[自动集气系统]

基于图像识别的瓦斯继电器气体状态监测和自动集气系统研究

文/蔡韧[1] 高梵清[1] 张坤[1] 宋人杰[1] 朱立铭[1] 周琪[2]
1. 国网上海市电力公司；2. 上海服泽能源科技有限公司

针对传统的瓦斯继电器人工巡检目视辨别气体状态的弊端，以无人自动化为目标，设计出一种基于图像识别的瓦斯继电器气体状态监测和自动集气系统，包括气体状态监测与集气控制嵌入式控制系统、本地监控及气体分析终端、物联网远程监控及报警中心三部分，可在不改变被检测瓦斯继电器现有机械结构、功能、性能和绝缘防护水平的前提下，基于视觉图像识别算法获取变压器瓦斯继电器内的气体状态。

变压器是电力系统中最为核心的组件之一，承担着电压变换以及无功补偿等重要任务，其安全稳定运行对于电能的可靠传输及灵活分配起着至关重要的作用。随着我国电力工业的飞速发展，用电需求以及电网电压等级的不断提高，现代大型变压器具有容量大、价值高、结构复杂和可靠性高等特点。虽然电力变压器的故障率呈减小的趋势，但是其一旦发生故障，产生的后果将更加严重，影响范围更大，停电负荷更多，甚至对区域电力系统的安全稳定造成影响[1-2]。因此，为了满足日益增长的对电能质量以及供电可靠性的需求，采用各种措施来监测电力变压器的状态、识别故障隐患，是保证电力系统安全稳定运行的重要工作。目前，瓦斯保护仍然沿用传统瓦斯继电器的保护形式。瓦斯继电器（又称气体继电器）是变压器所常用的一种保护装置，装在变压器的储油柜和油箱之间的管道内，变压器内部故障使油分解产生气体或造成油流涌动时，瓦斯继电器的接点动作，接通指定的控制回路，并及时发出信号告警（轻瓦斯）或启动保护元件自动切除变压器（重瓦斯）。一般容量在800 kV·A以上的油浸式变压器均有瓦斯继电器[3]。

目前大部分变电站仍然采用定期到现场抄表和人工巡检传统的数据采集方式获取变压器瓦斯继电器内的气体状态，该方式存在数据采集不准确、不及时的弊端[4]。因为不同瓦斯继电器内部结构、容积均不同，只依靠人眼观察获取瓦斯继电器内气体状态，容易受到观察角度、距离以及巡视人员自身状态的影响，存在较大误差，而且人工巡检抄表记录受到巡视次数的限制，使得瓦斯继电器气体液位变化存在监测不及时的情况。据不完全统计，2010—2020年，国家电网有限公司110 kV及以上变压器轻瓦斯误报警比率为18.7%。由于无法掌握瓦斯继电器真实气体体积，难以辨别误报警情况，不利于故障及时诊断[5]。

当前阶段关于瓦斯继电器的相关技术主要集中在瓦斯继电器的结构优化以及增加内部监测系统方面，但是普及程度依然较低，针对传统瓦斯继电器仍然没有一种行之有效的状态在线监测手段[6]。本文从瓦斯继电器内部结构原理出发，结合人工巡检时视觉观察瓦斯继电器内部气体状态的方式，提出了一种基于图像识别的瓦斯继电器气体状态监测和自动集气系统，可在不改变瓦斯继电器现有机械结构、功能、性能和绝缘防护水平的前提下，基于双波长光学图像识别算法获取变压器瓦斯继电器内的

气体状态。识别到轻瓦斯故障后可自动报警、记录时戳，通过旋转排气机构自动打开瓦斯继电器上部气阀，然后收集样本气体、自动分析并生成气体分析报告。

瓦斯继电器动作机理

1. QJ4-80瓦斯继电器结构组成

QJ系列继电器外形及内部结构基本相同，继电器机芯如图1所示。盖上的气体塞1供安装时排气以及运行中抽取故障气体之用，探针3供检查跳闸机构的灵活性和可靠性之用[7]。

