

傅里叶变换在变压器故障监测中的应用研究

变压器是电力系统非常重要的输变电设备，其运行状态直接影响系统运行的安全水平。采用傅里叶红外变换的方法对变压器的主要的故障特征气体进行定性分析，然后采用小波变换和BP神经网络对各故障特征气体进行定量分析，判别当前变压器的运行状况。对于故障运行的电力变压器，准确判断变压器的故障或故障隐患具有重要意义。

柏向阳/重庆安全技术职业学院



柏向阳/讲师

研究表明，故障运行时油浸式电力变压器油中溶解气体组分和含量会有明显的变化，并且与变压器的故障类型有关。因此对变压器油中溶解气体进行定性和定量分析，就可以判断当前变压器的运行状况。对变压器油中溶解气体的检测主要分为单组分检测和多组分检测两大类。本文重点分析利用傅里叶变换实现变压器多组分故障气体在线监测。

在线监测分析

1. 检测方法

当前国内外比较常用检测方法有气相色谱法、传感器阵列法、光声光谱法(PAS)和傅里叶变换红外光谱法(FTIR)^[1]。

(1) 气相色谱法

该方法自从1952年由James和Martin提出来以后，就被广泛地应用在变压器故障检测上。该方法理论相对比较成熟，检测结果可靠，目前应用相对比较多。但采用这种方法需要进行油气分离和混合气体的分离，消耗时间比较长，不宜于突发性故障的诊断。

(2) 传感器阵列法

该方法是基于多传感器信息融合

技术，利用气体传感交叉敏感特性，有选择地将数个气体传感器组合一起形成传感器阵列，结合模式识别技术，形成气体辨识系统，对混合气体直接进行检测。但这种方法容易引起传感器之间交叉影响，给结果分析带来困难。

(3) 光声光谱法

该方法是基于声光效应的一种光谱技术。由于光吸收激发的频率由调制频率确定，而其强度则只与可吸收该窄带光谱的特征气体的体积分数有关，建立气体体积分数与声波强度的定量关系，就可以准确地计量气池中各气体的体积分数。

(4) 傅里叶变换红外光谱法

傅里叶红外光谱技术应用于变压器在线监测，无须对混合气体分离，直接确定气体的成分和含量。并且具有检测速度快、非接触检测和不消耗样气等特点。下面将对其原理与应用进行详细分析。

2. 红外光谱检测原理

红外光谱范围很广，按应用波段不同分为三个区域^[2]：①近红外区域(NIR)，0.25~0.75 μm；②中红外区域(MIR)，2.5~25 μm；③远红外区域(FIR)，25~1 000 μm。

目前被广泛用于化合物定性、定量及其他化学过程研究的红外吸收光谱，主要是波长处于中红外区域的振动光谱，因此通常所讲的红外光谱就是指中红外光谱^[3]。

各种物质对不同波长红外辐射的吸收程度不同，因此当不同波长的红外辐射依次照射样品时，由于某些波长的

关键词/Keywords

变压器 ·
故障气体 ·
傅里叶红外光谱仪 ·
在线监测 ·
BP神经网络 ·

辐射能被样品吸收而减弱形成红外吸收光谱。不同物质具有不同的分子结构,就会吸收不同的红外能量而产生相应红外吸收光谱。因此用仪器测绘试样物质的红外吸收光谱,然后根据各种物质的红外吸收峰位置、数目、相对强度和形状(峰宽)等参数,就可以推断式样中存在那些基团,并确定其分子结构,这是红外吸收光谱定性的依据;同一物质不同浓度时,在同一吸收峰位置具有不同的吸收峰强度,在一定条件下试样物质的浓度与其特征吸收峰强度成正比关系,这就是红外吸收光谱的定量分析依据。红外光谱定性分析的原理是基于朗伯-比耳定律^[2]。朗伯定律表明当光通过有吸光性质的某一均匀介质时,其光强就被减弱,而吸收的分子数目只取决于光程中所存在的分子数,与入射光的强度无关。其数学表达式为

