DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.004

GIS中不同缺陷局放电流的电磁激发模态及特征可辨识性研究

尹 泽，舍从东，肖焓艳，庄添鑫，杨景刚，赵 科，
高 山，李玉杰，李熹宁
（国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211106）

摘要：为分析不同缺陷局放电流在GIS中的电磁激发模态及传播后特征可辨识性，文中以金属尖端、气隙、沿面和悬浮电位4类典型缺陷为对象，获取实测局放电流波形，并与理想高斯脉冲进行对比。基于XFDTD建立直筒、L形、T形GIS结构模型，分析TEM波与高次模波的传播特性，并提取时频域特征评价传播后可辨识性。结果表明，实测局放电流较高斯脉冲具有更明显的非对称性和频谱差异，可激发具有缺陷相关性的高次模响应。直筒结构中特征保持性较好，L形拐角和T形分支会削弱高次模及部分时域特征，但频谱带宽、主频和中高频能量占比等频域特征仍具有较好可辨识性，直筒、L形、T形结构中频域特征的平均类中心距离分别为1.415、1.422、1.439，均高于对应时域特征的1.323、1.336、1.343。研究结果可为GIS局放UHF检测中的传播路径影响分析和缺陷识别特征选取提供参考。

关键词：GIS；局部放电；特高频；实测电流；电磁模态；特征可辨识性

Research on Electromagnetic Excitation Modes and Feature Identifiability of Partial Discharge Currents for Different Defects in GIS

YIN Ze, SHE Congdong, XIAO Hanyan, ZHUANG Tianxin, YANG Jinggang, ZHAO Ke,
GAO Shan, LI Yujie, LI Xining
(Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: To analyze the electromagnetic excitation modes and the identifiability of propogated features of partial discharge currents for different defects in GIS, in this paper such four types of typical defects as metal tip, gas gap, surface discharge and floating potentials are taken as the research objects to obtain the actually measured partial discharge current waveforms and compare them with ideal Gaussian pulses. Based on XFDTD, straight, L-shaped and T-shaped GIS structural models are set up to analyze the propagation characteristics of TEM waves and higher-order mode waves, and time-domain and frequency domain features are extracted to evaluate the identifiability after propagation. The results show that the actually measured partial discharge currents exhibit more pronounced asymmetry and spectral differences compared to Gaussian pulses, and are capable of exciting higher-order mode responses that are correlated with specific defect types.The feature retention in the staright structure is relatively good, while the L-shaped bend and T-shaped branch tend to attenuate higher-order modes and some time-domain features. However, frequency-domain features such as spectral bandwidth, the dominant frequency and the energy proportio in the mid- to- high frequency band still maintain good identifiability. The average class- center distances of frequency-domain features in the straight, L-shaped, and T-shaped structures are 1.415, 1.422, and 1.439, respectively, all higher than those of the corresponding values of 1.323, 1.336, and 1.343 for the time-domain features. These findings can provide a reference for analyzing the influence of propagation paths and selecting defect identifi-

收稿日期：2026-04-21； **修回日期：**2026-07-10
基金项目：国家电网有限公司科技项目(J2025072)。
Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(J2025072).

cation features in UHF partial discharge detection of GIS.

Key words: GIS; partial discharge; ultra - high frequency; measured current; electromagnetic mode; feature identifiability

0 引言

随着电力系统向高电压、大容量和紧凑化方向不断发展，气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear，GIS)因具有占地面积小、绝缘性能优良、运行可靠性高以及受外界环境影响小等优点，已广泛应用于输变电工程和城市电网建设中[1-4]。GIS设备内部通常采用SF_6气体或其混合气体作为主绝缘介质，其结构包含中心导体、金属壳体、盆式绝缘子、导体连接部位、开关触头以及腔体转角、分支等多种典型单元。在制造、运输、安装及长期运行过程中，受金属微粒污染、导体毛刺、绝缘气隙、固体绝缘表面劣化、部件接触不良等因素影响，GIS内部易形成局部电场畸变并诱发局部放电(partial discharge，PD)[5-10]。局部放电虽在初期能量较小，但其长期发展会加速绝缘劣化，甚至引发绝缘击穿和设备故障，严重威胁电力系统的安全稳定运行[11-14]。

特高频(ultra high frequency，UHF)检测法因具有抗干扰能力强、灵敏度高、适用于在线监测等优势，已成为GIS局部放电检测与缺陷诊断的重要方法[15-18]。局部放电本质上是一个快速电荷释放过程，其产生的陡峭脉冲电流会在GIS金属封闭腔体内激发宽频带电磁波，对于UHF检测而言，传感器接收到的信号并不是局部放电源的直接等效表征，而是局放电流源激发的电磁波经过GIS腔体传播、结构突变作用和模态转换后的结果[19]。鉴于此，国内外学者对UHF电磁波信号在GIS中的传播特性开展了大量研究。吴云杰、张宏亮等人[20]对局部放电电磁波在252 kV GIS直腔体和L形拐角结构中的传播特性进行了试验研究，得到了电磁波在直腔体内传播时会随距离增加而衰减，且频率越高衰减越明显的结论。Ahmad Darwish、Shady S. Refaat等人[21-24]利用COMSOL软件对GIS典型结构进行了仿真研究，验证了L形拐角、T形分支和绝缘子对横电磁(transverse electromagnetic，TEM)波影响较小，但会导致高次模波发生反射和衰减，开关断口会使TEM波明显衰减。Yugandhara Rao Yadam等人[25]研究了GIS内部局放源参数对电磁波特性的影响，证明了局放源波形上升时间主要影响信号时频特征，而局放源位置、方向和传播距离主要影响信号幅值。

但现有研究仍存在许多不足，现有GIS局部放电电磁传播仿真研究中，常采用理想高斯脉冲、双指数脉冲或其他参数化波形作为激励源[26]。此类波形通常具有光滑、规则、参数可控等特点，便于分析传播过程，却难以真实反映不同缺陷局部放电电流的非对称上升沿、振荡衰减尾部、多频带分布及随机变化特征。同时，GIS局部放电缺陷检测的关键问题不仅在于电磁波在GIS中的传播衰减特性，更在于不同缺陷局放电流激发出的电磁模态在传播后是否仍可辨识，这部分工作仍存在较大空白。对于UHF检测而言，传感器通常安装在距离放电源一定距离的位置，接收到的信号已经历腔体传播、结构突变、模态转换和多路径叠加等过程，局部放电缺陷检测不仅取决于放电源本身的初始特征，还取决于这些特征在GIS复杂结构传播后能否被保留，这种情况下基于接收信号进行缺陷识别的可靠性将受到影响。

基于上述问题，文中以金属尖端、气隙、沿面和悬浮电位4种GIS典型绝缘缺陷为研究对象，采用GHz射频级局部放电脉冲电流测量系统获取不同缺陷下的实测局放电流波形，并将其作为电磁仿真激励源。首先，将四类实测局放电流波形与理想高斯脉冲进行对比，明确真实局放电流源在波形形态、频谱分布上的差异；其次，基于XFDTD仿真软件建立典型GIS直筒、L形、T形结构模型，分析不同缺陷电流源激发下TEM波和高次模波的模态组成及传播衰减规律，并从传播后模态特征保留角度，讨论传播过程中局部放电电磁信号的特征可辨识性。

