

〈微光技术〉

日盲紫外辐射的大气传输与大气温度关系的理论模型

潘浩, 马仪, 周仿荣, 马御棠, 钱国超, 文刚

(云南电网有限责任公司 电力科学研究院, 云南 昆明 650011)

摘要: 近些年来, 日盲紫外探测在电力检测方面得应用越来越广泛。本文基于大气温度轮廓线与国际公认的大气传输特性模拟软件包 MODTRAN, 针对大气温度对日盲紫外大气传输的影响进行模拟分析, 通过分波长分析与曲线拟合, 最终得出大气温度对紫外大气传输的关系式, 并通过实验验证了所建立的关系式的准确性。通过模拟关系式, 可以对大气温度对大气传输进行量化分析, 促进日盲紫外在大气传输的特性研究, 提高电晕检测的准确度。

关键词: 大气传输特性; 日盲紫外; 大气温度轮廓线

中图分类号: TN23, TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2020)10-1007-06

Research on the Theoretical Model Between Solar-blind UV and Atmospheric Temperature during Atmospheric Transmission

PAN Hao, MA Yi, ZHOU Fangrong, MA Yutang, QIAN Guochao, WEN Gang

(Electrical Research Institute of Yunnan Electric Power Research Institute(Group) Co., Ltd., Kunming 650051 China)

Abstract: In recent years, solar blind ultraviolet detection has been widely used in power fault detection. Based on atmospheric temperature profile and MODTRAN, we conduct simulation analysis on the influence of atmospheric temperature on solar blind ultraviolet atmospheric transmission. And finally the relationship between atmospheric temperature and ultraviolet atmospheric transmission was obtained through wavelength analysis and curve fitting. Based on the simulation relational expression, the quantitative analysis of atmospheric temperature and atmospheric transmission can be carried out, which can promote the study of the characteristics of solar blind ultraviolet transmission in the atmosphere and improve the accuracy of corona detection.

Key words: solar-blind ultraviolet, atmospheric transmission characteristic, atmospheric temperature profile

0 引言

随着我国的电网规模不断扩大, 电压等级越来越高, 电力系统中使用的高压电力设备的故障、损坏也不断增加。高压电力设备投入使用后, 由于表面粗糙不均、污秽、结构缺陷、导体接触不良等原因, 导致其绝缘表面的电场分布不均, 设备表面的空气局部被电离, “吡吡”放电且伴随蓝紫色荧光, 这种现象即“电晕放电”^[1-5]。电晕放电会增加电能的损耗, 同时还会产生高频脉冲电流, 干扰无线电通讯, 造成电力设备的损坏, 引起重大的安全事故^[1]。因此, 探测电晕放电, 找出电力设备的缺陷并修复, 对高压电力系

统的安全运行有着重大意义^[6]。

传统的红外热成像技术响应速度慢, 误检率高。红外热成像技术探测到的是发热现象, 通过红外图像看到电晕放电时, 往往电力设备或线路损坏已经很严重^[7]。在自然界中, 太阳是最强的紫外辐射源。平流层中的臭氧层对中紫外有强烈的吸收作用, 这一波段的紫外辐射在近地大气中几乎不存在, 该波段也被称为“日盲区”^[2]。由于电晕放电的光谱主要分布在紫外波段, 欧美国家研发了日盲紫外成像探测技术并应用于电晕探测, 能够在温升较小的放电初期探测到电晕放电^[8-12]。作为一种新兴的电晕放电探测技术, 日盲紫外成像探测技术将可见光背景和紫外光信号结合起来,

收稿日期: 2019-07-24; 修订日期: 2019-09-23.

作者简介: 潘浩 (1990-), 男, 湖南岳阳人, 工程师, 工学学士, 主要从事输电线路巡检, 无人机巡视故障识别。E-mail: panhao_epri@sina.com.

