

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.02.006

激光清障技术在电网中的应用现状与发展

张志博¹, 王一波², 张梓奎¹, 王华伟³, 张贵新¹, 尤正军³

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. 国网浙江省电力有限公司湖州供电公司, 浙江 湖州 313000;

3. 浙江泰仑电力集团有限责任公司, 浙江 湖州 313000)

摘要:附着于输电线路上的各类障碍是电网安全稳定运行的重大威胁,传统的清障方法或存在安全隐患,或耗能较高,且大多需要停电处理,而激光能量高、准直性好,可用于远距离无接触击落异物或融化覆冰。因此,文中综述了激光清障技术在电网中的应用现状与发展,首先总结了激光清除异物、覆冰、树障等不同类型障碍的原理与应用;然后对比了常用于清障的几种激光器的特点;最后分析了激光波长、激光功率、光斑直径等参数对清障效率的影响,研究了激光照射导线、绝缘子时功率密度与照射时间的安全阈值问题。激光清障技术目前已被广泛应用于清除线路悬挂异物,但清除覆冰、树障等应用方向受限于清障效率、成本,仍有待进一步发展。文中所综述的此技术的相关研究与应用可为电气工程领域的技术人员提供参考。

关键词:激光;除冰;异物清除;激光清障;非接触清除;输电线路

中图分类号:TM726;TN249

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)02-0045-08

0 引言

随着我国经济的不断发展,电能在生产、生活中发挥着越来越大的作用,我国电网规模也有了极大的增长。截至2019年底,我国110 kV及以上的输电线路长度已经达到109.34万km,交流1000 kV和直流800 kV及以上的特高压输电线路长度也已达到了35 583 km^[1]。附着在输电线路上的各类障碍物成为输电设备尤其是高压输电线路安全工作、电力系统稳定运行的巨大威胁^[2]。

常见的线路障碍物包括塑料薄膜、鸟窝、覆冰、树障等。塑料薄膜等电网悬挂异物会缠绕导线与地线,可能引发相间短路故障;树障会使得高压线绝缘距离减小,可能造成放电,引起林区火灾;线路覆冰过重可能引起线路断裂,还可能造成绝缘子冰闪、导线舞动、设备损坏等后果^[2-4]。这些障碍物不仅会引发停电事故,造成电网损坏,还可能造成更大的间接经济损失。

近年来已有不少新闻报道了由线路障碍造成的严重事故。电网悬挂异物会对列车牵引线路形成重大威胁,2017年4月,上海地铁1号线因一个气球引发区段延误,造成了恶劣影响^[5]。我国是输电线路覆冰灾害最为严重的国家之一,覆冰事故持续时间长,覆盖面积大^[6]。2020年11月,东北高铁因雨雪天气导致的接触网覆冰而大范围停运,仅长

珲线就有近279 km线路受到影响^[7]。

对于电网悬挂异物,目前已有的处理方式包括停电作业法,利用绝缘软梯、屏蔽服、绝缘操作杆等简易工具的人工处理法及吊臂车处理法等^[8]。这些处理方法各有缺点,比如停电作业法会造成大量经济损失且有时间限制;人工处理法有较高的安全隐患且操作困难,处理过程受天气与线路结构影响;吊臂车处理法对道路条件要求较高,不适合在复杂地形中使用。其他方法如清障机器人、无人机、直升机等有技术不成熟、操作复杂、成本高昂等缺点,目前还无法大规模使用^[9-10]。

对于线路与绝缘子覆冰,传统的处理方式包括机械方法破冰、热方法融冰、混合除冰等。机械方法破冰通过刮铲或电脉冲使覆冰产生应力而脱落,热方法融冰通过回路中的电流热等方式使覆冰融化。但这些方法都有不足,热方法融冰能耗较高,而机械方法破冰虽然能耗较小,但除冰时需要中断电力供应,操作繁琐,效率不高^[11-13]。

近年来,高功率激光器技术发展迅速,实验室中的半导体激光器巴条输出最大达到上千瓦,光电转换效率达到60%~70%,光纤激光器功率最大也达到千瓦级^[14-15]。使用激光处理线路障碍作为一种新型方案,具有无接触、速度快、准确度高等优点,在不停电的情况下也能从地面准确高效地清除输电线路上的障碍物。此方法能明显降低人力、物力成本,提升作业的安全性,具有极大的发展与应用前景。

收稿日期:2021-10-27;修回日期:2022-01-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900802)

文中介绍了利用高功率激光器清除电网中常见障碍物的基本原理,综述了国内相关领域的研究与应用;总结了激光器波长、激光功率、光斑直径等参数对于清障效果的影响,分析了清障过程中激光是否会对导线、绝缘子等设备造成影响,以供电气工程领域的技术人员参考。

1 激光清障技术原理、研究与应用现状

激光清障技术的基本原理为激光与材料的相互作用。激光对材料的作用是光的高频电磁场与材料中电子相互作用的结果,激光的波长、功率等参数与材料自身属性的不同,其作用效果也会有很大不同。当激光波长位于红外区时,激光照射障碍物常发生激光热蒸发效应,使得障碍物温度升高至熔化、蒸发,若障碍物的内部产生较大温差,还可能产生热应力。激光清障技术正是利用此特性实现了熔穿、切割异物或融化覆冰^[16-17]。

