第 51 卷 第 5 期：2485-2493　　高电压技术　　Vol.51, No.5: 2485-2493
2025 年 5 月 31 日　　High Voltage Engineering　　May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240995

油浸式并联电抗器铁芯振动下的悬浮放电特性

郭佳熠，沙叶楠，刘云鹏，陈宝龙，赵　涛
（华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室，保定 071003）

摘　要：强振动条件下的悬浮放电是诱发油浸式并联电抗器内部油纸绝缘破坏的重要因素之一，为掌握电抗器内部悬浮放电故障机理，实现对电抗器运行状态的快速准确监测，搭建了振动条件下的油纸绝缘悬浮放电缺陷试验平台，试验研究了振动幅值和振动频率对于悬浮放电的影响规律。试验结果表明：铁芯振动振幅越大，局部放电量越小；铁芯的不同振动频率对局部放电量大小的影响排序为：50 Hz>300 Hz>200 Hz>100 Hz。基于试验结果，借助有限元仿真技术，仿真计算了振动幅值与振动频率对表面最大电场强度及油流速度的影响规律。仿真结果表明：振幅越大，表面最大场强越小，悬浮电极下方油流速度越大；不同振动频率下的场强、油流速度由大到小排列均为：50 Hz>300 Hz>200 Hz>100 Hz；又基于油流速度对油流带电量和油中气泡运动的影响，综合分析比较了场强、油流带电量、气泡运动对局部放电量的影响规律，深入讨论了振动幅值和频率影响悬浮放电的机理。
关键词：油浸式并联电抗器；油纸绝缘；悬浮放电；机械振动；局部放电

Suspension Discharge Characteristics of Oil-immersed Shunt Reactor Under Vibration

GUO Jiayi, SHA Yenan, LIU Yunpeng, CHEN Baolong, ZHAO Tao
(Key Laboratory of Safety and Defense of Power Transmission and Transformation Equipment of Hebei Province, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Suspension discharge under strong vibration conditions is one of the important factors that induce the damage of oil-paper insulation in oil-immersed shunt reactors. In order to grasp the fault mechanism of suspension discharge inside the reactor and monitor the operation state of the reactor quickly and accurately, a test platform for suspension discharge defects of oil-paper insulation under vibration conditions was built in this paper. The influences of vibration amplitude and vibration frequency on suspension discharge were studied experimentally. The test results show that the larger the vibration amplitude of the iron core, the smaller the partial discharge; the order of the influence of different vibration frequencies of the iron core on the amount of partial discharge is: 50 Hz>300 Hz>200 Hz>100 Hz. Based on the experimental results, the influences of vibration amplitude and vibration frequency on the maximum electric field intensity and oil flow velocity of the surface are simulated by means of finite element simulation technology. The simulation results show that the larger the amplitude, the smaller the maximum field strength on the surface, and the greater the oil flow velocity under the suspended electrode; the field strength and oil flow velocity at different vibration frequencies are arranged from large to small: 50 Hz>300 Hz>200 Hz>100 Hz; based on the influence of oil flow velocity on oil flow charge and bubble motion in oil, the influences of field strength, oil flow charge and bubble motion on partial discharge are analyzed and compared. The mechanism of vibration amplitude and frequency affecting suspension discharge is discussed in detail.
Key words: UHV shunt reactor; oil-paper insulation; suspended discharge; mechanical vibration; partial discharge

0　引言

油浸式并联电抗器是油浸式交流输电工程中的关键核心设备[1]，可以起到补偿无功功率，减小轻载长线路电容效应，提高功率因数等作用[2-6]，保障其安全稳定运行对提升电网运行性能具有重要意义。油浸式并联电抗器容量大[7]，噪声问题严重[8-10]，内部铁芯、绕组振动剧烈[11-13]，易造成悬浮电位的产生进而发生局部放电[14]。探讨电抗器外加电压及内部铁芯振动对悬浮放电的影响规律，综合分析各影响因素下局部放电可能达到的最大放电量，有助

基金资助项目：中央高校基本科研业务费专项资金(计及振动影响的油浸式电抗器内部气体演化特征) (2024MS105)；河北省教育厅科学研究项目(ZC2025078)。
Project supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (Gas Evolution Characteristics of Oil-immersed Reactors Taking into Account Vibration Effects) (2024MS105), Science Research Project of Hebei Education Department (ZC2025078).

于监测油浸式并联电抗器运行状态，及时进行故障识别，保障电网安全可靠运行。

目前对于电抗器内部悬浮放电的研究主要集中于悬浮放电的发生条件、设备发生悬浮放电后的检测以及悬浮放电本身的特征研究。在电网实际工作运行中，通过分析悬浮放电事故案例，发现设备的长期振动是导致金属部件出现松动脱落，形成悬浮电位，进而造成电气设备内部击穿的原因[15]，而并联电抗器由于内部的麦克斯韦力、磁致伸缩、电磁振动等体作用力，铁芯会发生剧烈振动，引起螺栓松动脱落，屏蔽帽接口断裂，金属部件掉落在铁芯与油箱壁之间形成分压[12]，导致放电事故的发生。电气设备发生故障后，通过检测放电过程中的脉冲放电图谱[16]，分析放电后油中产生的气体及典型分解产物[17]，可以判断局部放电类型，识别是否发生了悬浮放电以及判断悬浮放电强度。针对悬浮放电本身的放电机制研究，目前国内外学者通过对悬浮放电电场的理论计算[18]，比较不同典型局部放电缺陷的放电图谱和放电特征量[19]，得出了悬浮放电不同于其他放电的特征规律；Hart 试验研究了正/负极性棒-板间隙中带有细杆的球形悬浮导体的击穿特性，得出了正负极性下悬浮电位对间隙击穿强度影响完全相反的结论[20]；Myung Ki Baek 等分析了悬浮电位对空间电荷的影响特性，得出了可以利用悬浮电位控制电晕放电的结论[21]。综合上述研究现状可知，目前对于振动条件下的悬浮放电规律性探索较为匮乏。

