

doi:10.3788/gzxb20184708.0822001

激光除冰光学系统的设计与参数分析

刘智颖¹, 穆竺¹, 王加科¹, 常征², 刘金²

(1 长春理工大学 光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022)

(2 湖北三江航天红阳机电有限公司, 湖北 孝感 432000)

摘要: 基于实际激光除冰过程对光斑尺寸与作用距离的需求, 根据激光器功率与抗激光损伤阈值的工艺参数, 确定激光除冰光学系统的纵向长度与横向尺寸, 据此设计了作用距离为 100~500 m 且光斑尺寸为 200~600 mm 可调的抗高功率损伤光学系统. 针对激光作用距离、光斑尺寸与调焦距离的关系曲线进行了理论计算与模拟仿真, 仿真结果表明系统可实现所需的作用距离与光斑, 并经实际样机实验得以验证.

关键词: 光学设计; 激光除冰; 参数计算; 作用距离; 光斑尺寸

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)08-0822001-7

Design and Parameter Analysis of Laser Deicing Optical System

LIU Zhi-ying¹, MU Zhu¹, WANG Jia-ke¹, CHANG Zheng², LIU Jin²

(1 Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Hubei Hongyang Sanjiang Aerospace electromechanical Co Ltd, Xiaogan, HuBei 432000, China)

Abstract: Based on the actual requirements of laser deicing process on the spot size and the action distance, the length and transverse dimensions of the laser deicing optical system are calculated according to the process parameters of laser power and anti-laser damage threshold. Then, the adjustable focusing optical system of high power damage with 100~500 m action distance and 200~600 mm spot size is designed. Focusing on the relationship between action distance, spot size and adjustment focusing distance, the theoretical calculation and simulation are carried out. The simulation results show that this system can achieve the desired adjustable distance and spot, which is verified by actual prototype experiments.

Key words: Optical design; Laser deicing; Parameter calculation; Action distance; Spot size

OCIS Codes: 220.3620; 140.3460; 060.3510; 080.1753; 160.4670

0 引言

随着人们保护生态环境意识的提升, 风能作为替代传统能源的清洁能源之一, 近年来在我国发展迅猛. 然而我国风场大多分布在寒冷的北方, 风电叶片覆冰的问题在很大程度上会限制风力发电的发展速度. 风电叶片是风力发电机组的动力源泉, 是其关键部件之一, 叶片状态的好坏将直接影响整机的性能和发电效率^[1]. 低温条件下, 风电叶片表面一旦结冰, 将缩短叶片使用寿命, 致使叶片质量分布不均引发机械故障甚至停机. 调查数据显示瑞典某风场在 1998~2003 年一共停机维修 1 337 次, 其中 92 次停机事故是由于低温气候造成的 (停机时间为 8 022 h), 在低温气候造成的停机事故中大部分 (停机时间为 7 353 h) 是由于叶片覆

基金项目: 国家自然科学基金(No.11474037)资助

第一作者: 刘智颖(1981—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学设计与检测等. Email: lzyc@ccit.com

收稿日期: 2018-03-05; 录用日期: 2018-05-25

<http://www.photon.ac.cn>

冰造成的^[2-3].另一方面结冰叶片的空气动力学会受到破坏,导致叶片受风能力下降^[4].冰层在叶片表面的初期堆积会引起表面粗糙度的增加,使得生产效率大幅下降.除此之外,叶片运转过程中在重力和离心力作用下,冰层粘附力下降极易出现冰块脱落,对周围人员设备造成伤害,影响日常生活.因此,对风电叶片除冰技术的研究非常有必要.

目前国内常用的叶片除冰方法可分为主动型和被动型,被动型常见的有溶液除冰、机械除冰和热能除冰,主动型一般采用涂层除冰^[5].但现有融除冰技术方法尚未完善,仍存在很多缺点,如能耗太高、技术不成熟、安全性不高、操作繁琐、除冰效率太低等.激光除冰技术应运而生,具有很多其他除冰方式不能比拟的优势,可利用激光的方向性好、能量定向传输效率高、非接触式作用等优点,在不停机情况下快速除去叶片表面的冰层^[6-8],与冬季正午最高温度及太阳辐射强度(377 W/m^2)^[9]进行比较,激光除冰的速度要远远超过太阳光自然照射融冰的速度,具有广泛的应用前景.

