

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003301

无人机巡线的紫外放电检测研究*

赵太飞 李晗辰 张 港 郑博睿

(西安理工大学 自动化与信息工程学院 西安 710048)

摘要:针对无人机巡线中输电设施放电问题,推导了紫外放电检测链路模型并使用光电倍增管设计了紫外放电检测系统。使用紫外放电检测系统进行放电检测实验,实验结果表明,系统探测信号与放电信号高度重合,系统探测信号强度与放电信号的强度呈现良好的线性相关;同一探测距离不同探测位置探测得到的信号峰值与探测平均值的相对误差小于3%,即探测信号强弱与探测距离有关,与探测位置无关;不同探测距离下模型计算的理论与实际探测值具有一致性,之间的相对误差最大为15.7%,验证了模型的正确性。该成果对无人机巡线时的紫外放电检测有一定的指导意义。

关键词:无人机巡线;紫外放电检测;光电倍增管

中图分类号: TN23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Ultraviolet discharge detection research for UAV patrol

Zhao Taifei Li Hanchen Zhang Gang Zheng Borui

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the discharge problem of transmission facilities in UAV patrol line, the ultraviolet discharge detection system is designed by adopting the ultraviolet discharge detection link model and using photomultiplier. Ultraviolet discharge detection system is used for discharge detection experiment. The experimental results are as follows, the detected signal of the system is highly coincident with the discharge signal, and the intensity of the detected signal of the system is linearly correlated with the intensity of the discharge signal. The relative error between the peak value of the detected signal and the average value of the detected signal is less than 3%, that is, the strength of the detected signal is related to the detected distance and has nothing to do with the detected position. The theoretical value calculated by the model under different detection distances is consistent with the actual detection value, and the maximum relative error is 15.7%, which verifies the correctness of the model. The results of this paper have some guiding significance for UV discharge detection of UAV in line patrol.

Keywords: UAV patrol; UV discharge detection; photomultiplier tube

0 引言

在当前社会,电能已经普及到各行各业中,成为人类社会的主要能源。我国电能供给和需求呈现着明显的东西部不均衡,国家电网通过广泛架设高压线等输电设施来解决用电均衡问题。输电设施受环境等多种因素影响会产生放电现象,放电现象一方面说明输电设施存在故

障,另一方面还会加剧输电设施的劣化^[1-2]。准确的放电检测能够及时发现放电故障点,有效保障电网的安全运转。

输电设施架设区域地形复杂,相较于传统的人工巡检,无人机等自动化设备的运用大大提升巡检的效率^[3-7]。众多学者将目光投入到无人机巡线的相关研究,王森等^[8]使用六旋翼无人机辅助巡线,对巡线时拍摄的图片进行绝缘子缺陷识别的研究;彭向阳等^[9-10]研制出

收稿日期: 2020-07-04 Received Date: 2020-07-04

* 基金项目:国家自然科学基金(61971345)、西安市科学计划(CXY1835(4))、西安市碑林区科技计划(GX1921)、榆林市科技计划(2019-145)资助项目

一套用于输电线巡检的多传感器无人机巡检系统,巡检测试结果与人工巡检结果一致;还提出一种自动识别无人机红外影像中绝缘子的方法,通过实验证明了方法的可行性;宋福根等^[11]利用无人机完成对1 000 kV特高压输电线的电场强度实测。

目前,针对放电的检测方法有红外、超声波、脉冲电流、超高频和紫外放电检测,紫外放电检测是一种光学检测手段^[12],相较于其他方法有非接触、准确度高、抗干扰能力强以及全天候使用等优势^[13],王胜辉等^[14]使用紫外成像仪对放电现象进行检测,研究放电强度、紫光光斑面积和检测距离之间的关系。Cui等^[15]推导了放电产生的紫外光子数在空气中的传播损耗模型。崔穆涵等^[16]的团队根据紫外放电检测需求,设计了一种配合紫外成像仪使用的紫外光学系统。

紫外放电检测的研究多是使用紫外成像仪进行的,紫外成像仪因开发使用成本,一般是对重要或重点关注的设备进行定点放电监测^[17]。相对紫外成像类仪器,光电倍增管成本更低廉、探测灵敏度更高,因此,本文选取光电倍增管进行紫外放电检测研究,结合无人机巡线场景推导紫外放电探测模型,设计开发用于无人机巡线的紫外放电检测系统,使用紫外放电检测系统进行放电检测实验,验证了研究结果和推导模型的正确性。

