第 50 卷 第 2 期：561-569 高电压技术 Vol.50, No.2: 561-569
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231028

# 基于激光诱导等离子体的真空开关真空度检测稳定性研究

柯　伟，袁　欢，刘佳琪，王小华，杨爱军，荣命哲
（西安交通大学电气工程学院，西安 710049）

**摘　要**：基于激光诱导等离子体成像的真空开关真空度检测方法是一种非接触式真空度检测方法，有望实现安全可靠的真空开关真空度带电检测。但是，激光诱导等离子体的演化是一个十分复杂的物理过程，激光能量、等离子体测量延迟时间等因素直接影响了等离子体成像，对等离子体成像稳定性的影响需要进行更加深入的研究。为此采用相对标准偏差研究了等离子体成像平均次数、激光能量和等离子体测量延迟时间等对等离子体图像和等离子体辐射强度积分稳定性的影响。结果显示，多次成像平均得到的等离子体图像和辐射强度积分不随平均次数发生明显变化，可用于表征真空度。更重要的是，等离子体辐射强度积分的相对标准偏差随平均次数和激光能量的增加而单调下降，随延迟时间的增加而增大，这意味着对等离子体进行多次成像平均，增加激光能量，减小等离子体成像的延迟时间可以提高等离子体辐射强度积分的稳定性，有利于提高真空度检测精度。该研究为基于激光诱导等离子体成像的真空开关真空度检测方法的参数优化提供了指导，为该方法的实际工程应用奠定了实验基础。
**关键词**：真空开关；真空度检测；激光诱导等离子体；等离子体辐射强度积分；等离子体稳定性

## Research on Stability of Vacuum Detection for Vacuum Switch Based on Laser Induced Plasma

KE Wei, YUAN Huan, LIU Jiaqi, WANG Xiaohua, YANG Aijun, RONG Mingzhe
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract**: The vacuum degree detection method for vacuum switches based on laser-induced plasma imaging is a non-contact approach that holds promise for achieving safe and reliable online monitoring of vacuum degree in vacuum switches. However, the evolution of laser-induced plasma is a highly complex physical process, where factors such as laser energy and delay time of plasma measurement directly impact plasma imaging. The influence of these factors on the stability of plasma imaging needs to be further studied. In this study, the effects of laser energy, average times of plasma imaging, plasma measurement delay time on the stability of plasma imaging and integral of plasma radiation intensity are investigated. Experimental results demonstrate that the plasma imaging and plasma radiation intensity integral do not change significantly with the average times of plasma imaging, which can be used to characterize vacuum degree. Furthermore, the relative standard deviation of the plasma radiation intensity integral displays a monotonic decrease with increasing of average times and laser energy, while it increases with delay time. This suggests that enhancing the stability of plasma radiation intensity integral can be achieved by imaging the plasma multiple times and then averaging, increasing laser energy, while reducing the delay time for plasma imaging. These findings contribute to improving the accuracy of vacuum degree detection. This study provides guidance for parameter optimization in the vacuum degree detection method based on laser-induced plasma imaging for vacuum switches, and establishes an experimental foundation for its practical engineering application.
**Key words**: vacuum switch; vacuum degree detection; laser-induced plasma; plasma radiation intensity integral; plasma stability

## 0　引言

随着“碳达峰•碳中和”目标的全面推进和经济社会的发展，电力系统的绿色低碳化升级势在必行，对环境友好型电力设备的需求将更加迫切。真空开关是一种以真空作为绝缘灭弧介质的开关设备，因其具有开断能力强、结构紧凑、维护简单等优点被广泛用于中压电力系统中[1-4]，并逐渐向高电压等级扩展，目前 126 kV 真空开关已经研制成功，并挂网试运行[5]。相比于 $SF_6$ 断路器，真空开关还天然具有温室气体零排放的绝对优势，十分契合电

**基金资助项目**：国家自然科学基金(51777145)；博士后基金(2020M683481)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51777145), Post-doctoral Foundation Projects (2020M683481).

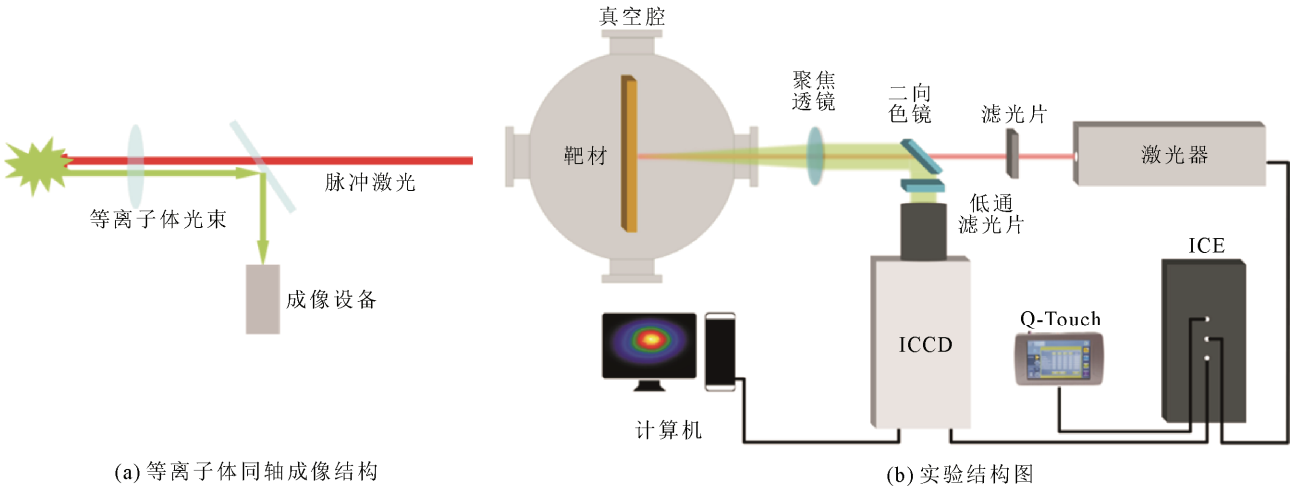
力系统的发展方向，是 $SF_6$ 断路器最理想的替代者。真空开关真空度在线检测是真空开关向高压、特高压输电等级发展、实现 $SF_6$ 断路器替代必须要解决的关键问题之一，但是，现有技术无法实现安全可靠的真空开关真空度在线检测，限制了输电等级真空开关的大规模应用。