为满足不同除冰现场的实际需求,激光除冰系统应具备可调节功能,以实现在不同作用距离下不同尺寸光斑的出射.对此本文设计了作用距离与光斑尺寸可调的激光除冰系统,并具体计算分析了作用距离、光斑尺寸与调焦距离的关系.

1 光学系统的设计与分析

1.1 光学系统参数计算

在激光除冰系统中,需要使用高功率激光器,光学元件及风电叶片能否承受高功率激光是一个关键问题,其损伤阈值由最高可承受的激光功率密度表示,即

$$E = \frac{P}{\pi \cdot (D_s/2)^2} \quad (1)$$

式中, P 为激光功率, D_s 为光斑直径, E 为激光功率密度.对于系统激光功率的确定,通过前期充分实验得到当激光功率为 $2\,000 \text{ W}$ 时,作用在同一点的时间不超过 4 min 即可在不损伤叶片及镜片的前提下实现除去厚度为 8 mm 、直径为 200 mm 的冰层.最终确定 $2\,000 \text{ W}$ 功率激光可同时被光学元件及风电叶片所承受,经计算得到光学元件对应可承受激光功率密度为 $2\,546.5 \text{ W/cm}^2$.设计过程中,预留 $2\sim 3$ 倍的安全系数,确保光学元件在高斯光束中心较高功率密度区域不被损坏,最终确定光学元件尺寸为 $\varphi 30 \text{ mm}$,同时匹配发射激光器光纤数值孔径为 0.05 ,可计算光学系统焦距为

$$f' = \frac{D_T}{2NA} = \frac{30 \text{ mm}}{0.1} = 300 \text{ mm} \quad (2)$$

式中, D_T 为光学元件通光孔径, NA 为激光器光纤数值孔径.

1.2 光学系统设计及像质评价

根据光在纯冰中的吸收系数,得到近红外波段光吸收系数较为合适,从中选择吸收率较高的波长^[10],随着波长的增加,波束扩展效应与受到的大气衰减都会减小^[11],因此选用市面上常见的 $1\,080 \text{ nm}$ 激光器,最终确定激光除冰光学系统的输入参数如表1所示.根据抗高功率激光选材原则,由于熔石英材料具有热膨胀系数小、高温蠕变小、热稳定性好、激光透过率高、激光损伤阈值高且抗热震性能良好等优良物理特性,所以系统最终选定熔石英玻璃作为材料,其性能指标及温度条件见表2^[12-13].

表1 光学系统输入参数

Table 1 Input parameters of the optical system

Wavelength/nm	Core diameter of fiber/ μm	Numerical aperture of fiber	Focal length/mm	Power/W
1 080	100	0.05	300	2000

表2 熔石英材料的性能指标

Table 2 Performance indicators of fused silica material

Specific heat/ ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Thermal expansion coefficient ($0\sim 1\,200^\circ\text{C}$)/ K^{-1}	Thermal conductivity (400°C)/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Melting point/ $^\circ\text{C}$	Mohs hardness
750	5.4×10^{-7}	1.951	1 713	7

首先将系统倒置进行初步设计,得到系统光路如图1所示.由于激光系统为单色系统且视场不大,不需

要考虑色差和轴外像差,可重点分析轴上像差,主要考察由球差产生的发散角变化对远距离光斑尺寸的影响^[14],根据光斑尺寸10%的精度要求,计算得到球差约束需要小于0.007 5 mm.倒置光学系统设计后球差曲线如图2所示,在全孔径下最大球差为0.002 02 mm,满足要求.



