

激光诱导击穿光谱技术在绝缘子污秽快速定量检测中的应用

顾黎强¹, 钱朝军¹, 孙明刚¹, 张 龙¹, 施浩波²

(1. 国网安徽省电力有限公司建设分公司, 安徽 合肥 230071;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:为研究激光诱导击穿光谱技术在绝缘子污秽快速定量检测中的应用,提升绝缘子污秽检测精度与速度,本文搭建基于激光诱导击穿光谱技术的检测平台对人工污秽与自然污秽样本进行测试,其中人工污秽样本由NaCl、CaSO₄、CaCO₃与高岭土混合形成,自然污秽样本则取自南方某地区电网中运行2年与4年的硅橡胶绝缘子,借助自由定标激光诱导击穿光谱方法对绝缘子污秽进行快速定量检测。结果表明:两个人工污秽样本中存在不同比例的9种元素成分,而两个自然污秽样本则分别存在9种和11种不同的元素;经过自吸收校正后,绝缘子污秽元素在玻尔兹曼图中表现为分布点排列整齐、回归线斜率一致、拟合程度高以及各元素的谱线强度明显增强,有效降低了自吸收效应对绝缘子污秽快速定量检测的影响,使检测精度得到提升。

关键词:光谱采集;等离子体;污秽成分;自吸收校正;定量检测;激光诱导击穿光谱

中图分类号:TM216 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.06.014

Application of laser-induced breakdown spectroscopy in rapid quantitative detection of insulator contamination

GU Liqiang¹, QIAN Chaojun¹, SUN Minggang¹, ZHANG Long¹, SHI Haobo²

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Construction Company, Hefei 230071, China;

2. State Grid China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to investigate the application of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) technology in rapid quantitative detection of insulator contamination, and improve the accuracy and speed of insulator contamination detection, a detection platform based on LIBS technology was established to test artificial and natural contamination samples. The artificial contamination samples were formulated by mixing NaCl, CaSO₄, CaCO₃, and kaolin, while the natural contamination samples were taken from silicone rubber insulators which had been in operation for two and four years in a regional power grid in southern China. The rapid quantitative detection of insulator contamination was carried out by means of the calibration-free LIBS method. The results show that there are 9 kinds of elements with different proportions in the two artificially contaminated samples, while the two naturally contaminated samples contain 9 and 11 distinct elements, respectively. After self-absorption correction, the contaminant elements of the insulators are presented as neatly arranged distribution points on the Boltzmann plot, with consistent regression line slopes, and high fitting degrees, and the spectral line intensities of each element enhances significantly. This effectively mitigates the impact of self-absorption on rapid quantitative detection of insulator contamination, and improves the detection accuracy.

Key words: spectrum acquisition; plasma; filth component; self-absorption correction; quantitative detection; laser induced breakdown spectrum

0 引言

电力系统中,绝缘子是非常重要的外绝缘设备,在整个输电网中占有较为重要的位置^[1-3]。然而电网在日常运行过程中,绝缘子表面通常会附着污

秽物,当污秽物累积到一定程度或含有腐蚀性成分时,就会影响绝缘子的绝缘性能^[4],甚至会出现线路闪络的现象,进而造成电力系统故障,导致大面积停电^[5-6]。因此,为了实时掌握绝缘子表面的污秽情况,设计出一种在不影响电网正常运行情况下,能够直接获取绝缘子污秽类型及成分的方法,具有重要的实际意义。

基金项目:国家电网公司科技项目(SGFJKOODWJS2000375)。

近年来,国内外诸多学者针对绝缘子污秽检测问题进行了大量研究,并取得了一定的成果。邱彦等^[7]通过采集绝缘子污秽样本高光谱图像,提取其高光谱谱线,并利用重加权采样方法获取样本中所有元素的谱线波长特征,构建基于随机森林的各波段分类模型,利用该模型对绝缘子污秽成分展开识别;王思华等^[8]根据绝缘子所在地区的气候特点,构建绝缘子表面污秽颗粒动态沉降模型,对绝缘子积污期间的积污公式进行改进,并以风速、降雨强度、次数等作为输入向量,将其输入创建好的基于遗传-BP神经网络的降雨冲刷模型中,以此实现该地区绝缘子表面被雨水冲刷后剩余污秽度的预测。上述两种方法虽然可以实现对绝缘子污秽的检测,但是前者主要依据高光谱成像技术进行检测,易受外界环境干扰,影响最终的检测精度;后者仅能对绝缘子表面污秽度进行预测,不能对污秽成分实现有效检测。

