第 49 卷 第 2 期：565-576 高电压技术 Vol.49, No.2: 565-576
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221785

低气压方波电压下多电飞机电机绝缘局部放电研究

孙 浩[1,2]，王亚林[1,2]，范 路[1,2]，丁 毅[1,2]，朱昕阳[1,2]，尹 毅[1,2]
（1. 上海交通大学电气工程系，上海 200240;
2. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海 200240）

摘 要：随着宽禁带电力电子器件与电机技术的发展，推进电机的比功率密度与容量大大提高，能够更好的满足多电飞机推进的需求，但极端环境条件(低气压、高温)与具有高 d*U*/d*t*(快速上升、下降时间)的高频方波电应力更加容易引发局部放电(partial discharge，PD)，加速电机绕组绝缘材料的老化，导致电机系统失效。局部放电检测是衡量绝缘可靠性的重要手段，但与正弦电压下局部放电检测方法不同，具有高 d*U*/d*t* 的方波电压在上升沿和下降沿会引发强烈电磁干扰，极大地影响局部放电检测。为了解决此问题并研究低气压下多电飞机电机绝缘局放特性，提出基于特高频下混频技术和硅光电倍增技术的多电飞机推进电机绝缘局部放电联合检测方法，有效解决了高 d*U*/d*t* 方波下的电磁干扰问题。针对飞机实际运行工况，利用所提出的检测方法测量了不同气压下(低至 20 kPa)，施加方波电压时电机绝缘试样的局部放电特性，并与施加正弦电压的情况进行对比。分析了电机绝缘气–固复合绝缘的界面电荷弛豫过程，发现重复方波电压下界面弛豫电荷与局放残余电荷对瞬态电场的存在拮抗作用。提出了不同气压高 d*U*/d*t* 方波下局部放电起始电压的改进 Paschen 公式，并分析了低气压对快速方波下电机绝缘局放特性的影响规律，为多电飞机推进电机绝缘性能评估和优化设计提供参考。

关键词：局部放电；多电飞机；特高频；下混频；硅光电倍增

Research on Partial Discharge of More Electric Aircraft Propulsion Motor Insulation Under Low Pressure and Square Wave Voltage

SUN Hao[1,2], WANG Yalin[1,2], FAN Lu[1,2], DING Yi[1,2], ZHU Xinyang[1,2], YIN Yi[1,2]
(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract：Due to the development of wide-bandgap power electronic devices and motor technology, the specific power density and capacity of electric aircraft motors have been greatly improved, which can better satisfy the needs of more electric aircraft propulsion. However, extreme environmental conditions (low pressure, high temperature) and high-frequency square wave electrical stress with high d*U*/d*t* (fast rising/falling time) are more easily to cause partial discharge, which may accelerate the aging of insulating materials and lead to failure. PD detection is an important approach to evaluate the insulation reliability, whereas, unlike the PD detection under sinusoidal voltage, the square wave voltage source with fast rise time can cause strong electromagnetic interference, which greatly interferes with PD detection. In order to solve this problem, this paper introduces a combined detection method for partial discharge of more electric aircraft propulsion motor insulation based on UHF down-mixing method and silicon photomultiplier photoelectric method, which has strong anti-electromagnetic interference ability. To test the actual operating conditions of the aircraft, the proposed method is used to measure the partial discharge of the motor insulation sample when a square wave voltage is applied under different air pressures (down to 20 kPa). The interfacial charge relaxation process of solid-gas composite insulation of motor insulation is analyzed, and the antagonistic effect of interfacial relaxation charge and local residual charge on transient electric field under repeated square wave voltage is proposed. The improved Paschen formula of partial discharge initial voltage under fast square wave with different air pressure is obtained, and the influence law of low air pressure on local discharge characteristics under fast square wave is analyzed, which provides reference for insulation performance evaluation and optimization design of propulsion motor for more electric aircraft.

Key words：partial discharge; more electric aircraft; ultra-high frequency ;down-mixing; silicon photomultiplier

基金资助项目：国家自然科学基金(52007114)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52007114).

0 引言

多电飞机(more electric aircraft，MEA)使用的电推进系统相比传统飞机的推进系统更轻、更简单和更环保[1-2]。多电飞机系统所需容量日益增大，从开始的千瓦量级发展到兆瓦量级，未来有进一步提升的趋势[2]。提高系统容量可以通过提升电流或电压来实现，而提升电流需要采用更粗的输电电缆、增加飞机总重量、降低系统效率，因此多采用提升电压的方式来提高系统容量。美国宇航局未来有计划采用 6 kV 作为飞机的供电电压，因此推进电机在高电压下的可靠性至关重要[3]。多电飞机推进电机由 SiC 器件产生的高频脉宽调制(pulse width modulation，PWM)电压驱动，SiC 器件产生的 PWM 电压具有快速的上升下降沿，容易导致电机端部出现高于直流侧电压的过电压以及绕组上电压分布不均[4-6]，使得绝缘材料承受的电场强度增大。当加在绝缘材料上的场强超过局部放电起始放电场强后，将极易引发局部放电(partial discharge, PD)，PD 会加快绝缘老化甚至导致绝缘失效。此外飞机运行时还会面临低气压和极端温度等恶劣环境，这些都会加快绝缘老化，降低绝缘性能[7-8]。

目前电机绝缘测试标准 IEC 60034-18-41 使用正弦或者脉冲电压对低压散绕电机绝缘进行局部放电评估，并要求电机绝缘系统的放电起始电压(partial discharge inception voltage，PDIV)与重复放电起始电压(repetitive partial discharge inception voltage，RPDIV)高于电机额定运行电压，以保证绝缘系统在其工作寿命内的可靠性[9]，但该标准并没有考虑气压、温度和湿度等环境因素对绝缘性能的影响。电机绝缘在方波电压的上升和下降沿处极容易发生局部放电[10]，但是高 dU/dt 方波电压在上升下降沿产生的电磁干扰(electromagnetic interference，EMI)信号会与局部放电信号发生重叠[11]。此外方波电压通过对地耦合电容所引起共模电流也会干扰局部放电测量，脉冲电流法等常规局部放电检测方法已经不再适用，亟需研究适合快速方波电压下局部放电检测方法。有研究者采用 1~500 MHz 高频电流传感器(high frequency current transformer，HFCT)来检测局部放电，但其测量频带上限只有数百兆赫兹，EMI 信号和放电电流脉冲在时域上仍存在一定的重叠[12]。有学者利用天线采集到的特高频(ultra-high frequency，UHF)信号以及 350 MHz 的高通滤波器来检测局部放电，该方法在一定程度上能够抑制 EMI 信号[13]，但局部放电信号的强度也因此减弱，对信号采集系统的采样频率和带宽要求也更高。国外学者用光电倍增管(photo-multiplier tube，PMT)检测放电产生的光信号，抗干扰能力很强，但是 PMT 需要辅助电路提供较高的供电电压(0.5~2 kV)[14]。有学者发现随着气压的降低，UHF 测量到的 PD 信号的频带与幅值均有所降低，这极不利于快速重复脉冲下的 PD 检测[15]。目前尚无针对电动飞机推进电机绝缘在低气压方波电压下的局部放电研究报道，对电动飞机在低气压下的运行的可靠性也缺乏系统深入的研究。

为此本文提出基于 UHF 下混频(down-mixing)和硅光电倍增(silicon photomultiplier，SiPM)联合的局部放电光–电联合检测方法，以解决高 dU/dt 方波电压下 EMI 信号对局部放电的影响；考虑飞机实际运行条件下的压强状况，测量了 20~100 kPa 施加快速方波电压下双绞线试样的局部放电特性，并与正弦电压情况进行了对比；探究了界面弛豫和局放残余电荷对电机双绞线绝缘电场动态分布的拮抗作用，并分析了气压对方波局部放电特性的影响规律。

1 基于下混频与硅光电倍增的快速方波电压下局部放电检测方法

为了抑制高 dU/dt 高频方波电压产生 EMI 对局放测量的干扰[16]，本文提出对天线采集的 UHF 信号使用下混频的信号处理方式，在提高了信号信噪比的同时，也降低了对采集设备采样率和带宽的要求。另一方面，针对局部放电过程中伴随着光电离等发光现象，提出基于 SiPM 的光学局部放电检测方法，与基于 UHF 的下混频方法结合，具有抗 EMI 能力强、可靠性高的特点。

