第 50 卷 第 10 期：4315-4328 高电压技术 Vol.50, No.10: 4315-4328
2024 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241106

变压器油中电弧放电故障检测及防爆综述

刘　凯[1]，樊立科[1]，聂广博[1]，焦世伯[1]，邓　军[2]，吴广宁[1]
（1. 西南交通大学电气工程学院，成都 611756;
2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司，广州 510663）

摘　要：变压器作为电力系统中的重要核心设备之一，其油箱内部易产生电弧故障，从而产生超压，致使油箱破裂，导致漏油，严重时引起爆炸甚至火灾，对电力系统的稳定运行造成严重威胁。该文针对变压器内部电弧故障从压力波特性、仿真模型、油中电弧检测方法以及防爆技术等方面进行回顾，首先对压力波特性、仿真模型以及压力波传播规律进行了综述，其中重点介绍了 4 种压力波仿真模型并对比其优缺点；其次，根据电弧故障检测难度大、破坏性强等特点归纳了油中电弧检测技术及标准；此外，分析探讨了变压器电弧故障的关键防爆技术。最后根据电弧故障以及防爆技术分析现有挑战，并在此基础上对未来发展趋势进行展望。
关键词：变压器；电弧故障；压力波；电弧检测；防爆技术

Review of Arc Discharge Fault Detection and Explosion-proof Technology in Transformer Oil

LIU Kai[1], FAN Like[1], NIE Guangbo[1], JIAO Shibo[1], DENG Jun[2], WU Guangning[1]
(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. Ultra-high Voltage Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: As one of the important core devices in the power system, the transformer is prone to arc failure in its fuel tank, which may generate overpressures, resulting in a fuel tank rupture, resulting in oil leakage, explosion, or even fire in serious cases, thus poses a serious threat to the stable operation of the power system. In this paper, the internal arc fault of the transformer is reviewed from the aspects of pressure wave property, simulation model, oil arc detection method explosion-proof technology, etc. Firstly, the pressure wave property, simulation model, and pressure wave propagation law are reviewed including four pressure wave simulation models, and their advantages and disadvantages are compared. Secondly, in accordance with the characteristics of difficulty and destructive operation in the arc fault detection, the technology and the standard of arc detection in oil are summarized. In addition, key explosion-proof technology for transformer arc faults is analyzed and discussed. Finally, current challenges are analyzed according to arc fault and explosion-proof technology future development trend is forecast on this basis.
Key words: transformer; arc fault; pressure wave; arc detection; explosion-proof technology

0　引言

变压器作为电力系统中至关重要的组成部分，承担着电能的传输与分配重任[1]，不仅在输变电站中起到电压变换的关键作用，还通过优化电力传输提高电网的运行效率和稳定性，确保电能能够有效地从发电厂传输到终端用户。随着变压器持续运行，电场应力、高温以及机械负荷影响可能导致其性能逐渐衰退[2]，绝缘强度减弱，甚至出现绝缘失效引发电弧放电现象。当变压器内部发生短路故障时，电弧会引发变压器油的化学分解和物理汽化过程，释放出的气体会吸取电弧的能量，促使局部温度急剧上升并伴随体积膨胀[3-4]。然而，由于变压器油的存在，这种膨胀过程通常会受到某种程度的抑制。压力差的持续存在会形成一系列压力波，压力波的累积效应会使变压器内部承受较高压力。一旦变压器油箱承受的压力超过其最大机械强度限制，会使之破裂，甚至可能引发爆炸。压力增加因素主要包括电弧能量的大小、持续时间以及具体位置。在变压器发生初级爆炸时，若不及时处理通过裂口释放出来的变压器油、混合气体和油雾等，其与空气混

基金资助项目：国家自然科学基金(52377161；52007158)；四川省自然科学基金(2023NSFSC0831)；国家重点研发计划(2022YFB4301202-17)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52377161, 52007158), Natural Science Foundation of Sichuan Province(2023NSFSC0831), National Key R&D Program of China (2022YFB4301202-17).

合后点燃可能引发二次爆炸。当故障发生在狭小空间时，若不及时处理将会引起剧烈爆炸，对人员和设备构成极大威胁，同时也会对社会经济带来挑战[5-6]。当变压器发生内部电弧故障时，通常会经历以下阶段[7]。

1）电弧形成：变压器内部绝缘失效可能导致放电通道形成，引发高能量电弧。

2）气泡生成：高温电弧会汽化和分解周围变压器油，产生气泡。

3）压力波形成：高压高温迫使气泡快速膨胀，形成压力波。

4）压力波传播：压力波以声速传播，内部发生反射、聚焦和扩散。

5）保护动作：保护系统发出分闸指令，断路器切断电流。

6）压力增加：能量持续注入放电通道，气泡动态脉动、坍塌和分裂，压力逐渐上升。

7）故障处理：断路器切断电流后，气泡迅速冷却，内部压力降低。

然而，实际应用中，电弧故障实时有效检测与迅速切除面临着挑战，同时压力释放阀的自动泄压性能尚存优化空间。变压器的结构设计在应对突发电弧故障时面临结构强度不足等问题，这可能导致油箱在承受过大压力下发生持久变形，严重时破裂，进而增加了引发火灾的风险[8]。根据当前变压器防爆技术的研究背景，深入探究油中压力波特性和建立精确的电弧压力仿真模型显得尤为关键。这不仅能提高变压器的防爆性能，还能增强其安全性，有效保护人员安全和财产免受潜在风险。

本文详细探讨了近年来国内外关于变压器油中电弧检测技术及其防爆技术的前沿研究成果，分析了电弧引发的压力波传播过程，同时归纳了其典型的仿真模型，针对电弧检测技术的最新进展进行总结。在现有变压器防爆原理及其关键技术的基础上，本文着重提出了未来对于变压器油中电弧特性仿真模型、检测技术以及其防爆技术的研究重点。

1 油箱内部压力波分析

压力波传播模型分析是理解油中电弧故障的关键要素，能为变压器防爆提供技术依据。但是由于电弧本身特征因素的制约，实际获取试验数据十分困难。同时，压力波的传播过程受到多种因素的影响，包括介质的物理特性、电弧的几何形状以及初始压力条件等[9]，导致当前压力波传播模型的准确性较低和适用性难度较大。为了更精确地描述压力波的传播过程，指导防爆设计，须先对压力特性进行深入分析，然后建立更为准确的模型，揭示其影响机制，从而分析压力波的传播规律。

1.1 压力特性分析

刘泽洪等借助构建变压器升高座区域油箱内部的电弧放电故障模拟试验装置，采用电弧金属丝点火技术，进行大电流和高能量的模拟短路试验。试验中获得了在不同燃弧能量下升高座内部压强时域变化曲线。结果显示，当电流从 20 kA 增加至 40 kA 时，筒壁上的压强峰值从 0.79 MPa 增加至 1.17 MPa，结果反映了电流增加对内部压强的显著影响，同时验证压力释放阀装置的关键作用[10-11]。

Perigaud 等通过安装气体缓冲罐来提升变压器的防爆性能，进行变压器油中电弧试验研究，测得电弧能量约为 0.1~1 MJ，深入研究揭示了压力峰值与电弧能量之间呈现出明显的对数关联规律[12]。Tadokoro 等从气泡体积图像中分析表明，气液界面随着气泡体积变化而波动，并且由于气相体积的增加或减少，气相压力发生变化，电弧的液相压力由气泡变化和气泡体积对应的压力叠加产生[13-14]。

张广进等通过搭建 *RLC* 串联谐振电路产生电流峰值约为 1.26 kA 的油中电弧，以放电周期 5 ms 为例，所记录的电流、电压、压力波形见图 1[15]。从图 1 中可以观察到 *RLC* 电路产生周期为 5 ms、持续时间为 15 ms 的电流波形，呈现振荡衰减。电流峰值约为 1.26 kA。电弧电压在电弧开始和结束时迅速升高，而在电弧发展阶段保持相对稳定。从电

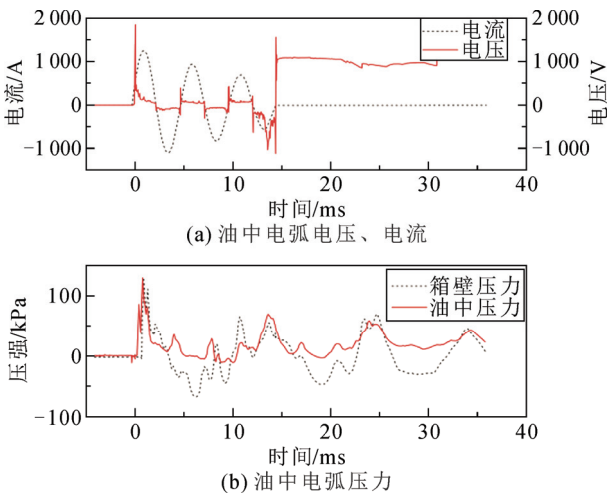


图 1 油中电弧电压、电流、压力波形

Fig.1 Waveform of arc voltage, current and pressure in oil

流开始约 0.3 ms 后，电压波形达到峰值，这表示在电弧丝熔断的时刻产生第 1 次激波，随后将电弧能量不断注入油中，导致压力迅速增加。根据图 1 压力波形的特征可以将其分为 2 个典型阶段——快速振荡阶段和持续稳定阶段。因此，该特征可为后续的电弧检测提供关键的技术支撑。