1 紫外放电检测方法

1.1 紫外放电检测原理

玻尔理论认为,当原子中的电子处于不稳定态时,电子会从一个能级 W_d 跃迁至另一个能级 W_s 并释放光波,释放的光波频率 f 如下所示:

$$f = \frac{\Delta W}{h} = \frac{W_d - W_s}{h} \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数。

输电线等输电设施表面放电本质上是一种气体放电现象,即空气中的各带电粒子朝着一定方向移动形成电流的现象。放电时空气中各原子发生电离,向外辐射光波,光波的频段主要为空气中 N_2 和 O_2 电离生成各种氮、氧类化合物所释放的混合频段^[18]。对放电现象进行光谱测量,辐射的光波主要集中在200~400 nm的紫外波段^[19],该波段包含因臭氧层吸收导致地表不存在的“日盲”紫外波段,紫外放电检测就是指通过对输电设施探测“日盲”紫外光的有无判断是否存在放电现象。

放电过程中伴随着复杂的化学反应和物理变化,实质上是电能通过能量转换后,转化为其他形式的能量向外释放,紫外光只是其中一种形式的能量,如下所示:

$$E_e = E_{UV} + E_{other} \quad (2)$$

式中: E_e 表示放电过程中释放的电能; E_{UV} 表示放电过程中辐射的紫外光能; E_{other} 表示放电过程中产生其他形式的能量。根据式(2)可推测当放电过程中释放的电能增强时,放电过程中辐射的紫外光能也会呈一定比例增强,如下所示:

$$E_{UV} \propto E_e \quad (3)$$

即 E_{UV} 与 E_e 呈正比例相关。因此,紫外放电检测过程中,可以根据探测到紫外光的能量大小来反应放电的强弱。

1.2 紫外放电检测链路模型

无人机巡线进行放电检测时,输电设施的放电产生的电晕、电弧长度远小于无人机巡线时距离输电线的距离,即将放电部位看作一个向外辐射紫外光的点光源,如图1所示。



图1 无人机巡线紫外放电检测

Fig. 1 UAV line inspection UV discharge detection

无线紫外光在大气中进行传播有一定的衰减,图1的紫外光链路可用式(4)表示^[20]。

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 e^{-K_e d} \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \quad (4)$$

式中: P_r 表示无人机所在位置接收到的紫外光功率; P_t 表示放电产生的紫外光功率; λ 表示紫外光的波长; d 表示无人机巡线时距离输电线的距离,即检测距离; K_e 表示紫外光在大气中传输的衰减系数; A_r 表示接收传感器光敏区的响应面积。

光电倍增管拥有高灵敏度、体积小易携带、高响应速度和低成本等优势,本文选取光电倍增管结合“日盲”紫外滤光片进行紫外放电检测,紫外光通过“日盲”滤光片会有一定的衰减,如下所示:

$$P_r' = P_r T_A \quad (5)$$

式中: P_r' 表示通过滤光片后的紫外光功率; T_A 表示滤光片的透过率。根据光电倍增管的参数,光电倍增管的阳极输出电流 I 如式(6)所示。

$$I = P_r' \eta S_k G \quad (6)$$

式中: η 表示光电倍增管阴极的量子转换效率; S_k 表示光电倍增管阴极电流灵敏度; G 表示光电倍增管的放大增益。式(6)表示放电紫外光照射在光电倍增管的光敏区

上,光敏区将光信号转换为阴极电流信号,阴极电流信号的大小取决于量子转换效率 η 和电流灵敏度 S_k , 阴极电流信号通过光电倍增管的倍增区进行层层放大后由阳极输出,阳极输出的电流信号大小取决于放大增益 G 。电流阳极输出电流 I 为负数,将其转换为方便处理的电压信号 U :

$$U = kIR \tag{7}$$

式中: k 表示反相系数; R 等效负载电阻。化简式(4)~(7)得:

$$P_t = \frac{4U\pi d^2}{k\eta GT_A R S_k A_r e^{-k_e d}} \tag{8}$$

由式(8)可知,使用光电管倍增挂载无人机进行巡线紫外放电检测,已知巡线时距离输电线的距离 d 和探测到的紫外信号电压 U 就能够对放电产生的紫外光功率进行估算,进而就能反应放电的强弱。

2 紫外放电检测系统设计

考虑到输电线架设区域存在基站信号盲区无法及时传回数据,将紫外放电检测系统分为两个部分。1) 无人机机载探测端,主要用于搭载无人机对输电线等电力设施进行快速放电检测和数据的本地记录;2) 电脑显示端,主要是对机载探测端所记录的数据进行存储和可视化显示。