1.1 基于 UHF 下混频的局部放电检测法

1.1.1 下混频原理

下混频是指将 2 组不同频率的信号相乘后经过选频电路得到目标差频信号的过程，如图 1 所示，在信号处理中通常用下混频的方法实现降频。以 ω_C 为中心频率的原始信号 u_C 和本振信号 u_L 经过乘法器后得到和频以及差频信号，其基本运算过程如式(1)—式(3)所示：

$$u_C = U_C \cos(\omega_C t + \varphi_C) \tag{1}$$

$$u_L = U_L \cos(\omega_L t + \varphi_L) \tag{2}$$

$$u_{\mathrm{I}}=u_{\mathrm{L}}u_{\mathrm{C}}=U_{\mathrm{C}}U_{\mathrm{L}}(\cos\omega_{\mathrm{C}}t\cos\omega_{\mathrm{L}}t)=\frac{1}{2}U_{\mathrm{C}}U_{\mathrm{L}}\left(\cos(\omega_{\mathrm{C}}+\omega_{\mathrm{L}})t+\varphi_{\mathrm{C}}+\varphi_{\mathrm{L}}\right)+\frac{1}{2}U_{\mathrm{C}}U_{\mathrm{L}}\left(\cos(\omega_{\mathrm{C}}-\omega_{\mathrm{L}})t+\varphi_{\mathrm{C}}-\varphi_{\mathrm{L}}\right)\tag{3}$$

式中：u_{C}、u_{L} 分别为原始局部放电信号(假设以 ω_{C} 为中心频率)和本振信号的角频率；U_{C}、U_{L}、φ_{C}、和 φ_{L} 分别为局部放电信号和本振信号的幅值和相位；u_{I} 为混频后信号。可以看出混频后产生频率为 $|\omega_{\mathrm{C}}-\omega_{\mathrm{L}}|$ 的差频信号与频率为 $|\omega_{\mathrm{C}}+\omega_{\mathrm{L}}|$ 的和频信号，通过低通滤波器滤除和频信号而保留差频信号，如此便将频率较高的原始信号 u_{C} 搬移至频率较低的频段。需要指出的是，局放信号的频带十分宽广(在千赫兹至吉赫兹范围内)，目前局放检测的所用方法均是针对部分频段分析，采用下混频方法对干扰较小的部分进行处理分析是一样可行的。

1.1.2　基于 UHF 下混频的局部放电检测设置

本文采用下混频方法对天线采集到的 UHF 信号进行降频处理，如图 2 所示。先将 UHF 信号经过高通滤波器滤除噪声干扰，再与本振信号进行混频，本振信号的频率选取局放信号与 EMI 信号频谱显著差异部分的中心频率，通过低通滤波器得到差频信号，在保留原始信号基本特征的同时，将信号频带降至低频区域，方便信号采集并提高信噪比。

本文搭建的下混频硬件系统由双脊喇叭天线、本振信号源、混频器、直流电源、高频/中频放大器和高/低通滤波器构成。本振信号源使用集成的电压控制振荡器，可输出 0.2~4.4 GHz 范围的正弦信号。高频放大器带宽为 0.6~3 GHz，用来放大原始信号；中频放大器带宽为 0.1~1000 MHz，用来放大混频后信号。高通滤波器截止频率为 600 MHz，用来抑制原始信号中 EMI 干扰；低通滤波器截止频率为 400 MHz，用来滤除和频信号同时抑制放大器噪声。

1.2　基于 SiPM 的局部放电光传感方法

局部放电期间发生的正、负载流子的电离、激发和复合过程均伴随有光子的辐射。利用光传感器从光学的角度检测局部放电能避开方波源产生的电磁干扰。SiPM 是由数百上千个单光子雪崩二极管构成，如图 3 左侧所示。相比于需要数百伏偏置电压的 PMT，SiPM 仅仅需要数十伏偏置电压，有着响应速度快、使用方便、增益高以及抗干扰能力强等优点[17-18]，能够有效地检测 200~900 nm 波长范围内的微弱光信号，适合局部放电检测。在加上反向偏置电压后，SiPM 将处于待激发状态，工作在“盖革”模式。在该模式下，一旦有光子接触到 SiPM 表面，光子会引发载流子快速碰撞，导致自持电荷雪崩，进而产生脉冲光电流信号；每个单光子雪崩二极管的阳极串联淬灭电阻，光电流快速上升时淬灭电阻上的电压也同步上升，以抵消反向偏置电压，使得 SiPM 能够自发返回待激发状态，以便能够响应下一次光脉冲信号。SiPM 阳极串接电阻将电流转换成电压，输出端口接电容隔直，并通过 LC 低通滤波器滤除电路共模电流干扰，如图 3 右侧所示。

1.3　测量方法验证与标定

1.3.1　局部放电检测平台

根据电机绝缘试样的测试标准 IEC 60317[19]，实验中试样采用直径 1 mm、聚酰亚胺绝缘层厚 50 μm 的双绞线来模拟电机绕组绝缘，并使用绕线器

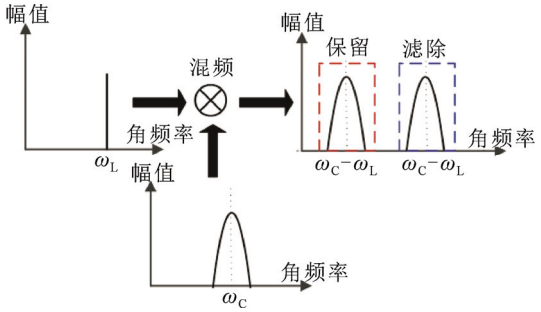


图 1　下混频原理示意图

Fig.1　Diagram of down-mixing principle

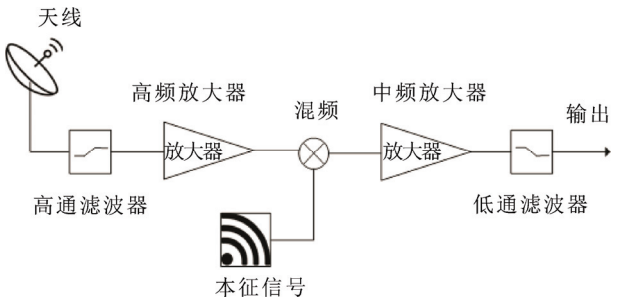


图 2　基于下混频的局部放电检测方法

Fig.2　PD detection method based on down-mixing

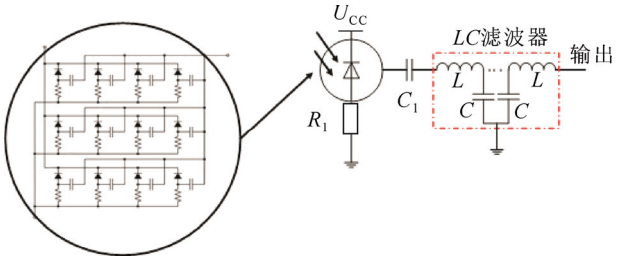


图 3　SiPM 结构及其调理电路

Fig.3　Structure and circuit of SiPM

在 12 cm 的长度上均匀扭出 12 个节。

多电飞机电机绝缘局部放电检测系统如图 4 所示，系统由自主搭建的高压方波电源、气压–温度可控实验腔体和上述 2 种局放检测装置组成。自研的高压方波电源由开关管 Q_1 和 Q_2 组成，其允许的最大连续开关频率为 20 kHz，最大输出电压为 15 kV，最短上升时间可达 40 ns，可生成 100 V/ns 的高 dU/dt 方波电压。本文中对试样施加的方波电压上升时间均为 125 ns 左右，符合电机绝缘检测标准[9]。真空控温腔体可将内部温度控制在 20~250 ℃，腔体内部气压在 1~100 kPa 范围内可控，腔体内部不透光，前部留有 2 个石英玻璃窗口并将 SiPM 光传感器和绝缘试样对准窗口分别安装在腔体内外两侧。由于 SiPM 传感器对温度较为敏感，在腔体与 SiPM 传感器之间添加隔热板，腔体内部温度从 20 ℃上升到 200 ℃，隔热板外侧温度会上升 2 ℃左右，对 SiPM 传感器影响较小。基于 UHF 下混频的局部放电检测系统放置在腔体外部固定位置，距试样约为 15 cm，避免位置对检测信号的影响。