$$-dI = kI dL \quad (1)$$

式中, k 为比例常数; I 为透射光强度; L 为透过介质的厚度。

对其在0到 L 积分可以得到

$$I = I_0 e^{-kL} \text{ 或 } \lg I_0 / I = KL \quad (2)$$

式中, K 为消光系数或吸光数; I_0 为入射光强度。

比耳定律是在样品吸收池的厚度不变的情况下,讨论光密度与浓度的关系。

其关系式为

$$E = \lg I_0 / I = KCL \quad (3)$$

因而将两个定律组合在一起就是朗伯-比耳定律

$$E_\lambda = K_\lambda C d \quad (4)$$

式中, E_λ 为某一波长的密度; K_λ 为某一波长的消光系数; C 为样品浓度; d 为样品吸收池的厚度。

其中 K_λ 是反映吸光分子特征的参量,不同的分子有不同的 K_λ 值,但对不同浓度的同一物质,在相同波长处具有相同的 K_λ 值。样品吸收池厚度 d 值可以由光的干涉原理计算得出, K_λ 值亦可以提前通过试验得到,因此只要测出 E_λ 就可以间接得到样品浓度 C 。

3. 红外光谱仪

红外光谱仪主要分为色散型和干涉型两大类。

两者的工作方式是不同的,色散型的红外光谱仪是由棱镜或光栅完成分光的,它是通过先把光源发出的光照射试样,然后由光栅分成单色光,由检测器获得光谱。而傅里叶变换干涉型红外光谱仪,光源发出的光先由迈克尔逊干涉仪变成干涉光,再让干涉光照射待测样品,这样检测器得到的是含有背景光谱的样品干涉图。

然后由计算机通过傅里叶变换成实际的红外吸收光谱图。随着现代科学技术的迅速发展,色散型红外光谱仪在许多方面不能满足需要,而后来出现的傅里叶变换光谱仪克服了色散型光谱仪的这些缺点。傅里叶变换红外监测原理图如图1所示。

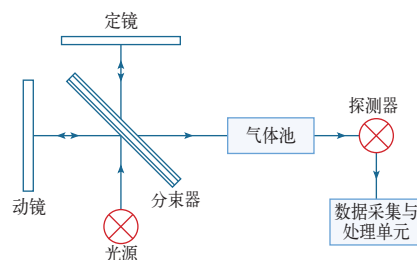


图1 基于傅里叶变换红外监测原理图

由图1可以看出,整个监测装置可分为光路系统、气体池、检测器和数据采集处理四大部分。光路系统实际上是一个迈克尔逊干涉仪。干涉仪由两个互成90°的平面镜、分束器、光源和检测器构成。分束器置于动镜与定镜之间并成45°夹角。它所完成的功能是把光源发出的光分成两束:一束通过分束器折射照射到定镜上,由于是垂直照射,光按原路返回,通过分光镜反射照射到样品上;另一束光通过分光镜反射照射到动镜上,由动镜的反射沿原路返回,通过分光镜折射照射到样品上。当这两束光束通过样品到达检测器时,由同一光源发出的光当到达检测器时由于具有光程差,则它们会产生光的干涉作用,于是就可以得到含有样品信息的光的干涉图像。

若进入干涉仪的入射光是波长为 λ 的单色光,开始时由于动镜与定镜距离相等,故两光束到达检测器的距离相同,则发生相长干涉,亮度最大;当动镜移动 $\lambda/4$ 的奇数倍时,则两光束到达检测器时的光程差为 $\pm\lambda/2, \pm3\lambda/2, \pm5\lambda/2$ 等,发

