基于非等时距Verhulst－双重BP神经网络油浸设备故障监测技术

油浸设备采用高效正确的故障监测及预报方法，对电网的安全稳定运行有重要影响。为了能更好地对油浸设备故障进行监测预报，提出了一种Verhulst－双重BP神经网络模型。实践证明，采用这种方法能有效提高数量众多、电压等级各异且运行环境各异的油浸设备故障的故障诊断率。

罗东生　许国清／国网福建省电力有限公司南平供电公司

罗东生／助理工程师

关键词/Keywords
Verhulst·
BP神经网络·
油浸设备·
故障监测·

油浸设备运行中发生故障会造成电网大面积停电、财产设备损失及人员伤亡，甚至发生大爆炸等不良后果。可以根据油浸设备油中溶解各气体含量的比值推断出运行中油浸设备已经或将要发生的故障。运行中每时刻油浸设备油中各溶解气体的含量是从渐变性增量累积到一定最大含量的非线性复杂过程，各种因素对运行中油浸设备油中各溶解气体的含量产生的作用也复杂多变。油浸设备故障监测预报一直是电网运行研究的难题。

油中溶解气体监测与故障判断

1. 非等时距Verhulst－BP神经网络日平均绝对产气率模型

判断变压器故障发展趋势的主要依据是考察油中故障特征气体的产生速率。当变压器内部故障处于早期发展阶段时，产气速率比较缓慢，故障进一步发展时，产气速率也随着增大。绝对产气速率与设备的油量有关，因此，少油量设备如互感器、套管的故障判断一般不适于绝对产气速率。

日平均绝对产气速率，是以每日产生气体的毫升数来表示，能直观地反映故障能量与气体量的关系，故障能量愈大，气体量愈多，故不同设备的日平均绝对产气速率是可比的。

绝对产气速率法识别故障具有比特征气体含量法更为灵敏的特点，在反映故障的发展速度和发展趋势方面更优于特征气体含量法。故首先用Verhulst－BP神经网络方程得出产气速率预测模型、最大产气速率及发生时间，最后用产气速率方程得到从取样开始每种油中溶解气体各时刻的含量比值曲线及比值－时间图来判断故障，这比单纯直接抽取某一时刻气体含量比值来判断故障更加高效准确。为正确监测预报变压器故障发展趋势，建立非等时距Verhulst－BP神经网络日平均绝对产气速率模型进行分析是可行的。

有日平均绝对产气速率

$$V=\frac{m(c_{t+1}-c_t)}{\rho\Delta t} \qquad (1)$$

式中，V为日平均绝对产气速率，mL/d；m为设备总油重，t；C_{t+1}为第2次取样测得油中某种气体浓度，μL/L；C_t为第1次取样测得油中某种气体浓度，μL/L；Δt为2次取样时间间隔中的实际运行时间，d；ρ为油的密度，t/m^3。

现110 kV来舟变电站1#主变压器为110 kV/50 MW电力变压器，总油量约7.73 t，油密度经过检测为0.85 t/m^3。采用光谱吸收技术，可得到每次检测油中溶解气体的含量值如表1所示。

根据表1中数据显示，总烃组分含量达到注意值150 μL/L，且开放式气体组分

中国知网 https://www.cnki.net

表1 变压器油色谱数据

（单位：μL/L）

气体类型	含量第1次	含量第2次	含量第3次	含量第4次	含量第5次	含量第6次	含量第7次
C_2H_2	2.1	2.17	2.23	2.26	2.28	2.33	2.73
C_2H_4	47.3	61.3	68.6	72.6	76.6	84.4	97.14
CH_4	48.8	69.5	81.8	87.8	93.9	107.3	97.5
H_2	21.58	23.55	25.13	25.5	25.9	27.4	9.23
C_2H_6	31.98	40.05	45.8	48.7	51.2	55.8	68.5

C_2H_2的绝对产气速率超过了注意值0.1 mL/d。说明变压器内部产生了故障。由于实际取样时第1～7次取样时间分别为2014年6月14日（$t=2$）、2014年6月18日（$t=6$）、2014年6月20日（$t=8$）、2014年6月21日（$t=9$）、2014年6月22日（$t=10$）、2014年6月24日（$t=12$）和2014年6月27日（$t=15$），即取样时间间隔是不等的。根据Verhulst方程的特点需要将非等间隔数据转换成等间隔数据，即采用拉格朗日插值法求取经过这些观测点数据的多项式曲线，可以得到曲线为

$$f(x)=\sum_{j=1}^{k} y_i \prod_{i=1,i\neq j}^{k} \frac{x-x_i}{x_j-x_i} \quad i,j=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