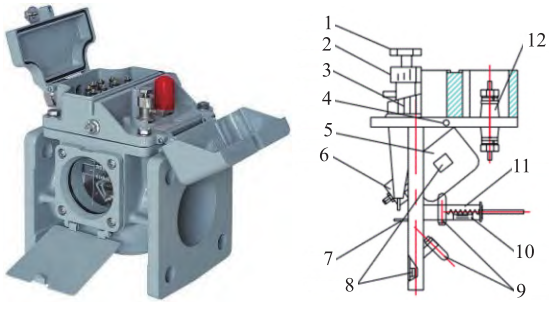

图1　QJ4–80瓦斯继电器外形及基本结构图

1—气塞　2—气塞弹簧　3—探针　4—封塞　5—开口杯（浮子）　6—重锤　7—挡针　8—磁铁　9—干簧接点　10—调节杆　11—弹簧　12—接线端子

2. QJ4-80瓦斯继电器动作机理

瓦斯继电器对变压器匝间和层间短路、铁心故障、套管内部故障、绕组内部断线、绝缘劣化和油面下降等故障均能灵敏动作。当油浸式变压器的内部发生故障时，由于电弧使绝缘材料分解并产生大量的气体，其强烈程度随故障的严重程度不同而不同。可分为两种模式：一种是轻瓦斯故障；另一种是重瓦斯故障。轻瓦斯主要反映在运行或者轻微故障时由油分解的气体上升进入瓦斯继电器，气压使油面下降，继电器的开口杯随油面落下，轻瓦斯干簧触点接通发出信号。当轻瓦斯内气体过多时，可以由瓦斯继电器的气嘴将气体放出。重瓦斯主要反映在变压器发生严重内部故障（特别是匝间短路等其他变压器保护不能快速动作的故障）产生的强烈气体推动油流冲击挡板，挡板上的磁铁吸引重瓦斯干簧触点，使触点接通而跳闸。

以图1的QJ4-80型瓦斯继电器结构为例，瓦斯继电器正常运行时其内部充满变压器油，开口杯（浮子）处于图1所示的位置。当变压器内部出现轻微故障时，变压器由于绝缘油分解而产生的气体聚集在继电器上部的气室内，迫使其油面下降，浮子5随之下降到一定位置，其上的磁铁8使干簧接点12吸合，接通信号回路，发出报警信号。当变压器内部发生严重故障时，油箱内压力瞬间升高，将会出现油的涌浪，冲动挡板7，当挡板转到某一限定位置时，其上的磁铁8使干簧接点12吸合，接通跳闸回路，不经预先报警而直接切断变压器电源，从而起到保护变压器的作用。部分QJ系列瓦斯继电器工作特性参数见表1。

表1　QJ系列瓦斯继电器工作特性

规格	QJ-50	QJ-80	备注
油速整定范围/（m/s）	0.6～1.2	0.7～1.5	油速刻度偏差±0.1 m/s
气体容量聚集/ml	250～300		容积刻度偏差±10%

总体系统方案研究与设计

1. 基于图像识别的瓦斯继电器气体状态监测和自动集气系统方案研究

变压器瓦斯继电器内气体状态监控和自动集气系统针对常用变压器的瓦斯继电器，可在不影响其原有安全性能的基础上，依靠视觉图像实时识别内部气体容量和油位高度，布局示意图如图2所示。当气体达到检测阈值时，触发自主排气机构动作将气体排出并收集。随后基于实时在线气体分析技

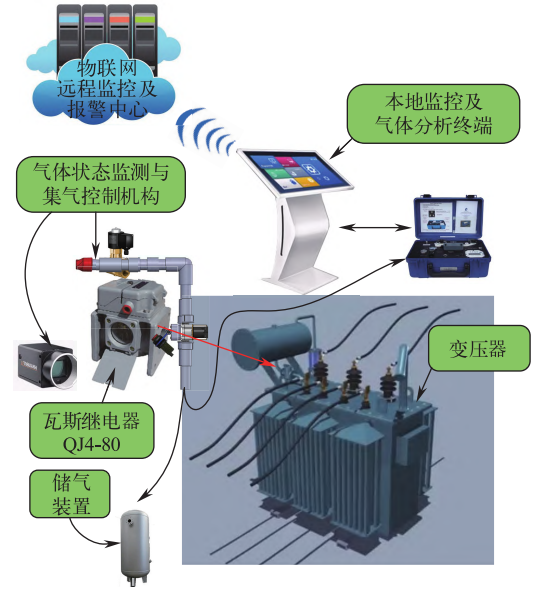

图2　变压器瓦斯继电器内气体状态监控和自动集气系统布局

术，快速获取、分析和记录发生故障后气体成分信息，实现对发生轻瓦斯故障变压器状态的初步分析与判断。储气装置内的剩余瓦斯气体可用于离线二次处理，与变压器内提取的油液样本作更加深入的对比分析。变压器瓦斯继电器内气体状态监控和自动集气系统为无人自主在线监测系统，可24 h全天候运行，配置有远程状态监测和报警系统，可通过物联网通信链路，实时反馈瓦斯继电器气体状态及报警信息。在发生轻瓦斯故障时，具备高效快速的反应处置能力。