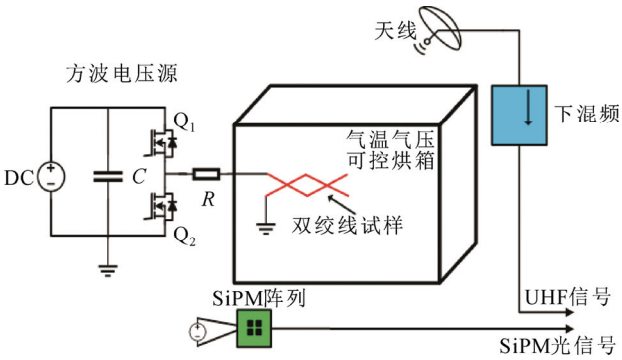


图 4 多电飞机电机绝缘局部放电检测系统

Fig.4 Partial discharge detection system of electric machine insulation for more electric aircraft

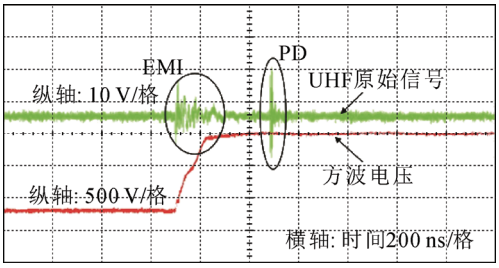


图 5 UHF 原始信号(包含 EMI 干扰和局放信号)

Fig.5 UHF original signal (including EMI interference and partial discharge signal)

1.3.2 测量方法验证

下文将通过比较 UHF 检测信号、UHF 加滤波器检测信号、UHF 下混频信号以及 SiPM 检测信号验证 2 种局部放电检测方法的有效性。

1）UHF 下混频法验证实验

UHF 天线采集的原始信号包含 EMI 信号与局部放电信号，如图 5 所示，此时局放信号与电磁干扰幅值相当，大约为 20 mV，检测的局部放电信号信噪比较差。为了选取合适的截止频率来抑制 EMI 信号，对包含局部放电和 EMI 的信号与仅包含 EMI 的信号进行频谱分析，结果如图 6 所示，可以看出 EMI 信号多集中于中低频部分，当频率>600 MHz 后，局部放电信号幅值明显高于 EMI 信号幅值，为了尽量保留局部放电信号，本文选择使用 600 MHz 的高通滤波器对 UHF 信号进行去噪。另外，根据频谱分析结果，局部放电信号与 EMI 信号的频谱差异部分集中在 0.6~1.2 GHz 频率范围，因此本文选取 0.9 GHz 作为下混频本振信号频率，低通滤波截止频率(中频频带)为 400 MHz。

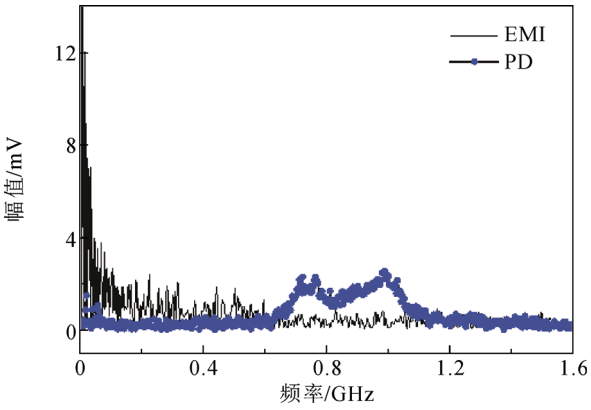


图 6 EMI 干扰信号和局放信号频谱

Fig.6 Spectrum of EMI interference and partial discharge signal

仅经过高通滤波器处理后的 UHF 信号与经过下混频处理后的信号对比如图 7 所示，经过高通滤波器滤波后，仍存在残余的 EMI 信号，而经过下混频处理后的局部放电信号信噪比由 12.89 dB 提高到 23.65 dB(电路其余参数相同)，并且两者出现位置可以相互对应，验证了下混频方法的有效性。

2）SiPM 检测方法验证实验

为了增强 SiPM 光传感器对局放所产生光子的感应灵敏度，实验中将 8 个 SiPM 阵列输出并联作为光传感器的总输出，偏置电压设置为 29 V。SiPM 光传感器信号的响应时间为百纳秒数量级，这与光传感检测电路的 *RC* 参数有关。SiPM 光传感器信号

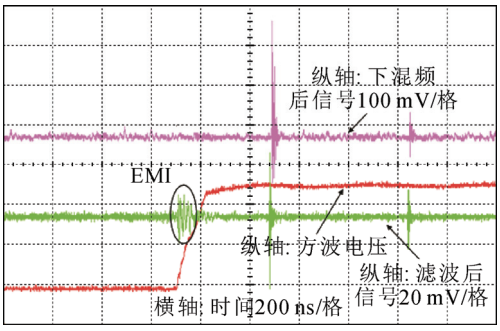


图 7　UHF 滤波后信号与下混频后信号

Fig.7　Filtered UHF signal and down-mixed signal

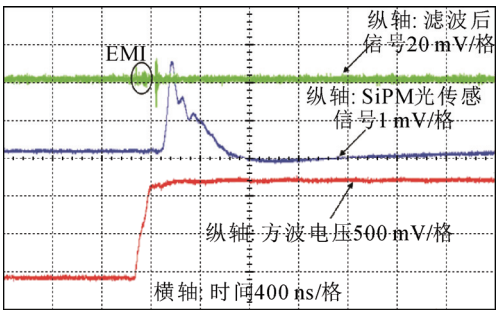


图 8　UHF 滤波信号与 SiPM 光传感信号

Fig.8　Filtered UHF signal and SiPM light sensor signal

与滤波后的 UHF 信号对比如图 8 所示，SiPM 光传感器信号与 UHF 信号出现时间相仿，能够相互对应，并且 SiPM 光传感器信号的信噪比显著强于 UHF 滤波后信号，能够有效地抑制 EMI，验证了 SiPM 光传感器的有效性。

1.3.3　局部放电量的标定

有研究表明在不同气压下，局部放电产生的电磁信号频谱存在差异[20]，并且不同气压下放电产生的光信号也存在强度的差异。上述 2 种方法均能够有效地检测局部放电，但是为了进一步验证 2 种方法的检测性能，并且在一定条件下将检测信号的幅值与放电强度进行关联，以便评估放电剧烈程度，本文采用脉冲电流法(放电发生在方波平坦部分避开干扰的位置)对这 2 种方法在固定实验设置条件下进行放电量标定，即保持传感器设置、位置和信号调理电路参数等实验条件不变，将测量的放电信号幅值进行比较，标定结果如图 9 所示。

根据标定结果可知，在不同气压下 UHF 混频信号和 SiPM 信号幅值与放电量之间存在较强的线性关系，2 种测量方式均可以通过标定计算放电量。随着气压降低，UHF 混频信号拟合直线斜率显著升高，放电信号幅值和分散性均减小，SiPM 信号拟合直线斜率有所降低，放电信号幅值增大。这表明随着气压的变化，同一放电量对应的 UHF 信号强度变化程度更大。相比于 UHF 混频检测方法，光学检测方法在低气压下仍能保持较大幅值。