现以C_2H_2气体为例展开说明，可以得到

$$\begin{aligned} f(x)_{C2H2}=&4.557\,29E-0.5\prod_{i=2}^{7}(x-x_i)-\\ &0.000\,27\prod_{i=1,i\neq 2}^{7}(x-x_i)+0.000\,69\prod_{i=1,i\neq 3}^{7}(x-x_i)-\\ &0.000\,95\prod_{i=1,i\neq 4}^{7}(x-x_i)+0.000\,735\prod_{i=1,i\neq 5}^{7}(x-x_i)-\\ &0.000\,3\prod_{i=1,i\neq 6}^{7}(x-x_i)+5.186E-05\prod_{i=1,i\neq 7}^{7}(x-x_i) \end{aligned} \tag{3}$$

经过拉格朗日插值法得到等时距数据如表2所示。

表2 变压器油色谱数据（插值变换后）

（单位：μL/L）

气体类型	含量第1次	含量第2次	含量第3次	含量第4次	含量第5次	含量第6次	含量第7次
C_2H_2	2.1	2.12	2.15	2.2	2.26	2.31	2.39
C_2H_4	44.5	50.7	57.74	64.9	72.6	80.6	88.3
CH_4	44.3	52.8	63.3	75.8	87.8	100.6	112.3
H_2	20.5	21.51	22.5	24.5	25.5	26.6	27.2
C_2H_6	30	33.6	37.5	42.9	48.7	53.6	58.4

上述气体浓度对应第1次～7次取样时间经过变换为2014年6月13日（$t=1$）、2014年6月15日（$t=3$）、2014年6月17日（$t=5$）、2014年6月19日（$t=7$）、2014年6月21日（$t=9$）、2014年6月23日（$t=11$）、2014年6月25日（$t=13$）。

定义$s=(t-3)/2$，$\Delta t=2s+2$，根据日平均绝对产气速率公式

$$x^{(1)}(s)=\frac{7.73[c_{2(s+1)+1}(gas)-c_1(gas)]}{0.85\times 2(s+1)} \tag{4}$$

式中，$s=0,\cdots,N$（$N\leqslant 6$取正整数）。

取数建立模型，可以得到：$x^{(1)}(0)=0.090\,9$，$x^{(1)}(1)=0.113\,6$，$x^{(1)}(2)=0.151\,56$，$x^{(1)}(3)=0.181\,8$，$x^{(1)}(4)=0.190\,97$，$x^{(1)}(5)=0.219\,77$。

同理，据此由表2的数据得等时距各气体含量进而进一步可以得到各气体的日平均绝对产气速率。

以C_2H_2气体为例展开说明，又因为

$$\boldsymbol{Y}=\begin{pmatrix} x^{(1)}(1)-x^{(0)}(0)\\ x^{(1)}(2)-x^{(0)}(1)\\ x^{(1)}(3)-x^{(0)}(2)\\ x^{(1)}(4)-x^{(0)}(3)\\ x^{(1)}(5)-x^{(0)}(4) \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{pmatrix} -0.5[x^{(1)}(1)+x^{(1)}(0)] & \{-0.5[x^{(1)}(1)+x^{(1)}(0)]\}^2\\ -0.5[x^{(1)}(2)+x^{(1)}(1)] & \{-0.5[x^{(1)}(2)+x^{(1)}(1)]\}^2\\ -0.5[x^{(1)}(3)+x^{(1)}(2)] & \{-0.5[x^{(1)}(3)+x^{(1)}(2)]\}^2\\ -0.5[x^{(1)}(4)+x^{(1)}(3)] & \{-0.5[x^{(1)}(4)+x^{(1)}(3)]\}^2\\ -0.5[x^{(1)}(5)+x^{(1)}(4)] & \{-0.5[x^{(1)}(5)+x^{(1)}(4)]\}^2 \end{pmatrix} \tag{6}$$

所以根据上式可以得到

$$\boldsymbol{Y}=\begin{pmatrix} 0.022\,73\\ 0.037\,89\\ 0.030\,31\\ 0.009\,09\\ 0.028\,79 \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{B}=\begin{pmatrix} -0.102\,308 & 0.010\,467\\ -0.132\,622 & 0.017\,589\\ -0.166\,72 & 0.027\,797\\ -186.429 & 0.034\,756\\ -0.205\,37 & 0.042\,179 \end{pmatrix} \tag{7}$$

采用excel进行矩阵计算，主要调用了命令Mmult（）、Transpose（）与Minverse（），即

$$[\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}]^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}=\begin{pmatrix} -0.436\,04\\ -1.634\,43 \end{pmatrix} \tag{8}$$