近年来，西安交通大学研究人员提出一种基于激光诱导等离子体的真空开关真空度检测方法[6-9]，并申请了发明专利[10-13]，此方法有望实现安全可靠的真空开关真空度在线检测。该方法的基本原理是利用高能脉冲激光在真空灭弧室的屏蔽罩表面诱导产生等离子体，等离子体的形貌特征和光谱特性与环境气压密切相关，根据信号探测器探测到的等离子体光谱信号和形貌特征即可获得待测真空灭弧室的真空度。激光诱导等离子体技术因其具有样品损伤小、可在线检测、样品制备简单、多元素同步分析等优点，被广泛用于材料分析、元素检测、生物医药、深空探索等领域[14-17]。激光诱导等离子体的演化是一个十分复杂的物理过程，受激光能量、脉冲宽度、聚焦程度、靶材形貌等多种因素的影响[18-21]。等离子体的稳定性对基于激光诱导等离子体的真空开关真空度检测方法至关重要，直接影响了此方法的真空度检测精度。

目前，脉冲激光能量、等离子体测量延迟时间等因素对等离子体成像的影响已有较多研究[22-25]；但是，上述因素对用于表征真空度的特征参量“等离子体辐射强度积分”的稳定性的影响尚不明确，对真空度测量的影响需要进行更加深入的研究。本文采用相对标准偏差表征等离子体稳定性，在 1、$10^{-1}$、$10^{-2}$、$10^{-3}$、$10^{-4}$ Pa 等气压下研究了等离子体成像平均次数、激光能量、延迟时间等因素对等离子体同轴成像稳定性的影响；进一步地研究了对等离子体辐射强度积分稳定性的影响。本文为基于激光诱导等离子体成像的真空开关真空度检测方法的实验参数优化提供了指导，为此方法的实际工程应用奠定了实验基础。

## 1 实验方法与装置

激光诱导等离子体同轴成像是将脉冲激光光路与等离子体成像光路复用，即沿脉冲激光入射方向对等离子体成像，如图 1(a)所示。图 1(b)给出了本实验的光路结构图，Nd:YAG 脉冲激光器产生的脉冲激光波长为 1064 nm，脉宽为 6 ns，重复频率为 1 Hz。脉冲激光透过二向色镜(透射波长：990~1600 nm，反射波长：420~900 nm)，经半径为 25.4 mm、焦距为 150 mm、石英玻璃制成的平凸透镜聚焦于真空腔内的靶材上。脉冲激光诱导靶材产生等离子体，等离子体光束经聚焦透镜返回，被二向色镜反射，通过低通滤光片成像于增强型电荷耦合器件(intensified charge coupled device，ICCD)，ICCD 由激光器的 Q-switch 信号控制时序，等离子体测量延迟时间为等离子体开始测量时刻相对于脉冲激光能量峰值时刻的延迟，ICCD 门宽为测量曝光时间。本实验采用 T2 铜板作为靶材，靶材被固定在高精度步进台上，可以进行高精度二维步进，以改变激光烧蚀点，避免烧蚀坑对激光诱导等离子体过程产生影响。真空腔利用机械泵和分子泵采用接力抽气的方式抽至所需真空度，由热阴极电离真空计对真空腔内气压进行测量。




(a) 等离子体同轴成像结构　　(b) 实验结构图

图 1　实验设置

Fig.1　Experimental setup

## 2　实验结果与分析

### 2.1　平均次数对等离子体成像稳定性的影响

在激光诱导击穿光谱中，由于激光诱导等离子体演化过程存在不确定性[26-28]，导致光谱测量结果存在较大的波动，研究人员常采用累计光谱的方式来提高光谱测量结果的稳定性，以获得更加精准的光谱测量结果。本文研究了等离子体成像的累计平均次数对等离子体成像稳定性的影响。在本实验中，激光能量为 24 mJ，ICCD 增益为 0，等离子体测量门宽为 100 ns，即对等离子体成像时的曝光时间为 100 ns，延迟时间为 300 ns，即等离子体测量开始曝光时刻相对于脉冲激光能量峰值时刻为 300 ns。每个气压下脉冲激光烧蚀 5 个点，每个点烧蚀 20 次，每次烧蚀采集 1 张等离子体图像，每个点共 20 张等离子体图像，对前 $n$ 次采集到的等离子体图像依次累计相加求平均，离子体成像平均示意图如图 2 所示，比如：成像平均次数为 1 时的等离子体图像是第 1 次等离子体成像的结果，成像平均次数为 5 时的等离子体图像是前 5 次等离子体成像的平均值，多次累计平均后的等离子体图像如图 3(a)所示，图中等离子体图像的强度已归一化处理。