激光诱导击穿光谱技术(LIBS)作为新兴起的光谱检测技术,其依据脉冲激光技术,采用高能激光聚集方式,对待检样本实施远距离检测,具有非接触性和无损性,在远程元素分析方面有着广泛应用^[9-10]。本文研究激光诱导击穿光谱技术在绝缘子污秽快速定量检测中的应用。通过搭建基于激光诱导击穿光谱技术的检测平台,检测不同类型的样本,验证其检测性能,探究其应用性,以期准确获取绝缘子污秽类型及成分。

1 绝缘子污秽快速定量检测

1.1 实验设备

实验设备主要包含光学平台、激光器、光谱仪、延时控制器以及反射透镜与聚焦透镜等。实验流程图见图1。

激光器(Nimma-900型,北京镭宝光电技术有限公司)能够设置多个脉冲波长。当波长为1 064 nm,发射时间达到10 ns时,其放射出的能量值能够

达到900 mJ。高能激光在短时间内可能对绝缘子表面造成损伤。激光的能量可以在相对较短的时间内传递给绝缘子材料,导致材料加热并可能产生热应力或熔化。这些过程可能导致绝缘子表面材料的物理或化学性质发生变化,且在长期检测的情况下可能会累积损伤。然而,具体影响和损伤程度取决于多个因素,包括激光功率、激光脉冲持续时间等。在现实应用中,为了保护绝缘子表面免受激光损害,通常会采取一些防护措施。本研究缩短激光脉冲持续时间,设置为2 ns,激光功率为90 mJ。

光谱仪(NEXOS™ Compact Line型,北京爱万提斯科技有限公司)可应于6个脉冲波段,采样时间间隔为0.01 nm。

延时控制器(DG645型,深圳市中瑞仪科电子有限公司生产商)重复频率为10 Hz。为了使光谱可以实现最大信噪比,实验设定延时时间为3.5 μs,分光计积分时间为35 μs^[11-12]。

利用LIBS进行绝缘子污秽快速检测的过程如下:将绝缘子污秽样本放置在光学平台上,调节实验样本与透镜的间距,使样本处于透镜的焦点位置;激光器发出的脉冲激光通过反射透镜与聚焦透镜作用于样本表面,样本便会被烧蚀、激发、蒸发以及解离,从而形成等离子体,这些等离子体具有温度高、电子密度高的特点^[13];利用延时控制器对光谱仪采集光谱信号的延迟时间进行控制,使光谱仪利用光纤获取辐射粒子光谱,待检测绝缘子污秽样本中元素的类别与含量可以通过光谱波长所在位置以及强度反映出来,这也是利用激光诱导击穿光谱技术对相关物质进行定量分析的依据;光谱中的相关数据则通过计算机进行获取与处理。

1.2 样本制备

采用人工污秽与自然污秽两种样本作为实验样本。其中人工样本选用的是含有不同污秽成分与含量的涂污绝缘片,绝缘片的材质是硅橡胶,尺寸为8 cm×8 cm。首先使用酒精对绝缘片表面进行清理,再将几类较为典型的污秽成分NaCl、CaSO₄、CaCO₃与高岭土(其主要成分为Al₂O₃等)混合形成人工污秽浊液后,涂抹在经过清理的绝缘片表面,获得盐密为0.3 mg/cm²、灰密为4 mg/cm²的1#样本,以及盐密为0.5 mg/cm²、灰密为3.8 mg/cm²的2#样本。

