第 52 卷 第 5 期：2068-2076 高电压技术 Vol.52, No.5: 2068-2076
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251655

基于里德堡原子的真型 GIS 局部放电量子传感检测

王 健[1]，杨明刚[1]，田世岗[1]，石 猛[2]，王学磊[3]，李庆民[1]
（1. 华北电力大学新能源电力系统全国重点实验室，北京 102206；2. 中国科学院空间应用工程与技术中心，北京 100094；3. 国网山东省电力公司电力科学研究院，济南 250002）

摘 要：气体绝缘开关设备(gas-insulated switchgear，GIS)作为关键设备，其绝缘状态评估十分依赖局部放电的早期检测。现有特高频等检测方法在实际应用中仍存在灵敏度不足、抗干扰能力弱及特征提取困难等局限。为突破传统检测技术瓶颈，结合传统特高频检测的带宽在 0.3~1.5 GHz 的限制，首次采用中心频率为 3.27 GHz 的铯原子气室，针对特高频无法覆盖的频率区间，搭建了真型 GIS 局部放电量子检测平台，将里德堡原子量子传感技术应用于 126 kV 的真型 GIS 设备尖刺、悬浮缺陷研究。实验表明，该量子探测系统的信号检测极限达 10 mV，检测局放的幅值为特高频信号的 0.6 倍，二者呈线性相关。通过对放电幅值-放电重复频率的统计分析，发现尖刺缺陷的放电重复频率显著高于悬浮缺陷。进一步统计了放电幅值-脉冲次数与放电幅值-脉冲间隔时间图谱，揭示了 2 种缺陷的本质差异，验证了里德堡原子技术在 GIS 局放检测中的可行性，为量子传感的绝缘缺陷识别奠定了基础。
关键词：里德堡原子；气体绝缘开关设备；局部放电；量子传感；特高频检测

Quantum Sensing Detection of Local Discharge Using a True-type GIS Based on Rydberg Atoms

WANG Jian[1], YANG Minggang[1], TIAN Shigang[1], SHI Meng[2], WANG Xuelei[3], LI Qingmin[1]
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Space Engineering and Technology Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Company Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

Abstract：Gas-insulated switchgear (GIS) is a critical piece of equipment, and the assessment of its insulation condition relies heavily on the early detection of partial discharge (PD). Existing detection methods, such as the ultra-high frequency (UHF) technique, still face limitations in practical applications, including insufficient sensitivity, weak anti-interference capability, and difficulties in feature extraction. To overcome the bottlenecks of conventional detection technologies and address the frequency band limitation of traditional UHF detection (0.3~1.5 GHz), this study employs a cesium atomic vapor cell with a center frequency of 3.27 GHz for the first time. Targeting the frequency range beyond the reach of UHF methods, a full-scale GIS partial discharge quantum detection platform was constructed, and the Rydberg atom quantum sensing technology is applied to investigate protrusion and floating defects in a 126 kV full-scale GIS. Experimental results demonstrate that the quantum detection system achieves a signal detection limit of 10 mV, with the measured PD amplitude being 0.6 times that of the UHF signal, exhibiting a linear correlation between the two. Statistical analysis of discharge amplitude versus discharge repetition rate reveals that the repetition rate of protrusion defects is significantly higher than that of floating defects. Furthermore, maps of discharge amplitude–pulse count and discharge amplitude–pulse interval time were statistically compiled, revealing the intrinsic differences between the two defect types. These findings validate the feasibility of the Rydberg atom technology for GIS partial discharge detection and lay a foundation for insulation defect identification using quantum sensing.
Key words：Rydberg atoms; gas insulated switchgear; partial discharge; quantum sensing; ultra-high frequency

基金资助项目：国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作项目(2025YFE0106300)；国家自然科学基金原创探索计划项目(52450005)；国家自然科学基金联合基金(U2341211)；国家自然科学基金(62501568)。
Project supported by National Key R&D Program-Intergovernmental International Science and Technology Innovation Cooperation Project (2025YFE0106300), National Natural Science Foundation of China Original Exploration Program (52450005), National Natural Science Foundation of China Joint Fund (U2341211), National Natural Science Foundation of China (62501568).

0　引言

近年来，气体绝缘开关设备(gas-insulated switchgear，GIS)作为电力系统中的关键设备，因其结构紧凑、可靠性高而被广泛应用。然而，GIS 内部绝缘缺陷引发的局部放电是导致其故障的主要原因之一，严重时可能引发设备击穿甚至区域性供电中断，对电网安全稳定运行构成严重威胁[1-2]。GIS 中局部放电传统检测手段可以分为声学类、光学类和电气类 3 种。

超声波法则通过捕捉 20~80 kHz 的声波信号进行缺陷识别[3-4]，其中白毅翔等提出智能去噪算法，提升信噪比[5]，马国明等人通过改进结构设计实现灵敏度的提升[6]。在局放光学监测领域任明等人设计了基于雪崩二极管的高灵敏局部放电传感器，能更早地检测到局部放电[7]。李泽等人构建了基于光导棒和光电转换器分析了不同放电缺陷光信号的时域特性[8]。电气监测主要包括脉冲电流法、高频电流互感器和特高频法。任达团队通过脉冲电流法揭示了变压器油隙贯穿性放电的物理机制[9]；许渊等提出多试品分布式测量，提高了脉冲电流法的灵敏度[10]；田等提出一种分形希尔伯特结构柔性天线，实现 1.34 dB 增益[11]；郑全福等基于 MUSIC 算法实现高精度局部放电定位[12]。

传统局放检测方法存在诸多局限：声学监测易受噪声干扰且定位精度有限；光学方法在弱光或遮挡下灵敏度不足；脉冲电流法难以在线应用；高频电流互感器与特高频法均易受电磁干扰，后者还因金属天线引发电场畸变，影响信号采集。因此，亟待提出一种能够实现高精度、稳定性强以及适用环境更灵活局放检测的新型传感手段。

