第 50 卷 第 10 期：4273-4296 高电压技术 Vol.50, No.10: 4273-4296
2024 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241261

变压器电弧故障防爆燃技术现状与发展趋势

周远翔[1]，李宇航[1]，赵义焜[2]，滕陈源[1]，卢理成[1]，李　鹏[2]
（1. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京 100084；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘　要：变压器是输电系统中最重要的设备之一，变压器油箱内电弧放电引起的压力上升极易导致油箱爆炸甚至引发大规模火灾事故，严重威胁电力系统的安全运行。为此从变压器状态监测、状态评价等方面总结了变压器故障预警技术的发展，介绍了变压器电弧故障快速清除的策略，从变压器电弧故障压力特征研究、变压器油箱优化设计、压力释放技术等方面阐述了变压器本体防爆技术的发展，并简要介绍了变压器火灾消防技术。另外，对比分析了现有变压器防爆燃技术的优势与不足，提出从预警、清除、防爆、消防等 4 个层级建立全面立体的变压器电弧故障爆燃防御体系，为变压器电弧防爆燃技术发展、保障输电系统安全可靠运行提供完整的思路。
关键词：变压器；电弧故障；爆燃；立体防御体系；快速清除技术；压力特性；防爆设计；消防系统

State and Prospects of Explosion-combustion Prevention Technology for Transformer Arc Faults

ZHOU Yuanxiang[1], LI Yuhang[1], ZHAO Yikun[2], TENG Chenyuan[1], LU Licheng[1], LI Peng[2]
(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Transformer is one of the most important devices in a power transmission system. The pressure rise caused by arc faults in the transformer oil tank can easily lead to tank explosion and even combustion, causing large-scale fire accidents and posing a serious threat to the safe operation of the power system. In this paper, the development of transformer fault warning technology is summarized from the aspects of transformer status monitor and evaluation, the strategy for quickly clearing transformer arc faults is introduced, and the development of transformer explosion-proof technology is elaborated from the aspects of transformer arc fault pressure characteristics research, transformer oil tank optimization design, and pressure release technology. Transformer fire protection technology is also briefly introduced. Based on summarizing the research on transformer arc fault explosion, this paper proposes a comprehensive transformer arc fault explosion defense system at four levels: fault warning, elimination, explosion prevention, and fire protection. This paper provides a complete idea for the development of transformer explosion-proof technology and for ensuring the safe and reliable operation of the power transmission system.
Key words: transformer; arc fault; explosion-combustion; defense system; quick clearing technology; pressure characteristics; explosion-proof design; fire protection system

0　引言

大型电力变压器/换流变压器是输电系统中最重要的设备之一[1-3]，是电能传输的枢纽装备，以油浸式变压器为主要类型。变压器内部的变压器油和油浸纸等绝缘材料随着运行时间增加会发生材料老化、绝缘性能下降等，存在着出现电弧放电故障的可能性[4]。随着我国特高压工程的发展建设，变压器的电压与容量也在不断提升，变压器电弧故障的能量等级也迅速增加，其风险和危害愈发显著。一旦变压器内部出现高能电弧故障，电弧向周围变压器油剧烈释放能量，变压器油迅速气化、裂解，产生的高温、高压气泡导致油箱内部的压强上升。通常，上述电弧故障在箱体处产生的压力超过箱体结构所能承受的极限，容易引发设备爆炸甚至燃烧，导致区域性的停电及变电站中的火灾事故[4-6]，造成千万元级的经济损失。

对于不同电压等级的变压器中以及不同能量、位置与类型的电弧故障，其物理过程大致相同。变压器内部电弧故障导致设备及变电站的火灾的物理

基金资助项目：国家电网公司科技项目(5500-201955514A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-201955514A-0-0-00).

过程可简要分为以下 6 个阶段[4, 6-7]。

1）绝缘击穿。当变压器内部变压器油和纸板绝缘失效时，会发生绝缘击穿，在变压器油中产生高能电弧。

2）气泡形成。高能电弧迅速气化、裂解周围的变压器油，形成高温高压的混合气体气泡，包含氢气、乙炔等小分子可燃气体以及变压器油蒸汽。

3）压力波产生。随着能量的持续注入，高温、高压气体形成的气泡具有向外扩张的趋势，气泡内压强与变压器油压不平衡，开始对外辐射出高幅值的压力波。

4）压力波传递。气泡处产生的高幅值压力波以声速向变压器油中传递，使得油中压力上升；压力波同时会在变压器内部器身以及油箱内壁处发生折反射，进一步使得油中静压上升。

5）箱体承压。压力波作用在箱体上，变压器箱体结构钢材料首先发生弹性形变，在过大压力作用下发生塑性形变直至破裂。

6）起火燃烧。在高压强作用下，变压器箱体薄弱部位首先发生炸裂，电弧故障产生的高温高压可燃混合气体从油箱中喷出，随后与空气中的氧气接触后，就会引发变压器油的持续燃烧，造成变压器设备本体甚至变电站的火灾事故。

在上述过程中同时伴随着断路器切断电弧电流、变压器箱体上压力释放阀通流泄压的发生，但是现有的运行经验与故障案例表明[5]：在绝缘击穿到故障清除的时间较长、压力释放阀泄压效果有限等因素限制下，现有的保护方案仍不能满足变压器设备电弧故障防爆、防火的要求。需要在进一步研究变压器内部电弧放电故障引起的压力产生与传递过程、变压器油起火燃烧特性的基础上，发展相适应的变压器电弧故障防爆技术，以最大程度避免变压器爆燃等严重事故的发生，保障变压器和输电系统的运行安全。

针对变压器内部电弧故障导致爆燃事故的物理过程中绝缘击穿、气泡形成、压力产生、压力传递、箱体承压以及燃烧起火的 6 个阶段，可针对性展开在故障预警、故障快速清除、变压器本体防爆技术、防火消防技术这 4 个方面的研究，以降低变压器电弧故障爆燃事故的风险及故障损失。本文通过对变压器油中电弧的压力特性与变压器油燃烧特性进行论述分析，归纳总结变压器本体防爆、消防技术以及国内外相关研究成果等，从变压器状态监测与故障预警、电弧故障快速识别与清除、变压器压力释放、变压器结构增强技术以及电气设备消防灭火等技术方面切入，提出相应的发展重点，建立全面立体的变压器电弧故障防御体系，降低故障发生概率，减少故障引起的经济损失与社会影响。

1 变压器电弧故障预警技术

变压器内部发生高能电弧故障的直接原因是油纸复合绝缘受水分侵蚀、杂质混合、材料老化、组件变形等影响，使得绝缘性能下降或局部电热应力上升、局部电场发生畸变，在长时间运行工况下油纸复合绝缘逐渐劣化直至击穿。如果能够通过对变压器实行多维度、多层次的状态监测，有效地获取在运变压器的状态信息，建立合理的多信息融合变压器状态评价模型，在变压器内部绝缘材料劣化至失效前发出准确的故障预警，就可以实现对高能电弧故障的准确预警与主动防御，从而避免电弧故障的发生，是降低故障经济损失最为有效的技术方法。对变压器特征参量的可靠监测与运行状态的准确判断是实现变压器电弧故障预警亟待解决的关键技术问题。

1.1 变压器状态监测

变压器状态监测技术包括离线检测技术和在线监测技术[8]，其中离线检测内容主要包括油纸绝缘理化特性[9-11]与变压器离线试验[12]等。变压器在线监测技术可以及时获取变压器运行情况，是实现设备预知性维修的前提，也是确保变压器和整个电力系统安全稳定运行的关键，主要包括油色谱分析、局部放电监测、温度信息监测和振动信息监测[8]等。

1.1.1 油色谱分析

油色谱分析的原理是利用变压器中油纸结构在一定强度的电热压力下分解形成气体并溶于油中。油色谱在线监测分析主要分为三大阶段：气体提取、气体检测和数据分析[13]。在气体提取部分，现有油色谱在线监测装置大多采用基于膜的油气分离技术实现气体的提取；气体检测方面应用最为广泛的是热导检测器和火焰电离检测器这类电化学检测器，此外，光声光谱法等新技术被越来越多地应用到变压器溶解气体在线监测中[8]；数据分析部分重点在于分析变压器状态与油中溶解气体所属种类和含量的关系，在当前国内外现行的分析方法包括三比值法[14]、改进三比值法[15-16]、Duval 三角法[17]等。然而由于油中溶解气体对流扩散速率的限制，

油色谱分析的在线监测的反应时间通常达到小时级以上，且存在着检测精度不高的问题，因此难以直接作为电弧故障的预警依据。

1.1.2 局部放电监测

变压器局部放电监测系统可对局部放电过程中局部放电特征参量进行采集、分析，采集方式通常借助各种形式的传感器，比如高频电流传感器、超高频传感器、超声波传感器、光学传感器等[18-20]，上述方法各有优劣：高频电流监测法能够进行精确的定量计算，但其受电磁干扰影响较大；超高频法因为其较高的电磁波信号范围，因此有着较强的抗干扰能力，但电磁波信号与局放监测电荷量的转换关系有待进一步统一；超声波局部放电监测技术由于信息传递过程的损失较大，难以进行定量计算，多利用回声定位法来确定故障位置；而光学局放监测技术则受限于变压器的结构和传感器的布置位置，需要考虑传感器是否能接收发生故障时产生的光信号。

1.1.3 温度信息监测

通过对变压器内部结构温升情况进行监测，从而可以判断各组件工作状态，其中变压器绕组“热点”温度直接决定绝缘材料的老化速度，温度越高，绝缘老化的速率越快[11]。温度测量方面最典型的技术为红外热成像设备监测技术，但其只能监测变压器表面温度，不能对变压器内部情况进行研究[8, 21]。而光纤测温技术可以精确地测量变压器内部温度情况。将光纤温度传感器直接安装在油浸变压器内部，温度探头置于绕组附近或者直接接触绕组，可在变压器内部恶劣的工作条件下实现对绕组“热点”温度的准确测量，给电力系统提供直接、动态、真实的监控信息。光纤测温传感器越来受到研究人员和使用单位的关注，将会是变压器内部绕组测温技术的重要发展方向之一。

1.1.4 振动信息监测

振动信息监测主要针对变压器内部机械故障，当变压器结构状态发生变化后其振动频率会随之变化，因此可以通过其振动信息判断变压器潜在的故障情况[22-23]。铁芯与绕组是变压器故障的常见部位，其发生故障时会产生振动，铁芯振动主要是因为铁芯钢片被磁化后尺寸发生了微小的变化，即磁致伸缩现象，绕组振动则由于漏磁场中的电磁力使绕组的轴向和径向受力而产生振动，该振动信号同时也会传递至变压器箱壁上从而被振动传感器检测到。国内外对于变压器振动产生机理和振动信号传递特性已经进行了较多的研究[24]，如何更好地获取振动信号以及从中获取有效的特征信息作为故障诊断的判据是下一步研究的关键。

1.2 状态评价技术

随着监测技术的发展与进步，基于状态监测的状态评价技术也得到长足发展，该方法可减少检修不当所造成的维修费用与降低故障风险，提升检修质效。状态评价作为状态检修的必要前提，可以通过对变压器的运行状态进行状态评价来判断设备的异常，并根据评价结果制定相应的检修方案。状态评价技术主要包含状态评估特征选取、多源异构数据融合、数据-物理双驱动的特征反演与状态评价等方面。

1.2.1 状态评价特征选择

对电力变压器运行状态做出全面和准确的判断必须要获得反映变压器状态的特征量。变压器状态评价体系指标通常选取于电气特性、产气特性、温度特性、力学特性和绝缘材料理化特性等，其中电气特性主要以局部放电特性为主，辅以吸收比、绕组介质损耗因数、铁芯接地电流、直流电阻不平衡系数和运行电压及电流波形特性等，产气特性包括氢气、低分子烃、一氧化碳和二氧化碳等气体含量及比值，温度特性为绕组热点温度、顶层油温等，力学特性为绕组变形、铁芯振动等，材料理化特性包括油介质损耗因数[25]、油中微水[26]、糠醛[27]等。

1.2.2 多源异构数据修复与对齐

在实际的运维检修工作中，不同特征参量往往通过人工巡检、在线监测等不同方式获得，不同省市区域、不同型号变压器设备的数据模型、在线监测系统采集周期、采集精度等相差较大，且在线监测数据在存储和传输过程中存在特征参量测量错误或传输丢失等问题[28]，实际数据的多源异构性显著降低了现有状态评估方法的可用度和精准度。为解决多源异构数据融合问题，需要对数据进行必要的前处理，当前主要基于插值[29]、预测和神经网络[30]等方法先修复缺失、异常的数据，再进行状态评估。目前主流的数据修复与对齐方法有：长短时记忆网络[31]、极端梯度提升方法[32]、自注意力生成对抗网络[33]等。

1.2.3 特征反演与状态评价

随着电力设备数字孪生技术的持续发展，结合传感数据、大数据处理算法和物理模型对变压器内部电、热、力多物理场分布进行高速准确反演计算、

对变压器运行状态进行实时评估和准确预测是变压器状态评价的关键研究方向之一[34]。

特征反演以物理驱动为主、数据驱动为辅。数字孪生是电力设备数字化的高级形态，不仅需要对设备进行准确的三维建模和传感数据可视化，还需要对设备内部的物理场分布、运行状态等进行实时更新和三维展示，要求结合物理模型、统计数学模型、机器学习模型等对传感数据进行反演计算。例如，通过分立的温度传感器结合物理驱动的多物理场仿真模型和数据驱动的代理模型可实现变压器内部温度分布、热点温度的准确计算[35]；通过油箱壁上分立的局部放电超声传感器对局部放电位置进行反演计算等[36]。

变压器状态评价多以数据驱动为主、物理驱动为辅，现有的状态评价方法主要通过物理规律指导特征向量构建，建立数据驱动的统计模型[37]、对异常、故障类型进行分类[38]、对状态参量、绝缘寿命等进行回归、预测等。变压器指标特征量众多，故障机理复杂，仅单一分析各项指标是否处于正常状态无法准确表征变压器运行状态，因此变压器状态评价通常被认为是多属性决策问题。由于电力变压器是一个复杂的系统，各状态参数与实际运行状态之间没有明确的关系，状态参数在测量时也不能保证完全准确，因此状态评价的过程中存在固有的模糊性和不确定性。目前主流的不确定性推理方法有：贝叶斯网络[39]、粗糙集[40]、模糊理论[41]、云理论[42]、集对分析法[43]等。

1.3 变压器电弧故障预警

变压器电弧故障预警是在变压器状态评价的基础上，将评价目标设置为设备的电弧故障前状态，基于状态评价中特征量所提供的关键信息，以诊断并预警出未来将会发生的潜伏性电弧放电故障。