综上所述，电弧的能量往往伴随着显著的压力峰值，然而，两者之间的关系有待进一步探索，实际操作中，油中电弧引发的压力波动不仅受电弧注入的能量影响，而且受供电功率、间隙距离、电极设计规格以及气泡形态等多种因素影响[16]。因此，变压器在各部位产生的压力波特性具有显著差异，探究压力波的特性能为防爆技术设计提供依据。

1.2　压力波仿真模型分析

为了精确测定油中电弧导致的压力变化，并检验变压器的防爆设计效能，必须进行变压器内部电弧故障的模拟试验。因此，本节对已有压力波仿真模型总结分析如下所述。

1.2.1　有限元仿真模型

闫晨光等针对内部电弧故障引起的变压器超压问题进行研究，从能量转换的角度揭示储罐内部超压的物理过程，探讨电气故障与超压特性之间的关系。考虑到变压器油中电弧故障检测具有难度大、破坏性大、成本高等特点，提出理论模型与数值模拟方法相结合[17]。基于实际 240 MVA/220 kV 油浸式变压器的结构参数，建立相应的变压器模型。随后，采用三维有限元分析不同位置的瞬态超压特性，包括压力上升曲线和有效压力指数。模拟结果显示，电弧能量是影响罐内超压的主要因素，其次是电弧故障发生位置的影响[17-18]。

此外，闫晨光等在 110 kV 变压器槽内模拟了电流峰值为 17.6 kA 的不对称电弧故障，并将试验数据用于数值模拟的输入。初始气泡半径 R_0=0.015 m，初始边界压强 p_{d0}=101 kPa(大气压)，计算时间步长为 50 μs。图 2 展示了动态油压和油箱应力随时间的空间变化[18]。从图 2 中可以发现，随着电弧故障的出现，油压首先在故障位置附近升高，然后发展到变压器油箱内的邻近区域。随着电弧的持续，气泡在 t=30 ms 后保持一定的大小；在 t=50 ms 时，气泡开始第 2 次膨胀，此时相对较高的油压主要分布在顶盖两侧；当电弧在 t=77 ms 熄灭时，罐内的最大压力约为 160 kPa。在整个过程中，储油柜内部的压力保持在较低水平，主要是连接管的阻尼作用。

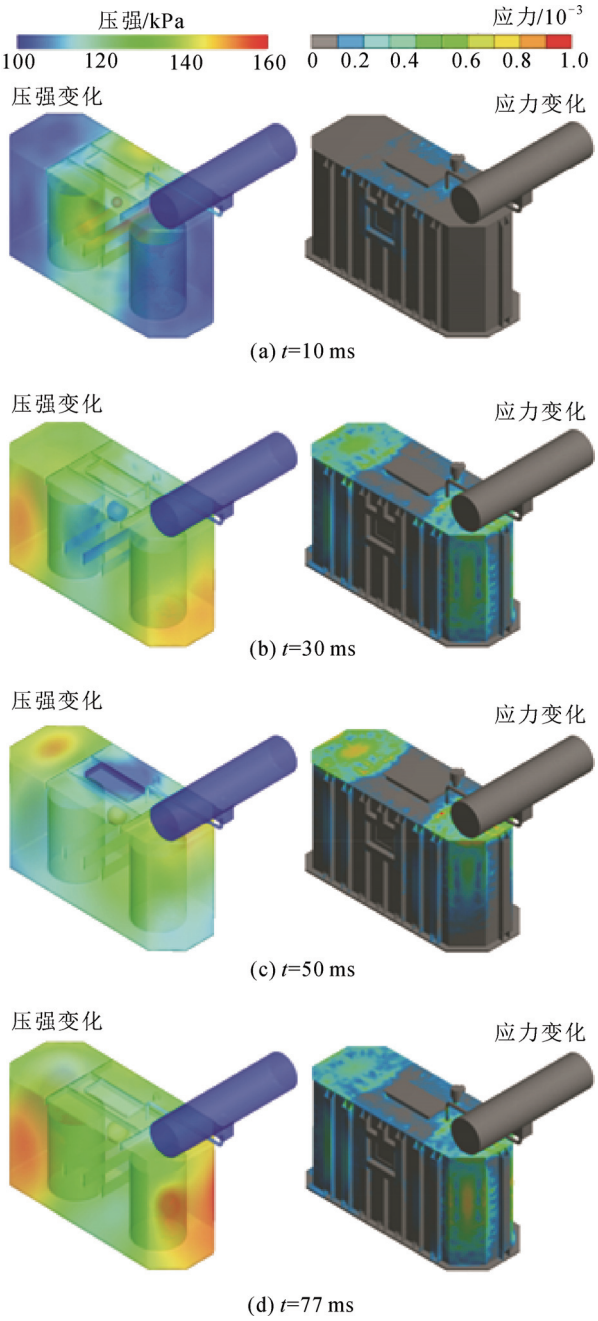


图 2　油压和油箱应变空间变化

Fig.2　Changes in oil pressure and tank strain space

1.2.2　流体力学仿真模型

该模型借助电流、电压以及能量变化，能够评估电弧活动状态，在故障区域引入指定的气体或能量。通过流体力学仿真分析压力波的产生、动态传播机制，以及在油箱内部引发的应力分布特征。两相流模型在模拟电弧中得到广泛应用[19-20]。

Baermr 等提出了两相流模型，该模型包含多个复杂的方程，适用于处理高速气液流动及界面追踪问题，计算较为复杂，但其理论价值显著[19-20]。Saurel 等在此基础上，对先前相对复杂方程进行优

化[21]。Kapila 等提出基于瞬时界面机械平衡的假设，对原始复杂的方程模型进行简化[22-23]。为深入理解气液界面，Allaire 等提出一种扩散界面方法，用于模拟具有一般状态方程的可压缩流体之间的界面。为每种流体的质量以及混合物的总动量和能量编写守恒方程[24]。Muller 等根据两相流模型的研究，在复杂的三维非结构化网格中求解相关方程。通过试验验证了该模型的准确性，在模拟变压器储罐(400 MVA)内部电弧故障时，其对压力波传播及结构响应能够精确描述。此外，该试验还验证了通过快速直接排油的防爆方法在减轻电弧爆炸压力波影响中的有效性[15,25-26]。Dastous 等采用两相可压缩模型分析压力变化和油箱形变对变压器内电弧故障的影响。结果显示该模型能够有效评估储罐设计的超压承受能力。然而，为确保结论的普遍性，需进一步研究不同型号变压器油箱并与试验验证[27-28]。李金忠等对分接开关内部电弧故障压力变化进行研究分析，发现电弧故障导致油箱内部产生高压气泡，形成球面压力波向周围传播。侧壁和底部监测点约在故障发生后 3.2 ms 左右达到最高压力，分别为 3 MPa 和 2.8 MPa。顶部监测点则相对滞后，约在 6.3 ms 时刻达到 5 MPa 的压力峰值，与试验相符[29]。该模型能够准确模拟电弧引起的气泡形成和油气混合过程。这对于分析变压器内部电弧产生的气体压力波以及其传播路径至关重要。通过此模型可以预测油箱内气体的扩散和油液的运动，有助于设计和评估防爆措施的有效性。但该模型较为复杂，导致计算成本较高。

1.2.3 声波仿真模型

声波模型通常用于描述由电弧或其他能量释放引起的压力波在液体或气体介质中传播的过程。在变压器油箱内部，电弧产生的能量会导致局部的气体膨胀，从而形成压力波。这些压力波在油箱内通过气体的压缩和膨胀传播，类似于声波在空气或液体中传播的方式。

闫晨光等基于声波传播建立了变压器故障压力模型油箱瞬态力学模型以及压力场结构场耦合模型。基于以上模型分析油箱内压力分布、压力波传播以及油箱箱壁应力分布的变化[30-33]。