1 不同缺陷局放电流源波形提取

文中通过构建GHz射频级试验回路来实现交流电压下宽频带局部放电脉冲电流测量，获取不同缺陷下的实测局放电流波形，并将其作为电磁仿真激励源。

1.1 人工模拟典型缺陷

GIS在制造、安装及长期运行过程中，受金属颗粒、导体毛刺、绝缘气隙、表面污染、部件接触不良等因素影响，内部易形成电场畸变并诱发局部放电。文中选取金属尖端、绝缘气隙、沿面放电和悬浮电位4类GIS中常见且具有代表性的绝缘缺陷作为研究对象，通过图1所示人工缺陷模型用于复现4类实际缺陷的主导放电机制。

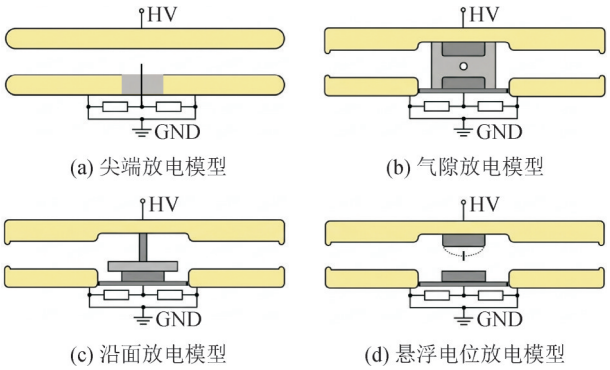


图1　GIS典型绝缘缺陷模型

Fig. 1　Typical insulation defect models in GIS

其中针板模型通过较小曲率半径形成局部强电场，对应导体毛刺和金属尖端的主要电场特征；预设气隙模型用于模拟固体绝缘内部或界面处气泡、裂纹引起的局部介质不连续；电极—绝缘材料组合模型用于形成切向电场和沿面放电通道；非接地金属电极则用于模拟接触不良或未可靠接地部件的电荷积累与间歇放电。高压黄铜板电极直径为135 mm、厚度为20 mm，并采用内径25 mm、外径135 mm、厚度20 mm的环形电极作为下板电极。该电极结构中，利用同轴环状电极与高压电极之间的几何电容作为耦合电容，这种方式一方面能够减小回路的时间常数，另一方面极大缩短回路中电荷传输路径，减少了由回路自感引起的波形振荡和损耗。利用50 Ω采样电阻串入试品支路，以50 V/A的灵敏度间接获取PD快速迁移电流信号。

1.2　试验平台

为采集实测PD电流脉冲作为局放电流源，文中采用GHz射频级局部放电脉冲电流测量系统获取GIS典型缺陷下的局部放电脉冲电流波形，试验平台见图2(a)。该系统主要由高压电源回路、GIS模拟试验腔体、电极缺陷模型、信号采集装置及进气系统组成。试验在0.5 MPa气体压力和外施电场的作用下实现SF_6气体中典型缺陷局部放电的模拟。

高压电源回路由380 V/50 Hz交流电源、调压器、升压变压器和耦合电容器构成，可输出0～100 kV可调电压，并将高压引入试验腔体。GIS模拟试验腔体采用金属密封结构，用于构建封闭式气体绝缘环境，模拟实际GIS设备内部电场分布和气体绝缘条件，结构及测量回路见图2(b)。腔体顶部通过聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene，PTFE)绝缘套管引入高压，侧面设置可开启窗口以更换缺陷模型，并预留接口用于真空抽气和SF_6气体充入。

局部放电脉冲电流采用脉冲电流法测量。电

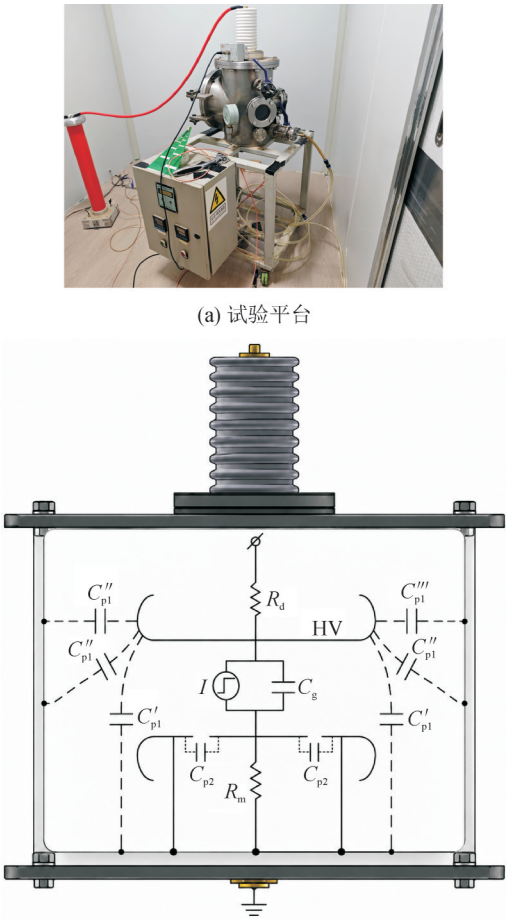


图2　局部放电脉冲电流测量系统

Fig. 2　Partial discharge pulse current measurement system

流采样部分选用WGR型精密无感电阻作为采样元件，将6只300 Ω电阻并联形成低感抗采样网络，并与放电模型下板电极串联接地，以降低寄生电感和高频脉冲测量畸变。采样电阻两端电压信号经GAU6-SMMSMM-050型低损耗射频同轴电缆传输至数字示波器，该电缆带宽达18 GHz，可有效保证局部放电瞬态脉冲波形的完整性和真实性。采用3 GHz带宽、最高采样率为10 GS/s的LeCory WavePro 7300A数字示波器存储快速脉冲电流信号。

1.3　不同缺陷局部放电电流源波形及频谱

为了构建出具有代表性的GIS典型缺陷局部放电脉冲电流波形，对采集到的波形利用小波分析进行处理。小波分析通过引入尺度伸缩与时间平移的小波基函数，兼顾高频与低频成分的不同分辨率需求，适合捕捉信号的局部变化。其定义为[27]

$$W_x(a,b)=\frac{1}{\sqrt{|a|}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式(1)中：$x(t)$为待分析的信号；$\psi(t)$为母小波，$\psi^*(t)$为其复共轭；a为尺度参数，当a较大时，小波

函数具有较低的中心频率，当 a 较小时，小波函数具有较高的中心频率；b 为平移参数，控制小波的位置。

对应的逆变换公式为[27]

$$x(t)=\frac{1}{C_\psi}\int_0^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}W_x(a,b)\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\frac{\mathrm{d}a\mathrm{d}b}{a^2} \quad (2)$$

C_ψ 是小波的归一化常数，其值满足[27]

$$C_\psi=\int_0^{+\infty}\frac{\left|\hat{\psi}(\omega)\right|^2}{|\omega|}\mathrm{d}\omega<\infty \quad (3)$$