目前，量子传感技术凭借其突破经典测量极限的潜力，正逐渐成长为一种电力领域新型的测量手段。在电力监测领域主要包含电场、磁场检测 2 种。

其中量子在磁场的应用方面，王学锋与崔梦缘共同聚焦于无自旋交换弛豫(spin-exchange relaxation-free，SERF)原子磁强计，以提升磁场测量灵敏度[13]；罗文博等人总结了金刚石 NV 色心对磁场的精密测量未来在电力系统中的应用[14]；陈瑶]等人为量子点技术为电力设备状态可视化提供了新材料[15]。

量子在电场测量的应用方面，陈雪花等人系统研究了基于里德堡原子的高灵敏度电场传感技术[16]；杨亮亮等人针对约瑟夫森器件的非正弦电流-相位关系进行了分析[17]；肖冬萍团队、李冬以及刁赢龙团队利用里德堡原子在低频电力计量做了大量研究[18-19]；此外，里德堡原子传感器在宽频段也展现了巨大测量潜力，如张映昀、韩顺利等人进一步拓展了原子传感器的频带覆盖与灵敏度[20-21]，为后续里德堡原子的局放检测奠定了重要基础。

而检测局部放电这种高频信号时，NV 色心等技术面临诸多限制，存在极低温依赖、灵敏度不足及带宽有限等问题。相比之下，里德堡原子量子传感技术可将微弱射频电场直接转换为光学信号，具备兆赫兹至太赫兹的理论响应带宽与微伏每厘米量级的灵敏度，能有效捕捉局放信号。

尽管已有研究将里德堡传感技术应用于电弧或电晕放电检测，如丁冬生团队对电弧放电进行了分析[22]、王恩惠团队在电弧放电基础上拓展到对局放现象进行了分析[23-24]，但这些高能量放电与早期微弱局放存在本质区别，难以反映绝缘材料初始劣化的关键过程。此外，袁昊等人对电晕放电进行了分析[25]，为里德堡原子应用于局部放电技术探测奠定了基础，但现有实验基于理想化模型，与真型设备存在显著差距。

因此，为系统探究里德堡原子传感器在振兴设备局放检测中的有效性，结合特高频带宽特点，首次搭建了中心频率为 3.27 GHz 里德堡原子真型 126 kV 的 GIS 局放检测实验平台；针对传统特高频无法检测的频率区间，构建了 2 种典型绝缘缺陷模型，包括尖刺缺陷、悬浮缺陷。采用里德堡原子传感系统与特高频法进行同步测量，利用特高频传感对比，分析里德堡原子放电信号的时序特征；统计不同电压下里德堡原子检测的放电重复频率；评估基于里德堡原子的量子检测系统在实际真型设备下局放检测的相关规律。

1　里德堡原子的检测原理

1.1　实验原理

里德堡原子在外加电场中会发生能级分裂与移动，这一现象称为 Stark 效应。本文利用铯原子在特定激光激发下进入里德堡态，并通过电磁诱导透明(electromagnetic induced transparency，EIT)光谱监测其能级变化，实现对微弱微波电场的传感。如图 1 所示，为实验所用的铯原子阶梯型电磁诱导透明能级图。

具体而言，如图 1 所示，采用 852 nm 和 509 nm

激光构建三能级阶梯型能级系统。当局部放电产生的微波电场作用于铯原子里德堡态时，会引起能级的 Stark 移动，导致 EIT 光谱峰值发生偏移。通过锁定探测光频率并扫描耦合光，可精确捕捉该频移量，进而反演得到电场强度。

Stark 效应频移量和外加场强 E 呈二次关系，两者的关系表达式[26]为：

$$\Delta A = \frac{\alpha(f)}{2} E^2 \tag{1}$$

式中：ΔA 为 Stark 效应中的频移量；$\alpha(f)$ 为对应里德堡能级的极化率。因此，Stark 分裂可以通过频移量反推出待测电场强度

1.2 里德堡原子局部放电检测系统

与传统电气测量方法相比，基于里德堡原子的微波电场传感技术具有高灵敏度、宽频带响应和自校准等潜在优势。实验旨在通过探测局放源辐射的电场在铯原子里德堡态中引发的电磁诱导透明光谱频移，来实现对局放现象的高精度测量。

图 2 为基于铯里德堡原子电磁诱导透明光谱的局放测量实验装置。采用 852 nm 与 509 nm 激光制备铯原子里德堡态。852 nm 分布式反馈光纤激光器输出的激光经由光纤分束器分为 2 路，其中 1 路被导入饱和吸收光谱装置，以将其频率锁定至铯原子跃迁线；另 1 束通过准直器实现 852 nm 激光的扩束和准直。原子气室为 20 mm×20 mm×100 mm 的立方体结构。为精确测量触发的 EIT 频移，对 852 nm 激光引入相位调制，从而在 EIT 谱上形成 1 对校准边带。边带与主峰的固定频差为实现光谱横向偏移至频率偏移的直接标定提供了可靠基准，确保了测量的准确性。

2 实验平台

2.1 放电实验平台

高压实验回路主要包括高压发生器、保护阻抗以及 GIS 模拟试验工装。该 GIS 工装由 126 kV 缺陷腔体绝缘子等组成，各腔体外壳与内部电极均采用铝合金材质，其中绝缘子的材质包含环氧树脂与 Al_2O_3。