自然污秽样本则从南方某地区运行的电网中,选取年限分别为2年与4年的硅橡胶绝缘子作为实验样本。首先从这两种绝缘子上分别取下两块尺寸一样的绝缘片,通过水洗法获得运行2年的绝缘

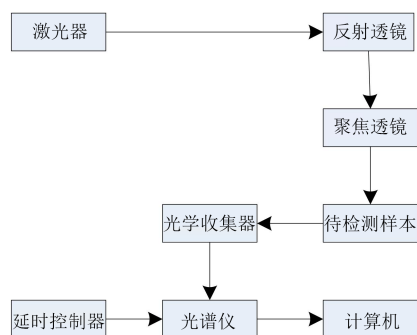


图1 实验流程图

Fig.1 Experimental flow chart

子盐密为 0.015 mg/cm²、灰密为 1.8 mg/cm², 而运行 4 年的绝缘子盐密为 0.039 mg/cm²、灰密为 2.9 mg/cm²。分别将这两个年限的自然积污绝缘片作为 3[#]、4[#] 样本用于实验。

1.3 基于 CF-LIBS 的绝缘子污秽快速定量检测

自由定标激光诱导击穿光谱方法(CF-LIBS)是进行定量分析的一种模型,其依据光谱线强度以及等离子体参数之间的关系对模型进行构建。该方法不受基体效应影响,也不需要利用大量样本构建定标曲线,比较适用于现场对绝缘子污秽进行快速检测^[4]。

光谱谱线强度以及等离子体参数间的关系如式(1)所示。

$$I_{\lambda}^{ij} = FG_s A_{ij} (g_i / (U_s(T))) e^{\frac{E_i}{k_B T}} \quad (1)$$

式(1)中: I_{λ}^{ij} 为跃迁波长 λ 下的谱线强度; i, j 分别为 λ 对应的电子跃迁的高能级、低能级; F 为实验常数; G_s 为样本内发射粒子浓度,下标 S 表示粒子类别; A_{ij} 为谱线跃迁概率; g_i 为 i 的统计权重; T 为等离子体激发温度; $U_s(T)$ 为 T 温度下种类为 S 的粒子配分函数; E_i 为 i 能级粒子的能量; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为自然常数。

对式(1)取对数,将其转换为直线形,描述为式(2)。

$$y = ax + q_s \quad (2)$$

式(2)中, a 和 q_s 分别为斜率和截距。

由公式(2)的原理推导式(3)~(6),绘制玻尔兹曼图。

$$a = -(1/(k_B T)) \quad (3)$$

$$q_s = \ln((FG_s)/(U_s(T))) \quad (4)$$

$$x = E_i \quad (5)$$

$$y = \ln(I_{\lambda}^{ij}/(g_i A_{ij})) \quad (6)$$

利用式(5)~(6)中 x, y 定义的二维平面为玻尔兹曼平面,通过实验获取的各条谱线均可表示为该平面上的一个点,因此对于绝缘子污秽样本内所有的元素粒子,均可以通过式(2)进行描述,同时描绘出玻尔兹曼图。

通过获取的玻尔兹曼图,能够反映出等离子体的温度,进而可以求得 $U_s(T)$,再结合各粒子的 q_s ,能够获得所有粒子的 G_s 。依据 G_s 的归一化,求取 F ,描述为式(7)。

$$\sum_s G_s = 1, F = \sum_s U_s(T) e^{q_s} \quad (7)$$

把 F 代入式(8),可获取所有粒子以及待分析元素的质量占比。

$$G_s = (1/F) U_s(T) e^{q_s} \quad (8)$$

则待分析元素浓度 G'_s 可以描述为式(9)。

$$G'_s = G_s^Y + G_s^L \quad (9)$$

式(9)中: G_s^Y 和 G_s^L 分别为待分析元素中的原子浓度和离子浓度。

因为光谱谱线强度往往受自吸收影响,进而会降低对绝缘子污秽定量分析的精度^[15],所以应该对谱线强度实施自吸收校正处理,以此增加计算等离子体温度的准确性,从而更精准地对绝缘子污秽进行定量分析。本研究通过内参考线的自吸收校正模型(IRSAC)对谱线强度实施自吸收校正。

