

短空气间隙流注放电的实验观测技术综述

宋辉, 孟祥麟, 盛戈皞, 江秀臣

(上海交通大学 电气工程系, 上海市 闵行区 200240)

Overview of Experimental Observation Technology for Short Air Gap Streamer Discharge

SONG Hui, MENG Xianglin, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Streamer discharge is an important stage of gas gap discharge. The mechanism, simulation and experimental researches of streamer discharge are one of the focuses of the research in the field of high voltage discharge plasma, among which the experimental study of streamer discharge is the basis of the researches on streamer discharge mechanism and simulation. However, streamer discharge has complex characteristics such as multiple temporal and spatial scales, multi-particle collisions, and multi-physics couplings, which poses great challenges to the experimental observation of streamer discharge. Aiming at the experimental observation methods and techniques of short air gap streamer discharge, this paper summarizes the related experimental methods, platforms and research progress made at home and abroad from two aspects: the short air gap streamer discharge experimental setup and the short air gap streamer discharge process observation technology. On this basis, this article discusses the key issues that need to be resolved in the current short air gap streamer discharge researches and the future development trends. We believe that the keys to the further development of experimental researches on the short air gap streamer discharge lies in 1) establishing a multi-physics simultaneous observation system with higher precision and higher temporal and spatial resolution; 2) exploring new experimental means and measurement techniques to obtain key characteristic parameters such as the average energy of electrons; and 3) thoroughly studying the digital image processing techniques to explore the deeper characteristic information contained in the optical images of discharges, so as to improve the research on the mechanism of streamer discharge.

KEY WORDS: gas discharge; short air gap; streamer; synchronization observation technology

摘要: 流注放电是气体间隙放电的重要阶段, 流注放电的机

理、仿真及实验研究是高压放电等离子体领域研究的重点之一, 其中流注放电的实验研究是流注放电机理及仿真研究的基础。然而流注放电具有多时空尺度、多粒子碰撞、多物理场耦合等复杂特点, 这对流注放电的实验观测提出了巨大的挑战。该文针对短空气间隙流注放电的实验观测, 分别从短空气间隙流注放电实验设置和短空气间隙流注放电过程观测技术 2 个方面综述了国内外相关实验方法、平台及取得的研究进展。在此基础上, 该文对目前短空气间隙流注放电研究所需要解决的关键问题和未来的发展趋势进行了探讨, 认为未来短空气间隙流注放电实验研究进一步发展的关键在于建立更高精度与更高时空分辨率的多物理量同步观测系统, 观测并分析单个流注发生发展的完整过程; 探索新的实验手段和测量技术, 获取电子平均能量等关键特征参数; 深入研究数字图像处理技术, 挖掘放电光学图像蕴含的更深层次的特征信息, 进而完善对流注放电机理的研究。

关键词: 气体放电; 短空气间隙; 流注; 同步观测技术

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.0336

0 引言

气体间隙放电是高电压工程领域长期关注的基础问题之一, 而流注的产生和发展是气体间隙放电的重要阶段。深入研究流注放电的微观机制并建立准确的气体放电物理模型, 有助于完善气体放电理论, 提高输变电装备的绝缘设计精细化水平^[1-2]。

目前, 实验仍是研究流注放电过程最直观准确的方法。采取合适的实验观测手段可以获得流注放电的关键放电参数, 得到流注放电发展过程中各参量的变化规律。通过与数值仿真结果相结合, 可以深入探索气体放电的发展过程和物理特性。然而, 流注放电的发展过程极为快速, 持续时间通常在纳秒量级, 此外相比于长空气间隙的放电, 短空气间隙流注放电伴随的物理现象通常更加微弱^[3]。早期受于实验手段的限制, 流注放电的发展过程无法被完整记录, 准确获取放电过程中的物理参量也具有一定的难度, 因此制约了流注放电的实验发展。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52007117)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52007117).

21世纪以来,随着实验观测手段和存储技术的进步,实时观测并准确记录流注放电的发展过程成为了可能^[4-6]。本文针对短空气间隙流注放电实验观测技术,从典型流注放电实验设置和实验观测手段两方面总结了国内外短空气间隙流注放电实验近年来取得的研究成果。在此基础上,分析并指出了目前短空气间隙流注放电实验研究仍有待解决的关键问题,并展望了未来的发展趋势,以期对未来短空气间隙流注放电的机理、仿真及实验研究提供一些参考。

1 典型的流注放电实验设置

气体放电形式多种多样,如流注放电、辉光放电、火花放电等,这些放电模式与放电条件和电极设计密切相关。因此要进行短空气间隙流注放电过程的实验观测与分析,必须首先确定合适流注放电实验设置。由于均匀场和非均匀场中气体间隙的放电特性有一定的差别,本章分为均匀场下流注放电实验设置和非均匀场下流注放电实验设置两部分。

1.1 均匀场下流注放电实验设置

在均匀场中,各点的电场强度都相等,某处一旦开始一定程度的电离,形成流注后,就会导致完全的过渡过程,空气间隙立刻被击穿^[7]。为了研究单个流注传播过程,产生稳定易于观测的流注,学者通常使用三电极结构流注发生装置^[8-9]研究流注放电的发生发展过程,实验设置示意图如图1所示。

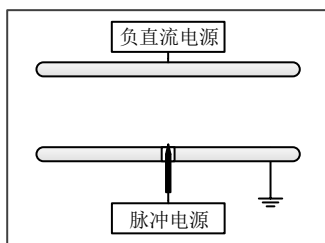


图1 均匀场下流注放电实验设置示意图^[8]

Fig. 1 Experiment set-up diagram of streamer in a uniform electric field

放电电极由2个平行平板电极和一个作为触发电极的针电极构成,下极板中心开有一个圆孔,针电极位于圆孔中心且针尖稍高于下极板。圆孔内填充聚四氟乙烯作为针电极和下极板之间的绝缘介质。将负极性直流电压施加于上极板,下极板接地,以建立一个近似均匀的稳定电场;将纳秒级脉冲电压施加在针电极上以触发正极性流注的产生。孔中的针尖会造成局部电场不均匀,但这种影响在短距离内会迅速衰减至可以忽略,因此可近似认为极板间的电场是均匀的。实验可在不同气压^[10]、不同湿度^[11]、不同温度^[12]等条件下进行,以研究流注放电

在不同条件下的传播特性。

1.2 不均匀场下流注放电实验设置

在不均匀电场中,各点的电场强度不等,曲率半径小的电极表面电场强度最大。当施加电压增加时,局部电场很高的电极附近先发生空气电离,而间隙其他地方并未达到击穿场强值。随着施加电压继续增加,空气的电离将沿着电极头部向前延伸,进而发展成流注^[7]。不均匀电场的典型实例是棒-板间隙和棒-棒间隙。棒-板电极示意图见附录图A1。电极通常由铝、铜或不锈钢制成,棒电极接高压直流或高压脉冲电源,板电极接地^[13-16]。

在电极上施加亚微秒或纳秒级脉冲电压时,离子空间电荷的迁移和积累可以忽略不计,可等效认为是电极间隙之间无空间电荷积累的情况。当正脉冲电压施加到棒电极时,棒电极会产生具有丝状分支的电离,即为流注。由于不均匀电场中存在径向场分量,流注将沿径向发展,从而使分支数目增加。在脉冲电压的条件下,间隙的放电方式将一直是流注放电,与电压大小无关,只有当电压值超过一定限度时,才会发展成火花放电。文献[17]利用棒-板电极研究了单次与重复频率脉冲下的流注分叉特性。