2. 机械结构设计方案

瓦斯继电器内气体状态监控与自动集气系统硬件上包括机械机构、控制系统模块和传感器。上述硬件的安装和布置需要在不改变被检测瓦斯继电器机械结构、功能、性能和绝缘防护水平的前提下实现。以此为设计原则，以目前常用的QJ4-80型瓦斯继电器及变压器外形结构为基础，瓦斯继电器内气体状态监控与自动集气系统机械机构布局及安装方案如图3所示。

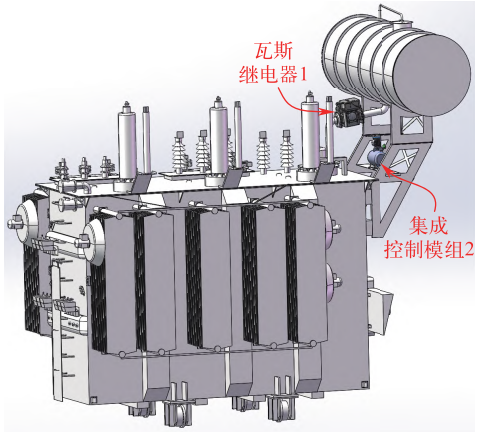

图3　安装及布局方案

由图3可知，瓦斯继电器装在变压器的储油柜和油箱之间的管道上，瓦斯继电器内气体状态监控与自动集气系统硬件借助变压器现有的安装孔和结构件实现机械结构和控制组件的安装布置。根据功能和结构的不同，分布在两个位置安装。其中旋转排气机构、图像识别模组借助瓦斯继电器上翻盖固定孔安装在瓦斯继电器上（集成模组1），气泵、截止阀、储气罐和控制模组集成在一起安装到油箱下方的横梁上（集成模组2）。两部分组件之间通过排气管和控制线缆连接，全系统供电为低压直流12 V外部供电。电源供应到集成模组2上，然后通过线缆给集成模组1供电。控制系统的供电和信号线缆均为独立悬空走线，与瓦斯继电器内现有的电气接线无任何接触和耦合关系。安装及布局方案的局部设计放大图如图4所示。

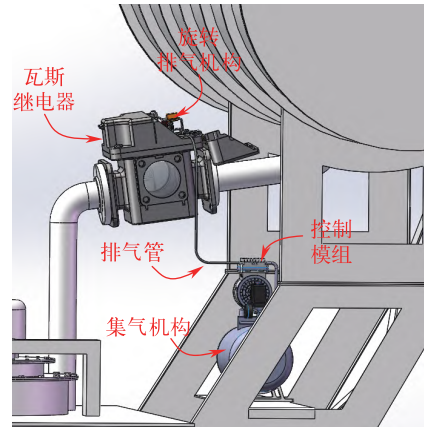

图4　安装及布局方案的局部放大图

以目前常用的QJ4-80型瓦斯继电器为研究对象，气体状态监测-自主排气-集气机构机械结构设计方案如图5所示。

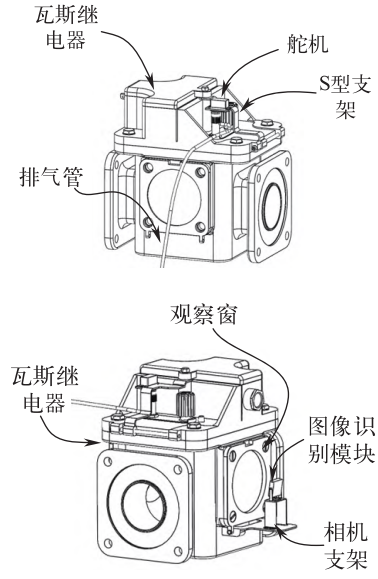

图5　气体状态监测-自主排气-集气机构结构设计图

该结构由算法控制单元、旋转排气机构、图像识别模块、相机支架、排气管、气泵、截止阀和储气罐组成。旋转排气机构包括舵机和S型支架，通过高准确度舵机模拟操作人员旋转密封螺柱的动作实现瓦斯继电器排气口打开和关闭过程。图像识别模块包括可见光高清相机和红外图像相机，固定在