在实验回路结构中，126 kV 缺陷腔体通过转接腔体内放置 2 种对应缺陷。保护阻抗用于抑制来自电源侧的干扰，同时还起到阻隔局部放电脉冲电流反向流入电源的作用。

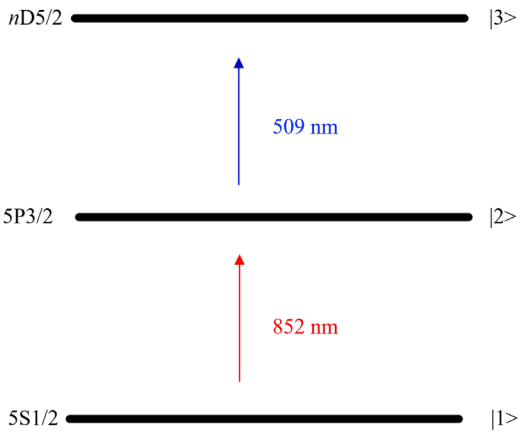


图 1 三能级里德堡原子阶梯型能级图

Fig.1 Diagram of three-level Rydberg atomic ladder energy level

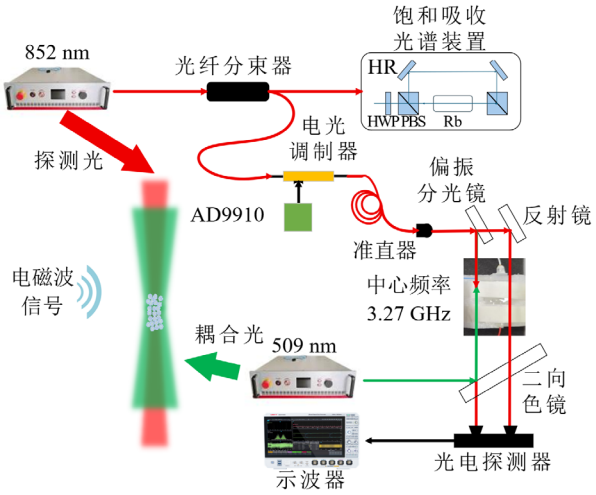


图 2 里德堡原子局放检测装置

Fig.2 Rydberg atomic radiation detection device

2.2 缺陷设置与实验流程

1）缺陷设置

本研究设计并制备了 2 种典型的局部放电缺陷，具体参数列于表 1，缺陷示意图如图 3 所示。为模拟尖刺放电，将铝制尖刺缺陷固定于 GIS 高压导杆表面，其轴向沿径向指向高压电极，尖端与腔体内壁保持 5 cm 距离，尖端曲率近似为 20 mm^{-1}。为模拟悬浮放电，将相应缺陷置于高压导杆与腔体之间的间隙中，使其轴向平行于高压电极，并与腔体内壁间距为 5 cm。

上述 2 种缺陷中，尖刺缺陷用 2 cm×1 cm 大小的绝缘胶带将一端固定在 GIS 的高压导杆的横截面，另一端竖直向下指向接地外壳；悬浮缺陷中，悬浮的金属异物平行于高压导杆放置，其中用绝缘

胶带一端绝缘胶带进行固定，绝缘胶带的另一端固定至高压导杆处。

通过依次将 2 类缺陷安装于 126 kV 缺陷腔体内，有效复现了真型 GIS 设备中常见的 2 类放电模式。为保障实验的一致性，所有金属微粒均采用高纯度铝材制备。本研究所搭建的局部放电检测平台由高压实验回路、里德堡原子信号同步测量系统以及特高频同步测量系统共同构成，如图 4 所示。

2）实验流程

在正式实验开始前，首先依次测定 2 种缺陷对应的局部放电起始电压。具体流程为：依次布置尖刺缺陷与悬浮缺陷，逐步升高工频电源的输出电压，记录首次出现稳定局部放电特征时的电压值，作为该缺陷的放电起始电压。

为在正式实验中获取 2 种缺陷所产生的稳定、持续局部放电信号，正式实验中，依次测量 2 种缺陷在设定电压下的局部放电响应。具体步骤为：分别布置各缺陷类型，采用阶梯升压法将输出电压逐步升至示波器中出现局部放电；电压稳定后，同步采集该缺陷下的特高频信号与里德堡原子信号，采样频率设为41.7 MHz。实验流程示意图如图4所示。

3　结果分析

实验中里德堡原子检测 2 种缺陷发生的局放基于里德堡原子的交流 Stark 效应，在实验开始时此时探测光的强度与对应光电探测器的电压都为最大值。因此，当局放发生时，EIT 峰值偏移，探测光强度会降低，对应光电探测器的数值下降。如图 5 所示，为未发生局放现象时的示波器波形。

在未发生局放时，由于激光器在工作时温度会不断升高，导致激光器功率发生变化，最终影响里德堡原子的形成。为了避免这一问题，增加了控制环节，导致光电探测器接收的探测光抖动较大，范围为−5~5 mV 之间。

为了评估里德堡原子局部放电检测技术的抗干扰性能，本研究设计了对照实验，分别测量了实验大厅内 2 种工况下的背景噪声水平：一是在仅开启 GIS 设备的条件下；二是在同时开启多类干扰设备(包括电-热老化平台、高频方波电源、击穿交流装置等)的条件下，对比分析特高频法与里德堡原子传感器的底噪表现。

