第 49 卷 第 1 期：198-206 高电压技术 Vol.49, No.1: 198-206
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220971

油浸式电力设备内部电弧引发的压力特征

李博宇[1]，郝治国[1]，李斯盟[1]，潘书燕[2]，熊军辉[1]，薛众鑫[1]
（1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049;
2. 国网电力科学研究院有限公司，南京 211106）

摘　要：油浸式电力设备内部电弧故障易引发严重的爆炸起火事故，对油浸式电力设备内部放电进行有效监测，开发高灵敏性、高可靠性的保护方案成为当下研究的重点。相比于其他放电监测手段的随机性和分散性较高、可靠性偏低，压力信号与内部贯穿性电弧的产生关联性极强，故将其作为保护依据具有更高的可靠性。而现阶段针对油浸式电力设备在内部电弧作用下的压力特征研究还并不完善，目前基于压力特征的保护方案也多停留在动作于其幅值越线的压力释放装置。为此设计并开展了油浸式电力设备内部电弧放电试验，测量并采集了针板结构油纸放电与柱板结构沿面放电两种放电模型由缺陷发展至电弧故障过程中压强信号的变化特征以及其同步电压电流数据。试验发现，两种放电模型的发展过程均可以划分为 3 个阶段，压强信号在针板结构油纸放电的电弧击穿阶段和柱板结构沿面放电的滑闪放电阶段与持续性闪络阶段有明显的波动，且波动特征具有很强的一致性，均由 3 种波动周期的压力分量叠加而成。试验中得到的压力特征可以作为判断油浸式电力设备内部是否有电弧产生的依据，从而对其内部情况进行诊断。相比传统的动作于压力幅值越线的机械式压力保护，结合压力信号的频率特征可以在较早期发现故障且能更好地识别累积能量较低的电弧故障。该文对于油浸式电力设备内部电弧引起的压力特征的研究为下一步开发基于压力特征的新型数字式非电量保护奠定了基础。
关键词：油浸式电力设备；电弧；压力信号特征；频率；非电量保护

Pressure Characteristics of Oil-immersed Power Equipment Under Internal Arc

LI Boyu[1], HAO Zhiguo[1], LI Simeng[1], PAN Shuyan[2], XIONG Junhui[1], XUE Zhongxin[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract：The internal arc fault of oil-immersed power equipment is prone to cause serious explosion and fire accidents. Effective monitoring of the discharge inside the oil-immersed power equipment and the development of protection schemes with high sensitivity and high reliability have become the focus of current research. Compared with high randomness, dispersion and low reliability of other discharge monitoring methods, the pressure signal has a strong correlation with the generation of internal arc, so it will have higher reliability as a protection criterion. At present, the research on the pressure characteristics of oil-immersed power equipment under internal arc is not perfect, and the protection schemes based on pressure characteristics mostly remain in the stage of pressure relief device that acts on its amplitude reaching threshold. In this paper, the internal discharge experiment of oil-immersed power equipment is designed and carried out. The pressure characteristics and synchronous voltage and current data in the process of needle plate oil-gap discharge and column plate surface discharge are measured and collected. It is found that the development process of two types of discharge can be divided into three stages. The pressure signal fluctuates obviously in the breakdown stage of needle plate oil-gap discharge and the intermittent flashover stage and continuous flashover stage of column plate surface discharge, and the characteristics are highly consistent, which are formed by the superposition of low, medium and high-frequency components. The pressure characteristics obtained in the experiments can be used as the basis to judge whether there is arc in the oil-immersed power equipment, so as to diagnose its internal condition. Compared with the traditional mechanical pressure protection which acts on the pressure amplitude reaching threshold, the protection method considering the frequency characteristics of the pressure signal can find the fault earlier, and the low-energy arc fault can be better identified. The study lays a foundation for the next development of the non-electric protection based on the pressure characteristics.
Key words：oil-immersed power equipment; arc; pressure characteristics; frequency; non-electricity protection

基金资助项目：国家自然科学基金联合基金(U1866603)。
Project supported by Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U1866603).

0 引言

绝缘油作为电力设备中重要的散热介质、绝缘介质以及灭弧介质，在电力系统中得到广泛的应用，常见于电力变压器、有载分接开关等重要电气设备。而当油浸式电力设备内部绝缘油中产生严重电弧故障时，油箱内部的高温电弧会迅速气化分解其周围的绝缘油，在短时间内产生大量烃类混合气体。而周围绝缘油的膨胀惰性使得气液两相界面上产生巨大的压力差，并以压力波的形式向外传播，油箱内部压力水平骤升。而油箱箱体在内部油压的冲击下将发生一定程度的弹性甚至塑性形变，当局部应力超过其材料的强度极限时，箱体将会发生破裂，油箱结构遭到破坏。此时绝缘油及其分解产生的高温混合气体通过破裂口向外释放并与空气混合后点燃，从而发生二次爆炸，引起严重的火灾事故。近年来发生了多起油浸式电力设备爆炸起火事故，造成了严重的后果[1-4]。以典型油浸式电力设备变压器为例，根据 CIGRE 变压器工作组在 2013 年发布的报告[5]，在变压器内部发生电弧短路故障后，由于继电保护装置动作不及时，占比 54%的变压器出现了油箱开裂、爆炸的情况，发生火灾的概率大约为 5%~15%，平均值约为 10%。

目前，针对油浸式电力设备在内部电弧作用下油箱内部压力特征的研究已经有了长足的进展，但其中多数研究着重于一定电弧能量水平下的内部压力分布及峰值的计算[6-7]，以及内部高压作用下油箱的形变特征[8-10]。一些学者也基于上述研究的成果，针对变压器油箱、升高座等部位的结构提出了一些优化方案，以避免爆炸事故的发生。使用的研究手段可以大体上分为实验探究[11-13]与仿真计算两种方法[7-8, 10, 14-16]。而针对气泡产生后脉动过程产生的压力波动的频率特征的探究多常见于水下爆炸气泡动力学[17-18]以及液电效应[19-21]的研究中。水下爆炸与液电效应的物理过程也涉及液体的瞬间剧烈气化分解并产生高温高压气团向外传播压力波，与油中电弧的场景极为相似，具有较大的参考意义。但其研究对象多为舰船、兵器，且其讨论的传播介质多为水，传播的区域假设为无限水域，放电形式多为高压强流脉冲放电。这与油浸式电力设备内部的有限空间油域内产生持续性电弧故障有本质区别。