文中母小波函数选取 Daubechies 8 正交小波。同一缺陷在固定工况下测得的数千组脉冲电流实验数据均进行小波分析，将其不同频带下的尺度参数进行归一化并取其均值，从而重构出对应缺陷下的具有代表性的局部放电脉冲电流波形，其波形及频谱见图3(a)-(d)。文[19]采用高斯脉冲来模拟实际的局部放电电流，所用的高斯脉冲波形及其频谱见图3(e)。

对比图3中GIS实测缺陷放电电流脉冲与理想高斯脉冲的波形及频谱可知，GIS局部放电所产生的信号脉冲在外观上与理想高斯脉冲具有一定相似性，但二者在具体波形特征上存在明显差异。同时，由于缺陷类型不同，放电脉冲在放电时间、脉冲宽度等方面也表现出较大差别。

高斯脉冲只能表征局部放电电流的宽带瞬态特征，无法反映真实缺陷放电中的非对称及随机频谱特征。真实局放电流激发的模态与缺陷特征密切耦合，传播后还会受到色散、反射和多模态叠加影响。单一高斯脉冲主要由幅值和脉冲宽度等少量参数决定，难以同时反映上述复杂波形结构及缺陷相关频谱信息。因此，理想高斯脉冲对于真实缺陷局放电流激发出的电磁模态在传播后是否仍可辨识的研究缺乏参考价值。

2 GIS典型结构仿真模型建立

利用XFDTD仿真软件进行研究，仿真模型采用某500 kV GIS尺寸的模型结构，外壳和中心导体为理想导体。内导体半径为0.11 m，外壳内半径为0.32 m，壳体厚度为1 cm。分别设置直筒型、L形、T形腔体作为基本模型进行分析与讨论，仿真模型见图4。边界设置为完全匹配层(perfectly matched layer，PML)，防止电磁波在边界处反射影响仿真计算结果。在距离腔体内壁5 mm处，以0.75 m固定间隔依次设置场点采集电场强度 E。

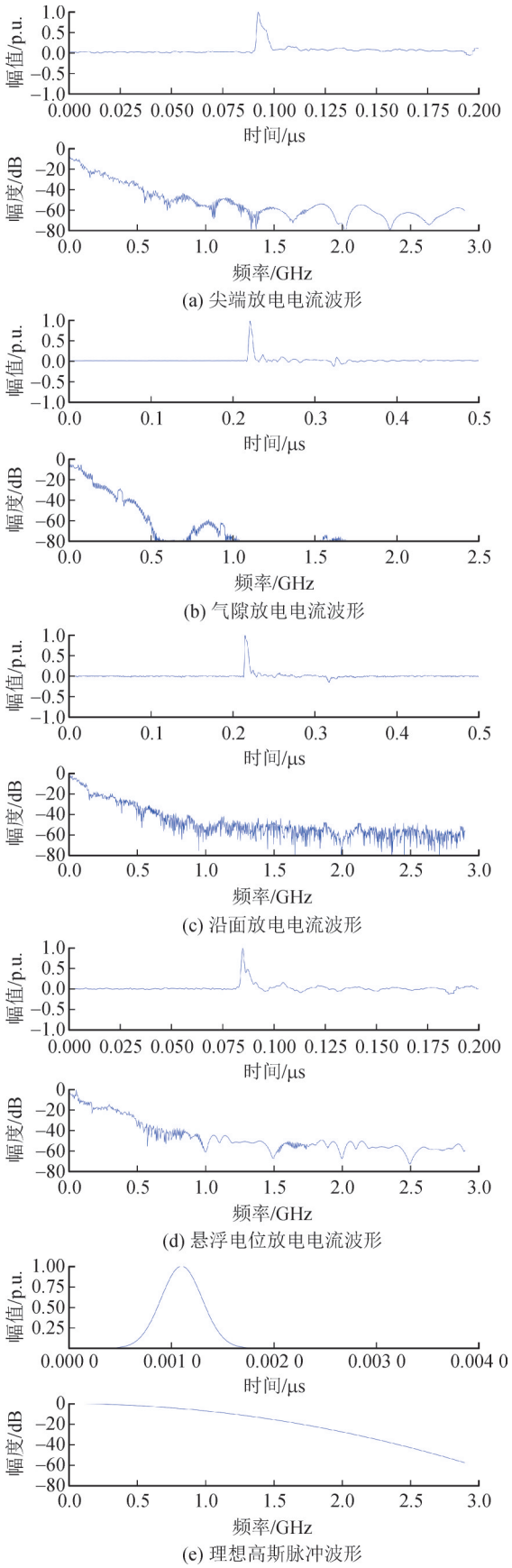


图3 不同缺陷局放电流波形及理想高斯脉冲波形

Fig. 3 Partial discharge current waveforms for different defects and an ideal Gaussian pulse waveform

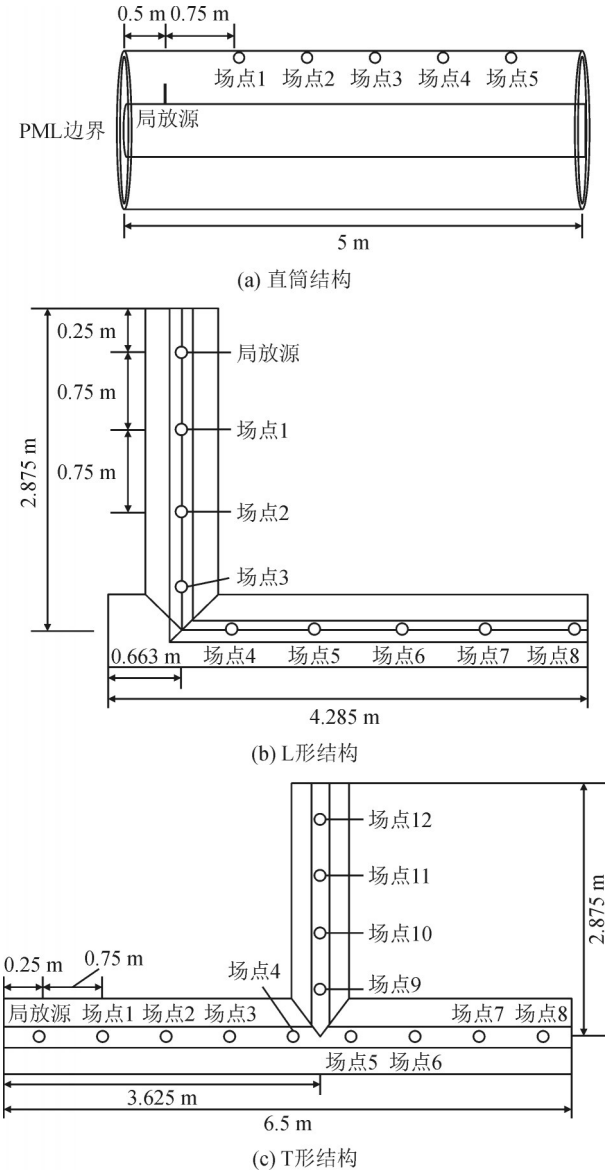


图4　GIS典型结构仿真模型

Fig. 4　Simulation model of a typical GIS architecture

为重点研究不同局放电流时间波形及频谱组成对电磁模态激发和传播特征的影响，文中在各GIS模型中采用相同的激励位置和馈入方式，并分别注入前文获得的4类典型缺陷统计代表性局放电流波形。