声学模型能够有效地模拟由电弧引起的压力波在油箱内的传播路径和速度，并且能够分析压力波的传播和应力变化。但难以对电弧产生的气泡在油箱内表面的非线性效应进行分析。

1.2.4 炸药等效仿真模型

Kawamura 等将变压器油箱电弧故障等效为炸药模型[33]。Muller 等研究表明电弧释放的能量中，大约 82%的能量被消耗在使变压器油蒸发这一过程当中，而剩余的 18%则转化为压力波[34]。Heudier 等通过试验，运用水中炸药模型模拟变压器油中电弧压力，分析得到压力的能量约为 4 600 kJ/kg[35]。陈苏文等研究发现，电弧故障负荷具有多峰、持续时间长等特点，导致变压器内部爆炸，故障位置、压力分布和变压器罐强度的不均匀性是爆炸发生的关键因素，并且提出新型防爆装置[36]。张振福等借助炸药爆炸模型对水下放电冲击波的特征进行研究，模拟了波的传播行为[37-39]。

该模型能够精确模拟电弧引发的局部能量释放过程。通过模拟类似于炸药爆炸的能量释放，能够准确地预测在变压器油箱内形成的压力波的强度和传播速度。但需要精确的能量释放参数来进行校准，这些参数通常需要从实际测试或者试验中获取，限制了其在预测未知条件下的适用性。

综上，对已有的变压器压力波仿真模型进行了归纳概述，表 1 对上述模型进行对比分析，进一步探讨压力波在电弧故障中的传播规律，有助于深入理解其对变压器安全性性能的影响。

1.3 压力波的传播规律

变压器油箱电弧产生的压力波在变压器防爆技术中扮演着关键角色。理解压力波的传播规律对于设计和实施有效的防爆措施至关重要。通过深入研究电弧故障时压力波在变压器内部传播路径，从而最大程度地减少电弧故障可能带来的损害。这不仅有助于保护电力设备和系统的安全运行，还能提升设备的可靠性和持久性，确保电力供应的稳定性。

闫晨光等对压力波的仿真结果显示，当变压器在运行过程中发生短路故障时，电弧产生能量，使罐内温度升高，从而使得绝缘油的温度升高，使其汽化产生压力波，并且油箱内不断上升的压力作用于油箱，使其发生爆炸[17]。当压力波在绝缘油中传播时，沿压力波传播路径上任意点的瞬态压力是正向和反向行波矢量的叠加。

韩明明等运用有限元仿真软件建立了变压器油箱的模型[40]，分析油箱内和壁面压力的变化以及影响这一现象的因素。结果表明，匝间短路失效后，变压器壁压随时间的增加而增大。压力波从圆弧的初始位置向外围传播，并随着扩散作用而减小。通

过选择合适的放压阀位置，可以减少压力对变压器油箱的影响，从而防止压力上升致使油箱破裂。白博峰等利用两相流模型对压力波的传播规律进行研究[9]。结果表明，压力波的传播规律受含气率和扰动角频率的双重影响。当含气率(体积分数)<0.05 时压力波的传播速度会随含气率增加快速而下降，当含气率>0.05 时压力波的传播速度会随含气率增加而缓慢下降，呈指数下降规律变化。但随着扰动角频率增加，波速会不断增加，以 200 Hz 为界限，呈对数上升规律变化[9]。

综上所述，压力波传播主要受壁面压力、压力释放阀、含气率以及扰动角频率的影响。但对压力波传播的因素研究不够全面，下一步须从工况、频率、介质以及温度等影响因素对压力波传播规律进行分析，并深入研究压力释放阀设计对压力波传播的影响，以完善对压力波传播规律的理解。在压力波传播的研究背景下，电弧检测技术也显得尤为重要。电弧的发生往往伴随着压力波的变化，因此，通过对电弧信号的检测可以有效地分析压力波的传播特性与规律。

表 1　压力波仿真模型对比

Table 1　Comparison of pressure wave simulation models

仿真模型	模型介绍	优点	缺点
有限元仿真模型[17]	基于守恒方程，包括质量守恒、动量守恒和能量守恒方程等来描述了内部压力、速度和密度的变化，及其如何随时间和空间位置变化	高精度、适应性强 、动态响应分析成本低	依赖于准确的初始条件和模型假设
流体力学仿真模型[18-19]	借助可压缩两相流模型，向故障部位排入气体或能量的电弧故障仿真	能够准确模拟电弧引起的气泡形成和油气混合过程，并且可预测油箱内气体的扩散和油液的运动	模型较为复杂进而导致计算成本较高，且结果依赖于模型的精确度
声波仿真模型[29-32]	基于声学模型，计算电弧气泡表面压差，估算压力波，然后计算压力传播、声固耦合等过程	能够有效地模拟由电弧引起的压力波在油箱内的传播路径和速度，并且分析压力波的传播和应力变化，计算量小	难以对电弧产生的气泡在油箱内表面的非线性效应分析
炸药等效仿真模型[37-39]	炸药爆炸其原理是通过炸药爆炸释放的能量来模拟油中电弧释放能量，从而进行仿真分析	分析压力传播过程，计算量小	需要精确的能量释放参数来进行校准

2　油中电弧检测方法

在电弧故障检测中，区分电弧故障信号和正常信号至关重要。当油箱内部出现电弧故障时，通常会伴随着电压和电流波形的显著变化，同时也会出现声音、振动、光、压力波和电磁能释放等现象，这些都是故障电弧的指示[16]。电弧的检测在工业领域中具有重要意义，选择适合的检测方法和设备，以及优化测量参数和环境，成为电弧检测领域重点解决的问题。

2.1　IEEE、IEC 等电弧检测标准

根据 IEC61869-1：2007、IEEEC57.13.5：2019、IEEE/IEC63253-5713-8 以及 IEC61869-1：2023 等变压器一般标准，对变压器油中电弧检测技术规定如下：

1）电弧检测技术主要涵盖内部电弧电流、电压、电弧起始位置以及电弧故障期间释放的能量累积等方面。

2）电弧检测装置应能够准确、及时地检测到变压器内部的电弧故障，并输出相应的电弧检测信号。

3）要求检测技术具备可靠性高、抗干扰能力强、使用方便等特点，以保证其在变压器运行过程中的稳定性和可靠性。

上述标准旨在明确预期性能水平，缺乏详细的技术说明，但有助于减少潜在的标准解释差异和重新测试的可能性。

2.2　基于电流信号检测

基于电量的电弧故障检测方法通常可分为电流特性和电压特性两大类[41]。当变压器内部出现电弧故障会引起电流波形异常变化，通过电流传感器检测电流信号，使用信号处理等技术分析频率、振幅和相位变化，从而检测电弧故障[42]。

Jun-Ho Jeong 等人提出了一种新型电流传感器[43]，利用罗氏线圈方法检测电弧信号，并设计了相应的信号转换电路以提高其检测灵敏度和准确性。此外，Giovanni Artale 等指出电流检测故障特性主要集中在谐波含量、零静止奇点等特征，虽灵敏度较高[44]，但由于谐波成分特性与一些非线性负载电流难以区分，因此电流检测方法的有效性受到一定限制。

总体而言，电流信号的电弧故障检测方法通过分析电流波形的异常变化来识别故障，利用信号处理技术提高检测的准确性。尽管这种方法灵敏度较高，但谐波成分难以与非线性负载电流相区分。

2.3 基于电压信号检测

当变压器油中发生电弧故障时，电弧电压波形呈现明显的特征，通常近似于矩形波或梯形波。此时，电弧电压在零区持续时间非常短，且变化率较大，在电流过零时达到最大值，因此可通过电压传感器来检测其波形特征[45]。

王伟等提出利用电压特性频带能量信息来检测电弧故障[41]。根据故障电弧电压波形的特点，将负载分为开关电源和非开关电源。为了检测电弧电压，利用电压特性的总能量和相位映射分布距离，构建了复合检测策略，以满足多种负载类型故障的故障检测。

电弧电压波形特征检测方法具有直观、适用性广和高灵敏度的优点，但受环境影响大、精度低、误报率高。基于电压特性频带能量的复合检测策略则提供多维度信息和强抗干扰能力，但其较为复杂且计算成本较高，依赖数据质量。

2.4 基于磁场信号检测

发生电弧故障时，由于电流的突变和电弧本身的特性，会在周围空间产生一个磁场。通过传感器检测到的磁场变化信号经过放大和处理后，可以通过分析磁场的强度、方向和变化速率等特征来判断电弧的位置和特性。

贾云飞等对油中磁场进行检测[46]，根据变压器油中电流的特性在过零点必定会产生电磁脉冲，虽然理论上可以实现对电弧故障的检测，但是由于火花放电、局部放电等产生的电磁脉冲会对此产生干扰，因此将火花放电、局部放电产生的电磁脉冲有效区分对于准确检测电弧是至关重要的。D.Cajal等提出了一种所谓的磁性相机，通过磁场测量低压断路器(low voltage circuit breaker，LVCB)油中的电弧现象[47-50]。