油浸式电抗器内部油纸绝缘系统中存在悬浮电位时，外施电压参数与铁芯振动都会影响悬浮电位的局部放电规律，本文建立了悬浮放电缺陷典型放电模型，通过仿真和试验分析了外加电压幅值、振动频率、振动幅值、电压与振动之间的相位差 4 种因素对悬浮放电的影响机制，并使用油中气泡理论、空间电荷理论解释了放电量的变化规律，综合探讨了振动条件下的悬浮放电规律。

1 振动条件下的悬浮放电试验平台

该试验平台接线图如图 1 所示，包含电源单元、缺陷模型单元、局部放电信号测量单元、信号采集与控制单元。

电源单元包含工频实验变压器、保护电阻、电容分压器。工频试验变压器采用 YDTW-10/100 型油浸式试验变压器，电源容量 10 kVA，最高输出电压为 110 kV，在额定工作电压下，该试验变压器局部放电的视在放电量小于 5 pC，且工频高压控制台保证外施电压连续可调，确保放电模型在合适的电压幅值下发生放电；保护电阻 R 阻值为 10 kΩ，确保试样被击穿后起到限流作用，避免损坏工频试验变压器和局放仪；电容分压器 C 由两个电容串联组成，总电容值为 1 000 pF，用于对参考电压信号进行提取；试验平台搭建过程中，工频变压器、耦合电容以及放电模型三点共同接地，使得采集到的局部放电信号更加准确。

缺陷模型单元包含振动平台和悬浮放电缺陷模型，其中振动平台包含激振器和功率放大器；缺陷模型为油纸绝缘-悬浮电极模型，上下极板均为直径 10 cm，厚度 1 cm 的铜板电极，上极板接地，下极板通入工频正弦高压，并在下极板上固定 100 mm×100 mm×0.3 mm(厚)的正方形油浸纸充当屏障；悬浮电极为圆柱拼接圆台的铜金属块，上表面直径 10 mm，圆台下表面直径 2 mm，除悬浮电极放电尖端外，各金属边缘均做圆滑处理防止发生杂散放电；悬浮电极通过绝缘螺杆与振动平台刚性相连，以保证悬浮电极与激振器输出同步，在竖直方向振动。测量单元采用脉冲电流法检测局部放电的放电量。

信号采集与控制单元使用多功能同步采集卡，实时监控电压信号和振动信号，并根据电压信号的实时相位向激振器输出控制信号，调控振动信号的相位，以实现电压与振动信号之间的相位差恒定。每组试验记录 5 min 内放电信号的二维 φ-q 散点图，每种试验条件下进行 5 次重复试验。

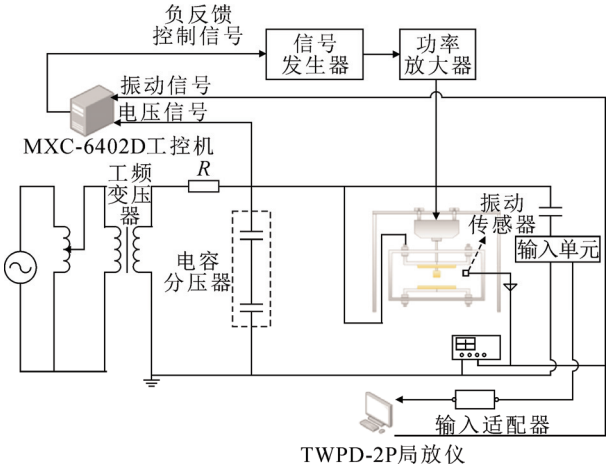


图 1 振动条件下的悬浮放电试验平台接线图

Fig.1 Wiring diagram of suspension discharge test platform under vibration condition

2 外施机械振动条件下的悬浮放电试验

2.1 振动幅值对悬浮放电的影响

为探究振动幅值对振动条件下悬浮放电的影响，开展外加工频电压幅值为 1.4 kV，悬浮电位振动频率为 100 Hz，振动幅值分别为 1、2、3、4、5 mm 的试验。上述试验条件下施加不同振动幅值后的放电 φ-q 图谱相见图 2(q 为放电量，φ 为相位)。

施加上述振幅后的放电特征参数见表 1。其中 $Q_{+\max}$、$Q_{-\max}$ 分别代表正、负半周最大放电量。

根据局部放电图谱和放电参数统计结果可知，随着振动幅值增大，放电程度减弱，正负半周整体放电量减小，且出现了明显相位偏移。幅值增加到 2 mm 时，放电起始相位变为 45°，整体波形仍呈现标准正弦波形，放电量相对于幅值为 1 mm 时略有减小。幅值进一步增加，波形总体为正弦波，但出现了很多杂散放电点，振动幅值为 5 mm 时尤为明显，全周期出现小幅值放电且不规则放电增多；放电波形向 0 相位方向发生了 30°左右偏移。