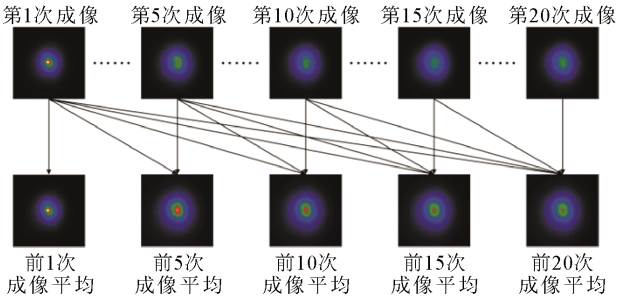



图 2　等离子体成像平均

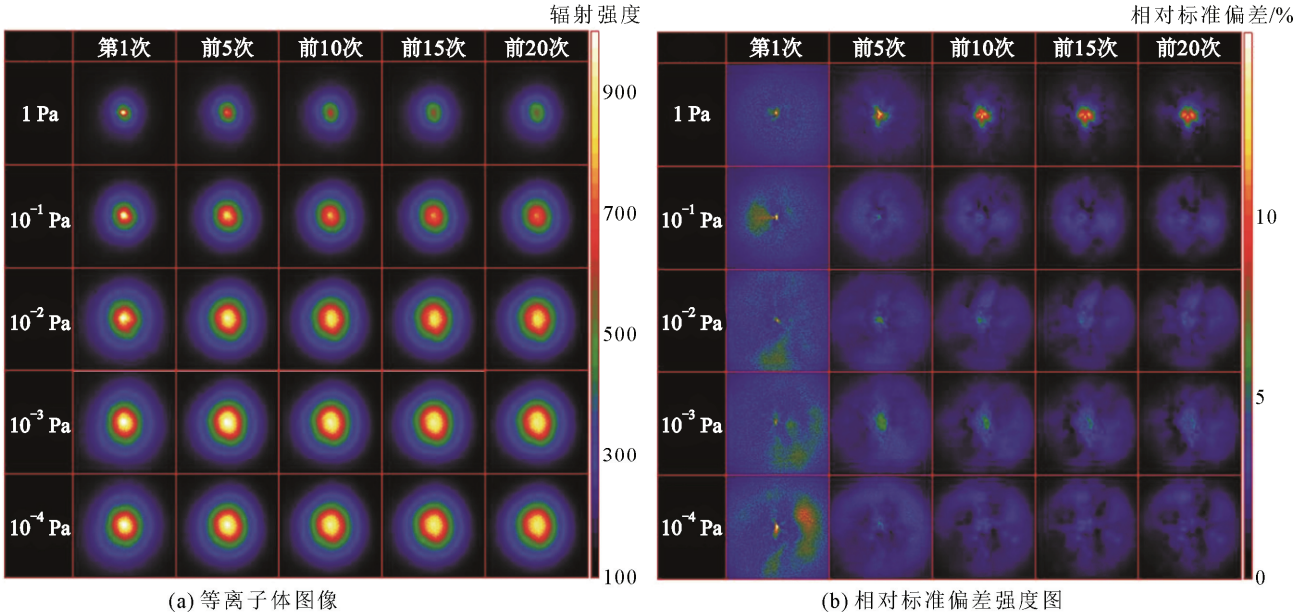
Fig.2　Average of plasma imaging

图 3(a)中每一列分别是第 1 次、前 5 次、前 10 次、前 15 次、前 20 次等离子体成像平均得到的等离子体图像，每一行分别是环境气压为 1、$10^{-1}$、$10^{-2}$、$10^{-3}$、$10^{-4}$ Pa 时等离子体的成像结果。可以看出，等离子体辐射强度随环境气压下降而单调增强，这是基于激光诱导等离子体成像的真空开关真空度检测方法的基础。更重要的是，同一气压环境下，等离子体成像不随平均次数发生明显变化，这意味着在同一气压环境下，成像平均后的等离子体图像具有较高的稳定性，不随平均次数发生变化，具有表征真空度的可行性。

本文采用相对标准偏差(relative standard deviation，RSD，用 $D_{SR}$ 表示)来表征等离子体的稳定性，相对标准偏差的计算式为：

$$D_{SR}=\frac{S}{\bar{x}}\times 100\% \tag{1}$$

式中：$S$ 为标准差；$\bar{x}$ 为相应的平均值。考虑到数据处理过程中各像素点的 $D_{SR}$ 值较小，不利于数据结果可视化，因此，在计算式中增加了 100%这一项。为研究等离子体成像稳定性的空间分布情况，本文对各气压下 5 个烧蚀点相同平均次数的等离子体图像进行逐点分析，首先计算各烧蚀点相同平均次数的等离子体图像的各像素点平均值与各像素点




(a) 等离子体图像　　(b) 相对标准偏差强度图

图 3　不同平均次数时等离子体图像和相对标准偏差强度图

Fig.3　Plasma images and relative standard deviation intensity diagrams at different average times

标准差，然后根据计算得到的各像素点平均值和标准差计算各像素点相对标准偏差，计算流程图见图4，得到了等离子体图像各像素点相对标准偏差强度图，结果如图3(b)所示，图中强度已归一化处理。

从图3(b)可以看出，等离子体图像中心区域是相对标准偏差最大的区域，1 Pa时此现象最为明显，这是因为等离子体中心区域辐射最强，相比于等离子体边缘区域更易受激光诱导等离子体过程变化的影响，因此等离子体中心区域的相对标准偏差相对于等离子体边缘区域更大一些。平均次数为1时(即第1次激光烧蚀所产生的等离子体图像)，等离子体图像的各像素点相对标准偏差强度图整体上要比多次平均(前5次、10次、15次、20次等离子体成像平均)所得到的等离子体图像更蓝一些，这意味第1次激光烧蚀所产生的等离子体图像各像素点相对标准偏差更大，这是因为实验所用靶材表面对激光具有较高的反射率导致等离子体辐射强度较弱，放大了测量元件本底噪声对等离子体成像的影响。此外，还可以发现，随着平均次数的增加，等离子体图像各像素点相对标准偏差强度图整体由蓝色逐渐变黑，这表明随着平均次数的增加，等离子体图像的相对标准偏差逐渐减小，等离子成像稳定性逐渐增大。

根据等离子体图像计算用于表征真空度的等离子体特征参量“等离子体辐射强度积分”的计算式为：

$$I=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(I_{ij}-I_{\text{noise}}) \tag{2}$$

式中：$I_{ij}$为等离子体图像中像素坐标为$ij$的像素点感光强度；$m$、$n$分别为等离子体图像的像素行、列数；$I_{\text{noise}}$为等离子体图像背景噪声强度值。

图5(a)给出了根据图3(a)等离子体图像得到的不同平均次数时等离子体辐射强度积分与环境气压的关系。可以发现，脉冲激光第1次烧蚀所产生的等离子体辐射强度积分最小，这是因为实验所用靶材表面较为光滑，对脉冲激光具有较高的反射率，脉冲激光第1次烧蚀靶材时有部分激光被靶材表面反射，导致产生的等离子体较少，所产生的辐射较弱。随着平均次数的增加，等离子体辐射强度积分趋于稳定，几乎不随等离子体成像平均次数发生明显变化，这表明对等离子体进行多次成像平均并不会显著改变等离子体辐射强度积分，所得到的等离子体辐射强度积分依然具有较高的稳定性，仍然可以用于真空度表征。