相机支架上，配合算法控制单元内的图像识别算法实现瓦斯继电器内气体状态识别。相机支架和S形支架均利用瓦斯继电器上现有的外壳翻盖安装孔固定。排气管、气泵、截止阀和储气罐安装在瓦斯继电器排气口后端，可实现自主集气、存储以及快速拆运的功能。排气时气泵工作，截止阀打开，由气泵产生高压将采集的气体泵入储气罐内。拆运或者回收储气罐内样本气体时，可将气泵后端排气管连接处脱开，便可将截止阀和储气罐一同替换掉，需检测气体时打开截止阀即可。

3. 基于图像识别的瓦斯继电器气体状态监测和自动集气控制系统设计

变压器瓦斯继电器内气体状态监控和自动集气系统根据功能关系可划分为嵌入式控制系统、本地监控及气体分析终端、物联网远程监控及报警中心三个部分，如图6所示。嵌入式控制系统是底层执行器控制与传感器数据输入的核心模块，具备作业控制和电源管理、视觉感知输入、传感器数据采集、排气-集气机构控制和网络通信等功能。本地监控及气体分析终端为可视化本地操作中心，配备人机交互界面，在嵌入式控制系统识别到变压器瓦斯继电器内发生故障触发排气-集气作业任务时，可同步控制在线气体分析仪实时分析收集到的轻瓦斯样本成分信息，接收气体成分反馈数据并生成数据汇总和结果分析报告。物联网远程监控及报警中心处

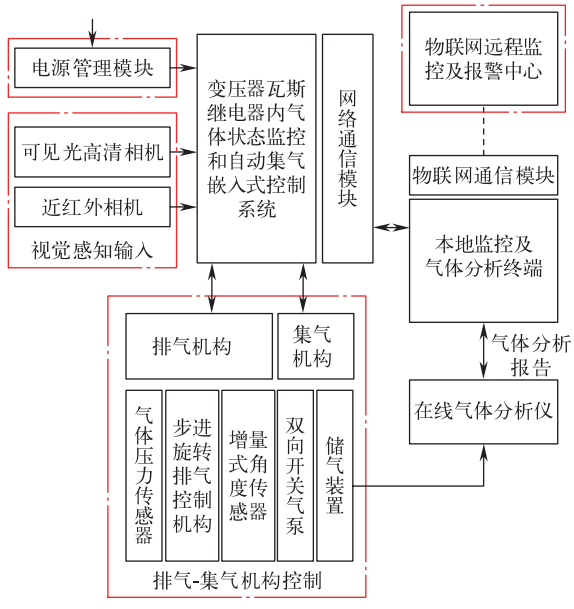

图6　变压器瓦斯继电器内气体状态监控和自动集气系统组成

于远程监控端，基于物联网通信，由本地监控及气体分析终端实时反馈瓦斯继电器气体状态及报警信息。在发生轻瓦斯故障时，可声光报警提示远程操作人员，缩短故障反应周期及处置周期。

（1）气体状态监控和自动集气嵌入式控制系统

嵌入式控制系统是变压器瓦斯继电器内气体状态和自动集气系统底层IO的核心逻辑控制单元，基于低功耗ARM构架核心设计，具备作业控制、电源管理、视觉感知输入、传感器数据采集、排气-集气机构控制和网络通信等功能。视觉感知输入负责双波长视觉识别系统（可见光高清相机和近红外相机）的实时图像采集、预处理和气体状态识别任务，基于OpenCV开发的算法负责识别瓦斯继电器内气体容量和油位高度；传感器数据采集组件负责气体压力传感器和增量式角度传感器的数据采集和解析任务；排气-集气机构控制负责步进旋转排气控制机构、双向开关气泵和储气装置的作业动作控制。基于自适应闭环控制算法，以传感器反馈数据为输入，在嵌入式主控系统的作业逻辑控制下，协同完成排气-集气作业流程。网络通信模块负责嵌入式控制系统与本地监控及气体分析终端间的数据交互，两者通过有线以太网连接。本地监控及气体分析终端可向嵌入式控制系统下发任务管理指令和任务参数，嵌入式控制系统实时反馈视觉识别结果、系统状态参数和传感器实时数据。