定位精准、分辨率高，不受日光和雾天的干扰。

目前，日盲紫外探测技术已引起国内的普遍重视，但具体的研究还较为薄弱，涉及景物、大气紫外传输特性的研究更少见。为了提高日盲紫外探测在大气环境中受大气温度影响的量化认识，本文通过大气温度轮廓线以及 MODTRAN 软件，模拟不同大气温度下，日盲紫外大气传输的特性曲线，通过分波长分析和曲线拟合，分析出大气温度对紫外大气传输影响的量化关系式，促进日盲紫外在大气传输的特性研究，提高在电晕检测领域的准确性。

1 大气透过率以及大气温度轮廓线的计算方法

由于紫外辐射与大气中的气溶胶、水分子等悬浮粒子发生吸收和散射作用，紫外信号在大气传输中产生了衰减，通常用大气透过率来衡量辐射衰减的程度。由于大气是非均匀的，不同的海拔高度对应的不同大气参数（如大气压强、大气温度、大气相对湿度等）对紫外辐射在大气中传输的影响也是不同的。根据比尔-布格-朗伯定律，气体的光学厚度与大气透过率有如下关系：

$$T = \exp(-\tau) \tag{1}$$

式中： τ 表示气体的光学厚度； T 表示相应的大气透过率。光学厚度是指沿着辐射传输路径，单位截面上物质由于吸收或散射产生的总衰减。根据定义，可用下式表示：

$$\tau_{a,s,e}(z) = \int_{z_1}^{z_2} \beta_{a,s,e} dz = \int_{z_1}^{z_2} n(z) \times \sigma_{a,s,e} dz \tag{2}$$

式中： $n(z)$ 为物质的数密度， cm^{-3} ； σ_a 、 σ_s 和 σ_e 分别表示吸收截面、散射截面和消光截面， cm^{-2} 。 β_a 、 β_s 和 β_e 分别表示吸收系数、散射系数和消光系数。在紫外辐射传输领域中，消光是指在介质中散射和吸收二者作用之和。截面的物理意义与粒子的几何面积类似，它是用来表示粒子从起始光束中所移除能量的大小。因此，散射截面与吸收截面之和为消光截面。

因此，大气辐射透过率计算方法研究需要考虑大气参数的计算方法，大气参数包括大气温度、大气压强、大气相对湿度、大气密度、大气折射率等，本文主要针对大气温度参数的计算进行讨论。

大气温度对于紫外大气辐射传输特性的研究有着十分重要的影响。1976 US Standard 大气参数是由美国天气局（National Weather Service, NWS）、美国空军地球实验室（U. S. air force earth laboratory）、宇宙航行管理局（NASA）经过大量的实验数据共同建立的，其大气温度随海拔高度的变化规律如图1所示，该曲线被称为大气温度垂直轮廓线。

由于本文中主要考虑的是对流层的温度分布，即海拔高度 0~11 km 的大气温度曲线，通过观察曲线可以判断：随着海拔的升高，温度的衰减呈线性衰减，因此通过将海拔高度为 0~11 km 的大气温度曲线进行线性拟合，得出如下海拔高度 H 与温度 T 的关系式：