3　不同缺陷局放电流的电磁激发模态及传播后特征可辨识性分析

GIS设备的中心导体与金属外壳构成近似同轴圆柱体结构，因此其内部特高频电磁波传播可近似采用同轴波导模型进行描述。在同轴波导中，主要传播模态为横电磁(transverse electromagnetic，TEM)波，其电场和磁场均仅具有横向分量，不存在轴向分量，且无截止频率，能够在GIS腔体中稳定传播。

除TEM波外，GIS封闭金属腔体中的反射和多路径干涉还会激发高次模波，其中以横电波为主。TE波电场仅具有横向分量，可根据横截面电场强度峰值分布划分为TE_{11}、TE_{21}、TE_{31}等模态。与TEM波不同，高次模TE波只有当工作频率高于其截止频率时才能有效传播，其截止频率表达式为[28]

$$f_c=\frac{cm}{\pi(r_1+r_2)} \tag{4}$$

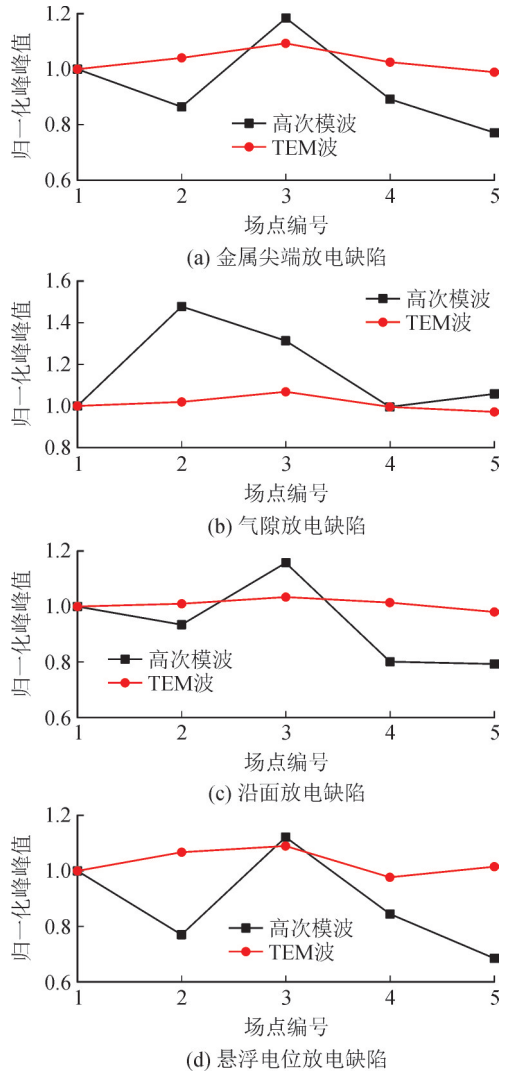
式(4)中：c为光速，取3×10^8 m/s；$m=1,2,3,\cdots$；r_1为中心导体的半径；r_2为外部壳体的半径。根据所构建的GIS模型尺寸，截止频率最低的高次模波TE_{11}的f_c为0.228 GHz。

对于文中研究而言，TEM波与高次模波的分解不仅用于描述GIS中局部放电电磁波的传播衰减规律，更用于分析不同形式电流激励源对电磁模态激发结果的影响，分别对各测点的电磁波信号进行滤波处理：采用截止频率为0.2 GHz的低通滤波，以提取TEM波成分；采用截止频率为0.26 GHz的高通滤波，以保留主要的高次模波成分。在此基础上，对滤波后不同模态信号峰峰值随传播过程的变化特性进行分析。

3.1　直筒型结构仿真结果分析

直筒型GIS腔体具有典型的同轴波导结构，中心导体与金属外壳沿轴向连续分布，传播路径中不存在明显的几何突变和阻抗不连续。因此，与L形拐角和T形分支结构相比，直筒结构中电磁波的反射、折射和模态转换作用相对较弱，更适合用于分析局放电流源本身对电磁模态激发及传播保持性的影响。

不同缺陷电流源激励下直筒结构中的传播结果见图5。对比图5可以看出4类实测局放电流源激发的TEM波均表现出较好的稳定传播特性，说明TEM波主要受GIS同轴主传播通道控制，对源波形差异的敏感性相对较弱。相比之下，高次模波在不同电流源激励下表现出更明显的变化差异。其中，金属尖端、悬浮电位和沿面缺陷下的高次模波随传播距离增加总体呈缓慢衰减，分别对应场点5衰减量为2.247 7、3.303 8、2.022 2 dB，悬浮电位放电缺陷下较金属尖端和沿面缺陷衰减更大，而气隙缺陷下高次模波在部分测点处出现阶段性增长。该现象并非表示传播过程中电磁能量增加，而是由于在GIS封闭腔体中，高次模波经过导体、壳体及结构突变处反射后形成多个传播路径，不同路径分量在测点处叠加。当路径差对应的相位差接近$2n\pi$时产生相长叠加，使局部场强峰值增加；当相位差接近$(2n+1)\pi$时产生相消干涉。



(a) 金属尖端放电缺陷

(b) 气隙放电缺陷

(c) 沿面放电缺陷

(d) 悬浮电位放电缺陷

图5 滤波后不同缺陷放电信号峰峰值的传播变化特性

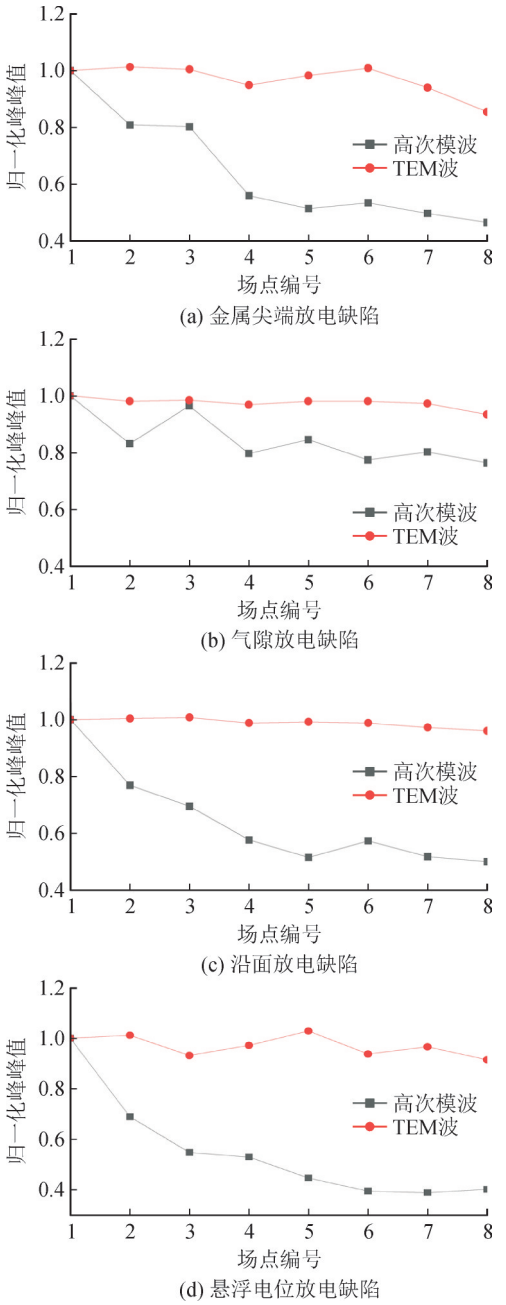
Fig. 5 Propagation characteristics of peak-to-peak values in discharge signals from different defects after filtering