生相消干涉,亮度最小;当动镜移动 $\lambda/4$ 的偶数倍时,则光程差为 $\pm\lambda, \pm 2\lambda, \pm 3\lambda$ 等,发生相长干涉,亮度最大。因此当动镜匀速移动时,由于两束光的光程差不断变化,则可以通过检测器探测到入射光的干涉图。其数学表达式为

$$I(X) = B(\sigma) \cos(2\pi\sigma X)^{[3]} \quad (5)$$

式中, $I(X)$ 为干涉图上某点的强度,它是光程差 X 的函数; $B(\sigma)$ 为样品吸收光谱干涉图的叠加,是一种中心极大并向两边迅速衰减的对称干涉图。其数学表达式为

$$B(\sigma) = \int_{-\infty}^{\infty} I(X) \cos(2\pi\sigma X) dX \quad (6)$$

由于傅里叶变换具有可逆性,因此可由干涉图分布 $I(X)$ 计算出光谱图分布

$$I(X) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\sigma) \cos(2\pi\sigma X) d\sigma \quad (7)$$

理论上讲可以用干涉法获得 $0 \rightarrow \infty$ 的完整光谱。但实际上动镜不能移动到无穷远,计算机也无法完成如此高密度的取样工作。因此在实际测量中动镜在有限的距离内移动,采用间隔取样,依有限数据近似表示。因此红外光谱仪也只能测量一定波长范围和具有一定分辨率的红外光谱。

5. 变压器油中溶解故障特征气体分析

试验研究表明油中溶解故障气体主要有 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 和 CO_2 。并且不同的故障所对应的主要气体及次要气体成分亦有差异,如表1所示。因此对各种故障气体进行检测,就可以间接判断当前变压器的运行状况。

表1 不同故障类型产生的气体成分^[4]

故障气体	主要气体成分	次要气体成分
油过热	CH_4 、 C_2H_4	H_2 、 C_2H_6
油和纸过热	CH_4 、 C_2H_4 、 CO 和 CO_2	H_2 、 C_2H_6
油纸中局部放电	H_2 、 CH_4 和 CO	C_2H_6 、 CO_2
油中火花放电	C_2H_2 、 H_2	
油中电弧	C_2H_2 、 H_2	CH_4 、 C_2H_4 和 C_2H_6
油和纸中电弧	C_2H_2 、 H_2 、 CO 和 CO_2	CH_4 、 C_2H_4 和 C_2H_6
受潮或油中气泡	H_2	

结果分析与处理

1. 吸收峰选择

红外光谱具有高度的特征性,除光学异构外,没有两种化合物的红外光谱完全相同。因此

在选择不同气体的特征峰时,应保证所选择的特征峰尽可能不重叠。而且所选择的特征峰强度要适中,准确地度量出低浓度,又不会在较高浓度处饱和。目前红外光谱定量分析中都是依据朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律,假定吸光度 A 与浓度 c 符合线性关系,并根据实验获得的数据,采用一定的算法进行曲线拟和,来获得关系式中的数据。但是吸光度与气体浓度只有在 A 很小的情况下才有较好的线性关系,通常是 A 小于0.1。

变压器故障气体红外吸收光谱如图2所示。由图2可以看出,一种物质在红外区可能有多个吸收峰,但并不是每个吸收峰都适于作定量分析,一般定量分析要满足以下几个条件:

- 1) 所选择的吸收峰要具有特征性。
- 2) 峰的吸收强度应服从朗伯-比尔定律。
- 3) 对于比较强的峰,可以选择峰的边缘进行分析。
- 4) 干扰少,即所选的定量吸收峰附近应尽可能没有其他吸收峰的存在。

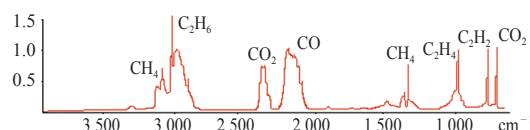


图2 变压器故障气体红外吸收光谱

综上所述,各故障特征气体特征吸收峰选择大致位于以下波段范围内:

- 1) CH_4 吸收峰分别位于 $3\ 050 \sim 3\ 150\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 280 \sim 1\ 380\text{ cm}^{-1}$ 两个波段范围内,考虑到峰重叠以及吸光度问题可以在 $1\ 280 \sim 1\ 380\text{ cm}^{-1}$ 范围内选择。
- 2) C_2H_6 吸收峰位于 $2\ 850 \sim 3\ 100\text{ cm}^{-1}$ 波段范围内,与 CH_4 有部分重叠,应尽量选取受影响比较小范围进行分析,考虑到吸光度,在 $2\ 850 \sim 2\ 900\text{ cm}^{-1}$ 范围内选取。
- 3) C_2H_4 吸收峰分别位于 $800 \sim 1\ 050\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\ 980 \sim 3\ 080\text{ cm}^{-1}$ 两个波段范围内,后一波段受重叠的影响,选择前一波段范围,又考虑 C_2H_2 影响,在 $1\ 000 \sim 1\ 050\text{ cm}^{-1}$ 范围内选取。
- 4) C_2H_2 吸收峰分别位于 $750 \sim 850\text{ cm}^{-1}$ 、

1 350~1 400 cm^{-1} 和3 300~3 400 cm^{-1} 三个波段范围内,由图2可以看出后两个波段与其他波段重叠,因此在750~850 cm^{-1} 范围内选取,又由于该波段与 C_2H_4 也有部分重叠,因此应选择远离重叠区域的波段,在750~780 cm^{-1} 范围内进行选择。

5) CO 位于2050~2 250 cm^{-1} 波段范围内不受其他波段影响,但其波峰处吸收度比较高,可在边缘处选择进行分析。

6) CO_2 吸收峰分别位于2 300~2 400 cm^{-1} 和600~680 cm^{-1} 两个波段范围内,由图2可以看出不受其他波段的影响,但在2 300~2 400 cm^{-1} 吸收度都相对较高,因此在后一个波段进行选择。

7) H_2O 分别位于1 450~2 100 cm^{-1} 和3 500~4 000 cm^{-1} 两个波段范围内,对 CH_4 气体浓度的分析会造成影响,因此在进行油气分离时,需要对混合气体进行干燥处理。

8) H_2 不吸收红外光谱,因此不能利用红外光谱法对其定性及定量分析。

2. 变压器故障识别分析

红外定量模型分析方法有最小二乘法、逆最小二乘法、偏最小二乘法和神经网络法等。本模型采用小波分析和反向神经网络相结合的方法。

傅里叶变换研究一个模拟信号的频谱特性,它要求必须获得时域信号的全部信息,如果一个信号发生突变,整个频谱都将受到影响。因此傅里叶变换缺乏空间局部性,它只能确定一个函数的奇异性的整体性质,而难以确定奇异点在空间的位置及分布情况。而小波分析克服了傅里叶变换不能对信号同时进行时频局部化分析的缺点,可以对信号进行精细的分析,具有空间局部化的特性,可以用来分析信号的奇异性、奇异性的位置和奇异度的大小。因此利用小波变换在时域和频域均具有良好的局部化特性,对频率成分采用逐渐精细的时域或空域取样步长,聚焦到信号的任意细节,在不同时域,不同频带上研究信号的特征。

反向传播模型(BP模型)是一种典型的人工神经网络模型。它包括输入层、输出层和隐含层。隐含层可以为一层也可以为多层,根据实际情况确定,层数越多,算法就越复杂,但分析

准确度就相对比较高。一般情况下采用一层隐含层,这样既可以保证运算速度不致过慢,又能够依任意准确度完成任意连续性函数的影射。

输入采用通过小波变换得到的含有样品信息的频谱关系式。输入节点数目取决于所要检测的特征气体的数目。

输出反映变压器运行状况,对于故障运行变压器,并指出当前变压器的主要故障类型。输出节点的数目取决于输出变压器的故障类型,有多少种类故障类型,就有多少输出节点。由于不能采用此种方法对 H_2 进行检测,而该气体又是反映变压器故障类型的主要特征气体之一,可以通过与其他方法相结合,可以检测表1上的所有故障特征气体。