在电极上施加直流电压时,带电粒子会在电场中移动,积累形成稳定的空间电荷,导致原始电场发生畸变,产生与脉冲电压下完全不一样的电离形式。随着施加电压的增加,棒电极会产生与脉冲电压下一致的稍有分支的丝状线,即为流注。电压继续增加,流注的产生更为频繁,直到阳极积累大量负离子,此时流注向辉光放电阶段过渡。如果间隙距离足够长,会产生击穿流注,发生电火花击穿。文献[18]使用棒-板电极研究了直流电压下气压和湿度对流注放电脉冲幅值和脉冲重复频率的影响。

棒-板和棒-棒电极结构下不易于控制流注的产生,为了更清楚地研究不均匀场下单个流注的传播过程,文献[19]用一个棒电极取代了均匀场下三电极结构流注发生装置中接地的平板电极,进行不均匀场下的流注放电实验研究。实验设置示意图如图2所示,共包含一个板电极、一个棒电极和一个作为触发电极的针电极,棒电极中心开有圆孔,针电极放置于圆孔中心且针尖稍高于棒电极。通过将负极性直流电压施加于板电极,棒电极接地,以形成一个不均匀电场;将纳秒级脉冲电压施加在针电极上以触发正极性流注的产生。文献[12]利用该装置研究了低温环境下的正流注传播特性。

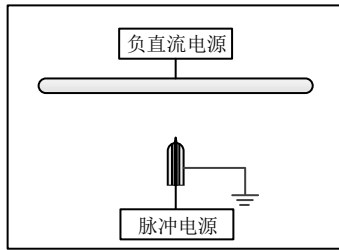


图2 不均匀场下流注放电实验设置示意图

Fig. 2 Experiment set-up diagram of streamer discharge in a non-uniform electric field

2 实验观测手段与测量参数

短空气隙流注放电具有多时空尺度、多粒子碰撞、多物理场耦合等复杂特点，且放电发展时间极短^[20]，因此直接研究流注放电发展过程的微观机理具有一定的难度。但流注放电过程会伴有电、光、热等现象^[21]，从记录宏观现象着手，精确测量上述物理参量可以帮助认识流注放电的发展过程，进而了解气体放电的物理特性和发展机理。短空气隙流注放电通常表现为低温等离子体，因此目前对短空气隙流注放电的实验研究主要集中在电学测量和光学观测两方面。在长间隙放电的实验观测中，除了对放电过程的电特性和光特性进行记录分析外，学者还采用纹影法和干涉法测量放电温度场，对流注-先导转化的热特性进行研究^[22-24]。

2.1 电学测量

在空气隙放电实验中，研究人员主要通过测量空间电场和放电电流这2个参量来记录放电过程的电特性^[25-27]，进而研究空气隙的放电机制。

2.1.1 放电电流测量

放电通道电流反映了放电过程中带电粒子的产生和消散，是描述短空气隙放电发展过程的重要物理参数之一。在不均匀场中，通过电流脉冲的出现可以确定流注起始电压，研究流注放电的起始特性；通过电流波形的变化可以判断电晕稳定化程度，研究放电的发展过程及放电模式的转变^[28-30]。由于短空气隙放电电流的持续时间短、频率高，电流测量系统除了需要满足对放电电流准确测量的要求外，还需要具有良好的电气绝缘与一定的抗电磁干扰能力。

早期采用磁探头的方式对放电电流进行测量^[31]，见附录图 A2。磁探头体积小、可灵活移动、且容易与高压绝缘，但缺点在于每次移动位置时必须重新校准。此外，还需采取特殊的预防措施，以确保探头仅感应到希望测量的特定电流。随着光电子学的发展，测量方式也在不断进步，发光二极管被应用到测量脉冲电流中来。文献^[32]在高压侧接入感

应器件发光二极管测量棒-棒电极间隙放电电流，再利用光调制机将传递到低压侧的信号解调获取电流值，接线图见附录图 A3。这种方法改善了磁探头的缺点，但对保护电路的要求较高，且测量范围较小。Les Renardieres 实验室将分流器串入低压电极和地线间测量间隙放电电流^[33]，其本质上是一个低值电阻，利用伏安特性计算测量电流值。分流器虽然使用原理简单、响应时间快，但测量时需要改变原有电路结构，且随着测量电流幅值和频率的增加，分流电阻的发热现象和趋肤效应均会使测量的准确度降低。现阶段，研究人员主要使用罗氏线圈对放电通道电流值进行测量^[34-36]。罗氏线圈是一种不含铁心的特殊结构线圈，具有测量范围广、响应频带宽等特点，且不需要像分流器一样接入被测回路中，适用于多种形式电流的测量。如图3所示，文献^[34]在高压侧使用罗氏线圈对40mm棒-板间隙下流注放电电流进行了测量，并分析了不同极性下的放电能量。综合以上，本文将电流测量方法的优缺点进行了比较，如表1所示。

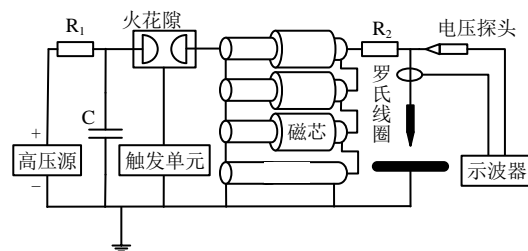


图3 罗氏线圈法

Fig. 3 Rogowski coil method

表1 电流测量方法的优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of current measuring methods

电流测量方法	优点	缺点
磁探头法	体积小、结构简单、放置方式灵活、与电路隔离、易与高压绝缘	每次使用前需校准、对2个或多个电流的合成场更敏感
发光二极管法	使用前无需重新校准、响应特性好	对保护电路的要求较高、测量范围较小
分流器法	原理简单、响应时间短	使用时改变原有电路结构、测量精度受温度影响较大
罗氏线圈法	无磁滞效应、无磁饱和问题、响应频带宽、响应范围广、能够实现非接触测量	复杂环境下的稳定性及抗干扰能力有待进一步提高

由于电流测量装置通常位于高压侧，数据采集和存储装置常位于接地侧，为了获取更准确的放电电流值，装置间需要考虑电气隔离问题。随着光电信息技术的发展，文献^[37]利用数字式光电隔离采集系统采集电流信号，在测量频率小于100MHz的电流信号时的准确度达99%，进一步提高了电流测量的准确性和稳定性。

2.1.2 空间电场测量

空间瞬态电场反映了放电过程中空间电荷的积聚与分布情况,研究空间电场的畸变特性可为后续建立空气间隙放电的物理模型提供依据。由于间隙放电中空间瞬态电场的幅值高、变化快,若想准确测量空间瞬态电场,通常要求电场传感器具有以下3点特征:1)传感器探头与信号处理部分可靠隔离;2)动态响应快、响应频带宽、测量范围广;3)对被测电场分布的影响尽可能小。

随着传感技术与光电材料的快速发展,国内外学者针对空间电场测量方法开展了大量研究,主要分为3类:1)基于电容测量原理的球形探头法^[38-41],2)基于Pockels效应的光电传感器法^[42-48],3)基于场致二次谐波^[49-50]、四波混频^[51-53]等原理的新型测量方法。

基于电容测量原理的球形探头法是利用球形电容式金属探头在待测电场中感应出的电压和电荷信号,配合光纤和接收机完成对放电间隙空间电场的测量。此方法基于传统的电容分压原理,利用光电转换技术传输电信号,实现高压隔离。文献[39]利用研制的二维球形电场测量系统对雷电冲击波下棒-板间隙电场进行测量。这种方法的原理简单、成本低,但是金属球形探头的引入会对被测电场造成影响,探头的半径越大导致测量误差越大。