可见，直筒结构中不存在明显结构突变，传播过程对源端特征的扰动较小。TEM波可作为稳定传播参考量，而高次模波虽然存在一定衰减，但其峰峰值变化趋势、局部波动及与TEM波的相对比例仍能保留部分源端特征信息。

3.2 L形结构仿真结果分析

与直筒型结构相比，L形GIS腔体在传播路径中存在明显转角，电磁波传播至拐角处时会受到几何突变和阻抗不连续的影响，产生反射、折射及模态转换。因此，L形结构不仅会影响局放电磁波的传播幅值，也会对不同模态成分产生选择性削弱作用，是分析局放信号传播后特征退化的重要结构。

4种缺陷电流源激励下的传播结果见图6。对比图6可知，4类实测局放电流源激发的TEM波在经过L形拐角后均基本保持稳定，说明TEM波主要受GIS同轴主传播通道控制，具有较强的结构适应性。



(a) 金属尖端放电缺陷

(b) 气隙放电缺陷

(c) 沿面放电缺陷

(d) 悬浮电位放电缺陷

图6 滤波后不同缺陷放电信号峰峰值的传播变化特性

Fig. 6 Propagation characteristics of peak-to-peak values in discharge signals from different defects after filtering

以场点1所测电场值峰值为基准，根据式(4)计算各探针处场强的衰减量[29]

$$A_i = \left| 20 \lg \frac{E_i}{E_1} \right| \tag{5}$$

式(5)中：A_i 为场点 i 的衰减量；E_i 为场点 i 所测电场值峰值；$i=2,3,4,\cdots$；E_1 为场点1所测电场值峰值。

L形拐角处不同缺陷下高次模波衰减量见表1，高次模波在拐角处均出现较大程度衰减，但不同电流源下衰减幅度存在差异。其中，悬浮电位缺陷衰减量最大，其高次模分量在经过L形拐角后损失最

为明显；金属尖端和沿面缺陷衰减量接近，二者激发的高次模在拐角结构中具有相似的传播退化特征；气隙缺陷下高次模波衰减相对较弱，说明实测气隙放电电流中的振荡成分和特定频带能量在拐角传播后仍能保留一定高次模响应。

表1　L形拐角处不同缺陷下高次模波衰减量

Table 1　At L-shaped corners: high-order mode attenuation under different defects

缺陷类型	场点3衰减量/dB	场点5衰减量/dB
金属尖端放电缺陷	1.912 4	5.778 6
气隙放电缺陷	0.329 2	1.462 6
沿面放电缺陷	3.165 9	5.776 8
悬浮电位缺陷	5.249 6	7.038 5

上述结果表明，L形结构对局放电磁波具有明显的模态选择性影响。TEM波传播稳定，可作为传播路径中的参考分量；高次模波虽然携带更多与真实局放电流时频特征相关的信息，但在L形拐角处更容易受到反射、模态转换和结构衰减的影响。因此，L形结构会削弱接收信号中的高次模特征，使传播后的缺陷相关信息出现一定退化。

3.3　T形结构仿真结果分析

与直筒型结构和L形结构相比，T形GIS腔体中存在明显的分支通道和传播路径突变。局部放电电流源激发的电磁波传播至T形分支处时，不仅会发生反射、折射和模态转换，还会在水平支路和垂直支路之间产生能量分配。因此，T形结构对局放电磁信号的影响更为复杂，是分析复杂GIS结构中传播后特征退化和可辨识性的重要工况。

4种缺陷电流源激励下的传播结果见图7。对比图7可知，4类实测局放电流源激发的TEM波在T形分支后均出现明显衰减，且水平支路和垂直支路中的变化趋势相近，基本呈现对称现象，T形分支处不同缺陷下TEM波衰减量见表2，各缺陷下场点5和场点9的衰减量差异较小，说明TEM波在水平支路和垂直支路中的传播变化基本一致，其衰减主要由T形分支的能量分配和阻抗突变决定，而受电流源类型影响相对较弱。相比之下，高次模波在不同电流源激励下表现出更明显的差异。4类电流源激发的高次模波均在分支处发生衰减，T形分支处不同缺陷下高次模波衰减量见表3，除气隙缺陷外，其余缺陷高次模波在T形分支处均发生较大衰减，且场点9处衰减量普遍大于场点5，说明垂直分支方向对高次模波具有更强的抑制作用。金属尖端和悬浮电位缺陷衰减量接近，二者激发的高次模在T形转角结构中具有相似的传播退化特征；沿面缺陷下衰减量相对较小；气隙缺陷下部分测点高次模波衰减最弱，说明实测气隙放电电流中的振荡成分和特定频带能量在复杂分支传播后仍能保留一定高次模响应。

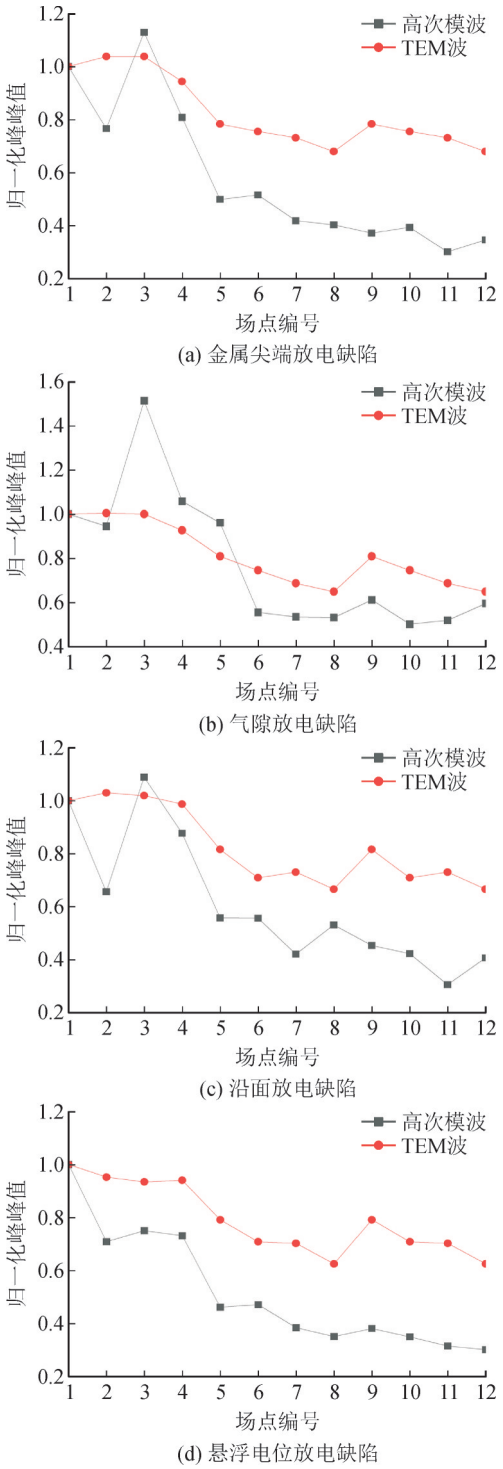


图7　滤波后不同缺陷放电信号峰峰值的传播变化特性

Fig. 7　Propagation characteristics of peak-to-peak values in discharge signals from different defects after filtering