目前激光清障技术的应用主要集中在3个方面:清除电网悬挂异物、清除绝缘子与导线上的覆冰、清除树障。文中将分别对其原理、研究与应用现状作简要介绍。

1.1 激光清除电网悬挂异物

1.1.1 激光清除电网悬挂异物的原理与研究现状

电网悬挂异物通常为非金属材料即塑料和化纤制品,包括塑料薄膜、风筝、风筝线、广告布等,下文统称为“异物”。异物一般通过绕圈、重力支撑、黏附3种方式与输配电线、地线接触纠缠。激光清除异物的基本原理为发射激光远程作用于缠挂或黏附部位,利用激光的热效应使异物熔化并将其击落^[18]。

相比另外2种障碍物,异物的组成类型较为复杂,不同波长的激光对于不同类型、不同颜色的异物吸收率不同,这要求在设计清障仪时选择波长合适的激光器,文献[19—20]对比了光纤激光器、半导体激光器、CO₂激光器等常见激光器对不同异物的清除效果。不同类型、厚度的异物熔穿所需的激光功率密度也不同,这要求激光器发射的激光功率密度必须达到某一阈值才能快速熔穿绝大多数的异物。由于异物通常缠绕在输电线路上,照射异物的同时会不可避免地加热导线,因此必须控制激光功率密度与照射时间以免对导线造成损伤,文献[18, 21—22]针对这些问题进行了理论仿真与实验。

激光异物清除装置主要包括激光器、光束准直系统、瞄准系统、控制系统、安全防护装置等部分,

文献[23—24]主要关注激光清障原理分析与清障仪整体结构设计,而文献[25—27]主要针对光学系统、瞄准系统、控制系统等辅助装置进行设计。

目前激光清障仪所采用的激光功率多为100~300 W,若激光误操作照射到人体,可能会对人体造成伤害,因此有学者提出了一些安全防护装置的构想^[27]。在使用激光器时,可以在周围放置超声波传感器或红外传感器用于周界监视,当有人或动物通过时,则控制激光停止出光;在电动云台中放置传感器,当设备倾倒超过某一角度时,则控制激光停止出光。燃烧、脱落的异物通常带有余温,使用过程中还须注意火灾危险。

1.1.2 激光清除电网悬挂异物的应用现状

激光处理异物技术近年来已在输电线路运行维护中投入应用。2016年,国网江苏省电力有限公司电力科学研究院研制了CO₂激光清障装置并用其清除了市区输电线路上缠绕的风筝线;2016年,东莞供电局使用激光清除9项线路飘挂物;2017年,浙江电网利用激光清障仪在92 m外清除了1 000 kV输电线路上悬挂的遮阳膜,耗时约30 s;河北电网、重庆电网、甘肃电力、湖南电力等也都开始使用激光清除输电线路上的塑料膜、布条等异物^[18-19, 28]。这项技术大大提升了工作效率,降低了作业安全风险,避免了大量因停电造成的经济损失。

1.2 激光清除覆冰

1.2.1 激光除冰的原理与研究现状

激光清除覆冰的思路大体分为2种:一种是利用大功率脉冲激光照射导线和冰层截面,通过产生的应力波将覆冰震碎,中国物理研究院应用电子研究所曾进行过这方面的研究^[29],但这种设备十分笨重,无法应用于清除绝缘子覆冰且很可能对导线造成损害;另一种是利用激光的热效应加热冰层使其熔化,结合因温差产生的内部应力使冰层或冰柱脱落。相较而言,第二种方法更加实用。

激光波长是影响除冰效率的一大因素,这是因为激光波长会极大地影响激光在冰层中的穿透深度,从而影响除冰时的激光作用效应与除冰效果^[30]。除此之外,激光功率与光斑直径也是影响除冰效率的重要因素^[31]。清除绝缘子表面覆冰时,必须将激光功率密度与照射时间控制在一个安全阈值下,否则绝缘子可能糊化变色,甚至断裂^[32]。

美国、日本等早在上世纪就已开展了激光除冰的相关研究^[2, 33-34],而我国的相关研究相较国外起步较晚。2006年以来,华中科技大学使用CO₂激光与Nd:YAG激光器进行了一系列理论仿真与除冰

实验^[31-32,35-36];清华大学与南方电网公司技术研究中心合作进行了半导体激光器处理覆冰的研究,利用理论仿真与实验研究了激光波长、激光功率、光斑直径等参数对于处理效果的影响^[11,30,37-38];中国物理研究院也曾进行过相关研究^[29]。

1.2.2 激光除冰的应用现状

清华大学与南方电网科学研究院曾合作研制了1台总输出功率为300 W的半导体激光清障仪并进行了现场试验,试验结果如表1所示^[37]。

表1 现场除冰试验结果

设备	作业距离/mm	覆冰厚度/mm	除冰范围/mm	除冰时间/s
杆塔	450	14.7	223	122
绝缘子	108	30.1	150	120
导线	350	25.4	70	95

除冰效率与成本是制约激光除冰技术发展的关键,但由于能量消耗过大且处理效率低,目前很少直接利用激光清除导线与杆塔覆冰,更可行的应用方式是使用激光紧急处理绝缘子表面覆冰,防止绝缘子表面发生闪络放电。另外,作为尚未广泛使用的新技术,激光除冰对操作人员的技术水平要求也较高^[12]。也有文献认为,除了清除线路覆冰,还可将激光应用于去除风力发电机桨叶的表面覆冰^[26],但仍未有具体的相关研究。

