

# 基于荧光双色比例的变压器绝缘油放电击穿故障诊断模型研究

赵跃<sup>2</sup>, 马凤翔<sup>2</sup>, 王安静<sup>1\*</sup>, 李大成<sup>1</sup>, 宋玉梅<sup>2</sup>, 吴军<sup>1</sup>, 崔方晓<sup>1</sup>, 李扬裕<sup>1</sup>, 曹志成<sup>1</sup>

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽合肥 230031  
2. 国网安徽省电力有限公司, 电力科学研究院, 安徽合肥 230000

**摘要** 传统变压器绝缘油品质荧光分析检测方法是利用荧光分光光度计采集油样本全谱段荧光光谱, 根据不同老化程度绝缘油的全谱荧光特征变化建立变压器运行状态诊断模型。针对传统荧光方法中光度计体积大、价格昂贵以及因光谱采集时间长无法实现实时监测等问题, 提出一种基于荧光双色比例的变压器绝缘油品质检测方法, 提取荧光特征双波段信息并建立变压器运行故障诊断模型, 可通过定制滤光片和可见光电探测器等硬件取代传统荧光分光光度计, 实现双色荧光信息快速采集及处理, 满足在线实时监测的同时降低硬件成本。对放电击穿故障造成的变压器绝缘油老化进行荧光分析, 试验模拟了不同放电击穿工况, 制备了不同放电击穿时间(10, 30, 50, 70, 90 和 120 min)下的尼纳斯油样本作为荧光检测目标; 使用荧光分光光度计采集了各样本在不同激发波长下的荧光发射光谱, 确定最优固定激发波长为 280 nm; 使用 3 点移动均值平滑法对样本荧光光谱平滑去噪, 通过分析不同放电击穿时间下油样荧光特征峰的变化规律, 选取 380~388 和 399~407 nm 作为双色信息提取波段, 利用最小二乘曲线拟合建立了荧光双色比例变压器绝缘油放电击穿故障诊断模型。研究结果初步证明了荧光双色比例法在变压器绝缘油放电击穿故障诊断上的有效性, 为一种体积小、成本低、快速有效在线监测系统的建立提供了一定的理论与实践基础。

**关键词** 变压器绝缘油; 荧光光谱; 双色比例探测; 故障诊断模型

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)04-1134-05

## 引言

变压器作为电能生产和配送过程中能量转换的核心, 其运行状态直接影响电力系统的安全可靠运行, 因此对变压器运行状态的监控变得尤为重要。最早的监测手段主要有局部放电试验和绝缘油理化试验等方法, 将变压器绝缘油抽样后测试其物理的或化学的属性, 建立物化属性关联的变压器运行状态诊断模型。随着技术的发展, 取样式方法受制于操作繁琐、检测周期长等因素不能满足实时监测的要求, 出现了在线监测式的油中溶解气体分析(dissolved gases analysis, DGA)方法, 通过检测绝缘油变质过程中产生的溶解气体(主要包括氢气、甲烷、乙烷、乙炔、一氧化碳、二氧化碳等)建立变压器运行状态诊断模型, 取得了一定成果, 被广泛应用于电力生产现场。然而, 实际应用中出现的问题也暴露了 DGA 技术存在的不足: (1) 变压器发生放电不产生气体或释

放的气体很少时无法检测; (2) 变压器发生放电故障并在短时间内不断增加, 快速释放大量的气体, 而 DGA 技术单次分析周期在 2 个小时左右, 存在监测延迟与事故隐患。因此, 寻求一种检测灵敏度高、方式直接、快速响应的变压器绝缘油品质分析技术成为研究热点。1575 年西班牙内科医生及植物学家 N. Monardes 第一次记录了荧光现象, 当紫外线照射到某些物质时, 这些物质会发射出各种颜色和不同强度的可见光, 而当紫外线停止照射时, 所发射的光线也随之很快消失, 这种光线被称为荧光。如今, 荧光分析技术已经发展成为一种十分重要且有效的光谱分析手段, 广泛应用于工业、农业、生命学科、环境学科等诸多领域。1990 年 Backhus 等将荧光分析技术成功应用于土壤和地下水中 PAHs(芳香族化合物)污染物检测中<sup>[1]</sup>, 2002 年 Yeo 等用一个 404 nm 半导体激光器作为激发光源, 实现商业汽油油品的可靠、低成本荧光检测<sup>[2-4]</sup>。2007 年 Markova 等分析了液压油品的荧光特征<sup>[5]</sup>。随着荧光分析技术在油品检测中的成功应用, 学者