上述结果表明，T形结构对局放电磁波具有显著的分支分配和模态选择性影响。一方面，T形分支会使TEM波和高次模波均发生幅值衰减，导致接

表2 T形分支处不同缺陷下TEM波衰减量

Table 2 TEM wave attenuation at T-shaped branches under different defects

缺陷类型	场点5衰减量/dB	场点9衰减量/dB
金属尖端放电缺陷	2.124 6	2.223 9
气隙放电缺陷	1.847 2	1.850 4
沿面放电缺陷	1.772 0	1.915 0
悬浮电位放电缺陷	2.029 1	2.073 7

表3 T形分支处不同缺陷下高次模波衰减量

Table 3 Attenuation of higher-order modes at T-shaped branches under different defect conditions

缺陷类型	场点5衰减量/dB	场点9衰减量/dB
金属尖端放电缺陷	6.049 7	8.628 9
气隙放电缺陷	0.349 5	4.274 3
沿面放电缺陷	5.091 3	6.900 9
悬浮电位放电缺陷	6.718 0	8.382 0

收信号整体能量降低；另一方面，高次模波对分支方向和结构突变更加敏感，其在垂直支路中的特征保持能力弱于水平支路。

3.4 传播后时频域特征可辨识性分析

为进一步验证局部放电信号经GIS结构传播后是否仍保留可用于缺陷识别的特征信息，文中在前述电磁模态传播分析的基础上，选取局部放电识别中常用的时频域特征，对不同结构和不同传播场点下的特征可辨识性进行定量评价。文中选取包括峰峰值、均方根值、能量、偏度、峭度、峰值因子、上升时间、半峰宽、主频、频谱中心、频谱带宽、谱熵、1～2 GHz频带能量占比、2～3 GHz频带能量占比、高频/低频能量比共15个特征。上述特征的选取主要基于局放脉冲形成机理、电磁传播特性及缺陷识别中的常用表征参数，所选特征能够覆盖局放信号的幅值强度、波形形态、时间尺度及频谱能量分布等不同层面的信息，同时，特征与局放源的电荷快速释放、脉冲上升过程、振荡衰减及GIS腔体中的模态激发具有较明确的物理联系，能够较全面地表征不同缺陷局放信号的时频域差异。为消除量纲影响，所有特征在计算前均进行标准化处理。

由于每类缺陷在同一结构和同一场点下的样本数量有限，文中不采用分类准确率或轮廓系数作为主要评价指标，而采用类中心距离评价传播后特征的可聚类区分能力。对全部特征进行标准化处理后，设第 i 类缺陷在特征空间中的中心 μ_i，缺陷类别数为 C，则类中心平均距离定义为

$$\bar{D}=\frac{2}{C(C-1)}\sum_{i=1}^{C-1}\sum_{j=i+1}^{C}\left\|\mu_i-\mu_j\right\|_2 \tag{6}$$

式(6)中，$\left\|\mu_i-\mu_j\right\|_2$ 为第 i 类与第 j 类缺陷中心之间的欧氏距离。经标准化后，较大 $\bar{D}$ 的表示不同缺陷在该特征上的类间分离程度较高。

特征在不同结构和不同场点下的类中心平均距离见图8、表4。由此可知，特征在传播后整体仍具有一定缺陷区分能力，但频域特征的可辨识性普遍优于时域特征。统计结果表明，直筒、L形、T形结构中，频域类特征的平均类中心距离分别为1.415、1.422、1.439，均高于对应时域类特征的1.323、1.336、1.343，说明幅值和能量类时域特征更易受传播衰减和结构突变影响，而频谱分布及频带能量占比对缺陷差异的保持能力更强。

从不同结构看，直筒结构中频谱带宽表现最稳定，平均类中心距离为1.481，场点间标准差仅为0.008；主频、2～3 GHz频带能量占比、频谱中心和1～2 GHz频带能量占比的平均类中心距离也均在1.41以上，说明无明显结构突变时，不同缺陷的频谱形态和中高频能量分布能够较好保留。L形结构中，频谱带宽仍具有最高区分能力，平均类中心距离为1.479，主频和1～2 GHz频带能量占比分别为1.451和1.446；同时，半峰宽的平均类中心距离达到1.435，表明拐角传播后部分波形形态特征仍具有一定辨识价值。T形结构中，可辨识性较强的特征主要集中在频带能量分布方面，2～3 GHz频带能量占比、1～2 GHz频带能量占比、高频/低频能量比、频谱中心、频谱带宽的平均类中心距离分别为1.467、1.462、1.446、1.441、1.435，说明复杂分支结构下高频能量占比及频谱位置特征仍能保留较明显的缺陷相关差异。

从电磁传播角度看，峰峰值、均方根值和绝对能量直接依赖信号整体幅值，当传播衰减引起信号整体缩放时，这些特征会发生明显变化。相比之下，主频、频谱中心和归一化频带能量占比主要反映频谱能量的相对位置和分配关系。当传播通道在主要有效频带内不存在极强的窄带选择性衰减时，信号整体幅值变化对频域特征的影响相对较小。综上，传播后仍具有较好特征可辨识性的指标主要集中在频谱带宽、主频、频谱中心以及中高频频带能量占比等频域特征，尤其在T形分支结构中，频带能量分布类特征比单纯幅值类特征更适合作为缺陷识别依据。

