35(10): 220-226.
- [7] 陈雪. 大口径卡塞格伦光学天线结构优化与光传输特性研究[D]. 成都:电子科技大学,2014.
- [8] 何文森,杨华军,江萍. 卡塞格伦光学天线光传输特性研究[J]. 激光与红外,2014,44(3):280-284.
- [9] 杜继东. 卫星光通信光学天线光机系统设计及自重形变的有限元分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [10] 郑大勇. 半导体激光引信发射系统研究[D]. 长春:长春理工大学,2011.
- [11] 张学彬,唐义,崔璐,等. 用于移动可见光通信的球面型可变焦光学接收天线[J]. 光学学报,2016,36(1): 65-72.
- [12] 苏毅,万敏. 高能激光系统[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [13] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2003.
- [14] 杜康,刘春雨,谢运强,等. 基于非球面的大相对孔径微型星敏感器镜头设计[J]. 仪器仪表学报,2019,40(6): 96-103.
- [15] 乔卫东,李跃,郭梁. 航空航天相机成像性能测试系统研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(9):9-16.

### 作者简介

姜来,硕士,主要研究方向为新概念系统设计、光学系统设计等。

E-mail:356212500@qq.com

马喆(通信作者),博士,研究员,主要研究方向为新概念无人装备、发展战略与体系等。

E-mail:mazhe\_thu@163.com