磁场传感器通常具有较高的灵敏度和响应速度，但须克服火花放电和局部放电等干扰。磁性相机虽然在设备复杂性和成本上可能较高，但其提供的多通道数据和强抗干扰能力使其在复杂应用场景中更具优势。

2.5 基于压力波检测

基于压力波特性检测变压器电弧，通过压力传感器检测电弧初期产生的瞬时高频压力波和电弧发展阶段的稳定周期性压力波，从而实现对电弧故障的实时准确检测。在电弧初期，压力波的突增和高频特征可迅速识别电弧的发生，而在电弧发展阶段，持续且稳定的压力波则帮助确认故障的存在及其严重性。

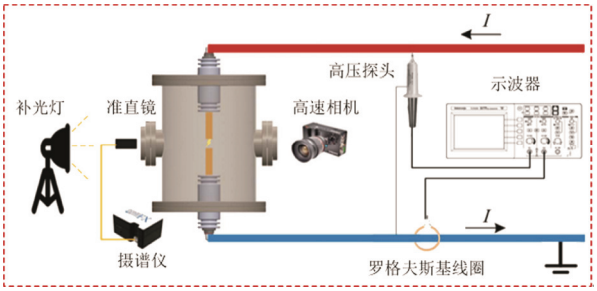
郜世杰等基于电弧压力效应对变压器电弧故障进行检测[45]，从理论上分析当油箱内产生压力可以通过比例微分传感器对电弧故障检测。贾云飞等基于压力波特征对变压器的电弧故障进行了有效检测[46]。在电弧初期，检测到的压力波形状短暂且急剧，频谱中含有高频成分，反映出电弧初始阶段的瞬时热释放和介质扰动。随着电弧的发展，压力波的波形则变得更为持久，呈现出更长且更平缓的脉冲，频谱中的低频成分逐渐增强，反映出持续的能量释放和介质膨胀。

通过压力传感器对压力波检测，电弧初期检测速度较快、反应灵敏，但容易受火花放电干扰且准确率较低。电弧发展阶段准确率较高、受外界因素影响较小，但检测时间较长。

2.6 基于光信号电弧检测

基于光信号检测油中电弧主要应用光学测量技术。当变压器内部发生电弧时，会产生高温和高压的等离子体，从而产生光辐射。通过光学传感可以实时监测到这些光信号的变化。

光信号检测变压器油中电弧放电现象是较为成熟的检测技术[51-53]。变压器油中发生电弧放电时会产生大量的等离子体，包括原子、分子、带电粒子等，通过各种复杂相互作用，形成发射光谱。这种光信号以光速传播，具有很强的抗干扰性。Rozga 等研究液体介质在标准雷击击穿时的光谱特性，在间隔距离为 10 mm 的点平面电极设置中引发的击穿电弧进行光谱测量[54]。韩若愚等测量铜线在纯气体、纯水、半水半气环境中放电时间为 20~30 μs 的电爆炸积分谱[55]。李玉洁等研究了 SF_6 在火花放电和表面放电下的发射光谱[56]。贾双瑞等搭建油中大电流电弧试验平台如图 3 所示，并对油中电弧的光学特性进行了测试，为光信号检测油中电弧提供了参考[57]。



I—基于电容电感谐振法模拟电弧产生的工频大电流

图 3 油中电弧光学特性测试平台

Fig.3 Testing platform for optical characteristics of arc in oil

光信号的电弧检测方法通过检测电弧产生的光信号具有实时性强、检测灵敏度高以及适用于复杂环境等优点。但该方法易受外部光源影响、检测精度有限，并且对光信号处理要求高、局限于特定波长。

2.7　基于光声信号检测

光声检测主要基于电弧故障产生的有机气体，在变压器电弧故障相关气体中，C_2H_2 是唯一在极高温度故障(超过 700 ℃)时专门释放的气体[58-59]。虽然局部放电故障可能会产生微量的 C_2H_2，但当产生的 C_2H_2 体积分数>10^{-6} 时，表明已发生电弧。

周升等人提出溶解气体分析(dissolved gas analysis，DGA))浸入式光声光谱仪(intelligent partial discharge analysis system，iPAS)，基于光纤的拉曼光谱吸收光谱或电化学传感器来检测溶解的 C_2H_2 如图 4 所示[60-61]。

基于光声的电弧检测方法优点是可以实现非接触式检测，具有高精度和快速响应的特点，能够准确地识别电弧的存在和位置。该检测方法需要专门的设备和技术支持，成本较高。

综上，电弧的检测技术在不断发展中取得了显著的进步，但仍面临许多技术和应用上的挑战。各种检测方法各有优劣，需要根据具体应用场景进行选择和优化。基于油中电弧电测方法对比分析如表 2 所示。未来的研究应继续提升测量设备的精度和可靠性，深入研究电弧适应复杂环境的测量技术。同时，多种测量方法的结合应用和数据融合处理将是提高检测结果准确性和全面性的有效途径。通过技术创新和方法改进，电弧检测技术将在电力领域发挥更为重要的作用。

3　关键防爆技术

3.1　变压器防爆与减压的标准

IEEEC57.12.00—2021 标准是针对液浸式配电变压器、电力变压器以及稳压变压器的一般要求，IEEEC57.12.10—2023 标准针对 833 kVA 及以上单相、750 kVA 及以上三相变压器进行规定。

1）变压器在正常运行时，油箱中最大压力不应高于 203 kPa。

2）变压器油箱必须满足当所受压力超过其压力极限的 25%时，油箱不能发生变形。

3）对于容量超过 2 500 kVA 或电压等级超过 200 kV 的变压器，必须在其顶部安装压力释放阀。

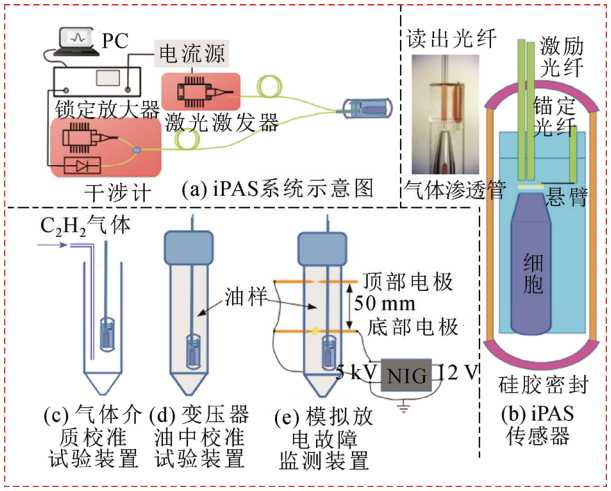


图 4　iPAS 系统测试装置

Fig.4　iPAS system and test device

表 2　电弧检测方法对比

Table 2　Comparison of arc detection methods

电弧检测方法	适用场合	传感器类型	判据	优缺点
电压检测[41]	各种电压等级的变压器	电压分压器、电压变送器	电弧电压在零区时间间隔非常短，且变化率较大，在电流过零时最大	灵敏度较高、抗干扰能力强，但受环境影响大、精度低并且计算成本高
电流检测[41]	各种电压等级的变压器	霍尔效应传感器、电流互感器	电弧故障引起的电流波形异常变化	灵敏度较高、特征明显，但需要在负载侧设置监测点，成本高
电磁检测[45]	中、高电压等级的变压器	电磁传感器、磁通门传感器、磁阻相机	电流过零时必产生电磁脉冲	灵敏度较高、实时性强、适用性广泛，但容易误报，精度低，受其他干扰因素较大
压力波检测[46]	高电压等级变压器	压电传感器、声波传感器	根据压力波快速振荡阶段和持续稳定阶段	电弧初期：灵敏度高，检测相对迅速，但准确率低，易受火花放电干扰； 电弧发展：准确率较高、受外界因素影响较小，但检测时间较长
光检测[54]	高电压等级变压器	光电传感器、光纤传感器	燃弧瞬间会产生光信号	响应速度快，灵敏度高、定位准确，适用于高温和高压等复杂环境，但易受环境光的影响，成本较高，需要合理的布局规划，局限于特定波长
光声检测[58]	结合光和声波检测技术，适用于高电压等级的变压器	光声传感器、光声谱仪	电弧故障产生 C_2H_2 气体	灵敏度高，响应速度快，但易受环境噪声的影响，信号处理复杂，成本高

变压器设计测试中需要证明其油箱的形状、类型都满足 IEEE C57.12.00 标准的要求。但是 IEEE C57.12.00 和 IEEE C57.12.10 这 2 个标准只给出了变压器工作于正常运行状态下的压力极限要求，并没有给出在变压器发生异常情况下(如发生内部电弧故障)对压力极限的要求。