2.2 振动频率对悬浮放电的影响

工程实践经验表示，悬浮放电的放电典型频率为 100 Hz[22]，同时具有 50 Hz、100 Hz 的整数倍频

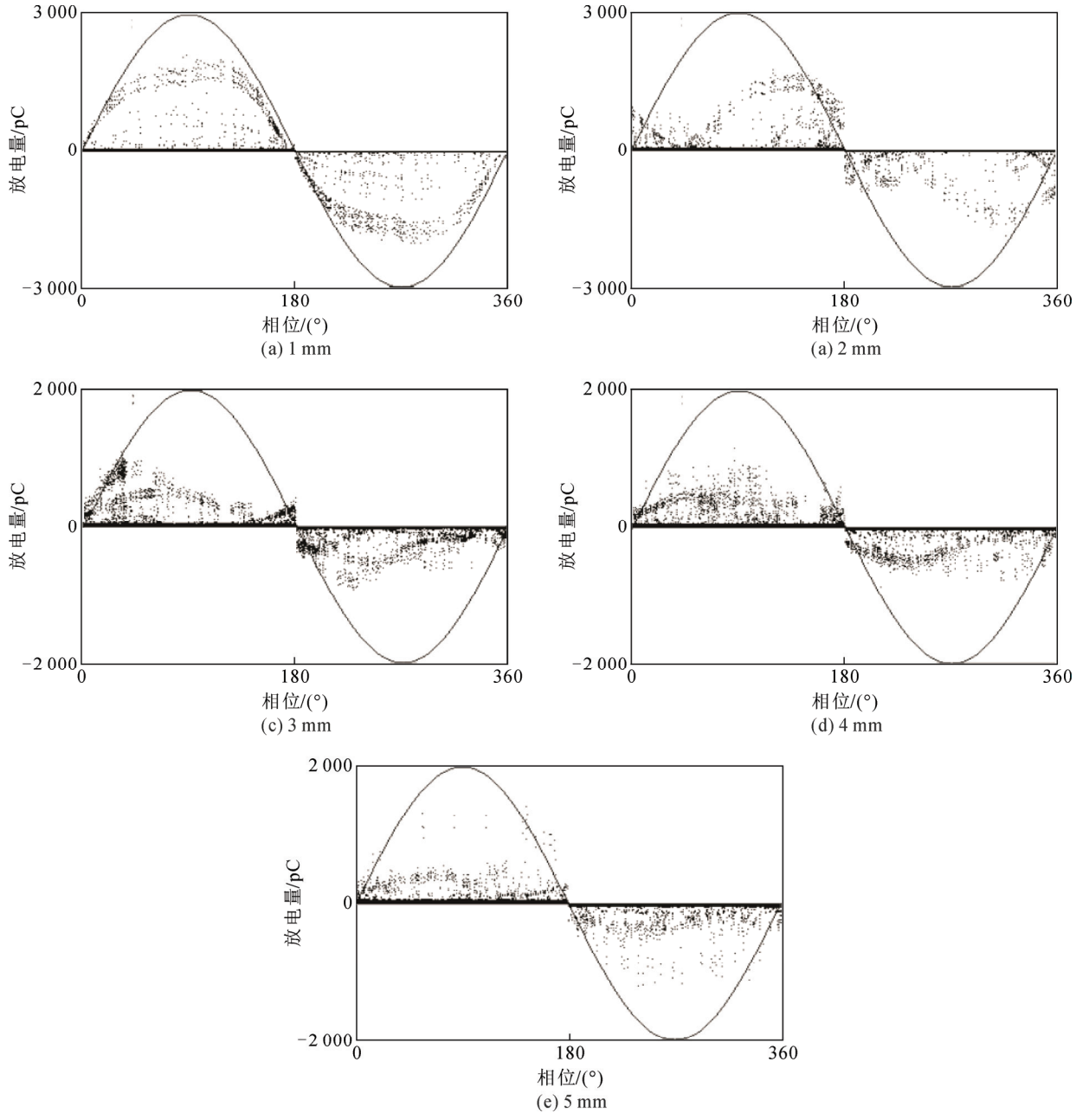


图 2 施加不同振动幅值后的放电图谱

Fig.2 Discharge pattern after applying different vibration amplitudes

表 1 不同振幅下的放电特征参量

Table 1 Discharge characteristic parameters under different vibration amplitudes

振动幅值/mm	$Q_{+\max}$	$Q_{-\max}$
1	2 008.47	−1 983.05
2	1 754.24	−1 677.97
3	1 016.95	−915.25
4	1 000.00	−779.66
5	525.42	−542.37

分量。油浸式并联电抗器的铁芯振动频率主要为 100 Hz，因此若电抗器铁芯与悬浮电极振动同为 100 Hz，则二者波形无初始相位差同步变化。若悬浮电极振动频率改变，两种波形就会存在频率偏差进而导致相位偏差，产生较大的瞬时值偏差，场强也会发生畸变影响放电强度。为探究振动频率对振动条件下悬浮放电的影响，高压板电极通入幅值 1.4 kV 工频电压，悬浮电极振动幅值保持 1 mm 不变，分别施加振动频率为 50、100、200、300 Hz 的试验。上述实验条件下施加不同振动频率后的放电 φ-q 图谱如图 3 所示。

施加上述振动频率后的放电特征参数见表 2。

根据局部放电图谱和放电参数统计结果可知，相对于 100 Hz 振动而言，施加其他频率振动时，正负半周放电量最大值和放电次数略有增加，出现了不同程度的相位偏移。50 Hz 时的放电量最大，放电起始相位为 15°，放电波形较宽，大幅值放电相较其他频率更多；200 Hz 时的放电量增加较少，放电起始相位为 40°，放电波形较圆润；300 Hz 时的放电量较大，放电初始相位向 0 相位方向偏移了 30°，放电波形较窄类似三角。

3 振动对悬浮放电的影响机制

油纸绝缘系统在交流电压作用下，电场强度变化、油流带电程度和电极间油隙产生的气泡动力学特性均会对放电过程的发展产生影响。悬浮电极的振动会同时影响上述 3 个方面进而对局部放电产生影响：(1)振动会改变悬浮电极与高压电极之间的间距，导致放电间隙内电场变化[23]；(2)电极振动会导致悬浮电极附近的油流速度变化，绝缘油与绝缘纸板的表面摩擦会发生油流带电现象，且流速的增加会影响油流带电量，进而影响击穿电压的大小[24]；(3)气泡受油纸绝缘中水分、气体含量和压力等因素的影响，从绝缘纸表面空穴产生，在电极之间的油