$$T = T_0 \left(1 - \frac{H}{44.331}\right) \tag{3}$$

式中： T_0 为海平面处的大气温度。对于美国 1976 标准大气， $T_0 = 288.15 \text{ K}$ 。

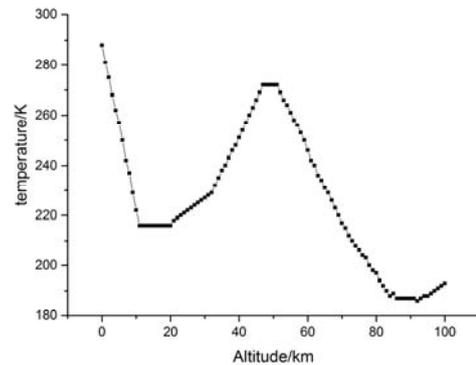


图1 美国 1976 标准大气温度垂直轮廓线

Fig.1 US 1976 standard atmospheric temperature vertical profile

2 大气传输模型软件

目前较为实用的大气模型是美国空军研究实验室开发的 MODTRAN 和 LOWTRAN 大气模型，这两个模型在大气模拟计算方面有着广泛的应用。MODTRAN (MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance algorithm and computer model)，即中等光谱分辨率大气透过率及辐射传输算法和计算模型，它是由美国空军研究实验室（US Air Force Research Laboratory, AFRL）与 Spectra Technology Corporation 利用 FORTRAN 语言共同开发，是对 LOWTRAN 模型逐渐地改进，它继承并包含了所有 LOWTRAN 模型的代码。LOWTRAN 的光谱分辨率为 20 cm^{-1} ，MODTRAN 的目的在于改进 LOWTRAN 的光谱分辨率，它将红外波段光谱的半高全宽度 (FWHM, Full Width at Half Maximum) 由 LOWTRAN 的 20 cm^{-1} 减小到 2 cm^{-1} 。MODTRAN 和 LOWTRAN 可以计算从紫外到微波（即波长 $\lambda \in 0.2 \sim \infty \mu\text{m}$ ）的大气传输问题，模型具有较强的经验性。

如图2所示为 PcMod Win3.7 的操作界面。PcMod Win 是 Windows 下有界面的软件，可以选择 MODTRAN 和 LOWTRAN 两种仿真软件包。软件中考虑了大气分子的吸收和散射、水气吸收、气溶胶的散射和吸收、大气背景辐射、日光或月光的单次散射

和地表反射、直接大气辐射以及日光大气热辐射的多次散射等。在大气模式中设立了 1976 US Standard Model (美国 1976 标准模型)、Tropical Model (热带模型)、Mid Latitude Summer (中纬度夏天) 和 Mid Latitude Winter (中纬度冬天)、SubArctic Summer (亚北极夏天) 和 SubArctic Winter (亚北极冬天) 以及自定义模式等选择。气溶胶消光模型扩充为 Aerosol Free Clouds (气溶胶有云)、No Aerosol or Clouds (无气溶胶或云)、Rural (乡村)、Navy Maritime (海上)、Urban (都市)、Tropospheric (对流层)、Fog advection (平流层雾) 和 Desert Extinction (沙漠地带) 等多种模式。本文中主要使用的是 MODTRAN 仿真软件包, 针对水平路径上的传播特性, 由于我们考虑的是大气温度对传输的影响, 因此对其他气候条件, 保持一致性。

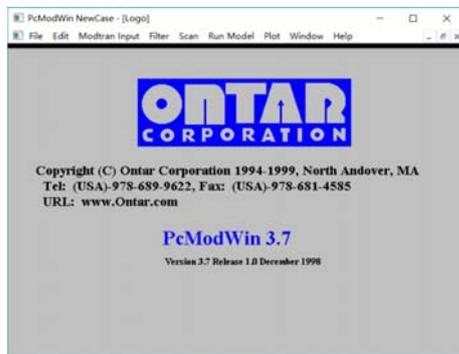


图2 PcModWin 操作界面

Fig.2 The interface of PcModWin

3 大气温度理论模型分析

通过使用大气传输软件 MODTRAN 可以得出不同海拔高度下紫外大气传输的特性曲线。本文中, 通过 MODTRAN 软件, 仿真出了美国 1976 标准大气条件, 乡村能见度 5 km 的环境条件以及探测距离为 500 m 条件下, 0~11 km 海拔高度下, 波长与紫外波段大气透过率的关系曲线。通过与大气温度轮廓线相关联, 我们可以得出不同大气温度下, 紫外大气传输的特性曲线, 绘制如图 3 所示。

其中, 波数代表的是紫外波段的波长, 由于电晕波段主要分布在 240~280 nm, 通过换算, 我们截取波数为 35700~41600 cm⁻¹ 的波段, 得出如图 4 所示曲线。