3.2 电弧故障诊断切除

瓦斯保护、纵差保护以及电流速断保护在变压器保护当中扮演着至关重要的角色。当发生电弧故障时，重瓦斯保护虽具备一定的反应机制，但其动作时间通常会有约几十毫秒的延迟，纵差保护和电流速断保护在识别此类故障的过程中也有延迟。为高效准确地诊断电弧故障，并促使断路器迅速断开，使其有效阻止电弧能量快速扩散，当变压器出现电弧故障时，会伴随产生声、电磁波、压力、热量以及化学反应等多类型故障信息。通过多类型故障信息对电弧故障实施高效快速的检测，但精确的阈值设定策略、先进识别算法以及有效防止误报的控制机制，需要进一步深入研究。断路器在接收到分闸指令后，会经历一段响应时间以确保顺利完成分闸动作。利用快速断路器技术能大幅提升故障响应速度，同时有效地控制并减少故障释放的能量影响。依照 DL/T5222—2021 标准[62]，在电压等级高于 110 kV 的电力网络中，若须迅速隔离故障区域，应选择能够在极短时间内完成断开操作的断路器，时间须小于 0.04 s。

3.3 安全气道

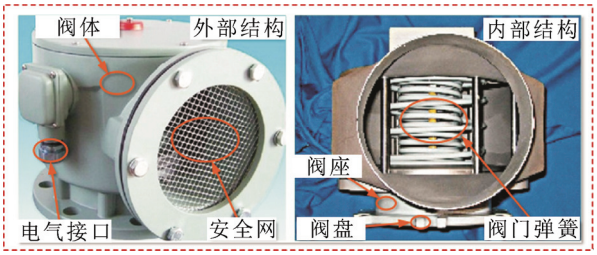
20 世纪 80 年代，变压器的设计普遍采用单一的安全气道作为主要的爆炸压力释放系统。其核心设计目标包含：当变压器内部承受异常高压会引发油箱潜在危险时，预设的安全气道中的易爆膜会在压力骤升时自动破裂，即时泄压，以确保油箱结构的稳固与安全；一旦膜破裂，安全气道引导释放的油气向着可控的方向排放，有效地降低了油气扩散引发火灾的潜在威胁[63-64]。

实际操作中，安全气道时常遇到响应不迅速甚至完全失效的问题，主要源于易爆膜，如玻璃材质等，其不具备明确的预设爆破压力，而是依赖统计分析来决定，这将导致在内部故障发生时，油箱的破裂时间会先于膜片破裂的风险。为应对这一挑战，郑桐等在膜片表面引入控制痕迹，目的是抑制爆破压力的上升及波动幅度，然而，这种措施却带来了膜片提前失效的可能性[64]。安全气道的设计面临油柱惰性的挑战，由于压力源位于油箱内部，而膜片位于安全气道的顶端，使得压力波必须先克服油柱阻力才能抵达膜片而造成滞后，延长安全气道的响应时间。在油箱实际破裂前，安全气道的有效防护功能可能会被显著削弱。

3.4 压力释放阀

早期的压力释放阀主要采用破裂盘(又称防爆膜或爆破片)构造。当压力超过安全范围时，破裂盘会破裂，提供释放压力的通道。然而，一旦破裂，变压器就会暴露在外界环境中。因此，Goodman 等研发了一种能够多次密封的压力释放阀系统，即压力释放阀[65]。这种系统能够在高压力下快速启动，但由于压力传输到阀门位置的响应时间较长，因此许多电弧故障未能及时启动。典型压力释放阀装置如图 5 所示。研究表明，在长时间电弧放电情况下，压力释放阀效果显著；但对高能量电弧放电，其保护作用有限。Abi-Samra 等指出，内部电弧故障位置、规模及持续时间会影响压力释放阀的效果[66]。当电弧现象出现在变压器顶部时，压力释放阀展现出良好的效能，能有效控制和释放压力。当电弧出现在变压器底部，即便顶部的油箱处于全开状态，仍然存在油箱破裂的风险。内部电弧释放的压力波效应会使得局部区域压力显著上升，从而导致油箱破裂。小型变压器能够迅速释放压力避免油箱破损，但是对于大型变压器由于电弧能量显著增强，可能导致压力超出释放阀的设计范围。赵志刚及其团队在电弧研究中发现，电弧故障若发生在接近压力释放阀的位置，能够迅速释放储存的气体，从而有效实现压力缓解。若故障位置离释放阀较远，只会排放出变压器油。即便安装了多个大型的压力释放阀，其减压效能不如变压器结构本身应力产生形变自然提供的效果[67]。

Roseberg 等深入研究油的黏性特性[68]，假设在变压器发生故障时，压力释放阀能迅速启动并维持



(a) 外部结构 (b) 内部结构

图 5 典型压力释放阀

Fig.5 Typical pressure relief valve

最大流速运作，并且探讨了 100 MVA 变压器的压力释放效率与影响因素。研究显示，为了在 3 个操作周期内将由 3~7 MJ 电弧故障引发的压力降低 30%，须使用直径较大的 140 cm 泄压阀，相比之下，如果采用仅有 25 mm 直径的泄压阀，仅仅能实现压力下降的 3%。压力释放阀的常见问题包括：安装位置不理想，其往往安置于顶部，然而此处正好是分接开关、绕组、套管故障高发部位；其控制机制也存在问题，一部分依赖于传感器检测压力并通过电信号操控阀门，这种设计存在响应延迟。

另外，阀门的孔径设置不合理，这直接影响其启动速度和减压效能。鉴于此陈苏文等提出通过强化油箱结构能够有效防止低能级电弧的冲击，同时为可能产生的电弧区域设计结构性弱点如破裂盘，关键部位如油箱端部和套管应装配有效的泄压装置[36]。

综上所述，在小容量变压器和低能量电弧的环境中，压力释放阀展现出良好的效果和高效性能。然而，对于大型变压器和高能量电弧，由于安装位置不合理、压力波传递效率低、机械反应时间过长以及阀门孔径设计不足等因素，难以快速响应或未能有效降压。在后续研究当中，研究更加精密的油中电弧压力仿真模型，深入优化泄压阀的安置策略，包括精确选择其安装位置、细致调整直径参数以及合理设计阀门的数量配置，防止变压器遭受潜在的破裂风险。

3.5　油箱制造技术

强化变压器油箱结构以提升防爆性能是必要的措施。然而，过度的强化可能减少油箱的形变能力，使其在面对电弧冲击时内部压力意外增加。在高压力下，油箱一旦损坏将带来严重的安全风险[69-71]。因此，变压器油箱的设计需要在强化结构的同时克服其潜在缺陷，确保在电弧故障情况下能有效地分散压力，实现均衡的应力分布，从而提升整体的防爆性能。

1）优化油箱关键结构

变压器油箱的易损部位主要集中在顶盖与箱体连接处、箱壁角落的焊接线、底部与侧壁的接合处以及套管穿孔位置[66]。针对这些薄弱环节，可采取多种强化措施：在接缝处运用 C 型夹具[34]，采用焊接或圆形盖板，增设上下连接处的加强筋，并在较大穿孔周围添加补强结构[66]。另外，可考虑在套管升高座安装固定“腰带”[27]，并用整块弯板取代 90°角处的焊接[7]。

2）油箱升级改造

研究气泡体积与油箱变形之间的动态关系，发现在变压器满载油状态下，电弧引发的气泡能够有效地适应并被油箱的形变所吸收。通过提升油箱的变形能力，可以有效地扩大电弧气泡的形成空间，从而在电弧故障状态下缓解压力，实现更有效的防护。Brodeur 等提出具有弹性的变压器设计理念[70]。设计思路不仅着眼于强化油箱的耐压性能，也要考虑应力的均衡分布，在维持必要刚性的同时，也预留出适宜的形变余地，同时兼顾效能与安全性。图 6 展现了现有 3 种变压器油箱。

Brodeur 等通过强化关键脆弱区域，增强油箱的适应性，设计出 1 台额定电压为 330 kV、容量达 210 MVA 的全尺寸变压器。为评估安全性能，通过空气注入能量技术，模拟时间持续长达 50 ms、释放能量高达 20 MJ 的电弧故障。经过测试，该变压器具有良好防爆能力[71]。此外，研究还显示，在变压器结构中预留适当的气体空间能有效降低电弧故障引发的油箱内部压力上升现象[34,72-73]。此设计有效提高了变压器电弧故障安全性和可靠性。