针对上述问题，本文设计并开展了油浸式电力设备内部电弧放电试验，测量并采集了油浸式电力设备内部针板结构油纸放电以及柱板结构沿面放电由缺陷发展至电弧故障过程中压力参量的变化特征以及其同步电压电流数据。归纳总结了两种放电形式下压力信号的特征规律并对其频率特征的形成原因进行了理论分析，对油浸式电力设备内部电弧故障下的压力特征研究以及非电量保护手段的进一步开发有一定的参考意义。

1 试验平台与研究方法

1.1 试验腔体与缺陷模型

本试验的主要目的是通过模拟油浸式电力设备典型内部绝缘缺陷发展至电弧故障的过程，研究其引发的油箱内部压力特征。

试验平台依据典型油浸式电力变压器箱体结构设计了试验模型腔体及油枕与相应油枕连接管，确定腔体长、宽、高分别为 300 mm×200 mm×300 mm。其尺寸与结构如图 1 所示。

试验模型主要结构包括：1）电极接线柱，用于安装和更换不同类型电极，并对电极间距进行调整；2）试验油箱，罐体使用亚克力玻璃材料制作，在正对电极位置处装设了玻璃透镜观察窗，以便于使用高速相机对放电时的电弧通道以及所产生气体的运动汇集形态进行记录；3）油枕连接管及油枕，在试验箱体顶部留有直径 25 mm 的油枕连接管出口，配合安装油枕连接管及油枕以模拟真实变压器的几何结构；4）传感器接口，在油箱的顶部和侧面设有螺纹孔，用于安装压力传感器。此外，在箱体顶部以及底部单独布置排油阀门，便于变压器油的排除和注入。

在油浸式电力设备中，油纸屏障绝缘结构为最为常用的主绝缘结构形式。基于此，本研究在试验中设计并制作了两类典型放电类缺陷等效模型包括针板结构油纸放电模型和柱板结构沿面放电模型，电极结构和尺寸根据国标文件《GB/T 1408.1—2006 绝缘材料电气强度试验方法第 1 部分：工频下试验》设计如图 2 所示。

图 2 中两种模型对应油浸式电力设备中不同类型的放电类缺陷，图 2(a)所示针板油纸放电模型模拟的是绕组塑性形变后产生的金属尖端放电，图 2(b)所示柱板沿面放电模型，模拟的是长垫块和围屏处发生的爬电现象。试验所用绝缘纸板大小为 5.5 cm×5.5 cm，厚度为 2.2 mm，均已经抽真空、高温烘干和充分浸油处理。各组试验均控制环境温度以

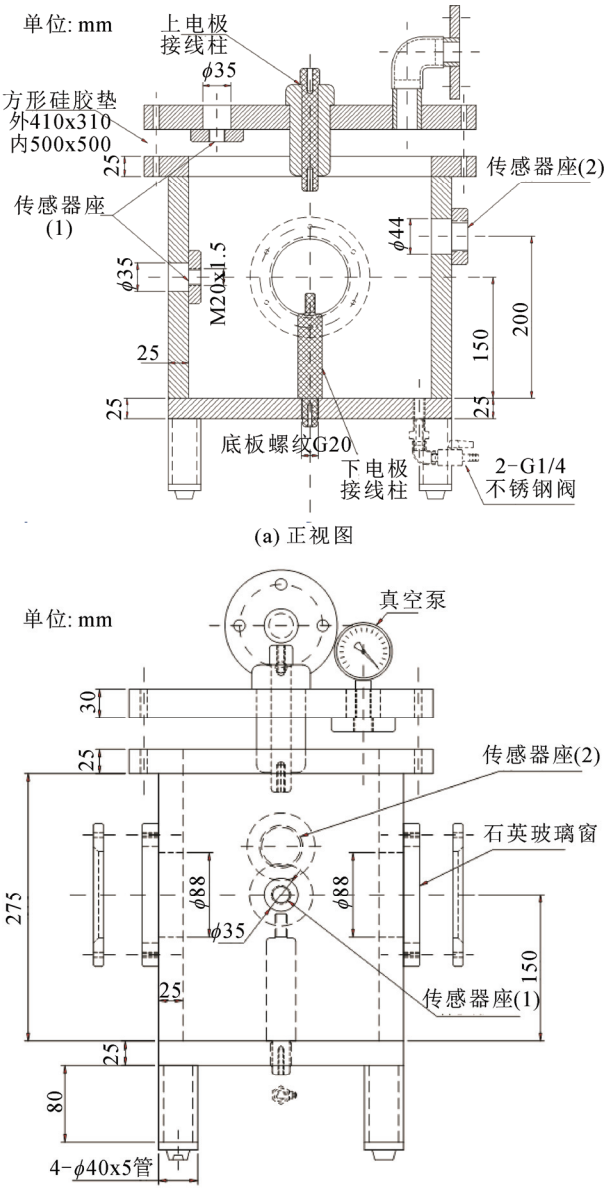


图 1 试验模型箱体示意图

Fig.1 Diagram of test model

及变压器油温在室温(25 ℃)下进行试验。

1.2 试验回路与信号采集系统

试验中模拟电弧故障的等效电路如图 3 所示，主要包括试验变压器、分压器、耦合电容与试验模型。试验通过试验变压器提供所需正弦电压。

试验回路中涉及的主要设备参数如表 1 所示。

试验信号采集系统由高压分压器、电流传感器、压力传感器与采集卡组成。在试验中，共需要采集顶面压强、侧面压强、电弧电压、电弧电流 4 种信号。除此之外，在试验过程中，还利用高速相机辅助抓拍电弧击穿瞬间的放电形态以及所产生气泡动态变化特征，高速相机参数为 5000 帧/s。在试验过程中采集到的数据通过数据采集卡上传至 PC 端进行统一后处理，并通过数字示波器进行实时的波形显示。整体信号采集–测量系统如图 4 所示。