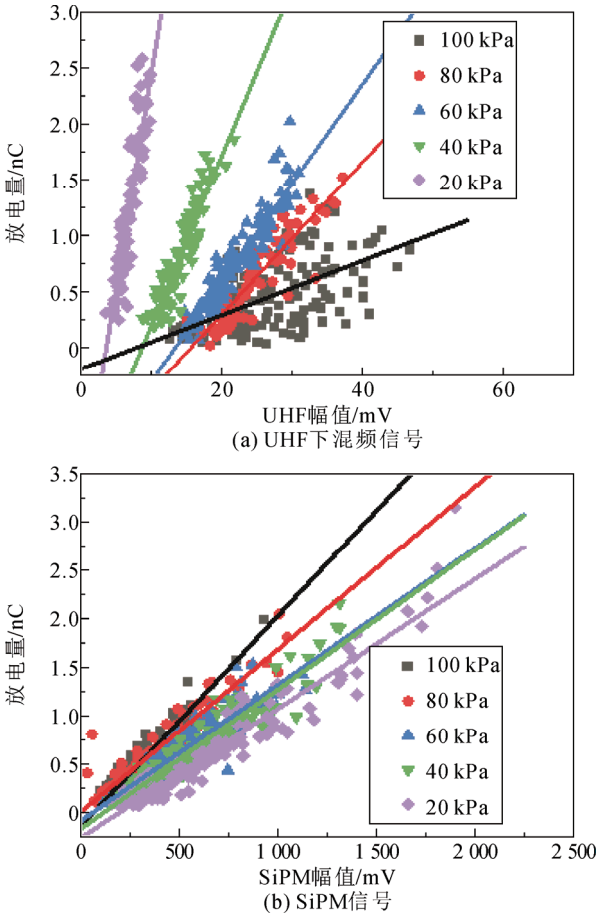


图 9　UHF 混频和 SiPM 信号标定结果

Fig.9　UHF and SiPM signal calibration results

2　不同气压下电机双绞线局部放电特性

本文使用基于 UHF 下混频与 SiPM 联合的局部放电检测方法在室温(20 ℃)、不同气压(20~100 kPa)条件下探究双绞线试样的局部放电特性。首先对频率为 50 Hz、5 kHz 的单极性、双极性方波以及 50 Hz 的正弦波电压下试样的 PDIV(首次出现放电)与 RPDIV(针对方波电压，连续 10 个周期中至少出现 5 次放电)进行测量(测量结果为峰峰值)，结果如图 10 所示。实验结果表明，随着气压的降低，不论何种波形，试样的 PDIV 与 RPDIV 都呈现下降趋势，其中 20 kPa 气压下(对应飞机在万米高空巡航时的气压)的 PDIV 相比 100 kPa 下(地面气压)下降了 30%~40%，这表明低气压环境更容易导致绝缘出现

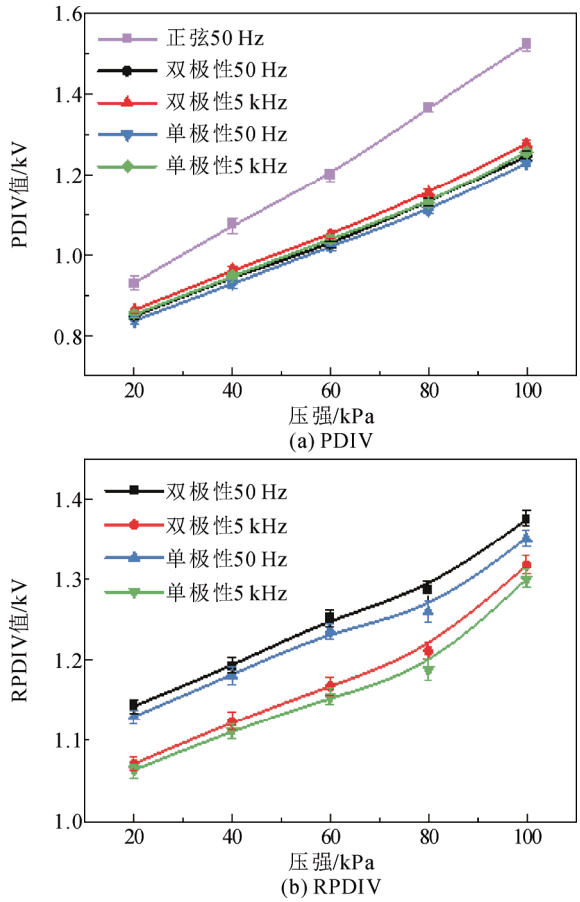


图 10 不同气压下 PDIV 和 RPDIV(峰峰值)

Fig.10 PDIV and RPDIV at different air pressures (peak-to-peak value)

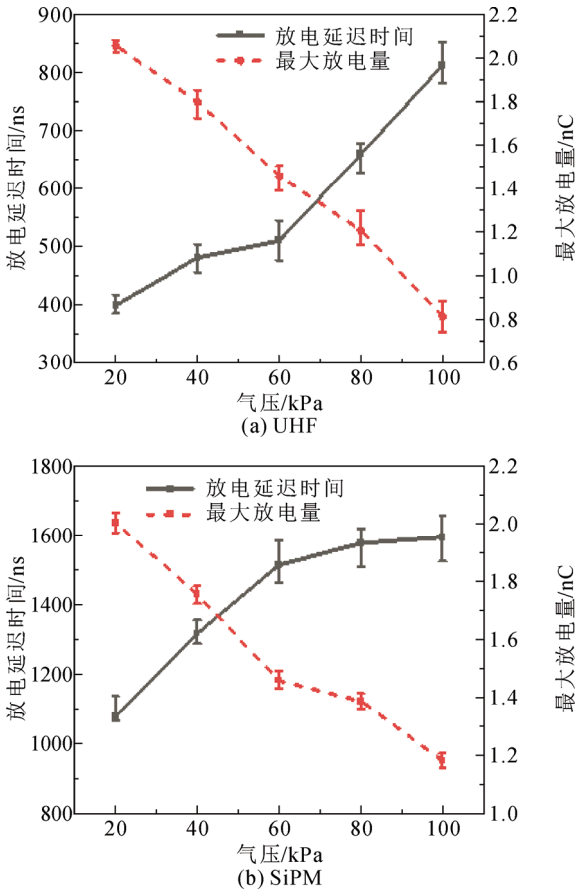


图 11 不同气压下单极性方波放电统计量

Fig.11 Statistic parameters of PD under unipolar square wave voltage at different air pressures

局部放电。同时可以看出方波电压下的 PDIV 低于正弦电压下的 PDIV，这说明方波电压下更容易出现局放，对绝缘挑战更大。4 种不同参数方波电压的 PDIV 数值接近，5 kHz 方波电压 PDIV 略高于 50 Hz 方波电压 PDIV，单极性方波电压 PDIV 略低于双极性方波电压 PDIV，且 5 kHz 方波电压 RPDIV 明显低于 50 Hz 方波电压 RPDIV。

为了进一步分析气压对双绞线试样放电特性的影响，在不同压强下对试样施加 1.5 kV、5 kHz 单极性方波，连续采集 200 个周期内的放电信号，并统计局部放电信号的最大放电量、首次放电延迟时间(放电时刻与电压开始上升时刻的时间间隔)以及放电相位–幅值图谱(phase-resolved partial discharge，PRPD)[21]。图 11 为 2 种方法在不同气压下单个周期内最大放电量和首次放电延迟时间变化曲线，可以看出随着气压的降低，放电延迟时间显著降低且分散性降低，最大放电量几乎线性增加。且 UHF 下混频方法检测到的放电延迟时间小于 SiPM 传感器检测到的放电延迟时间，这可能与 SiPM 调理电路的时间数 R_1C_1 有关。

由于 2 种检测方法放电图谱相似，图 12 展示了 SiPM 传感器采集到的不同气压下的 PRPD 放电图谱。可以看出局部放电集中发生在方波电压上升下降沿处，随着气压的降低，放电发生时刻更加集中，并且在较低气压下，还会出现幅值有明显差异的 2 种放电集合，其中小幅值放电紧跟在大幅值放电后，相关分析将在第 3 章详细讨论。

3 讨论

3.1 方波下双绞线绝缘界面电荷弛豫分析

双绞线试样的绝缘结构由固体介质绝缘层(常用聚酰亚胺)和微气隙组成，如图 13(a)所示。区域 1 中可以近似看成是匀强电场，同时该区域也是双绞线绝缘最薄弱的环节[22]。本节主要考虑区域 1 并采用 2 层绝缘层夹气隙的 3 层平板结构来简化分析，如图 13(b)所示。