油箱的结构是变压器重要的组成部分，其设计直接影响到变压器的性能、安全性和维护便利性。表 3 是对油箱的结构、优缺点对比分析。

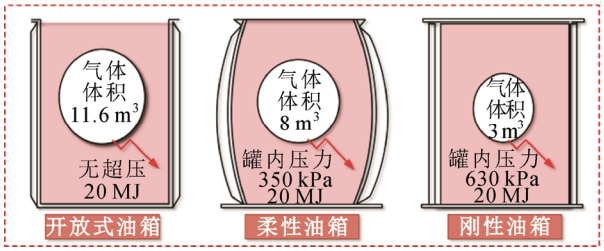


图 6　变压器油箱

Fig.6　Transformer tank

表 3　油箱对比分析

Table 3　Comparative analysis of fuel tanks

油箱类型	结构介绍	优点	缺点
开放式油箱	油箱通常是敞开，油液与空气直接接触	散热效果好、维护简便、成本低	易污染、存在火灾和爆炸风险
柔性油箱	通常采用柔性材料制成，能够随油液体积的变化而膨胀或收缩	压力调节效果好、密封性好、质量小	不耐用、散热差、成本较高
刚性油箱	由金属或其他坚固材料制成，形状固定，不能随油量变化而改变	耐用性强、散热条件好、密封性好	成本高、质量大

3.6 新型防爆技术

Muller 等提出排油注氮技术可有效防止变压器油箱爆炸，通过快速排油和注入氮气的方式，能够迅速响应电弧产生的压力波。当变压器发生低阻抗故障时，电弧导致油中液体蒸发和气泡形成，快速增压，若未及时处理，油箱内部压力急剧上升，可能导致爆炸。排油装置能迅速排出油气混合物，降低内部压力；同时，注入氮气减少氧气浓度，有效防止火灾，避免设备损坏。该技术不仅提升了设备的安全性，还避免了因设备损坏而导致的停电和火灾等重大事故[74]。如图 7 所示，展示了排油注氮防爆装置。尽管该设备在功能上表现出良好性能，但其成本高且占用空间较大，对于减压效率的影响因素需要深入探究和优化。

电弧故障时常出现在有载分接开关、绕组以及绝缘薄弱的套管等结构当中。通过有效隔离措施，能够减小电弧故障所影响范围。萧烈等人提出新型防爆技术，将有载分接开关与变压器进行隔离，并且研制出防爆隔板。通过 6.5 MJ 油中电弧试验，产生高达 1.277 MPa 的压力，证实隔板在电弧故障释放能量时能够有效防止爆炸事故发生，从而为电力设备的安全运行提供了重要保障[75]。

卢理成等创新性地设计出以爆破片为核心的新型高效压力释放系统[76]。该系统经过燃爆试验与动态等效试验的双重验证，结果表明爆破片型压力泄放装置在高能量电弧故障条件下表现优异。新型装置的设计使其在操作速度和泄放效率上显著优于传统的压力释放阀。如图 8 所示，该爆破片装置能够在短时间内迅速释放内部压力，有效防止因压力积聚导致的变压器燃爆风险，从而为变压器防爆技术提供了更为可靠的方案。

通过上述对现有的关键防爆技术进行综述，表 4 总结了现有关键防爆技术的优缺点，以帮助评估其在不同应用场景中的适用性。

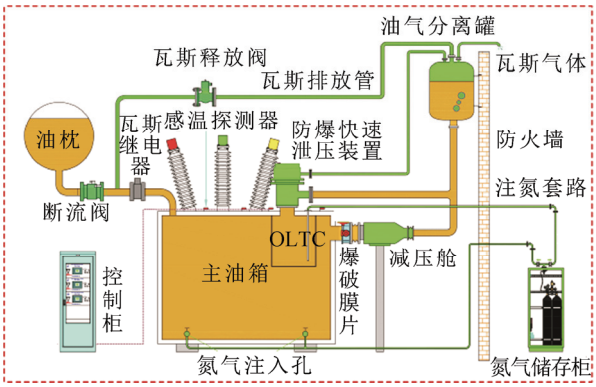


图 7 排油注氮防爆装置

Fig.7 Explosion-proof device for oil discharge and nitrogen injection

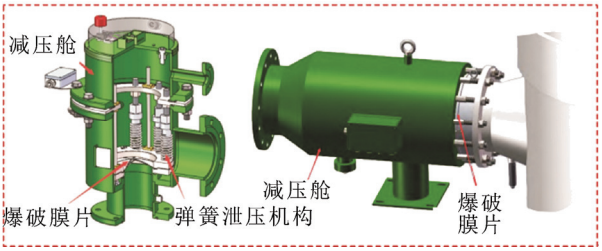


图 8 爆破膜片型泄压装置

Fig.8 Bursting diaphragm type pressure relief device

表 4 防爆技术比较

Table 4 Comparison of explosion-proof techniques

防爆技术	优点	不足
电弧诊断切除技术[62]	电弧诊断切除技术能迅速识别故障并启动切除，有效遏制电弧能量扩展，提高系统安全性	快速切除技术需要复杂的设备，增加系统的成本和维护复杂度
安全气道[63]	能够迅速引导电弧能量释放，有效减少设备损坏和人员安全风险	爆破压力设定不精确、易过早破裂以及油柱传输延迟
压力释放[66]	在小容量变压器和低能量电弧下表现良好	大容量变压器和高能量电弧情况下，由于位置选择不当和响应时间长，其效果有限
油箱设计[70-71]	通过加强结构薄弱点和优化柔性设计，有效提升了防爆性能，确保在高能低阻抗故障时能够安全有效	过度增强油箱强度可能导致油箱形变减少，增加内部压力风险，需要在强度和柔性之间取得平衡
新型防爆技术[74-76]	排油注氮装置具有快速响应和有效减压的优点；防爆隔板技术有效将变压器的有载分接开关与主体分隔，减小故障的影响范围；爆破片型压力泄放装置在电弧故障下表现出优越的速度和泄放效率，有效预防了变压器燃爆事故	排油注氮装置高成本和占地面积大；爆破片型泄压装置的设计和安装需要确保在实际应用中的可靠性和耐用性

4 当前面临挑战与未来研究方向

4.1 当前面临的挑战

随着能源需求增长和电力系统发展水平加快，变压器作为电网的关键组成部分，其安全性和可靠性显得尤为重要。然而，面对当今复杂多变的运行环境和严格的技术要求，其面临以下挑战。

1）压力波传播特性分析不够明确。当前压力波仿真模型的准确性和适用性较差，由于不同类型

的变压器具有不同的油箱设计和尺寸，这些差异会对压力波的传播特性产生显著影响。油箱内部复杂的结构对压力波的传播路径、反射和衰减产生重要影响。对于电弧释放能量的精确量化和压力波在油箱内部的传递规律并不具体。

2）电弧检测技术精度低且易受外界干扰。各种检测方法存在着各自的局限性且受外界干扰较大，电流检测方法受到信号失真和随机性不可控特性的影响，电压检测方法需要在所有负载侧设置监测点且成本较高，磁场检测方法易受外界环境因素干扰，光检测方法受环境光影响较大，光声检测方法信号处理复杂且成本高。现有检测方法在实际应用中往往难以满足复杂环境下的高精度和可靠性要求。

3）关键防爆技术尚不成熟。现有的防爆技术在应对大容量变压器和高能量电弧时效果有限，存在位置选择不当、响应时间长等问题。油箱设计虽然通过加强结构薄弱点和优化柔性设计提升了防爆性能，但过度增强油箱强度可能导致内部压力风险增加，需要在强度和柔性之间取得平衡。新型防爆技术虽然具有快速响应和有效减压的优点，但排油注氮装置存在高成本和占地面积大的问题，爆破片型泄压装置的设计和安装也需要确保可靠性和耐用性。

4.2　未来研究方向

展望未来，随着新型电力系统不断扩大和智能化水平的提升，传统的电弧检测方法、压力模型评估分析以及相应防爆技术已难以满足这些需求。因此有待进行深入研究。未来具体研究方向如下所述。

1）深入研究压力波传播特性。建立高精度仿真模型，考虑变压器油箱的具体设计和尺寸、内部结构如隔板、散热器和绕组的影响。利用多尺度模拟技术，从微观到宏观层面，详细分析电弧能量释放和压力波传播的全过程，以统一和更清晰地了解其传播规律。通过现场试验获取真实数据，验证和优化仿真模型，整合多源数据提升对压力波传播特性的理解和预测能力。

2）高精度与智能化的电弧检测技术。使用高精密传感器进行电弧检测，提升检测精度和可靠性，这些传感器能够在复杂环境下准确捕捉电弧信号，并提供实时反馈。结合人工智能和大数据分析技术，开发智能化电弧检测系统，实时分析大量数据，实现对电弧故障的快速识别和定位。

3）提升防爆技术的智能化与高效性。在大容量变压器和高能量电弧应用中，通过优化位置选择和缩短响应时间等措施，进一步增强系统安全性。开发智能化的排油注氮装置和爆破片型泄压装置，在确保安全的基础上，降低成本、减少占地面积，同时提升系统的可靠性与耐用性。