2.1 机载探测端

紫外放电检测系统的无人机机载探测端的组成如图 2 所示。

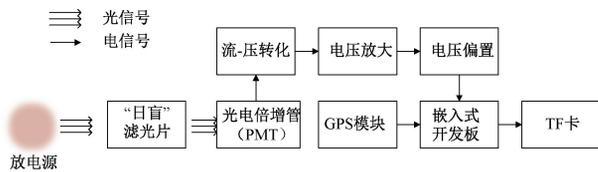


图 2 机载探测端的组成框图

Fig. 2 Block diagram of UAV detection terminal

输电线放电时会辐射出多种光波信号,“日盲”滤光片一方面可以滤除太阳光等其他光波信号对探测的影响,另一方面可以只让特定波长的窄带光波通过,便于对信号大小的衡量,进而对放电的强弱进行判断,本文使用的“日盲”滤光片是透过峰值为 254 nm 的窄带滤光片。光电倍增管实现光信号与电信号的转换,本文使用的光电倍增管型号为 R7154。

光电倍增管的阳极输出为负电流信号,需要将负电流转换为方便处理的电压信号,因此需要对光电倍增管的输出信号进行流-压转化;光电倍增管虽然有着良好的放大增益,但放电辐射的紫外光信号仍相对微弱,所以在

流-压转化后再接入电压放大对转化的信号进行放大;为了保证信号能够在合适的采集范围内,电压放大后接入电压偏置调节输出电压的范围。本文分别设计了接入 R7154 型光电倍增管的流-压转换、电压放大和电压偏置电路。

本文使用 STM32F103VET6 为主控芯片的嵌入式开发板对光电倍增管和 GPS 模块进行运算控制。当检测到放电产生的“日盲”紫外光时,对数据进行运算并记录到微型存储(TF)卡中。

2.2 电脑显示端

无人机机载探测端将探测到的放电信息记录到 TF 卡,虽然数据能够存储,但是使用、查看和操作不便,因此编写一个放电数据查询程序,该程序的组成如图 3 所示。

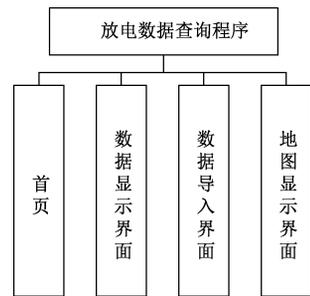


图 3 放电数据查询程序的组成框图

Fig. 3 Block diagram of discharge data query program

本文采用 Apache 服务器和 PHP 语言对放电数据查询程序进行设计和编写,为了更便捷、更高效地进行开发,选择在 Laravel 框架下进行开发。使用 MySQL 数据库用来满足放电数据查询程序中对于数据存储和查询的需求。

由图 3 可知,放电数据查询程序分别有首页、数据显示界面、数据导入界面和地图显示界面组成。首页即是一个登陆界面,需要对操作人员的信息进行确认,是操作人员进去程序的入口,主要功能是防止非相关人员对数据的查看和操作。数据显示界面对以往记录的放电信息进行显示,可以通过特定条件对放电信息进行筛选查询,同时对已经排查或成功维修的放电信息进行标注,防止对同一放电故障进行多次维修。数据导入界面方便操作人员一键将无人机机载探测上 TF 卡的数据录入到放电数据查询程序。地图显示界面通过百度地图 API 将文字化的放电位置数据转化为更方便操作人员观察的地图信息。

3 样机探测实验

使用紫外放电检测系统中的无人机机载探测端对型号为 CTP-2000k 的等离子脉冲电晕发生器产生的电晕放

电进行紫外放电检测验证实验。

为了方便观察对比,将放电信号和紫外信号的部分数据放入到同一图中,如图 4 所示。图 4 中,虚线表示电晕放电的电信号,该信号的幅值强度对应图中左侧坐标轴;实线表示机载探测端接收到的光信号,该信号的幅值强度对应图中右侧坐标轴。由电信号数据可知,电晕放电在以一定频率进行正负高压的脉冲式放电,脉冲峰值不超过 ± 10 kV;探测到的光信号与电信号拥有相同的频率,脉冲峰值不超过 2 V。光信号与电信号有着良好的波形重合,说明光信号也能反应放电的情况。