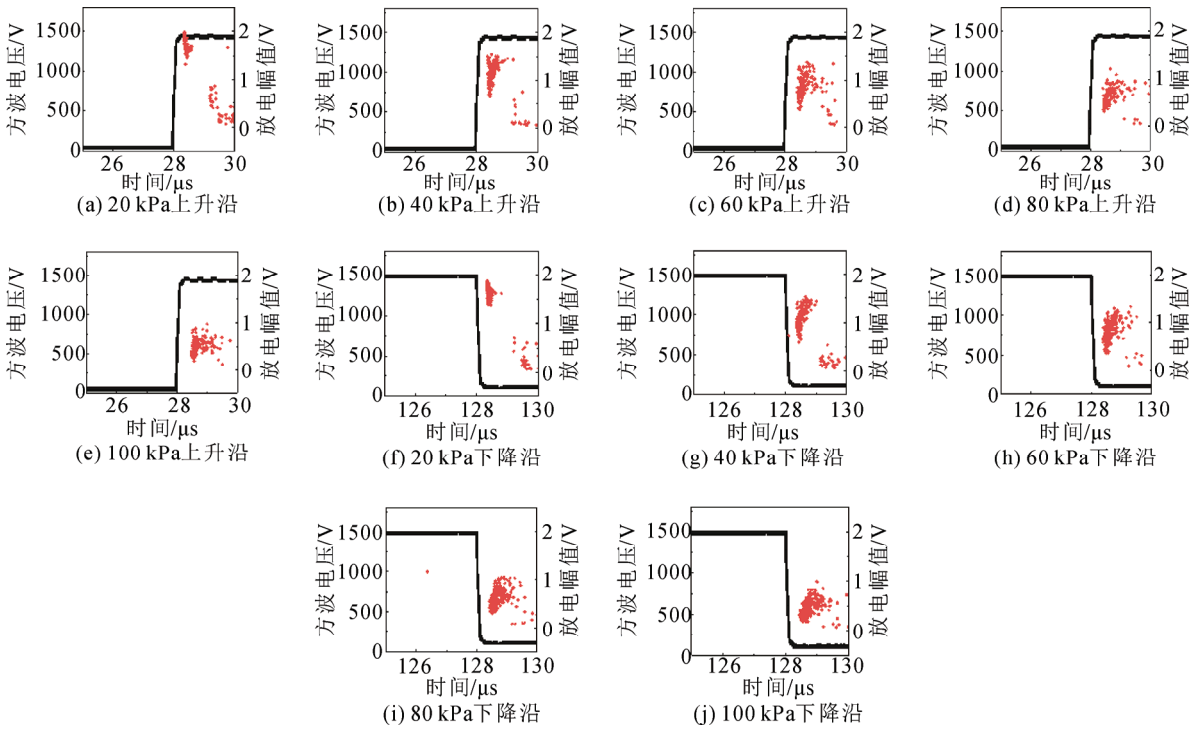


图 12　不同气压下单极性方波局部放电 PRPD 图谱

Fig.12　Phase-resolved partial discharge under unipolar square wave voltage at different air pressures

由于双绞线固体绝缘材料和气隙的介电常数和电导率不匹配，在施加方波电压时电场分布存在从瞬态介电常数分布转换到稳态时按照电导率分布的弛豫过程，并且 26 种材料的界面将积累电荷，影响材料内部的电场。在施加阶跃电压后，等效模型中的电场分布可以根据 Maxwell 方程计算，即：

$$\begin{cases} u(t)=U\varepsilon(t) \\ 2l_1E_1+l_0E_0=u(t) \\ -\varepsilon_1E_1+\varepsilon_0E_0=\sigma_s \\ \gamma_1E_1-\gamma_0E_0+\partial\sigma_s/\partial t=0 \end{cases} \tag{4}$$

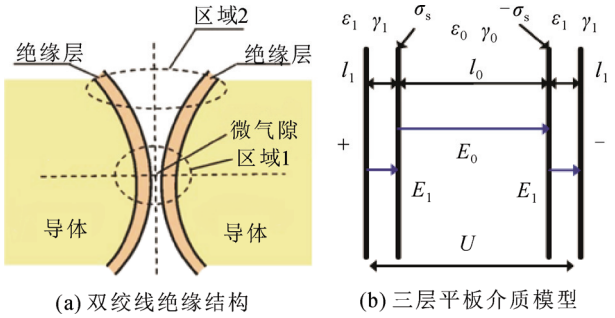
$$\begin{cases} \tau=\dfrac{2l_1\varepsilon_0+l_0\varepsilon_1}{2l_1\gamma_0+l_0\gamma_1} \\ \sigma_s(t)=\dfrac{\gamma_1\varepsilon_0-\gamma_0\varepsilon_1}{2l_1\gamma_0+l_0\gamma_1}U(1-\mathrm{e}^{-t/\tau}) \\ E_0(t)=\dfrac{\gamma_1}{2l_1\gamma_0+l_0\gamma_1}U+\left(\dfrac{\varepsilon_1}{2l_1\varepsilon_0+l_0\varepsilon_1}-\dfrac{\gamma_1}{2l_1\gamma_0+l_0\gamma_1}\right)U\mathrm{e}^{-t/\tau} \end{cases} \tag{5}$$

式中：l_0、l_1 分别为气隙与固体介质绝缘的厚度；E_0、E_1 分别为气隙与固体绝缘层的场强；γ_0、γ_1 分别为空气与固体绝缘的电导率；ε_0、ε_1 分别为空气与固体介质绝缘的相对介电常数；$u(t)$ 为外加电压；$\varepsilon(t)$ 为阶跃函数；U 为直流电压幅值；τ 为界面电荷弛豫时间；σ_s 为界面极化电荷。

由于气隙层、固体绝缘层的电导与介电常数比值不相等，根据式(5)，在两层相交的界面处将出现界面极化电荷 σ_s 与 $-\sigma_s$。值得注意的是，气隙的电导率与高电压下的电离或注入产生的电子、离子浓度有关，一般在接近局放发生的时候，气隙的电导率远大于固体绝缘的电导率。因此对于双绞线试样绝缘而言，有 $\gamma_0>\gamma_1$，$\varepsilon_1>\varepsilon_0$[23]，则 $\sigma_s<0$，故在施加直流电压后，界面处将产生与邻近电极极性相反的异极性电荷，气隙上的场强也会因为界面电荷积累从按介电常数反比分布过渡到按电导反比分布。随着界面电荷的建立，气隙中的电场强度将逐渐减小。

3.2　基于电荷弛豫的方波下双绞线绝缘电场分布

根据 3.1 节分析，对图 13 所示的双绞线绝缘结构进行有限元物理场仿真，以探究不同频率的正弦、方波下双绞线绝缘电场分布情况，双绞线直径为 1 mm，绝缘层厚 50 μm，其他仿真参数如表 1 所示。



(a) 双绞线绝缘结构　(b) 三层平板介质模型

图 13　双绞线试样绝缘结构和等效模型

Fig.13　Insulation structure and model of twisted pair

表 1 双绞线绝缘电场仿真参数

Table 1 Electric field simulation parameters for twisted pair

参数	γ_0/(S·m^{-1})	γ_1/(S·m^{-1})	ε_0	ε_1	U/V
数值	5×10^{-11}	10^{-15}	1	3.5	1000

1）正弦、单极性与双极性方波下瞬态电场

施加 50 Hz 相同峰峰值的单极性方波、双极性方波和正弦波时气隙电场仿真结果如图 14 所示，正弦波最大场强明显低于方波最大场强，故气隙场强要达到相同的击穿场强，正弦波所需的电压峰峰值更高，这与 PDIV 实验结果相符。单极性方波最大场强略高于双极性方波最大场强，这与单极性方波含有直流分量有关。

对于占空比为 50%、幅值为 U、周期为 T 的单极性方波(峰峰值为 U)，可以将其分解为 0.5U 直流分量与双极性方波(峰峰值为 U)交流分量，如图 15(a)所示(占空比为其他值时情况类似，也可分解为相应的直流分量与双极性方波分量)。因此，气隙在幅值为 U 的单极性方波电压下电场分布可以看做是双极性方波电压下场强分布(E_{AC})与直流电压下场强分布(E_{DC})的叠加，如图 15(b)所示。弛豫现象使得交流分量产生的电场强度在半周期内有一定的衰减，而 E_{DC} 的存在，使得施加单极性方波电压时，在其正半周期内 E_{DC} 与 E_{AC} 方向相同，气隙中合场强增大；在其负半周期内 E_{DC} 与 E_{AC} 方向相反，气隙中合场强减小。因此单极性方波在气隙上的最大场强要高于双极性方波的，相同频率的单极性方波 PDIV 比双极性方波的要略低，并且正负半周期内最大场强出现位置恰好是电压上升下降沿处，这与放电多集中在上升下降沿的实验结果相符。