通过分析图 6 中环境变化前后底噪大小，可以看出用电设备变复杂后会产生电磁噪声，这些噪声

表 1　金属微粒的规格

Table 1　Specifications of metal particles

形状	尖刺	悬浮
尺寸	长 80 mm×直径 1 mm	长 50 mm×直径 1 mm

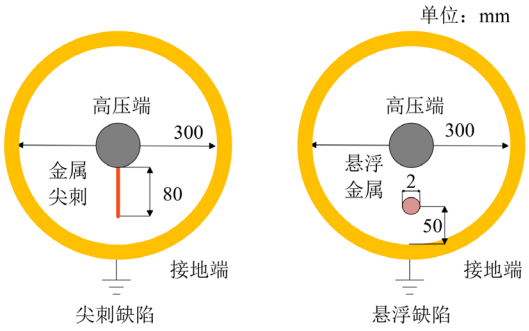


图 3　局部放电缺陷模型

Fig.3　Partial discharge defect model

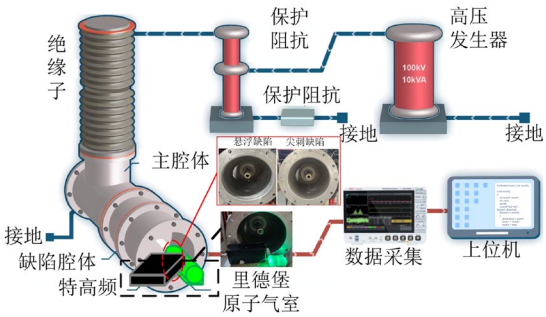


图 4　放电实验平台

Fig.4　Discharge experiment platform

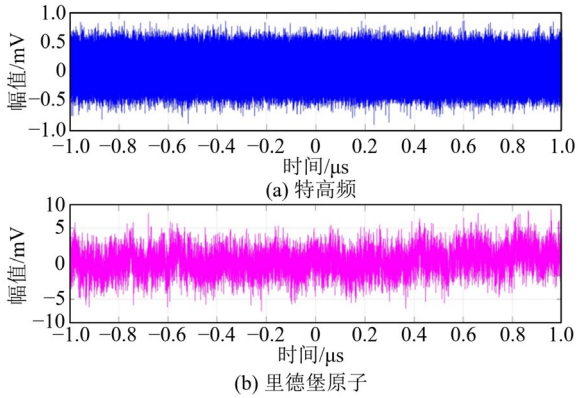
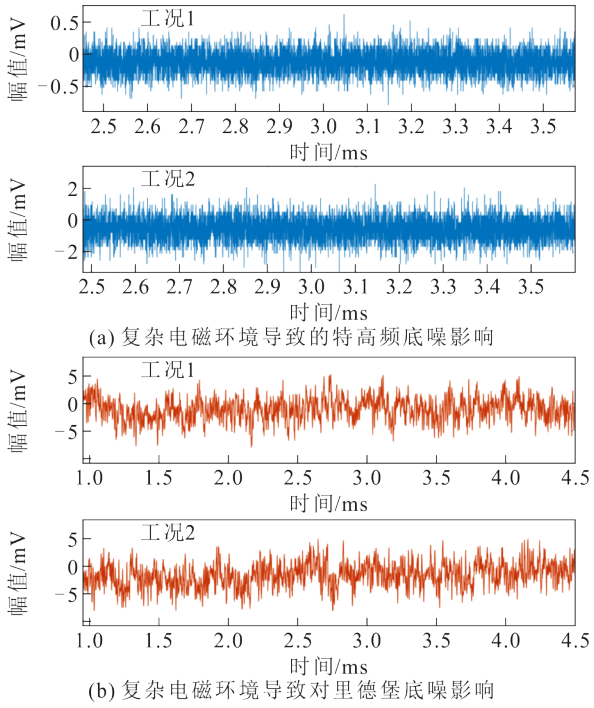


图 5　无局放发生时传感器波形

Fig.5　Sensor waveform when no local release occurs

会直接进入 UHF 传感器的前端放大器，抬高系统噪声基底使得特高频传感的底噪变大，但里德堡原子的底噪由于受激光器功率影响，并未发生变化。

为了分析里德堡原子，分别统计了里德堡原子与特高频检测到 2 种缺陷发生局部放电的放电重复

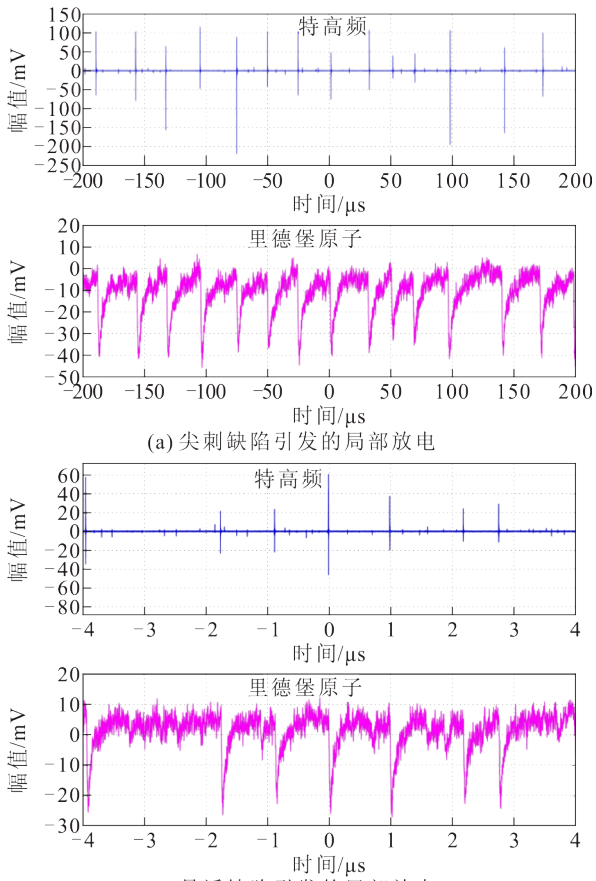


(a) 复杂电磁环境导致的特高频底噪影响

(b) 复杂电磁环境导致对里德堡底噪影响

图 6 复杂电磁环境对 2 种传感器的底噪影响

Fig.6 Impact of complex electromagnetic environment on the background noise of two types of sensor