收稿日期: 2021-03-22, 修订日期: 2021-05-28

基金项目: 国网安徽省电力有限公司科技项目(52120519001V), 中国科学院重点部署项目(KGFZD-135-16-002-2) 和国家自然科学基金项目(41505020)资助

作者简介: 赵跃, 1984 年生, 国网安徽省电力有限公司高级工程师 e-mail: yzhao84@163.com

\* 通讯作者 e-mail: ajwang@aiofm.ac.cn

将研究目标转投于化学成分和汽油相似的变压器绝缘油上, 2006年 Deepa 等探讨了同步荧光光谱技术(synchronous fluorescence spectroscopy, SFS)在变压器绝缘油品质老化特性变化上的应用<sup>[6]</sup>, 2014年 Godinho 等利用近红外、分子荧光及核磁共振光谱多元分析技术实现变压器绝缘油品质检测<sup>[7]</sup>。

尽管荧光分析技术已被尝试用于变压器绝缘油检测中, 但都侧重氧化老化变质研究, 针对放电击穿老化变质的研究尚未见报道。同时, 现有研究一般使用荧光分光光度计测量固定激发波长荧光光谱(激发波长固定, 采集荧光发射光谱)或同步荧光光谱(激发波长和发射波长同步变化, 最优波长差为 5 nm 左右)<sup>[6]</sup>, 利用模式识别方法建立变压器运行状态诊断模型, 这些方法不仅数据采集时间长而且系统体积大、成本高, 不利于变压器绝缘油在线实时监测系统的实现。本文针对以上问题, 制备了变压器绝缘油不同放电击穿量下的样本, 采集了各试验样本的荧光光谱, 确立最优激发波长, 研究放电击穿下的荧光光谱变化特性, 提取荧光特征双峰信息, 尝试建立基于荧光双色比例的变压器绝缘油放电击穿故障诊断模型, 以期证明提出方法的可行性, 为低成本荧光分析变压器绝缘油放电击穿在线实时监测系统的建立提供研究基础。

## 1 原理与方法

变压器绝缘油中具有荧光特性的物质为芳香烃族化合物, 主要成分通常为较重的蒎( $C_{14}H_{10}$ )或二甲苯( $C_{10}H_{12}$ ), 分别在 290~390 和 340~440 nm 范围内被激发, 发射范围在 370~500 和 420~580 nm。当变压器绝缘油受到氧化或放电击穿发生老化变质后, 芳香烃化合物分解或转化<sup>[8-9]</sup>, 造成其荧光光谱强度变弱并发生特征峰“红移”现象<sup>[10]</sup>。本文的荧光双色比例法基于荧光光谱双特征峰的变化规律提出, 原理如图 1。

图 1 显示了不同老化程度下的变压器绝缘油荧光光谱, 可以看到随着老化程度的增加,  $\lambda_{Short}$  和  $\lambda_{Long}$  两个特征峰强度呈现不同程度的下降, 因此可利用特征峰的比例值大小区分



图 2 荧光双色比例变压器绝缘油品质检测原理

Fig. 2 The principle of transformer insulating oil quality testing based on fluorescence double color ratio

由于试验用变压器绝缘油主要荧光物质成分未知, 以新油样本为测试对象, 通过扫描激发波长 250~450 nm 范围获取荧光发射光谱, 确定绝缘油的荧光特征波段。同时, 缩小

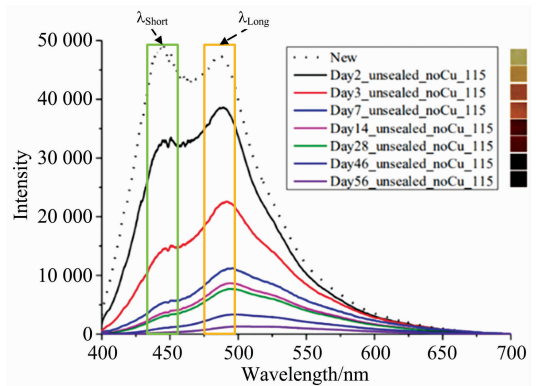


图 1 荧光双色比例变压器绝缘油品质检测原理

Fig. 1 Principle of transformer insulating oil quality testing based on fluorescence double color ratio

不同样本光谱, 建立基于荧光双色比例的变压器绝缘油品质检测定量模型。

定义长波与短波荧光比例  $FP = \frac{V(\lambda_{Long})}{V(\lambda_{Short})}$ , 其中  $V(\lambda_{Long})$  为长波荧光强度,  $V(\lambda_{Short})$  为短波荧光强度。进一步, 通过测量不同老化油的荧光强度比例  $FP$ , 再通过数据拟合方法可建立绝缘油老化定量模型。