Pockels效应即线性电光效应,指某些电光晶体(如铌酸锂等)折射率的改变与所加电场成正比,利用偏振光输出端的相位差间接获取电场信息。此类传感器的传感头由非金属材料构成,减少被测电场畸变,但该方法基于分立的光学器件,仍存在不易控制光路、系统稳定性差等不足。为了克服以上缺陷,学者们基于集成光学的概念,研制出将电极、天线和光波导集成在一起的集成光波导式电场传感器,其结构示意图如图4所示^[45]。相比于传统的基于Pockels效应的电场传感器,该传感器高度集成化,使得光波容易控制,且灵敏度、稳定性及抗干扰能力等方面均有提升。清华大学曾嵘团队一直致力于集成光波导式电场传感器的研究,设计了包

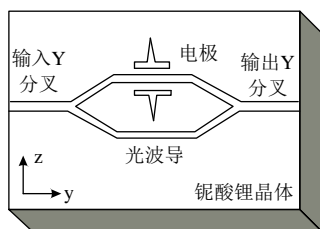


图4 集成光波导式电场传感器结构示意图^[45]

Fig. 4 Structure of an integrated optical waveguide type electric field sensor

含Mach-Zehner干涉仪结构等多种电极结构的电场传感器^[46-47],为间隙放电的空间瞬态电场测量提供了有效手段。

近年来,国内外也出现了一些基于新兴技术的电场测量方法,如场致二次谐波法、四波混频法等。场致二次谐波法^[49]是一种非介入式激光测量方法,激光束经过待测电场区域后会产生二次谐波,二次谐波强度与待测电场强度的关系如式(1)所示,可通过测量二次谐波强度计算出待测电场强度。

$$I_{2w} = AN^2(E_{\text{Ext}})^2(I_{\text{Pump}})^2 \quad (1)$$

式中: I_{2w} 为二次谐波信号强度; A 为校准常数; N 为气体分子数密度; E_{Ext} 为待测电场强度; I_{Pump} 为泵浦光束强度。四波混频法^[51]类似于相干反斯托克斯拉曼散射,需要2个以上激光器同时工作。四波混频中,分子气体的拉曼位移被振动分离,在外加电场的作用下,产生对应于拉曼跃迁能量的红外相干光束。输出信号强度与待测电场强度之间的关系如式(2)所示,以此可推算被测电场强度。以上新兴的原理及特性为电场测量方法提供了新的思路。

$$I_{\text{IR}} \propto \chi_{\text{IR}} I_{\text{Pump}} I_{\text{Stokes}} (E_{\text{Ext}})^2 \quad (2)$$

式中: I_{IR} 为输出信号强度; χ_{IR} 为极化率; I_{Pump} 为泵浦光束强度; I_{Stokes} 为斯托克斯光束强度; E_{Ext} 为待测电场强度。

2.2 光学观测

光特性是放电最直接的外特性,通过实验获取流注放电发生发展过程中的光强、光谱、发光形态和发光寿命等光学信息可以推求放电中粒子能级变化、光子和粒子相互影响机制等微观物理过程。流注放电产生的光信号非常微弱,而且发展速度极快,因此对光学观测仪器的灵敏度、信噪比以及采集信号的处理有很高的要求。目前应用较多的光学观测方法主要有3种:1)利用光电倍增管直接采集放电过程的光强信息;2)利用成像技术获取放电形态变化;3)利用光谱仪分析放电光谱信息。

2.2.1 光电倍增管

目前,研究人员多使用光电倍增管来确定流注的起始时刻,获取流注稳态传播电场和流注传播速度等参数^[8-12]。

实验时,将1号光电倍增管正对着上极板的表面,2号光电倍增管对着针尖,如图5所示。当流注产生时,1号光电倍增管会探测到流注头部产生的光子,将其转换成电信号输出至示波器;当流注发展到负极板时,2号光电倍增管同样会捕捉到流注产生的光子,输出一个电信号,见附录图A4。

利用 2 个信号起始点的时间差 Δt 和极板间距 d 便可以计算出流注在极板间的传播速度 $v = d / \Delta t$ 。文献[12]研究发现在不同温度下，流注传播速度和所施加的电压值之间存在指数增长的关系。

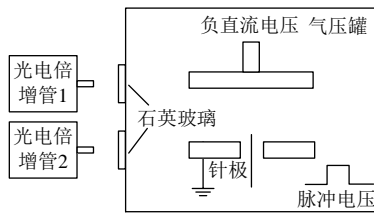


图 5 光电倍增管位置示意图^[10]

Fig. 5 Schematic diagram of photomultiplier tube

在某一电压值下重复进行流注放电实验，流注传播概率为 2 号光电倍增管接收到光信号的次数除以实验总次数。逐步增加电压值，流注传播概率会从 0 提高到 1。文献[10]将流注传播概率随平行极板间电场强度变化的描述为如下方程：

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi}/2} e^{-\frac{2(E-E_c)^2}{w^2}} \quad (3)$$

式中： E 为电场强度； E_c 为平均电场强度； w 为方差； A 、 y_0 为与环境条件有关的系数。文献[8]将流注传播概率为 0.975 时对应的电场强度定义为流注稳态传播电场。经研究发现流注稳态传播电场的值会随着湿度、气压的增加而增加，随着温度的增加而减小^[10,12]。文献[12]利用视在光放电量即光电流波形与时间的积分来间接表征流注的发光强度。

值得注意的是，光电倍增管虽然在高灵敏度检测极微弱发光方面有很大的优势，但它并不能获取流注放电完整发展过程的空间信息，因此无法实现放电过程的成像观测。

2.2.2 成像技术

在成像方面，研究人员多利用拍摄的短空气隙流注放电的光学图像来获取流注放电通道直径、流注分叉等参数信息^[13,54-58]。

早期，研究人员主要使用胶片相机来捕捉流注放电形态，这种方式能够观察到微弱的光迹，记录某个时刻的放电信息，但并不能观测完整的放电过程^[59-60]。20 世纪 70 年代，Les Renardieres 实验室利用图象变换器和旋转相机观测长间隙放电发展情况，利用分幅或扫描的方式完整记录放电过程，改进了上述方法的不足^[33,61-63]。但是在这种工作方式下，拍摄到的图像分辨率较低，放电形态不易分辨且记录影像的胶片难以永久保存。此后，随着电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)和互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)的出现，利用上述图像传感

器制成的增强型电荷耦合器件(intensified CCD, ICCD)和高速摄像机具有高灵敏度和高分辨率，可以实现弱光探测和高速成像，且相较于胶片相机，成像结果可数字化，易于存储和处理^[64-66]，因此被广泛应用于间隙放电光学观测实验中。两者的主要差别在于高速摄像机的曝光时间在微秒级，可以记录秒级内的放电信息，而 ICCD 的曝光时间在纳秒级，因此高速摄像机多用于分散性较大的长间隙放电观测实验中，而 ICCD 则常用于短空气隙放电实验中。文献[13]通过 ICCD 拍摄的放电照片分析了氧气浓度为 20% 和 0.01% 时的流注分叉角度，流注通道的横截面积和流注分叉比，进而研究了氮氧比对流注分叉特性的影响，使用 ICCD 拍摄的不同氧浓度下的流注形态照片见附录图 A5。清华大学曾嵘团队利用 ICCD 搭建的光学观测平台可以实现 5ns 的曝光时间，10ns 的拍摄间隔连续拍摄 4 帧图像^[55]，如图 6 所示。从图中可以看到，在更高的时间分辨率下，拍摄出的流注形态呈烟花状而非以往拍到的树枝状。ICCD 的局限性在于它的连续曝光时间间隔较长，在一次流注过程中只能记录某一时刻的图像，如果想得到流注放电的时间演化图像需要进行多次重复实验，而实验的可重复性会对记录结果的准确性造成一定影响。若想测量单次实验现象，可借助于条纹相机。条纹相机可以实现时间连续成像，准确地记录流注放电的演化过程，但它只有一维空间分辨能力，无法记录放电形态，且国内多面临技术管制，使用成本高，因此应用较少^[36,67-68]。成像设备的优缺点如表 2 所示。