1.3 激光清除树障

树障一直是阻碍线路安全运行的重大隐患,传统的人工砍伐方法工作量大、工作效率低,且在作业过程中可能引起线路跳闸与人员受伤。利用激光作用于物质的热效应与力学效应,并使用合适波长与功率的激光可将树障切断或烧蚀损毁^[4]。与异物清除不同的是,清除树障需要更高的激光功率,同时,树木茂盛的地区多为地形复杂的山区或森林地区,大型设备难以进入,这对清障仪的体积与便携性提出了要求^[19]。CO₂激光器在100 W以上就必须使用水冷,体积较大且不适合户外运输使用;相较而言,光纤激光器在光电转化效率与光束质量方面都优于CO₂激光器,更适用于树障清除。

国网湖北电力有限公司进行了激光树障清除装置的研制及相应的仿真与实验研究^[4],使用功率为200 W的光纤激光器,将激光束转换为线激光束。仿真发现,当照射10 s时,根据木材不同,照射点表面温度可达378~1 238 °C,这一温度远超木材250~300 °C的燃点,同时在照射过程中树木内部产生的热应力也有利于切断树木。在实际试验中,使

用装置照射20 m远的树枝,对于较细的树枝,5 s内即已清除;直径为6 cm的约需15~30 s;大于6 cm的则视情况而定。

2 激光器类型与激光清障关键参数的影响选择

2.1 激光器类型对比

激光是通过刺激原子导致电子跃迁释放辐射能量而产生的具有同调性的增强光子束,具有单色性好、高亮度、光束准直性好等特点^[39]。按照工作物质物态可把激光器分为以下几类:固体激光器、气体激光器、半导体激光器等。现有研究与应用中,常用于清障的激光器主要包括光纤激光器、半导体激光器、CO₂激光器,其波长、输出功率、体积等参数各不相同。激光器是清障仪的核心部件,不同类型会对清障仪的性能、设计等造成极大影响,因此设计清障仪时需要根据需求选择合适的激光器。

表2简单对比了不同类型激光器的特点^[11,14]。CO₂激光器的光电效率低,非金属物质对CO₂激光吸收较好;半导体激光器体积最小、耗电较少,但光束准直性较差;而光纤激光器维护方便,适合工程使用。

表2 不同类型激光器的特点

参数	CO ₂ 激光器	半导体激光器	光纤激光器
波长/nm	10 600	<2 000	1 000~2 000
功率	可达数十千瓦	单 bar 可达300 W	可达1 000 W (风冷)
电光效率	约5.5%	>50%	20%~30%
冷却方式	水冷(100 W及以下可能风冷)	水冷或风冷	水冷或风冷
光学设计	远场准直、镜头体积大,但透明障碍物效果好	单 bar 功率不足;多 bar 条合束设计及镜头复杂、体积大	发散角小,光束质量好,准直或聚焦的光斑小,光能量密度高

2.2 激光波长对清障的影响

2.2.1 激光波长对异物清除效果的影响

对于不同波长的激光,异物的透过率与吸收率不同,因此其熔穿所需要的功率密度也不同。塑料薄膜是一种常见的异物,文献[20]对比了光纤(波长1 064 nm)、CO₂(波长10 600 nm)、半导体(波长980 nm)激光对于不同颜色、厚度的塑料薄膜的处理效果,并测量了塑料膜对激光的透射率,其结果见图1、图2。测量发现CO₂激光对透明塑料膜的熔穿效果最好,这与透射率的测量结果是相符的;对于有色塑料薄膜,虽光纤激光器的透射率最低,但

由于反射散射的影响,CO₂激光的熔穿功率仍远低于其他2种激光;对于10 mm厚的黄色塑料薄膜,CO₂激光的最小熔穿功率密度为0.013 3 W/mm²。

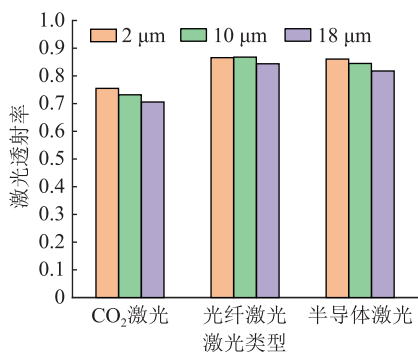


图1 不同厚度的透明塑料薄膜对于激光的透射率
Fig.1 Transmittance of transparent plastic films of different thickness to lasers

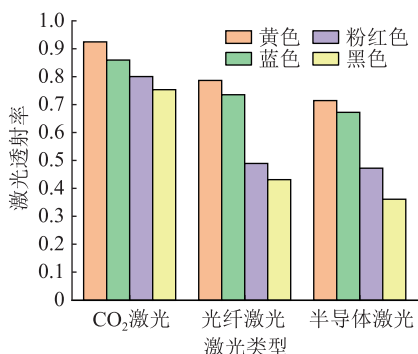


图2 不同颜色的10 mm厚塑料薄膜对激光的透射率
Fig.2 Transmittance of 10 mm thick plastic films of different colors to lasers

文献[19]对比了CO₂激光与光纤激光处理黑白A4纸与透明、黑色塑料薄膜的效果,发现处理黑色薄膜与黑色A4纸时,两者差距不大,但处理透明塑料薄膜与白色A4纸时,光纤激光的效果远不如CO₂激光。尽管在实验室中光纤激光处理透明塑料薄膜的表现不佳,但实地试验中,光纤激光也能有效切割,只是用时稍长。这可能是因为实际使用中塑料薄膜往往层层缠绕且由于长期使用导致透明度明显下降。