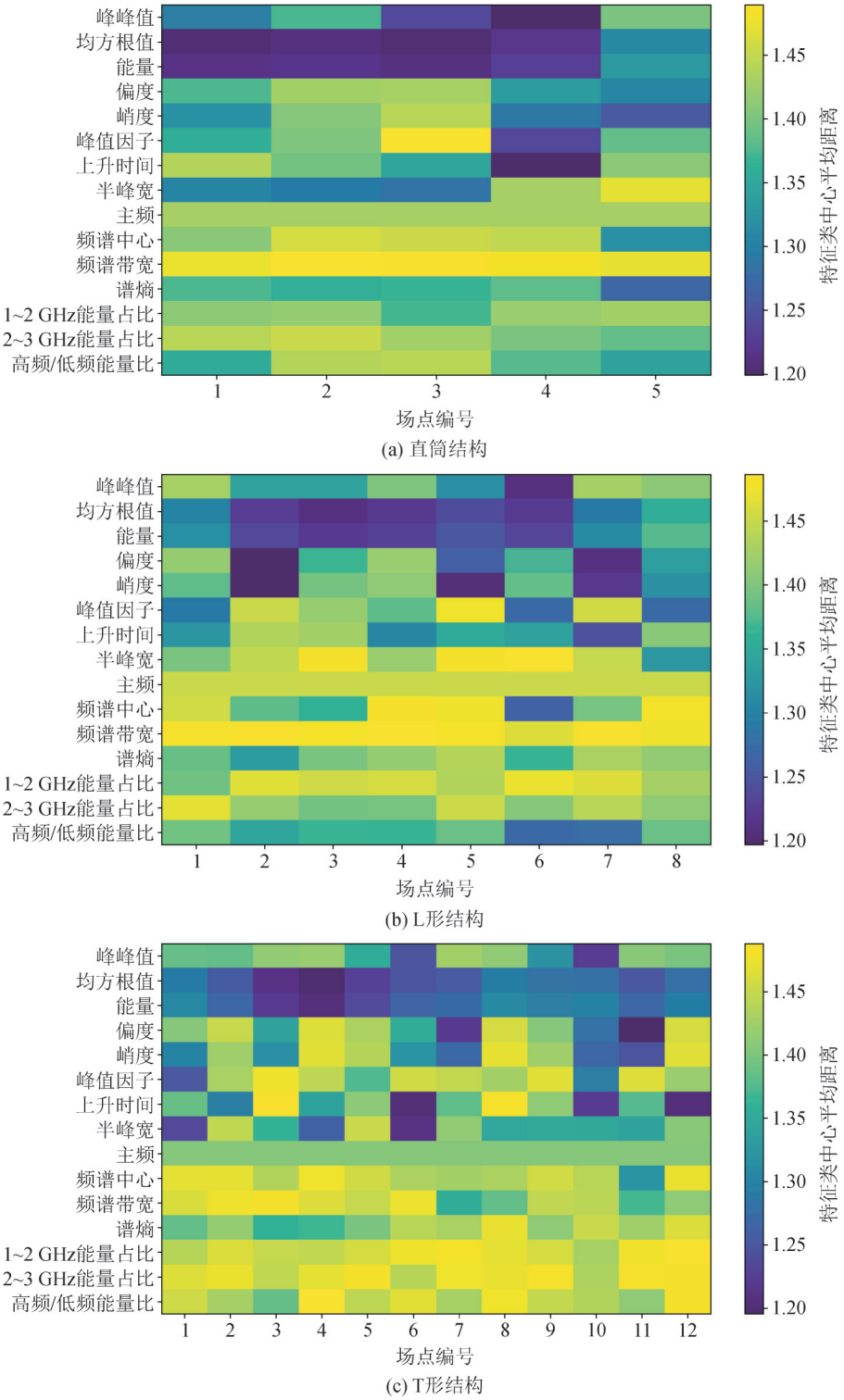


图8 不同GIS结构下特征传播后可辨识性热力图

Fig. 8 Heatmaps of feature identifiability after propagation under different GIS structures

4 结论

文中采用四类典型缺陷的实测局放电流统计波形作为激励源，而不是仅采用理想高斯脉冲或单一参数化脉冲；研究重点由单纯的传播衰减扩展到缺陷相关特征在传播后的保持能力。文中结果与已有研究关于TEM波传播相对稳定、高次模波对拐角和分支结构更加敏感的结论总体一致，并进一步表明，不同实测电流源所激发的高次模变化及中高频能量分布存在差异并能在传播过程中一定程度上保留，在该500 kV GIS典型尺寸下得到以下结论：

1)实测局放电流与理想高斯脉冲相比，在波形

表4 不同GIS结构下15项特征类中心距离的均值及标准差

Table 4 Mean and standard deviation of centroid distances for 15 features under different GIS structures

特征	直筒结构		L形结构		T形结构	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
峰峰值	1.302	0.086	1.359	0.074	1.366	0.068
均方根值	1.230	0.045	1.258	0.052	1.256	0.031
能量	1.241	0.051	1.272	0.056	1.270	0.034
偏度	1.375	0.056	1.321	0.088	1.372	0.096
峰度	1.343	0.079	1.313	0.092	1.367	0.088
峰值因子	1.375	0.091	1.376	0.087	1.413	0.071
上升时间	1.358	0.095	1.354	0.065	1.350	0.100
半峰宽	1.357	0.086	1.435	0.055	1.348	0.079
主频	1.430	0.000	1.451	0.000	1.405	0.000
频谱中心	1.418	0.060	1.411	0.077	1.441	0.042
频谱带宽	1.481	0.008	1.479	0.008	1.435	0.044
谱熵	1.351	0.045	1.397	0.036	1.418	0.036
1～2 GHz能量占比	1.411	0.022	1.446	0.027	1.462	0.018
2～3 GHz能量占比	1.422	0.028	1.423	0.027	1.467	0.018
高频/低频能量比	1.392	0.047	1.349	0.049	1.446	0.030

非对称性、振荡尾部和频谱分布方面存在明显差异，能够更真实地反映不同缺陷局放源对GIS电磁模态激发的影响。

2)直筒结构中TEM波传播较稳定，高次模波对电流源时频特征更敏感，可保留部分缺陷相关信息；气隙缺陷在部分测点出现高次模局部增强，说明其振荡成分和特定频带能量具有一定传播保持性。L形拐角和T型分支均会削弱高次模波，其中L形结构主要表现为拐角处高次模衰减，T形结构则同时受到分支能量分配和传播方向影响，T形结构中高次模在垂直支路衰减更明显，表明复杂结构会加剧局放特征退化。

3)时频域特征在传播后仍具有一定缺陷区分能力。频谱带宽、主频、频谱中心及中高频能量占比等频域特征的类中心距离整体高于时域幅值类特征，说明频域特征更适合作为传播后缺陷识别依据。

4)综合来看，TEM波可作为传播路径影响的稳定参考，高次模波和频域特征可反映实测局放电流源的差异。文中结果表明，不同缺陷局放信号经GIS典型结构传播后仍保留一定可辨识信息，可为GIS局放UHF检测、传感器布置及缺陷识别特征选择提供一定参考。

参考文献：

[1] Cao Chen, Wang Jialin, Wang Qingli, et al. Monitoring method for GIS electrical contact state based on VMD - Hilbert marginal spectrum energy entropy[J]. IEEE Access, 2025(13): 48096-48105.

[2] Mier E C, Khamlichi A, Dalstein M, et al. Methods for partial discharge calibration in gas-insulated substations for HVDC power grids and charge evaluation uncertainty[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(19): 23486-23493.

[3] Chang Yanan, Liu Zhipeng, Li Qingmin, et al. Capture mechanism and optimal design of micro-particle traps in HVAC/HVDC gas insulated equipment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 4700-4710.

[4] 何 龙，朱咏明，马金财.基于改进峭度图和GoogLeNet的GIS内置互感器铁磁谐振辨识[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(6)：50-58.
He Long, Zhu Yongming, Ma Jincai.Ferromagnetic resonance identification of built-in instrument transformer for GIS based on improved kurtosis graph and GoogLeNet[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6): 50-58.

[5] 曹 森，张赛鹏，朴虎万，等.GIS故障缺陷运行统计及分析[J].中国设备工程，2024(23)：266-267.
Cao Sen, Zhang Saipeng, Piao Huwan, et al. Operational statistics and analysis of GIS faults and defects[J]. China Plant Engineering, 2024(23): 266-267.