（2）本地监控及气体分析终端

本地监控及气体分析终端包括人机操作监控终端和在线气体分析仪。人机操作监控终端硬件形式为一台工业级立式触摸一体机，配备可视化人机交互界面，可实时查看嵌入式控制系统的视频图像画面、作业状态信息和传感器数据，可通过交互界面输入和选择界面管理嵌入式作业系统的的任务类型和任务状态。在线气体分析仪具备快速响应和全自动作业的特点。人机操作监控终端内的作业系统软件可通过专用报文指令控制在线气体分析仪开启或关闭作业模式，以及在气体分析仪完成气体分析作业后，快速接收其反馈的检测数据，并生成数据汇总和结果分析报告。

本地监控及气体分析终端还具有数据/视频存储、安全管理等功能，配备基于SQL SERVER2016开发的关系型数据库，能够实时记录操作数据和系

统状态。在作业过程中，也会实时存储视觉识别系统的视频图像数据和识别结果，用于后续操作回放和故障复查。

（3）物联网远程监控及报警中心

物联网远程监控及报警中心处于远程监控端，可通过物联网与本地监控及气体分析终端通信，由本地监控及气体分析终端实时反馈瓦斯继电器气体状态及报警信息。在发生轻瓦斯故障时，可声光报警提示远程操作人员，缩短故障反应周期及处置周期。

关键算法和控制策略研究

1. 双波长图像识别算法研究

本文提出一种基于双波长光学特征的图像识别策略，使用图像识别模块通过观察窗获取瓦斯继电器内绝缘油和气体分布的图像特征，从而识别内部气体状态。该识别方式无需改动瓦斯继电器内现有的机械机构和电气接线，完全模拟操作人员日常巡视作业习惯完成气体状态识别过程。为了提高识别准确率，降低环境光照和油液颜色对可见光图像识别准确率的影响，光学相机选用了双波长光学相机，兼备可见光波长和红外光波长感知能力。前者可感知颜色分布特征，后者可捕获温度分布特征。瓦斯继电器内绝缘油和气体分布的图像特征在两种波长光学图像下相互对比识别、互相验证，可极大地提高识别成功率，降低误警率。基于双波长光学特征的图像识别算法流程如下。

1）步骤A100。由算法控制单元获取并解析可见光高清相机和红外图像相机数据。

2）步骤A200。可见光图像亮度归一化处理，将图像由RGB色彩空间转换为HSV色彩空间，统计全局图像亮度平均值，通过调节偏置值使图片整体亮度趋于固定值M（一般可设置为50%），从而保证消除环境光对可见光图像的影响。

3）步骤A201。红外图像对比度修正，红外图像颜色数据由温度数据直接转换而来，统计全局画面内的温度上下限，以温度上下限作为颜色映射显示的边界，可以保证画面内不同温度间具有更高的对比度。

4）步骤A300。依据圆形特征，寻找可见光高清图像和红外图像中观察窗的位置，基于圆形边界截取圆内图像。

5）步骤A400。遍历法搜索最优水平分割线：首先滤除无效RGB颜色，然后由上到下设置水平分割线，计算并记录水平分割线上下部分的颜色平均值差值。遍历后，选取颜色平均值差值最大的水平分割线作为遍历法识别结果R_1和R_2。

6）步骤A401。质心法计算最优水平分割线：首先滤除无效RGB颜色，然后轮廓提取上下两部分的图像，计算轮廓内的颜色质心，以质心反向计算水平分割线位置，作为质心法识别结果R_3和R_4。

7）步骤A500。识别结果对比判断：综合步骤A400和A401中的水平分割线位置识别结果R_1、R_2、R_3和R_4，结果之间相差5%以内则认为相似。以结果因子统计R_1、R_2、R_3和R_4内相似结果的个数。如果结果因子$N\geqslant 2$，则结果有效，并以这N个相似结果集的平均值作为水平分割线识别结果；如果出现两种识别结果，且结果因子N均为2，则判定此次识别失败，重新启动下次识别。图像识别算法流程图如图7所示。