相比于光纤激光,CO₂激光对于异物尤其是白色与透明异物的处理效果更好,但是光纤激光器有着功率及体积上的优势,实际应用时,需要根据所需处理的异物综合考虑选择。

2.2.2 激光波长对除冰效果的影响

高功率、高能量的激光与冰的相互作用会产生热效应,不同波长的激光在冰层中的穿透深度不同,因此不同波长的激光作用于冰层可视为不同类型的热源,对除冰效果会产生影响。图3为不同波长的光在纯冰中传输的吸收系数。

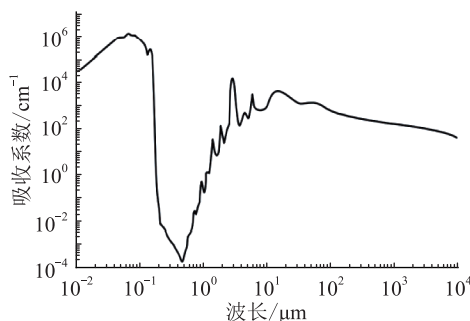


图3 不同波长的光在纯冰中的吸收系数
Fig.3 Absorption coefficients of light of different wavelengths in pure ice

当吸收系数较小的激光(如半导体激光)照射时,激光穿透深度相对冰层厚度较大,可将激光看作体热源,表面与一定厚度内的覆冰同时吸收激光能量,从而温度上升。而由于冰层内部的温差,冰层上、下表面和内部都会产生应力分布,这会使冰块变得疏松甚至出现裂纹或碎裂,能有效提高激光除冰效率。当吸收系数较大的激光(如CO₂激光)照射时,可看作面热源,发生相变的冰集中于冰层表面,形成逐层融化现象。而过程中热应力的影响范围相对有限,主要依靠激光的热效应达到除冰效果。根据文献[31,35—36]中的实验结果,在使用波长为1.064 mm的Nd:YAG激光照射后,坚硬的冰块变得疏松,沿着冰块的应力分布方向作用机械力,便可使冰块轻松地断裂脱落,这是提高除冰效率的一种思路。而使用波长较长的CO₂激光时,应力的影响大大减小。

实际应用中,激光的穿透深度并非越高越好。文献[11,30]进行了红外波段的808 nm、980 nm、1 075 nm的激光融穿覆冰的对比试验,其结果如表3所示。

表3 不同波长激光融冰试验效果对比
Table 3 The ice melting test results using lasers of different wavelengths

波长/mm	激光透射率	功率/W	光斑直径/mm	融穿时间/min	试验现象
808	70%以上	10	4	>25	直径2 mm、深1 mm的小坑
980	30%~40%	10	4	8	覆冰被融穿,孔径约7 mm
1 075	约23%	10	4	7	覆冰被融穿,孔径6~7 mm

由表3可知,808 nm激光的穿透深度较大,但980 nm激光与1 075 nm激光的除冰效率远高于808 nm激光。这是由于808 nm激光的穿透深度过大,较多激光能量作用在覆冰物体表面,通过反射

损耗了。在考虑到覆冰厚度的前提下,穿透深度适中的激光能更好完成加热接触面与切割覆冰的任务,更适用于激光清障仪。

2.3 激光功率、光斑直径对除冰效率的影响

影响激光处理覆冰效果的因素有激光功率、光斑直径、初始温度、覆冰厚度、激光波长等,若使用脉冲激光器还有脉冲峰值功率与脉冲频率等。文中主要介绍激光功率与光斑直径的影响,覆冰初始温度与覆冰厚度取决于自然环境,因此不再介绍。

由文献[30,37—38]的仿真结果可知,当融穿2 cm的覆冰时,随着激光功率增加,覆冰融穿时间不断减小,在激光功率超过70 W后,除冰效果提升并不显著,此时制造激光除冰设备的成本将会大幅度提高;当光斑减小时,覆冰融穿时间也随之减小,当光斑直径小于8 mm时,融穿时间的变化不再显著,当光斑过小时,激光功率密度较大,容易对电力设备造成损害。实验结果与仿真结果相吻合,如图4所示。实际试验中,当激光功率为50 W、光斑直径为10 mm时,融穿2 cm的冰层约需37 s^[11,38]。

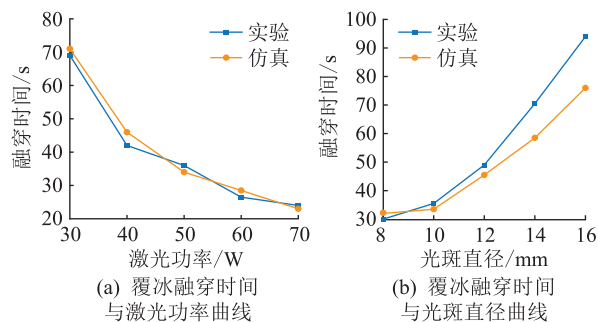


图4 激光功率与光斑直径的实验仿真结果

Fig.4 Experimental and simulated results of laser power and light spot diameter

激光光斑直径并非越小越好,当使用聚焦小光斑(直径100 mm)作用于冰块时,虽然聚焦点附近的冰块产生破坏,但是破坏范围十分有限,不足以影响冰块整体。光斑减小,融穿冰柱速度虽然加快,但热影响区域小,除冰速度反而可能减小;在一定的激光功率密度下,增大光斑,光斑热影响区域变大,除冰体积也相应增加^[31]。在文献[11]进行的模拟覆冰除冰实验中,利用功率为50 W、光斑直径为10 mm的半导体激光清除厚度为2 cm、直径约120 mm的圆柱体冰层,采取先切割再整体扫描的方式,覆冰脱落约需2 min。据估计,清除一片绝缘子上初始温度为-5 ℃、厚度约为1~3 cm的覆冰需要用时5~15 min。