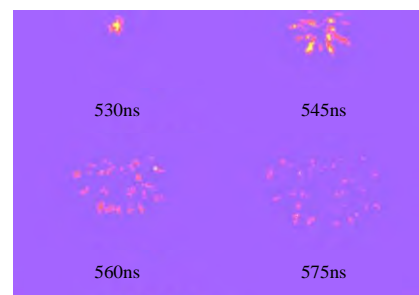


图 6 高时间分辨率下正流注发展过程^[55]

Fig. 6 Development process of positive streamers with high time resolution

2.2.3 光谱仪

发射光谱法是等离子体参数研究中的重要手段之一，具有装置简单、精度和灵敏度高、对等离子体自身无干扰等特点。使用光谱仪能够采集不同波段范围的光谱信息，进而计算出等离子体电子数密度、电子温度等参数，还可以根据光谱信息判断参与反应的粒子种类与能级结构等^[69-73]。

表 2 成像设备的优缺点
Table 2 Advantages and disadvantages of imaging equipment

成像设备	优点	缺点
胶片相机	能够观察微弱的光迹并判别细的放电分支	只能记录部分放电过程
图象变换器和旋转相机	利用分幅或扫描的方式连续记录放电过程	图像分辨率较低、放电形态较难分辨、胶片不利于保存和处理
高速摄像/照相机	可以实现高时间分辨率、成像数据易于存储和处理	照片连续曝光时间较长,无法直观获得流注放电的时间演化图像
条纹相机	可实现时间连续成像,全景展示放电演化过程	只有一维空间分辨能力、国内多面临技术管制、使用成本高

在采集放电产生的光信号时,先用透镜将光信号聚焦,再通过光纤将其传输到光谱仪中进行分光,最后由 CCD 探测器将光信号转为数字信号经计算机处理得到光谱信息,光谱测量系统如图 7 所示。文献[70]利用光谱仪获取了 10mm 不均匀场下空气介质的放电光谱信息,并使用 Saha-eggert 法计算得到电子激发温度和电子数密度,从微观角度探求气体放电的规律。文献[71]进行了 10mm 棒-棒电极和棒-板电极下的空气击穿放电实验,记录了波长范围从 330nm 到 830nm 的光谱特性曲线,分析发现空气中气体放电参与反应的主要粒子为氮氧离子,产生的谱线主要有氧原子谱线 OI 及氮原子谱线 NI 等。

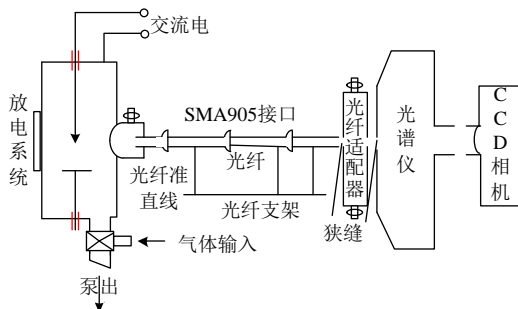


图 7 光谱测量系统^[68]

Fig. 7 Spectrum measurement system

光电倍增管、高速摄像/照相机、光谱仪为目前获取流注放电光学信息的常用观测设备,通过这几种设备能获取到的直接信息和间接信息见表 3。在实际研究中可以使用其中一种方式进行流注放电光学观测,也可以将几种实验手段相结合,进行流注放电光学同步观测,以获取更全面的光学信息。

2.3 实验观测数据的挖掘处理

利用上述实验观测手段可以获得记录气体放电发展过程的电学和光学信息,通过对这些数据进行处理和挖掘分析能够获得反映流注放电微观机理的物理参数,得到流注放电发展过程中微观粒子

表 3 光学观测手段与测量参数
Table 3 Optical observation methods and measurement parameters

光学测量设备	可获取的直接信息	经分析得到的间接信息
光电倍增管	有限空间光信息(将检测的光信号变成增强的电信号)	流注发展时刻、流注传播速度、流注起始场强、流注稳定传播电场
高速摄像/照相机	放电过程图像	流注放电通道形状、流注半径(直径)、发光强度、流注分叉情况、分形维数
光谱仪	放电过程的光谱信息	电子数密度、电子温度、参与反应粒子种类、能级结构

的变化规律。相比于图像数据,针对电流等数据的处理方法已较为成熟,主要是基于放电波形或数据文件,统计流注脉冲电流幅值、流注脉冲电流重复频率等参数的发展规律,进而研究气压、湿度、外施电压、间隙距离等因素对流注放电特性及发展过程的影响^[37,74-75]。放电实验中观测的光学图像数据是气体放电实验中获得的主要数据类型之一,但囿于观测手段和图像处理的限制,关于放电光学图像处理方法的研究仍处于初步阶段。如何充分挖掘光学图像中蕴涵的丰富空间结构信息,一直是相关领域的热点和难点。

最初,研究者主要从定性的角度分析流注放电的图像信息,实现对流注放电基础物理规律的认识。如流注放电的形态为树枝状、喷泉状、烟花状^[54-55];流注放电的路径为从棒头部向间隙远处延伸,且伴随着多次分叉^[44,76];流注的发光强度随着外施电压的增加而增强,随着环境温度的降低而减弱^[12,20]。

随着成像设备和计算机技术的发展,更多的流注放电信息量可以从定量的角度通过图像处理方法获取。目前主要通过图像处理方法获取流注放电局部参数信息(如流注通道光学直径、流注放电传播长度及流注分支角度等)和整体表征信息(如分形维数)。在获取局部参数信息之前,为了使图像更有辨识度,通常使用伪彩色算法将原始黑白照片进行图像增强^[65,77-78]。该方法是将黑白图像的各个不同灰度级映射为彩色 RGB 值,从而得到增强的彩色图像。利用该方法处理前后的放电图像对比如图 8 所示,处理后流注形态更易辨识。为了获取流注通道的光学直径,通常使用半峰值法^[13,34,78-81]对图像进行处理。首先选取一个矩形作为光学直径统计区域,两边分别垂直和平行于流注通道。读取垂直于流注通道边上的像素点并统计其平均灰度值,得到如附录 A6 所示的平均灰度值曲线,再从该曲线中读取半峰值宽度,根据实际像素进行换算,即可得

到该段的流注通道光学直径。该参数能反映流注头部电离的强弱程度，利用其值也可计算出流注通道横截面积、分叉前后流注直径比等参数。文献[79]利用该法研究了 40mm 棒-板电极下流注通道的光学直径，随着外施脉冲电压值的增加，流注直径从 0.2mm 增加到 3mm。放电最长传播距离可以通过在每个图像中选择离高压电极最远的像素点，并利用 MATLAB 等工具统计得到，流注分支角度也可以通过图像直接读取^[58,82]。100mbar 时，16cm 棒-板电极空气隙下放电最长传播距离在不同电压幅值下随放电时间变化的统计图见附录图 A7，各阶段的线性拟合表示相应的流注传播速度。文献[13]测得氧气浓度为 20% 和 0.01% 时，16cm 棒-板间隙下流注分支角度分别为 $52.9 \pm 13.8^\circ$ 和 $42.3 \pm 7.4^\circ$ 。