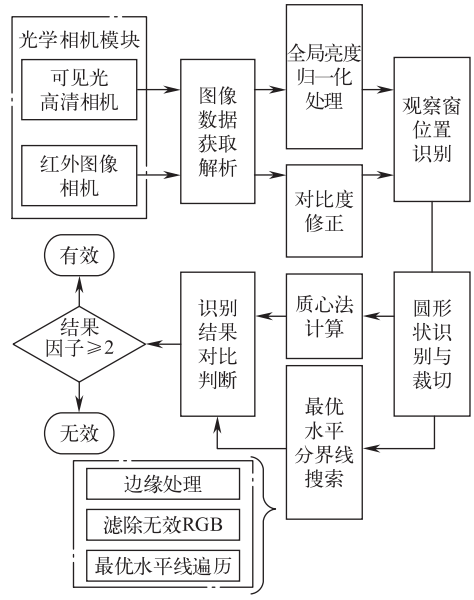

图7　图像识别算法流程图

图8为图像识别算法图例，图像识别模块获取的可见光高清图像和红外图像中方框为外壳边框，圆形为瓦斯继电器圆形观察窗，圆形观察窗内可以看到上下分层的两部分：上层透明部分为气体；下层为绝缘油层。气体和绝缘油之间有着明显的分界

线，通过识别分界线的位置便可得到瓦斯继电器内气体的容量。

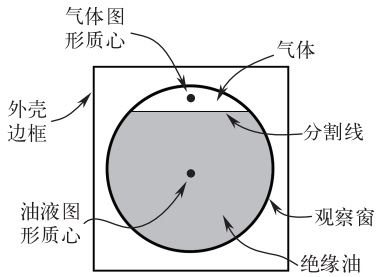

图8　图像识别算法图例

2. 作业控制方法

本文针对瓦斯继电器气体状态监测和自动集气系统提出了一种作业控制方法，步骤如下。

1）步骤B100。由图像识别模块实时监控和识别瓦斯继电器内气体状态，得到气体油液分界线位置高度X（0～100，最高为100）。

2）步骤B200。判断气体油液分界线位置高度X是否低于阈值M。

3）步骤B300。如果步骤B200中的条件成立，则触发旋转排气机构、气泵和截止阀联合动作开始排气和集气。

4）步骤B400。瓦斯继电器排气时，图像识别模块持续实时监控和识别瓦斯继电器内气体状态，当气体油液分界线位置高度X恢复至100时，停止排气动作（旋转排气机构、气泵和截止阀全部停止）。

5）步骤B500。集气完成后，控制系统发出报警信号并记录时间戳，然后通知远程操作人员回收气体，回收时只需将气泵后端排气管连接处脱开即可。

结束语

本文在变压器故障检测与处理技术领域提出了一种基于图像识别的变压器瓦斯继电器内气体状态监控和自动集气系统及控制方法，创新点及贡献如下。

1）结构设计以及识别方式方面，本系统在不改变被检测瓦斯继电器机械结构、功能、性能和绝缘防护水平的前提下获取变压器瓦斯继电器内的气体状态，借助现有的安装孔和结构件实现机械结构和控制组件的安装布置，对老式瓦斯继电器进行简易升级后便可实现该功能，具备较强的实用性和创新性。

2）图像识别算法方面，本文提出了一种基于双波长光学特征的图像识别算法，选用的传感器兼备可见光波长和红外光波长感知能力。前者可感知颜色分布特征，后者可捕获温度分布特征。针对同一幅图像，本文采用了多种图像识别方法处理瓦斯继电器内绝缘油和气体分布的图像特征，然后将识别结果相互对比、互相验证，基于结果相似度估算最优识别结果，降低环境光照和油液颜色对可见光图像识别准确率的影响，可极大地提高识别准确度，降低误报警率。

3）作业控制方法方面，本文提出的作业控制方法以无人化在线监测为目标，可自动识别轻瓦斯故障，自动排气、集气和记录时戳，然后通知远程操作人员回收气体，可显著提高变电站智能作业水平。**EA**

（收稿日期：2024-02-19）

参考文献

[1] 陈一鸣．电力变压器在线监测方法研究[D]．济南：山东大学，2020．

[2] 杨之淳，孟雷，丁文良，等．变压器气体继电器测试设备的探讨[J]．变压器，2009，46(9)：47-51．

[3] 辜祥．变电站变压器在线监测系统的设计与实现[D]．成都：电子科技大学，2021．

[4] 李胜男，韩冬冬，周鑫，等．基于CFD的瓦斯继电器反向油流动作研究[J]．能源研究与信息，2020，36(4)：222-227．

[5] 包中福．电力变压器内部故障诊断的特征气体法及其应用研究[D]．重庆：重庆大学，2004．

[6] 王争荣，邓晓健．变压器油中气体在线智能诊断系统[J]．电力系统及其自动化学报，2002(1)：64-66．

[7] 王建，朱文兵，顾朝亮，等．智能瓦斯继电器气体容积在线监测技术研究[J]．山东电力技术，2023，50(2)：72-77．