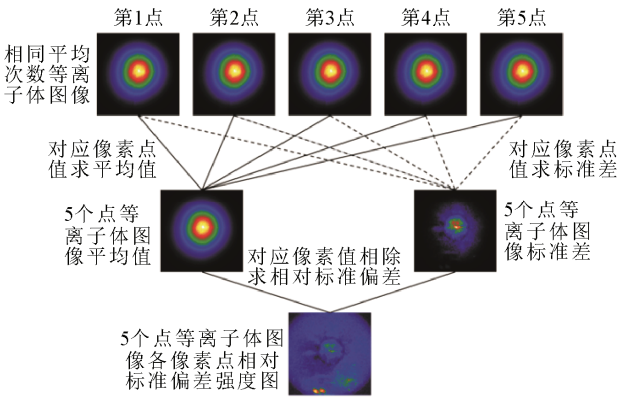
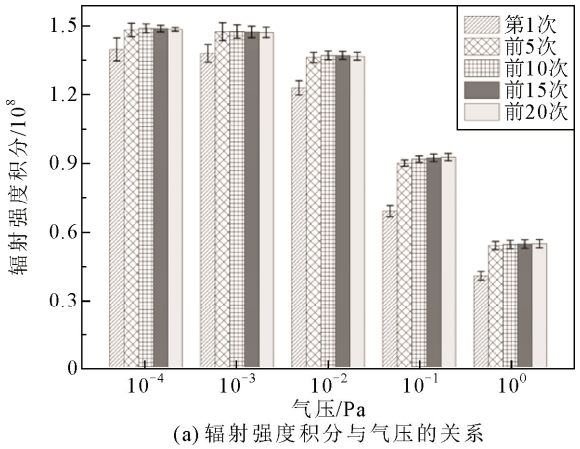
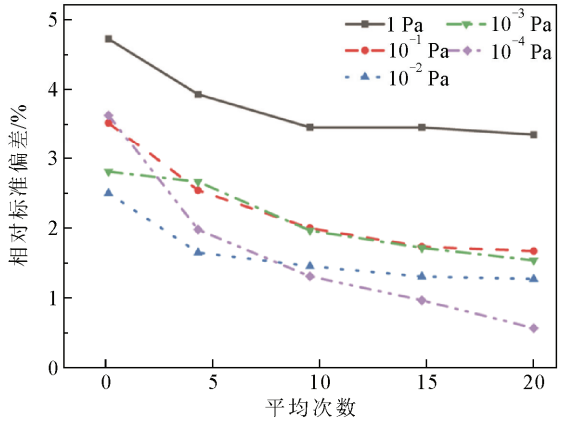



图4 等离子体图像相对标准偏差计算方法

Fig.4 Calculation method of plasma image relative standard deviation




(a) 辐射强度积分与气压的关系




(b) 辐射强度积分相对标准偏差与平均次数的关系

图5 不同气压下不同平均次数时的等离子体辐射强度积分和辐射强度积分的相对标准偏差

Fig.5 Radiation intensity integral of plasma and its relative standard deviation under different average times and air pressure

图5(b)给出了等离子体辐射强度积分的相对标准偏差与平均次数的关系。可以发现，等离子体辐射强度积分的相对标准偏差随平均次数的增加而单

调下降；这表明等离子体辐射强度积分的稳定性随平均次数的增加而增强。此外，还可以看出，环境气压为 1 Pa 时，等离子体辐射强度积分的相对标准偏差最大，这因为 1 Pa 时环境空气中空气粒子数比 $10^{-4}$ Pa 时更多，环境空气粒子与等离子体粒子的相互作用更多，等离子体粒子间相互作用更少，导致等离子体辐射强度最弱，受测量元件本底噪声的影响更大。在进行真空度检测时，通过脉冲激光对靶材进行多次烧蚀多次成像，对等离子体的多次成像进行平均处理，可以降低等离子体图像的相对标准偏差，提高等离子体成像的稳定性，获得更稳定的等离子体辐射强度积分，进而达到提高真空度检测精度的目的。

### 2.2　激光能量对等离子体成像稳定性的影响

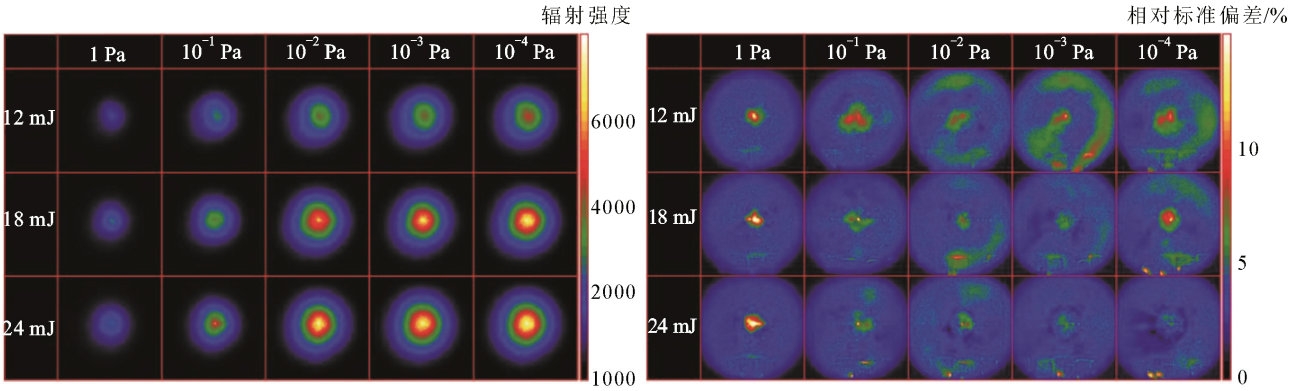
脉冲激光能量是激光诱导等离子体过程的关键影响因素之一，增大激光能量可以获得辐射强度更强的等离子体[6,29]，但是，激光能量对等离子体成像稳定性的影响尚不明确。本实验在每个气压下烧蚀 10 个点，每个点烧蚀 10 次，每次烧蚀进行 1 次等离子体成像，以 10 次等离子体成像的平均值作为该点的等离子体图像。