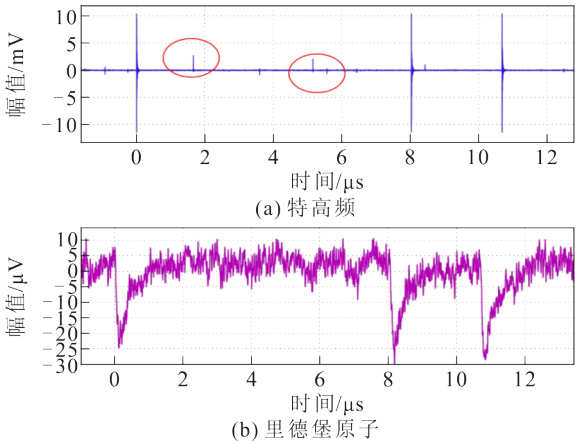


(a) 尖刺缺陷引发的局部放电

(b) 悬浮缺陷引发的局部放电

图 7 2 种缺陷局放信号波形

Fig.7 Waveforms of two kinds of defect partial discharge signals



(a) 特高频

(b) 里德堡原子

图 8 里德堡原子局放检测有效波形对比

Fig.8 Comparison of effective waveform of atomic discharge detection in the Rydberg

频率，图 7 为 2 种传感器在 2 种缺陷中检测到的局部放电信号。

分析图 7 中 2 种缺陷的特高频信号与里德堡原子数据发现，当特高频天线检测到局放时，里德堡原子输出的信号并未在全部局部放电发生时随之变化，如图 8 所示。

为探究里德堡原子能检测到局放的极限值，对采集到的数据进行分析，统计 10 mV 以上的局放的放电重复频率，尖刺缺陷产生的局部放中特高频与里德堡原子检测到局放的放电重复频率分别为 37 500 次/s 和 37 500 次/s；悬浮缺陷产生的局部放中特高频与里德堡原子检测到局放的放电重复频率分别为 895 次/s 和 895 次/s。通过图 8 中的信息可以确定，当特高频检测到局放产生 10 mV 以下的分别为 1、2.5 mV 与 3 mV 电磁波时，里德堡原子的检测信号并未出现变化，结合 10 mV 以上的 2 种传感器放电重复频率一致，最终确定该系统局放检测的极限值为 10 mV。

为了进一步了解里德堡原子检测到的局放信号的特性，选择对 3 种缺陷中检测到的单次放电进行时分析。其中里德堡原子检测到局部放电的单次信号时域信息如图 9 所示。

通过观察图 9 所示里德堡原子检测信号，可以看出，在局放发生后，电场的改变导致气室内的里德堡原子受到干扰，不再维持里德堡状态，从而导致检测到的探测光信号降低，最终在示波器上出现下降沿。局放消失后，气室内的里德堡原子在探测光和耦合光的激发下又重新恢复至里德堡状态导致

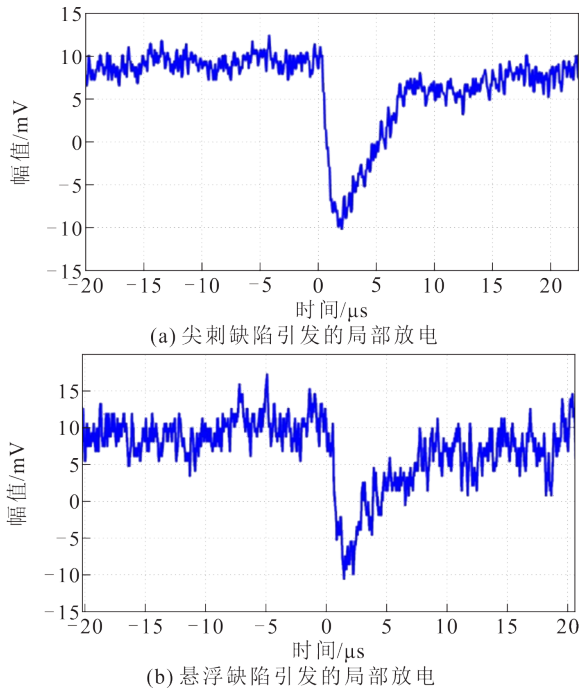


图 9　里德堡原子 2 种缺陷中单次局放波形

Fig.9　Single partial discharge waveform in two types of defects in the Rydberg atomic structure

检测到的探测光信号增强，最终在示波器上出现的现象为信号上升。

为探究里德堡原子所检测局放信号的特性，图 10 分析了增益不变情况下特高频信号与里德堡原子信号的幅值。结果表明，里德堡原子检测到的信号幅值系统地约为特高频检测结果的 60%。这一线性相关说明里德堡原子信号与特高频信号具有相同的变化规律，从而证明了里德堡原子检测局放的可行性。

基于上述直流局放数据，构建直流局放典型统计特征图谱，分析 2 种缺陷中直流局放的放电特性。首先，根据实验数据构建不同电压下放电重复频次与放电幅值的变化关系，如图 11 所示。

通过观察图 11 所示里德堡原子检测的不同电压下尖刺缺陷与悬浮缺陷的图像，可以看出，随着电压增加，虽然 2 种缺陷的放电重复频次与放电幅值也增长，但能看出 2 种缺陷的放电重复频次中，尖刺缺陷的放电重复频次要明显高于悬浮缺陷的放电重复频次，并且从整体上观察，尖刺放电的放电幅值要高于悬浮缺陷的幅值。