$T = A \times (FP)^n + B \times (FP)^{n-1} + \dots + C \times FP + D$  (1)  
式(1)中,  $T$  为待求解的老化量(放电击穿时间, 单位为 h),  $A, B, \dots, C, D$  为拟合系数。

## 2 实验部分

选择常见变压器绝缘油尼纳斯油进行不同放电击穿量老化试验, 获取新油、分别放电击穿 10, 30, 50, 70, 90 和 120 min 共 7 个试验样本。使用 HORBIA 公司生产的 Fluorolog-3 型荧光分光光度计采集试验样本荧光光谱, 用口径 10 mm、容积 3.5 mL 的荧光比色皿盛放样品(图 2)。

激发波长范围, 为寻找最优激发波长做准备。试验测试流程参数如表 1 所示。

表 1 试验测试流程参数表

Table 1 Testing flow parameters

| 测试序号 | 油样名称         | 激发波长范围/nm | 发射波长范围/nm | 激发/发射步长/nm |
|------|--------------|-----------|-----------|------------|
| 1    | 新油           | 250~450   | 260~700   | 5          |
| 2    | 放电击穿 10 min  | 270~310   | 280~700   | 5          |
| 3    | 放电击穿 30 min  | 270~310   | 280~700   | 5          |
| 4    | 放电击穿 50 min  | 270~310   | 280~700   | 5          |
| 5    | 放电击穿 70 min  | 270~310   | 280~700   | 5          |
| 6    | 放电击穿 90 min  | 270~310   | 280~700   | 5          |
| 7    | 放电击穿 120 min | 270~310   | 280~700   | 5          |

### 3 结果与讨论

试验所测荧光光谱均用 3 点(发射光谱波长间隔为 5 nm, 窄峰宽度为 40 nm)移动均值平滑法去噪处理, 图 3 为新油样本的激发波长扫描荧光光谱, 可以发现, 试验油样的荧光发射光谱特征位置在 350~500 nm 之间, 最优激发波长范围为 270~310 nm。

对比最优激发波长范围下各试验油样本荧光光谱, 寻找最优固定激发波长。利用荧光强度与样本区分度综合判别(图 4)。

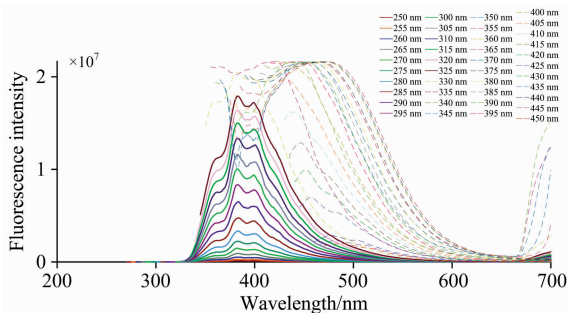


图 3 新油激发波长扫描荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectra of the fresh oil on scanning excitation wavelengths

以图 4(a)激发波长为 280 nm 下的各油样本的荧光特征光谱为例, 定义主峰荧光强度为 Peak Intensity, 主峰强度均方差为 Peak Std, 表示各样本特征的离散度。图 4(b)和(c)分别计算得到了各激发波长下特征峰强度曲线和特征峰均方差曲线, 最优固定激发波长选择应同时满足 Peak Intensity 和 Peak Std 最大化, 可以看出, 试验油样放电击穿老化荧光检测最优固定激发波长为 280 nm。

选择固定激发波长 280 nm 下的油样本荧光光谱建立荧光双色比例变压器绝缘油放电击穿诊断模型, 从图 4(a)中可以看出: 随着放电击穿时间的增加, 绝缘油发生一定程度的老化,  $\lambda_{Short}$  和  $\lambda_{Long}$  两个特征峰荧光强度都变弱了, 但有别于氧化老化情况, 放电击穿老化样本的特征峰位置保持不变, 没有发生明显波长“红移”现象, 反而有助于较窄双色波段的选择, 提高检测准确度。