由于电力变压器故障类型包含油过热、油和纸过热、油纸绝缘中局部放电、油中火花放电和电弧放电等多种故障类型[44]，且故障原因多样，变压器状态特征与故障类型之间存在非线性映射关系，因此仅依靠传统的阈值公式与专家系统，难以针对性地归纳与提出变压器特征量与电弧放电这一种故障类型之间的关系[39]，针对变压器电弧放电的故障预警仍需要借助状态评价中涉及到的机器学习与深度学习等以数据驱动为主的人工智能技术。

然而，变压器发生电弧故障频率极低，导致训练模型能获取的故障集数据量较小[45]。同时，运维过程中的数据缺失导致数据完备性降低，二者共同使得数据驱动的故障预警模型泛化能力与预测准确性大大降低。因此需要借助多源异构数据修复与对齐技术补足数据信息，同时将电弧放电的故障机理与物理特性作为人工智能模型训练的辅助输入信息，形成数据驱动与物理驱动相结合的变压器电弧故障预警模型，以获取较高的泛化能力与预测准确性。

1.4 故障预警技术发展

通过对变压器进行状态监测与状态评价，实现对变压器运行状态的准确判断，结合电弧放电的故障机理与物理特性，在故障发生前发出预警，并依据状态评价结果对变压器采取降负荷或断电的防御性措施，以避免高能电弧故障。然而，目前变压器的故障预警主要依赖于油色谱在线监测与局部放电检测，油色谱在线监测囿于溶解气体在油中扩散传播的物理特性，在变压器油中从故障点位通过对流、扩散将故障信号传递至传感器处需要时间，具有显著的滞后性，响应及时性不足；而高频电流、超高频、超声波、光学传感器等多参量局部放电感知技术则分别在抗干扰、信号转换关系、传感器有效布置等方面仍存在局限性，同时也未能实现多物理量传感数据间有效融合。实际运行过程中局部放电数据繁多，干扰项大，缺陷漏报及误报率偏高。未来需要进一步发展局部放电干扰信号识别与抗干扰技术，充分发挥出局部放电声光电监测响应速度快的优势，在掌握电弧故障发展机理以及物理特性的基础上，发出快速预警；同时联合油中色谱监测，辅之以温度监测与振动监测，形成多参量融合的监测系统，提升状态评价有效性，为电弧故障预警提供坚实的数据支撑。随着人工智能技术的不断发展，变压器故障预警技术对数据采集和传感器技术、状态与状态评价、智能决策支持等方面的要求越来越高，需要进一步发展应用人工智能技术，充分利用多维特征参量所包含的物理信息，形成高效、快速、精准的评价体系。实现对变压器设备实时评价、故障准确预测和预防性断电保护，减少电弧故障发生概率。

2 变压器电弧故障快速保护与清除

当变压器状态监测与状态评价对变压器绝缘状态判断失效，绝缘击穿仍在变压器内部发生时，如继电保护装置能够及时动作，断路器等故障清除

装置及时切断故障电弧电流，减少对故障气泡的能量注入，阻碍压力产生过程的进一步发展，能够显著降低变压器内部的压力，减少变压器爆燃事故发生的风险。上述保护动作过程中包含 2 个阶段：1）继电保护装置检测到故障发生并发出保护信号；2）断路器等开关装置断开回路。在运行的输电工程中针对大型变压器的故障清除主要是基于电流差动保护检测故障发生，并通过网侧的断路器开断电流。

2.1 故障快速保护

2.1.1 基于电气特征的故障保护

目前的变压器及输电线路的保护主要依赖于电路参量对故障进行判断，其依据为故障发生时主要伴随着 2 个电气特征——相电流增加与差电流增加。继电保护相关研究者依据上述特征发展了电流速断保护与电流差动保护等故障检测与保护方法。其中电流差动保护凭借着其原理简单、特征量单一、动作信号快等优势，成为了变压器内部电弧故障的主要保护方式之一[46]，其基本原理如图 1 所示[47]。

图 1 中 $\boldsymbol{U}_1$ 与 $\boldsymbol{U}_2$ 别为高低压绕组的额定电压，$\boldsymbol{I}_1$ 与 $\boldsymbol{I}_2$ 分别为高低压绕组的电流，$\boldsymbol{I}_1'$ 与 $\boldsymbol{I}_2'$ 分别为对应电流互感器的电流。$\boldsymbol{I}_r=\boldsymbol{I}_1'+\boldsymbol{I}_2'$ 为继电器 KD 所测电流，当 $\boldsymbol{I}_r$ 大于保护整定阈值时，差动保护动作。然而由于变压器铁芯的铁磁材料具有非线性磁化的特点，使得变压器在空载合闸、重合闸以及过励磁等情况下会产生远大于额定电流的励磁电流，进而使得差电流显著增大，形成励磁涌流，造成电流差动保护误动的风险增加。尤其换流变压器因自身结构导致其漏抗高于普通变压器的值，且因其操作方式不同，可有载调压等特殊性，相比较于普通变压器，换流变励磁涌流在幅值上更高，衰减速度更慢。国内外学者围绕着励磁涌流的基本特征，发展了励磁涌流识别技术，降低了电流差动保护误动的风险[48]。

在励磁涌流识别方面，国内外研究者基于励磁涌流电流波形的特征，开发了二次谐波判别法[49]、间断角原理[50]、波形对称原理[51]等，以判断发生的是电弧故障或是励磁涌流；基于励磁涌流和内部电弧故障时电压量的差异，将其同基于电流的判别方法结合起来，形成了等值电路判别法[52]与磁通特性判别方法[53]。然而由于变压器励磁涌流电流和电压受到系统接线方式、铁芯材料与结构、绕组结构、开关合闸相角的影响，目前以励磁涌流基本特征为依据的识别方法不能完全识别全部的励磁涌流特征，无法完全避免变压器差动保护的误动[54]。近年来，相关研究人员提出了励磁涌流同人工智能算法结合的继电保护策略[55-56]，然而以人工智能算法为基础的识别方法仍主要以差动电流的数据驱动方法为主，不能够反映变压器运行过程中的励磁涌流与电弧故障之间物理信息的差异，同时由于目前相关研究者可获取的变压器运行故障样本有限，所获得的识别方法泛用性与准确性还有待进一步测试与验证。

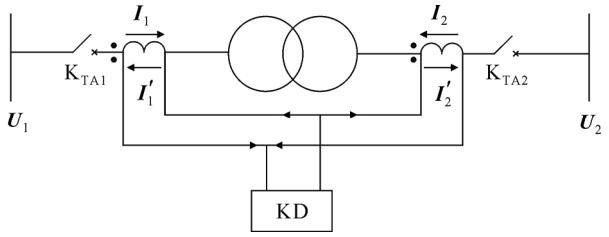


图 1 变压器差动保护接线原理图

Fig.1 Schematic of transformer differential protection

此外，当变压器内部发生小匝数的匝间短路故障与局部的层间短路故障时，短时差电流变化较小，同时由于励磁涌流对差动保护策略的影响使得故障信号处于检测灵敏区间之外，常常造成继电保护的慢动或拒动。而匝间、层间短路环流幅值极大，又存在着发展为接地短路故障的可能性，进一步放大电弧故障的影响范围和危害程度，基于上述策略的继电保护技术大概率已经无法保护变压器。

2.1.2 基于非电气特征的故障保护

在变压器内部发生电弧故障时，除引起线路上的电气特征发生变化外，电弧还会向周围绝缘介质释放能量，电能向其他形式能量转化，故障电弧周围的绝缘材料发生剧烈的物理、化学变化，并引起相关非电气量特征的显著变化，包括产气、油流、温度、压力与光辐射。基于上述非电气量特征变化可作为电气特征的故障检测方法的补充，提升检测准确性。

1）产气与油流特征

当变压器发生油中电弧放电故障时，电弧会向周围的变压器油瞬间注入大量能量并引起变压器油气化与裂解，形成具有一定体积的高温、高压气泡。电弧产生的气泡在体积上具有扩张的趋势，推动周围的变压器向外流动，使得在变压器与油枕的连接管处能够获得相应的油流信息，实现对变压器内部故障发生情况的判断。

典型的瓦斯继电器基于上述特征起到对变压

器的保护作用，其主要结构如图 2 所示[57]。主油箱内部绝缘油通过顶部连接管涌向油枕，油流冲击瓦斯继电器挡板使其翻转，当挡板翻转至某一角度位置时，触发重瓦斯接点动作，进而发出跳闸信号。然而瓦斯继电器挡板的机械结构的本征特性会导致挡板动作的时间存在数十毫秒的延迟，因此瓦斯继电器的保护性能越来越难以满足当前大容量、高电压等级电力变压器对其保护性能的要求。

2）温度特征

在变压器正常运行时，变压器导体发热、铁磁损耗等热量的产生与耗散通常处于动态平衡的状态，当变压器处于高负载状态或是外界环境温度较高时，变压器也能通过油流循环配合散热系统将热量传递出变压器箱体外。变压器内部出现电弧故障时，短时内迅速释放的大量电能中有相当一部分转化为热能，产热功率远超散热功率，使得变压器油故障点处大量热导致变压器油、绝缘纸等碳化，对铜导体等造成大量损伤。然而由于变压器油导热系数与流速限制，油中热传导与热对流的时间尺度通常要达到小时级，与电弧故障毫秒级的时间尺度要求相去甚远，因此只有当电弧故障发生在变压器温度传感器附近时，温度特征才提供有效的故障判断信号，一旦传感器与故障点位距离较远，故障温度信号需要经历数十分钟以上时间才能被检测到。目前来看，基于温度特征的保护策略适用范围较小，难以提供有效的电弧故障快速保护。

3）压力特征

油中电弧放电会造成变压器油中的压力上升，是变压器电弧故障的重要特征之一，也是导致爆燃事故发生的直接原因。利用电弧放电产生的压力特征实现对电弧故障的快速判断，是实现变压器内部短路电弧故障的快速检测的重要技术路线[58-60]。

闫晨光等首先提出了基于压力全量、单量特征的变压器保护原理及判据[54, 58]，认为压力单量信息的保护原理具有较高的可靠性与灵敏度，但动作速度慢于压力全量保护。李博宇测量并采集了针板结构与柱板结构沿面放电 2 种电极结构下的电弧放电过程中电弧电气特征与压力特征[59]，从时频域对压力信号进行了分析，结果如图 3 所示，提出将 2 种放电模型的发展过程划分为 3 个阶段，并提出利用中频分量作为电弧故障的检测判据。贾云飞等开展了千安级油中电弧压力特征研究[60]，将油中工频电弧分为快速振荡阶段和持续上升阶段。前者压力波

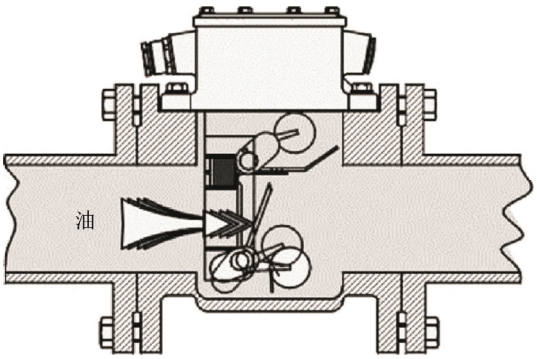


图 2 瓦斯继电器重瓦斯动作示意图

Fig.2 Schematic diagram of severe gas relay operation

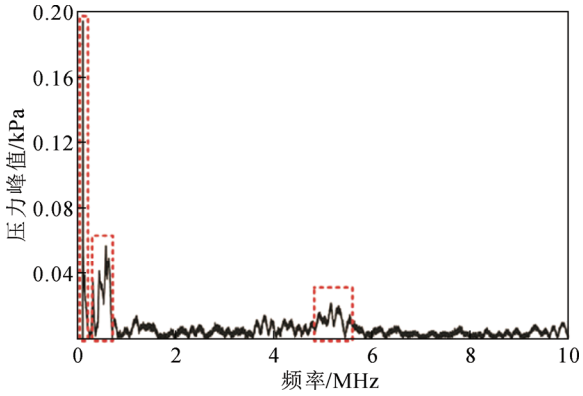


图 3 电弧故障压力特征频谱

Fig.3 Frequency spectrum of arc fault pressure

峰值高、上升速度快，可作为电弧故障快速识别的判据，但容易受油中火花放电等放电的干扰；持续上升阶段的压力波受交变能量注入的影响而存在规律性的脉动，可作为保障故障识别的准确度的依据。因此，基于压力特征的变压器继电保护方法具有对故障信号敏感、检测相对迅速等优势，是实现电弧故障快速保护的重要方向之一。

4）光信号特征

基于光信号特征的局部放电检测技术已有一定的研究，但由于局部放电与电弧放电物理过程的差异，局部放电光信号特征检测的相关技术难以直接应用于电弧放电的故障检测。局部放电是绝缘局部区域发生的放电，放电能量小、产气量小、单次放电持续时间短，包含多次放电过程；而电弧放电是绝缘的击穿，形成贯穿性的放电通道，放电能量大、放电持续时间久、产气量大同时气泡形态变化影响显著。二者在物理过程上的差异会造成光信号存在显著区别。而目前电弧故障产生的光信号特征相关研究较少。李昊宇与贾双瑞等分别使用电焊机与工频谐振回路产生了变压器油中电弧，并测量了

其光谱，结果如图 4 所示，油中电弧的光谱主要集中在 500~1 000 nm，为可见光波段与红外波段[61-62]。西安交通大学贾云飞等使用高速光谱仪与光电探测器测量油中工频电弧放电的光谱与光信号强度，分析得到不同电流下光谱在时域上的变化[60]。

目前相关研究结果表明故障电弧产生的一瞬间会产生强烈的脉冲光信号，信号特征显著、传输速度极快，可作为判断故障发生有效判据。然而随着放电的发展，变压器油中积累碳化颗粒并逐渐变黑，且油气界面存在较多气泡[60]，光信号放电开始后数十毫秒后便难以传出，故障光信号检测时间窗口极短；同时，变压器结构及器身会阻碍光信号的传递，需要在掌握光信号在油箱内的发生、传播和反射特征的基础上，结合典型故障发生位置，进一步研究光检测传感器选型、优化布置与动作判据。油中工频电弧光信号的具体特性有待进一步研究。