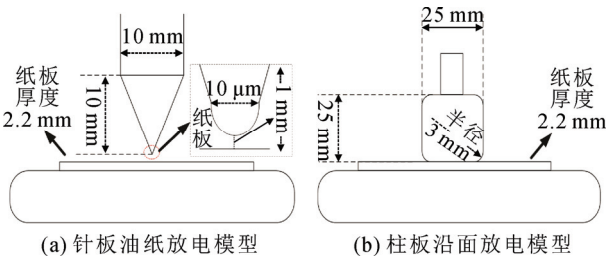


图 2 放电模型

Fig.2 Diagram of discharge model

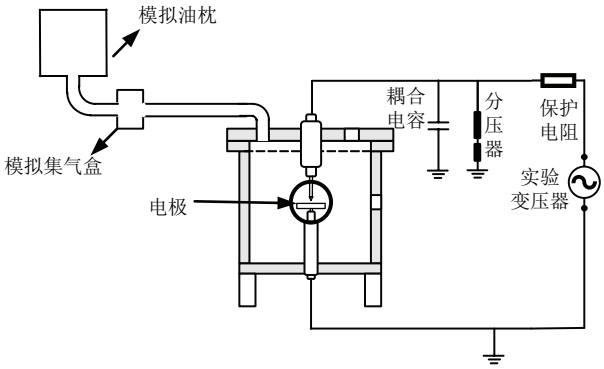


图 3 试验回路原理图

Fig.3 Schematic diagram of test circuit

表 1 设备参数

Table 1 Equipment parameters

设备名称	设备型号	设备参数
试验变压器	武汉华特电气设备有限公司 YDJZ 型试验变压器	变比：400 V/100 kV； 容量：20 kVA； 低压电流：50 A； 高压电流：200 mA
分压器	国电西高 GDFR−C1−100G	分压比：10 000:1； 精度：AC 1.0%、DC 0.5%； 电压等级 100 kV
耦合电容	武汉南瑞电气有限公司 1 600 PF/100 kV 型耦合电容	额定电压 100 kV
压力传感器	CJGP−I	响应频率：>20 kHz； 测量范围：0~100 kPa； 测量精度：0.01%

1.3 试验方法

在针板结构油纸放电与柱板结构沿面放电试验中，均采用先阶梯升压后恒定电压的方法加压，以模拟变压器正常运行过程中外加电压工况。首先通过预试验，测试了两种放电模型的局放起始电压

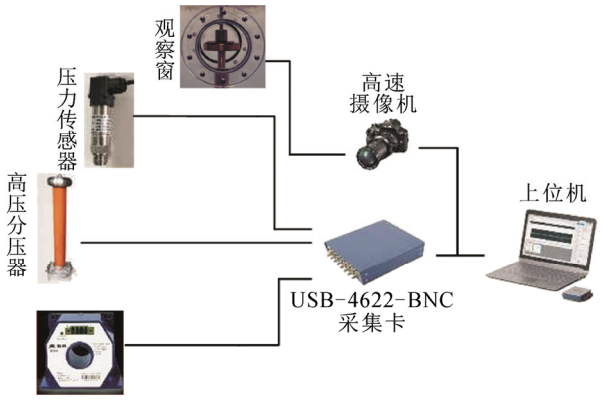


图 4　信号测量–采集系统

Fig.4　Signal measurement and acquisition system

(针板结构：20 kV，柱板结构：22 kV)。正式试验中从局部放电起始，电压开始阶梯升压(2 kV/5 min)，出现明显火花放电后，稳定电压不再抬升，直至发生电弧击穿。

2　试验结果

2.1　针板结构油纸放电

根据试验中针板油纸放电发展过程中所观察到的放电特征对其进行阶段划分，油纸放电的发展过程可以分为 3 个阶段，分别为油隙低能放电、火花放电与电弧放电阶段，如图 5 所示。在油隙低能放电阶段，针尖附近绝缘油易分解并生成微型碎气泡，气泡在相互间同种电荷斥力作用下向周围随机扩散；火花放电阶段，针板间出现明显的电火花，产气速率明显加快，气泡体积相较之前显著增大；电弧放电阶段，微弱的电火花变为耀眼的白光，大量产气且单个气泡体积均较大。

在针板油纸放电的发展过程中，压力信号仅在最后的持续性电弧击穿阶段有明显的波动，该阶段放电模型两端电压以及试验回路电流的典型波形如图 6 所示。分析可知，在 1 个周波内，并未形成持续稳定的电流，发生了数十次电流通道通–断交替，而电压也对应出现多次跌落–恢复交替。

当绝缘油中产生电弧时，绝缘油气化分解所产生混合气体体积、压力波的幅值以及频率与电弧功率以及能量息息相关，根据式(1)计算电弧功率及能量，即

$$\begin{cases} P_{\mathrm{arc}} = u_{\mathrm{arc}} i_{\mathrm{arc}} \\ W_{\mathrm{arc}} = \int_0^T P_{\mathrm{arc}} \mathrm{d}t \end{cases} \tag{1}$$