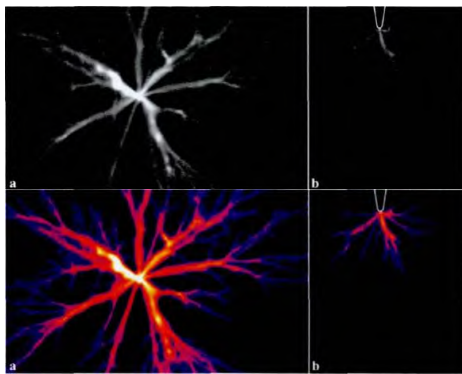


图 8 伪彩色算法还原前后的流注放电照片^[78]

Fig. 8 Streamer discharge photos before and after pseudo-color algorithm restoration^[78]

在获得整体表征信息方面，现多利用计盒维数法计算流注放电通道的分形维数，用此参数表征放电过程复杂程度和整体形貌^[83-84]。计盒维数法计算分形维数时，首先将图像进行边缘提取和二值化处理，之后选取不同的观测尺度 r 值对处理后的二值图进行划分，统计包含像素值为 1 的网络数 $N(r)$ ，最后计算 $(r, N(r))$ 所拟合成的直线斜率，即为分形维数^[83]。文献[83]利用该法计算了 10mm 非均匀场下空气隙放电图像的二维分形维数，其范围在 1.4~1.55。文献[74]利用海森矩阵法将放电通道进行三维还原后，使用计盒维数法计算了不同气压下 60mm 棒-板电极空气隙放电图像的三维分形维数。结果表明：气压越高，放电通道的三维分形维数越大，即放电通道越曲折复杂。综合以上，本文总结了目前针对短间隙流注放电实验数据的挖掘处理方法，这几种方法的适用范围和特点见附录表 B1。

在秒级的更长时间尺度下，华中科技大学叶齐政课题组利用电晕放电的可见光图像，进行了形态学和色度学信息挖掘，获取了如灰度标准差、色度

分量占比等大量统计学指标变化规律，进而给出电晕放电的统计学诊断方法^[85-88]。然而由于长曝光时间条件的限制，相关方法并未应用到短空气隙流注放电光学图像处理中来，不过仍有一定的参考价值 and 借鉴意义。

3 待解决问题与未来发展趋势

21 世纪以来，国内外学者在短空气隙流注放电领域开展了大量的研究工作，在实验观测方面取得了一定的进展，但仍存在一些不足。如：现有实验手段无法完整记录单次流注的发生和发展过程，需要通过多次放电来总结放电现象，每次流注放电的分散性和随机性会对记录结果的准确性造成一定影响；如研究人员多关注流注传播电场、流注传播速度、流注直径等易获取的物理量，关于电场分布、电子平均能量等难以检测的微观物理参数的实验研究工作较少，而这些量对于揭示流注放电微观机理、完善放电仿真模型具有重要的作用；如对成像设备记录的光学图像的信息挖掘还不够深入，获取的特征信息有待进一步丰富等。

为了进一步了解短空气隙流注放电的物理过程，完善间隙放电的微观机理，针对上述短空气隙流注放电实验研究存在的不足，未来可从以下几个方面开展研究：

1) 采取更高精度与更高时空分辨率的实验观测手段。在亚纳秒甚至皮秒级的极小时间尺度下研究短空气隙流注放电的发展过程，记录单次流注放电过程的微观瞬态信息，关注不同实验条件下电子崩向流注转化的时空临界点及转化机制，深入了解流注放电起始和发展过程的物理机理，为建立更准确更完善的短空气隙放电模型奠定基础。条纹相机在理论上具有皮秒级的时间分辨率，转镜式高速成像技术在一些特定的实验条件下也已达到皮秒级或更高的时间分辨率，国内外已有团队探索了相关技术应用于放电过程观测，但其高成本与复杂的成像系统导致难以推广。量子成像技术是一种新兴的量子应用技术，具有单光子或少光子下的成像能力，结合时间相关光子计数技术和计算成像算法可以达到皮秒级的时间分辨率，也具有应用于放电实验观测的巨大潜力。

2) 建立多物理量同步观测系统。在现有较为完善的电-光同步观测系统的基础上，综合流注放电的声、热、化学特性等各方面特性，建立更全面的多物理量同步观测系统，测量流注放电发展过程中的不同特征信号，将其进行综合对比分析，深入

研究流注放电发展过程,全面阐述短空气隙流注放电的机理。多物理量同步观测系统在具体实施上的难点和关键在于同步触发机制的设计,电、热、化学特性等各类物理化学过程具有不同的时间尺度,如何保证各类观测量采集的及时性并与放电微观过程关联是同步触发机制设计中要解决的难题。

3) 发展关于流注放电粒子密度等新型微观测量技术。探索新的实验手段和测量技术,获取如电子平均能量分布、净电荷密度分布等更丰富的流注放电通道内部物理参量信息,将实验测量结果与数值仿真结果相对比,从微观粒子运动规律的角度完善流注起始与发展机理的研究。在空间电场测量方面,应从原理、材料及结构三方面突破,如寻找新的物理量耦合机制、对传统传感材料进行改性、结合微机电系统改进传感器拓扑结构以拓展传感器的应用范围。

4) 深入研究数字图像处理技术。探索如何在纳秒级甚至皮秒级的极短记录时间下,深入挖掘光学图像中能够反映流注放电微观机制的重要物理参数及关键指标,为短空气隙流注放电的基础研究提供新的视角。利用人工智能领域的机器学习和数据挖掘等技术获取放电光学图像蕴含的更深层次反映放电特性的特征信息,将提取到的放电状态表征参量与电流、特高频等信号进行关联研究,建立典型短间隙等效缺陷的局部放电的光学检测特征参量体系。可考虑使用遗传算法的投影寻踪理论实现放电的量化分级评价。

4 结论

1) 总结了国内外典型的短空气隙流注放电实验设置。均匀电场下通常使用三电极结构的流注放电发生装置,通过在触发电极上施加脉冲电压以触发流注;不均匀电场下,一般将直流电压或脉冲电压施加在棒-板电极或棒-棒电极上来产生流注,也可以使用不均匀场下三电极结构的流注放电发生装置。

2) 总结了近年来短空气隙流注放电的实验观测手段和测量参数。电气参数上主要使用罗氏线圈对放电电流值进行测量,利用基于 Pockels 效应的光电传感器法获取空间电场值。光学观测方面主要使用光电倍增管确定流注的起始和发展速度等;使用 ICCD 等成像设备获取放电图像,利用图像处理分析方法分析如通道直径等流注放电局部参数和分形维数等整体表征信息;使用光谱仪获取发射光谱,计算等离子体电子温度和密度等。

3) 指出了目前短空气隙流注放电实验研究中待解决的问题及未来研究重点。目前仍没有合适的实验手段能够完整记录单次流注放电过程,获取如电子平均能量等流注通道内部参数,未来需要建立更高精度与更高时空分辨率的多物理量同步观测系统,并采取新的实验方法及深入图像处理技术的研究,充分挖掘图像蕴含的高层次特征信息,完善对短空气隙流注放电起始和发展机理的研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