所以，$a=-0.436$，$b=-1.634\,4$。

根据

中国知网 https://www.cnki.net

$$x^{(1)}(s+1)=\frac{ax^{(1)}(0)}{bx^{(1)}(0)+[a-bx^{(1)}(0)]e^{as}} \quad (9)$$

且$x^{(1)}(0)=0.090\ 9$，所以可得C_2H_2绝对产气速率预测函数为

$$x^{(1)}(s+1)_{C2H2}=\frac{-0.039\ 654\ 375}{-0.148\ 636\ 76-0.287\ 407e^{-0.436s}} \quad (10)$$

式中，$s=0$，…，N（N取正整数）。

BP神经网络，即误差反传误差反向传播算法的学习过程，由信息的正向传播和误差的反向传播两个过程组成。BP神经网络是一个三层的网络，包括输入层、隐含层与输出层。得出上述预测函数后接着用$s+1$、C_2H_2绝对产气速率预测值与实际值残差作为输入层，产气速率修正量（负残差）作为输出层构建BP神经网络从而使产气速率预测值更接近实际值。同时根据Kolmogorov定理，可以确定隐层节点数$m=2w+1=5$（w为输入层节点数，此为2）。

在所有训练数据完成归一化后，接着网络进行了2次训练。第1次训练用正整数序列（代表时间刻度说明时间的增加，$s+1$）、产气速率预测值$x^{(1)}(s+1)$作为BP神经网络的输入信号，已知负残差，即$x^{(1)}(s+1)$值减去实际值作为BP神经网络输出信号。

第2次训练与第1次训练正整数序列保持相同，作为一个输入信号，将实际值减去1次残差修正后$x^{(1)}(s+1)$值作为另一个输入信号，1次修正后负残差，即1次残差修正后$x^{(1)}(s+1)$值减去实际值作为BP神经网络输出信号。

1次修正与2次修正分别训练学习50 000次，网络共训练学习了100 000次。当由Verhulst方程得到下一时刻的预测产气速率时，将其输入到训练好的BP神经网络从而能用上述同样的方法预测出该时刻的负残差，再将数据反归一化后，用预测出该时刻负残差（修正量）累加入该时刻该气体日平均产气速率预测函数输出，就能准确得出该时刻该气体日平均产气速率。

采用Matlab软件进行系统建模，设置好输入与输出数据后，随机选取95%作为网络训练数据，5%作为网络测试数据，并对数据进行归一化处理。之后构建并训练BP神经网络，主要步骤有

Net＝newff（inputn，outputn，5）；%BP神经网络构建

Net.trainParam.epochs＝50000；%训练次数配置

Net.trainParam.lr＝0.1；%学习率设置

Net.trainParam.goal＝0.00004；%目标设置

Net＝train（net，inputn，outputn）；%神经网络训练

将预测数据进行归一化后，输出预测结果并将输出结果反归一化

An＝sim（net，inputn_test）；%网络预测输出

具体详细过程可参见文献[8]，得出结果如表3所示。

表3 Verhulst反函数预测与BP神经网络修正详表

无BP与相对误差		有BP与相对误差		产气率实际值	修正量
0.090 94	0.00%	0.090 94	0.00%	0.090 946	0.000 00
0.118 56	4.29%	0.117 14	3.05%	0.113 68	−0.001 42
0.147 53	−2.67%	0.148 55	−1.99%	0.151 57	0.001 03
0.175 21	−3.67%	0.176 96	−2.71%	0.181 88	0.001 76
0.199 40	4.41%	0.196 91	3.11%	0.190 98	−0.002 48
0.218 94	−0.38%	0.218 77	−0.46%	0.219 77	−0.000 17

同理可以得出变压器从采样开始到最大绝对产气速率状态时C_2H_4、CH_4、H_2和C_2H_6气体的日平均绝对产气速率预测及修正函数模型。

2．油中溶解气体最大绝对产气速率及其发生时间

可以得到C_2H_2气体最大产气速率将达到

$$x^{(1)}(s_r+1)=\frac{a}{b}=0.266\ 787\ 13\ \text{mL/d} \quad (11)$$

x_1取$x^{(1)}(s_r+1)$的近似值$x_1\approx 0.266\ 787$ mL/d。

根据方程：$\frac{dx^{(1)}(s+1)}{ds}=b[x^{(1)}(s+1)]2-ax^{(1)}(s+1)$有极值的特点，以$s_r=-\frac{\Delta s}{a}\ln(\frac{bx_1}{a-bx_1})+s_1$计算最大产气速率预测时间$s_r$。其中$\Delta s=1$为建模序列等时间距；$s_1$为第一个建模测值观测时间。