在此基础上，选择里德堡原子到尖刺缺陷 15 kV、悬浮缺陷 31 kV 电压下采集的数据，统计直流局放图谱的放电幅值-脉冲重复数的分布图，将有

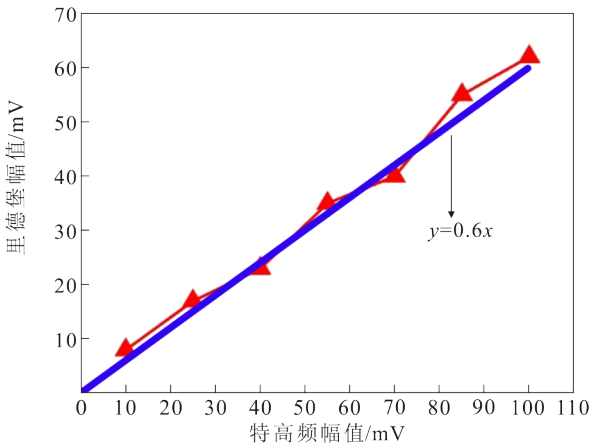


图 10　里德堡与特高频幅值关系统计

Fig.10　Rydberg and the statistical analysis of UHF amplitude correlation

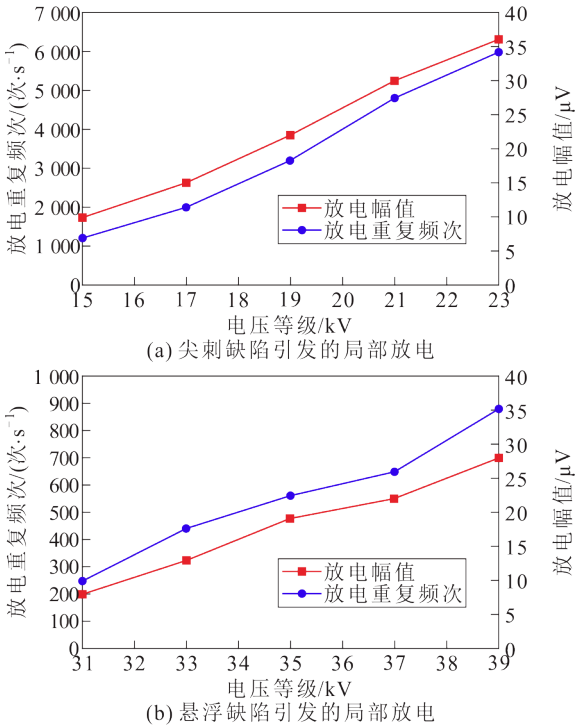


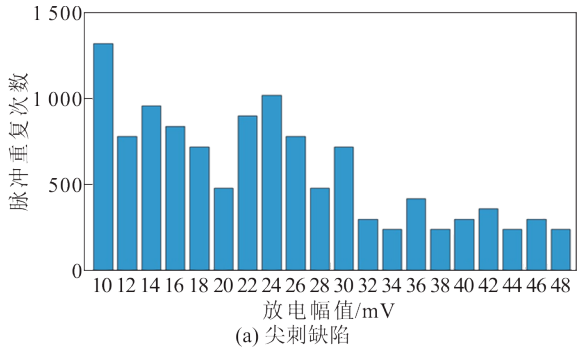
图 11　不同电压下里德堡原子 2 种缺陷局放信息统计

Fig.11　Information statistics of two kinds of defects in the Rydberg atom under different voltages

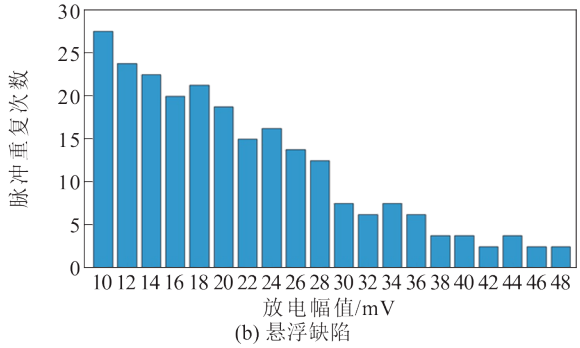
效幅值分为 10 段，如图 12 所示。

从图 12 整体分布来看，2 种缺陷表现出截然不同的统计特征。

尖刺缺陷的放电幅值-重复次数分布呈现显著的不规则性与离散性，其分布轮廓为多峰值形状且高幅值放电次数出现较多，表明放电过程具有较大的随机性和不稳定性。相比之下，悬浮缺陷的分布则展现出良好的连续性与单调衰减趋势，其轮廓平



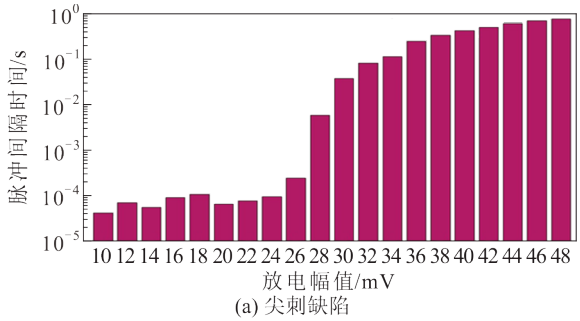
(a) 尖刺缺陷



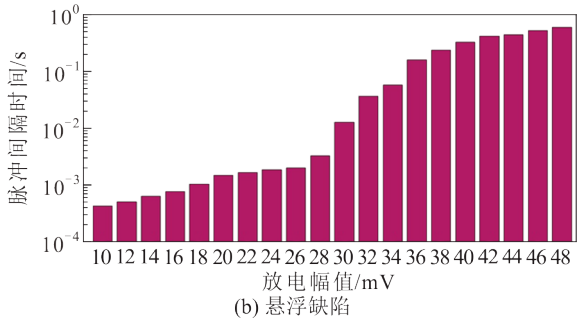
(b) 悬浮缺陷

图 12 2 种缺陷不同放电幅值与对应脉冲重复次数分析

Fig.12 Analysis of different discharge amplitudes and corresponding pulse repetition numbers for two kinds of defects



(a) 尖刺缺陷



(b) 悬浮缺陷

图 13 2 种缺陷放电幅值与对应脉冲间隔时间分析

Fig.13 Analysis of discharge amplitudes and corresponding pulse interval time for two kinds of defects

滑且放电主要分布在低幅值范围内。因此，脉冲次数在幅值维度上的整体分布形态的规整度，可以作为里德堡原子区分尖刺放电与悬浮放电的一个关键性特征。

同时，对该电压下局放发生时，不同幅值局放间的局放脉冲的时间间隔进行统计，统计直流局放图谱的放电幅值-脉冲时间间隔的分布图。由于不同幅值的脉冲间隔时间差异性过大，因此选择用对数形式表示，将有效幅值分为 10 段，如图 13 所示。