图1 倒置光学系统光路
Fig.1 Optical path of inverted optical system

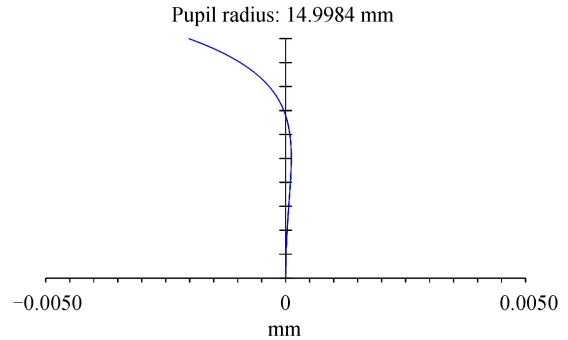


图2 倒置光学系统球差曲线
Fig.2 Spherical aberration curve of the inverted optical system

1.3 调焦距离计算

倒置光学系统设计完成后,以点光源模拟激光器的方式对除冰系统出射作用距离与光斑尺寸进行模拟与评估.通过调节激光器与光学系统之间的距离(调焦距离)在不同作用距离下得到不同尺寸光斑,以满足实际激光除冰过程中的作用距离与除冰面积.根据几何光学中的牛顿成像公式及图3所示各参量几何关系^[15],计算调焦距离 x 分析,即

$$xx' = ff' \tag{3}$$

$$x = \frac{ff' \cdot (D_s - D_T)}{D_T \cdot L + (D_s - D_T) \cdot f'} \tag{4}$$

式中, L 为作用距离, D_s 为光斑直径, D_T 为光学元件通光孔径, f 为系统的物方焦距, f' 为系统的像方焦距.

至此,光学系统设计完成,其光路如图4所示,可实现100~500 m作用距离下,200~600 mm光斑尺寸可调.图5为调焦距离分别在1.70 mm、2.48 mm、3.25 mm、4.02 mm、4.78 mm和5.55 mm,作用距离300 m下直径分别为200 mm、280 mm、360 mm、440 mm、520 mm和600 mm的激光光斑.

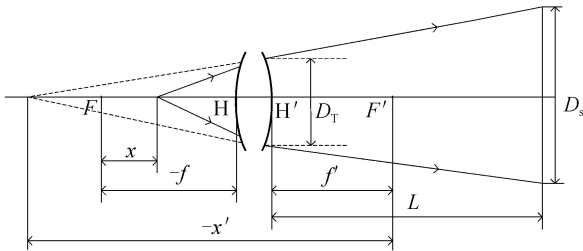
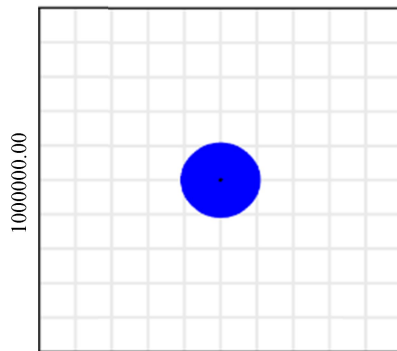


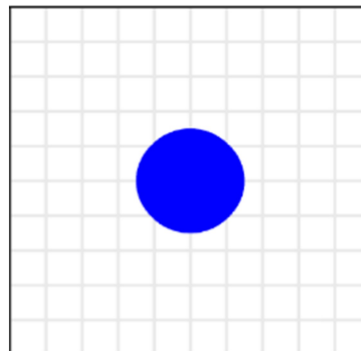
图3 各参量几何关系
Fig.3 Geometric relationship between the parameters



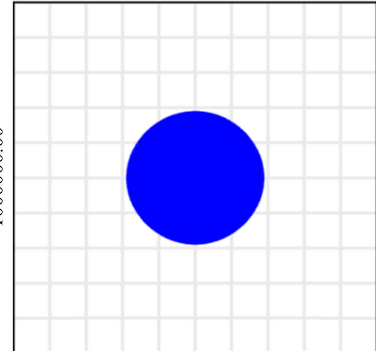
图4 光学系统光路
Fig.4 Optical path of the optical system