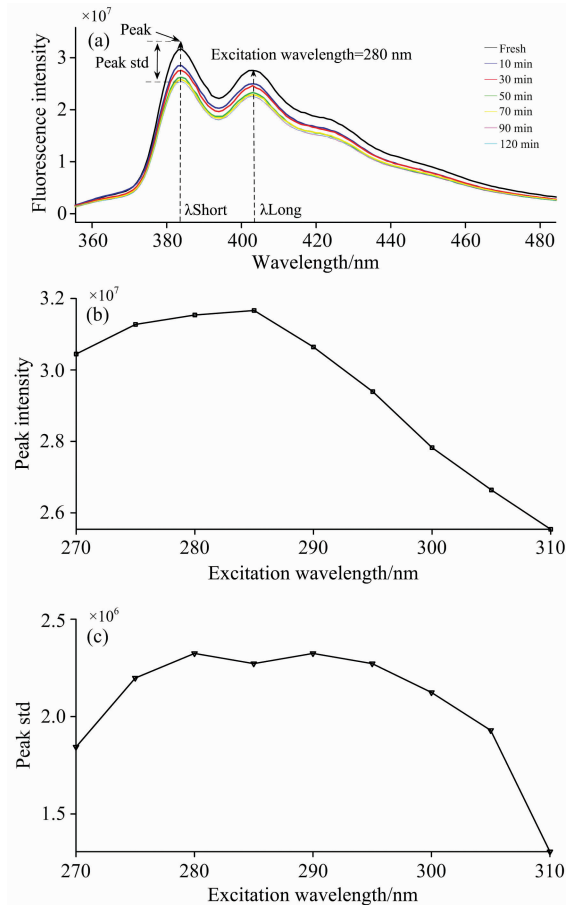


图 4 最优固定激发波长选择

(a): 各样本荧光特征比较; (b): 各激发波长下特征峰强度曲线; (c): 各激发波长下特征峰均方差曲线

Fig. 4 Selection of optimal fixed excitation wavelength

(a): Comparison of fluorescence characteristics of samples; (b): Intensity curves of characteristic peaks at each excitation wavelength; (c): Variance curves of characteristic peaks at each excitation wavelength

分别提取双色波段 380~388 和 399~407 nm 荧光特征信息, 根据荧光双色比例绝缘油老化定量模型式(1), 利用最小二乘拟合完成模型建立, 获得模型最优拟合为二次方程  $T=12\ 815.55 \times (FP)^2 - 23\ 226.54 \times FP + 10\ 523.79$ , 相关系数为 0.9515, 拟合曲线如图 5 所示。

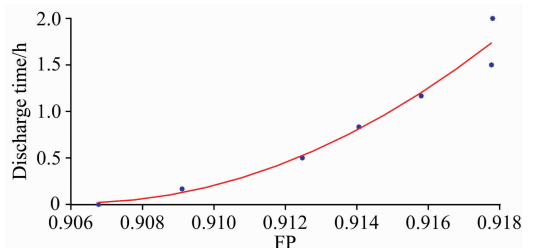


图 5 变压器绝缘油放电击穿荧光比例诊断模型曲线

Fig. 5 Curve of fluorescence proportional diagnostic model for discharge breakdown of transformer insulated oil

从图5中看出,各样本点基本都落在拟合曲线上,拟合残差小、效果好,说明不同放电击穿油样本的荧光比例FP值和放电击穿时间存在一个二次关系,在实际放电击穿潜伏故障诊断中,可根据测量计算的荧光比例推算出累计放电击穿时间,为变压器故障预防与处理提供精准数据支持。

## 4 结 论

通过测量不同放电击穿时间下的变压器绝缘油老化样本

的荧光光谱,确定油样最优固定激发波长为280 nm,基于实测数据分析不同放电击穿量引起的荧光特征变化规律,建立基于荧光双色比例的变压器绝缘油放电击穿故障诊断模型,表明了荧光双色比例计算的可行性,可弥补传统方法中荧光信息获取时间长、成本高的不足。研究结果初步验证了荧光双色比列法在变压器绝缘油放电击穿故障诊断应用上的潜力,为一种体积小、成本低、快速在线监测系统的进一步建立提供了一定基础。

## References

- [ 1 ] Backhus D A, Gschwend P M. *Environmental Science & Technology*, 1990, 24: 1214.
- [ 2 ] Yeo T L, Ozanyan K B, Hindle F, et al. *Appl. Spectrosc.*, 2002, 56: 846.
- [ 3 ] Hindle F P, Yeo T L, Ozanyan K B, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3: 766.
- [ 4 ] Ozanyan K B, Yeo T L, Hindle F P, et al. *IEEE Sensors Journal*, 2004, 4: 681.
- [ 5 ] Markova L, Myshkin N, Ossia C, et al. *Tribology in Industry*, 2007, 29: 33.
- [ 6 ] Deepa S, Sarathi R, Mishra K. *Talanta*, 2006, 70: 811.
- [ 7 ] Godinho M S, Blanco M R, Neto F G, et al. *Talanta*, 2014, 129: 143.
- [ 8 ] Fofana I, Bouaicha, A, Farzaneh M, et al. *Electric Power Applications*, 2010, 4: 177.
- [ 9 ] Abdi S, Boubakeur A, Haddad, A, et al. *Electric Power Components and Systems*, 2011, 39: 1701.
- [ 10 ] SI Shang-hua, ZHAO Jing-zhou, ZOU Guo-liang, et al(斯尚华, 赵靖舟, 邹国亮, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2020, 40(6): 1736.