2）不同频率方波下瞬态电场

对于方波电压，由于界面电荷的弛豫现象，在其正负半周期内气隙电场衰减，且方波频率越高，衰减时间越短。直流分量引起的电场衰减与频率无关，仅需分析方波电压的交流分量引起的电场随频率的变化。记极性反转引起的瞬时场强变化为 ΔE，该值仅与电压反转变化的峰峰值有关，记电场在外加电压正负半周期内的衰减率为 $\alpha_1(f)$和 $\alpha_2(f)$，衰减率是方波频率的函数，则有

$$\begin{cases} E_- = \alpha_1(f)E_+ - \Delta E \\ E_+ = \alpha_2(f)E_- + \Delta E \end{cases} \tag{6}$$

式中：E_+、E_-分别表示正、负半周期开始时场强。

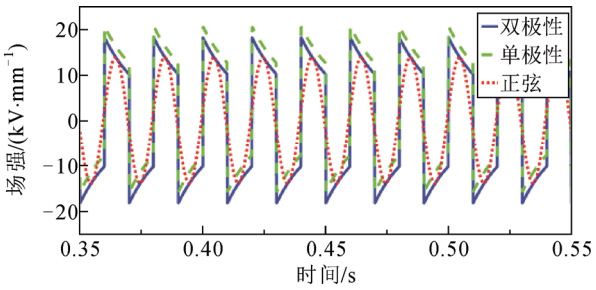


图 14 不同波形下气隙瞬态场强

Fig.14 Transient electric field under different waveforms

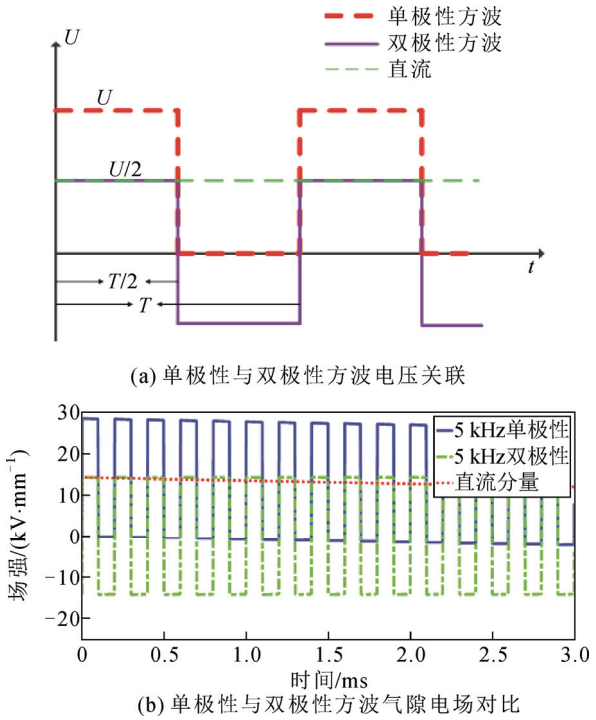


图 15 单极性与双极性方波电压下电场分析

Fig.15 Electric field analysis of unipolar and bipolar square wave voltage

$$\begin{cases} E_- = -\dfrac{1-\alpha_1(f)}{\alpha_1(f)\alpha_2(f)}\Delta E \\ E_+ = \dfrac{1-\alpha_2(f)}{\alpha_1(f)\alpha_2(f)}\Delta E \end{cases} \tag{7}$$

当方波频率升高时，每个周期松弛时间变短，$\alpha_1(f)$和 $\alpha_2(f)$均会增大并趋近于 1，根据式(7)可知 E_+和 E_-的幅值均减小，即频率升高，极性反转时叠加的电场降低，气隙中电场强度减小，对应实验结果中 5 kHz 方波下的 PDIV 略高于 50 Hz 方波下的 PDIV 值。同时仿真结果也表明 50 Hz 方波电压下最大场强高于 5 kHz 方波电压下最大场强，如图 16 所示。

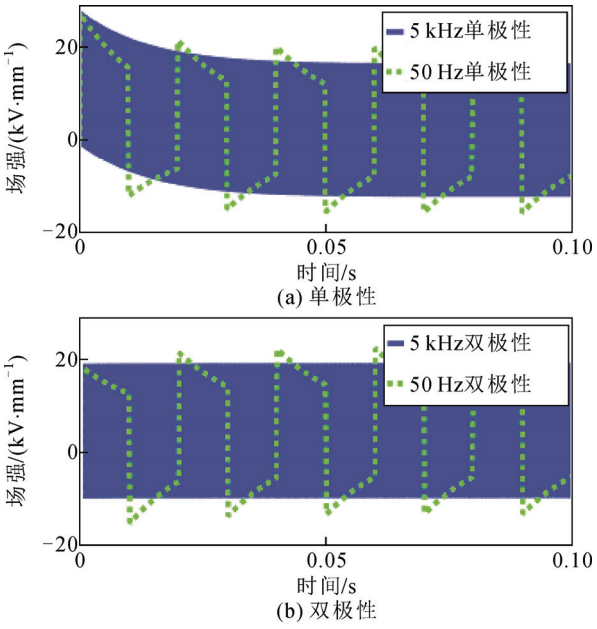


图 16　不同频率的方波下气隙电场仿真结果

Fig.16　Electric field simulation results under square voltage with different frequencies

3.3　重复方波电压下界面弛豫电荷与局放残余电荷的拮抗作用

依据气体放电理论，发生局部放电需要满足 2 个条件：1）局部场强超过起始击穿场强 E_{inc}；2）空间中产生足够数量的初始电子[24]。有研究表明前一次局部放电发生时刻与幅值会影响后一次局部放电发生时刻与幅值，放电所产生的空间电荷存在记忆效应[25]。

发生首次放电前，有机绝缘层内部以及表面所含电子数极少，首次放电所需初始电子主要是通过气隙体电离而产生；而后续第二次放电所需初始电子主要由首次放电留下的表面残余电荷所提供[24]。需要指出的是，3.1 节分析的界面弛豫电荷是由于电导和介电常数不匹配产生的极化界面电荷，下文将放电产生的残余空间电荷纳入考虑，并分析其对 RPDIV 的影响规律。

以单极性方波为例，由于施加电场的周期性，仅分析单个周期内的放电过程，见图 17(a)。

时间段 a：在电压上升沿前，由于上一周期下降沿的放电，在气体–固体绝缘界面处会积累少量的残余电荷，放电残余电荷产生场强 E_r，与 3.1 节分析的弛豫电荷产生场强 E_q 共同作用在气隙中产生合场强 $E=E_q–E_r$。

时间段 b：在电压上升沿时，随着外加场强 E_0 增大，合场强 $E=E_0–(E_q–E_r)$逐渐增大，当合电场超过气隙起始击穿场强 E_{inc} 并经过一段延迟时间产生足够的初始电子后发生局部放电。

时间段 c：放电完成后会在界面处产生大量的残余空间电荷，这些电荷对气隙电场有抑制作用，此时合场强 $E=E_0–(E_q+E_r)<E_{inc}$，因而在方波电压平坦部分虽然外施电压高，但合场强 E 较小，不容易发生放电。随着放电产生的电荷逐渐消散，气隙电场逐渐增加，同时弛豫电荷积累导致电场下降，两者呈现拮抗作用，共同决定气隙内部电场。当界面弛豫效应占主导时，气隙电场逐渐下降，反之局放电荷消散占主导时气隙电场增加。

时间段 d：在电压下降沿时，虽然外施场强 E_0 降为 0，但是大量残余电荷产生的反向场强 E_q 与界面松弛电荷产生的场强 E_r 之和仍可能超过 E_{inc}，进而引发局部放电。4 个阶段连续循环构成了方波电场下的放电过程。