(a) $\phi 200$ mm, $x=1.70$ mm



(b) $\phi 280$ mm, $x=2.48$ mm



(c) $\phi 360$ mm, $x=3.25$ mm

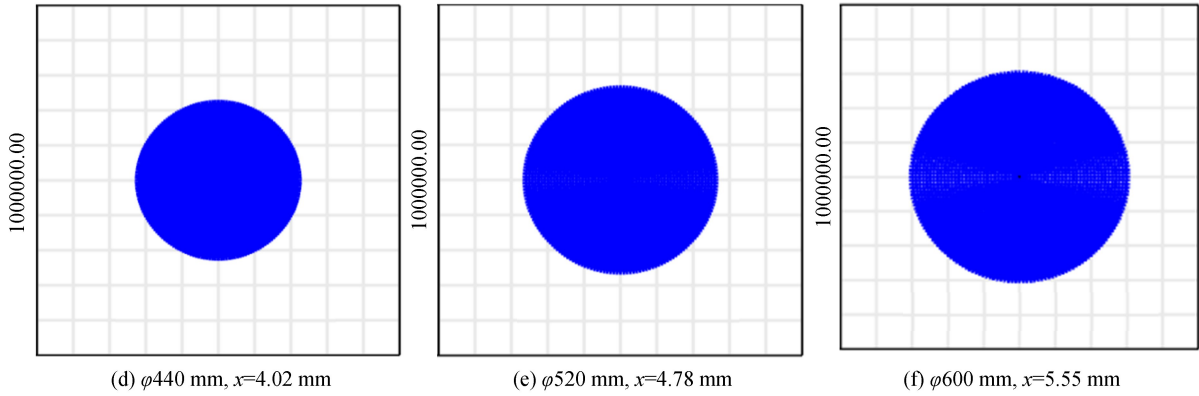


图 5 300 m 作用距离下光斑模拟图

Fig.5 Simulation of spot under 300 m action distance

2 作用距离及光斑尺寸与调焦距离关系曲线分析

由式(4)对 D_s 求导得

$$\frac{\delta x}{\delta D_s} = \frac{f \cdot f' \cdot D_T \cdot L}{[D_T \cdot L + (D_s - D_T) \cdot f']^2} \approx \frac{f \cdot f'}{D_T \cdot L} \quad (5)$$

当作用距离一定时光斑尺寸与调焦距离基本成线性关系,且线性关系的斜率随作用距离的增大而减小,考虑实际应用即在作用距离增加时,光斑尺寸在相同范围内变化,调焦浮动会变小.在某一固定作用距离下,分析光斑尺寸变化与调焦距离关系时,直接输入该线性关系即可.

由式(4)对 L 求导得

$$\frac{\delta x}{\delta L} = \frac{-f \cdot f' \cdot D_T \cdot (D_s - D_T)}{[D_T \cdot L + (D_s - D_T) \cdot f']^2} \quad (6)$$

当光斑尺寸一定时作用距离与调焦距离之间不再存在线性关系.所以当确定某一光斑尺寸,分析作用距离与调焦距离关系时,调焦距离与作用距离为曲线函数关系.

当给定某一作用距离与光斑尺寸时,可按照式(4)计算得出调焦距离 x .但由于调焦距离的变化会引起系统通光孔径的改变,具体分析如图6所示,对于同一激光出射角 θ ,当调焦距离为 x ,通光孔径将减小 $\theta \cdot x$,则实际通光孔径应修正为 $(D_T - \theta \cdot x)$,将修正后的通光孔径代入式(4),得到修正调焦距离 x_c 表达式为

$$x_c = [(D_T \cdot f' - D_s \cdot f' - D_T \cdot L + \theta \cdot f \cdot f') + \sqrt{(D_T \cdot f' - D_s \cdot f' - D_T \cdot L + \theta \cdot f \cdot f')^2 - 4\theta \cdot f \cdot f' (f' - L)(D_T - D_s)}] / [2\theta \cdot (f' - L)] \quad (7)$$

计算后将所需作用距离 L 及修正后的调焦距离 x_c 代入模拟分析软件 ZEMAX 中查看给定作用距离下光斑尺寸校验结果的正确性,最终整理代表性数据如表 3 所示.