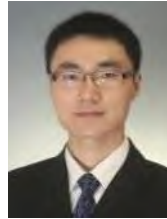
参考文献

- [1] 武占成,张希军,胡有志. 气体放电[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [2] EBERT U, NIJDAM S, LI Chao, et al. Review of recent results on streamer discharges and discussion of their relevance for sprites and lightning[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(A2): A00E43.
- [3] 陈维江,曾嵘,贺恒鑫. 长空气隙放电研究进展[J]. *高电压技术*, 2013, 39(6): 1281-1295.
CHEN Weijiang, ZENG Rong, HE Hengxin. Research progress of long air gap discharges[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(6): 1281-1295(in Chinese).
- [4] ZENG Rong, WANG Bo, NIU Ben, et al. Development and application of integrated optical sensors for intense E-field measurement[J]. *Sensors*, 2012, 12(8): 11406-11434.
- [5] ZENG Rong, ZHANG Yun, CHEN Weiyuan, et al. Measurement of electric field distribution along composite insulators by integrated optical electric field sensor[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(1): 302-310.
- [6] 曾嵘,耿屹楠,牛犇,等. 空气隙放电物理参数测量研究进展[J]. *高电压技术*, 2011, 37(3): 528-536.
ZENG Rong, GENG Yinan, NIU Ben, et al. Research progress on parameters measurement of air gap discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(3): 528-536(in Chinese).
- [7] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 3版. 北京:中国电力出版社,2015: 360.
YAN Zhang, ZHU Deheng. *High voltage insulation technology* [M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 360(in Chinese).
- [8] ALLEN N L, MIKROPOULOS P N. Dynamics of streamer propagation in air[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 32(8): 913-919.
- [9] ALLEN N L, GHAFAR A. The conditions required for the propagation of a cathode-directed positive streamer in air[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, 28(2): 331-337.
- [10] HUI Jianfeng, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Variation of the dynamics of positive streamer with pressure and humidity in air[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(2): 382-389.
- [11] 郑跃胜,任建华,舒胜文,等. 空气湿度对非均匀交流电场下短间隙击穿特性的影响[J]. *高电压技术*, 2019, 45(5): 1352-1359.
ZHENG Yuesheng, REN Jianhua, SHU Shengwen, et al. Effect of air humidity on breakdown characteristics of short gaps under alternating non-uniform electric fields[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(5): 1352-1359(in Chinese).
- [12] 王黎明,唐文晰,怡勇,等. 基于三电极的低温环境正流注传播

- 特性[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1586-1593.
WANG Liming, TANG Wenxi, YI Yong, et al. Characteristics of positive streamer in low temperature environment based on three-electrode device[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1586-1593(in Chinese).
- [13] CHEN She, WANG Feng, SUN Qiuqin, et al. Branching characteristics of positive streamers in nitrogen-oxygen gas mixtures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3): 1128-1134.
- [14] 黄俊. 自然雾中棒板短空气隙放电特性与放电机理分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [15] 王胜辉, 邓畅宇, 王新宇, 等. 淋雨对短空气隙操作冲击放电影响的实验研究[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1092-1098.
WANG Shenghui, DENG Changyu, WANG Xinyu, et al. Experimental study on effects of rain on short air gaps discharge with switching impulse voltage[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1092-1098(in Chinese).
- [16] ZHANG Xing, GUO Yulin, SUN Anbang, et al. The pulsed mode of negative DC corona in nitrogen at atmosphere pressure: comparison with Trichel pulses in air[J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(3): 033501.
- [17] 刘典, 夏胜国. 短空气隙放电电流注分叉特性实验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 282-286.
LIU Dian, XIA Shengguo. Experimental studies on characteristics of streamer branching in short air gaps discharge[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 282-286(in Chinese).
- [18] 卞星明, 惠建峰, 黄海鲲, 等. 气压湿度对负直流电晕特性影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 118-124.
BIAN Xingming, HUI Jianfeng, HUANG Haikun, et al. Effects of air pressure and humidity on the characteristics of negative DC corona[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 118-124(in Chinese).
- [19] 王纯洁, 王黎明, 梅红伟, 等. 三电极结构流注放电试验平台[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 103-108.
WANG Chunjie, WANG Liming, MEI Hongwei, et al. Streamer discharge test platform with three-electrode structure[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 103-108(in Chinese).
- [20] EBERT U, MONTIJN C, BRIELS T M P, et al. The multiscale nature of streamers[J]. Plasma Sources Science & Technology, 2006, 15(2): S118-S129.
- [21] 马乃祥. 长间隙放电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 64-69.
- [22] 程晨. 正极性流注—先导转化过程热特性试验观测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [23] 耿江海, 王权圣, 律方成, 等. 基于背景纹影技术的长空气隙放电通道温度场测量[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1234-1242.
GENG Jianghai, WANG Quansheng, LÜ Fangcheng, et al. Temperature field measurement of long air gap discharge channel based on background oriented schlieren technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1234-1242(in Chinese).
- [24] ZHAO Xiagen, HE Junjia, HE Hengxin, et al. Number and dimensional distribution of stems near the anode in a 1m air gap under positive pulse[C]//2016 33rd International Conference on Lightning Protection. Estoril: IEEE, 2016: 1-5.
- [25] 律方成, 钦雨晨, 王平, 等. 正极性操作冲击电压下流注发展过程中空间电场变化规律[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2964-2970.
LÜ Fangcheng, QIN Yuchen, WANG Ping, et al. Variation law of spatial electric field during the development of streamer under positive switching impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2964-2970(in Chinese).
- [26] HIDAKA K, MUROOKA Y. Electric field measurements in long gap discharge using pockels device[J]. IEE Proceedings A, 1985, 132(3): 139-146.
- [27] 陈维江, 谷山强, 谢施君, 等. 长空气隙放电过程的试验观测技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 13-21.
CHEN Weijiang, GU Shanqiang, XIE Shijun, et al. Experimental observation technology for long air gap discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 13-21(in Chinese).
- [28] 程文馨. 高压直流空气放电模式研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [29] 丁玉剑, 律方成, 李鹏, 等. $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流杆塔间隙放电特性[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1032-1038.
DING Yujian, LÜ Fangcheng, LI Peng, et al. Discharge characteristics of $\pm 1100\text{kV}$ UHV DC tower air gaps[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1032-1038(in Chinese).
- [30] 方雅琪, 王力农, 李瑞, 等. 超/特高压线路带电作业间隙放电特性仿真计算[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4435-4444.
FANG Yaqi, WANG Linong, LI Rui, et al. Discharge characteristics calculation method for live working gaps of EHV and UHV lines[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4435-4444(in Chinese).
- [31] THOMAS R J. High-impulse current and voltage measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1970, 19(2): 102-117.
- [32] MUROOKA Y, HIRANO T, KISHI K. Optoelectronic measurements of prebreakdown current in an air gap[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(4): 1559-1566.
- [33] The Renardières Group. Negative discharges in long air gap discharges at Les Renardières-1978 results[J]. Electra, 1981, 47(74): 67-218.
- [34] BRIELS T M P, KOS J, WINANDS G J J, et al. Positive and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(23): 234004.
- [35] METWALLY I A. Self-integrating Rogowski coil for high-impulse current measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(2): 353-360.
- [36] 李兴文, 吴坚, 贾申利. 放电等离子体基础及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [37] 董曼玲. 直流条件下厘米级间隙流注特性数值仿真及实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [38] FESER W, PFAFF W. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(10): 2904-2911.
- [39] 张海燕, 王文端. 长间隙放电的电场测量[J]. 华北电力大学学报, 1996, 23(3): 53-58.
ZHANG Haiyan, WANG Wenduan. A study on large air gap discharges by the measurements of their fields[J]. Journal of North China Electric Power University, 1996, 23(3): 53-58(in Chinese).
- [40] 张婷, 方志, 陈陶陶, 等. 球形电场测量系统在高压测量领域中的应用[J]. 电测与仪表, 2007, 44(11): 11-16.
ZHANG Ting, FANG Zhi, CHEN Taotao, et al. Applications of the spherical electric field measurement system in high-voltage measurement field[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(11): 11-16(in Chinese).
- [41] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 349-367.
YANG Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367(in Chinese).
- [42] KANG W J, KOO J Y, LIM Y S, et al. A possible non-contact measuring technique for the variation of the electric field due to