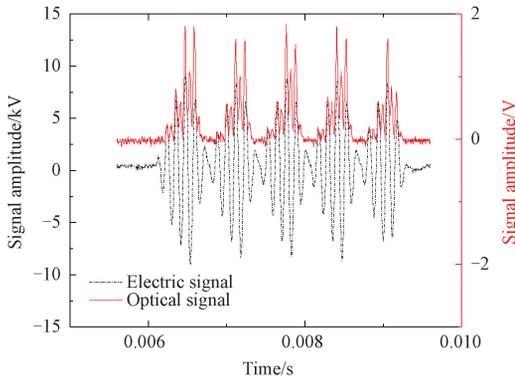


图 4 放电信号和紫外信号对比

Fig. 4 Comparison of discharge signal and ultraviolet signal

为了研究放电辐射的紫外光信号强度是否能够反映放电的强弱,对不同峰值电压的电晕放电进行紫外放电检测实验。保持实验条件相同,调节高压电源对 CTP-2000k 型等离子脉冲电晕发生器的输入,然后进行紫外放电检测,实验结果如图 5 所示。

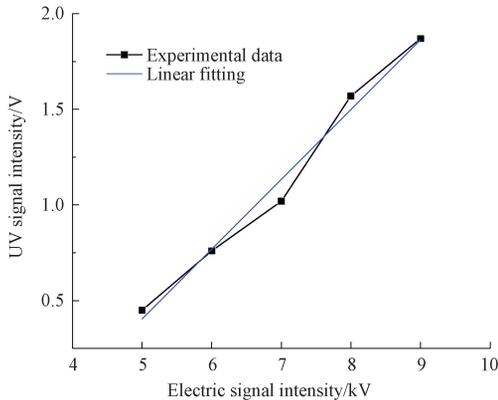


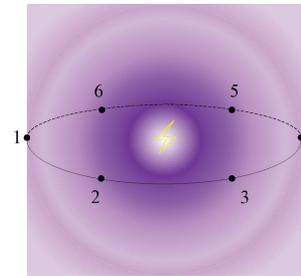
图 5 放电信号强度和紫外信号强度关系

Fig. 5 Relationship between discharge signal intensity and UV signal intensity

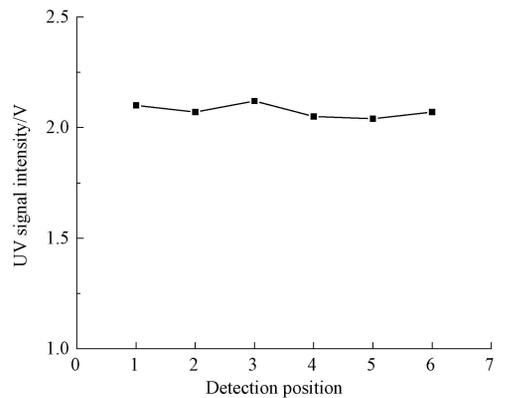
图 5 中,点线为实验数据,电信号和光信号的取值均为脉冲信号的峰值,实线是为了参照拟合出的直线。可以看出,随着电晕放电的电信号强度升高,电晕放电的紫

外光信号也在逐渐增加,且有着良好的线性关系。综合图 4 和 5 的结果,证明了式(3)的正确性,即检测得到紫外光信号的强度能够在一定程度上反应放电的强弱。

无人机巡线输电线时,根据输电线的输电等级选择安全探测的距离,巡线的安全探测距离一般不小于 10 m。在 10 m 外选取同一探测距离的不同探测位置,进行放电紫外点光源辐射验证实验,不同的探测位置如图 6(a)中 1~6 所示。探测位置 1~6 是同一圆周上的 6 点,在 1~6 的位置对中心处的高压脉冲放电器产生的火花放电进行直视探测,探测结果如图 6(b)所示。



(a) 放电紫外探测位置
(a) Discharge UV detection position



(b) 探测位置与探测强度关系
(b) Relationship between detection position

图 6 放电紫外点光源辐射验证实验
Fig. 6 Discharge verification experiment of UV point light source

从图 6(b)可以看出,在探测距离不同的不同探测位置探测得到的信号强度变化不大,各探测信号与探测平均值的相对误差不大于 3%,考虑到实际实验中的实验误差,可以认为同一探测距离下的直视探测结果与探测位置无关,其探测结果只与探测距离的远近有关,即放电产生的紫外光是以点光源的形式向外辐射。