图 6(a)给出了不同激光能量下的等离子体图像，可以看出等离子体辐射强度随激光能量的增加而增强。这是因为高能量的脉冲激光可以烧蚀更多的靶材，初始等离子体粒子数密度更高，等离子体可以产生更强的辐射。由于环境气压为 1 Pa 时，等离子体辐射强度相对于 $10^{-4}$ Pa 的更弱，不同激光能量的等离子体辐射强度差异更小，导致从图 6(a)的归一化结果上看环境气压为 1 Pa 时不同激光能量的等离子体辐射强度的差异并不显著。根据图 6(a)所示等离子体图像，图 6(b)给出了不同激光能量时等离子体图像各像素点相对标准偏差的强度图。可以看出，激光能量为 12 mJ 时，等离子体图像各像素点的相对标准偏差整体上比于 18 mJ 和 24 mJ 时的更大，此现象在气压低于 1 Pa 时尤为明显，这是因为高能量的脉冲激光可以获得更强的等离子体辐射，外界干扰因素对激光诱导等离子体过程和等离子体成像过程的影响更小，所得到的等离子体稳定性更高，在高激光能量下等离子体图像相对标准偏差更小。

根据图 6(a)所示等离子体图像，图 7 给出了不同气压下等离子体辐射强度积分的相对标准偏差与激光能量的关系。可以发现，等离子体辐射强度积分的相对标准偏差随激光能量的增强而单调减小，这意味在进行真空度检测时，可以通过增大脉冲激光能量获得更稳定的等离子体成像，提高等离子体辐射强度积分的稳定性，进而达到提高真空度检测精度的目的。此外，激光能量为 12 mJ 和 18 mJ 时，相对标准偏差在 $10^{-4}$ Pa 时最大，并且 18 mJ 时显著大于其他气压下的相对标准偏差，在 24 mJ 时最小。通过观察相同激光能量下相对标准偏差随环境气压的变化，可以发现相对标准偏差并没有明显地表现出与环境气压的相关性，不同激光能量的相对标准偏差随环境气压变化的规律并不一致，相对标准差的变化可能是由于等离子体自身辐射的不稳定性和测量误差引起的。

### 2.3　延迟时间对等离子体成像稳定性的影响

等离子体在产生后会快速膨胀扩散并向外产生辐射，在高真空环境下，等离子体辐射寿命仅有数百纳秒[30]。在不同延迟时间下对等离子体进行成




(a) 等离子体图像　　(b) 相对标准偏差强度图

图 6　不同激光能量时等离子体图像和相对标准偏差强度图

Fig.6　Plasma images and relative standard deviation intensity diagrams at different laser energy

像分析时，等离子体具有不同的形貌特征[31-32]，延迟时间对等离子体成像稳定性的影响尚不明确。本实验在延迟时间为 200、300、400 和 500 ns 时对等离子体进行同轴成像分析，研究了不同延迟时间下等离子体成像的稳定性，成像结果如图 8(a)所示，图像采集方案与激光能量实验部分相同。从图 8(a)可以看出，等离子体辐射强度随延迟时间增加而减弱，随环境气压下降而增强，这与之前的研究结果相同[6]。

根据图 8(a)所示等离子体图像，计算了不同延迟时间下等离子体图像各像素点的相对标准偏差，结果如图 8(b)所示。可以发现，等离子体图像中心区域的相对标准偏差较大，这与图 3(b)和图 6(b)相同；此外，等离子体图像各像素点相对标准偏差强度图随延迟时间变化的规律并不十分明显，原因是本实验中等离子体成像延迟时间依次为 200、300、400、500 ns，成像门宽为 100 ns，近乎连续成像，不同延迟时间下等离子体图像的相对标准偏差的差异不大，导致等离子体图像的相对标准偏差随延迟时间变化的规律不明显。

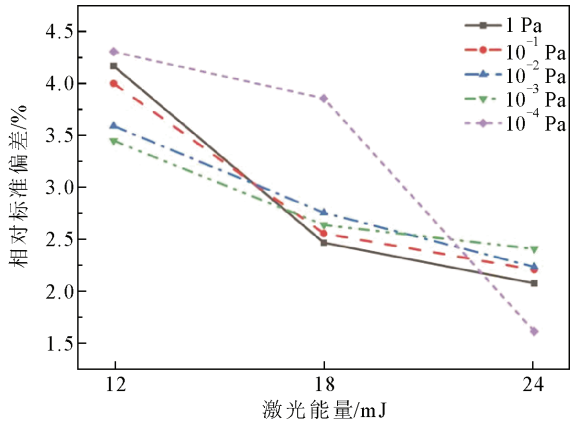
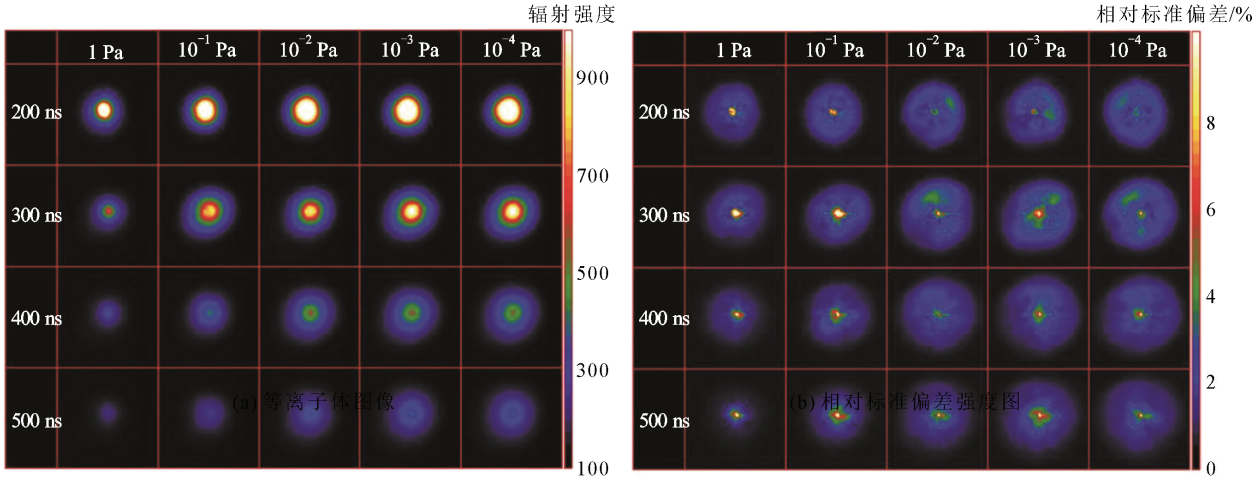



图 7 等离子体辐射强度积分相对标准偏差与激光能量的关系

Fig.7 Relationship between the relative standard deviation of the plasma radiation intensity integral and laser energy