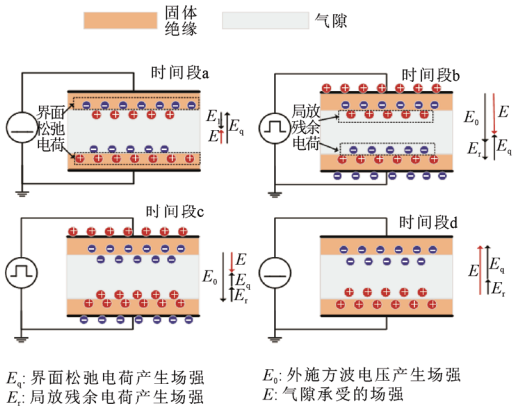
图 17(b)描述方波电压下气隙瞬态场强变化趋势，当方波频率升高时，残余空间电荷的衰减时间缩短，剩余的电荷多，极性反转时合场强 E 增大，发生局部放电的概率增大，更容易在多个连续周期连续发生局部放电，即频率升高，RPDIV 降低。

另外，在时间阶段 c 气隙中电场随着电荷衰减扩散而增加，气隙场强可能再次超过 E_{inc} 而引发第 2 次、第 3 次局部放电，这解释了图 12 中低气压下首次放电后出现二次小幅值放电的原因。

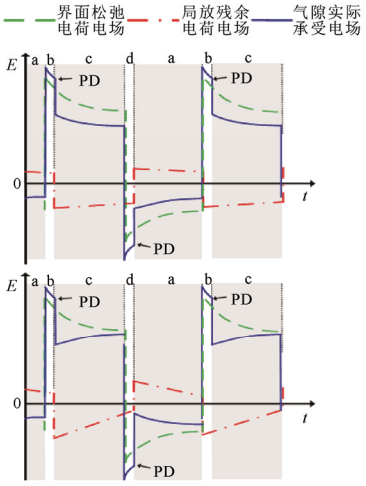
3.4　低气压对双绞线方波电压下局部放电的影响

多电飞机电机绝缘工作在低气压环境中，当气压降低时，气体中电子的平均自由程增大，电子发生碰撞几率降低。由于碰撞而损失的能量将减小，故在相同的外电场作用下，电子将在电场运动中获得更多的能量，有利于电子崩的发展，更加容易发生放电。因此在本文的研究范围内，气压越低，PDIV 越低，在相同外施电压下，局部放电放电量越大。需要指出的是，当气压继续降低时，由于空间中的气体数量减少，碰撞发生概率降低，局部放电发生反而困难，PDIV 可能会提高。

Paschen 定律用来表征均匀电场下气隙击穿电压 V、气隙距离 d 和气压 p 之间关系[26]。根据 3.1 节分析，固体绝缘层以及界面电荷会减弱气隙场强，因此本文对 Paschen 定律进行改进，以拟合不同压强下双绞线试样的 PDIV。由于本文研究的试样绝缘间距不变，Paschen 公式的自变量简化为气压 p，



(a) 双绞线绝缘界面松弛电荷与局放残余电荷示意图



(b) 界面松弛电荷与局放残余电荷影响下的双绞线绝缘气隙瞬态电场

图 17 重复方波电压下界面弛豫电荷与局放残余电荷动态

Fig.17 Dynamics of interface relaxation charge and residual charge under repetitive square wave voltage

如式(8)所示。对不同电压波形下 PDIV 的拟合结果如图 18 和表 2 所示。可以看出，实验结果散点均在 Paschen 曲线的右侧，拟合效果较好，R^2 值>0.99，说明式(8)可以对双绞线在不同电压形式下的 PDIV 进行较好的拟合。

$$U_{\mathrm{inc}}(p)=\frac{Ap}{\ln p-B}+C \tag{8}$$

式中：$U_{\mathrm{inc}}(p)$表示气压为 p 时的起始放电电压；A、B 和 C 为待拟合参数。

局部放电的放电时延存在统计随机性，为了分析放电时延与压强的关系，设放电延迟时间服从指数概率分布[27]，其概率密度函数与分布函数如式(9)和(10)所示。

$$f(t)=\frac{1}{\lambda}\mathrm{e}^{-(t-t_{\mathrm{i}})/\lambda} \tag{9}$$

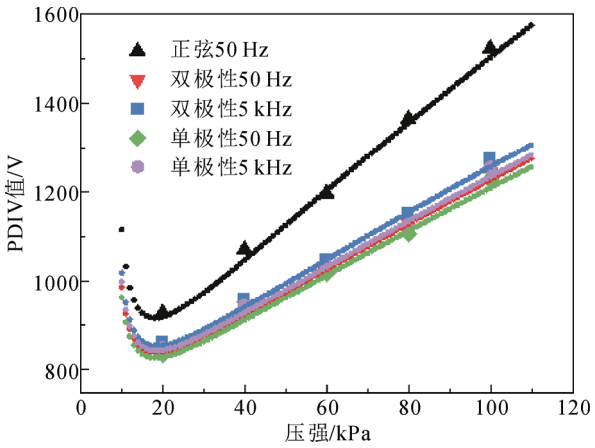


图 18 不同气压下 PDIV 拟合曲线

Fig.18 PDIV fitting at different air pressures

表 2 不同气压下 PDIV 拟合结果

Table 2 PDIV fitting parameters at different air pressures

电压类型	A	B	C	R^2
50 Hz 正弦	31.39	1.907	353.8	0.9977
50 Hz 双极性方波	20.9	1.924	457.9	0.9958
5 kHz 双极性方波	21.72	1.935	453.5	0.9961
50 Hz 单极性方波	20.52	1.914	456.6	0.9964
5 kHz 单极性方波	21.08	1.931	456	0.9949

$$F(t)=1-\mathrm{e}^{-(t-t_{\mathrm{i}})/\lambda} \tag{10}$$

式中：$f(t)$ 表示延迟时间 t 的概率密度；$F(t)$ 表示延迟时间 t 的概率分布；λ 和 t_{i} 为分布参数；t_{i} 表征气隙场强达到 E_{inc} 时刻的统计参数；$t-t_{\mathrm{i}}$ 表示满足击穿场强条件后的延迟时间；λ 为 $t-t_{\mathrm{i}}$ 的数学期望。

用上述概率分布模型来拟合不同压强下相同幅值的单极性方波上升/下降沿处的放电延迟时间，结果如图 19 和表 3 所示。根据拟合结果可知：

1）随着压强的降低，t_{i} 明显减小，这与低气压下 PDIV 的降低有关，在低气压条件下气隙上的场强会更早达到 E_{inc}，因此 t_{i} 减小。

2）随着气压的降低，λ 先缓慢降低后明显减小，这表明低气压会缩短放电延时期望，并减小放电延时的分散性，放电更加集中。电子平均自由程随着气压降低而升高，碰撞次数减少，放电更加容易发生，因此放电延迟时间分布更加集中。

3）下降沿延迟时间高于上升沿延迟时间，该现象可能是由于直流分量电场存在，使得上升沿处电场略高于下降沿处电场，导致下降沿延迟时间偏高。

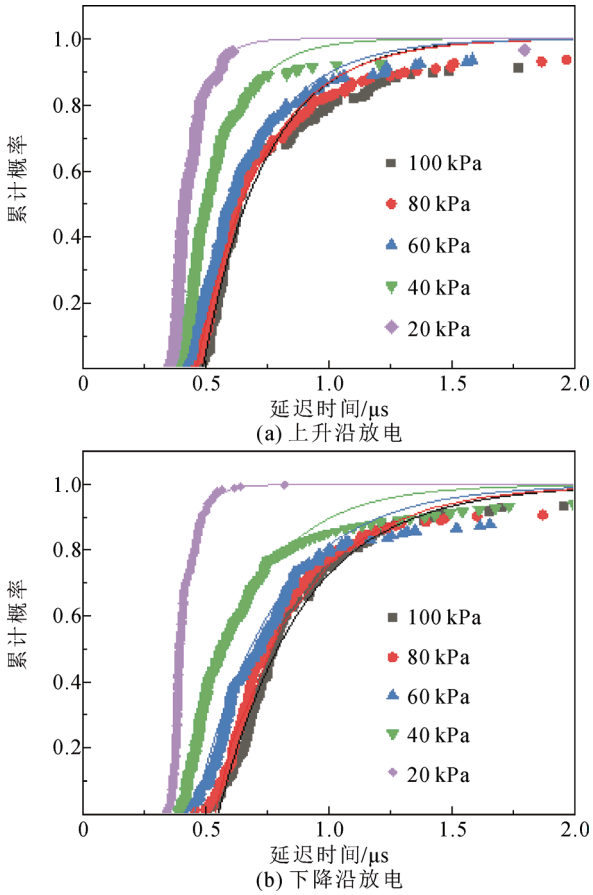


图 19　不同气压下单极性方波放电延迟时间分布

Fig.19　PD delay time distribution under unipolar square wave voltage at different air pressures