式中：P_{arc} 为电弧功率；u_{arc} 为电弧电压；i_{arc} 为电弧电流；W_{arc} 为电弧能量；T 为电弧持续时间。

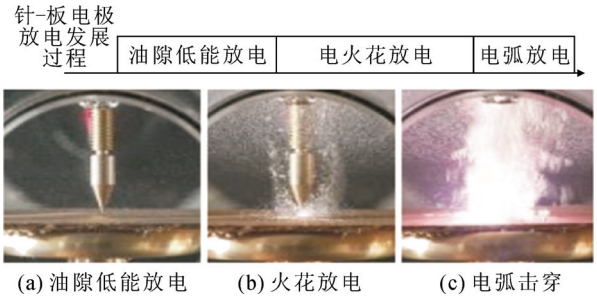


图 5　针板油纸放电发展过程

Fig.5　Developing process of pin-to-plate oil-paper barrier discharge

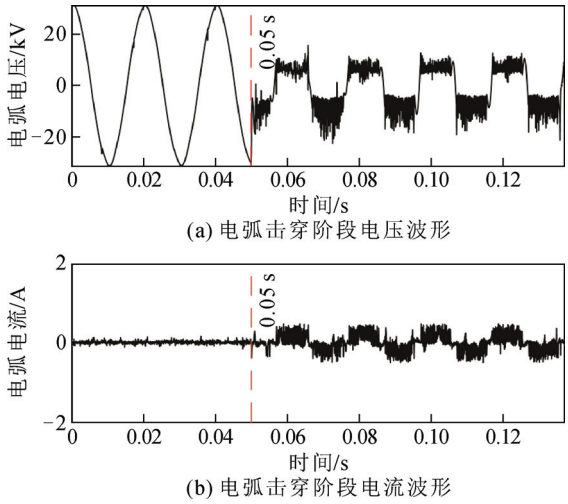


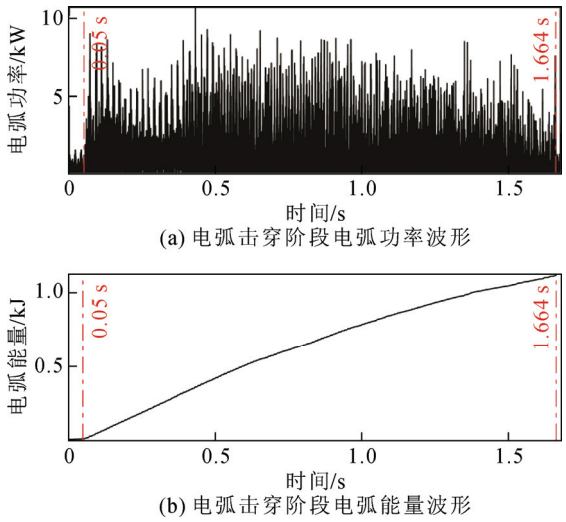
图 6　电弧击穿阶段典型电压、电流波形

Fig.6　Typical voltage and current waveform during break-down stage

根据实验中测得电弧电压与电弧电流数据，计算得到电弧功率以及电弧能量曲线如图 7 所示。整个电弧阶段起于 0.05 s，止于 1.664 s，持续时间为 1.614 s，累积电弧总能量达到 1 141 J。

此处选取 1 组针板油纸放电试验中电弧击穿阶段所测得典型压强数据进行分析，如图 8 所示。

由图 8 可知，在发生电弧击穿后，在电弧激励下，油箱内部先产生了一个较大的初次冲击波，随后这一分量振荡衰减。电弧击穿阶段的整体压强波形由 3 种频率的压强分量叠加而成，分别是周期为 0.3 s 左右的低频分量、周期为 2~4 ms 的中频分量与周期为 0.15 ms 左右的高频分量。选取图 8 中顶面压强数据进行频谱分析，如图 9 所示。频谱中共出现 3 处较明显尖峰，分别对应频率为 3.05、381 与 6568 Hz。分别对应前文中所述的低频分量、中频分量与高频分量。



(a) 电弧击穿阶段电弧功率波形

(b) 电弧击穿阶段电弧能量波形

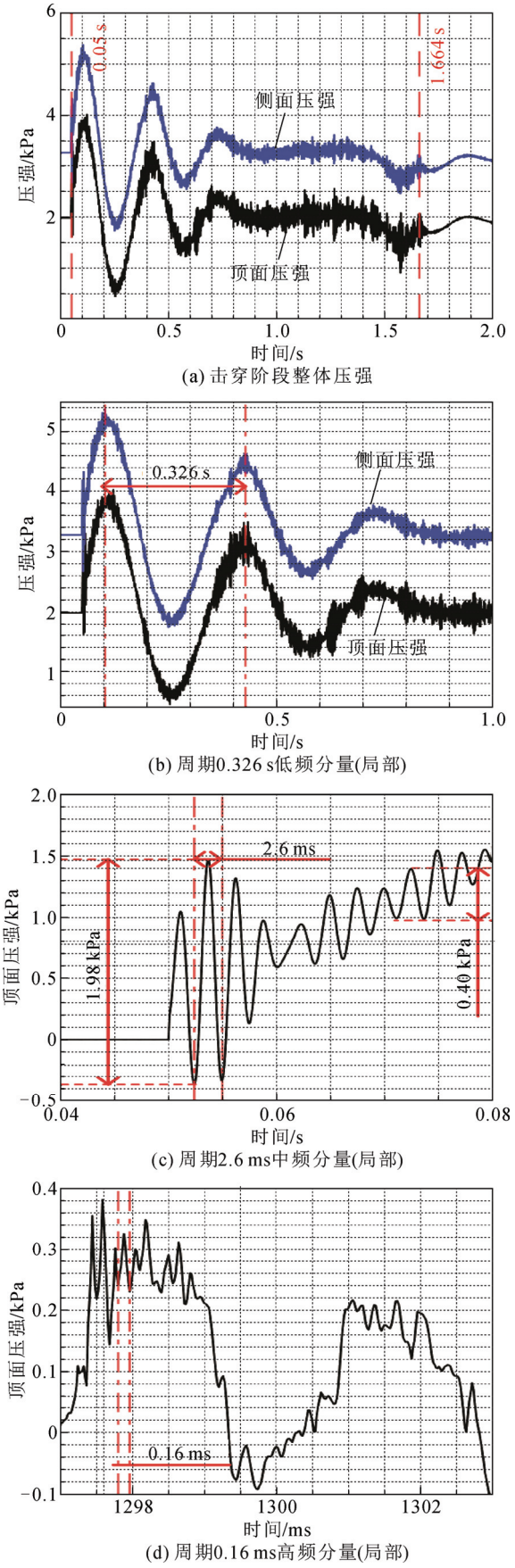
图 7 电弧击穿阶段电弧功率与电弧能量波形

Fig.7 Power and energy waveform of arc during breakdown stage

2.2 柱板结构沿面放电

柱板沿面放电的放电形式相较于针板油纸放电更为复杂，是一种同时沿横向和纵向双向发展的复合放电，既存在油纸界面上的沿面流注放电，又存在电极边缘的楔形油隙放电，在含有强垂直分量的沿面电场作用下纸板存在沿横向和纵向的同时劣化，表现为击穿后纸板上同时存在碳环和爬电痕迹。其发展过程也可以分为 3 个阶段，分别为楔形油隙放电、滑闪放电与持续性闪络阶段，如图 10 所示。楔形油隙放电阶段与针板结构油隙放电较为相似，柱板交界处不断有小碎气泡溅射而出；滑闪放电阶段伴随有若干次的间歇性闪络，有电火花从柱板交界处沿纸板向外爬电，或由板电极沿纸板面向内爬电，单次爬电时通常伴随小缕气泡群依次向上运动；持续性闪络阶段可类比电弧击穿阶段，电弧不易熄灭，发出耀眼火光，大量产气。