2.4 激光功率密度与照射时间的安全阈值问题

在激光清障过程中,激光照射如导线、绝缘子等的电力设备是不可避免的,长时间、高强度的照

射可能对其造成损害。在实际清障作业中,必须将激光功率密度与照射时间控制在安全阈值之下。

2.4.1 激光照射对绝缘子的影响

在实际的清障作业中,清除绝缘子表面覆冰是最常见的应用场景之一,激光功率密度与激光照射时间是绝缘子表面激光破坏的重要参量,因此有必要对不同类型的绝缘子所能承受的光功率密度与照射时间阈值进行研究。

目前使用的绝缘子分为瓷绝缘子、复合绝缘子和玻璃绝缘子。由于激光能穿透玻璃绝缘子,激光照射不会对玻璃绝缘子表面产生影响。通常认为复合绝缘子的激光功率阈值低于瓷绝缘子,瓷绝缘子的颜色会影响其对激光的吸收能力^[33,37]。

绝缘子的激光损伤需要综合考虑其抗热冲击能力和抗拉阈值。当激光照射绝缘子表面时,激光作用区域的绝缘子表面温度会上升,光斑边缘会产生拉应力。对于瓷绝缘子,当激光照射时间增加,其表面温度超过其抗热冲击能力时,会出现糊状变色现象;当激光继续照射,由温差引起的拉应力可能超过抗拉阈值,应力破坏导致绝缘子断裂。对于复合绝缘子,由于其燃点较低,受到激光照射时,易受到燃烧破坏,燃烧后的绝缘子部位呈现白色^[33]。

目前已有许多学者与技术人员实际测量或仿真了绝缘子的安全阈值,由于不同研究实验所用激光器与绝缘子类型不同,下面分别列举以供参考。

文献[37]研究了使用波长980 nm的半导体激光照射对不同颜色、类型绝缘子的影响,结果如表4所示。照射一段时间后,瓷绝缘子瓷釉表面出现变色,而激光照射对复合绝缘子的憎水性影响不大。

表4 不同类型绝缘子的安全阈值

Table 4 Safety limits for different types of insulators

绝缘子类型	照射时间/s	功率密度阈值/(W·mm ⁻²)
棕色瓷绝缘子	60	1.00
	15	1.15
白色瓷绝缘子	60	0.70
	15	1.00
高温硫化硅橡胶	60	0.14
	15	0.26
室温硫化硅橡胶	60	0.09

文献[36]研究了波长10 600 nm的CO₂激光对白色瓷绝缘子的影响,激光器的光斑直径为5 mm。当激光功率小于17 W时,激光照射1 min或3 min,绝缘子表面均未出现裂纹,因此认为绝缘子的激光功率密度上限为0.866 W/mm²。在实际工程中,由于有冰水混合物的保护,这一数值可能稍有提高。

文献[32]研究了使用长脉冲 Nd:YAG 激光照射瓷绝缘子的影响,激光器输出功率为 268 W,光斑直径为 38 mm,脉冲宽度为 1 ms,重复频率为 60 Hz。当激光斜入射约 20 s 后,绝缘子表面出现了糊状痕迹,此时入射激光能量为 4.73 J/mm^2 ,平均功率密度为 0.2365 W/mm^2 ;功率密度不变,当激光正入射约 47 s 后,绝缘子断裂,此时的入射激光能量为 11.1 J/mm^2 。

2 片瓷绝缘子的球碗连接处为钢帽,激光照射这一部位同样可能对绝缘子造成影响。文献[40]仿真得到了激光照射钢帽时的温度与应力分布,激光功率设定为 200 W,光斑直径为 24 mm,功率密度为 0.442 W/mm^2 ,照射 60 s。由仿真结果可知,瓷件最高温度为 $96 \text{ }^\circ\text{C}$,远低于热破坏阈值,但温差引起的热应力最大可达 821 MPa,可能对绝缘子钢帽与瓷片造成损害。

2.4.2 激光照射对导线的影响

激光长时间照射导线可能引起导线温度上升,也可能对导线造成电学故障和力学性能退化。

文献[21—22]对 CO_2 激光照射 LGJ-300/20 导线的温度场进行了仿真,当激光吸收率取极端值 100%时,钢芯线上最高温度为 $349.335 \text{ }^\circ\text{C}$,铝绞线上最高温度为 $361.379 \text{ }^\circ\text{C}$,达不到镀锌层的熔点,也无法对铝绞线与钢芯线造成损害。光洁铝对于 10.6 mm 激光吸收率约为 0.019,因此实际温度应该远比仿真低。在近距离(5 cm)下利用光束半径为 3.5 mm、功率密度为 2.598 W/mm^2 的 100 W 激光照射导线 10 min,测量发现导线电阻率随温度上升而增加,变化不大时,其最大变化百分比为 4%;最大拉伸力随照射时间的增加有所下降,但仍满足标准要求。在远距离下的照射实验中,激光对导线的影响更小。

1 060 nm 的激光对于铜和铝等金属的吸收率更高,因此光纤激光相比 CO_2 激光对导线造成的损害更大。有研究使用光纤激光器在 20 m 以内烧灼 400 mm^2 的钢芯铝绞线 10 min 后,导线逐渐出现熔断现象,而相同条件下使用 CO_2 激光则无反应。在实际应用中,输电线路对地距离一般不会如此低,且激光不会对准固定点超过 1 min,可以认为 CO_2 激光与光纤激光清除异物基本不会对导线造成损害^[19,24]。