- corona discharge by use of Pockels sensor[C]//2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kitchener: IEEE, 2001: 127-131.
- [43] CHANG J, VITTITOE C N, NEYER B T, et al. An electro-optical technique for intense microwave measurements[J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57(11): 4843-4848.
- [44] HIDAKA K, FUJITA H. A new method of electric field measurements in corona discharge using Pockels device[J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53(9): 5999-6003.
- [45] 王平, 肖智勇, 耿江海, 等. 含毛刺缺陷的球-板长空气隙流注放电特性[J]. *高电压技术*, 2020, 46(10): 3591-3596.
WANG Ping, XIAO Zhiyong, GENG Jianghai, et al. Streamer discharge characteristics of long air gap between ball and plate with burr defects[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(10): 3591-3596 (in Chinese).
- [46] Pau Castera, Ana M. Gutierrez, Domenico Tulli, et al. Electro-optical modulation based on pockels effect in batio3 with a multi-domain structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2016, 28(9): 990-993.
- [47] ZENG Rong, YU Junjie, WANG Bo, et al. Study of an integrated optical sensor with mono-shielding electrode for intense transient E-field measurement[J]. *Measurement*, 2014, 50: 356-362.
- [48] KOBAYASHI R, TAJIMA K, KUWABARA N, et al. Improvement of frequency characteristics of electric field sensor using Mach-Zehnder interferometer[J]. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 2000, 83(11): 76-84.
- [49] GOLDBERG B M, CHNG T L, DOGARIU A, et al. Picosecond laser electric field induced second harmonic generation for measurement of arbitrarily applied electric fields[C]//2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee: AIAA, 2018: 1432-1440.
- [50] 白晗, 黄邦斗, 邱锦涛, 等. 基于场致激光二次谐波产生原理的纳秒脉冲电场非介入测量方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(17): 5700-5706.
BAI Han, HUANG Bangdou, QIU Jintao, et al. Investigation on non-intrusive measurement of nanosecond-pulsed electric field based on electric field induced second harmonic generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(17): 5700-5706(in Chinese).
- [51] EVSIN O A, KUPRYANOVA E B, OCHKIN V N, et al. Determination of the intensities of electric fields in gases and plasmas by the CARS method[J]. *Quantum Electronics*, 1995, 25(3): 278-282.
- [52] AKIMOV D A, ZHELTIKOV A M, KOROTEEV N I, et al. Coherent Raman scattering in molecular hydrogen in a dc electric field[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1999, 70(6): 375-379.
- [53] ITO T, KOBAYASHI K, MUELLER S, et al. Electric field measurement in an atmospheric or higher pressure gas by coherent Raman scattering of nitrogen[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(9): 092003.
- [54] BRIELS T M P, VAN VELDHUIZEN E M, EBERT U. Positive streamers in ambient air and a N₂: O₂ Mixture (99.8: 0.2)[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 906-907.
- [55] ZENG Rong, CHEN She. The dynamic velocity of long positive streamers observed using a multi-frame ICCD camera in a 57 cm air gap[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(48): 485201.
- [56] Clevis T, Nijdam S, Ebert U. Inception and propagation of positive streamers in high-purity nitrogen: Effects of the voltage rise rate[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2012, 46(4).
- [57] NIJDAM S, VAN DE WETERING F M J H, VAN VELDHUIZEN E M, et al. Diameters of positive streamers in pure N₂/O₂ mixtures[C]//Proceedings of the 29th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG 2009). Canc ún: ICPIG, 2009: 10-13.
- [58] CHEN She, HEIJMANS L C J, ZENG Rong, et al. Nanosecond repetitively pulsed discharges in N₂-O₂ mixtures: inception cloud and streamer emergence[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(17): 175201.
- [59] NASSER E, LOEB L B. Impulse streamer branching from Lichtenberg figure studies[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(11): 3340-3348.
- [60] NASSER E. Role of the cathode field emission in the streamer-spark transition[J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(13): 4712-4716.
- [61] The Renardi ères Group. Research on long air gap discharges at Les Renardi ères[J]. *Electra*, 1972, 38(29): 53-157.
- [62] The Renardi ères Group. Research on long air gap discharges at Les Renardi ères-1973 results[J]. *Electra*, 1974, 40(35): 31-152.
- [63] The Renardi ères Group. Positive discharges in long air gap discharges at Les Renardi ères-1975 results and conclusions[J]. *Electra*, 1977, 43(53): 31-152.
- [64] WORMEESTER G. Propagation mechanisms of positive streamers in different gases/Gideon Wormeester[D]. Eindhoven, The Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 2013.
- [65] NIJDAM S, VAN DE WETERING F M J H, BLANC R, et al. Probing photo-ionization: experiments on positive streamers in pure gases and mixtures[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(14): 145204.
- [66] BRIELS T, VAN VELDHUIZEN E M, EBERT U. Time resolved measurements of streamer inception in air[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 908-909.
- [67] EICHWALD O, DUCASSE O, DUBOIS D, et al. Experimental analysis and modelling of positive streamer in air: towards an estimation of O and N radical production[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(23): 234002.
- [68] RAKITIN A E, STARIKOVSKII A Y. Streak images of pulsed discharge development at high overvoltage[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 900-901.
- [69] 郑殿春, 赵大伟, 杨嘉祥, 等. 针-板电极空气隙直流放电光信息采集[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2014, 19(3): 95-99.
ZHENG Dianchun, ZHAO Dawei, YANG Jiayang, et al. Optical single collecting of needle-plate dc discharge in air gap[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2014, 19(3): 95-99(in Chinese).
- [70] 伊文阳. 空气间隙放电光谱分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [71] 赖厚湖. 短间隙高压气体放电光谱检测与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
LAI Houhu. Detection and analysis of spectrum in high voltage discharge process of narrow gap[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013(in Chinese).
- [72] LI Hongyue, WU Xingwei, LI Cong, et al. Study of spatial and temporal evolution of Ar and F atoms in SF₆/Ar microsecond pulsed discharge by optical emission spectroscopy[J]. *Plasma Science and Technology*, 2019, 21(7): 074008.
- [73] 王倩. 大气压下空气/SF₆放电的光谱特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [74] 刘民, 唐炬, 潘成. 空气中针板直流正负电晕发展过程实验研究[J]. *高电压技术*, 2016, 42(4): 1018-1027.
LIU Min, TANG Ju, PAN Cheng. Development processes of positive and negative DC corona under needle-plate electrode in the air[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(4): 1018-1027(in Chinese).
- [75] 卞星明, 惠建峰, 黄海鲲, 等. 气压和湿度对正直流电晕流注脉