5　结论

本文针对变压器油中电弧检测技术以及压力仿真模型等进行了回顾，并且基于当前变压器防爆技术面临的挑战，分析了其未来研究方向。综上所得结论如下所述。

1）通过对油箱内部压力波分析，运用有限元仿真模型、声学仿真模型、流体力学仿真模型以及炸药等效模型对油箱压力仿真，结果显示流体力学仿真模型更接近实际。压力波的传播规律主要受壁面压力、压力释放阀、含气率以及扰动角频率的影响，还需进一步深入研究。

2）油中电弧检测方法包括基于电学参数、磁性相机、光信号检测以及光声检测等。其中，电压、电流检测受外界干扰较大难以直接应用。光信号检测技术具有较高的抗干扰性和快速响应时间，适合用于检测电弧故障。光声检测溶解气体分析系统是必不可少的，可提供对即将发生的电弧故障预警。

3）通过优化油箱制造技术，包括强化结构薄弱环节、优化油箱柔性环节以及采用新型防爆技术，如排油注氮技术和爆破片型压力泄放系统等，可以有效提升变压器的防爆性能，未来可通过提升防爆技术的智能化与高效性来提高变压器的防爆性能。

参考文献　References

[1] 王树国，朱述友. 基于一种新型高速泄压技术的油浸变压器防爆防火方案研究[J]. 电气应用，2022，41(12)：51-57.
WANG Shuguo, ZHU Shuyou. Study on explosion proof and fire protection scheme of oil immersed transformer based on a new high speed pressure relief technology[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(12): 51-57.

[2] 程　祥，陶霰韬，叶　刚，等. 连续雷电冲击下的变压器油纸绝缘老化特性[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1958-1966.
CHENG Xiang, TAO Xiantao, YE Gang, et al. Aging characteristics of transformer oil-paper insulation under continuous lightning impulses[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1958-1966.

[3] 周　盟，罗传仙，郭家旭，等. 换流变压器内部电弧故障超压仿真研究[J]. 电工电能新技术，2024，43(5)：68-75.
ZHOU Meng, LUO Chuanxian, GUO Jiaxu, et al. Numerical study on overpressure caused by arcing faults inside a converter transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(5): 68-75.

[4] 曹隆建. 工频强电流电弧在非密闭充油容器中形成的压力[J]. 中国电机工程学报，1991，11(2)：67-73.

CAO Longjian. On pressure generation in an unsealed oil container by high current[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(2): 67-73.

[5] 李博宇，郝治国，李斯盟，等. 油浸式电力设备内部电弧引发的压力特征[J]. 高电压技术，2023，49(1)：198-206.
LI Boyu, HAO Zhiguo, LI Simeng, et al. Pressure characteristics of oil-immersed power equipment under internal arc[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 198-206.

[6] 吕俊霞. 电力变压器防火防爆措施及方法[J]. 精密制造与自动化，2010(4)：62-64.
LÜ Junxia. Power transformer fire-proof and explosion-proof precaution[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2010(4): 62-64.

[7] 贾云飞，汲胜昌，李金忠，等. 变压器油中工频电弧特性及变压器防爆研究综述[J]. 中国电机工程学报，2024，44(7)：2910-2926.
JIA Yunfei, JI Shengchang, LI Jinzhong, et al. Overview on the characteristics of power frequency arc in transformer oil and transformer explosion protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2910-2926.

[8] 朱思宇，汪书苹，杨 娴，等. 变压器油在电弧作用下的点燃特性[J]. 火灾科学，2021，30(3)：142-150.
ZHU Siyu, WANG Shuping, YANG Xian, et al. Ignition characteristics of transformer oil under arc[J]. Fire Safety Science, 2021, 30(3): 142-150.

[9] 白博峰，黄 飞. 两相流压力波传播规律研究[J]. 石油化工设备，2004，33(6)：1-6.
BAI Bofeng, HUANG Fei. Investigation on pressure wave propagation in two-phase flow[J]. Petro-Chemical Equipment, 2004, 33(6): 1-6.

[10] 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)：4688-4698.
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): 4688-4698.

[11] 种芝艺，卢理成，周远翔，等. 充油密封容器内电弧对燃弧压力产生特性的影响[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3876-3886.
CHONG Zhiyi, LU Licheng, ZHOU Yuanxiang, et al. Effect on pressure generation characteristics by arc in oil-filled closed tank[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3876-3886.

[12] PERIGAUD G, MULLER S, DE BRESSY G, et al. Contribution to the study of transformer tank rupture due to internal arcing development of a computer simulation tool[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.

[13] TADOKORO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Pressure rises due to arc under insulating oil in closed vessel-relationship between bubble behavior and pressure rises[J]. Electronics and Communications in Japan, 2016, 99(12): 91-102.

[14] TADOKORO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Pressure rises due to arc under insulating oil in closed vessel-pressure fluctuation of depth direction in oil[J]. Electrical Engineering in Japan, 2018, 202(2): 43-53.

[15] ZHANG G J, HAN T Y, WEN T, et al. The relationship between power of arc discharge in transformer oil and peak value of the shock wave[J/OL]. High Voltage, 2024: 1-10[2024-05-16]. https://doi.org/10.1049/hve2.12462.

[16] HU S, HUANG Z, LIU X, et al. Study on high energy discharge characteristics caused by arc faults in transformer turret[J]. IEEE Access, 2023, 11: 106924-106933.

[17] YAN C G, ZHOU X, XU Y, et al. Experimental study on the gas bubble temperature around an arc under insulation oil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1245-1248.

[18] YAN C G, XU C, LIU H, et al. Research on oil pressure rise and fluctuation due to arcing faults inside transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1483-1492.

[19] 殷 亮，蒋军成，程建杰，等. 等温可压缩两相流的 VOF 数值模拟[J]. 力学季刊，2010，31(4)：502-510.
YIN Liang, JIANG Juncheng, CHENG Jianjie, et al. Numerical simulation for isothermal compressible two phase flow with the volume of fluid (VOF) method[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(4): 502-510.

[20] BAER M R, NUNZIATO J W. A two-phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition (DDT) in reactive granular materials[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1986, 12(6): 861-889.

[21] SAUREL R, ABGRALL R. A multiphase Godunov method for compressible multifluid and multiphase flows[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 150(2): 425-467.

[22] KAPILA A K, MENIKOFF R, BDZIL J B, et al. Two-phase modeling of deflagration-to-detonation transition in granular materials: reduced equations[J]. Physics of Fluids, 2001, 13(10): 3002-3024.

[23] MURRONE A, GUILLARD H. A five equation reduced model for compressible two phase flow problems[J]. Journal of Computational Physics, 2005, 202(2): 664-698.

[24] ALLAIRE G, CLERC S, KOKH S. A five-equation model for the simulation of interfaces between compressible fluids[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 181(2): 577-616.

[25] MULLER S, BOIARCIUC M P, PERIGAUD G. Protection of oil-filled transformer against explosion: numerical simulations on a 200 MVA transformer[C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech. Bucharest, Romania: IEEE, 2009: 1-8.

[26] LANDIS B, BRADY R. Development of a fluid structure interaction tool for the study and prevention of transformer tank explosions[C]//IEEE PES T&D 2010. New Orleans, USA: IEEE, 2010: 1-8.

[27] 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.

[28] DASTOUS J B, TASCHLER E, BÉLANGER S, et al. A comparison of numerical methods for modeling overpressure effects from low impedance faults in power transformers[J]. Procedia Engineering, 2017, 202: 202-223.

[29] 李金忠，汪 可，任家帆，等. 分接开关油室电弧故障压力传播过程研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(20)：7651-7657.
LI Jinzhong, WANG Ke, REN Jiafan, et al. Study on pressure propagation process of arc fault in OLTC oil chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7651-7657.

[30] 闫晨光，郝治国，张保会. 基于压力特征的变压器数字式保护研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(24)：6405-6412.
YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui. Power transformer digital protection based on internal pressure characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6405-6412.

[31] YAN C G, HAO Z G, ZHANG S, et al. Correction: numerical methods for the analysis of power transformer tank deformation and rupture due to internal arcing faults[J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0137038.

[32] 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]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 180-187.

[33] 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.

[34] KAWAMURA T, UEDA M, ANDO K, et al. Prevention of tank rupture due to internal fault of oil-filled transformer[C]//International Conference on Large High Voltage Electric Systems. Paris, France: CIGRE, 1988: 1-7.

[35] HEUDIER L, SAKJI S, CHENAF M, et al. Resistance to explosion assessment of an electric transformer building[J]. International Journal of Safety and Security Engineering, 2019, 9(1): 61-72.

[36] CHEN S W, DU G, XIE Q, et al. A preliminary study on anti-explosion performance of UHV transformer[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Chongqing, China: IEEE, 2021: 1-4.