为了衡量自吸收效应,引进自吸收系数 f_{λ} 来校正谱线强度, f_{λ} 描述为式(10)。

$$f_{\lambda} = (I_{\lambda}^{ij}/I_{\lambda_R}^{mn})((g_m A_{mn})/(g_i A_{ij})) e^{\frac{-E_m - E_i}{k_B T}} \quad (10)$$

式(10)中: λ_R 为内参考线波长; $I_{\lambda_R}^{mn}$ 为谱线强度; A_{mn} 为自吸收系数; g_m 为校正因子; E_m 为谱线强度偏差。

求得的 f_{λ} 如在 0~1 区间内,则视为有效值,其值越接近 1,说明受自吸收效应影响越小;如果不在此区间内,则将其设置成 1,代表无需校正。

获取到所有谱线的 f_{λ} 后,就可以通过式(11)对其谱线强度进行校正。

$$I'_{\lambda}{}^{ij} = (I_{\lambda}^{ij}/f_{\lambda}) = ((I_{\lambda_R}^{mn} g_i A_{ij})/(g_m A_{mn})) e^{\frac{-E_m - E_i}{k_B T}} \quad (11)$$

在对谱线强度进行校正的过程中,内参考线的选取至关重要,其可以直接影响绝缘子污秽定量检测的结果。一般来说,常选取受自吸收影响小的谱线,也就是上能级能量高、谱线跃迁概率低且强度也较低的谱线当作内参考线。

2 实验分析

为了衡量激光诱导击穿光谱技术对绝缘子污秽定量检测的性能,实验对污秽样本中主要元素的内参考线进行了选取,详见表 1。

2.1 人工污秽绝缘片定量检测

利用本文方法对 1[#]、2[#] 人工污秽样本进行定量检测,得到这两个污秽样本的光谱图如图 2 所示。从图 2 可以看出,光谱图可以清晰地反映出人工污秽样本中所有元素的类别与含量。样本 1[#] 和 2[#] 中均含有 9 种元素,其中样本 1[#] 中元素 Ca(1) 的含量最大,元素 Na 次之,元素 O(1) 含量最小。而样本 2[#] 中元素 Ca(2) 的含量最大,元素 Ca(1) 次之,元素 O(3) 含量最小。由此可见,激光诱导击穿光谱技术可以有效实现对绝缘子污秽的定量检测。根据设置的变量,1[#] 样本的盐密小于 2[#] 样本,而灰密略大于 2[#] 样本。而图 2 中元素含量的对比结果并非完全对应,这是因为密度和元素含量并非直接相关。即使两个样本

表1 绝缘子污秽样本中主要元素内参考线

元素	波长/nm	跃迁概率/s ⁻¹	上能级能量/eV
Ca(1)	545.95	4.07×10 ⁷	6.124 5
Ca(2)	356.39	4.07×10 ⁷	5.365 4
O(1)	231.47	2.15×10 ⁶	30.269 8
O(2)	399.81	2.15×10 ⁶	27.345 8
O(3)	469.87	2.15×10 ⁶	26.564 7
Na	573.26	4.95×10 ⁶	39.879 4
C	449.25	3.31×10 ⁷	26.564 7
Cl	498.13	3.48×10 ⁶	21.968 7
S	319.69	3.14×10 ⁶	19.589 7
Al	262.88	3.25×10 ⁶	20.125 4
K	621.32	2.56×10 ⁶	12.324 5
Mg	678.98	3.73×10 ⁶	8.876 5
Fe	739.86	4.15×10 ⁶	11.654 2
Si	767.35	2.19×10 ⁶	9.087 8