3 总结与展望

文中主要综述了激光清障技术已有的研究与应用,以供电气工程领域的技术人员在应用这一技术时参考。激光波长、功率等参数会极大地影响激

光清障效果,激光波长会影响材料对激光的吸收系数与激光在材料中的穿透深度,而激光功率则会影响清障效率。实施清障作业时,也必须控制激光功率密度与照射时间,以免对电力设备造成损害。

激光清障装置的核心为高功率激光器,高功率激光器的功率、体积、光束质量、耐用性等参数是影响清障装置性能的重要因素。 CO_2 激光虽因其波长对非金属材料的作用效果较好,但无水冷的 CO_2 激光器性能较差,且激光光束质量不好,通常只用于近距离清障。光纤激光器与半导体激光器在光束质量、光电转化效率等方面都优于 CO_2 激光器,经过数十年的发展,光纤激光器的成本也已经大大降低,这 2 类激光器在清障领域已有逐渐取代 CO_2 激光器的趋势。

根据使用激光器的不同与应用场景的不同,目前已经出现了许多不同清障装置。激光清除悬挂异物的应用已经较为成熟,在清除覆冰与树障方面,受制于清障效率与成本等因素,仍然有待进一步的研究与发展。总的来说,激光清障技术可以高效、无接触地清除电网上的常见异物,具有广阔的发展前景。

激光器性能的进步也为清障装置的设计提供了更多的可能。近年来,高功率激光器尤其光纤激光器的性能进步十分迅速,无水冷的商用光纤激光器最大功率已达到 1 000 W,水冷的甚至可达几万瓦,同时激光器的成本与体积也大大下降了。因为清除线路障碍物通常并不需要很高的激光功率,但作业环境却通常比较复杂,所以小型化、便携化可能是未来清障仪发展的趋势。目前,已有技术人员研发了枪型的激光清障仪,重量仅为 6 kg,完全可以单人携带使用。未来完全可能出现安装于无人机上的激光清障仪,无人机可以巡线飞行,利用激光雷达、图像处理技术等识别前方线路上的障碍物并及时进行清除。除了应用于清障领域,激光技术还可以应用于绝缘子清洗、驱鸟等领域,将来甚至可能出现综合不同功能的集成激光装置,但以目前的激光器技术还很难做到这一点。

参考文献:

- [1] 国家电网. 业务领域[EB/OL]. [2021-08-28]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/col2017041154/column_201704-1154_1.shtml.
- [2] 侯福营. 电网输电线路故障原因与对策分析[J]. 集成电路应用,2020,37(4):144-145.