- 冲特性的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2371-2382.
- BIAN Xingming, HUI Jianfeng, HUANG Haikun, et al. Influence of air pressure and humidity on positive DC corona streamer pulse characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2371-2382(in Chinese).
- [76] TERAMOTO Y, FUKUMOTO Y, ONO R, et al. Streamer propagation of positive and negative pulsed corona discharges in air[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 2218-2219.
- [77] ONO R, ODA T. Ozone production process in pulsed positive dielectric barrier discharge[J] Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(1): 176-182.
- [78] 吴传奇. 冲击电压下长空气隙正极性流注放电特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [79] BRIELS T M P, KOS J, VAN VELDHUIZEN E M, et al. Circuit dependence of the diameter of pulsed positive streamers in air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(24): 5201-5210.
- [80] 刘典. 短空气隙放电流注分叉特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [81] BRIELS T M P, VAN VELDHUIZEN E M, EBERT U. Positive streamers in air and nitrogen of varying density: experiments on similarity laws[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(23): 234008.
- [82] HEIJMANS L C J, CLEVIS T T J, NIJDAM S, et al. Streamer knotwilg branching: sudden transition in morphology of positive streamers in high-purity nitrogen[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(35): 355202.
- [83] 郑殿春, 丁宁, 沈湘东, 等. 基于分形理论的尖-板电极短空气隙放电现象[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 024703.
- ZHENG Dianchun, DING Ning, SHEN Xiangdong, et al. Discharge phenomena of short-air-gap in needle-plate electrode based on fractal theory[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 024703(in Chinese).
- [84] 王帅. 低气压间隙放电的三维分形特征研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.
- [85] 李飞行, 叶齐政, 王玉伟, 等. 电晕放电可见光数字图像的 RGB 色度研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1881-1888.
- LI Feixing, YE Qizheng, WANG Yuwei, et al. Research on RGB chromaticity of corona discharge visible digital image[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1881-1888(in Chinese).
- [86] 胡昱. 电晕放电的数字图像处理技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [87] LI Xingwang, YE Qizheng, GU Wenguo, et al. Statistical evaluation of AC corona images in long-time scale and characterization of short-gap leader[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 165-173.
- [88] 李飞行. 基于数字图像处理技术的交流电晕放电空间结构研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.



宋辉

在线出版日期: 2021-06-25。

收稿日期: 2021-03-02。

作者简介:

宋辉(1987), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 研究方向为输变电设备状态监测与智能化研究, E-mail: songeos@163.com;

孟祥麟(1997), 女, 博士研究生, 研究方向为输变电设备状态监测与智能化研究, E-mail: meng_xianglin@sjtu.edu.cn。

(实习编辑 李健一)

附录 A

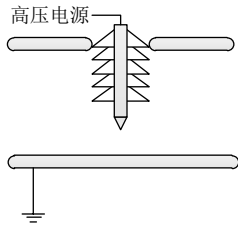


图 A1 棒-板电极示意图^[13]

Fig. A1 Schematic diagram of rod-plate electrode

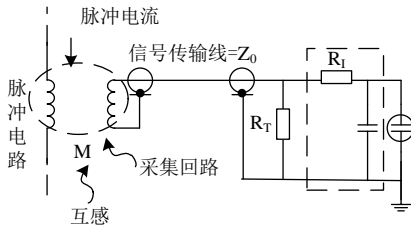


图 A2 磁探头法^[31]

Fig. A2 Magnetic probe method

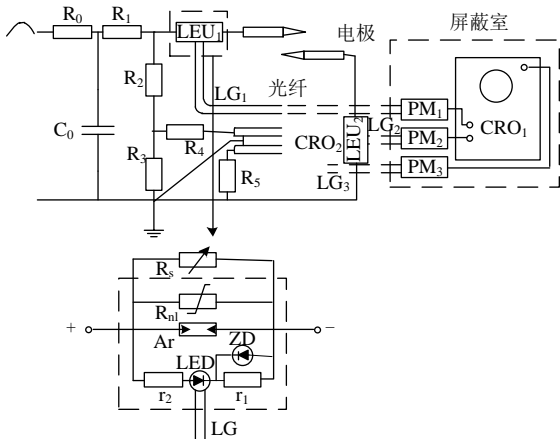


图 A3 发光二极管法^[32]

Fig. A3 Light-emitting unit method

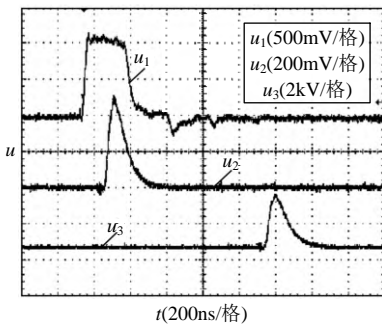


图 A4 脉冲电压与光电倍增管信号^[10]

Fig. A4 Pulse voltage and photomultiplier tube signal

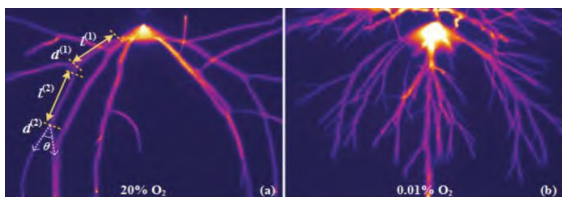


图 A5 不同氧浓度下的典型流注形态^[13]

Fig. A5 Typical streamer morphology at different oxygen concentrations

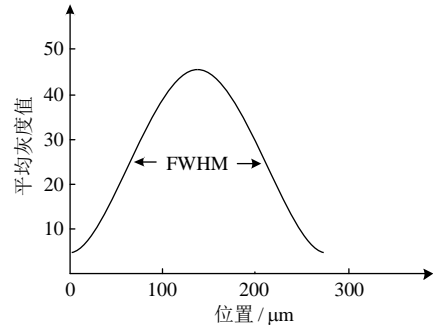


图 A6 半峰值法示意图^[80]

Fig. A6 Schematic diagram of full width at half maxima

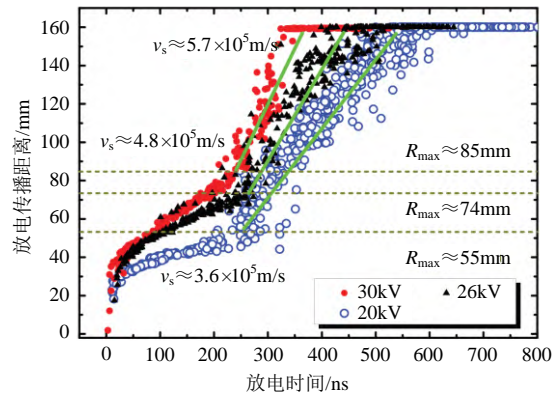


图 A7 放电发展的电压依赖性^[58]

Fig. A7 Voltage dependence of discharge development

附录 B

表 B1 流注放电实验观测数据的挖掘处理方法特点

Table B1 Characteristics of mining and processing methods for experimental observation data of streamer discharge

数据类型	挖掘处理方法	获取参数	意义
放电波形或数据文件	统计分析法	脉冲宽度、上升沿、下降沿、脉冲幅值、脉冲重复率、相邻脉冲时间间隔、相邻脉冲幅值差值等	研究参数变化规律进而分析放电发生的物理机制
		定性描述	了解流注放电基础物理过程
光学图像	伪彩色算法	流注放电彩色图像	使流注形态更易辨识，便于后续分析处理
	半峰值法	流注通道光学直径	反映流注头部电离的强弱程度
统计分析法	统计分析法	放电最长传播距离、流注分支角度	分析不同条件下放电发展依赖性、研究流注分支机理
		计盒维数法	流注放电通道的分形维数