为了进一步探究探测距离和探测结果的关系并验证本文式(8)的正确性,使用机载探测端对高压脉冲放电器产生的火花放电进行紫外放电检测实验,实验结果如图 7 所示。图 7 中,点线为实验数据,实线为理论计算数据,计算公式如下:

$$U = \frac{k\eta GT_A RS_k A_r e^{-K_e d} P_t}{4\pi d^2} \quad (9)$$

式(9)通过式(8)变换得来,根据式(8)计算在 10 m 处得到的放电紫外光功率 P_t , 以此作为放电源辐射紫外光的基准光功率代入式(9)中,从而得出如图 7 的实线。

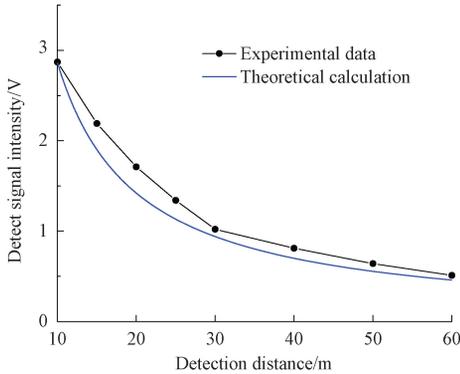


图 7 探测距离与探测强度关系

Fig. 7 Relationship between detection distance and detection intensity

从图 7 可以看出,理论计算和实验数据趋势表现一致,除了 10 m 处的基准值外,实验数据均略高于理论计算值,在 15、20、25、30、40、50 和 60 m 处的相对误差分别为 13.3%、14.1%、15.7%、4.6%、14.3%、10.9% 和 8.7%。分析原因如下:1)“日盲”滤光片虽然是 254 nm 的窄带滤光片,但还是有少量相近波段的放电紫外光信息透过进而增大实验探测结果;2)探测端接收的紫外信号除了大气中直视传输的紫外光外,还有微量的大气散射信号和路径反射信号。

4 结 论

本文针对无人机巡线检测场景中使用光电倍增管进行了紫外放电检测研究,推导了放电紫外探测链路模型,设计了放电紫外检测系统并进行实验。实验结果表明,探测信号的大小能够反应放电的大小;同一探测距离的直视探测,探测信号大小与探测位置无关;不同探测位置的直视探测,探测信号与探测距离有关,其关系与推导模型有着良好的一致性,验证了本文推导模型的正确性。

参考文献

[1] VENKATESULU B, THOMAS M J. Corona aging studies on silicone rubber nanocomposite [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2): 625-634.

[2] LI Y X, WANG T ZH, GUO L Q, et al. Detection and

analysis of high voltage electrical equipment corona discharge based on ultraviolet imaging technology [C]. Control & Decision Conference, IEEE, 2017: 6928-6931.

- [3] QIU R H, MIAO X R, ZHUANG SH B, et al. Design and implementation of an autonomous landing control system of unmanned aerial vehicle for power line inspection [C]. Chinese Automation Congress, IEEE, 2017: 7427-7431.
- [4] 范怡敏, 罗云飞, 沈克永, 等. 配备小型紫外光传感器的无人机电力巡视设计与测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(5): 188-194.
- FAN Y M, LUO Y F, SHEN K Y, et al. Design and test of unmanned aerial vehicle power patrol with small ultraviolet sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(5): 188-194
- [5] 施孟佶, 秦开宇, 李凯, 等. 高压输电线路多无人机自主协同巡线设计与测试[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 117-122.
- SHI M J, QIN K Y, LI K. Design and testing on autonomous multi-UAV cooperation for high-voltage transmission line inspection. [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 117-122.
- [6] 王振华, 黄宵宁, 梁焜, 等. 基于四旋翼无人机的输电线路巡检系统研究[J]. 中国电力, 2012, 45(10): 59-62.
- WANG ZH H, HUANG X N, LIANG K, et al. Study on the transmission line inspection system based on quadrotor UAVs [J]. Electric Power 2012, 45(10): 59-62.
- [7] 汤明文, 戴礼豪, 林朝辉, 等. 无人机在电力线路巡视中的应用[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 35-38.
- TANG M W, DAI L H, LIN CH H, et al. Application of unmanned aerial vehicle in inspecting transmission lines[J]. Electric Power, 2013, 46(3): 35-38.
- [8] 王森, 杜毅, 张忠瑞. 无人机辅助巡视及绝缘子缺陷图像识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1862-1869.
- WANG M, DU Y, ZHANG ZH R. Study on power transmission lines inspection using unmanned aerial vehicle and image recognition of insulator defect [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1862-1869.
- [9] 彭向阳, 陈驰, 饶章权, 等. 基于无人机多传感器数据采集的电力线路安全巡检及智能诊断[J]. 高压技术, 2015, 41(1): 159-166.
- PENG X Y, CHEN CH, RAO ZH Q, et al. Safety inspection and intelligent diagnosis of transmission line