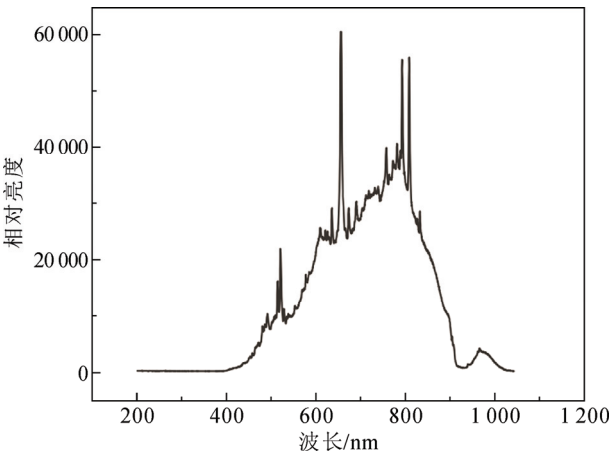


图 4 电弧放电光信号图谱

Fig.4 Optical spectrum of arc discharge

2.2 故障清除技术

当继电保护装置检测变压器内部发生电弧故障时，会向断路器等开关设备发出动作信号，断开或分离故障回路以清除故障。目前输电工程中主要采用的故障清除手段为高压断路器，在直流输电工程中为保护电力电子设备也会采用主支路电流转移开关的方案[63]，通过触发间隙等方法快速转移主通流回路上故障电流。

2.2.1 高压断路器

断路器是短路电流开断的关键设备，断路器从接收分闸信号到完成分闸操作往往需要一定时间，采用快速断路器可显著减小故障时间、降低故障能量。目前投运电力系统中，高电压等级断路器主要以气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated metal-enclosed switchgear，GIS)为主[64]，采用 SF_6 气体作为绝缘及灭弧介质。压气式 SF_6 断路器凭借着灭弧原理简单、且大电流开断能力良好等优势，现在仍是 550 kV 及以上电压等级断路器的主要选择，其结构如图 5 所示[65]。

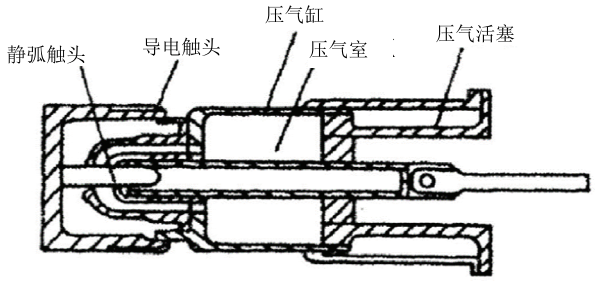


图 5 压气式 SF_6 断路器结构

Fig.5 Structure of puffer SF_6 circuit breaker

压气式 SF_6 断路器的气缸和活塞在操动机构的作用下随弧触头一起运动，受活塞挤压作用，压气室 SF_6 气体压力升高，在喷口上下游之间形成压差。当喷口打开后，压气室、喷口、弧触头之间形成强烈气吹，冷却电弧实现电弧开断。

基于上述原理的传统断路器固有分闸时间>30 ms，开断时间>40 ms，故障清除时间通常长达 70 ms 以上，不能满足电弧故障快速清除的需求。在高速断路器研发方面，平高集团率先研制出 252 kV 高速开断断路器及 GIS 产品[64]，并于在浙江宁波 500 kV 天一变实现挂网试点应用，现场进行了人工短路试验，产品开断时间达到 20.1 ms，处于国际领先水平。

然而由于断路器本身机械结构对分闸速度的限制，断路器从接收到分闸信号到实现电流的开断，不可避免地需要数十毫秒的时间。大型电力变压器高能电弧放电功率通常达到百兆瓦级，短时间内就能够向变压器油箱内注入数十兆焦的能量，目前的高速断路器对于降低大型电力变压器电弧故障爆燃风险作用效果仍相对有限。为有效降低电弧故障引起变压器设备爆燃的风险，需要结合短路电流柔性抑制技术，通过增加电网的弹性、快速调节电网结构，柔性抑制短路电流，进而发展更高电压等级、更快响应速度的短路电流开断技术。

2.2.2 高速触发间隙

等离子喷射触发间隙作为一种微秒级气体火花开关，具有高绝缘、快导通和大容量通流和快速

绝缘恢复的特点[66]，能够在数十微秒至数毫秒时间内闭合，为实现大电流短路故障的高速清除发展提供了新的方向。

近年来研究较多的触发型气体火花开关包括场畸变型[67]、激光触发型[68]和等离子体喷射触发型[69]。然而上述开关由于在高气压 SF_6 中等离子体喷射高度过低而无法实现长间隙、低工作系数条件下气体开关的触发导通，增强型等离子体喷射装置则改进了上述问题，其导通的工作原理如图 6 所示[70]。

当高压触发脉冲施加到触发电极时，金属铝丝上会瞬间流过高密度脉冲电流，迅速积累的能量导致铝丝经历电爆炸，经历固态到液态到气态再到等离子体态的相变过程。由于上述过程极为迅速，在毛细管内形成密集的热金属等离子体，同时在毛细管内外形成巨大的压力差，促使等离子体快速喷射进入到电极间隙。这些喷射出的等离子体具有较高的电导率，使得气体开关的等效间隙长度缩短为等离子体射流头部与上电极之间的距离；同时，喷射出的等离子体会显著扭曲间隙的空间电场分布，且等离子体本身含有大量正负离子，为放电的形成和发展提供了初始放电离子，有助于诱导间隙开关的导通。在此基础上西安交通大学研制了 DC80 kV/30 kA 气体绝缘密封触发间隙产品，在白—江特高压直流输电工程中实现应用，触发导通时延为 0.3 ms，实现可控消能装置的快速控制[71]。若在变压器网侧接线处并联 SF_6 接地间隙，在数百微秒至数毫秒时间内导通并形成低阻气体电弧通道，则能够实现快速降低故障支路电流、熄灭油中电弧，有望显著降低电弧故障向油箱内注入的能量。需要进一步提升间隙的等离子体喷射能力，研究间隙触发时油中电弧弧压与弧阻变化规律，为快速旁路触发间隙应用于变压器电弧故障快速清除提供技术与理论支撑。

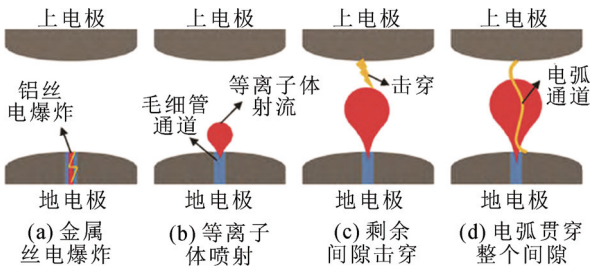


图 6 增强型触发间隙原理

Fig.6 Working principle of the enhanced plasma jet ejector

3 变压器本体防爆技术

3.1 电弧故障压力特性与计算方法

压力特性作为电弧故障的重要特征之一，是变压器本体防爆技术研究中最为关注的电弧特性，是开展变压器防爆设计的基础。电弧故障的压力产生过程直接受到电弧、故障产气量、气泡温度与状态等影响，压力波在油箱内部传播过程中会因结构、界面等因素发生变化，在变压器箱体处分化出不同的压力特征。在变压器防爆设计中，更为关心的是作用在变压器箱体上的压力与结构材料所产生的应变与应力，因此本文将主要对不同能量、不同结构、不同故障位置下电弧放电产生的压力特性与仿真计算方法进行总结论述，而电弧放电压力产生过程中电弧特征、产气特性等与气泡形态之间的关系和计算模型在文献[7]已有详细论述，在此不再赘述。

3.1.1 电弧故障压力特性

电弧故障的压力特性包括压力的产生特性与传递特性，前者指电弧故障发生过程中电弧压力波的本征特征及其与电弧之间的关系；后者则关注电弧故障压力波在变压器油中的传播过程及其与油箱、绕组等结构的相互作用。

Barkan 等人首先试验研究了配电变压器中电弧放电引起的压力变化，研究结果发现配电变压器顶层气体压强与电弧在油中的深度相关，提出了顶部气体峰值压力与能量密度的关系，其中能量密度为油箱能量与体积之比[72]。Tadokoro 等则在实验室油盒模型中内研究了能量在 0~80 kJ 范围的电弧的压力特性[73-74]，研究发现电弧能量与压力峰值近似表现出正比例关系，初步提出了压力峰值与电弧能量之间的数值关系。法国电力公司(Electricité de France, EDF)和巴西电能研究中心在大型电力变压器中共计开展了 62 次电弧故障模拟试验[75]，同样获得了压力峰值和电弧能量的关系，最大试验能量达到 2.5 MJ。上述 2 组研究中对压力与电弧能量之间的关系阐述也并不完全一致，结果如图 7 所示，也反映了试验模型对压力的影响。

在电弧故障产生的压力波形特征方面，李博宇测量并采集了针板结构油纸放电与柱板结构沿面放电这 2 种电极结构下电弧放电与压力特征，但试验电弧电流与功率仅有数安与数百瓦[59]；贾云飞等则在百安级电流与准兆瓦级功率条件下开展了压力特征研究[60]，研究表明快速振荡阶段压力幅值高，衰减快，振荡频率高；持续上升阶段中压力随注入能量增加而逐渐升高，并呈现出与电弧放电功率同频

率的规律性脉动。然而上述研究主要目的是为开发基于压力特征的非电量保护提供支撑，试验模型与条件仍与实际的变压器模型存在一定差异。

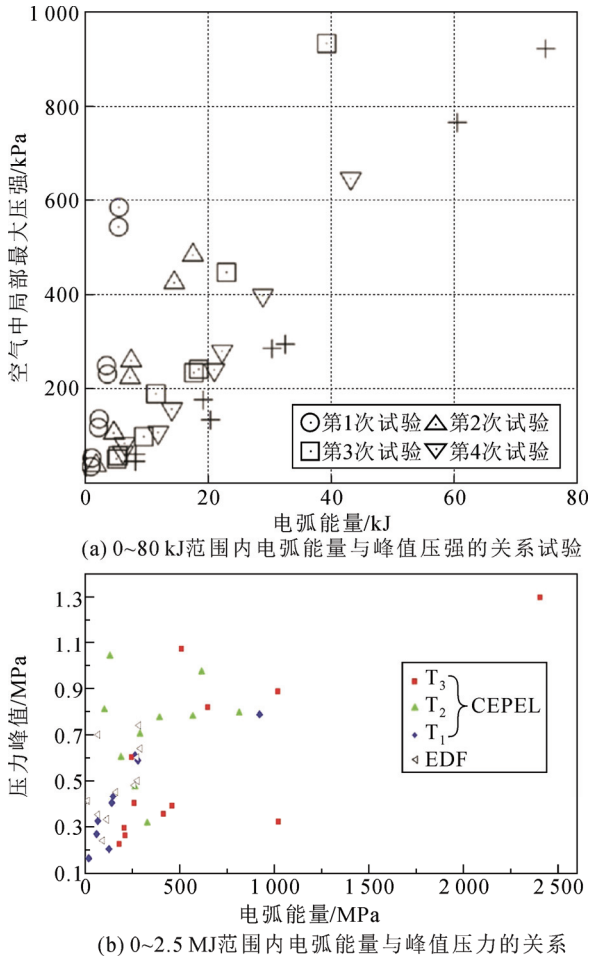
近年来，种芝艺等也通过试验研究了变压器升高座区域内电弧故障特征与压力之间的关系[76]，试验中电弧电流达到 40 kA，电弧放电功率达到 60 MW，并以此提出了电弧功率与压力峰值之间的关联模型，如式(1)所示。

$$p_{\text{peak}} = 0.505\ln(P_{\text{arc}} - 1.503\,3) - 0.296 \quad (1)$$

式中：p_{peak} 为电弧故障峰值压强；P_{arc} 为电弧故障放电功率。

Yan 等基于试验中对气泡形态的观测以及压力的测量，结合仿真建立电弧诱导气泡动力学模型，进一步揭示了电弧、气泡与压力 3 者之间的关系[77]。

上述研究主要是针对电弧故障产生压力的特征。然而在实际油中传播过程中，压力波会在绝缘油与油纸的界面、绝缘油与钢结构材料界面等位置发生折反射，油箱结构特征与结构件等对压力在油箱上的分布特征具有显著影响。



(a) 0~80 kJ范围内电弧能量与峰值压强的关系试验

(b) 0~2.5 MJ范围内电弧能量与峰值压力的关系

图 7 压力峰值与电弧能量之间的关系

Fig.7 Relationship between peak pressure and arc energy

近年来，电弧故障压力与油箱特征与内部结构件之间的影响规律逐渐得到研究者的重视。刘泽洪等初步研究了变压器结构及组部件对压力特征的影响[78]，见图 8，并且首次在实验室模拟了变压器爆燃事故，获取了电弧故障后续静压引起爆燃事故的物理过程：电弧持续释放能量，升高座箱体内部边界压强持续上升，压边界压强超过结构所能承受的最大静压力，形变量超出其弹性极限，升高座及油箱结构发生破坏，箱体内部高温高压的绝缘油气化物接触空气，将导致爆炸燃烧发生。同时进一步对比了升高座内部与圆柱形油箱之间的结构差异，发现升高座区域发生燃弧故障时，油箱内压强较升高座内压强更小，油箱中燃弧导致的升压明显小于升高座中燃弧导致的升压。李金忠等则通过相同的试验方法获得了换流变有载分接开关油室中的压力分布特征[79]，压力波形特征见图 9，认为在有载分接开关油室内，压力波在经过反射与汇聚到达油室顶部时，顶部压力会被显著放大，压力峰值可达 5.1 MPa。

Yan 等通过仿真与试验，探究了流固耦合作用下的有载分接开关油室中电弧故障引起动态油压行为，并且通过代理模型优化方法改进了压力释放阀的配置方案[80]。邵宇航等则针对电弧故障下分体式有载分接开关的声固耦合压力特性开展了研究，认