从整体趋势来看，2 种缺陷的脉冲间隔时间均随放电幅值的增加而呈现数量级式的增长，但仔细观察可发现二者在增长轨迹的规整性上存在显著差异。

悬浮缺陷的间隔时间分布展现出平滑且连续的指数增长特征，形成一条相对规整的曲线，表明其放电过程具有高度的时序规律性。相比之下，尖刺缺陷的分布虽也呈现增长趋势，但在中低幅值区域表现出明显的波动性和不稳定性，间隔时间出现非单调变化，反映出其放电触发机制具有更强的随机性。因此，脉冲间隔时间随放电幅值变化的轨迹规整度可作为里德堡原子区分悬浮放电与尖刺放电的有效判据。

综上所述，上述直流局放统计分布的整体形态规整度与脉冲间隔随幅值变化的轨迹稳定性共同构成了基于里德堡原子检测技术有效区分 2 种缺陷类型的可靠判据。

4 结论

1）首次搭建了真型 126 kV 的 GIS 中基于里德堡原子的局部放电测量平台，应用中心频率为 3.27 GHz 的 Cs 原子气室进行实验，并在此平台基础上探究了尖刺、悬浮 2 种缺陷类型的局部放电检测。

2）通过利用特高频信号进行标定，分析里德堡原子在 2 种缺陷中局部放电，通过对比同一时间段内 2 种缺陷的特高频信号与里德堡原子信号，发现当局部放电产生 10 mV 以上的信号时，里德堡原子在尖刺、悬浮 2 种缺陷中检测到的放电重复频率分别为 37 500、895 次/s，与特高频检测到的次数相同，确定了该中心频率为 3.27 GHz 的里德堡原子检测系统局放检测的极限值为 10 mV，且由于现有系统带宽限制，导致里德堡检测到的放电幅值约为特高频信号的 60%。

3）基于对里德堡原子检测系统所获数据的综合分析，通过对比尖刺缺陷与悬浮缺陷在特定电压下的放电统计特征，明确了二者的区别。确认了尖刺缺陷具有更高的放电重复频率和放电幅值，进而从放电幅值-重复次数分布和放电幅值-脉冲时间间隔分布 2 个维度揭示了其差异机理：尖刺缺陷在两

者均表现出显著的不规则性和随机性，而悬浮缺陷则展现出高度的规律性与连续性。为后续基于里德堡原子的量子局放检测技术奠定了基础。

参考文献　References

[1] 张滢滢，郝艳捧，米鸿儒，等. GIS 绝缘子固化特征与缺陷产生机理研究进展[J/OL]. 高电压技术，2025：1-16[2025-12-31]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20250476.
ZHANG Yingying, HAO Yanpeng, MI Hongru, et al. Progress on curing characteristics and defect generation mechanism of GIS insulators[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-16[2025-12-31]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20250476.

[2] 李军浩，韩旭涛，王昊天，等. 电气设备局部放电检测技术述评：2015—2025[J]. 高电压技术，2025，51(7)：3132-3158.
LI Junhao, HAN Xutao, WANG Haotian, et al. Review of partial discharge detection technology in electrical equipment: 2015—2025[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3132-3158.

[3] 白毅翔，陈志英，张修伦，等. 基于改进 VMD-WT 的油浸式变压器局部放电超声信号去噪方法[J]. 电子测量与仪器学报，2024，38(12)：237-249.
BAI Yixiang, CHEN Zhiying, ZHANG Xiulun, et al. Ultrasonic signal denoising method for partial discharge of oil-immersed transformer based on improved VMD-WT[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12): 237-249.

[4] 唐志国，胡　瑞. 变压器局部放电超声传播路径分析和其对定位误差的影响[J/OL]. 高电压技术，2025：1-13[2025-12-31]. https://doi.org/10.13336/j. 1003-6520.hve.20250242.
TANG Zhiguo, HU Ru. Analysis of ultrasonic propagation paths of partial discharge in transformers and their impact on localization errors[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-13[2025-12-31]. https://doi.org/10.13336/j. 1003-6520.hve. 20250242.

[5] 袁燕岭，高　岭，张占新，等. 电缆局放检测用柔性压电超声传感器的灵敏度优化[J]. 高电压技术，2025，51(2)：652-659.
YUAN Yanling, GAO Ling, ZHANG Zhanxin, et al. Sensitivity optimization of flexible piezoelectric ultrasonic sensor for cable partial discharge detection[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 652-659.

[6] 马国明，周宏扬，刘云鹏，等. 变压器局部放电光纤超声检测技术及新复用方法[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1768-1780.
MA Guoming, ZHOU Hongyang, LIU Yunpeng, et al. Optical fiber ultrasonic detection technology for partial discharge in power transformer and new multiplexing method[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1768-1780.

[7] 任　明，李信哲，王思云，等. 基于雪崩面阵的气体绝缘放电光脉冲检测技术及传感性能研究[J]. 电网技术，2021，45(9)：3627-3635.
REN Ming, LI Xinzhe, WANG Siyun, et al. Gas insulated discharge optical pulse detection technology and sensing performance based on avalanche diode array[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3627-3635.

[8] LI Z, QIAN Y, ZANG Y M, et al. Optical partial discharge detection and diagnosis method based on PHOG features[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(6): 3040-3048.

[9] 任　达，郑玉平，李斯盟，等. 基于脉冲电流信号的大型电力变压器极不均匀电场油隙贯穿性放电特性[J]. 中国电机工程学报，2025，45(9)：3332-3345.
REN Da, ZHENG Yuping, LI Simeng, et al. Characteristics of oil gap penetration discharge in large power transformers with extremely non-uniform electric field based on pulse current[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9): 3332-3345.