# Research on Electric Breakdown Fault Diagnosis Model of Transformer Insulated Oil Based on Fluorescent Double-Color Ratio

ZHAO Yue<sup>2</sup>, MA Feng-xiang<sup>2</sup>, WANG An-jing<sup>1\*</sup>, LI Da-cheng<sup>1</sup>, SONG Yu-mei<sup>2</sup>, WU Jun<sup>1</sup>, CUI Fang-xiao<sup>1</sup>, LI Yang-yu<sup>1</sup>, CAO Zhi-cheng<sup>1</sup>

1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230000, China

**Abstract** Traditional fluorescence analysis and detection methods of transformer insulated oil quality, which use fluorescence spectrophotometer to collect the full bands' fluorescence spectrum of the oil sample and establish the diagnostic model of transformer operation states using the full bands' fluorescence characteristics of insulating oil with a different aging degree, have the problems of large volume and the high price of photometer and the inability to realize real-time monitoring due to a long time of spectrum acquisition, a new method to detect the quality of transformer insulating oil based on the fluorescent double-color ratio to extract fluorescence characteristic dual band information and establish fault diagnosis model of transformer operation was raised to solve it. Thus, the traditional fluorescence spectrophotometer can be replaced by custom filters and visible photodetectors to realize the rapid acquisition and processing of double-color fluorescence information, which can meet the on-line monitoring and reduce the hardware cost. The aging of transformer insulating oil caused by discharge breakdown fault was analyzed by fluorescence analysis. Different discharge breakdown conditions were simulated. NYNAS oil samples with different discharge breakdown times (10, 30, 50, 70, 90 and 120 min) were prepared as fluorescence detection targets. Fluorescence emission spectra at different excitation wavelengths were collected by fluorescence spectrophotometer, and the optimal fixed excitation wavelength was found to be 280 nm. The 3-point moving mean smoothing method was used to smooth the fluorescence spectrum of the samples and by analyzing the variation of the fluorescence characteristic peak of the oil sample under different discharge breakdown times, bands of 380~388 and 399~407 nm were selected as the double-color information extraction band. The fault diagnosis model of transformer insulated oil discharge based on fluorescent double-color ratio was established by least-

square curve fitting. The study results demonstrate the effectiveness of the fluorescent double-color method on the fault diagnosis of transformer insulated electric oil breakdown, which provides a theoretical and practical basis for establishing a small, low-cost, fast and effective online monitoring system.

**Keywords** Transformer insulated oil; Fluorescence spectra; Double-color ratio detection; Fault diagnosis model

(Received Mar. 22, 2021; accepted May 28, 2021)

\* Corresponding author

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

## 《光谱学与光谱分析》2022年征订启事

国内邮发代码：82-68

国外发行代码：M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊，国内统一刊号：CN 11-2200/O4，国际标准刊号：ISSN 1000-0593，CODEN 码：GYGFED，国内外公开发行人，大 16 开本，332 页，月刊；是中国科协主管，中国光学学会主办，钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版，每期售价 95 元，全年 1140 元。刊登主要内容：激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X 射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊，中国科协优秀科技期刊，中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊，中国科技论文统计源刊，“中国科学引文数据库”，“中国物理文摘”，“中国学术期刊文摘”，同时被国内外的 CJCR, CNKI, CSCD, SCI, AA, CA, Ei, AJ, PJK, MEDLINE, Scopus 等文献机构收录。根据中国科学技术信息研究所发布信息，中国科技期刊物理类影响因子、引文量及综合评价总分《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告（广告经营许可证：京海市监广登字 20170260 号）。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅，若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址：北京市海淀区学院南路 76 号（南院），

《光谱学与光谱分析》期刊社

邮政编码：100081

联系电话：010-62181070, 62182998

电子信箱：chnghxygpfx@vip.sina.com

修改稿专用邮箱：gp2008@vip.sina.com

网 址：http://www.gpxygpfx.com