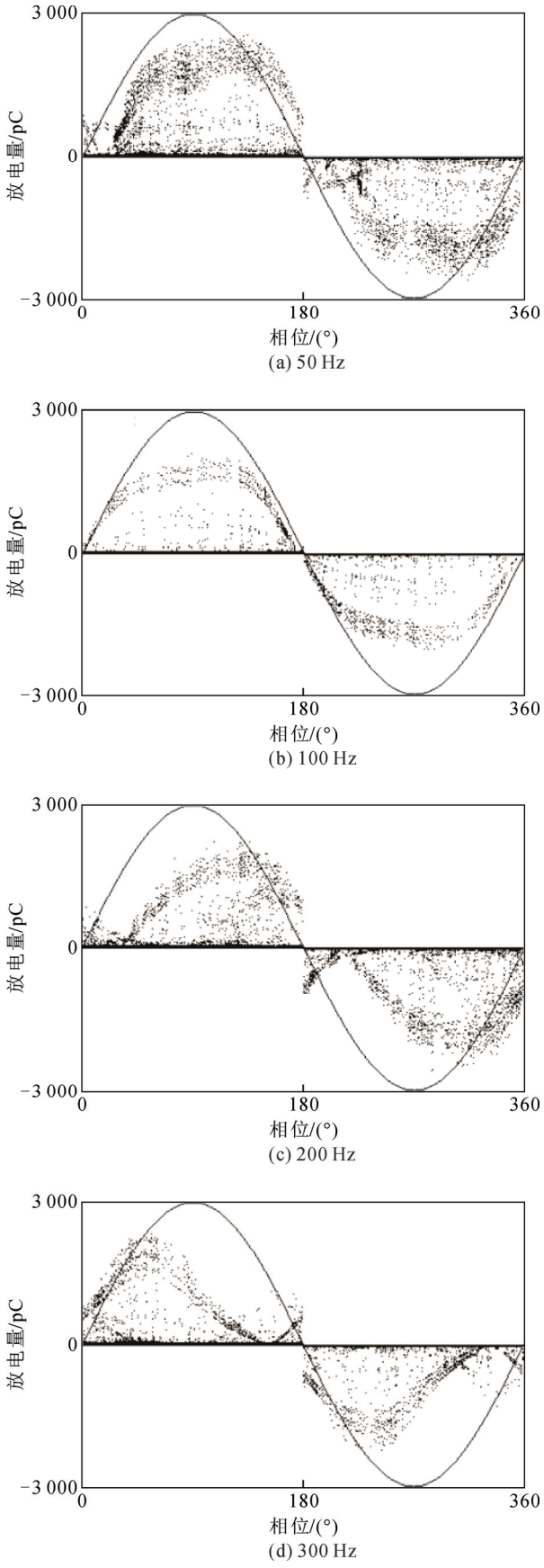


图 3 施加不同振动频率后的放电图谱

Fig.3 Discharge pattern after applying different vibration frequencies

隙内，受绝缘油流速不同的影响进而发生不同程度的形变、位移，最终影响绝缘程度[25]。借用上述理论解释试验过程中出现的放电量差异，并比较各因素的影响程度，有利于探索油纸绝缘中的悬浮放电规律。

3.1 场强对悬浮放电的影响规律

3.1.1 振动悬浮导体的场强计算理论模型

悬浮电极的振动主要通过影响悬浮电位的位置，改变含有悬浮导体的电极系统中的电容分布，进而改变悬浮导体与静止电极之间的场强分布，影响放电严重程度。

对于这类含振动悬浮导体的电极系统，构成一个电容网络，支路电容即为电极间的部分电容。通过对不同电极加电压，便可利用有限元计算程序计算不同部分电容线性组合的值，并建立确定各部分电容值的线性代数方程组。在求出所有的部分电容后，便可由节点电位方程确定悬浮导体的电位，再根据各已知电极的电位确定电位边值，求得悬浮导体的电场分布。油纸绝缘-振动悬浮导体场域计算电位ϕ分布图及部分电容网络如图 4、图 5 所示。

应用工程有限元软件确定图中各电极之间单位长部分电容的线性组合值，求解出C_1、C_2、C_3，则电位悬浮导体上的电位可由式(1)的节点电位方程求解：

$$\boldsymbol{ACA}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{Q}_{\mathrm{n}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为此电容网络的节点关联矩阵；$\boldsymbol{C}$ 为支路电容对角矩阵；$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}$ 为节点电位列向量；$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{n}}$ 为节点净电荷列向量。

在求得悬浮导体的电位后，便可利用式(2)求得悬浮电位与高电位极板之间的场强。

$$E=\frac{U_{\mathrm{ab}}}{d} \tag{2}$$

式中：U_{ab} 为悬浮电极与高压极板之间的电位差；d 为悬浮电极下表面与高压电极之间的距离。

3.1.2 振动条件下的油纸绝缘缺陷仿真模型

将并联电抗器内部油纸绝缘中悬浮放电缺陷等效为图6。上下极板均为直径100 mm，厚度10 mm的铜板电极，两极板之间距离 20 mm，上极板接地，下极板为高压电极，施加幅值 2.5 kV 的工频交流电压；为模拟油浸式并联电抗器振动工况下产生的内部松动螺栓及断裂屏蔽帽，将悬浮电位设计为直径 10 mm，高度 10 mm，圆柱拼接圆台的金属块，圆台下端表面直径为 2 mm，其余几何参数见尺寸标识。悬浮电位静止状态下紧贴绝缘纸板，按照正弦波规律向 y 轴正方向竖直振动。使用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 对振动过程进行数值仿真，调整悬浮电位的振动幅值及频率，研究油中可能产生的表面最大电场强度进而表征放电严重程度。

表 2 不同振动频率下的放电特征参量

Table 2 Discharge characteristic parameters under different vibration frequencies

振动频率/Hz	$Q_{+\max}$	$Q_{-\max}$
50	2 567.80	−2 542.37
100	2 008.47	−1 983.05
200	2 237.29	−2 262.71
300	2 313.56	−2 084.75