[10] 李　星，丁登伟，张　榆，等. GIS/GIL 设备局部放电高电位脉冲电流测量方法[J]. 高电压技术，2025，51(11)：5472-5480.
LI Xing, DING Dengwei, ZHANG Yu, et al. High potential partial discharge pulse current detection method for GIS/GIL equipment[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(11): 5472-5480.

[11] TIAN J W, ZHANG G Z, MING C, et al. Design of a flexible UHF Hilbert antenna for partial discharge detection in gas-insulated switchgear[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(4): 794-798.

[12] ZHENG Q F, LUO L G, SONG H, et al. A RSSI-AOA-based UHF partial discharge localization method using MUSIC algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9002309.

[13] 崔梦缘，王学锋，邓意成，等. SERF 态效应用零磁场环境实现技术研究进展[J/OL]. 激光与光电子学进展，2025：1-20[2025-11-20]. https://link.cnki.net/urlid/31.1690.TN. 20250225.1429.030.
CUI Mengyuan, WANG Xuefeng, DENG Yicheng, et al. Development of zero-magnetic field achieving techniques for SERF effect application[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025: 1-20[2025-11-20]. https://link.cnki.net/urlid/31.1690. TN. 20250225.1429.030.

[14] 罗文博，付秋明，王戈明，等. 金刚石 NV 色心量子传感器的制备及其在电力系统中的应用(特邀)[J]. 中国激光，2025，52(18)：1803012.
LUO Wenbo, FU Qiuming, WANG Geming, et al. Fabrication of diamond NV centers quantum sensors and their applications in power systems (invited)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(18): 1803012.

[15] MA Y T, QIAO Z X, YU M Z, et al. Single-beam integrated hybrid optical pumping spin exchange relaxation free magnetometer for biomedical applications[J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(11): 114001.

[16] 陈雪花，丛　楠，罗文浩，等. 基于里德堡原子的电场传感技术[J]. 计测技术，2023，43(4)：83-94.
CHEN Xuehua, CONG Nan, LUO Wenhao, et al. Electric field sensing technology based on Rydberg atoms[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(4): 83-94.

[17] 杨亮亮，何楷泳，戴根婷，等. 非正弦电流-相位关系约瑟夫森结动力学行为的分析[J]. 物理学报，2025，74(18)：187401.
YANG Liangliang, HE Kaiyong, DAI Genting, et al. Numerical analysis of dynamical behavior in Josephson junctions with non-sinusoidal current-phase relations[J]. Acta Physica Sinica, 2025, 74(18): 187401.

[18] 肖冬萍，陈　苓，阎　晟，等. 交/直流电场对里德伯原子 Stark 效应的调控作用及工频强场测量[J]. 物理学报，2025，74(24)：243201.
XIAO Dongping, CHEN Ling, YAN Sheng, et al. Regulation of Stark effect in Rydberg atoms by AC and DC electric fields and measurement of power-frequency strong fields[J]. Acta Physica Sinica, 2025, 74(24): 243201.

[19] DIAO Y L, QU Z Y, QU N, et al. Research of 110 kV high-voltage measurement method based on Rydberg atoms[J]. Electronics, 2025, 14(15): 2932.

[20] 韩顺利，刘贵祥，柴继旺，等. 基于里德堡原子的超外差宽带频谱测量设计与实现[J]. 量子电子学报，2025，42(4)：546-555.
HAN Shunli, LIU Guixiang, CHAI Jiwang, et al. Design and realization of broadband spectrum measurement based on Rydberg atoms superheterodyne[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2025, 42(4): 546-555.

[21] 张映昀，柴继旺，刘贵祥，等. 基于铯里德堡原子的宽带太赫兹场

强测量系统设计[J]. 红外与激光工程，2025，54(2)：20240289.
ZHANG Yingyun, CHAI Jiwang, LIU Guixiang, et al. Design of wide-band terahertz electric field strength measurement system based on cesium Rydberg atom[J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(2): 20240289.

[22] WANG Q F, ZHANG L H, LIU B, et al. Measurement of arc rf signals based on Rydberg atoms[J]. Physical Review Applied, 2025, 24(1): 014006.

[23] 王恩惠，耿佳琪，赵　龙，等. 里德堡原子 EIT 与 EIA 中间态对故障电弧感应增强的研究[J]. 量子光学学报，2025，31(2)：020204.
WANG Enhui, GENG Jiaqi, ZHAO Long, et al. Research of an arc fault detection-enhanced method based on an EIT-EIA intermediate state[J]. Journal of Quantum Optics, 2025, 31(2): 020204.

[24] 王恩惠，赵　龙，仇茹嘉，等. 激光束腰对里德堡原子检测局放信号的影响[J/OL]. 量子电子学报，2025：1-15[2025-12-25]. https://link.cnki. net/urlid/34.1163.tn. 20251118.1119.004.
WANG Enhui, ZHAO Long, QIU Rujia, et al. The influence of beam waist on Rydberg atomic detection for partial discharge[J/OL]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2025: 1-15[2025-12-25]. https://link.cnki.net/urlid/34.1163. tn. 20251118.1119.004.

[25] 袁　昊，罗　兵，陈建君，等. 基于里德堡原子的电晕放电信号测量[J]. 量子电子学报，2025，42(4)：556-564.
YUAN Hao, LUO Bing, CHEN Jianjun, et al. Corona discharge signal measurement based on Rydberg atoms[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2025, 42(4): 556-564.

[26] JING M Y, HU Y, MA J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy[J]. Nature Physics, 2020, 16(9): 911-915.



王　健(通信作者)
1985—，男，博士，教授，博导
主要从事电力装备智能监测与局放量子传感测量方面相关研究
E-mail: wangjian31791@ncepu.edu.cn

WANG Jian
Ph.D., Professor
Corresponding author



杨明刚
1999—，男，博士
主要从事高压局放检测、量子传感方面的研究
E-mail: kdymg6@163.com

YANG Minggang
Ph.D.

收稿日期　2025-11-21　修回日期　2026-02-02　　编辑　曾文君