- HOU Fuying. Faults causes of grid transmission and countermeasures[J]. Application of IC, 2020, 37(4): 144-145.
- [3] 周舟,赵婉婉. 输电线路导线覆冰现象分析[J]. 通讯世界, 2020, 27(3): 127-128.
- ZHOU Zhou, ZHAO Wanwan. Analysis of ice-covered transmission line conductors[J]. Telecom World, 2020, 27(3): 127-128.
- [4] 范杨,张鼎,程绳,等. 基于线激光技术的输电线路树障清除装置研制及应用研究[J]. 湖北电力, 2020, 44(5): 65-70.
- FAN Yang, ZHANG Ding, CHENG Sheng, et al. Development and application of tree barrier removal device for transmission line based on linear laser technology[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(5): 65-70.
- [5] 黄程,马珂. 基于激光技术的接触网异物除障器研究及应用[J]. 电气化铁道, 2019, 30(5): 89-90, 93.
- HUANG Cheng, MA Ke. Study and application of laser based OCS foreign article eliminator[J]. Electric Railway, 2019, 30(5): 89-90, 93.
- [6] 周艺环,冯思滕,蔡勇,等. 高压输电线覆冰连续激光清除系统设计及实验研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(1): 41-45.
- ZHOU Yihuan, FENG Simeng, CAI Yong, et al. Design and experimental study of CW laser cleaning system for high voltage transmission lines ice-covered[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(1): 41-45.
- [7] 新华网. 长珲高铁全线恢复运营[EB/OL]. (2020-11-23) [2021-03-28]. http://www.xinhuanet.com/2020-11/23/c_11-26775349.htm.
- XINHUA. Changchun-Hunchun high speed rail resumes operation on all lines[EB/OL]. (2020-11-23) [2021-03-28]. http://www.xinhuanet.com/2020-11/23/c_1126775349.htm.
- [8] 姜来,周洁,杨静琦,等. 激光异物清理系统的光束发射系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 26-30.
- JIANG Lai, ZHOU Jie, YANG Jingqi, et al. Beam emission system design of laser foreign body remover device[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(1): 26-30.
- [9] 孙梅,张成研. 一种输电线路上的存在异物清除机器人装置[J]. 农机使用与维修, 2019(8): 26-27.
- SUN Mei, ZHANG Chengyan. Robot device for removing foreign matter on power transmission line[J]. Agricultural Mechanization Using & Maintenance, 2019(8): 26-27.
- [10] 雷冬云,白剑锋,温智慧,等. 基于无人机的10 kV 架空配电线路漂浮异物清除装置设计[J]. 湖南电力, 2020, 40(5): 78-81, 86.
- LEI Dongyun, BAI Jianfeng, WEN Zhihui, et al. Design of floating foreign matter removal device for 10 kV overhead distribution lines based on unmanned aerial vehicle[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(5): 78-81, 86.
- [11] 陈胜. 激光技术在电网中的除冰应用研究[D]. 北京:清华大学, 2010.
- CHEN Sheng. The application and research of laser deicing in power system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [12] 蒋明,赵汉棣,马小强. 高压输电线覆冰及防冰、除冰技术综述[J]. 电力安全技术, 2020, 22(4): 26-32.
- JIANG Ming, ZHAO Handi, MA Xiaoqiang. Icing of HV transmission line and summary of anti-icing and de-icing technology[J]. Electric Safety Technology, 2020, 22(4): 26-32.
- [13] 杨静思,李庆东,王发志,等. 激光技术在电网除冰装置中的应用[J]. 电子世界, 2019(11): 208-209.
- YANG Jingsi, LI Qingdong, WANG Fazhi, et al. Application of laser technology in deicing device of power grid[J]. Electronics World, 2019(11): 208-209.
- [14] 王狮凌,房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 51-64.
- WANG Shiling, FANG Fengzhou. High power laser and its development[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 51-64.
- [15] 陈良惠,杨国文,刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 13-31.
- CHEN Lianghui, YANG Guowen, LIU Yuxian. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 13-31.
- [16] 魏有. 基于有限元分析的激光与物质相互作用数值仿真方法研究[D]. 长春:长春理工大学, 2017.
- WEI You. Numerical simulation method study of the interaction between laser and material based on finite element analysis[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.
- [17] 中井贞雄. 激光工程[M]. 熊纓,译. 北京:科学出版社, 2002.
- SADAO Nakai. Laser engineering[M]. XIAONG Ying, translating. Beijing: Science Press, 2002.
- [18] 陈杰,梁伟,张志坚,等. 架空线路异物激光清除技术研究[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 659-663.
- CHEN Jie, LIANG Wei, ZHANG Zhijian, et al. Study on laser removal technology of foreign bodies on overhead transmission lines[J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 659-663.
- [19] 徐北方,冯军森. 激光技术应用于清除超高压架空输电线路异物的探讨[J]. 农村电气化, 2019(7): 43-46.
- XU Beifang, FENG Junmiao. Approach of laser technology used to clear foreign matter on EHV overhead transmission lines[J]. Rural Electrification, 2019(7): 43-46.
- [20] 谢宏,邓磊,陈诚,等. 激光技术对架空线路塑料薄膜异物处理特性的研究[EB/OL]. (2017-05-25) [2021-08-28]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201705-1341>.
- XIE Hong, DENG Lei, CHEN Cheng, et al. Researches of treating properties of plastic film at overhead lines by the laser technology[EB/OL]. (2017-05-25) [2021-08-28]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201705-1341>.
- [21] 梁伟,陈杰,周志成,等. 电网异物激光清除器对导线的安全性研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(8): 26-30.
- LIANG Wei, CHEN Jie, ZHOU Zhicheng, et al. Effect of laser-cleaner for overhead line foreign body on overhead conductors[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017, 43(8): 26-30.

- [22] 黄清,魏旭,周志成. 激光对架空输电导线的温度影响研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(6):45-49.
HUANG Qing,WEI Xu,ZHOU Zhicheng. Research on temperature effect of laser on overhead transmission line[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2016,35(6):45-49.
- [23] 王英军. 激光标准技术在电网异物清除方面应用研讨[J]. 中国标准化,2017(16):230-231.
WANG Yingjun. Research on the application of laser standard technology in the removal of foreign objects in the power grid[J]. China Standardization,2017(16):230-231.
- [24] 高峰,刘阳,肖茂森,等. 高压输电线路聚合物激光清除系统设计及实验研究[J]. 激光与红外,2020,50(11):1328-1332.
GAO Feng,LIU Yang,XIAO Maosen,et al. Design and experiment study of laser cleaning polymer plastics for high voltage transmission lines[J]. Laser & Infrared,2020,50(11):1328-1332.
- [25] 周维维,樊卫华,姜姝. 激光异物清除器装置研究[J]. 计算机测量与控制,2018,26(7):123-127.
ZHOU Weiwei,FAN Weihua,JIANG Shan. Research on laser foreign body remover device[J]. Computer Measurement & Control,2018,26(7):123-127.
- [26] 刘智颖,穆彦,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):147-153.
LIU Zhiying,MU Zhu,WANG Jiake,et al. Design and parameter analysis of laser deicing optical system[J]. Acta Photonica Sinica,2018,47(8):147-153.
- [27] 王红亮,程中普,窦灵慧,等. 架空线路激光除异物设备的安全防护研究[J]. 电工技术,2019(12):72-73,76.
WANG Hongliang,CHENG Zhongpu,DOU Linghui,et al. Research on safety protection of laser removal equipment for foreign objects in overhead lines[J]. Electric Engineering,2019(12):72-73,76.
- [28] 楼平,岳灵平,李龙. 新型激光除异物技术在特高压输电线路的应用[J]. 浙江电力,2018,37(6):6-9.
LOU Ping,YUE Lingping,LI Long. Application of new laser removal technology of foreign bodies in UHV transmission lines[J]. Zhejiang Electric Power,2018,37(6):6-9.
- [29] 万敏,杨锐,路大举,等. 利用激光为架空高压输电线路除冰的方法:CN101325321A[P]. 2008-12-17.
WAN Min,YANG Rui,LU Daju,et al. Method for deicing aerial high voltage power line using laser:CN101325321A[P]. 2008-12-17.
- [30] 陈胜,张贵新,徐曙光,等. 电网中激光除冰技术分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2011,51(1):47-52.
CHEN Sheng,ZHANG Guixin,XU Shuguang,et al. Analyses of laser de-icing methods for power systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2011,51(1):47-52.
- [31] 齐丽君. 输电线路激光除冰的理论及实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
QI Lijun. Laser deicing theoretical and experimental research for transmission lines[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [32] 齐丽君,朱晓,朱长虹,等. 瓷绝缘子表面激光损伤的数值模拟和实验研究[J]. 激光技术,2011,35(6):844-848.
QI Lijun,ZHU Xiao,ZHU Changhong,et al. Numerical simulation and experiment research of laser damage of porcelain insulator surface[J]. Laser Technology,2011,35(6):844-848.
- [33] LANE J W,MARSHALL S J. De-icing using lasers[R]. United States:Army Cold Regions Research and Engineering Lab,1976.
- [34] LEE L H N. On penny-shaped crack at an ice-substrate interface[C]//Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures,1984:1085-1094.
- [35] 刘磊. 脉冲激光与冰相互作用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
LIU Lei. The research of interaction between the pulse laser and the ice[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2007.
- [36] 朱卫华,朱晓,朱长虹,等. CO₂激光热熔法除冰的研究[J]. 光学与光电技术,2007,5(3):41-42,54.
ZHU Weihua,ZHU Xiao,ZHU Changhong,et al. Research on hot melting de-icing method using CO₂ laser[J]. Optics & Optoelectronic Technology,2007,5(3):41-42,54.
- [37] 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.
ZHAO Yuming,ZHANG Guixin,LUO Bing,et al. The technology of high power semiconductor laser de-icing[J]. Southern Power System Technology,2011,5(5):60-64.
- [38] ZHANG G X,CHEN S,XU S G,et al. Application and research of laser de-icing in power system[C]//2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. Atlanta,GA,USA. IEEE,2010:470-473.
- [39] 陈钰清,王静环. 激光原理[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
CHEN Yuying,WANG Jinghuan. Laser principle[M]. Hangzhou:Zhejiang University Press,1992.
- [40] 方春华,周秋雨,李景,等. 瓷质绝缘子表面激光辐射温度和应力特性研究[J]. 高压电器,2019,55(6):151-156,163.
FANG Chunhua,ZHOU Qiuyu,LI Jing,et al. Investigation on temperature and stress characteristics of porcelain insulator surface under laser irradiation[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(6):151-156,163.