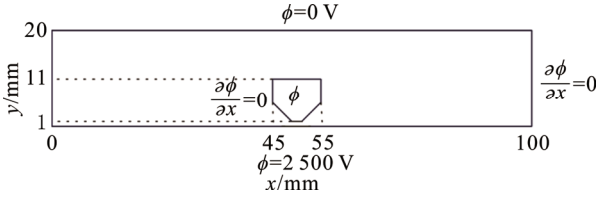


图 4 悬浮导体场域计算电位分布图

Fig.4 Calculation potential distribution diagram of suspended conductor field

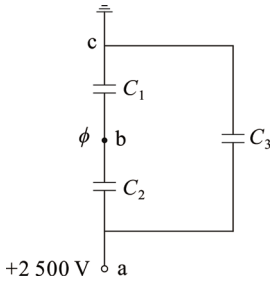


图 5 部分电容网络

Fig.5 Partial capacitance network

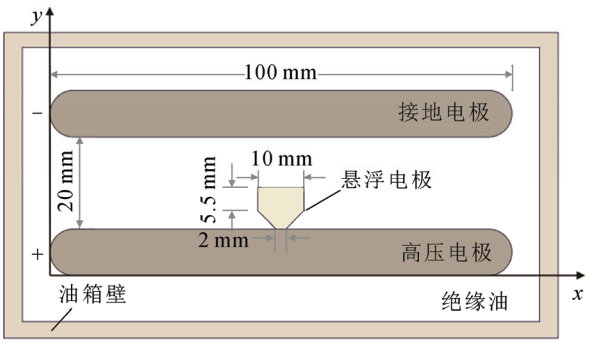


图 6 并联电抗器悬浮放电缺陷仿真模型

Fig.6 Simulation model of suspension discharge defect of shunt reactor

3.1.3 不同振动幅值下的场强变化规律

悬浮电极振动频率保持 100 Hz 不变，改变其振动幅值，观察悬浮电极运动过程中出现的表面最大场强 E_{max}，仿真结果见图 7，最大场强变化趋势如表 3 所示。

由统计结果可知，随着振动幅值增加，电极之间的场强减小。悬浮电极下表面与下板电极之间可以看作匀强电场，场强计算公式为 $E=U/d$，振幅增加会导致悬浮电极与高压电极之间距离增加，在相同外施电压等级的情况下场强减小。该仿真结果与试验得出的振幅越大，局部放电量越小的结论相对应，进一步论证了场强变化与放电量变化之间的正相关对应关系。

3.1.4 不同振动频率下的场强变化规律

固定悬浮电极振动幅值为 1 mm，调整悬浮电极振动频率分别为 100、50、200、300 Hz，与悬浮电极典型振动频率相对应。统计运动过程中出现的表面最大场强 E_{max} 见仿真图 8，场强变化趋势见表 4。

由统计结果可知，油纸绝缘中可能出现的表面最大场强 E 由大到小排列顺序为：E(50 Hz)>E(300 Hz)>E(200 Hz)>E(100 Hz)，场强的大小与试验过程中放电量的大小相对应。

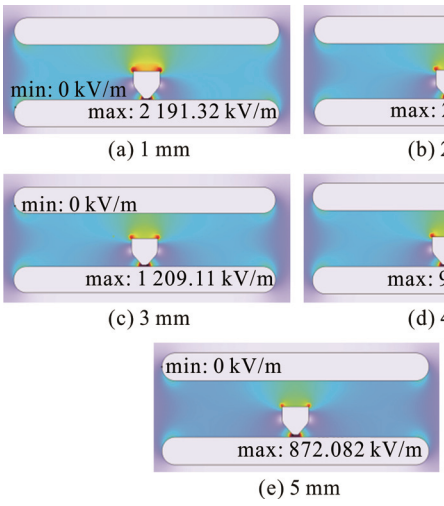


图 7 施加不同振动幅值后的表面最大场强仿真图

Fig.7 Simulation diagram of surface maximum field strength after applying different vibration amplitudes

表 3 施加不同振幅时的表面最大电场强度

Table 3 The maximum electric field strength of the surface when different vibration amplitudes is applied

振动幅值/mm	1	2	3	4	5
E_{max}/(kV·m^{-1})	2 191.32	2 000.56	1 209.11	921.54	872.08

3.2 油流速度对悬浮放电的影响规律

在图 6 所示的悬浮放电缺陷模型中利用流固耦合场对不同振动幅值、振动频率下悬浮电位运动过程中其下表面附近的油流速度进行了仿真，统计结果如表 5 所示。

3.2.1 油流速度对油流带电程度的影响

绝缘油的流动会与绝缘纸摩擦产生电荷，油流带电是电荷通过对流从绝缘纸表面电层转移到电介质液体而发生的现象，它取决于影响油纸绝缘扩散界面的各种因素。油纸表面处的电流密度 J_s 可以表示为：

$$J_s=-\left(f_1\frac{D}{\delta_d}+f_2\frac{(\mu E_0)^2}{\delta_b}\right)C_{-0} \tag{3}$$

式中：f_1、f_2 为考虑到绝缘纸含水量、老化等因素的修正因子；D 为电位移；δ_d 为扩散层厚度；E_0 为

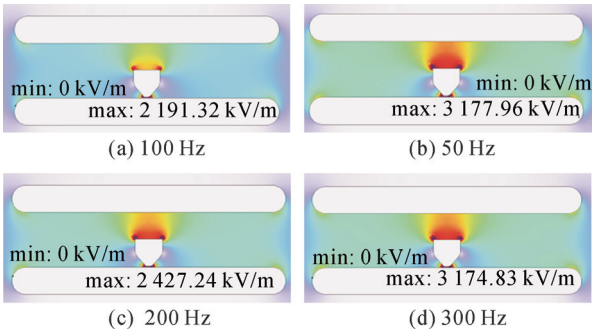


图 8 施加不同振动频率后的表面最大场强仿真图

Fig.8 Simulation diagram of surface maximum field intensity after applying different vibration frequencies