通过对图 4 分析可知, 在 240~280 nm 的范围内, 随着温度的升高, 透率先增加后减小, 温度在 250 K 附近存在透过率极大值。我们采用 4 阶多项式拟合每个单波长下温度与透过率的关系。在这里我们取 240 nm、260 nm 和 280 nm 三个波长下的大气温度与透过率以及对应的曲线拟合结果图如图

5 所示。

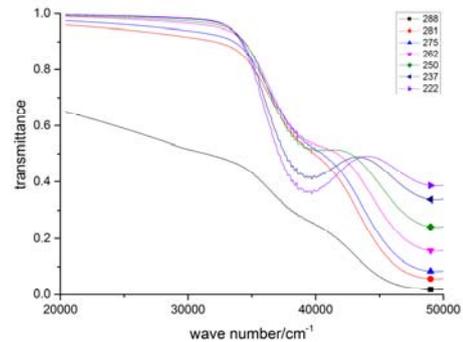


图3 不同大气温度条件下, 紫外大气透过率曲线

Fig.3 Curves of ultraviolet atmospheric transmittance at different atmospheric temperature

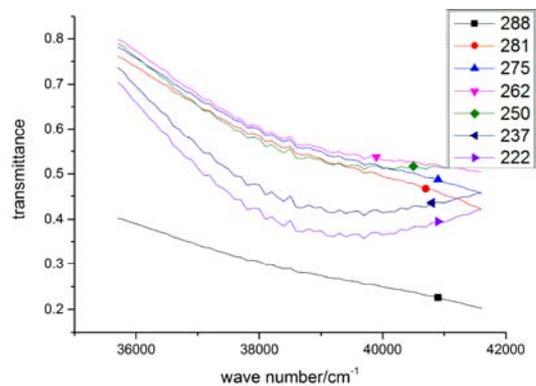


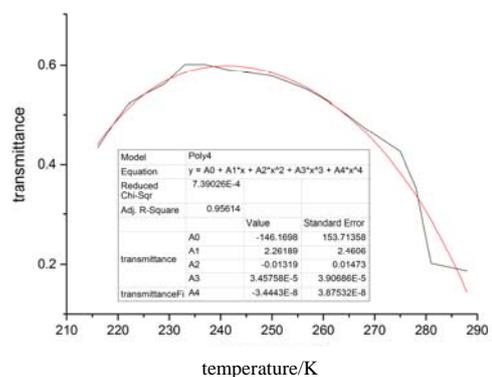
图4 不同大气温度下, 240~280 nm 下紫外大气透过率曲线

Fig.4 Curves of ultraviolet (240-280 nm) atmospheric transmittance at different atmospheric temperature

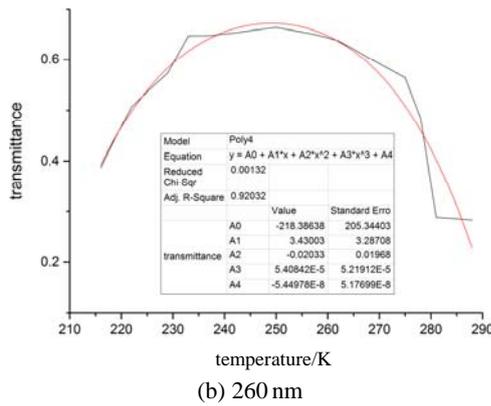
本文中, 针对 240~280 nm 的每一波长下, 我们采用的四阶多项式曲线拟合。一般四阶多项式拟合的通用公式如下所示:

$$y = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + A_4x^4 \quad (4)$$

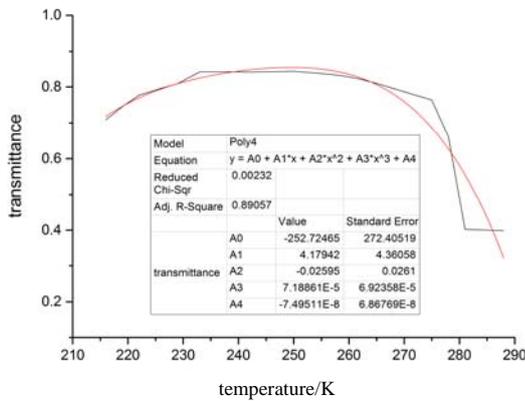
通过在每个波长下, 大气温度与透过率关系曲线所拟合出的四阶多项式, 我们得出了在每个波长下, 多项式的参数值与波数的关系, 如表 1 所示。



(a) 240 nm



(b) 260 nm



(c) 280 nm

图5 240~280 nm 波长下, 大气温度与透过率曲线的拟合结果

Fig.5 Fitting results of atmospheric temperature and transmittance at wavelength of 240-280 nm

表1 每个波数下对应的大气温度与透过率关系的参数值

Table 1 The parameter value of the relationship between atmospheric temperature and transmittance under each wave number

| Wave number | A ₀ | A ₁ | A ₂ | A ₃ | A ₄ |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 37000 | -254.10 | 4.08 | -0.024 | 6.66E-05 | -6.80E-08 |
| 37500 | -244.30 | 3.88 | -0.023 | 6.25E-05 | -6.35E-08 |
| 38000 | -229.14 | 3.62 | -0.021 | 5.78E-05 | -5.85E-08 |
| 38500 | -219.57 | 3.45 | -0.020 | 5.46E-05 | -5.50E-08 |
| 39000 | -207.07 | 3.24 | -0.019 | 5.07E-05 | -5.10E-08 |
| 39500 | -197.80 | 3.08 | -0.018 | 4.80E-05 | -4.81E-08 |
| 40000 | -188.33 | 2.93 | -0.017 | 4.53E-05 | -4.53E-08 |
| 40500 | -180.37 | 2.80 | -0.016 | 4.33E-05 | -4.33E-08 |
| 41000 | -166.76 | 2.58 | -0.015 | 3.97E-05 | -3.96E-08 |
| 41500 | -146.17 | 2.26 | -0.014 | 3.45E-05 | -3.44E-08 |

通过分析表1可知, 这5个参数随着波数的变化呈线性变化, 因此, 可以总结出紫外大气透过率

与波长和温度的关系式为:

$$T_r = -1088.74 + 0.02256 \times w + (18.08 - 3.79 \times 10^{-4} \times w)T + (-0.10 + 2.19 \times 10^{-6} \times w)T^2 + (3.12 \times 10^{-4} - 6.69 \times 10^{-9} \times w)T^3 + (-3.26 \times 10^{-7} + 7 \times 10^{-12} \times w)T^4 \quad (5)$$

式中: T_r 是紫外大气透过率; w 代表波数; T 代表大气温度。

4 实验与分析

本文通过对 260 nm 的特征波长进行分析, 选取在开阔的场地中进行实验, 探测距离为 60 m, 实验所用的辐射源为氙灯、积分球以及 260 nm 的滤光片组成的光源系统, 可以稳定地输出 260 nm 的信号, 通过紫外成像仪对信号进行采集, 紫外成像仪所显示的数据为光子数, 表征到达成像仪的光子个数, 通过分析可知, 光子数 P 与透过率 T 的关系可以表示为:

$$T = P / P_{out} \quad (6)$$

式中: P_{out} 表示光源出口处的光子数, 由于实验中, 光源的强度保持不变, 因此 P_{out} 为固定值。实验时间在 5 月份, 从中午 12 点开始, 每隔 1 h 测量一次, 一直测量到凌晨 12 点。实验中用到两个温度计, 分别放在光源出口和成像仪前端, 采集到的温度与光子数对应的表格如表 2 所示。