[6] 李向东，唐炳南，杨文呈，等.基于PCA-IPSO-SVM的GIS局部放电故障智能诊断算法[J]. 电网与清洁能源，2025，41(11)：44-54.
Li Xiangdong, Tang Bingnan, Yang Wencheng, et al. An intelligent GIS partial discharge fault diagnosis algorithm based on PCA-IPSO-SVM[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(11): 44-54.

[7] 吴 杰.基于改进小波变换和随机森林的GIS局部放电故障识别系统[J]. 电子设计工程，2025，33(13)：138-143.
Wu Jie.GIS partial discharge fault identification system based on improved wavelet transform and random forest[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(13): 138-143.

[8] 贾文达，曹志伟，王继豪，等. GIS操作电磁骚扰的三维全波仿真及电弧模型影响分析[J]. 电力工程技术，2025，44(6)：134-142.
Jia Wenda, Cao Zhiwei, Wang Jihao, et al. Effect of the arc model on electromagnetic interference caused by GIS switch operations in 3D full wave simulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 134-142.

[9] 张书琴，张克选，骆常璐，等. GIS外壳绝缘隔断处的过电压分析与控制措施研究[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(11)：181-187.
Zhang Shuqin, Zhang Kexuan, Luo Changlu, et al. Analysis of overvoltage and control measures at the insulation partition of GIS enclosures[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(11): 181-187.

[10] 岳 嵩，朱 勇，何龙寿，等.基于改进动态电弧模型的GIS快速暂态过电压特性研究[J]. 智慧电力，2025，53(8)：114-120.
Yue Song, Zhu Yong, He Longshou, et al.Research on characteristics of very fast transient overvoltage in GIS based on an improved dynamic arc model[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 114-120.

[11] Sun Wei, Ma Hongzhong, Wang Sihan. A novel fault diagnosis of GIS partial discharge based on improved whale optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2024(12): 3315-3327.

[12] 淡淑恒，乔顺利.1 000 kV GIS中特快速暂态过电压的仿真与分析[J]. 电力科学与技术学报，2025，40(6)：233-240.
Dan Shuheng, Qiao Shunli. Simulation and analysis of very fast

transient overvoltage in 1 000 kV GIS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2025，40(6)：233-240.

[13] 王　宁，黄新波，朱永灿，等.基于MA-DBN算法的GIS故障预测[J]. 西安工程大学学报，2020，34(5)：27-33.
Wang Ning，Huang Xinbo，Zhu Yongcan，et al.GIS fault prediction based on MA - DBN algorithm[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University，2020，34(5)：27-33.

[14] 李　阳，唐志国.恒压下GIS环氧树脂绝缘子沿面放电发展全过程状态特征研究与诊断[J]. 电瓷避雷器，2024(3)：123-130.
Li Yang，Tang Zhiguo.Research and diagnosis of state characteristics in the whole process of creeping discharge development of gis epoxy resin insulating parts under constant voltage[J]. Insulators and Surge Arresters，2024(3)：123-130.

[15] 王路伽，房春旭，杨海涛，等. 基于S11和S21互比对的GIS局部放电特高频传感器校验仿真[J]. 电力工程技术，2026，45(3)：28-36.
Wang Lujia，Fang Chunxu，Yang Haitao，et al. Simulation of GIS partial discharge UHF sensor verification based on S11 and S21 cross - comparison[J]. Electric Power Engineering Technology，2026，45(3)：28-36.

[16] 王昊天，王宇昂，颜　林，等.GIS暂态电压局部放电融合检测技术及其应用[J]. 电工技术学报，2025，40(19)：6306-6316.
Wang Haotian，Wang Yuang，Yan Lin，et al.GIS transient voltage-partial discharge composite detection and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2025，40(19)：6306-6316.

[17] 唐　炬，张晓星，曾福平. 组合电器设备局部放电特高频检测与故障诊断[M]. 北京：科学出版社，2016.
Tang Ju，Zhang Xiaoxing，Zeng Fuping. Ultra - high - frequency detection of partial discharges and fault diagnosis in switchgear[M]. Beijing：Science Press，2016.

[18] 张国治，田晗绿，张　磊，等.具备局部放电超声波感知功能的PZT基特高频传感技术[J]. 电工技术学报，2024，39(19)：6215-6227.
Zhang Guozhi，Tian Hanlü，Zhang Lei，et al. Research on PZT-based ultrasonic-ultra high frequency composite partial discharge sensing technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(19)：6215-6227.

[19] 周灵亮. GIS内部局部放电电磁波的激发与传播特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2023.
Zhou Lingliang.A study on the excitation and propagation characteristics of partial discharge electromagnetic waves in GIS [D]. Chongqing：Chongqing University，2023.

[20] 吴云杰，张宏亮，吴军辉，等. 252 kV GIS局部放电特高频信号在直线和L型结构中传播特性的试验研究[J]. 高压电器，2022，58(7)：223-228.
Wu Yunjie，Zhang Hongliang，Wu Junhui，et al. Experimental research on propagation characteristics of 252 kV GIS partial discharge UHF signal in straight line and L-shaped structure[J]. High Voltage Apparatus，2022，58(7)：223-228.

[21] Darwish A，Refaat S S，Abu-rub H，et al. Partial discharge signal propagation in three-phase gas-insulated switchgear：CIGRE recommendations-based analysis[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE)，2020：5091-5097.

[22] Darwish A，Refaat S S，Abu-rub H，et al. PD signal propagation in GIS：ultra - high frequency detection - based modeling[J]. IEEE Sensors Journal，2020，20(16)：9417-9426.

[23] Darwish A，Refaat S S，Abu - rub H，et al. Partial discharge signal propagation in T - structured GIS[C]//2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP)，2019：632-636.

[24] Darwish A，Coapes G，Refaat S S，et al. PD signal attenuation in 550 - kV GIS：impact of different barriers on the propagation of electromagnetic waves[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2021(70)：1-13.

[25] Yadam Y R，Sarathi R，Arunachalam K. Numerical and experimental investigations on influence of internal defect parameters on partial discharge induced UHF signals in gas insulated switchgear[J]. IEEE Access，2022(10)：110785-110795.

[26] 杨　涛，李秀卫，赵斌财，等. GIS内特高频局放信号传播特性研究[J]. 山东工业技术，2018(4)：147.
Yang Tao，Li Xiuwei，Zhao Bincai，et al. Study on the propagation characteristics of high-frequency partial discharge signals in GIS [J]. Journal of Shandong Industrial Technology，2018(4)：147.

[27] Mallat S.A wavelet tour of signal processing：the sparse way[M]. 3rd ed. Burlington：Academic Press，2008.

[28] Pozar D M. Microwave engineering[M]. 4th ed. Hoboken：John Wiley & Sons，2011.

[29] Collin R E.Foundations for microwave engineering[M]. 2nd ed. New York：IEEE，2001：944.

尹　泽(1993—)，男，博士，高级工程师，主要研究方向为电力设备绝缘诊断、高电压试验技术等(通信作者)(E-mail：ll1929566118@163.com)。