表 3　不同气压下单极性方波放电延迟时间分布拟合结果

Table 3　PD delay time distribution fitting parameters under unipolar square wave at different air pressures

气压/kPa	上升沿			下降沿		
	t_i	λ	R^2	t_i	λ	R^2
100	0.4878	0.255	0.9684	0.5489	0.3466	0.9824
80	0.4616	0.2564	0.9879	0.5145	0.3361	0.9844
60	0.4283	0.2539	0.9924	0.4529	0.3268	0.9801
40	0.4013	0.1543	0.9882	0.4159	0.2653	0.9769
20	0.3653	0.0756	0.9899	0.3696	0.0597	0.9542

4　结论

1）提出的下混频和 SiPM 联合检测方法抗电磁干扰能力强，能够在快速方波电压下有效检测局部放电信号。不同气压下 2 种检测方法获得的局放信号幅值与放电量均存在较强的线性关系。

2）方波电压下电机绝缘的 PDIV 低于正弦电压，幅值相同时方波电压更容易产生局部放电。方波电压的极性与频率对 PDIV 影响较小，单极性方波电压 PDIV/RPDIV 略低于双极性方波电压，5 kHz 方波电压 PDIV 略高于 50 Hz 方波电压的。由于界面弛豫电荷与局放残余电荷的拮抗作用，RPDIV 随着方波电压频率增加而降低。

3）气压降低会导致电机绝缘 PDIV 降低，利用修正的 Paschen 定律能够较好地拟合双绞线试样 PDIV。随着气压降低，局部放电放幅值增大、放电延时缩短以及放电分散性减小。通过指数概率分布表征上升/下降沿放电延迟时间，延迟时间期望 λ 先缓慢降低后明显减小。多电飞机推进电机在绝缘设计时应充分考虑气压对绝缘可靠性的影响。

参考文献　References

[1] 朱新宇. 多电飞机及其技术发展分析[J]. 民用飞机设计与研究，2007(4)：17-22.
ZHU Xinyu. Analysis of more electric aircraft and its technical development[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2007(4): 17-22.

[2] MADONNA V, GIANGRANDE P, ZHAO W D, et al. Electrical machines for the more electric aircraft: partial discharges investigation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1389-1398.

[3] KIM H D, FELDER J L, TONG M T, et al. Turboelectric distributed propulsion benefits on the N3-X vehicle[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(6): 558-561.

[4] STONE G, CAMPBELL S, TETREAULT S. Inverter-fed drives: which motor stators are at risk?[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2000, 6(5): 17-22.

[5] VAN DO T, TROVÃO J P F, LI K, et al. Wide-bandgap power semiconductors for electric vehicle systems: challenges and trends[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(4): 89-98.

[6] BENZAQUEN J, HE J B, MIRAFZAL B. Toward more electric powertrains in aircraft: technical challenges and advancements[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(3): 177-193.

[7] WANG Y L, BALACHANDRAN T, HOOLE Y, et al. Partial discharge investigation of form-wound electric machine winding for electric aircraft propulsion[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1638-1647.

[8] WANG Y L, BALACHANDRAN T, HOOLE Y, et al. Partial discharge investigation of form-wound electric machine winding for electric aircraft propulsion[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1638-1647.

[9] IEC. Rotating electrical machines-part 18-41: partial discharge free electrical insulation systems (type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters-qualification and quality control tests: IEC 60034-18-41[S], 2014.

[10] 李佩宜，王　鹏，马世金，等. 重复脉冲参数对变频电机绝缘 PDIV 测试信噪比影响研究[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2981-2990.
LI Peiyi, WANG Peng, MA Shijin, et al. Influence of repetitive impulse voltage parameters on the signal-to-noise ratio of PDIV test for inverter-fed motor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2981-2990.

[11] 马世金，王　鹏，董　涵，等. 用于高频脉冲电压下变频电机绝缘放电检测的特高频天线设计[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3451-3459.

MA Shijin, WANG Peng, DONG Han, et al. Design of ultra-high frequency antenna for discharge detection under high frequency impulsive voltage conditions for inverter-fed motors insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3451-3459.

[12] ZHOU K, WU G N, GUO X X, et al. Partial discharge activity of inter-turn insulation under different parameters of square wave voltage[J]. IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2009, 129(12): 922-930.

[13] WANG P, WU G N, GAO B, et al. Study of partial discharge characteristics at repetitive square voltages based on UHF method[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(1): 262-270.

[14] LUSAURDI L, CAVALLINI A, DEGANO M. The impact of impulsive voltage waveforms on the electrical insulation of actuators for more electrical aircraft (MEA)[C]//Proceedings of the IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China: IEEE, 2017: 4414-4418.

[15] LUSUARDI L, RUMI A, CAVALLINI A, et al. Partial discharge phenomena in electrical machines for the more electrical aircraft. part II: impact of reduced pressures and wide bandgap devices[J]. IEEE Access, 2021, 9: 27485-27495.

[16] 丁 毅，王亚林，李文艺，等. 基于 SHF 信号采集和下混频技术的方波下局部放电测试方法[J]. 高电压技术，2022，48(3)：1133-1141.
DING Yi, WANG Yalin, LI Wenyi, et al. Partial discharge test method under square wave based on SHF signal acquisition and down-mixing technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1133-1141.

[17] REN M, ZHOU J R, SONG B, et al. Towards optical partial discharge detection with micro silicon photomultipliers[J]. Sensors, 2017, 17(11): 2595.

[18] 芮逸凡，王亚林，周明瑜，等. 局部放电检测高增益柔性馈电立体螺旋天线的设计与应用[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1865-1874.
RUI Yifan, WANG Yalin, ZHOU Mingyu, et al. Design and application of high-gain steric helical antenna with flexible feeding network for partial discharge detection[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1865-1874.

[19] IEC. Specifications for particular types of winding wires-part 0-8: general requirements-polyester glass-fibre wound unvarnished and fused, or resin or varnish impregnated, bare or enamelled rectangular copper wire: IEC-60317-0-8[S], 2019.

[20] ABADIE C, BILLARD T, LEBEY T. Influence of pressure on partial discharge spectra[C]// Proceedings of 2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Montreal, Canada: IEEE, 2016: 507-510.

[21] 唐志国，唐铭泽，李金忠，等. 电气设备局部放电模式识别研究综述[J]. 高电压技术，2017，43(7)：2263-2277.
TANG Zhiguo, TANG Mingze, LI Jinzhong, et al. Review on partial discharge pattern recognition of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2263-2277.

[22] FLORKOWSKA B, ROEHRICH J, ZYDRON P, et al. Partial discharge characteristics of enameled wire of electric machine winding under exploitation stresses[C]// Proceedings of 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Potsdam, Germany: IEEE, 2010: 1-4.

[23] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(3): 393-405.

[24] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical insulation, 1995, 2(4): 510-528.

[25] VAN BRUNT R J, CERNYAR E W, VON GLAHN P. Importance of unraveling memory propagation effects in interpreting data on partial discharge statistics[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(6): 905-916.

[26] LEVKO D, ARSLANBEKOV R R, KOLOBOV V I. Modified Paschen curves for pulsed breakdown[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(6): 064502.

[27] FU P Y, ZHAO Z B, LI X B, et al. Surface discharge characteristics and initiation mechanism of PEEK in nitrogen under semi-square voltage[J]. AIP Advances, 2018, 8(7): 075322.



孙 浩
1996—，男，硕士生
主要从事快速方波下电机绝缘检测相关研究工作
E-mail: sunhao123@sjtu.edu.cn

SUN Hao



尹 毅(通信作者)
1972—，男，博士，教授，博导
主要从事电介质物理理论、空间电荷表征技术及应用等方面的研究工作
E-mail: yiny@sjtu.edu.cn

YIN Yi
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2022-10-28 修回日期 2023-01-18 编辑 曾文君