表 4 施加不同频率时的表面最大电场强度

Table 4 The maximum electric field strength of the surface when different vibration frequency is applied

频率/Hz	100	50	200	300
E_{max}/(kV·m^{-1})	2 191.32	3 177.96	2 427.24	3 174.83

表 5 悬浮电极下方油流速度

Table 5 Insulating oil flow rate below the suspended electrode

条件	v_y/(mm·s^{-1})	v_x/(mm·s^{-1})
A=1 mm	45.591	54.521
A=2 mm	56.514	73.466
A=3 mm	72.491	95.110
A=4 mm	92.527	134.139
A=5 mm	102.377	149.002
f=100 Hz	45.591	54.521
f=50 Hz	129.374	203.103
f=200 Hz	46.221	58.069
f=300 Hz	107.455	200.782

注：A 表示振幅；f 表示振动频率。

电场强度；C_{-0}为绝缘油中的负电荷密度，与分子扩散系数D_m、油温T相关；F为法拉第常数；μ为电荷载流子的迁移率和分子离子的扩散率；δ_b为迁移层厚度，与电场强度、油流速度有关，如式(4)所示：

$$\delta_b = \frac{\mu E_0}{v} + x_0 \tag{4}$$

式中：v为绝缘油的流速；x_0为电荷距交界面处的距离。

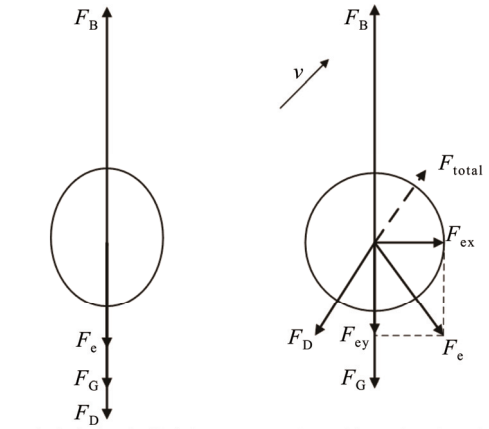
根据上述机理模型，油流带电量与外施电场强度、油流速度、油温以及绝缘内部结构都有关。随着油流速度增加，绝缘油温度上升以及外施电场场强增加都会使得油流带电量增加。油流速度的增加一方面为电荷的分离提供了更多能量，另一方面导致油流与绝缘纸板之间的剪切应力增加，导致油纸之间发生摩擦时有更多电荷进入绝缘油中，并在绝缘纸板表面积累更多极性相反的电荷，造成油纸绝缘系统局部电场增加。同时，油流速度的增加还会使得油中电荷混合程度增加，分布更加均匀，绝缘油导电性能增强。

振动幅值增加时，油流速度增大，油流带电量增多，绝缘性能下降，放电量增大；不同振动频率造成的绝缘油流速v由大到小排列为v(50 Hz)>v(300 Hz)>v(200 Hz)>v(100 Hz)，油流带电量q_c的多少与流速排列一致，与不同频率下的局部放电量相对应。

3.2.2 油流速度对气泡的影响

在流场与电场同时作用的情况下，气泡首先在悬浮电极与高压电极之间的油隙产生，受到沿电场线方向的拉伸作用变为椭圆形，同时因电场力作用沿着悬浮电极下端倾斜表面上升，随着气泡远离强电场区域，形状逐渐过渡至圆形。图 9 为油中气泡受力分析，其中，F_e为气泡所受电动力；F_D为气泡受到的阻力；F_B为浮力；F_G为气泡所受重力；F_{total}为合力。水平方向所受电动力F_{ex}对气泡的影响主要为将气泡推出强电场区域，竖直方向电动力F_{ey}则主要影响气泡上升速度。

通过对不同振动幅值、振动频率的流速仿真可以看出，水平方向的油流速度始终大于竖直方向流速。不同流速下气泡变形的差异受压力梯度力的影响，流体沿流动方向存在压力梯度，且压力梯度与速度的平方成正比，故流速越大，压力梯度越大。气泡同时受到竖直方向、水平方向电动力的挤压，且水平方向压力梯度更大，所以气泡呈现沿竖直方向拉伸的椭圆；气泡受电场力作用沿电场方向的拉伸也加剧了气泡的形变。随着油流速度不断增加，气泡的形变程度更加严重，并且被推离高场强区域的速度以及沿悬浮电极上升的速度都进一步增加。在 COMSOL Multiphysics 软件中搭建表征流场分布的气液两相流仿真模型，研究气泡沿悬浮电极上升过程中的形变，图 10 为油纸绝缘-悬浮放电系统下气泡仿真模型示意图，其中各试验组件尺寸与 1.1 节油纸绝缘缺陷仿真模型一致，气泡直径为 0.1 mm[26]。气泡在悬浮电极周边不同位置受到水平、竖直方向油流电动力挤压后的形变情况如图 11 所示。由仿真结果可知，气泡首先出现在悬浮电极下方，随后沿着电场方向向悬浮电极右下方区域移动，因受到电致伸缩力和水平方向压力梯度的挤压发生形变，逐渐由球形变化为纵向拉伸状态。随后气泡沿悬浮电极表面上升，随着气泡电致伸缩力的减小和拖拽力方向的改变，气泡的纵向拉伸程度变缓，逐渐恢复至球形。且在悬浮电极不同振幅、不同振动频率情况下，随着悬浮电极下方油流速度增加，气泡上升并逸出高场强区域的速度增加，上升过程更加剧烈。