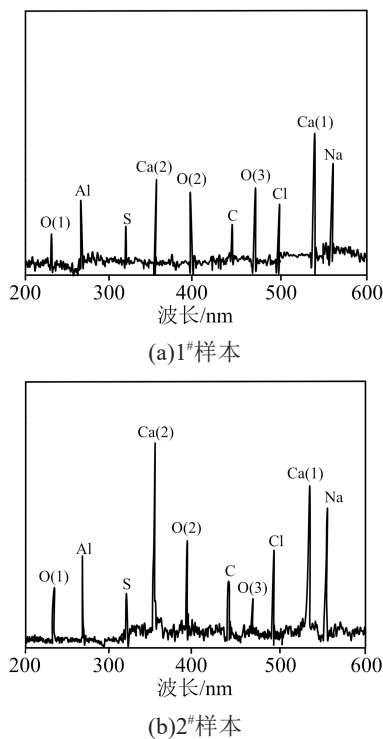


图2 人工污秽样本光谱图

Fig.2 Spectra of artificial contamination sample

具有相似的密度,它们的化学组成也可能存在差异。

采用X射线光电子能谱(XPS)技术作为标准对1#样本进行元素分析,以文献[7]作为对比方法,得到光谱检测对比结果如图3所示。从图3可以看出,本文方法得到的光谱图与XPS技术相一致,说明本文方法可以有效实现污秽样本的定量检测。与文献[7]方法相比,本文方法的检测结果精度较高,可

以准确实现污秽样本的定量检测。

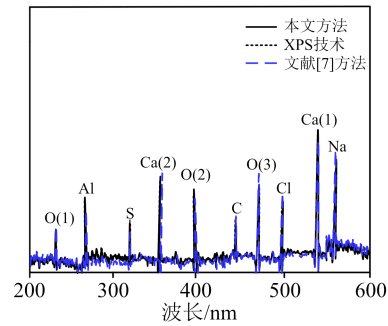


图3 1#样本光谱对比图

Fig.3 Spectral comparison map of sample 1#

2.2 自然污秽样本定量检测

利用本文方法对3#、4#自然污秽样本进行定量检测,得到关于这两个污秽样本的光谱图,如图4所示。从图4可以看出,3#样本检测出9种元素,且主要集中在波长为400~700 nm,其中元素C的含量最大,元素O(1)含量最小。而4#样本中则检测出11种元素,元素Ca(1)的占比最大,对比3#样本新增了少量的Fe元素与Si元素,主要集中在波长为400~800 nm。从上述数据可知,4#样本的污秽程度高于3#样本,进而说明本文方法有效。

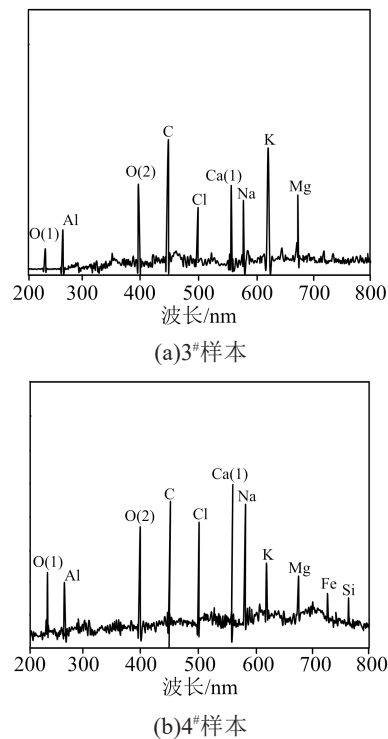


图4 自然污秽样本光谱图

Fig.4 Spectra of natural contamination samples

2.3 自吸收校正性能测试

为了考量本文所提自吸收校正方法的性能,实

验分别对2[#]人工污秽样本中的元素Ca(2)、Na、S,以及4[#]自然污秽样本中的元素Ca(1)、C、Mg进行测试,各元素经过自吸收校正前后的谱线通过玻尔兹曼图进行描述,结果如图5和图6所示。