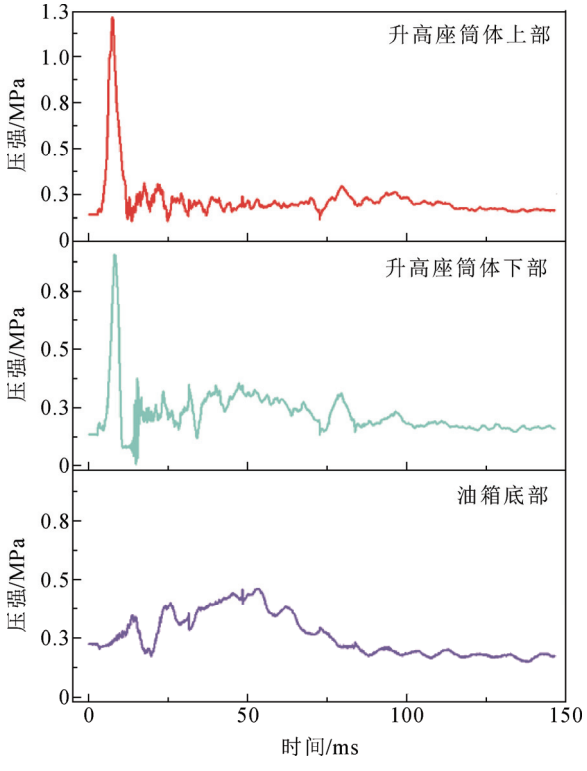


图 8 升高座区域电弧故障压力曲线

Fig.8 Arc fault pressure curves in AC turret

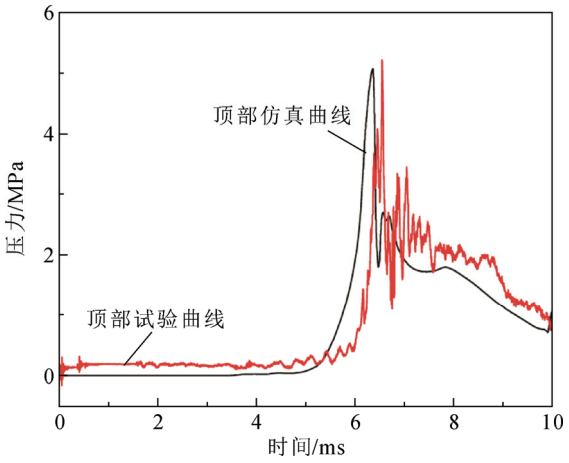


图 9 有载分接开关油室电弧故障压力曲线

Fig.9 On-load-tap-changer top pressure curve

为电弧故障产生的压力对油室结构产生冲击作用，在油室顶盖和油室底座形成局部应力集中[81]。

虽然目前相关研究者均认为压力与电弧能量具有正相关关系，并依据各自的试验模型与结果建立了自洽的压力模型，但是由于所测压力值与试验模型结构密切相关，各个试验得到的压力波形均不完全一致，且关于变压器内部结构件对压力的影响研究较少，现有研究关于变压器内电弧故障压力特性的结论具有局限性，对于压力在变压器内部的时空间变化特征也不清晰，难以进一步获取变压器在电弧故障压力作用下的受力特征。

3.1.2 电弧故障压力计算方法

由于直接对电弧及其压力产生过程进行试验和仿真难度较大，相关研究者首先通过理论分析、经验公式，直接计算获得电弧在变压器内所能形成的静态压力。近年来，随着对电弧故障压力特征的理论研究不断深入，相关学者进一步发展出流体力学、压力声学等仿真方法，实现对电弧故障的直接仿真计算。

CIGRE 变压器火灾安全导则中基于电弧产生的气体体积与油箱的形变量相等的假设，提出了电弧能量、故障压力之间的关系[6]为：

$$p_{\mathrm{d}}=F\left(100\sqrt{\frac{1}{4}+\frac{kE}{100C}}+50\right) \tag{2}$$

式中：p_{d}为计算压强，kPa；E 为电弧能量，kJ；C 为油箱变形系数，$\mathrm{m^3/kPa}$；k=5.8×10^{-4} $\mathrm{m^3/kJ}$ 为电弧故障产气-能量系数；F 为压力动态放大系数，与油箱总体积和相关，关系如图 10 所示。基于式(2)对变压器油箱受力进行迭代计算，迭代计算流程如图 11 所示。

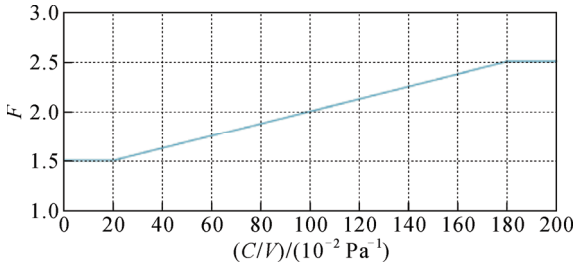


图 10 放大系数与形变量关系

Fig.10 Relationship between magnification factor and tank shape variable

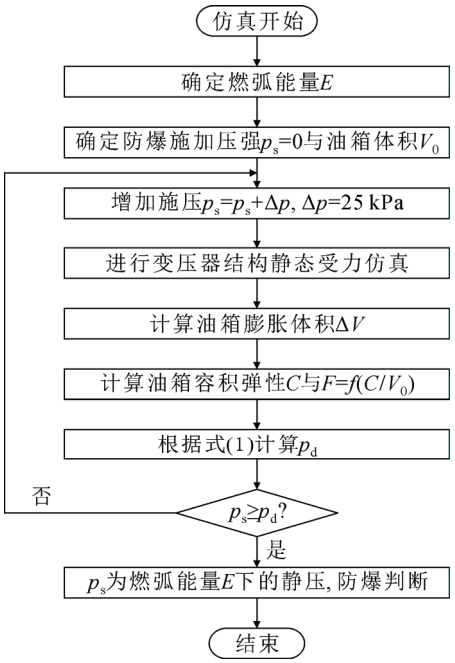


图 11 等效静压计算流程

Fig.11 Equivalent static pressure calculation process

上述估算方法目前被较为广泛地应用于变压器油箱防爆设计与强度校核中。尽管该方法在计算模型中考虑了变压器油箱的应变以及产气量同电弧能量的关系，但本质上是将电弧故障产生的动态压力等效为变压器内部均一的静压，忽略了电弧压力的产生与传递过程中造成的变压器箱体内部压力在时间与空间上的差异。Dastous 等也对比了上述等效静压和动态压力计算方法的差异[82]，动态压力计算方法是在电弧故障位置根据电弧能量注入气体，结果表明静态模型得到的应力和形变比动态模型略大。虽然上述动态压力计算方法中对于电弧的建模并不严谨，但是该研究仍在一定程度上反映了等效静压计算方法的局限性。

三硝基甲苯炸药(trinitrotoluene，TNT)爆炸仿真能够模拟高能炸药的压力波传播过程以及对象结构

的应力分布，被广泛用于建筑[83-84]、船舶[85]等结构抗爆强度计算中。相关研究者将其应用于变压器电弧故障防爆设计与强度校核中，形成电弧故障的TNT 等效仿真方法。Kawamura 等提出并使用 TNT 炸药等效模拟了变压器内部的电弧故障[86]。Chen 等使用 LS-DYNA 软件，基于 TNT 等效仿真方法研究了变压器油箱在电弧故障下的压力分布[87]，如图 12 所示。

变压器油中工频电弧的理化过程与 TNT 爆炸过程存在本质不同，TNT 爆炸所产生的压力波形与实际的油中电弧所产生的故障压力存在较大差异，因此基于 TNT 炸药等效仿真模型仅能用于压力波在变压器油箱中的传递特性研究。如不能对 TNT 爆炸模拟电弧故障的等效性进行深入论述并有效证明，该方法难以进一步指导变压器防爆设计。

针对电弧故障导致的故障压力仿真最直接的方法是直接针对故障电弧产生气泡及其辐射压力波的传播过程进行仿真建模，主要包括流体力学仿真模型以及压力声学仿真模型。流体力学仿真方法是根据电流、电压或能量来估算电弧的产气量，然后在故障位置注入气体(或直接注入能量)，利用流体力学仿真模型来求解压力传播和油箱形变。流体力学的电弧故障压力仿真最早由 Baer 提出[88]，由 2 个连续性方程、2 个动量方程、2 个能量方程和 1 个相界面追踪方程构成，主要应用于高马赫数的气液流动和界面捕捉，但计算相对复杂。Kapila 等假设界面上的机械平衡瞬间可以实现，将原本较为复杂的七方程模型简化为五方程模型[89]。为更好地描述气液界面的流动，这一五方程模型被进一步改进，包括混合物的质量、动量、能量守恒方程，每一项相的质量守恒方程，体积分数输送方程。Muller 等基于上述可压缩两相流的五方程模型，对变压器内部电弧的压力传播进行了仿真，压力峰值与试验结果较为接近[75]，但压力波形上存在差异，也忽略油箱了形变过程。李金忠等人基于可压缩两相流模型对分接开关油室电弧故障压力传播过程进行了仿真[79]，仿真所得压力波形与试验结果变化趋势相符，如图 9 所示。近年来，相关研究者针对流体力学模型进行优化改进，以更接近实际故障的发展过程。周盟等结合了气泡动力学与 k-ε 湍流流体力学计算方法(其中 k 表示湍流动能，ε 表示湍动耗散率)，计算得到了换流变压器内部电弧故障超压分布[90]。Yan 等

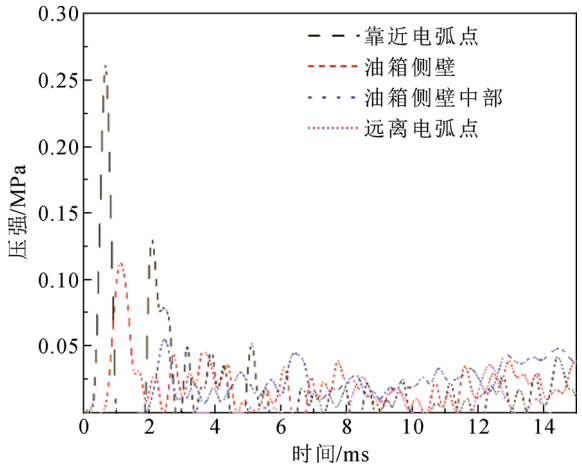


图 12 TNT 模拟电弧故障压力波形

Fig.12 Arc fault pressure curves through TNT simulation

耦合了两相流计算中的有限体积法、结构力学中有限元方法以及气泡动力学模型，计算得到了 110 kV 与 35 kV 变压器电弧故障时内部的压力与应力分布，与试验结果相符[80]。可压缩两相流模型可以用于研究油中电弧气泡的形态、压力波的产生与传播等物理过程，与实际的情况最为接近，但该方法计算量较大，仿真结果的准确性依赖于合适湍流模型与电弧产气模型的选取。

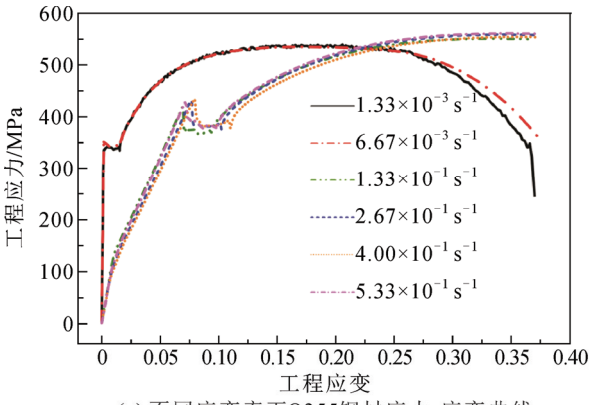
由于变压器油的可压缩性较小，压力波在其中传播的过程近似于声波，可将流体力学仿真模型简化压力声学模型，即将流体方程线性化得出声学方程。闫晨光等首先基于声学波动方程建立了变压器内部电弧故障的压力传播模型[91-92]，估算变压器内部短路故障时的电流和能量，基于电弧产气模型与绝热过程的假设计算气泡表面的压差，最后将压差作为压力源输入到变压器声学仿真模型中计算得到压力分布，并利用声固耦合模型得出变压器油箱的应力分布。进一步地，姜岚等引入范德华方程[93]，并利用压力声学模型对 110 kV 变压器计算得到了气体类型、电弧放电位置两方面对变压器油箱的应力分布的影响规律，Yao 等利用上述方法计算得到了 220 kV、500 kV 与±800 kV 变压器压力分布特性的差异[94]。

声学仿真模型计算量相对小，能够快速得到压力波在变压器内部的分布，并开展变压器油箱强度校核。然而该方法需要以油中电弧气泡表面的压差作为压力源，准确性依赖于压力产气模型。同时由于该方法无法计算油中流动过程，难以计算油箱形变较大或涉及压力释放装置的情况。

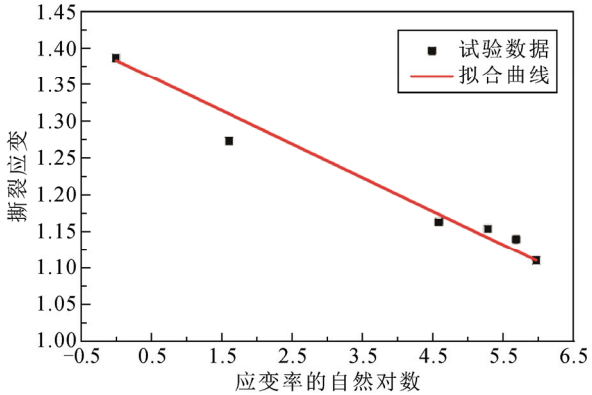
3.2 变压器油箱优化设计

3.2.1 变压器结构加强设计

变压器发生爆炸的本质是变压器结构钢材料可承受的形变程度有限，而内部过高的压力作用在钢材上，使得变压器结构钢发生应变并产生应力抵抗压力的作用，内部压力越大，应变也就越大，一旦应变超过材料的极限，油箱发生撕裂进而发生爆炸。目前变压器常用的结构钢材料为 Q355 钢材，在不同应变速率下的应力应变曲线与撕裂应变见图 13[95]。关于电弧故障过程中变压器箱体应力-应变特性研究中，直接试验测量的研究较少，主要以仿真分析为主，并假设 Q355 钢为线性材料，即材料的应力-应变为正比例关系。基于该假设得到电弧故障过程中变压器箱体的应变范围为 1.2×10^{-5}~7.1×10^{-3}，应变率的范围为 8.33×10^{-5}~2.38×10^{-2} s^{-1}[93]。变压器电弧故障防爆设计校核时，应当使变压器在电弧故障过程中的应变率的自然对数与应变的关系曲线处于图 13(b)应变率的自然对数与撕裂应变关系曲线的左下方。



(a) 不同应变率下Q355钢材应力-应变曲线



(b) 应变率与撕裂应变之间的关系

图 13 动态载荷下 Q355 钢材应力-应变特性

Fig.13 Stress-strain characteristics of Q355 steel under dynamic loading

针对故障引起的油箱爆炸问题，目前国际上通用的变压器油箱防爆设计关键技术路线主要包括变压器按照压力容器进行设计制造与增强变压器油箱机械强度这 2 种方式。若考虑按照压力容器的标准进行设计、制造，则变压器油箱的设计应考虑在其内部发生最严重电弧故障情况时，保证变压器不发生变形开裂或爆炸，但是这将大大增加变压器的制造工序和生产成本，此外在实际应用中变压器操作也将变得异常繁琐和复杂，并且并非所有的内部电弧故障都是高能量故障，因此将变压器按照压力容器进行设计和制造在经济性和实用性上不能被业界接受。