- based on unmanned helicopter of multi sensor data acquisition [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 159-166.
- [10] 彭向阳, 梁福逊, 钱金菊, 等. 基于机载红外影像纹理特征的输电线绝缘子自动定位[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 922-928.
PENG X Y, LIANG F X, QIAN J J, et al. Automatic recognition of insulator from UAV infrared image based on periodic textural feature[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 922-928.
- [11] 宋福根, 林韩, 兰生. 利用无人机对特高压线路上方电场强度实测[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2836-2843.
SONG F G, LIN H, LAN SH. Test research of the electric field intensity in the upper space of UHV AC transmission line using UAV [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2836-2843.
- [12] 贾乐成, 陈世利, 曾周末. 超声声场光学检测的研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 1-15.
JIA L C, CHEN S L, ZENG ZH M. Research progress in optical detection of ultrasound fields[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 1-15.
- [13] 律方成. 基于活动轮廓模型的外绝缘紫外放电特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 967-974.
LV F CH. External insulation ultraviolet discharge feature extraction based on active contour model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 967-974.
- [14] 王胜辉, 冯宏恩, 律方成. 电晕放电紫外图像参数变化特性及距离修正[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1823-1830.
WANG SH H, FENG H E, LV F CH. Parameter variation characteristic and observation distance correction of corona discharge ultraviolet image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1823-1830.
- [15] CUI H Y, HUO S J, MA H W, et al. Effects of view angle and measurement distance on electrical equipment UV corona discharge detection [J]. Optik, 2018, 171(1): 672-677.
- [16] 崔穆涵, 田志辉, 周跃, 等. 大相对孔径紫外成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 212-218.
CUI M H, TIAN ZH H, ZHOU Y, et al. Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera[J]. Chinese Optics, 2018, 11(2): 212-218.
- [17] 田野, 陈维江, 宁昕, 等. 配电网户外架空设备非接触式带电检测技术研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2495-2501.
TIAN Y, CHEN W, NING X, et al. Review of non-contact on-line detection technology of outdoor overhead equipment in distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2495-2501.
- [18] 王彦, 梁大开, 赵光兴, 等. 基于 ICCD 的高压电晕放电紫外光谱检测 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2431-2436.
WANG Y, LIANG D K, ZHAO G X, et al. Detection of ultraviolet spectrum based on ICCD in the high voltage corona discharge [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2431-2436.
- [19] 房陈岩, 李清灵, 庾金涛, 等. 室内高压电弧/电晕的紫外特性分析和测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(4): 1178-1183.
FANG CH Y, LI Q L, YU J T, et al. The measurement study and analysis of ultraviolet features of high voltage arc and corona indoors [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(4): 1178-1183.
- [20] XU Z Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links [C]. IEEE International Conference on Acoustics, IEEE, 2007: 577-580.

作者简介



赵太飞, 2007 年于电子科技大学获博士学位, 现为西安理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为紫外光通信技术、路由技术、网络抗毁性技术、物联网技术等。
E-mail: zhaotaifei@163.com

Zhao Taifei received Ph. D. from University of Electronic Science and Technology of China in 2007. He is a professor and Ph. D. supervisor at Xi'an University of Technology now. His main research interests include ultraviolet communication, and internet of things and so on.



李晗辰, 2017 年于宿州学院获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为日盲紫外光探测技术及嵌入式技术。

Li Hanchen received his B. Sc. degree from Suzhou University in 2017. He is a M. Sc. candidate at Xi'an University of Technology. His main research interests include solar blind ultraviolet detection technology and embedded technology.



张港, 2019 年于西安理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生。

Zhang Gang received his B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2019. He is a M. Sc. candidate at Xi'an University of Technology.



郑博睿, 2013 年于西北工业大学获得博士学位, 2017 年至今在西安理工大学自动化学院电子系工作, 主要从事等离子体流动控制、流体力学等方面的研究。

Zheng Borui received Ph. D. from Northwestern Polytechnical University in 2013, and has been working in the Department of Electronics, School of Automation, Xi'an University of Technology since 2017. His main research interests include plasma flow control, fluid mechanics and other aspects of research.