柱板沿面放电发展过程中的持续性闪络阶段与针板油纸放电中的电弧击穿阶段的电压电流波形以及压力信号特征均有很强的相似性，压力信号也由 3 种频率分量叠加而成，此处不再做具体分析。而相比于针板油纸放电，除去最后的持续性闪络阶段，压力信号在滑闪放电阶段也有明显的波动，该阶段的典型电压、电流波形如图 11 所示。此次沿面闪络发生于正半波，在半个周波内连续发生了 3 次闪络，而后电压波形恢复正常。分析可知，相较于电弧持续击穿阶段，该阶段放电间隔较长，电弧维持时间较短，且电压过零熄弧后电弧不会发生重燃，



(a) 击穿阶段整体压强

(b) 周期0.326 s低频分量(局部)

(c) 周期2.6 ms中频分量(局部)

(d) 周期0.16 ms高频分量(局部)

图 8 针板油纸放电电弧击穿阶段箱壁压强特征

Fig.8 Pressure characteristics during breakdown stage of pin-to-plate oil-paper barrier discharge

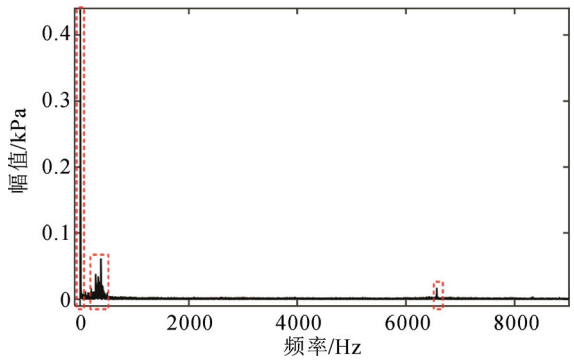
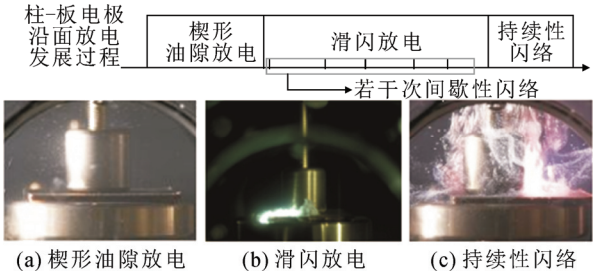


图 9　针板油纸放电压力信号频谱

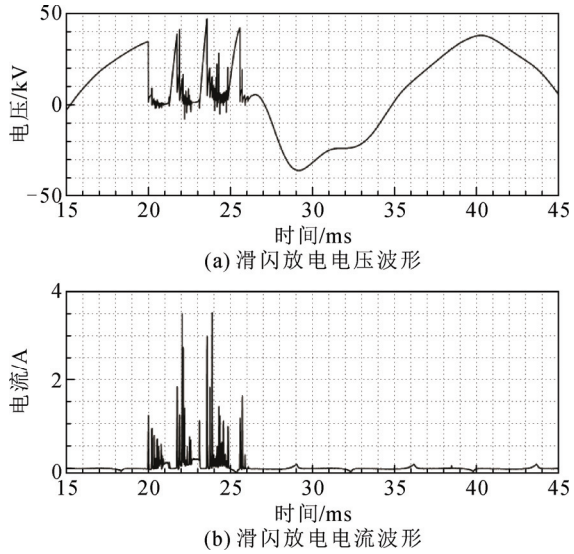
Fig.9　Frequency spectrum of pressure signal under pin-to-plate oil-paper barrier discharge