针对变压器设备油箱强度不满足防爆需求的问题需要增强变压器油箱机械强度的问题，国内外的变压器研究人员开展了大量结构强度提升设计的综合方案研究。保定天威对一种典型的 220 kV 电力变压器油箱结构进行了分析改进，以保证油箱强度，进而从设计结构、制作工艺、产品检验和强度试验这 4 个方面提出了保证油箱强度的关键点[96]。山东电力设备针对一种典型的变压器油箱，通过有限元分析建模并分析其抽真空条件下的变形情况，总结各参数对油箱结构强度的影响规律，优化了油箱结构[97]。IEEE Std C57.156—2016《IEEE Guide for Tank Rupture Mitigation of Liquid-Immersed Power Transformers and Reactors》推荐了一种油箱耐压能力评估计算方法，得到了部分国内外变压器厂家的应用。

加拿大魁北水利水电研究所通过调研多起变压器爆燃事故，发现变压器油箱盖通过焊接比螺栓固定具有更高的耐压能力[98]。另外，通过在变压器油箱顶盖接缝、分接头安装处等易发生开裂的弱机械强度部位加装撑条等措施，也可以起到补强加固的作用，从而提高变压器整体的耐压能力[86]。西门子公司采用 ANSYS 对变压器油箱结构进行机械强度校核，同时也对变压器油箱发展提出了防爆型油箱设计。Alexander 等用静态有限元分析 FEM 预测变压器油箱的变形情况[99]，显示内部压力分布变化，同时采用不同的数值模型，当变压器内部故障导致压力升高，提出了一种快速解决方法用于变压器油箱结构设计。

增加油箱强度是提高变压器防爆能力最直接的方法。山东电工、天威保变和西门子等国内外变压器厂家均利用基于变压器抽真空试验、静态承压仿真或者等效模拟计算的方法，获得油箱一般性的或等效模拟情况下的结构薄弱点，并进行局部加强。

然而这种方法的本质问题仍是在于对电弧压力特性的掌握不全面，不清楚实际的变压器/换流变结构演化规律，在仿真计算中对压力的时空间特征做出了一定的简化，因此难以与实际的电弧故障情况相对应，对于实际电弧故障的针对性存在欠缺，油箱提升设计、增强结构的成本往往不能与最终的防爆效果匹配。

3.2.2 柔性油箱与新型吸能材料

对变压器油箱进行改进设计来直接增强变压器油箱机械强度，是提高变压器最大承压能力最直接的手段。然而受制于材料固有力学特性，通过结构优化实现的机械强度提高极为有限。同时由于Q355材料形变较小，电弧能量仅有少量部分被油箱材料变形吸收，大部分仍需油箱结构承担。如能够增加变压器油箱的形变程度或使用吸能材料，使得油箱直接承受的故障电弧能量降低，可有效降低变压器结构破坏的风险。

ABB 提出了利用柔性变压器吸收变压器电弧故障能量的方法[100]，并对比了敞口、柔性、刚性油箱在同一电弧能量下的形变。进一步地，相关研究者提出了利用新型吸能材料来降低故障电弧作用在变压器箱体上的能量的方法。基于超材料，聚氨酯、网状铝合金等基底材料制作的蜂窝多孔防爆抗冲击吸能超结构制作抑爆材料填充油箱，多孔材料的填充会增强油箱的抗冲击性和抗压性，有效提高油箱整体结构的稳定性[101]。相关研究人员通过数值计算等方法研究了负泊松比蜂窝夹芯结构[102]、双箭头形蜂窝结构[103]与星形蜂窝结构[104]在高幅值冲击压力载荷下的动力学特性，并证明了上述吸能材料比相同面密度钢板具有好的抗冲击性能与防爆性能。Yan 等率先利用密度层状泡沫铝夹层板变形吸收电弧故障释放的能量，迅速减轻了电弧引起的超压[105]。

在特高压换流变/变压器油箱壁面及加强筋的材料选型中，负泊松比蜂窝超结构与密度层状泡沫铝夹层板有优异的抗冲击性能和防爆性能，能作为一种新型的高效吸能缓冲材料。目前该方法仍处于研究的早期阶段，距离应用于工程用变压器具有一定距离。

3.3 压力释放技术

压力释放技术应用于变压器上已有较久的历史。早期应用在油浸式变压器本体上的保护装置为安全气道，亦称为“鹅颈爆气道”，当变压器内部压力突增危及油箱时，安全气道中部的易爆膜破裂，将变压器油沿气道的设计方向喷出。早期的安全气道中易爆膜材料为玻璃等材料，破裂压力难以控制，泄压效率与低误动率之间难以平衡；同时易爆膜位于安全气道的尾部，压力需要先推动安全气道中的油柱冲破易爆膜才能被释放，泄压效率相当受限。因此，安全气道逐渐被可重复闭合的压力释放阀所替代，后者也成为目前被广泛用于各种电压等级变压器上的保护装置。不过，随着膜片材料与制作工艺的发展，膜片式的泄压装置的性能得到提升，被重新考虑应用于变压器防爆设计领域。

3.3.1 压力释放阀

目前国内外电力变压器上主要使用 Messko 公司与 Qualitrol 公司的压力释放阀。图 14 所示为 Messko MPREC 系列压力释放阀与 Qualitrol LPRD 大型压力释放阀。前者为单出口设计，且阀盘开启高度由罩壳内限位结构限制，降低了压力释放阀在极限工况下的泄放能力；后者采用环向泄放设计，但该阀整体高度较低，限制了阀的泄放能力，且阀内关键零部件直接暴露，降低了使用寿命与稳定性。国内外对变压器用压力释放阀的研究主要集中于压力释放阀的动作与泄压特性仿真分析[106]，多基于静态及准静态载荷条件，对高能电弧作用下的泄压特性研究较少，难以反映电弧故障下冲击压力对压力释放阀泄放性能及结构的影响。



(a) Messko MPREC 系列压力释放阀



(b) Qualitrol LPRD 系列压力释放阀

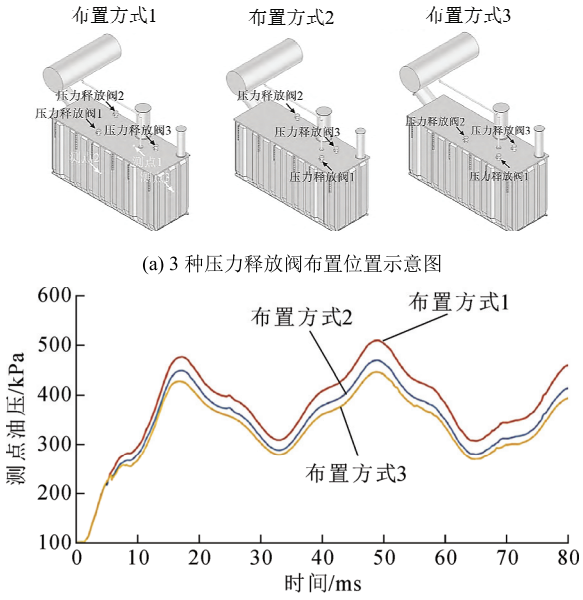
图 14 典型工程用压力释放阀

Fig.14 Typical engineering pressure relief valves

高能电弧故障作用下，压力释放阀对大型电力变压器泄压防爆效果受到了广泛质疑，Abi-Samra与赵志刚等均认为对于大能量电弧[4, 107]，当电弧故障恰好在压力释放阀附近时，可快速排出油气混合物，起到减压作用；而当电弧故障距离压力释放阀位置较远时，高能电弧就很可能已经在油箱内部产生了局部超高幅值压力，并使得变压器油箱局部钢结构材料应变超过承受极限，压力释放阀也只有助于释放电弧后续所产生的静态压力。同理，大容量变压器尺寸更大，故障电弧能量等级相对较高、压力传播距离较长，压力释放阀响应时间会更久，也更难发挥出良好的泄压防爆效果。虽然 JB/T 7065—2015《变压器用压力释放阀》对变压器用压力释放阀的结构与尺寸、动作性能、密封性能、泄压性能以及可靠性等进行了约束规定，并规定了变压器用压力释放阀所需的试验项目与要求。但实践证明该标准也并不满足电弧故障防爆设计的要求。因此，针对于压力释放阀在高能电弧作用下泄压防爆效果优化，需要开展阀本体泄压效果提升研究与油箱上阀配置方案研究，以最大限度地发挥泄压装置的泄压防爆作用。刘泽洪等通过升高座区域的放电试验确定了压力释放阀安装在升高座顶部具有较优的泄压效果[78]。

但是目前关于油箱上阀配置方案研究仍相对较少，GB/T 6451—2023《油浸式电力变压器技术参数和要求》只要求 110 kV 以上变压器压力释放阀安装位置位于中、高压出线位置。程林等开展了 500 kV 特高压换流变压器在 3 种不同压力释放阀布置方式下的故障油压变化特征研究[108]，结果如图 15 所示。其仿真结果表明：换流变压器发生内部电弧故障时，其内部故障油压在空间上分布不均，压力释放阀布置方式对其安装位置附近的压力泄放影响较为明显，而对其余位置超压影响较小；并提出了建议在顶盖上布置 3 个压力释放阀，其中 2 个分别位于绕组上方顶盖，另 1 个压力释放阀安装于顶盖靠近网侧套管处。同济大学陈素文等使用 LS-DYNA 利用 TNT 炸药模拟电弧故障，提出特高压变压器应当在网侧与阀侧套管升高座区域加装压力释放阀的建议[109]。上述研究针对的变压器结构与故障位置相对有限，难以支撑压力释放阀的广泛应用。

当前我国压力释放阀研究与变压器电弧故障防爆需求存在较大差距。对于大容量变压器与高能



(a) 3 种压力释放阀布置位置示意图

(b) 3种压力释放阀布置方式下的压力曲线

图 15 3 种压力释放阀布置方式及其压力变化

Fig.15 Pressure curves with three arrangements of pressure relief valve

能电弧，由于高幅值压力作用下的泄压效率不高以及配置方案限制防爆效果等问题，压力释放阀出现不动作或动作时间太慢而效果不佳等结果的可能性极大。因此，针对性地优化压力释放阀结构设计，合理配置大型变压器安装数量与安装位置，以达到最高效的泄压效率，是进一步研究的重点。

3.3.2 防爆膜型压力释放装置

近年来，防爆膜的设计已经有了非常大的进展，有了更为精确的爆破点，可以适用于有变化的系统需求。防爆膜对于压力的反应非常迅速，在许多不同的应用中可以用来进行泄压，保护工厂、人群、环境及机器设备免受工艺流程中因过压或真空而造成的危险损害。

防爆膜相对于电气及气动运作的安全系统而言最大优势是可靠性，这使得它们成为了工业中最重要的安全故障保护装置。防爆膜具有即时响应、全通径释压等优势，几毫秒内即可释放过压，且具有一定的经济性，相比其他用于压力释放的安全系统，防爆膜应用显著减少防护成本。防爆膜型泄压装置主要有 4 个重要组部件，包括防爆膜片及夹持器、减压舱、检测单元以及其他附件，其结构如图 16 所示。当发生高能电弧故障时，油箱内部瞬间产生高速冲击波，压力上升速度极快；防爆膜片瞬间被击破，打开高速泄压通道，同时膜片状态监测装

置发出膜片破裂信号，挡板开关及漏油报警开关也随后发出信号。

卢理成等通过高压气体推动水流冲击泄压装置的试验对比了压力释放阀和防爆膜之间的泄压效果和动作特性差异[110]。在相同爆破压力的动态液压冲击下，压力释放阀损坏，液体呈发散状喷出；而防爆膜破裂，液体经导管引出。卢理成等进一步对比了在高能电弧故障下压力释放阀与防爆膜泄压效果的差异，结果如图 17 所示[76]，压力释放阀的螺栓脱落，整个压力释放阀已经脱离升高座；而防爆膜型压力释放装置在防爆膜破裂后经导油管将变压器中的油泄放到油池中。

目前，防爆膜型压力释放装置已经在白鹤滩—浙江等特高压直流工程中应用。但防爆膜型压力释放装置在电弧作用下的防爆泄压效果仅在变压器升高座区域得到了试验验证[76, 78]，在变压器其他结构处的动作泄压特性和防爆效果仍不明确，需要进一步研究。

3.3.3 防爆膜型压力释放阀

北京中瑞和等在防爆膜型压力释放装置的基础上提出了防爆膜型压力释放阀[111]，其主要结构如图 18 所示。防爆膜型压力释放阀主要由弹簧减压机构、防爆膜片与减压舱组成。

防爆膜型压力释放阀包含 2 个夹持器，其中下部夹持防爆膜片，上部夹持器则起固定整个泄压机构的作用，上、下夹持器之间用弹簧连接。上、下夹持器、防爆膜片及中间弹簧泄压机构形成可重复闭合的阀结构。防爆膜片承受正向压力，即变压器油箱内施加在膜片上的压力，主要单元为托架，托架上设置鳄齿及若干个桥段，当变压器油压较大、防爆膜爆破时托架上的桥段受力断裂。防爆膜片劈裂并被变压器油推开，与流体方向成 90°，金属密封膜被鳄齿割破，打开泄压通道。该防爆膜片的开启仅由变压器内部油流驱动，仅当变压器内部压力达到膜片爆破压力且压力上升速度较快时，防爆膜片才会开启。而当变压器油压尚未达到膜片爆破或压力上升速度较慢时，防爆膜片尚未动作，弹簧减压机构动作，打开释放变压器内压力；之后变压器内油压降低，弹簧减压机构复位，与压力释放阀作用效果一致。因此，当压力幅值较高、压力上升速度极快时，防爆膜片破裂，替代弹簧减压结构，打开更大的泄压通道进行泄压；当压力幅值较低、压力上升速度较慢时，阀结构动作，阀盘打开进行泄压。

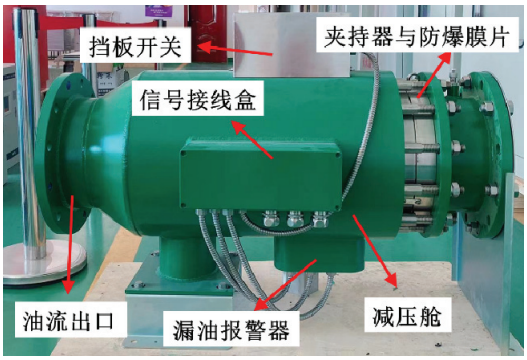


图 16 防爆膜型泄压装置

Fig.16 Explosion-proof membrane



(a) 安装防爆膜



(b) 安装压力释放阀

图 17 防爆膜与压力释放阀泄压效果对比

Fig.17 Comparison of pressure relief effect of explosion-proof membrane and pressure relief valve