[37] 张振福. 水下冲击波聚焦的数值模拟与实验研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2012.
ZHANG Zhenfu. Numerical and experimental investigations on underwater shock wave focusing[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2012.

[38] 王一如. 水下脉冲流光放电冲击波特性数值分析研究[D]. 大连：大连理工大学，2019.
WANG Yiru. Numerical analysis study on shock wave characteristics of pulsed streamer charges in water[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2019.

[39] 刘小龙，张群飞，雷开卓. 水下强声源的多电极阵列聚束特性[J]. 高压物理学报，2017，31(2)：175-181.
LIU Xiaolong, ZHANG Qunfei, LEI Kaizhuo. Multi-electrode array bunching characteristics of underwater intense sound source[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(2): 175-181.

[40] HAN M M, ZHU M Z, GU Z L, et al. Investigating pressure patterns in transformer tanks after an interturn short circuit: a finite element approach[J]. Energies, 2024, 17(3): 564.

[41] WANG W, XU B Y, ZOU G F, et al. Arc fault detection method based on voltage characteristic energy amplitude and phase mapping distribution distances[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 225: 109866.

[42] 张轩瑞，王昊天，胡一丹，等. 电力变压器振荡型雷电冲击耐压试验及局部放电检测技术[J]. 高电压技术，2023，49(12)：5032-5041.
ZHANG Xuanrui, WANG Haotian, HU Yidan, et al. Oscillating lightning impulse voltage withstand test and partial discharge detection technology for power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5032-5041.

[43] JEONG J H, YOON Y H. Arc generation detection analysis of smart grid system using a new arc detection sensor of current measurement[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17(5): 3077-3084.

[44] ARTALE G, CATALIOTTI A, COSENTINO V, et al. Arc fault detection method based on CZT low-frequency harmonic current analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(5): 888-896.

[45] 郜世杰，罗宁昭. 船用中压变压器电弧故障检测方法研究[J]. 机电设备，2015，32(3)：78-81.
GAO Shijie, LUO Ningzhao. Research on arc fault detection of middle-voltage marine transformer[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2015, 32(3): 78-81.

[46] 贾云飞，贾双瑞，罗 迅，等. 变压器内部电弧故障快速检测方法研究与对比[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2158-2165.
JIA Yunfei, JIA Shuangrui, LUO Xun, et al. Research and comparison on rapid detection methods of transformer internal arc fault[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2158-2165.

[47] CAJAL D, LAURENT A, GARY F, et al. A study of the various phases of the break in a low-voltage circuit breaker thanks to the magnetic camera[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32(10): 1130-1135.

[48] LAURENT A, GARY F, CAJAL D, et al. A magnetic camera for studying the electric breaking-arc[J]. Measurement Science and Technology, 1993, 4(10): 1043-1049.

[49] BRDYS C, TOUMAZET J P, LAURENT A, et al. Optical and magnetic diagnostics of the electric arc dynamics in a low voltage circuit breaker[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(7): 1146-1153.

[50] TOUMAZET J P, BRDYS C, LAURENT A, et al. Combined use of an inverse method and a voltage measurement: estimation of the arc column volume and its variations[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(7): 1525-1533.

[51] BAUG A, CHOUDHURY N R, GHOSH R, et al. Identification of single and multiple partial discharge sources by optical method using mathematical morphology aided sparse representation classifier[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3703-3712.

[52] ZHENG S S, WU S Y. Detection study on propagation characteristics of partial discharge optical signal in GIS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 7005912.

[53] JIA S R, JIA Y F, BU Z W, et al. Detection technology of partial discharge in transformer based on optical signal[J]. Energy Reports, 2023, 9 Supplement 1: 98-106.

[54] ROZGA P, TABAKA P. Spectroscopic measurements of electrical breakdown in various dielectric liquids[C]//Proceedings of the IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Sydney, Australia: IEEE, 2015: 524-527.

[55] HAN R Y, WU J W, QIU A C, et al. A platform for exploding wires in different media[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(10): 103504.

[56] LI Y J, XIAO H Y, MA J T, et al. Emission spectrum analysis of SF_6 under spark discharge and surface discharge[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechanical and Electronics Engineering. Xi'an, China: IEEE, 2022: 208-212.

[57] JIA S R, JIA Y F, LUO X, et al. Optical signal characteristics of power frequency arc in transformer oil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(1): 675-678.

[58] SUN C H, OHODNICKI P R, STEWART E M. Chemical sensing strategies for real-time monitoring of transformer oil: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(18): 5786-5806.

[59] 刘展程，王 爽，唐 波. 基于 SSA-BiGRU-Attention 模型的变压器油中溶解气体含量预测[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2972-2981.
LIU Zhancheng, WANG Shuang, TANG Bo. Prediction of dissolved gas content in transformer oil based on SSA-BiGRU-Attention model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2972-2981.

[60] ZHOU S, IANNUZZI D. Immersion photoacoustic spectrometer (iPAS) for arcing fault detection in power transformers[J]. Optics Letters, 2019, 44(15): 3741-3744.

[61] SCHILT S, THÉVENAZ L. Wavelength modulation photoacoustic spectroscopy: theoretical description and experimental results[J]. Infrared Physics & Technology, 2006, 48(2): 154-162.

[62] 国家能源局. 导体和电器选择设计规程：DL/T 5222—2021[S]. 北京：中国计划出版社，2021.

National Energy Administration. Specification for design of the conductor and electrical equipment selection: DL/T 5222—2021[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2021.

[63] 王文铮. 从安全气道到压力释放器[J]. 变压器，1984，21(1)：28-29.
WANG Wenzheng. From safety airway to pressure release[J]. Transformer, 1984, 21(1): 28-29.

[64] 郑 桐. 变压器安全气道的正确应用[J]. 华北电力技术，1982(8)：23-26，36.
ZHENG Tong. Correct application of transformer safety airway[J]. North China Electric Power, 1982(8): 23-26, 36.

[65] GOODMAN E A, ZUPON L. Static pressures developed in distribution transformers due to internal arcing under oil[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(5): 1689-1698.

[66] ABI-SAMRA N, ARTEAGA J, DAROVNY B, et al. Power transformer tank rupture and mitigation-a summary of current state of practice and knowledge by the task force of IEEE power transformer subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1959-1967.

[67] 赵志刚，徐征宇，王健一，等. 大型电力变压器火灾安全研究[J]. 高电压技术，2015，41(10)：3378-3384.
ZHAO Zhigang, XU Zhengyu, WANG Jianyi, et al. Research on the fire safety of large power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3378-3384.

[68] ROSEBERG T, JANKOVIC I, HEDDING R. Transformer tank rupture-a protection engineer's challenge[C]//2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). College Station, USA: IEEE, 2017: 1-29.

[69] 龚 立，阮仁俊，陈昊宇，等. 电力变压器防爆技术与减压措施研究[J]. 变压器，2012，49(4)：43-47.
GONG Li, RUAN Renjun, CHEN Haoyu, et al. Research on power transformer explosion-proof technologies and pressure mitigation measures[J]. Transformer, 2012, 49(4): 43-47.

[70] Brodeur S, Dastous J B. Design and testing of an arc resistant power transformer tank[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 35(2): 699-706.

[71] 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.

[72] MAHIEU W R. Prevention of high-fault rupture of pole-type distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1698-1707.

[73] HAMEL A, DASTOUS J B, FOATA M. Estimating overpressures in pole-type distribution transformers. I. Tank withstand evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 113-119.

[74] MULLER S, BRADY R, DE BRESSY G, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 1-experimental tests on large transformers[C]//ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. Chicago, Illinois, USA: ASME, 2008: 1-9.

[75] XIAO L, KRAUSE C, SCHLITTLER B, et al. Verification of barrier-board over-pressure withstand capability and transformer operational risk mitigation by an explosion experiment[C]//2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Phuket, Thailand: IEEE, 2020: 310-313.

[76] 卢理成，董弘川. 特高压变压器油箱防爆措施及改进研究[J]. 全球能源互联网，2023，6(1)：64-70.
LU Licheng, DONG Hongchuan. Study on explosion proof measures and improvements for the UHV transformer tank[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 64-70.



刘 凯
1990—，男，博士，副教授，博导
主要从事电气设备多物理场计算与数字孪生、电气设备在线检测与故障诊断等方面工作
E-mail: liukai@swjtu.edu.cn

LIU Kai
Ph. D.
Associate professor



吴广宁(通信作者)
1969—，男，博士，教授，博导
主要从事电气设备绝缘在线监测、过电压及防护技术等方面研究工作
E-mail: gnwu@swjtu.edu.cn

WU Guangning
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2024-07-08 修回日期 2024-09-11 编辑 曾文君