(a) 楔形油隙放电　(b) 滑闪放电　(c) 持续性闪络

图 10　柱板结构沿面放电发展过程

Fig.10　Developing process of surface discharge under column-plate structure



(a) 滑闪放电电压波形

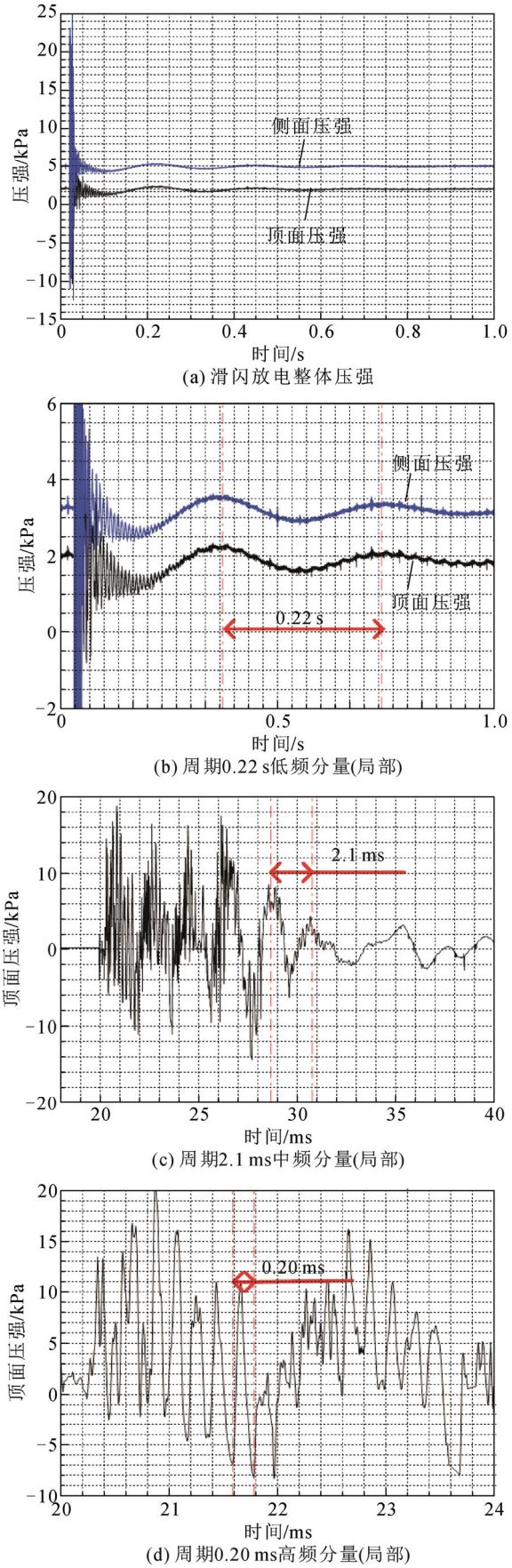
(b) 滑闪放电电流波形

图 11　滑闪放电典型电压、电流波形

Fig.11　Typical voltage and current waveform during slip-flashing discharge stage

3 次闪络累积电弧能量仅为 23.5 J。

此处选取 1 组柱板沿面放电试验中滑闪放电阶段所测得典型压强数据进行分析，见图 12。



(a) 滑闪放电整体压强

(b) 周期0.22 s低频分量(局部)

(c) 周期2.1 ms中频分量(局部)

(d) 周期0.20 ms高频分量(局部)

图 12　柱板沿面滑闪放电阶段箱壁压强特征

Fig.12　Pressure characteristics during slip-flashing stage of surface discharge under column-plate structure

由图 12 可知，在滑闪放电阶段，压强波形也先出现了一个较大的初次冲击波，随后振荡衰减。其初次冲击波的幅值明显大于前文所分析电弧击穿所引起的初次冲击波，而其电弧总能量却远小于持续击穿阶段的电弧能量。这是因为电弧击穿阶段的电弧能量是在长达 1.614 s 的时间内累积达到的，而间歇性闪络仅持续不到半个周波，电弧总能量较小，但电弧功率却更大。可见初次冲击波的幅值大小主要取决于电弧功率的大小。另一方面，滑闪放电阶段所测得的整体压强波形也由 3 种频率的压强分量叠加而成，分别是周期为 0.2 s 左右的低频分量、周期为 2~5 ms 的中频分量与周期为 0.20 ms 左右的高频分量。选取图 12 中顶面压强数据进行频谱分析，如图 13 所示。频谱中共出现 3 处较明显尖峰，分别对应频率为 4.76、478 与 5120 Hz。分别对应前文中所述的低频分量、中频分量与高频分量。

3 讨论与分析

试验中针板油纸放电的电弧放电阶段和柱板沿面放电的滑闪放电阶段与持续性闪络阶段所测得压力信号有明显波动，且波动特征具有很强的一致性，均由低、中、高这 3 种频率分量叠加而成，此处对其形成原因进行讨论分析。

1）压力波低频分量

试验中电弧击穿阶段以及滑闪放电阶段的压力波中的低频分量是由于试验箱体内绝缘油的周期性涌动造成的。当电弧产生时，绝缘油在高温电弧作用下发生气化、分解，产生大量气体，同时油中气体在浮力作用下向箱体顶部汇集。在气泡的产生和向上运动的过程中，会对周围绝缘油产生两方面的作用，一方面，混合气体的密度远小液态绝缘油，则其占据的体积远大于分解前对应同等质量液态绝缘油所占据的体积，短时间内体积的急剧增大对绝缘油造成了强烈挤压，推动液体向油枕剧烈涌动；另外一方面，大量气体向上运动的过程中，因为气泡与绝缘油之间的粘滞力作用，使得绝缘油发生一定程度的翻涌。以上两方面的作用，导致了绝缘油周期性涌动，冲击箱体壁面。

由于质量流的形成相较于压力波的传递更慢，这一分量的变化周期较长，其波幅值随着时间逐渐衰减，第一个波峰的幅值最大。随着质量流的形成，绝缘油从罐体内冲出，从而起到了泄压的作用，导致这一周期分量的幅值逐渐减小。由于试验罐体的几何结构不完全对称，绝缘油会从一侧的油枕连接管涌出，且气体的产生及运动的方向随机性较大，均会对绝缘油的涌动行为有一定影响，所以这一分量表现出来的周期在一定范围内波动。这一压力波分量的周期受设备尺寸、形状、绝缘油总质量和电弧产气量等固有条件的影响较大。

2）压力波中频分量

试验中所测得的压力波中的中频分量是由于电极间的等离子通道处形成的高温高压气泡膨胀–坍塌交替发生的脉动过程释放的压力波传播到试验箱体壁面所导致。这一分量的形成可以用液电效应中的机械效应来解释，随着放电发生，大量电能注入放电通道，在高温电弧作用下，周围绝缘油迅速升温，气化分解，形成高温高压气泡，包裹电弧。气体内部高压迫使气–液两相界面迅速膨胀，挤压周围油体，进而产生压力波向外传播，其初次冲击波形成的压力远大于其后的脉动压力波的峰值。随着气泡膨胀，气体体积变化，气泡内部压强随之变化，导致气泡发生膨胀–坍塌交替的脉动过程，如图 14 所示。气泡的脉动会再次释放压力波，直至气泡无法维持形态而消失。