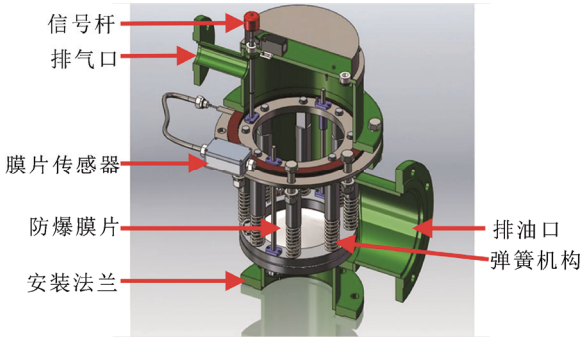


图 18 防爆膜型压力释放阀

Fig.18 Membrane-type pressure relief valve

目前防爆膜型压力释放阀凭借着兼具压力释放阀可重复闭合与防爆膜快速高效泄压的优势，已经在溪洛渡直流工程中试点应用，然而针对其动作与泄压特性以及在高能电弧故障下的泄压防爆效果尚未有深入且系统的研究。防爆膜型压力释放阀能否作为有效的高能电弧防爆泄压装置还须进一步试验与仿真验证。

3.3.4 快速泄压系统

SERGI Transformer Protector 公司提出了基于防爆膜的快速泄压系统[75]。该设备的具体工作流程包括：在变压器内部电弧故障发生后，防爆膜接收到电弧故障产生的压力波峰后动作，将变压器内的油气混合物通过减压舱排出，到达油气分离箱，将可燃气体引导至安全位置；同时利用氮气气体储存罐向油箱内注入氮气，以确保油箱中的可燃气体被完全排出并且降低油箱中油气混合物的温度，保护变压器的安全；管道上安装有单向百叶窗结构的阀门，用以将分离后的可燃气体单向排出，并避免外部空气进入箱体。国内土木行业标准 CECS 187—2005《油浸变压器排油注氮装置技术规程》对排油注氮装置设计、安装和验收等方面做出了具体的规定。

上述泄压装置本质上仍是利用防爆膜进行压力释放，其主要优势在于利用注入氮气和收集可燃气体显著降低了变压器起火点燃的风险。但是该系统复杂的管道系统大大增加了油流向外排出的流阻，不利于压力的传递和迅速释放，显著降低了防爆膜的泄压效率。同时，目前变压器防爆设计的主要问题仍在于箱体不能承受电弧故障产生的巨大压力，该方法降低起火风险的优势也无法体现。

3.4 变压器本体防爆技术发展

目前变压器本体防爆技术的作用原理及优缺点如表 1 所示。为解决变压器内部高能电弧故障引起设备爆炸的问题，需要针对变压器油箱耐压能力不足、压力释放装置的泄压能力与配置方案同满足大能量电弧故障下压力泄放需求不匹配等问题，进一步开展变压器油箱结构优化设计和高效压力释放装置等关键技术研究，研究局部结构优化与新型缓冲材料相融合的防爆型油箱设计方案，并研制高泄放能力的新型压力释放阀和防爆膜型压力释放装置，以提高电弧故障下变压器的承压与压力泄放能力；最后，综合变压器油箱结构增强与压力释放两种技术路线，研发相互配合的变压器防爆设计综合方案，全面、有效地提升变压器的耐电弧故障、承压与防爆能力。

表 1 变压器本体防爆技术比较

Table 1 Comparison of explosion proof technologies for transformer oil tank

变压器本体防爆技术		作用原理	优点	缺点
变压器结构优化设计	变压器结构加强设计	直接增强变压器结构薄弱点强度	方法较直接，易于设计	材料性能有限导致提升效果有限，增加生产成本
	增加柔性油箱与吸能材料	利用油箱形变或吸能材料吸收电弧故障能量	优化上限高于结构加强设计	处于研究的早期阶段，难以短时间内应用
压力释放技术	增加压力释放阀	弹簧阀盘打开受到压力打开，排油降压	可重复闭合	响应速度较慢，泄压效果有限，作用范围较小
	增加防爆膜型压力释放装置	防爆膜片承压破裂并打开，排油降压	响应速度快，全通径泄压，泄压效率相对较高	不能重复闭合，可靠性有待进一步验证
	增加防爆膜型压力释放阀	防爆膜+压力释放阀	理论上兼具可重复闭合与全通径泄压的优势	高能电弧作用下泄压效果与长期可靠性未得到验证
	增加快速泄压系统	防爆膜+气体收集装置	避免可燃气体接触空气，显著降低起火风险	集气管道显著降低了泄压效率，防爆效果受限

4 变压器火灾消防技术

变压器等油浸式电力设备内部发生高能电弧故障并导致油箱结构破坏后，大量的变压器油混合着高温变压器油蒸汽及裂解产物等可燃气体从油箱中逸出，一旦高温高压的可燃气体与空气混合后达到了点燃的条件，极易导致变压器起火燃烧甚至致使严重的变电站火灾事故，造成巨大的经济损失和严重的社会影响。因此，需要研究与变压器火灾相适配的消防灭火技术，在起火发生后迅速灭火控制事故规模，减少变压器爆燃带来的危害和损失。

4.1 变压器油火灾特性

变压器油是变压器的主要冷却和绝缘介质，容量极大，而变压器油燃烧热性直接影响变压器火灾的严重程度。对变压器油燃烧特征参数的研究，可以为变压器火灾的预防和扑灭提供科学依据和技术支持。

4.1.1 变压器油燃烧特征参数

闪点是衡量变压器油易燃性的重要指标。闪点直接影响变压器油的安全性与使用环境的要求。在实际应用中，如果变压器油的闪点较低，则意味着油品在较低温度下就可能会挥发并形成可燃气体，遇到火源时容易引发火灾。对于变压器油的选择与应用，确保其闪点在安全范围内至关重要[112]。

热释放率(heat release rate，HRR)表示在燃烧过程中单位时间内所释放的热量，通常以千瓦表示。HRR 越高，说明燃烧过程越剧烈，释放的能量越多，从而对周围环境的影响也越大。在变压器油燃烧时，高 HRR 可能会导致火焰迅速蔓延，增加灭火难度。了解变压器油的热释放率有助于制定有效的防火和灭火策略。

点火时间是指从点燃火源到油品开始燃烧所需的时间。这个参数与变压器油的组成和物理特性密切相关。点火时间越短，表明油品更容易被点燃，火灾风险也越高。研究发现，变压器油的点火时间不仅受油品本身的影响，还与环境温度、压力、湿度等外部条件密切相关。在高温高压环境下，变压器油的点火时间通常会缩短，从而增加火灾发生的可能性。在设计变压器及其附属设备时，必须充分考虑这些外部因素对点火时间的影响，以提高系统的整体安全性。

烟气释放率(smoke release rate，SRR)是另一个衡量变压器油燃烧特性的关键参数，表示在燃烧过程中单位时间内所释放的烟气量。烟气中含有大量有毒有害物质，对人体健康和环境都有极大的危害。在变压器油燃烧过程中，高 SRR 会导致火场烟雾弥漫，可见度降低，增加疏散和灭火的难度[113]。

研究者在相关的工作中发现，初始油温或外部辐射热通量(external radiation heat flux，ERHF)也会影响变压器油的燃烧过程[114]。随着初始油温的增加，点火时间明显减少，火焰燃烧更加剧烈，热释放率随之增加，且试验过程中变压器油的烟雾和 CO 排放速率也显著增加，表明初始油温越高，变压器油火灾危险性越大。

4.1.2 变压器油池火

变压器油作为一种典型的液体可燃物，具有易燃、易流动以及不可压缩等特征，从油箱顶部破裂口被引燃后形成典型的油池火灾。油池火是指一定厚度的燃油在物体表面燃烧的现象。当燃油泄漏到物体表面并向四周扩散时，如果受到阻挡或限制，燃油会在局部聚集，形成一定厚度的油池。一旦油池被点燃，就会形成油池火。油池火的热释放速率不仅取决于变压器油的特性，还与油池表面积和蒸发速率有关，而变压器油的蒸发速率则明显受到油温的影响。

文献[115]揭示了不同油池直径下变压器油的燃烧特性，在预热燃烧阶段，火焰主要受到油池直径和油品厚度的影响。较小的油池直径和较薄的油品厚度会导致火焰较快进入稳定燃烧阶段。稳定燃烧阶段，油品的燃烧速率随直径的增加而增加，火焰高度和热释放速率也随之增加。在火焰熄灭阶段，油池直径较大则火焰熄灭时间较长。

4.1.3 变压器油溢流火

在变压器的侧面发生开口时，变压器油从油箱侧面流出，变压器火灾易发展为溢流流淌火。溢流火通常发生在液态燃料的存储、运输和使用过程中。当变压器泄漏形成一层薄薄的燃烧液膜时，这种火灾会迅速蔓延。与传统油池火不同，溢流火的燃烧过程受到油传热的强烈影响，因为扩散区域没有完全受到物理边界的限制，形成的扩散变压器油层厚度相对较薄，一般为毫米级，导致油温迅速上升[116]。

溢流火的燃烧区域和变压器厚度直接受变压器油泄漏速率的影响，其燃烧过程主要由对流传热主导，约占总热反馈的 90%。流淌火会经历快速蔓延、收缩、准稳态燃烧、稳定燃烧和熄灭 5 个阶段。在快速蔓延阶段，变压器油泄漏后形成的液膜会迅速扩展并覆盖较大的表面积。在此过程中，液膜的厚度较薄，油温迅速升高，导致火焰迅速扩展。此阶段的燃烧速度较快，火焰高度和热释放速率急剧增加。收缩阶段发生在变压器油供应减弱或停止后。由于燃料供给减少，液膜的厚度逐渐变薄，火焰逐渐缩小并向泄漏源头回缩。此时，燃烧强度有所减弱，但由于变压器油仍在持续挥发，火焰不会立即熄灭。准稳态燃烧阶段是溢流火的主要燃烧阶段。在这一阶段，变压器油泄漏速度和火焰燃烧速率达到相对平衡，火焰高度和热释放速率保持相对稳定。变压器油层的厚度在此阶段也趋于稳定，火焰的传播速度减缓。稳定燃烧阶段是溢流火进入稳定状态后，变压器油泄漏速率和燃烧速率达到动态平衡，火焰高度和热释放速率保持恒定。此阶段的燃烧过程相对平稳，火灾的蔓延速度明显减缓。熄灭阶段是溢流火的最后一个阶段，当燃料消耗殆尽或外界条件如灭火措施等作用下，火焰逐渐熄灭。在这一

阶段，热释放速率和烟气释放量迅速下降，火焰高度逐渐降低，直至完全熄灭。

溢流火的燃烧特性不仅受燃料种类和泄漏速率的影响，还与环境条件密切相关。例如，风速和风向会显著影响火焰的蔓延速度和方向，温度和湿度则会影响燃料的挥发速率和燃烧强度。因此，在研究和防控溢流火时，必须综合考虑这些因素，以制定有效的消防对策。

4.1.4 变压器喷射火火灾

变压器喷射火通常指变压器油在内部高压作用下通过箱体上的泄漏口喷射出来并被点燃的火灾。这种火灾通常发生在变压器爆炸后的短时间内，具有高动量持续喷射的特点。喷射火不仅能够直接冲击周围的设备，还会在火焰周围持续产生强烈的热辐射。

火焰长度是喷射火的重要几何参数，被定义为从泄漏口到可燃混合气燃烧下限的射流轴线长度。火焰长度会影响火焰冲击范围和近场热辐射分布。根据国内外已经建立的关于喷射火长度特征的半经验模型[117-118]，火焰长度通常被认为会经历 3 个阶段。在第 1 阶段，火焰长度随着喷出速度增加而增大，属于层流火焰阶段；在第 2 阶段，火焰湍流作用加强，火焰长度不再增加，出现减小的转折区域，称为过渡阶段；在第 3 阶段，火焰充分发展，火焰长度保持稳定的水平。

喷射火的另外一个重要参数是火焰推举距离，被定义为从喷口到可见火焰底部的距离，其主要影响喷射火的热辐射分布特征、火焰稳定性。研究发现，推举距离与出口速度之间呈现线性增长关系，且不受喷口直径影响[119-120]。

变压器喷射火通常是由高温或高能电弧放电引起的，一般火焰长度较大，泄漏口处动量大、能量密度大，造成火灾扑救难度大。因此，在开展变压器喷射火灾防控研究时，需要针对其火焰长度大、油流动量大的特征开展针对性的消防措施研究。

4.2 变压器消防灭火系统

4.2.1 固定灭火系统

变压器的固定消防设施主要包括水喷雾灭火系统和泡沫喷雾灭火系统。这 2 种系统分别依据 GB 50219—2014《水喷雾灭火系统技术规程》和 GB 50151—2010《泡沫灭火系统设计规范进行设计》，总体上也参照依据 GB 50229—2019《火力发电厂与变电站设计防火标准》。水喷雾灭火系统利用高压水雾覆盖火源，通过水的蒸发吸热作用，迅速冷却火焰及其周围环境，同时隔绝氧气，从而有效抑制火灾蔓延。细水雾灭火系统是利用特制喷嘴将水雾化成微小水滴，形成高密度的细水雾云，细水雾在火焰中迅速汽化，吸收大量热量，降低火焰温度，并在火焰表面形成水蒸气层，阻断氧气的供给。泡沫灭火系统包括泡沫喷雾系统和压缩空气泡沫系统。泡沫通过覆盖火源，隔绝氧气并冷却火焰，从而灭火[121]。

其他常见的灭火系统如表 2 所示。消防炮灭火系统，通过大口径消防炮直接喷射高压水或泡沫至火源，覆盖和冷却火焰，从而迅速灭火。干粉灭火系统使用干粉灭火剂，通过化学反应中断燃烧过程，从而灭火。二氧化碳灭火系统通过释放二氧化碳，迅速降低火场周围的氧气浓度，从而抑制燃烧。

根据上述灭火方案的特点和应用场景，可以在实际应用中选择适合的灭火系统或组合使用多种系统，以提高灭火效果和可靠性。

4.2.2 灭火系统改进方案

现有的灭火系统在面对大型变压器火灾时暴露出一些不足。例如，水喷雾和泡沫喷雾的喷头有效射程较小，必须贴近变压器设置，易受变压器爆炸的影响而失效。为此，研究人员也提出来一些改进方案。