根据图 8(a)所示等离子体图像，图 9 给出了等离子体辐射强度积分的相对标准偏差与延迟时间的关系；结果显示，等离子体辐射强度积分的相对标准偏差随延迟时间增加而增大，这意味着随着延迟时间的增加，等离子体成像的稳定性下降。一方面，在等离子体扩散过程中，等离子体粒子与空气粒子相互作用会导致等离子体辐射强度衰减，不同的等离子体中等离子体粒子与空气粒子的相互作用对等离子体辐射强度的影响不同；随着延迟时间的增加，对等离子体辐射强度影响的差异逐渐累加，导致延迟时间更大时等离子体辐射差异更大，成像的稳定性越低。另一方面，等离子体辐射强度随延迟时间增加而快速下降，等离子体辐射较弱时，测量元件本底噪声和测量误差对等离子体成像的影响更大，使得根据等离子体图像计算得到的等离子体辐射强度积分的稳定性随延迟时间增加呈现下降趋势。

在本实验中，ICCD 门宽为 100 ns，即对等离子体成像测量的曝光时间为 100 ns、延迟时间为 200 ns 时，所测等离子体为 200~300 ns 时的等离子体，延迟时间为 300 ns 时所测等离子体为 300~400 ns 时的等离子体，对等离子体的成像几乎是连续采样。由于等离子体本身存在一定的不稳定性，以及等离




(a) 等离子体图像 (b) 相对标准偏差强度图

图 8 不同延迟时间时等离子体图像和相对标准偏差强度图

Fig.8 Plasma images and relative standard deviation intensity diagrams at different delay time

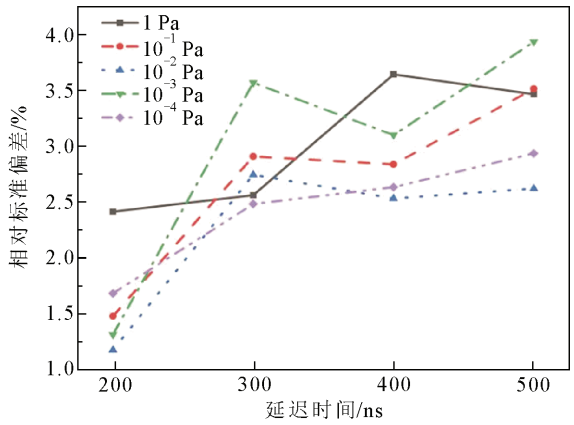



图 9　等离子体辐射强度积分相对标准偏差与延迟时间的关系

Fig.9　Relationship between the relative standard deviation of the plasma radiation intensity integral and delay time

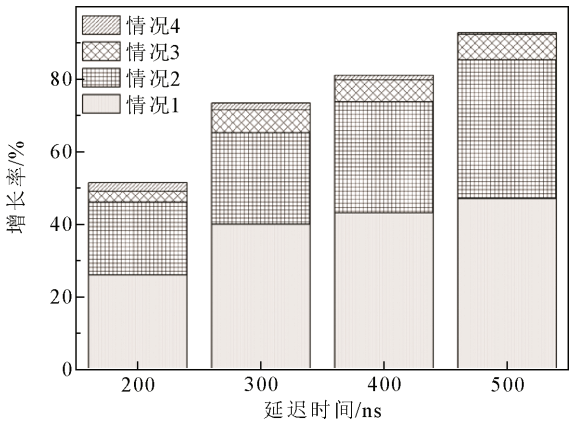



图 10　不同延迟时间下不同气压间等离子体辐射强度积分增长率

Fig.10　Growth rate of plasma radiation intensity integral between different ambient pressures at different delay time

子体成像过程存在着误差，因此等离子体辐射强度积分的相对标准差随延迟时间并没有呈现出严格的单调变化，但呈正相关关系，这也导致了图 8(b)中等离子体图像的相对标准偏差随延迟时间的变化规律并不十分明显。因此，在进行真空度检测时，选择较小的延迟时间可以在一定程度提高等离子体成像的稳定性，获得更稳定的等离子体辐射强度积分，进而达到提高真空度测量结果准确度的目的。但是，等离子体成像所选择的延迟时间不能过小，因为在高真空环境下(环境气压<10 Pa)靶材料的烧蚀量几乎一致[24]，这表明在高真空下环境气压不同时所产生的初始等离子体几乎一致，等离子体辐射强度的差异来自于等离子体扩散过程中等离子体粒子与空气粒子的相互作用，延迟时间过小导致不同气压下等离子体辐射强度的差异并不明显，不利于真空度检测。

本文采用不同环境气压间等离子体辐射强度积分的增长幅度来表征不同环境气压间等离子体辐射强度积分的差异，比如：环境气压为 $10^{-4}$ Pa 时的等离子体辐射强度积分相对于 $10^{-3}$ Pa 时的增长率，$10^{-3}$ Pa 时的等离子体辐射强度积分相对于 $10^{-2}$ Pa 时的增长率，依次类推。图 10 给出了不同延迟时间下、不同环境气压间等离子体辐射强度积分增长率，图中情况 1 对应于 $10^{-1}$ Pa 时等离子体辐射强度积分相对于 1 Pa 时的增长率，情况 2 对应于 $10^{-2}$ Pa 时等离子体辐射强度积分相对于 $10^{-1}$ Pa 时的增长率，情况 3 对应于 $10^{-3}$ Pa 时等离子体辐射强度积分相对于 $10^{-2}$ Pa 时的增长率，情况 4 对应于 $10^{-4}$ Pa 时等离子体辐射强度积分相对于 $10^{-3}$ Pa 时的增长率。从图中可以看出，随着延迟时间的增大，不同气压间等离子体辐射强度积分的增长率之和逐渐增大，这表明不同气压间等离子体辐射强度积分的差异在本实验测量的延迟时间范围内随延迟时间逐渐增大。这是因为在环境气压为 $10^{-4}$~1 Pa 的高真空环境下，不同气压间的等离子辐射强度差异来自于等离子体扩散过程中与空气粒子的相互作用，环境气压为 1 Pa 时空气粒子数密度最大，等离子体粒子与空气粒子间的相互作用最强，因此环境气压为 1 Pa 时等离子体辐射强度最弱；等离子体成像的延迟时间越大，等离子体粒子与空气粒子相互作用的时间越长，不同气压间等离子体辐射强度积分的差异越大，更有利于进行真空度检测。