(a) 气泡产生、拉伸阶段 (b) 沿悬浮电极下表面上升阶段

图 9 油中气泡受力分析

Fig.9 Force analysis of bubbles in oil

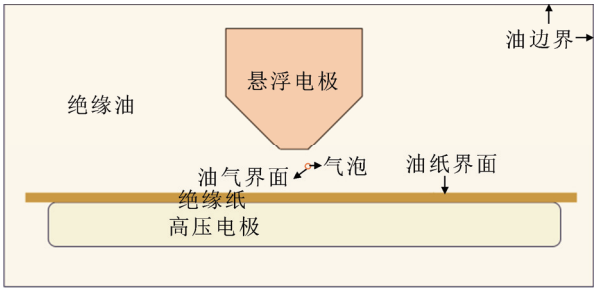


图 10 气泡仿真模型示意图

Fig.10 Dagram of bubble simulation model

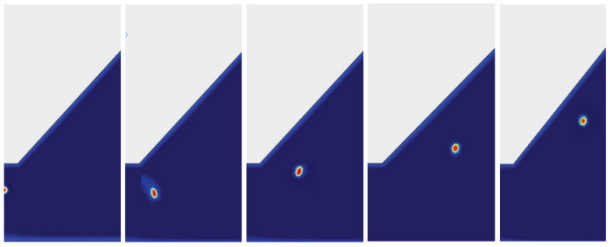


图 11 气泡沿悬浮电极上升过程中的形变情况仿真图

Fig.11 Simulation diagram of the deformation of bubble in the process of rising along the suspended electrode

气泡沿电场方向的形变会在一定程度上延伸气体通道，从而使绝缘油性能下降。但悬浮电极的高频率振动会使气泡快速被推离高电场区域，且流速越高，气泡通过高场强区域的时间越短。针对绝缘油中悬移气泡对局部放电影响的相关研究表明：油流速度增大，击穿电压呈现先上升后基本保持稳定的趋势[27]。这是因为油流速度影响了电极间油隙内气泡的放电重复率进而影响放电剧烈程度，油流速度越大，气泡放电重复率越低，绝缘强度越高。

振动幅值增加时，油流速度增大，气泡快速逸出高场强区域，放电重复率降低，绝缘性能提高；不同的振动频率造成的油流速度由大到小排列为 v(50 Hz)>v(300 Hz)>v(200 Hz)>v(100 Hz)，放电重复率 n 的多少与流速排列相反。

3.3 各因素对悬浮放电剧烈程度的影响总结分析

振动幅值、振动频率通过影响悬浮电极与高压电极之间的场强以及悬浮电极周围的油流速度，来对悬浮放电产生影响，各因素影响效果各不相同，因此对影响因素及其影响程度进行对比。

(1)场强影响：振幅越大，电极间场强越小；不同振动频率下的场强大小排列为 E(50 Hz)>E(300 Hz)>E(200 Hz)>E(100 Hz)。

(2)油流带电程度影响：振幅越大，油流带电量越多；不同振动频率下的油流带电多少排列为 q_c(50 Hz)>q_c(300 Hz)>q_c(200 Hz)>q_c(100 Hz)。

(3)气泡放电重复率影响：振幅越大，气泡放电重复率降低；不同振动频率下的气泡放电重复率多少排列为 n(100 Hz)>n(200 Hz)>n(300 Hz)>n(50 Hz)。

场强、油流带电程度与气泡放电重复率都与局部放电量正相关，结合试验结果进行分析，振幅越大，电极间场强越小，油流带电量越大，气泡放电重复率越低，试验中检测到的局部放电量越低，其中油流带电量的影响较小；不同振动频率造成的场强大小、油流带电程度、发生局部放电时的放电量大小排列均为 q(50 Hz)>q(300 Hz)>q(200 Hz)>q(100 Hz)，气泡放电重复率对放电的抑制程度较轻。

4 结论

1）悬浮电极振动的振幅越大，电极间场强越小，油流带电量越大，气泡放电重复率越低，局部放电量越低，其中油流带电量的影响较小。

2）悬浮电极不同振动频率造成的场强大小、油流带电程度、发生局部放电时的放电量大小排列均为 q(50 Hz)>q(300 Hz)>q(200 Hz)>q(100 Hz)，气泡放电重复率排列与之相反，但对放电的抑制程度较轻。

参考文献 References

[1] 李厚源，郑 涛，黄少锋，等. 基于并联电抗器引发拍频效应的特高压交直流碰线保护改进方案研究[J]. 电网技术，2023，47(8)：3416-3425.
LI Houyuan, ZHENG Tao, HUANG Shaofeng, et al. Improved scheme of UHV AC-DC line-touching protection based on beat-frequency effect induced by shunt reactor[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3416-3425.

[2] KUMAR A, PERVEEN R, PARIKH U. Evaluation of circuit breaker capability for reignition free operation of 400kv shunt reactor and 765kv shunt reactor with NGR using controlled switching device[C]//Proceedings of 2023 9th IEEE India International Conference on Power Electronics. SONIPAT, India: IEEE, 2023: 1-9.

[3] TAN F L, CHEN H, HE J H. Oil temperature forecasting of UHV shunt reactor based on K-means clustering method and similar period[J]. Dianli Zidonghua Shebei, 2019, 41(6): 213-219.

[4] 徐征宇，李金忠，葛 栋，等. 特高压并联电抗器高性能隔声装置研制[J]. 高电压技术，2018，44(7)：2276-2283.
XU Zhengyu, LI Jinzhong, GE Dong, et al. Development of high performance sound insulation device for UHV shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2276-2283.

[5] HU J Z, LIU D C, LIAO Q F, et al. Electromagnetic vibration noise analysis of transformer windings and core[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(4): 251-257.