1）提升水喷雾灭火系统的供给时间

参考美国、日本及英国的相关标准，将水喷雾

表 2 消防灭火系统比较

Table 2 Comparison of fire suppression systems

灭火系统	优点	缺点	适用火灾类型
水喷雾灭火系统	冷却迅速，覆盖面积大，适用范围广	水资源消耗大，对电气设备可能有损害	油类火灾
细水雾灭火系统	用水量少，灭火效率高	初期成本较高，对系统维护要求高	油类火灾、电气火灾
消防炮灭火系统	灵活性高，操作简便，覆盖范围广	需要人员操作，自动化程度较低	各种大型火灾
泡沫灭火系统	对油类火灾特别有效，灭火迅速	设备维护复杂，泡沫对环境有一定影响	油类火灾
干粉灭火系统	灭火速度快，适用范围广，成本较低	干粉可能对设备和环境造成污染	各种火灾
二氧化碳灭火系统	灭火效率高，无残留物，不会对设备损害	对人员安全有潜在威胁，需注意通风	封闭环境中的电气火灾

灭火系统的持续供给时间提升至 60 min 以上。此举不仅可以有效抑制火灾蔓延，还能为外部消防救援队的到达争取时间。

2）优化灭火系统的启动方式

在传统的变压器火灾探测系统中，通常采用双感温电缆模式。为了提高系统的可靠性，可以增加变压器断路器跳闸信号作为灭火系统启动的条件。这种优化设计能够减少误动作，确保系统在火灾初期迅速启动。

3）引入压缩空气泡沫灭火系统

压缩空气泡沫灭火系统是一种基于正压产泡方式的新型灭火系统。该系统通过泡沫比例混合装置和气液比例混合系统，将泡沫液与空气混合，形成高效的灭火泡沫。相比传统的低、中、高倍泡沫系统，压缩空气泡沫系统具有灭火速度快、覆盖面积大、抗爆性能好的优点。

4.2.3 灭火系统的综合评价

水喷雾系统适用于初期火灾的迅速控制，泡沫喷雾系统则在覆盖和抑制油火方面效果显著。新型压缩空气泡沫系统由于其高效性和安全性，逐渐成为研究热点。

综合考虑变压器火灾的复杂性和潜在风险，未来的灭火系统应朝着以下所述的方向发展。

1）高效覆盖：灭火系统应能够迅速覆盖整个火灾区域，防止火势蔓延。

2）抗爆能力：系统设计需考虑变压器爆炸的风险，确保关键部件在爆炸后仍能正常工作。

3）智能化控制：通过引入智能感知和控制技术，实现灭火系统的自动化和智能化，提高了灭火效率。

5 结论与展望

本文基于变压器内部电弧故障的物理过程与主要特征变化，从变压器电弧故障预警、电弧故障快速清除、变压器防爆技术以及防火消防等方面总结归纳了降低设备爆燃风险、减少故障危害的技术方案，对比分析了故障现有的变压器故障预警、防爆与消防等技术存在的优势与不足，得到结论和进一步的研究展望如下所述。

1）变压器电弧故障能量释放剧烈、发展速度极快，同时造成的损失巨大。主要从变压器故障预警、故障快速保护及清除、本体防爆技术和火灾消防技术方面开展研究，需要针对电弧故障的各个阶段开展针对性防御设计，以最大限度减少变压器爆燃风险和减少电弧故障危害。

2）目前状态监测技术对变压器状态评价的支撑不足，导致高能电弧故障的准确预警能力不满足防爆燃的要求。探究油中色谱、声、光、热和机械等多参量融合的一体化监测方法，并进一步结合人工智能技术，是实现电弧故障快速与准确预警的重要发展方向。

3）变压器电弧故障快速清除需要进一步发展精准、可靠的电弧故障快速保护与开关设备高速开断与闭合技术，降低设备爆燃风险。一方面需要重点利用压力、光信号等非电量特征实现基于多维特征量的变压器电弧故障快速检测；另一方面，采用触发间隙转移熄弧与快速高压断路器相结合的方案，是发展电弧故障快速清除的主要技术路线之一。

4）变压器内部电弧故障压力特性是变压器防爆设计的理论基础，目前电弧故障压力特性的研究集中于压力的本征特征，变压器结构件对压力的影响规律尚不清晰，亟须进一步通过试验与仿真深入完善电弧故障压力特性研究，更好地支撑变压器防爆优化设计。

5）现有的变压器油箱结构增强方案与泄压方案对电弧故障压力特征针对性不足，防爆能力不满足当前大型电力变压器防爆要求，后续研究需要基于电弧故障压力特征，融合局部结构改进加强、采用新型缓冲材料的变压器防爆型油箱设计方案，并研制高泄放能力的新型压力释放阀和防爆膜型压力释放装置，结合变压器油箱结构增强与压力释放这 2 种技术手段，协同提升变压器的耐电弧故障与防爆能力。

6）未来的灭火系统应朝着高效覆盖、智能化控制的方向发展，实现灭火系统的自动化和智能化，并对变压器爆燃事故可能引起的油池火、溢流火以及喷射火的火焰特征开展针对性灭火技术研究，提高灭火设备的抗爆能力以及对电弧故障爆燃事故的灭火效率。

参考文献 References

[1] 刘泽洪. ±1 100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J]. 中国电机工程学报，2020，40(23)：7782-7791.
LIU Zehong. Findings in development of ±1 100 kV UHVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7782-7791.

[2] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京：中国电力出版社，2013：1-22.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing, China:

China Electric Power Press, 2013: 1-22.

[3] 周远翔，陈健宁，张 灵，等.“双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.

[4] 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.

[5] 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 accidents of 500 kV power transformers[J]. Electric Engineering, 2016(4): 52-53, 59.

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

[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] JIN L, KIM D, ABU-SIADA A, et al. Oil-immersed power transformer condition monitoring methodologies: a review[J]. Energies, 2022, 15(9): 3379.

[9] LI S J, GE Z, ABU-SIADA A, et al. A new technique to estimate the degree of polymerization of insulation paper using multiple aging parameters of transformer oil[J]. IEEE Access, 2019, 7: 157471-157479.

[10] 杨丽君，廖瑞金，孙会刚，等. 变压器油纸绝缘热老化特性及特征量研究[J]. 电工技术学报，2009，24(8)：27-33.
YANG Lijun, LIAO Ruijin, SUN Huigang, et al. Investigation on properties and characteristics of oil-paper insulation in transformer during thermal degradation process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 27-33.

[11] 廖瑞金，杨丽君，郑含博，等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报，2012，27(5)：1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.

[12] TORKAMAN H, KARIMI F. Measurement variations of insulation resistance/polarization index during utilizing time in HV electrical machines-a survey[J]. Measurement, 2015, 59: 21-29.

[13] BUSTAMANTE S, MANANA M, ARROYO A, et al. Dissolved gas analysis equipment for online monitoring of transformer oil: a review[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4057.

[14] 杨廷方，刘 沛，李景禄，等. FCM 结合 IEC 三比值法诊断变压器故障[J]. 高电压技术，2007，33(8)：66-70.
YANG Tingfang, LIU Pei, LI Jinglu, et al. New fault diagnosis method of power transformer by combination of FCM and IEC three-ratio method[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 66-70.

[15] 廖瑞金，廖玉祥，杨丽君，等. 多神经网络与证据理论融合的变压器故障综合诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报，2006，26(3)：119-124.
LIAO Ruijin, LIAO Yuxiang, YANG Lijun, et al. Study on synthetic diagnosis method of transformer fault using multi-neural network and evidence theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 119-124.

[16] 张卫华，苑津莎，张铁峰，等. 应用 B 样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报，2014，34(24)：4129-4136.
ZHANG Weihua, YUAN Jinsha, ZHANG Tiefeng, et al. An improved three-ratio method for transformer fault diagnosis using B-spline Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4129-4136.

[17] IEEE. IEEE guide for the interpretation of gases generated in mineral oil-immersed transformers: IEEE Std C57.104—2019[S]. New York, USA: IEEE, 2019.

[18] 李军浩，韩旭涛，刘泽辉，等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.

[19] 郭 俊，吴广宁，张血琴，等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报，2005，20(2)：29-35.
GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 29-35.

[20] 唐 炬，欧阳有鹏，范 敏，等. 用于检测变压器局部放电的荧光光纤传感系统研制[J]. 高电压技术，2011，37(5)：1129-1135.
TANG Ju, OUYANG Youpeng, FAN Min, et al. System using fluorescent fiber for partial discharge detection in transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1129-1135.

[21] ASLAM M, HAQ I U, REHAN M S, et al. Dynamic thermal model for power transformers[J]. IEEE Access, 2021, 9: 71461-71469.

[22] HU Y W, ZHENG J, HUANG H. Experimental research on power transformer vibration distribution under different winding defect conditions[J]. Electronics, 2019, 8(8): 842.

[23] SECIC A, KRPAN M, KUZLE I. Vibro-acoustic methods in the condition assessment of power transformers: a survey[J]. IEEE Access, 2019, 7: 83915-83931.

[24] 汲胜昌，程 锦，李彦明. 油浸式电力变压器绕组与铁心振动特性研究[J]. 西安交通大学学报，2005，39(6)：616-619，658.
JI Shengchang, CHENG Jin, LI Yanming. Research on vibration characteristics of windings and core of oil-filled transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 616-619, 658.

[25] 胡赵宇，李 喆，陈海威，等. 基于声纹压缩和代价敏感的变压器状态检测评估方法[J]. 电力工程技术，2024，43(3)：209-216.
HU Zhaoyu, LI Zhe, CHEN Haiwei, et al. Transformer state detection and assessment method based on voiceprint compression and cost-sensitive techniques[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 209-216.

[26] 陈 彬，刘 阁. 变压器油中微水含量在线监测方法研究进展[J]. 高电压技术，2020，46(4)：1405-1416.
CHEN Bin, LIU Ge. Research progress in on-line monitoring methods of micro-water content in transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1405-1416.

[27] 王健一，刘雪丽，孙建涛，等. 油纸绝缘新型老化表征物研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报，2021，41(21)：7517-7528.
WANG Jianyi, LIU Xueli, SUN Jiantao, et al. Research progress and prospect of new aging characterization of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7517-7528.

[28] 李 岩，滕 云，冷欧阳，等. 数据驱动的输电线路在线监测装置可靠性评估[J]. 中国电机工程学报，2018，38(15)：4410-4419.
LI Yan, TENG Yun, LENG Ouyang, et al. Reliability evaluation of on-line monitoring device over transmission line based on data driven concept[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4410-4419.

[29] KAISER J. Dealing with missing values in data[J]. Journal of Systems Integration, 2014, 5(1): 42-51.

[30] MIRANDA V, KRSTULOVIC J, KEKO H, et al. Reconstructing missing data in state estimation with autoencoders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 604-611.

[31] 吴俊宏，张 印，李 莎，等. 基于 LSTM 算法的线路故障智能诊断方法研究[J]. 大电机技术，2023(增刊 2)：62-67.
WU Junhong, ZHANG Yin, LI Sha, et al. Research on intelligent diagnosis method for line faults based on LSTM algorithm[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(Supplement 2): 62-67.

[32] 张又文，冯 斌，陈 页，等. 基于遗传算法优化 XGBoost 的油浸式变压器故障诊断方法[J]. 电力自动化设备，2021，41(2)：200-206.
ZHANG Youwen, FENG Bin, CHEN Ye, et al. Fault diagnosis method for oil-immersed transformer based on XGBoost optimized by genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 200-206.

[33] 周远翔，林孟龙，陈健宁，等. 基于自注意力生成对抗网络的电力设备在线监测缺失数据填补[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1795-1809.
ZHOU Yuanxiang, LIN Menglong, CHEN Jianning, et al. Missing data imputation for online monitoring of power equipment based on self-attention generative adversarial networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1795-1809.

[34] 盛戈皞，钱 勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3072-3084.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084.

[35] 陈 思，刘亚东，严英杰，等. 10 kV 油浸式变压器匝间短路故障反演与定位[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1870-1881.
CHEN Si, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Inversion and localization of turn-to-turn short-circuit faults in 10 kV oil-immersed transformers[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1870-1881.

[36] 张景晨. 高压换流站噪声源的特性与反演方法研究[D]. 北京：中国电力科学研究院，2020.
ZHANG Jingchen. Characteristic and inversion method of noise sources in HVDC converter stations[D]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2020.

[37] 张 晗，常 安，王 奇，等. 基于多源信息的变压器状态评价方案研究与应用[J]. 高压电器，2016，52(2)：19-27.
ZHANG Han, CHANG An, WANG Qi, et al. Research and application of transformer condition evaluation model based on multi-source information[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 19-27.

[38] 刘云鹏，许自强，李 刚，等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术，2019，45(2)：337-348.
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, LI Gang, et al. Review on applications of artificial intelligence driven data analysis technology in condition based maintenance of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 337-348.

[39] 赵文清，朱永利，姜 波，等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. 高电压技术，2008，34(5)：1032-1039.
ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, JIANG Bo, et al. Condition assessment for power transformers by Bayes networks[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 1032-1039.

[40] 王永强，律方成，李和明. 基于粗糙集理论和贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报，2006，26(8)：137-141.
WANG Yongqiang, LÜ Fangcheng, LI Heming. Synthetic fault diagnosis method of power transformer based on rough set theory and Bayesian network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 137-141.

[41] 廖瑞金，王 谦，骆思佳，等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化，2008，32(3)：70-75.
LIAO Ruijin, WANG Qian, LUO Sijia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 70-75.

[42] 张镱议，廖瑞金，杨丽君，等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报，2012，27(5)：13-20.
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.

[43] 俞 乾，李卫国. 模糊集对分析模型在大型电力变压器状态评价中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2013，44(2)：598-603.
YU Qian, LI Weiguo. Application of fuzzy set pair analysis model to power transformer condition assessment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(2): 598-603.

[44] 国家能源局. 变压器油中溶解气体分析和判断导则：DL/T 722—2014[S]. 北京：中国电力出版社，2015.
National Energy Administration. Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil: DL/T 722—2014[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2015.

[45] 唐文虎，牛哲文，赵柏宁，等. 数据驱动的人工智能技术在电力设备状态分析中的研究与应用[J]. 高电压技术，2020，46(9)：2985-2999.
TANG Wenhu, NIU Zhewen, ZHAO Boning, et al. Research and application of data-driven artificial intelligence technology for condition analysis of power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 2985-2999.

[46] 贺家李，李永丽，董新洲，等. 电力系统继电保护原理[M]. 4 版. 北京：中国电力出版社，2010.
HE Jiali, LI Yongli, DONG Xinzhou, et al. Principles of power system protection[M]. 4th ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2010.