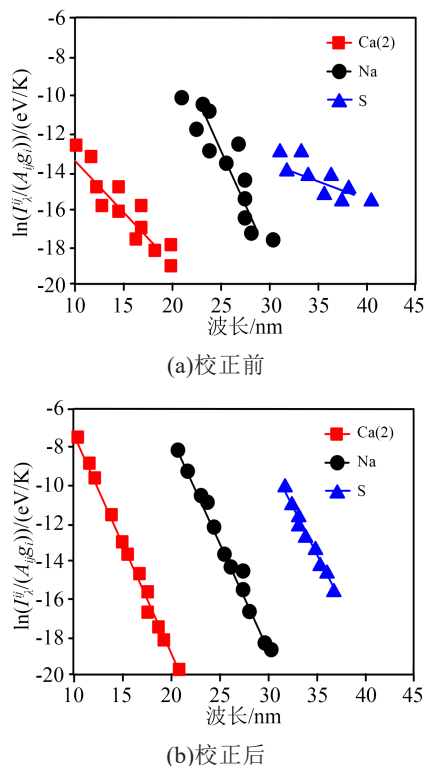


图5 2[#]样本部分元素自吸收校正前后玻尔兹曼图
Fig.5 Boltzmann diagram of sample 2[#] partial elements before and after self-absorption correction

图5中的纵坐标即为式(6)中的 y ,通过图5可知,在对2[#]样本进行自吸收校正前,3种元素的谱线体现在玻尔兹曼图中的分布点多数排列在回归线左右两侧,线性程度较低,部分点偏离期望位置较远,导致这种现象的原因就是自吸收效应的影响。进行自吸收校正后的分布点,排列较为整齐,回归线的斜率接近一致,拟合程度得到提升,各元素的谱线强度也得到明显增强。

从图6可以看出,4[#]样本经过自吸收校正后,体现在玻尔兹曼图中的分布点以及回归线得到有效校正,其中C元素相比其他两个元素在校正前后变化的幅度不大,说明该元素受自吸收效应影响较小,其他元素受其影响较大。由此表明,存在于不同化合物中的各个元素,被自吸收效应影响的程度各有不同,进而说明利用激光诱导击穿光谱技术对绝缘子污秽进行定量检测时,会受到自吸收效应不同程度的影响,利用本文方法可以较好地解决该问题,有效提升绝缘子污秽定量检测精度。

以XPS技术作为标准对2[#]样本部分元素自吸收校正后进行分析,结果如图7所示。

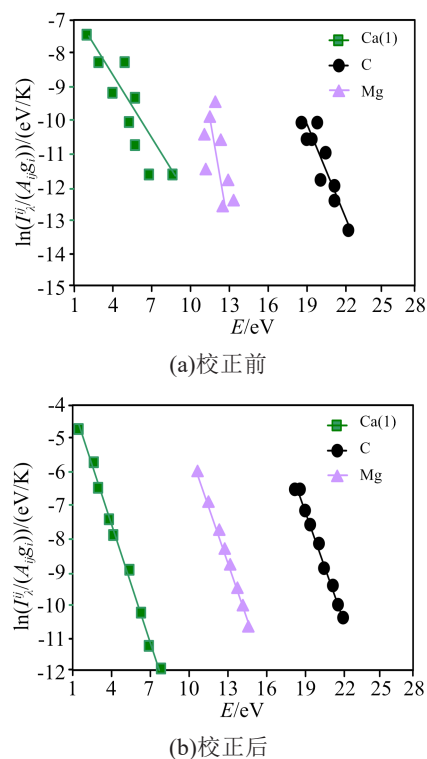


图6 4[#]样本部分元素自吸收校正前后玻尔兹曼图
Fig.6 Boltzmann diagram of sample 4[#] partial elements before and after self-absorption correction

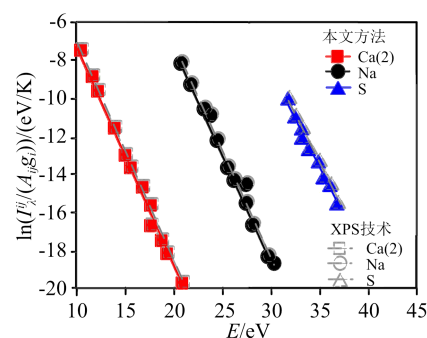


图7 2[#]样本部分元素自吸收校正后的对比结果
Fig.7 Comparasting results of sample 2[#] partial elements after self-absorption correction