作者简介:



张志博

张志博(1999),男,硕士在读,研究方向为激光清障技术与微波等离子体(E-mail:zzb20@mails.tsinghua.edu.cn);

王一波(1980),男,学士,高级工程师,从事电气工程及其自动化相关工作;

张梓奎(1983),男,硕士,工程师,从事各类激光技术的应用与研究。

Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration

YAN Qunmin¹, MU Jiahao¹, MA Yongxiang¹, WANG Yong², SUN Yangyang²

(1. College of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Hanzhong Power Supply Branch of Shaanxi Local Power (Group) Co., Ltd., Hanzhong 723001, China)

Abstract: The wide application of distributed energy storage has effectively solved many problems caused by large-scale distributed generation (DG) access to the distribution network and the rapid increase of load on the planning and operation of the power grid. Distributed energy storage has the characteristics of fast power throughput, high control accuracy, flexible installation, and multi-subject benefits, which can effectively ensure the safety and stability of power supply in the distribution network. The development status of distributed energy storage is sorted out. The advantages and disadvantages of distributed energy storage application modes at home and abroad are analyzed in recent years according to its access location on the DG side, the medium and low voltage distribution network side, the user and the microgrid side. Various mathematical models and optimization algorithms for the optimal configuration of distributed energy storage are compared and analyzed in terms of its location and capacity. Combined with the problems existing in the configuration process of distributed energy storage, the development trend of distributed energy storage is prospected.

Keywords: distributed generation (DG); distributed energy storage; new energy; application mode; location and capacity selection; optimal configuration

(编辑 吴楠)

(上接第 52 页)

The application status and development of laser barrier removal technology in power grid

ZHANG Zhibo¹, WANG Yibo², ZHANG Zikui¹, WANG Huawei³, ZHANG Guixin¹, YOU Zhengjun³

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Grid Huzhou Power Supply Company of Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Huzhou 313000, China;

3. Zhejiang Tailun Power Group Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: Various barriers attached to the transmission line pose a huge threat to the safe and stable operation of the power grid. Traditional barrier removal methods either have safety hazards or consume high energy, and most of them require power outage. With the advantage of high energy and good collimation, laser can be used to shoot down foreign bodies or melt ice without contact from a distance. Therefore, the application status and development of laser barrier removal technology in power grid are sum up. Firstly, the principles of removing different types of barriers such as foreign bodies, ice and tree barriers using laser are summarized. Secondly, the features of several lasers which are commonly used in barriers removal areas are compared. Finally, the effect of some parameters such as laser wavelength, laser power and spot diameter on barrier removal efficiency are analyzed. The safety threshold of power density and irradiation time when lasers irradiate transmission line and insulators are also studied. Laser barrier removal technology is widely used to remove foreign bodies hanging on the lines, but removing ice, tree barriers or other barriers are limited by the removing efficiency and cost. These are still need to be further developed. The related researches and applications of this technology are reviewed in this paper, which can provide a reference for technical personnel in the field of electrical engineering technology.

Keywords: laser; de-icing; removal of foreign body; laser barrier removal; non-contact remove; transmission lines

(编辑 陆海霞)