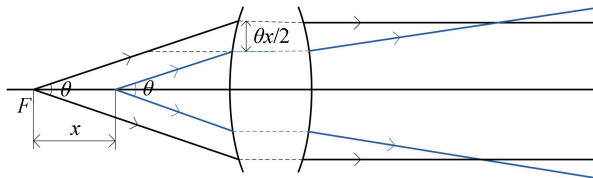


图 6 调焦距离的修正分析

Fig.6 Analysis of adjustment focusing distance correction

作用距离 100~500 m 之间以 50 m 为间隔进行数据划分,将其代入式(7),分别得到 9 条关系线如图 7 所示,同时分别对表 3 中的 9 行数据进行拟合,关系线与由式(7)获得的结果完全一致,验证了计算结果与仿真结果的一致性.在固定作用距离下,调焦距离与光斑直径基本成线性关系的结论得以验证,从图中可以看出作用距离会改变关系线的斜率和截距.

表 3 指定作用距离及特定光斑尺寸下的调焦距离数据

Table 3 Adjustment focusing distance data in the specified action distance and spot size

x/mm \ L/m	L/m										
D_s/mm	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
100	5.11	6.26	7.41	8.54	9.66	10.78	11.89	12.99	14.08	15.16	16.24
150	3.40	4.17	4.94	5.71	6.47	7.23	7.98	8.73	9.47	10.22	10.95
200	2.55	3.13	3.71	4.29	4.86	5.44	6.01	6.57	7.14	7.70	8.27
250	2.04	2.51	2.97	3.43	3.90	4.36	4.82	5.27	5.73	6.18	6.64
300	1.70	2.09	2.48	2.86	3.25	3.63	4.02	4.40	4.78	5.17	5.55
350	1.46	1.79	2.13	2.46	2.79	3.12	3.45	3.78	4.11	4.44	4.77
400	1.28	1.57	1.86	2.15	2.44	2.73	3.02	3.31	3.60	3.89	4.18
450	1.13	1.39	1.65	1.91	2.17	2.43	2.69	2.94	3.20	3.46	3.71
500	1.02	1.25	1.49	1.72	1.96	2.19	2.42	2.65	2.88	3.12	3.35

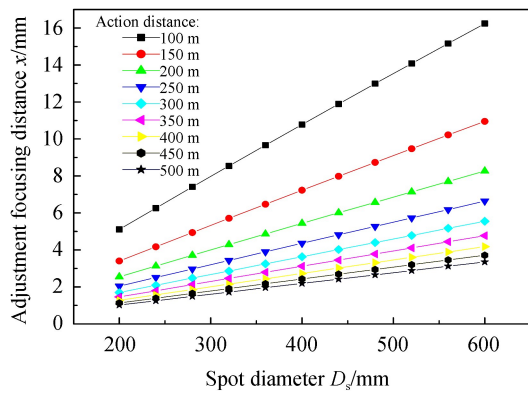


图 7 不同作用距离下光斑直径与调焦距离的关系曲线
Fig.7 Curves between the spot diameter and the adjustment focusing distance under different action distances

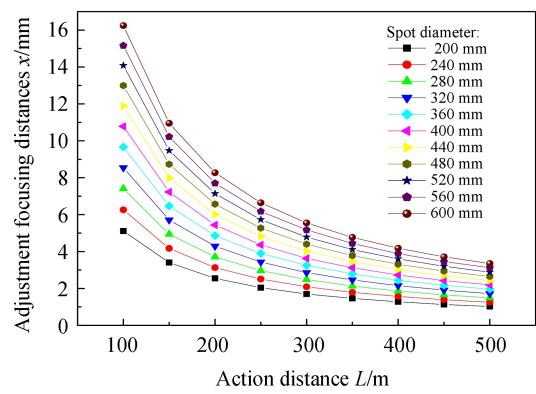


图 8 不同光斑直径下作用距离与调焦距离的关系曲线
Fig.8 Curves between the action distance and the adjustment focusing distance under different spot diameters