气泡脉动的本质是气体内能、机械能与势能之间的相互转化。根据能量守恒，气泡膨胀对外部绝

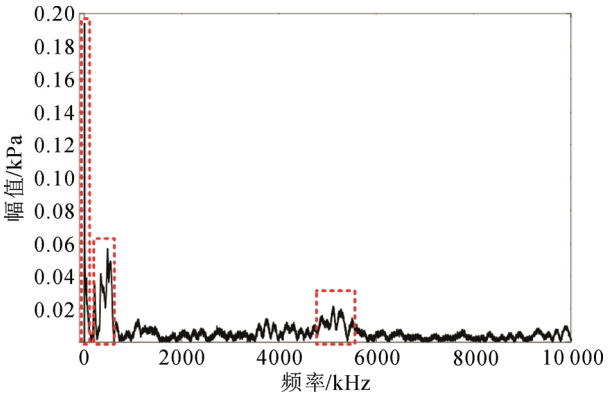


图 13 柱板沿面滑闪放电阶段压力信号频谱

Fig.13 Frequency spectrum of pressure signal under slip-flashing discharge stage

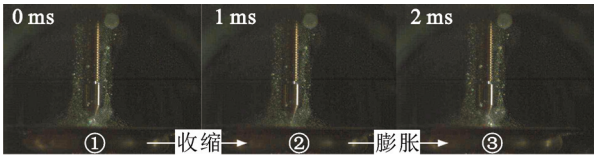


图 14 针板油纸放电气泡膨胀-收缩脉动过程

Fig.14 Picture of bubble pulse under pin-to-plate oil-paper barrier discharge

缘油液体做功，转化为周围液体动能，这一过程可以用气泡动力学模型来描述，此处选用Rayleigh-Plesset[22]方程表征气体压强和气泡半径之间的关系为

$$r\frac{\mathrm{d}^2r}{\mathrm{d}t^2}+\frac{3}{2}\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)^2+\frac{4\nu}{r}\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\rho}\left(p_{\mathrm{gas}}-\frac{2\sigma}{r}+p_{\mathrm{v}}-p_{\infty}\right) \tag{2}$$

式中：r 为气泡半径；ν 为液体运动粘度；ρ 为液体密度；p_{gas} 为气泡内部气体压强；σ 为表面张力系数；p_{v} 为液体饱和蒸汽压；p_{∞} 为远场压强。

而与一般液电效应中所讨论的脉冲放电不同的是，在试验中的电弧击穿阶段以及滑闪放电阶段均有多次放电发生，即在第一次放电产生气泡后，气泡并非自由振荡，而是其内部持续有高温电弧释放能量，激励气泡发生受迫振动。而电弧传递到气泡中的能量，其中一部分使气体温度升高，内能增大；另一部分使气体体积膨胀对外界绝缘油液体做工表示为

$$\mathrm{d}W_{\mathrm{heat}}=\alpha\mathrm{d}W_{\mathrm{arc}}=\alpha P_{\mathrm{arc}}\mathrm{d}t=C_{\mathrm{v}}n_{\mathrm{gas}}\mathrm{d}T_{\mathrm{gas}}+p_{\mathrm{gas}}\mathrm{d}V_{\mathrm{gas}} \tag{3}$$

式中：W_{arc} 为故障电弧能量，其中传递到混合气体中的能量为 αW_{arc}，α 为能量转换系数；P_{arc} 为电弧功率；W_{heat} 为电弧加热混合气体的能量；C_{v} 为定容混合气体比热，取 2.84 kJ/(kg·K)；n_{gas} 为混合气体总物质的量；T_{gas} 为气体温度；V_{gas} 为气泡体积。

结合式(2)、式(3)与气体状态方程，可建立数学模型描述油中气泡在内部电弧持续激励下内部压强以及气体体积的变化特征。由数学模型可知，这一压力波分量的幅值主要受电弧功率影响，在电弧熄灭后逐渐衰减；其周期主要受绝缘油气化分解所产生混合气体的理化性质以及电弧功率影响，受设备尺寸、形状影响较小。

3）压力波高频分量

试验中得到的压力波动数据中的高频分量的周期在 0.2 ms 左右，这一频率分量的形成是由于放电瞬间产生的冲击波在油箱箱体内不断反射叠加所致。区别于之后气泡脉动产生的周期波动的压力波，电弧形成瞬间产生的初次压力波，可以认为其是一个冲击波，即此时电弧从无到有瞬间产生，气体迅速产生并向外膨胀，此处的压力产生了阶跃式的变化，在极短的时间内就到达了第 1 个波峰。随着其辐射性传播，冲击波衰减为声波，在绝缘油中以声速传播，幅值随传播距离衰减。故该分量的周期可以认为是以变压器油中声速在试验箱体传播 1 个来回所用时间。试验中箱体尺寸为 300 mm×200 mm×300 mm，变压器油中声速理论值为 1420 m/s 左右，因此在试验箱体中横向和纵向传播 1 个来回的理论时间在 0.15~0.21 ms，与试验中测得的高频压力分量的周期较相符。这一压力波分量的周期主要受设备尺寸以及内部结构的影响，考虑到工程实际中油浸式电力设备尺寸差异较大，且内部结构复杂，故可能难以测得幅值较为明显的这一分量。

4 结论

1）根据试验中针板结构油纸放电以及柱板结构沿面放电的发展过程中的放电特征可以对其进行阶段划分。针板油纸放电的发展过程可以分为低能油隙放电、火花放电和电弧放电这 3 个阶段；柱板沿面放电的发展过程可以分为楔形油隙放电、滑闪放电和持续性闪络这 3 个阶段。压力信号在针板油纸放电的电弧击穿阶段以及柱板沿面放电的滑闪放电和持续性闪络阶段有明显的波动。

2）在两种类型的电弧激励下，压力的波动特征有很强的一致性，基本都可以认为由 3 种频率的压力分量叠加而成，分别是周期为 0.2~0.4 s 的低频分量、周期为 2 ms 左右的中频分量与周期为 0.2 ms 左右的高频分量。

3）压力信号中的低频分量是由于电弧作用下气体的急速产生、膨胀以及上浮带动试验箱体内绝缘油发生周期性涌动造成的。这一压力波分量的周期受设备尺寸、形状、绝缘油质量和电弧产气量等固有条件的影响较大。

4）压力信号中的中频分量是由于放电通道处电弧形成的高温高压气泡膨胀–坍塌交替发生的脉动过程释放的压力波传播到试验箱体壁面所导致的。这一分量可以用液电效应的相关数学模型进行描述，其周期受设备尺寸形状等外部条件影响较小。

5）压力信号中的高频分量是由于放电瞬间产生的初次冲击波在油箱箱体内不断发生折反射叠加所致。这一压力波分量的周期也受设备尺寸以及内部结构影响较大。

试验中得到的压力信号特征，特别是中频压力分量的出现，可以作为判断油浸式电力设备内部是否有电弧发生的依据，从而对其内部情况进行诊断。相比传统的机械式非电量保护，结合压力信号的“中频”特征可以在更早期且更快地发现故障，且能更好地识别累积能量较低的电弧故障。相比于传统的

电流差动保护，压力信号对于轻微匝间故障等端部电流变化微弱的电弧故障更为敏感。而相比于其他放电监测手段，压力信号在且仅在故障发展后期阶段形成贯穿性电弧后才有明显波动特征出现，将其作为保护依据具有更高的可靠性。综上所述，开发基于压力特征的新型数字式非电量保护方案将是今后进一步研究的方向。

参考文献 References

[1] 王梦云. 2004 年度 110 kV 及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备，2005(11)：35-41.
WANG Mengyun. Statistics and analysis of 110 kV and the above transformer fault in 2004[J]. Electrical Equipment, 2005(11): 35-41.