最大产气速率时间预报（C_2H_2气体）如表4所示。

中国知网 https://www.cnki.net

表4 最大产气速率时间预报(C_2H_2气体)

s序号	t序号	时间	日平均产气速率/（mL/d）	气体含量/（μL/L）
–	1	2014年6月13日	–	2.1
0	3	2014年6月15日	0.090 9	2.12
1	5	2014年6月17日	0.113 6	2.15
2	7	2014年6月19日	0.151 5	2.20
3	9	2014年6月21日	0.181 8	2.26
4	11	2014年6月23日	0.190 9	2.31

所以C_2H_2发生最大产气速率的时间

$$s_m=-\frac{\Delta s}{a}\ln\left(\frac{bx_1}{a-bx_1}\right)=33.33 \tag{12}$$

$s_r=s_m+s_1$，即为C_2H_2将于2014年8月14日发生最大绝对产气速率，此时油中气体含量为46 μL/L。后观测实际最大时间为2014年8月13日。同样地，也可以得到其他气体的最大产气速率与其发生时间，在此不在赘述。

3. 三比值法故障判断

为凸显故障分析故障，列出C_2H_4与C_2H_6的日平均产气速率预测函数分别为

$$x^{(1)}(s+1)_{C2H4}=\frac{-11.578\,779\,41}{-0.340\,27-0.071\,76e^{-0.412\,0s}}$$

$$x^{(1)}(s+1)_{C2H6}=\frac{-10.252\,983}{-0.452\,993-0.173\,356e^{-0.626\,35s}} \tag{13}$$

$$x^{(1)}(s+1)_{H2}=\frac{-0.923\,564}{-0.132\,032-0.782\,388\,2e^{-0.914\,42s}}$$

$$x^{(1)}(s+1)_{CH4}=\frac{-21.388\,84}{-0.404\,777-0.148\,607e^{-0.553\,38s}}$$

根据表2及上述拉格朗日插值法，当$t=1$时（2014年6月13日），油中溶解C_2H_4含量近似为44.5 μL/L；油中溶解C_2H_6含量近似为30 μL/L；油中溶解C_2H_2含量近似为2.1 μL/L；油中溶解CH_4含量近似为44.3 μL/L；油中溶解H_2含量近似为20.5 μL/L。

经过excel计算可以得到从采样开始下述两种气体比值为

$$\text{Ratio}=\frac{44.5+\frac{\rho\times2(s+1)}{m}x^{(1)}(s+1)_{C2H4}}{30+\frac{\rho\times2(s+1)}{m}x^{(1)}(s+1)_{C2H6}} \tag{14}$$

C_2H_4/C_2H_6两种气体含量比值－时间图如图1所示。

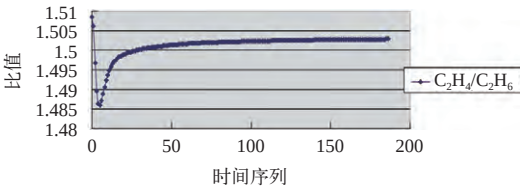

图1 C_2H_4/C_2H_6气体含量比值－时间图

经过excel计算可以得到从采样开始下述两种气体比值为

$$\text{Ratio}=\frac{44.3+\frac{\rho\times2(s+1)}{m}x^{(1)}(s+1)_{CH4}}{20.5+\frac{\rho\times2(s+1)}{m}x^{(1)}(s+1)_{H2}} \tag{15}$$

CH_4/H_2两种气体含量比值－时间图如图2所示。

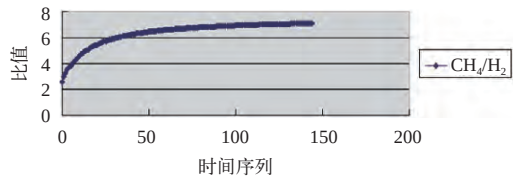

图2 CH_4/H_2气体含量比值－时间图

经过excel计算可以得到从采样开始下述两种气体比值为

$$\text{Ratio}=\frac{2.1+\frac{\rho\times2(s+1)}{m}x^{(1)}(s+1)_{C2H2}}{44.5+\frac{\rho\times2(s+1)}{m}x^{(1)}(s+1)_{C2H4}} \tag{16}$$