光斑尺寸 200~600 mm 之间以 40 mm 为间隔进行数据划分,将其代入式(7),分别得到 11 条关系曲线如图 8 所示,同时分别对表 3 中的 11 列数据进行拟合,关系曲线与由式(7)获得结果完全一致,验证了计算结果与仿真结果的一致性,同时也证实了当光斑尺寸一定,作用距离与调焦距离之间不存在线性关系的结论。

3 实验验证

由于激光传输距离在 100~500 m 时大气湍流对光斑尺寸的影响较小^[11],且大功率激光存在一定危险破坏性,选择空间可控的室内进行近距离等效实验对设计及计算结果进行验证。

在如图 9 实验样机的调节处理下,将复合钢板放置于 6 m 处接收光斑,通过软件控制调节系统相对位置



图 9 实验样机
Fig.9 Experimental prototype



图 10 直径为 16 mm 的光斑
Fig.10 16 mm diameter spot

得到 6 m 作用距离下不同尺寸光斑,光斑尺寸可按照图 10 方式测得,最终得到如图 11 所示的实验结果,记录不同光斑尺寸所对应的调焦距离,并与模拟调焦距离对比,整理数据见表 4.实验结果可验证图 7 的结论,在作用距离一定时,系统光斑直径与调焦距离成线性关系。



图 11 激光光斑

Fig.11 Pattern of the laser spot

表 4 6 m 作用距离下实验光斑的模拟调焦距离与实际调焦距离数据

Table 4 Theoretical adjustment focusing distance and the actual adjustment focusing distance data of experimental spot under 6 m action distance

Spot diameter/mm	13	16	20	24	32	42	50
Simulated adjustment focusing distance/mm	-8.95	-7.37	-5.26	-3.16	1.05	6.32	10.53
Experimental adjustment focusing distance/mm	-9.32	-7.84	-5.63	-3.54	0.68	5.95	10.16

图 12 所示为模拟结果与实验结果对比曲线,其中横坐标为光斑直径,纵坐标为调焦距离.通过对比可以发现实验结果与模拟结果大体一致,最大偏差为 6.38%,对于存在的偏差分析为:一是实验样机在加工过程中镜头参数存在偏差,使得焦距以及光学元件通光孔径发生改变;二是在实验过程中,作用距离以及光斑尺寸的度量可能存在一定偏差,使得实验调焦距离与模拟调焦距离不能完全吻合.针对表 4 数据发现误差值多数为 0.37 mm,很有规律,考虑由于光斑尺寸是在实验过程中测量得到,在测量过程中对于光斑边界的确定存在一定偏差,经计算分析得到测量光斑直径整体偏大约 0.7 mm.

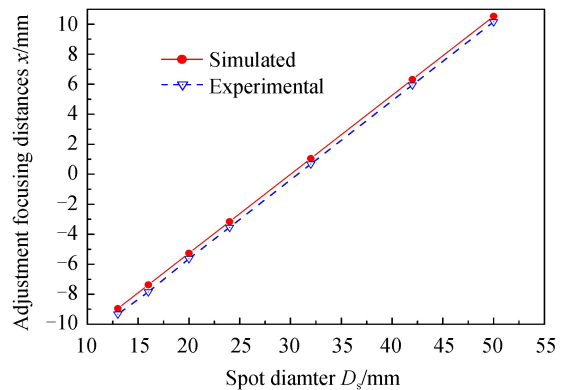


图 12 实验数据与模拟数据对比曲线

Fig.12 Comparison curve of experimental data and simulated data

4 结论

本文基于激光除冰过程中对除冰面积与作用距离的需求,根据抗激光损伤阈值的工艺参数,通过合理分配参数设计了作用距离及光斑可调的激光除冰光学系统,理论计算得到调焦距离与作用距离及光斑尺寸的函数表达式,通过 ZEMAX 软件模拟激光器出射光斑,分析了模拟调焦距离与计算调焦距离产生偏差的原因,并给出修正调焦距离的计算方法.除此之外,本文讨论了作用距离、光斑尺寸与调焦距离的曲线关系,并通过实验得以验证,进而表明该系统可满足激光除冰的参数需求,为激光除冰系统提供可行的数据参考。