[2] 王梦云. 110 kV 及以上变压器事故与缺陷统计分析[J]. 供用电，2007(1)：1-5.
WANG Mengyun. Statistic analysis of transformer's faults and defects at voltage 110 kV and above[J]. Distribution & Utilization, 2007(1): 1-5.

[3] DUARTE D. Aspects of transformer fires in Brazil[J]. Open Journal of Safety Science and Technology, 2012, 2(3): 63-74.

[4] 高宗宝，江建明，单银忠，等. 500 kV 电力变压器着火事故分析研究[J]. 电工技术，2016(4)：52-53，59.
GAO Zongbao, JIANG Jianming, SHAN Yinzhong, et al. Analysis and study on fire accident of 500 kV power transformer[J]. Electric Engineering, 2016(4): 52-53, 59.

[5] Working Group A2.33. Guide for transformer fire safety practices[R]. Paris, France: CIGRE, 2013.

[6] KAWAMURA T, UEDA M, ANDO K, et al. Prevention of tank rupture due to internal fault of oil-filled transformer[C]//Proceedings of the International Conference on Large High Voltage Electric Systems. Paris, France: CIGRE, 1988.

[7] BRADY R, MULLER S, DE BRASSY G I, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 2-development and application of a numerical simulation tool[C]//Proceedings of the ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. Chicago, USA: ASME, 2008: 49-58.

[8] BRADY R, MULLER S, PETROVAN-BOIARCIUC M, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 3-design of efficient protections using numerical simulations[C]//Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference. Prague, Czech Republic: ASME, 2009: 667-675.

[9] BRODEUR S, DASTOUS J B. Design and testing of an arc resistant power transformer tank[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 699-706.

[10] DASTOUS J B, LANTEIGNE J, FOATA M. Numerical method for the investigation of fault containment and tank rupture of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1657-1665.

[11] MULLER S, BRADY R, DE BRESSY G I, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 1-experimental tests on large transformers[C]//Proceedings of the ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. Chicago, USA: ASME, 2008: 357-365.

[12] 唐 炬，尹 佳，张晓星，等. 基于压力和特高频的少油设备绝缘联合在线监测[J]. 高电压技术，2020，46(2)：546-553.
TANG Ju, YIN Jia, ZHANG Xiaoxing, et al. On-line monitoring of insulation defects of oil-less equipment based on pressure and UHF[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 546-553.

[13] 刘泽洪，卢理成，周远翔，等. 变压器升高座区域电弧故障与压力特性研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(13)：4688-4697.
LIU Zehong, LU Licheng, ZHOU Yuanxiang, et al. Research on pressure characteristics of AC turret on arc fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4688-4697.

[14] LANDIS B, MULLER S, PETROVAN-BOIARCIUC M, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 4-development of a fluid structure interaction numerical tool[C]//Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference. Prague, Czech Republic: ASME, 2009: 45-53.

[15] 闫晨光，张保会，郝治国，等. 电力变压器油箱内部故障压力特征建模及仿真[J]. 中国电机工程学报，2014，34(1)：179-185.
YAN Chenguang, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Modeling and simulation of pressure characteristics of power transformer tanks' internal faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 179-185.

[16] 闫晨光，郝治国，张保会，等. 电力变压器油箱形变破裂建模及仿真[J]. 电工技术学报，2016，31(3)：180-187.
YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Modeling and simulation of power transformer tank deformation and rupture[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 31(3): 180-187.

[17] 张阿漫，汪 玉，闻雪友，等. 水下爆炸气泡动态特性研究综述[J]. 船舶力学，2009，13(5)：828-840.
ZHANG Aman, WANG Yu, WEN Xueyou, et al. Review of the dynamics of the underwater explosion bubble[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(5): 828-840.

[18] 逄春京. 水下爆炸气泡动过程的数值模拟研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2008.
PANG Chunjing. Numerical simulation of bubble pulsation produced by underwater explosion[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2008.

[19] 李 元，孙 滢，刘 毅，等. 液电效应及电火花震源的研究现状与展望[J]. 高电压技术，2021，47(3)：753-765.
LI Yuan, SUN Ying, LIU Yi, et al. Electrohydraulic effect and sparker source: current situation and prospects[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 753-765.

[20] 孙 冰. 液相放电等离子体及其应用[M]. 北京：科学出版社，2013.
SUN Bing. Discharge plasma in liquid and its applications[M]. Beijing, China: Science Press, 2013.

[21] 余 庆，张 辉，杨睿智. 基于 LS-DYNA 的液电效应冲击波数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2022，42(2)：024201.
YU Qing, ZHANG Hui, YANG Ruizhi. Numerical simulation of the shock wave generated by electro-hydraulic effect based on LS-DYNA[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(2): 024201.

[22] RAYLEIGH J. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. Philosophical Magazine, 1917, 34(200): 94-98.



李博宇(通信作者)
1997—，男，博士
主要从事电力系统继电保护方面的研究工作
E-mail: 1054816927@qq.com

LI Boyu
Ph.D.
Corresponding author



郝治国
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事电力系统继电保护、新能源接入电力系统方面的研究工作
E-mail: zhghao@mail.xjtu.edu.cn

HAO Zhiguo
Ph.D., Professor

收稿日期 2022-06-14 在线出版日期 2022-11-28 编辑 曾文君