此外，还可以发现不同气压间等离子体辐射强度积分的增长率随环境气压的下降而减小，这表明不同气压间等离子体辐射强度积分的差异随环境气压的下降而逐渐减小，这是因为环境气压从 1 Pa 降至 $10^{-4}$ Pa 过程中，根据理想气体状态方程估算，环境空气的粒子数密度从 $10^{14}$ cm$^{-3}$ 降至 $10^{10}$ cm$^{-3}$，远低于目前实验研究中测量到的等离子体电子数密度($10^{15}$~$10^{20}$ cm$^{-3}$)[33-34]，环境空气对等离子体的影响随环境气压的下降越来越弱，因此由环境空气粒子与等离子体粒子相互作用导致的不同气压间等离子体辐射强度积分的差异随环境气压的下降而逐渐减小，这也解释了图 5(a)中等离子体辐射强度积分随环境气压的下降而趋于饱和。

根据上述分析，等离子体成像的稳定性随延迟时间的增大而下降，不利于真空度检测；而不同气

压间等离子体辐射强度积分的差异在本实验的延迟时间范围内随延迟时间的增大而增大，更有利于真空度检测。因此，在进行真空度测量时，对于等离子体成像延迟时间的选择应该综合考虑等离子体成像的稳定性和不同气压间等离子体辐射强度积分的差异，以确定最佳的等离子体成像延迟时间，获得更好的真空度测量结果。

## 3 结论

1）对等离子体进行多次成像平均后，得到的等离子体图像和等离子体辐射强度积分不随平均次数发生明显变化，具有较高的稳定性，依然可用于表征真空度；其次，等离子体图像中心区域相对标准偏差较边缘区域更大，这意味等离子体中心区域的稳定性更低。更重要的是，等离子体成像和等离子体辐射强度积分的稳定性随等离子体图像平均次数的增加而增强。

2）研究了不同气压间等离子体辐射强度积分与激光能量和延迟时间的关系，结果显示：等离子体成像和等离子体辐射强度积分的稳定性随激光能量增强，随延迟时间减弱；不同气压间等离子体辐射强度积分差异随延迟时间增大，更有利于真空度检测。

3）在利用基于激光诱导等离子体成像的真空开关真空度检测方法进行真空度检测中，增大脉冲激光能量，对等离子体进行多次成像平均处理，可以提高等离子体成像和等离子体辐射强度积分的稳定性，进而达到提高真空度检测精度的目的。而对于等离子体成像延迟时间的选择应该综合考虑等离子体成像的稳定性和不同气压间等离子体辐射强度积分的差异，以确定最佳的等离子体成像延迟时间。本文为基于激光诱导等离子体成像的真空开关真空度检测方法的参数优化提供了实验依据，为此方法的实际工程应用奠定了基础。

## 参考文献 References


[1] 董华军，马丽婷，李 杰，等. 基于图像处理技术的真空开关分闸速度检测[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2539-2544.
DONG Huajun, MA Liting, LI Jie, et al. Opening speed detection of vacuum switch based on image processing technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2539-2544.

[2] 舒胜文，阮江军，黄道春，等. 126 kV 3 断口真空断路器的重燃特性[J]. 高电压技术，2012，38(4)：999-1005.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Re-ignition characteristics of 126 kV vacuum circuit breaker with triple breaks[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 999-1005.

[3] 袁 欢，叶 哲，王小华，等. 真空开关真空度检测研究及其进展[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3624-3635.
YUAN Huan, YE Zhe, WANG Xiaohua, et al. Research and development of vacuum degree online detection of vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3624-3635.

[4] 柯 伟，陈敏源，袁 欢，等. 激光诱导等离子体中聚焦程度对真空开关真空度检测的影响[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4224-4232.
KE Wei, CHEN Minyuan, YUAN Huan, et al. Influence of focusing degree in laser-induced plasma on vacuum detection of vacuum switch[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4224-4232.

[5] 大河网. 126 千伏环保组合电器在鹤壁投运[EB/OL]. (2022-01-21)[2023-02-15]. https://news.dahe.cn/2022/01-21/955072.html.
DAHE CN. 126 kilovolt environmental protection combined electrical appliances were put into operation in Hebi[EB/OL]. (2022-01-21)[2023-02-15]. https: //news.dahe.cn/2022/01-21/955072. html.

[6] 袁 欢，柯 伟，王小华，等. 基于激光诱导等离子体光路复用技术的真空开关真空度检测研究[J]. 高电压技术，2022，48(3)：1160-1167.
YUAN Huan, KE Wei, WANG Xiaohua, et al. Vacuum degree detection of vacuum switch based on laser induced plasma optical path multiplexing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1160-1167.

[7] YUAN H, GORNUSHKIN I B, GOJANI A B, et al. Laser-induced plasma imaging for low-pressure detection[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15962-15971.

[8] 袁 欢，宋立冬，刘 平，等. 基于激光诱导击穿光谱的真空灭弧室真空度在线检测实验研究[J]. 高压电器，2017，53(3)：230-234.
YUAN Huan, SONG Lidong, LIU Ping, et al. Experimental study of vacuum degree online detection of vacuum interrupter based on laser induced breakdown spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 230-234.

[9] WANG X H, YUAN H, LIU D X, et al. A pilot study on the vacuum degree online detection of vacuum interrupter using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(44): 44LT01.

[10] 袁 欢，柯 伟，王小华，等. 一种提取激光等离子体轮廓的系统及方法：CN202110569877.2[P]. 2021-09-07.
YUAN Huan, KE Wei, WANG Xiaohua, et al. The invention relates to a system and a method for extracting laser plasma profile: CN202110569877.2[P]. 2021-09-07.

[11] 袁 欢，柯 伟，杨爱军，等. 基于激光等离子体成像的低气压测量方法及装置：CN202010857373.6[P]. 2020-12-15.
YUAN Huan, KE Wei, YANG Aijun, et al. Low pressure measurement method and device based on laser plasma imaging: CN202010857373.6[P]. 2020-12-15.