C_2H_2/C_2H_4两种气体含量比值－时间曲线如图3所示。

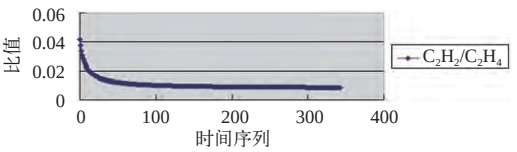

图3 C_2H_2/C_2H_4气体含量比值－时间图

根据图1、图2和图3，可以得到：$1.4<\text{Ratio}_{\frac{C2H4}{C2H6}}<1.51$，所以$C_2H_4/C_2H_6$比值为1，$2<\text{Ratio}_{\frac{CH4}{H2}}<8$，所以$CH_4/H_2$比值为2；$0<\text{Ratio}_{\frac{C2H2}{C2H4}}<0.05$，所以

中国知网 https://www.cnki.net

C_2H_2/C_2H_4比值为0。

所以得出综合曲线如图4所示。

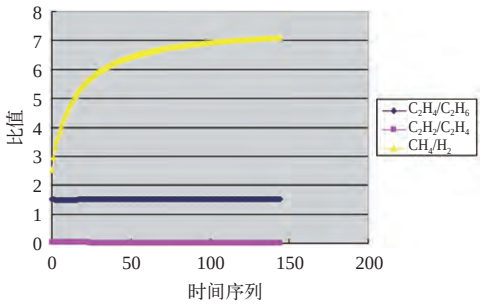

图4 气体含量比值－时间图

根据国家标准GB/T 7252—2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》，采用以IEC改良三比值法的编码规则对变压器故障类型进行判断。在此基础上录入整合了油中溶解气体含量与故障关系进行分析，如表5所表示。

表5 变压器油中溶解气体与设备故障分析对应表

情况	特征故障	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
PD	局部放电	0	1	0
D1	低能量局部放电	1	0，1	0，1，2
D1T	低能量局部放电兼过热	1	2	0，1，2
D2	高能量局部放电	2	0，1	0，1，2
D2T	高能量局部放电兼过热	2	2	0，1，2
T0	热故障T＜150 ℃	0	0	1
T1	热故障150 ℃＜T＜300 ℃	0	2	0
T2	热故障300 ℃＜T＜700 ℃	0	2	1
T3	热故障T＞700 ℃	0	0，1，2	2

又因当$CH_4/H_2=1\sim3$时，为磁回路过热性故障；当$CH_4/H_2\geqslant3$时，为导电回路过热性故障。且分析得到总烃的增加与变压器的负荷率无关，所以变压器发生了温度介于300～700 ℃之间的导电回路热故障。进一步检查确认为变压器分接头开关接触不良，造成接头部分绝缘材料被破坏，分解产生烃类气体。

进而可以计算出故障部位的大致温度为

$$T=\left[322\lg\left(\frac{C_2H_4}{C_2H_6}\right)+525\right]℃=581℃ \quad (17)$$

结束语

首先应用拉格朗日插值法将非等时距数据转化为等时距数据，再用Verhulst反函数双重BP神经网络模型对非线性动态并且历时曲线尾段有明显上升趋势的油浸设备油中溶解气体绝对产气速率进行预测预报，接着采用日平均绝对产气速率预测模型通过计算得到每种油中溶解气体每一时刻的含量比值及比值－时间图，进而用三比值法判断故障，得到了良好的诊断效果。结果显示，Verhulst反函数双重BP神经网络日平均绝对产气速率模型具有更高的油浸设备故障监测预报准确度。另外，无论是用产气速率法还是用其他方法进行故障判断，都要根据不同方法的特点正确应用，以免出现误判。油中特征气体的含量或产气速率在很大程度上还与设备类型、负荷情况、故障类型及内部绝缘材料的老化程度等因素有关，应结合这些情况进行综合分析。此外，还要考虑到非故障因素引起某些特征气体增长异常的情况。

参考文献

[1] GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [M]. 北京：中国标准出版社，2002.

[2] 刘瑾，等. 基于光谱吸收技术的电力油浸设备故障气体检测方法的研究 [C]. 北戴河：第五届全国信息获取与处理学术会议，2008.

[3] 王端珍. 运行中的变压器、电抗器产气情况分析 [J]. 变压器，2003，32 (2)：32-36.

[4] 王大忠，徐文，陈珩. 模糊理论、专家系统及人工神经网络在电力变压器故障诊断中的应用 [J]. 中国电机工程学报，1996，16 (5)：349-351.

[5] 苏鹏声，王欢. 电力系统设备状态检测与故障诊断技术分析 [J]. 电力系统自动化，2003，27 (1)：61-65，82.

[6] 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.

[7] 王彦吉，宋增福. 光谱分析与色谱分析 [M]. 北京：北京大学出版社，1994.

[8] 王小川，史峰，郁磊，等. Matlab神经网络43个案例分析 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2011.

（收稿日期：2015－03－06）EA

中国知网 https://www.cnki.net