隐含层节点数的选取相对比较复杂,可以参考下式进行选择

$$n = (n_{\text{in}} + n_{\text{out}})^{0.5} + m \quad (8)$$

式中, m 为1~10之间的数。

输入为经傅里叶变换和小波处理分析处理后各故障特征气体在其所选特征频率处相关特征值;输出采用0,1编码表示当前变压器的运行状况。

神经网络的输出实际上是置信度,最大为1,数值越大则表明该故障的可能性和严重性越大,当输出小于0.5时,认为该事件发生的可能性很小,视为不存在;当置信度大于0.6时,才认为该现象出现;而置信度为0.5~0.6时,视为网络判断失效。

模拟仿真结果分析

标准故障数据如表2所示。

表2 标准故障数据

H_2	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CH_4
7	10.6	11.2	1.9	5.8
14.3	9.7	2.5	0.1	3.4
31.5	18.3	45.8	0.78	46.8
53.3	17.2	20.6	0	74.8
74	6.8	65.2	7.4	19.2
101	13.6	112.3	12.9	57
129.7	14.8	143.3	23	134.6
195.8	11.6	2.4	0.7	14.5
343	25.9	49.3	51	108.7

输入节点数取5，分别对应表2的5种故障特征气体。输出节点取8个，对应8种运行状况，如表3所示。

表3 变压器故障类型

故障类型	故障类型
无故障	低能局部放电
高能局部放电	低能量放电
高能量放电	低温过热
中温过热	高温过热

归一化后的数据如表4所示。

表4 归一化后仿真数据表

H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CH ₄
0.539	0.848	0.9	0.1	0.435
0.9	0.641	0.235	0.1	0.286
0.634	0.405	0.882	0.1	0.9
0.9	0.1	0.795	0.107	0.248
0.808	0.106	0.9	0.1	0.355
0.815	0.1	0.9	0.151	0.846
0.9	0.145	1.007	0.1	0.157

根据上面的隐含层节点的参考公式，分别选取10、12和14所得的结果如表5所示。

表5 模拟仿真结果

序号	实际故障	网络 (n=10)	网络 (n=12)	网络 (n=14)
1	低能量放电	低能量放电	低能量放电	低能量放电
2	无故障	无故障	无故障	无故障
3	中温过热	中温过热	中温过热	中温过热
4	中温过热	中温过热	中温过热	中温过热
5	高能量放电	低能量放电0	低能量放电	高能量放电
6	高能量放电	低能量放电0	高能量放电	高能量放电
7	高温过热	高温过热	高温过热	高温过热
8	高能局部放电	高能局部放电	高能局部放电	高能局部放电
9	低能量放电	低能量放电	低能量放电	低能量放电
识别率		78%	89%	100%

当隐含层节点数选为14时，仿真结果相对比较好。

当用IEC三比值法进行判断时，对编码如122，002等无法判断，而使该方法失效；同时在三比值判断区间交界处附近的数据，用IEC判断时，可能会误判。而神经网络可以克服这些不足，这是因为它的置信度的值很少在0.5附近。神经网络的不足是训练时间可能比较长，容易陷入局部极小的局限，而使学习过程无法得到正确的解。可以通过使用自适应调整学习效率或模拟退火算法进行改进。

结束语

利用傅里叶红外变换技术，可直接检测混合气体CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CO和CO₂各组份含量，但是不能检测H₂（H₂在中红外区没有吸收光谱）。利用小波变换和BP神经网络可对故障气体的组分和含量进行定性与定量分析，判断当前变压器的运行状况。其优点是测试速度快，可以连续采

集对故障分析有利的全部故障特征气体含量，不需要载气，长期免维护。随着技术的不断发展，对产品品质功能要求的不断提高，变压器在线监测产品将具有更高的可靠性、准确度和灵敏度，其检测的气体种类将更加全面，诊断技术趋于智能化。

参考文献

[1] Xu Kun, Zhou Jianhua, Ru Qiushi, et al. Development and prospect of transformer oil dissolved gas on-line monitor technology [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (8) : 30-32.

[2] 陈允魁. 红外吸收光谱法及其应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1993.

[3] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[4] 张光昭. 傅里叶变换光谱学原理 [M]. 广州: 中山大学出版社, 1988.

(收稿日期: 2015-01-07) **EA**