参考文献

- [1] WANG Wei, HOU Xue-jie, GUAN Xiao-ying, *et al.* Research progress of wind blade deicing technology[J]. *The Composite Materials of FRP*, 2014, (1): 90-93.
王伟,侯学杰,管晓颖,等.风电叶片除冰技术的研究进展[J]. *玻璃钢复合材料*, 2014, (1): 90-93.
- [2] DALILI N, EDRISY A, CARRIVEAU R. A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13**(2): 428-438.
- [3] JASINSKI W, NOE S, SELIG M, *et al.* Wind turbine performance under icing conditions[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1998, **120**(1): 319-333.
- [4] VIRK M S, HOMOLA M C, NICKLASSONP J. Effect of rime ice accretion on aerodynamic characteristics of wind turbine blade profiles[J]. *Wind Engineering*, 2010, **34**(2): 207-218.
- [5] YAN Bo, XU Yan-yan. Study on the anti-icing scheme of fan blades[J]. *Agricultural Machinery of South China*, 2015, (1): 46-46.

- 晏波,徐燕燕. 风机叶片抗覆冰方案的研究[J]. 南方农机,2015,(1):46-46.
- [6] LIU Lei, ZHU Xiao. Research on laser deicing[J]. *Journal of Light Scattering*, 2006, **18**(4): 379-385.
刘磊,朱晓. 激光除冰研究[J]. 光散射学报,2006,**18**(4):379-385.
- [7] LU Hong, ZHU Hai-hong, CHENG Zu-hai. A pulse laser deicing method for field suspension lines; CN 101562321A [P]. 2009-10-21.
卢宏,朱海红,程祖海. 一种野外架空线路的脉冲激光除冰方法:中国,101562321A[P],2009-10-21.
- [8] ZHANG G X, CHEN S, XU S G, *et al.* Application and research of laser de-icing in power system [C]. Power Modulator and High Voltage Conference, IEEE, 2011:470-473.
- [9] ZHANG Xiao-yan. Experimental application of road solar energy utilization system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014:35-37.
张小燕. 道路太阳能利用系统的试验应用研究[D]. 天津:天津大学,2014:35-37.
- [10] ZHAO Yu-ming, ZHANG Gui-xin, LUO Bing, *et al.* The technology of high power semiconductor laser deicing[J]. *China Southern Power Grid*, 2011, **5** (5): 60-64.
赵宇明,张贵新,罗兵,等. 大功率半导体激光除冰技术[J]. 南方电网技术,2011,**5**(5):60-64.
- [11] WANG Yuan-bo. Laser atmospheric transmission characteristics and experimental research [D]. Xi'an: Xidian University, 2010:30-32.
王元博. 激光大气传输特性及实验研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010:30-32.
- [12] CHEN Yan. Study on low dielectric constant fused silica ceramic materials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 23-24.
陈艳. 低介电常数熔融石英陶瓷材料的研究[D]. 成都:电子科技大学,2010:23-24.
- [13] ZHONG Mian. Effects of irradiation on sapphire, fused silica and laser damage properties[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 22-23.
钟勉. 辐照对蓝宝石、熔石英光学和激光损伤特性的影响[D]. 成都:电子科技大学,2016:22-23.
- [14] WANG Feng, LIU De-sen. Analysis of spot size and aberration characteristics of self-focusing lenses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 830-833.
王风,刘德森. 自聚焦透镜的光斑尺寸与像差特性分析[J]. 光子学报,2007,**36**(5):830-833.
- [15] WANG Wen-sheng, LIU Dong-mei, XIANG Yang, *et al.* Applied optics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010: 44-45.
王文生,刘冬梅,向阳,等. 应用光学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2010:44-45.

Foundation item: The Natural Science Foundation of China(No.11474037)

引用格式:LIU Zhi-ying, MU Zhu, WANG Jia-ke, *et al.* Design and Parameter Analysis of Laser Deicing Optical System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0822001

刘智颖,穆竺,王加科,等.激光除冰光学系统的设计与参数分析[J].光子学报,2018,**47**(8):0822001