从图7可以看出,本文方法得到的2[#]样本部分元素自吸收校正后的玻尔兹曼图与XPS技术相一致,表明本文方法对元素自吸收校正的检测具有有效性,获得的结果具有一定的参考价值。

3 结论

(1)利用LIBS技术,成功对绝缘子污秽样本中的9种元素进行定量检测,验证了其高灵敏度。

(2)引入自吸收校正技术后,元素谱线在玻尔兹曼图上的分布点更整齐,拟合度提升至90%以上,有效提高了检测精度。

(3)与XPS技术对比,本文LIBS方法在绝缘子

污秽定量检测中的误差率低于5%,提供了可靠的检测手段。

参考文献:

- [1] 王乃啸,王希林,覃歆然,等.激光诱导击穿光谱结合 CARS-PLSR法快速定量检测绝缘子污秽[J].中国电机工程学报,2020,40(04):1378-1386,1428.
- [2] 王欣伟,刘星廷,芦山,等.绝缘子葡萄糖污秽的激光诱导击穿光谱检测[J].高电压技术,2022,48(3):876-882.
- [3] 郭连波,牛雪晨,张猛胜,等.激光诱导击穿光谱技术应用研究进展[J].光子学报,2023,52(3):67-80.
- [4] 董丽丽,高晴,吴家森,等.基于皮秒激光诱导击穿光谱技术的镓酸铋薄膜的快速定量分析研究[J].红外与激光工程,2023,52(3):339-347.
- [5] 马欢,郭裕钧,张血琴,等.基于高光谱技术的绝缘子污秽含水量检测[J].高电压技术,2020,46(4):1396-1404.
- [6] 李茂刚,梁晶,闫春华,等.基于激光诱导击穿光谱技术结合随机森林算法快速定量分析土壤中重金属元素[J].分析化学,2021,49(8):1410-1418.
- [7] 邱彦,郭裕钧,张血琴,等.基于高光谱技术的绝缘子污秽成分识别方法[J].高电压技术,2020,46(11):4023-4030.
- [8] 王思华,王惠,田铭兴.盐碱沙尘区域的接触网绝缘子动态积污与预测研究[J].铁道学报,2020,42(8):68-75.
- [9] 张血琴,周志鹏,郭裕钧,等.不同材质绝缘子污秽等级高光谱检测方法研究[J].电工技术学报,2023,38(7):1946-1955.
- [10] 杨忠毅,蒋兴良,张志劲,等.基于离子聚类配对的绝缘子表面可溶污秽化合物成分检测方法[J].高电压技术,2022,48(11):4287-4296.
- [11] 伍弘,郝金鹏,杨凯,等.宁夏引黄灌区输电线路绝缘子污秽分析及防污闪运维建议[J].绝缘材料,2022,55(8):82-89.
- [12] 燕宝峰,车传强,赵建坤,等.绝缘子表面灰密的测量影响因素分析[J].电瓷避雷器,2022,309(5):172-177.
- [13] 王英,刘炯德,马建桥,等.高速列车车顶绝缘子动态积污特性仿真分析[J].计算机仿真,2020,37(7):172-177.
- [14] 杨刚,李恒超,谭蓓,等.层次极限学习机用于高光谱图像预测绝缘子污秽度[J].西南交通大学学报,2020,55(3):579-587.
- [15] 郭飞飞,徐鹏,崔飞鹏,等.激光诱导击穿光谱技术对铁矿石中磷硫碳的快速定量表征[J].冶金分析,2020,40(12):94-98.

收稿日期:2023-06-16;修回日期:2023-09-07。

作者简介:顾黎强(1979-),男(汉族),安徽淮南人,高级工程师,主要从事电力工业及工业经济等的研究;钱朝军(1982-),男(汉族),安徽合肥人,高级工程师,主要从事电力工程、土木工程建造与管理的研究。