[6] 陈 凯，乔振朋，杜宇轩，等. 1000 kV 油浸式并联电抗器储油柜与本体联管断裂原因分析[J]. 高电压技术，2021，47(增刊 1)：86-89.
CHEN Kai, QIAO Zhenpeng, DU Yuxuan, et al. Fracture analysis of 1000 kV UHV shunt reactor oil storage tank and its connecting pipe[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(supplement1): 86-89.

[7] 李金忠，张丹丹，徐征宇，等. 有限元法分析隔声装置对特高压并联电抗器散热性能的影响[J]. 高电压技术，2017，43(3)：822-827.
LI Jinzhong, ZHANG Dandan, XU Zhengyu, et al. Heat dissipation performance of ultra-high voltage shunt reactor with sound insulation based on finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 822-827.

[8] 杨 帆，张相杰，王鹏博，等. 特高压并联电抗器铁芯振动及噪声特征研究[J]. 高电压技术，2024，50(2)：751-762.
YANG Fan, ZHANG Xiangjie, WANG Pengbo, et al. Study on the vibration and noise characteristics of the iron core in ultra-high voltage

shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 751-762.

[9] 郭佳熠，耿江海，律方成，等. 基于气隙结构的特高压并联电抗器铁芯减振技术[J]. 高电压技术，2021，47(11)：3892-3900.
GUO Jiayi, GENG Jianghai, LÜ Fangcheng, et al. Vibration reduction technology of UHV shunt reactor core based on air gap structure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3892-3900.

[10] 周 兵，王延召，胡静竹，等. 并联电抗器振动特性及声功率级计算[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3685-3692.
ZHOU Bing, WANG Yanzhao, HU Jingzhu, et al. Vibration characteristics and acoustic power level calculation of shunt reactors[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3685-3692.

[11] 周 兵，宋 倩，倪 园，等. 高压并联电抗器噪声特性及控制[J]. 高电压技术，2016，42(6)：1819-1826.
ZHOU Bing, SONG Qian, NI Yuan, et al. Noise characteristics of high-voltage shunt reactors and its control[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1819-1826.

[12] 郭佳熠. 特高压并联电抗器铁心振动机理及减振措施研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2021.
GUO Jiayi. Vibration mechanism and vibration reduction measures of ultra-high voltage shunt reactor core[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2021.

[13] 祝丽花. 叠片铁心磁致伸缩效应对变压器、交流电机的振动噪声影响研究[D]. 天津：河北工业大学，2013.
ZHU Lihua. Study of affection from magnetostriction in laminated core on vibration noise of transformer and AC motor[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2013.

[14] MIYAZAKI S, KURAISHI T. Identification of partial discharge source in shunt reactor by frequency response analysis and partial discharge measurement[C]//Proceedings of 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2022: 159-162.

[15] KUSUMOTO S, ITOH S, TSUCHIYA Y, et al. Diagnostic technique of gas insulated substation by partial discharge detection[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(4): 1456-1465.

[16] 何家欣，康 钧，李江涛，等. 高海拔地区 750 kV 并联电抗器现场局部放电试验方法[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2827-2833.
HE Jiaxin, KANG Jun, LI Jiangtao, et al. On-site partial discharge test method of 750 kV shunt reactor in high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2827-2833.

[17] VAN BRUNT R J, HERRON J T. Fundamental processes of SF_6 decomposition and oxidation in glow and corona discharges[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(1): 75-94.

[18] 王 俊，田刚领，张国跃，等. 悬浮电位引起电场放电的计算分析[J]. 电气开关，2010，48(5)：70-71，74.
WANG Jun, TIAN Gangling, ZHANG Guoyue, et al. The calculation and analysis of the electric field discharge caused by floating potential[J]. Electric Switchgear, 2010, 48(5): 70-71, 74.

[19] ZAHED A A, EL-HAG A H, QADDOUMI N, et al. Comparison of different fourth order Hilbert fractal antennas for partial discharge measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 175-182.

[20] HART C L, NIXON K J, JANDRELL I R. The effect of a floating conductor on the breakdown strength of a DC gap at both polarities[C]//Proceedings of the IEEE Power and Energy Society Conference and Exposition in Africa: Intelligent Grid Integration of Renewable Energy Resources. Johannesburg, South Africa: IEEE, 2012: 1-5.

[21] BAEK M K, CHUNG Y K, PARK I H. Experiment and analysis for effect of floating conductor on electric discharge characteristic[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 2323-2326.

[22] VAN BRUNT R J. Physics and chemistry of partial discharge and corona. Recent advances and future challenges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 761-784.

[23] WANG S Y, REN M, DONG M, et al. Effect of mechanical vibration on surface discharge along Epoxy resin under AC electric field[C]//Proceedings of 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Richland, USA: IEEE, 2019: 645-648.

[24] 池明赫. 运行条件对复合电场下油纸绝缘击穿特性的影响[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2015.
CHI Minghe. Influence of working condition on breakdown characteristics of oil-paper insulation under complex electric field[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2015.

[25] ZHAO T, TONG Y X, ZHENG Y M, et al. Experimental study on bubble effect of oil-paper insulation in natural ester[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(6): 2387-2393.

[26] 李云鹏. 气泡在油纸绝缘中的分子积聚微观机制与迁移动力学过程研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2023.
LI Yunpeng. Study on molecular accumulation mechanism and migration dynamics of bubbles in oil paper insulation[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2023.

[27] PAN C, TANG J, TAO X T, et al. Partial discharge and breakdown characteristics of moving transformer oil contaminated by metallic particles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1774-1784.



郭佳熠
1992—，男，博士，讲师
主要从事高电压与绝缘技术，特高压并联电抗器本体质量提升研究
E-mail: guojiayi@ncepu.edu

GUO Jiayi
Ph.D.



沙叶楠(通信作者)
1999—，女，硕士生
研究方向为特高压并联电抗器、局部放电
E-mail: 2573541872@qq.com

SHA Yenan
Corresponding author

收稿日期 2024-06-20 修回日期 2025-03-28 编辑 曹昭君