表2 大气温度对应的紫外成像仪所采集光子数

Table 2 The number of photons collected by the ultraviolet imager corresponding to the atmospheric temperature

| Temperature | | Photon number |
|------------------|------------------|---------------|
| thermometer 1/°C | thermometer 2/°C | |
| 37.4 | 37.4 | 6706 |
| 38 | 38.2 | 6663 |
| 37 | 38.9 | 6982 |
| 32.9 | 36.5 | 8209 |
| 30.5 | 32.5 | 8621 |
| 29 | 30.8 | 8703 |
| 25.6 | 26.7 | 9350 |
| 24 | 25.5 | 9621 |
| 23.3 | 24.5 | 9955 |
| 22 | 23.1 | 10152 |
| 21 | 22 | 10250 |
| 20.1 | 21 | 10222 |
| 19.3 | 19.7 | 10926 |
| 18.1 | 19.1 | 10986 |

表中,光子数是通过连续采集10次成像仪的光子数取平均得到,我们将两个温度计所采集的温度值求平均作为大气温度,得出光子数与大气温度的曲线如图6所示。

从图6中可以看出,随着温度的升高,光子数逐渐降低,也就是代表透过率逐渐降低,这与拟合的结果相符合,由于实验时的温度限制,我们无法得到理论建立模型的极值,我们通过对所采集的光子数进行二次拟合,然后再进行扩展,得出拟合后的曲线如图7所示。

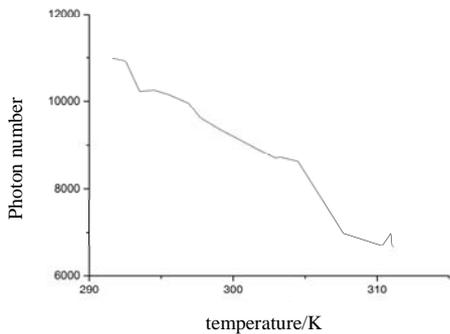


图6 光子数与大气温度的关系曲线

Fig.6 Curve between photon number and atmospheric temperature

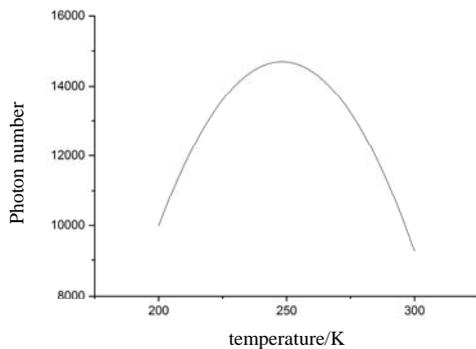


图7 拟合后的光子数与大气温度的曲线

Fig.7 Curve between photon number and atmospheric temperature through curve fitting

从图7中可以看出,拟合后的曲线在整体趋势上和理论所建立的模型曲线大致相同,极值点都同样在250 K附近。由于光源所发出的光是稳定均匀的单色光,因此到达紫外成像仪的光子数可以看作是单色光经过大气环境衰减后的度量,所拟合的光子数的极值,也可以代表大气透过率的极值,因此,通过分析光子数与温度的关系曲线,印证了所建立模型的准确性。

5 总结

本文从大气温度轮廓线与国际通用的大气传输模拟软件 MODTRAN 出发,通过分析海拔高度与大气温度的曲线,以及拟合海拔高度与大气传输特性的曲线,整理得出最终大气温度与紫外大气传输特性的关系;运用分波长分析和曲线拟合,我们得出了在不同波长下,温度与大气透过率的关系曲线,再通过加入波长参数,我们得出了最终的大气透过率与紫外波数和大气温度的关系式。通过在实际大气环境中的实验数据,我们验证了所建立模型的准确性。通过以上研究,可以促进紫外探测在大气传输的量化研究,提高日盲紫外探测在电晕应用的准确性。

参考文献:

- [1] 匡蕾, 顾燕. 紫外像增强器用于电力安全检测的研究[J]. 红外技术, 2015, 37(11): 986-990.
KUANG Lei, GU Yan. Research on the application of UV image intensifier in security detection of power equipment[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(11): 986-990.
- [2] 郑海晶, 白廷柱. 紫外告警技术现状及发展分析[J]. 红外技术, 2017, 39(9): 773-779.
ZHENG Haijing, BAI Tingzhu. Development analysis and state of ultraviolet warning technology[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(9): 773-779.
- [3] 张海峰, 庞其昌, 陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表, 2006, 43(2): 6-8.
ZHANG Haifeng, PANG Qichang, CHEN Xiuchun. The characteristics of high-voltage corona and its detection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2006, 43(2): 6-8.
- [4] 周影, 姜洪伟, 周跃, 等. 微弱日盲紫外电晕自动实时检测方法[J]. 中国光学, 2015 (6): 926-932.
ZHOU Ying, LOU Hongwei, ZHOU Yue, et al. Automatic real-time detection method of faint solar-blind ultraviolet corona[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2015(6): 926-932.
- [5] 张志劲, 张伟, 黎振宇, 等. 不同缺陷类型导线的紫外成像检测[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2647-2652.
ZHANG Zhijin, ZHANG Wei, LI Zhenyu, et al. UV imaging detection on transmission line of different defect types[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(9): 2647-2652.
- [6] 肖遥, 张志劲, 邓军, 等. 非设备故障缺陷引起紫外放电测试结果差异的因素分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 887-894.
XIAO Yao, ZHANG Zhijin, DENG Jun, et al. Analysis on factors of UV-discharge test results difference caused by non-equipment defect and fault[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(3): 887-894.

- [7] 万树伟, 陈澜, 卞星明, 等. 试验电压对输电线路缺陷电晕放电紫外光子计数率的影响[J]. *高电压技术*, 2014, **40**(1): 147-152.
WAN Shuwei, CHEN Lan, BIAN Xingming, et al. Effect of applied-voltage on UV photon number of corona discharge from transmission line defect[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, **40**(1): 147-152.
- [8] 韩顺利, 胡为良, 罗文健, 等. 基于光谱辐射特性及图像增强的紫外场景仿真研究[J]. *中国激光*, 2013, **B12**: 244-246.
HAN Shunli, HU Weiliang, LUO Wenjian, et al. Research on ultraviolet scene simulation based on spectrum radiation characteristics and image enhancement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **B12**: 244-246.
- [9] 叶会生, 雷红才, 臧春艳, 等. 极不均匀场中电晕放电的紫外成像检测特性研究[J]. *高压电器*, 2010, **46**(1): 35-39.
YE Huisheng, LEI Hongcai, ZANG Chunyan, et al. Study on UV imaging detection characteristics of corona discharge under non-uniform electric field[J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, **46**(1): 35-39.
- [10] 王胜辉, 冯宏恩, 律方成. 基于日盲紫外成像检测的复合绝缘子电晕放电光子数变化特性[J]. *高电压技术*, 2014, **40**(8): 2360-2366.
WANG Shenghui, FENG Hongen, LV Fangchen. Variation characteristics of composite insulator corona discharge photon count based on solar-blind ultraviolet imaging detection[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, **40**(8): 2360-2366.
- [11] 王黎明, 万树伟, 卞星明, 等. 极不均匀电场中负直流电晕放电紫外特性[J]. *高电压技术*, 2014, **40**(6): 1614-1622.
WANG Liming, WAN Shuwei, BIAN Xingming, et al. Ultraviolet characteristics of negative DC corona discharge in extremely non-uniform electric field[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, **40**(6): 1614-1622.
- [12] 王胜辉, 冯宏恩, 律方成. 电晕放电紫外成像检测光子数的距离修正[J]. *高电压技术*, 2015, **41**(1): 194-201.
WANG Shenghui, FENG Hongen, LV Fangcheng. Distance correction of corona discharge photon count in ultraviolet imaging detection[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, **41**(1): 194-201.