[47] 栾云飞. 基于统计量的电力变压器电流波形特征分析和励磁涌流辨识方法研究[D]. 广州：华南理工大学，2023.
LUAN Yunfei. Research on analysis of power transformer current waveform characteristics and identification method of excitation inrush current based on statistics[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2023.

[48] 郝治国，张保会，褚云龙. 变压器励磁涌流鉴别技术的现状和发展[J]. 变压器，2005，42(7)：23-27.
HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, CHU Yunlong. Trend and situation of distinguish technology of transformer magnetizing inrush current[J]. Transformer, 2005, 42(7): 23-27.

[49] 黄大卓，严柏平，沈春城，等. 基于二次谐波分量衰减特性的变压器励磁涌流识别方法[J]. 变压器，2023，60(1)：28-34.
HUANG Dazhuo, YAN Baiping, SHEN Chuncheng, et al. A novel inrush current distinguishing scheme based on second harmonic component decaying characteristics of transformer current[J]. Transformer, 2023, 60(1): 28-34.

[50] 王祖光. 间断角原理变压器差动保护[J]. 电力系统自动化，1979，3(1)：18-30.
WANG Zuguang. Interrupting angle principle for transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1979, 3(1): 18-30.

[51] 孙志杰，陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化，1996，20(4)：42-46.

SUN Zhijie, CHEN Yunlun. Transformer differential protection based on the characteristic analysis of the first and second half cycle of the magnetizing in-rush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4): 42-46.

[52] PHADKE A G, THORP J S. A new computer-based flux-restrained current-differential relay for power transformer protection[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(11): 3624-3629.

[53] YABE K. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1109-1118.

[54] 闫晨光. 基于压力特征的油浸式电力变压器保护新原理研究[D]. 西安：西安交通大学，2017.
YAN Chenguang. Research on a novel oil-immersed power transformer protection based on pressure characteristic[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2017.

[55] 张国栋，刘　凯，蒲海涛，等. 基于长短时记忆神经网络的励磁涌流与故障电流识别方法[J]. 上海交通大学学报，2024，58(5)：730-738.
ZHANG Guodong, LIU Kai, PU Haitao, et al. Identification of inrush current and fault current based on long short-term memory neural network[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(5): 730-738.

[56] 邹成明，孔玲玲. 基于双通道深度学习网络的励磁涌流识别研究[J/OL]. 云南民族大学学报(自然科学版)，2024：1-10[2024-07-31]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1192.n. 20240605.1540.002. html.
ZOU Chengming, KONG Lingling. Excitation inrush current identification based on dual-channel deep learning network[J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2024: 1-10[2024-07-31]. http: //kns. cnki. net/kcms/detail/53.1192. n. 20240605.154 0.002. html.

[57] 闫晨光，徐　彻，曹　培，等. 电力变压器瓦斯继电器暂态动作特性研究[J]. 电工电能新技术，2022，41(5)：1-7.
YAN Chenguang, XU Che, CAO Pei, et al. Research on transient characteristics of power transformer gas relay[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(5): 1-7.

[58] 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.

[59] 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.

[60] 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.

[61] 李昊宇. 油浸式变压器电弧放电故障检测研究[D]. 福州：福建工程学院，2019.
LI Haoyu. Research on arc discharge fault detection of oil-immersed transformer[D]. Fuzhou, China: Fujian University of Technology, 2019.

[62] 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.

[63] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2353-2361.
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361.

[64] 钟建英，陈　刚，谭盛武，等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2769-2782.
ZHONG Jianying, CHEN Gang, TAN Shengwu, et al. Key technology and development trend of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2769-2782.

[65] 白　苏. SF_6 断路器灭弧室特性试验测量方法的研究[D]. 北京：清华大学，2019.
BAI Su. Research on test and measurement method for characteristics of arc extinguish chamber of SF_6 circuit breakers[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2019.

[66] 杨兰均，马江波，黄　东，等. 高压合成回路用放电开关等离子体触发装置特性[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3474-3480.
YANG Lanjun, MA Jiangbo, HUANG Dong, et al. Characteristics of the plasma triggering device applied to discharge switch for HV synthetic circuit[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3474-3480.

[67] 李　颖，靳建伟，陈　立，等. FLTD 三电极场畸变气体开关寿命特性[J]. 强激光与粒子束，2020，32(3)：035002.
LI Ying, JIN Jianwei, CHEN Li, et al. Lifetime characteristic of three-electrode field-distortion gas switch of fast linear transformer driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(3): 035002.

[68] 廖敏夫，董华庆，陈占清，等. 不同电极激光触发真空开关高频开断能力研究[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2578-2585.
LIAO Minfu, DONG Huaqing, CHEN Zhanqing, et al. Research on high-frequency interruption capacity of LTVS with different electrodes[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2578-2585.

[69] 张明康，刘轩东，沈　曦，等. 喷射等离子体触发气体开关导通特性[J]. 强激光与粒子束，2019，31(12)：125003.
ZHANG Mingkang, LIU Xuandong, SHEN Xi, et al. Discharge characteristics of a gas switch triggered by ejected plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(12): 125003.

[70] 郜　淦，李晓昂，张宁博，等. 增强型等离子体喷射装置及其触发极限[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3334-3343.
GAO Gan, LI Xiaoang, ZHANG Ningbo, et al. Enhanced plasma ejector and its trigger limit[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3334-3343.

[71] 李志兵，徐晓东，张　然，等. ±800 kV 混合直流输电工程用 DC 80 kV SF_6/N_2 等离子体喷射触发间隙研制[J]. 高电压技术，2023，49(3)：937-945.
LI Zhibing, XU Xiaodong, ZHANG Ran, et al. Development of DC 80 kV SF_6/N_2 plasma injection trigger gap for ±800 kV hybrid DC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 937-945.

[72] BARKAN P, DAMSKY B L, ETTLINGER L F, et al. Overpressure phenomena in distribution transformers with low impedance faults: experiment and theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(1): 37-48.

[73] 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.

[74] 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.

[75] MULLER S B, BRADY R, DE BRESSY G L, et al. Prevention of transformer tank explosion: part 1-experimental tests on large trans-

formers[C]//ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference. Chicago, Illinois, USA: ASME, 2008: 357-365.

[76] 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.

[77] 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.

[78] 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.

[79] 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.

[80] YAN C G, LIU H, XU C, et al. Limitations and performance of pressure relief devices in on-load tap changer compartments under arcing faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(4): 2520-2529.

[81] 邵宇航，吕晓露，李金忠，等. 电弧故障时分体式有载分接开关结构失效风险仿真研究[J]. 西安交通大学学报，2024，58(7)：129-138.
SHAO Yuhang, LÜ Xiaolu, LI Jinzhong, et al. Simulation study on the risk of structural failure in separate type on-load tap changers during arc faults[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(7): 129-138.

[82] 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.

[83] 田玉滨，李　朝，张春巍. 爆炸荷载作用下配筋砌体结构的动力响应[J]. 爆炸与冲击，2012，32(6)：658-662.
TIAN Yubin, LI Zhao, ZHANG Chunwei. Dynamic response of reinforced masonry structure under blast load[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(6): 658-662.

[84] 吴志军，张鹏林，刘泉声，等. 基于零厚度粘聚力单元的钢筋混凝土板在爆炸荷载下的动态破坏过程分析[J]. 工程力学，2018，35(8)：79-90，110.
WU Zhijun, ZHANG Penglin, LIU Qunsheng, et al. Dynamic failure analysis of reinforced concrete slab based on cohesive element under explosive load[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8): 79-90, 110.

[85] 王志强，陈忠宇. 基于 LS-DYNA 的船-桥墩碰撞分析[J]. 工程建设与设计，2024(11)：83-85.
WANG Zhiqiang, CHEN Zhongyu. The design of long-cantilevered steel canopy[J]. Construction & Design for Engineering, 2024(11): 83-85.

[86] KAWAMURA T. Prevention of tank rupture due to internal fault of oil-filled transformer[C]//32nd International Conference on Large High Voltage Electric Systems. Paris, France: CIGRE, 1988: 1-7.

[87] 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.

[88] 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.

[89] 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.

[90] 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.

[91] 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.

[92] 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.

[93] 姜　岚，陈云桥，王　爽，等. 基于实际气体模型的油浸式变压器爆炸应力分布研究[J]. 变压器，2024，61(1)：29-34.
JIANG Lan, CHEN Yunqiao, WANG Shuang, et al. Study on stress distribution of oil-immersed transformer explosion based on actual gas model[J]. Transformer, 2024, 61(1): 29-34.

[94] YAO H W, LV K F, LOU Z, et al. Simulation study on oil pressure problems caused by internal faults in oil-immersed transformers[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 175: 190-198.

[95] 朱　昱. 基于 Johnson-Cook 模型的 Q355B 钢动态本构关系研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2019.
ZHU Yu. Research on dynamic constitutive relationship of Q355B steel based on Johnson-Cook model[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2019.

[96] 马四龙，张胜利，宣　罗. 变压器油箱强度分析与结构改进[J]. 中小企业管理与科技，2014(7)：212-213.
MA Silong, ZHANG Shengli, XUAN Luo. Strength analysis and structural improvement of transformer tank[J]. Management & Technology of SME, 2014(7): 212-213.

[97] 于泉泉，王永刚，徐莲环. 基于 ANSYS 的典型变压器油箱结构强度分析[J]. 变压器，2014，51(11)：33-37.
YU Quanquan, WANG Yonggang, XU Lianhuan. Strength analysis of typical transformer tank based on ANSYS[J]. Transformer, 2014, 51(11): 33-37.

[98] 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.

[99] HACKL A, HAMBERGER P. Predict the rupture of transformer tanks with static FEM analysis[C]//2012 XXth International Conference on Electrical Machines. Marseille, France: IEEE, 2012: 2358-2361.

[100] BRODEUR S, SALMI Y, COLLIER A. A flexible friend[J]. ABB Review, 2016, 1(1): 18-22.

[101] 敬　霖，王志华，赵隆茂. 多孔金属及其夹芯结构力学性能的研究进展[J]. 力学与实践，2015，37(1)：1-24，48.
JING Lin, WANG Zhihua, ZHAO Longmao. Advances in studies of the mechanical performance of cellular metals and related sandwich structures[J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(1): 1-24, 48.

[102] 姚兆楠. 负泊松比蜂窝材料和功能梯度蜂窝材料的冲击动力学性能研究[D]. 西安：长安大学，2015.

YAO Zhaonan. Dynamic crushing performance of auxetic honeycombs and functionally graded honeycombs[D]. Xi'an, China: Chang'an University, 2015.

[103] 刘洋佐，徐　诚，马吴宁，等. 小口径弹丸侵彻双箭头负泊松比蜂窝夹芯结构的弹道特性[J/OL]. 上海交通大学学报，2023：1-21[2024-07-31]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu. 2023.293.
LIU Yangzuo, XU Cheng, MA Wuning, et al. Ballistic characteristics of small-caliber bullet penetration arrowhead negative Poisson's ratio honeycomb core structures[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023: 1-21[2024-07-31]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu. 2023.293.

[104] 高松林. 星形负泊松比结构抗冲击性能研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2019.
GAO Songlin. Study on shock resistance of star egative poisson ratio structure[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2019.

[105] YAN C G, GUO J X, ZHANG P, et al. Prevention of oil-immersed equipment rupture due to arcing faults based on metal foam[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(4): 2965-2968.

[106] 罗　亮，邱勇令，李金忠，等. 油浸式变压器新型压力释放阀动力学分析[J]. 变压器，2022，59(9)：20-29.
LUO Liang, QIU Yongling, LI Jinzhong, et al. Dynamic analysis of a new pressure relief valve for oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2022, 59(9): 20-29.

[107] 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.

[108] 程　林，周　盟，郭家旭，等. 特高压换流变压器压力释放阀布置方式[J]. 电网与清洁能源，2024，40(4)：44-53.
CHENG Lin, ZHOU Meng, GUO Jiaxu, et al. A study on the arrangement of pressure relief devices in UHV converter transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4): 44-53.

[109] CHEN S W, GUO Z C, DU G, et al. A balanced design concept of anti-explosion and design scheme of pressure relief device of UHV transformer[C]//2021 3rd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). Shanghai, China: IEEE, 2021: 95-99.

[110] 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.

[111] 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.

[112] 赵金龙. 持续泄漏溢油流淌火扩散和燃烧机理与模型研究[D]. 北京：清华大学，2018.
ZHAO Jinlong. Experimental and model study on the spread and burning behaviors of continuous liquid spill fires[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2018.

[113] 陈　涛，王雨薇，张佳庆，等. 典型变压器油燃烧特性及烟气危害性研究[J]. 消防科学与技术，2021，40(8)：1125-1129.
CHEN Tao, WANG Yuwei, ZHANG Jiaqing, et al. Study on the fire characteristics and smoke hazards of typical transformer oils[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(8): 1125-1129.

[114] ZHANG B S, ZHANG J Q, HUANG Y, et al. Burning process and fire characteristics of transformer oil: a study focusing on the effects of oil type[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 139(3): 1839-1848.

[115] 陈　晟，邓洁清，鞠振福，等. 变压器油池火燃烧规律的实验研究[J]. 中国安全生产科学技术，2020，16(8)：63-68.
CHEN Sheng, DENG Jieqing, JU Zhenfu, et al. Experimental study on combustion laws of transformer oil pool fire[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(8): 63-68.

[116] TONG W X, JI J, WANG C, et al. Experimental study on the combustion behaviors of continuous methanol spill fires on the vertical plane[J]. Energy, 2023, 285: 129475.

[117] HAWTHORNE W R, WEDDELL D S, HOTTEL H C. Mixing and combustion in turbulent gas jets[J]. Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena, 1948, 3(1): 266-288.

[118] HOTTEL H C, HAWTHORNE W R. Diffusion in laminar flame jets[J]. Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena, 1948, 3(1): 254-266.

[119] GAUTAM T. Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air[J]. Combustion Science and Technology, 1983, 41(1/2): 17-29.

[120] PETERS N, WILLIAMS F A. Liftoff characteristics of turbulent jet diffusion flames[J]. AIAA Journal, 1983, 21(3): 423-429.

[121] 陈宝辉，李　波，吴传平，等. 特高压变压器消防能力提升设计方案及分析[J]. 消防科学与技术，2020，39(8)：1134-1137.
CHEN Baohui, LI Bo, WU Chuanping, et al. Analysis of improvement strategies for the fire extinguishing systems of UHV transformers[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8): 1134-1137.



周远翔(通信作者)
1966—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压与绝缘技术的教学与科研工作
E-mail: zhou-yx@tsinghua.edu.cn

ZHOU Yuanxiang
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-08-01　修回日期　2024-09-13　　编辑　曾文君