[12] 王小华，刘定新，袁 欢，等. 基于激光诱导击穿光谱的电力设备在线监测方法及装置：CN105675587A[P]. 2016-06-15.
WANG Xiaohua, LIU Dingxin, YUAN Huan, et al. Method and device for on-line monitoring of power equipment based on laser induced breakdown spectrum: CN105675587A[P]. 2016-06-15.

[13] 王小华，袁 欢，刘定新，等. 一种真空开关中真空灭弧室的真空度在线监测装置及方法：CN105575725A[P]. 2016-05-11.
WANG Xiaohua, YUAN Huan, LIU Dingxin, et al. The invention relates to an on-line vacuum monitoring device and a method for vacuum arc extinguishing chamber in a vacuum switch: CN105575725A[P]. 2016-05-11.

[14] MARKIEWICZ-KESZYCKA M, CAMA-MONCUNILL X, CASADO-GAVALDA M P, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for food analysis: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 65: 80-93.

[15] SENESI G S, HARMON R S, HARK R R. Field-portable and handheld laser-induced breakdown spectroscopy: historical review, current status and future prospects[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2021, 175: 106013.

[16] LIMBECK A, BRUNNBAUER L, LOHNINGER H, et al. Methodology and applications of elemental mapping by laser induced breakdown spectroscopy[J]. Analytica Chimica Acta, 2021, 1147:

72-98.
[17] MAURYA G S, MARÍN-ROLDÁN A, VEIS P, et al. A review of the LIBS analysis for the plasma-facing components diagnostics[J]. Journal of Nuclear Materials, 2020, 541: 152417.
[18] LI S L, HU Z L, ZHOU Y P, et al. The influence of more concentrated energy distribution formed by an aspheric lens with eliminated spherical aberration on laser-induced air breakdown[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2022, 37(12): 2662-2671.
[19] WANG J X, WANG S Q, ZHANG L, et al. Measurement and analysis of species distribution in laser-induced ablation plasma of an aluminum–magnesium alloy[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(3): 035005.
[20] KORAL C, DE GIACOMO A, MAO X L, et al. Nanoparticle enhanced laser induced breakdown spectroscopy for improving the detection of molecular bands[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2016, 125: 11-17.
[21] XU J, WANG X, YAO M Y, et al. Detection model of the plasma spectrum based on the polarization recognition rate induced by a low energy density laser[J]. Applied Optics, 2022, 61(16): 4768-4772.
[22] BABAE R, GHEZELBASH M, MAJD A E, et al. Simultaneous investigation of the laser intensity and magnetic field effects on laser-induced plasma spectroscopy[J]. Journal of Russian Laser Research, 2022, 43(2): 162-168.
[23] XU B P, LEI B Y, WANG J, et al. Observation of primary and secondary enhancement of emission spectra from spatially confined laser-induced aluminum plasmas[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(2): 5720508.
[24] WU D, SUN L Y, LIU J M, et al. Parameter optimization of the spectral emission of laser-induced tungsten plasma for tokamak wall diagnosis at different pressures[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2021, 36(6): 1159-1169.
[25] SONG Y Z, SONG W R, LI L, et al. Flame-assisted plasma modulation to improve the raw signal quality for laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 162: 107433.
[26] FU Y T, GU W L, HOU Z Y, et al. Mechanism of signal uncertainty generation for laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Frontiers of Physics, 2021, 16(2): 22502.
[27] LONG J, SONG W R, HOU Z Y, et al. A data selection method for matrix effects and uncertainty reduction for laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Plasma Science and Technology, 2023, 25(7): 075501.
[28] FU Y T, HOU Z Y, LI T Q, et al. Investigation of intrinsic origins of the signal uncertainty for laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2019, 155: 67-78.
[29] SOBRAL H, HERNÁNDEZ-RANGEL V. Dependence on the lens-to-target distance and with the laser energy at constant irradiance of the laser-induced breakdown spectroscopy signal[J]. Applied Spectroscopy, 2022, 76(8): 998-1007.
[30] CHOI S J, YOH J J. Laser-induced plasma peculiarity at low pressures from the elemental lifetime perspective[J]. Optics Express, 2011, 19(23): 23097-23103.
[31] LIU Z, TIAN Y, LU Y, et al. Temporal-resolved measurement using a dual light-collection for laser induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2021, 180: 106202.
[32] VAN DEN BEKEROM D C M, JANS E R, ADAMOVICH I V. NO PLIF flow visualization and time-resolved temperature distributions in laser induced breakdown plumes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(26): 265201.
[33] YONG T, ABDALLA A I, CAPPELLI M A. Laser absorption measurements of electron density in nanosecond-scale atmospheric pressure pulsed plasmas[J]. Physics of Plasmas, 2021, 28(5): 053501.
[34] KUMAR P, SOUMYASHREE S, RAO EPURU N, et al. Determination of stark shifts and widths using time resolved laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) measurements[J]. Applied Spectroscopy, 2020, 74(8): 913-920.



**柯　伟**
1996—，男，博士生
研究方向为电力设备在线检测与寿命评估
E-mail: kewei1996@foxmail.com

KE Wei
Ph.D. candidate



**袁　欢(通信作者)**
1992—，男，博士，助理教授
研究方向为电力设备在线检测与寿命评估
E-mail: huan_yuan@hotmail.com

YUAN Huan
Ph.D.
Corresponding author



**刘佳琪**
1999—，女，博士生
研究方向为电力设备在线检测与寿命评估
E-mail: JiaqiLiu0717@163.com

LIU Jiaqi
Ph.D. candidate



**王小华**
1978—，男，博士，教授，博导
研究方向为电力设备在线检测与寿命评估、电器智能化技术、环保型开关设备设计技术
E-mail: xhw@mail.xjtu.edu.cn

WANG Xiaohua
Ph.D., Professor



**杨爱军**
1986—，男，博士，教授，博导
研究方向为电力设备在线检测与寿命评估
E-mail: yangaijun@mail.xjtu.edu.cn

YANG Aijun
Ph.D., Professor



**荣命哲**
1963—，男，博士，教授，博导
研究方向为电器电弧物理与电接触理论、电器智能化技术、放电等离子体及应用、直流开断技术
E-mail: mzrong@mail.xjtu.edu.cn

RONG Mingzhe
Ph.D., Professor

收稿日期　2023-06-05　修回日期　2023-08-10　　编辑　曾文君