

一种在线分析变压器故障特征气体的智能传感器

佟继春¹, 陈伟根¹, 陈荣柱²

(1. 重庆大学, 重庆 400044; 2. 温州电业局, 浙江 温州 325000)

One Intelligent Sensor for Online Analysis of Oil-dissolved Gas in Transformer

TONG Ji-chun¹, CHEN Wei-gen¹, CHEN Rong-zhu²

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Wenzhou Electric Power Bureau, Wenzhou 325000, China)

摘要: 在线监测变压器油中溶解气体可有效地分析变压器绝缘状况,在线监测用气体传感器是实施该技术的关键。针对半导体气体传感器的交叉敏感特性,提出了将气体传感器阵列与人工神经网络技术相结合,利用6个半导体气体传感器组成传感器阵列,采用BP神经网络进行模式识别。大量的试验证明,所提出的智能传感器可有效地提高H₂,CO,CH₄,C₂H₄,C₂H₂,C₂H₆ 6种气体的分辨率和检测灵敏度。

关键词: 变压器; 油中气体; 在线监测; 智能传感器

中图分类号: TM855

文献标识码: A

Abstract: Online detection technology of transformer oil dissolved gas can be used to analyze insulation status of transformer effectively, and the gas sensor in online detection is crucial to this technology. Using the intersection sensitivity for semiconductor gas sensors, this paper presents a smart sensor integrating gas sensor array with artificial neural network technology. The author employs gas sensor array consisting of six semiconductor sensors and BP neural network to do pattern recognition. Lots of experiments prove that the smart sensor can improve resolution and sensitivity of online detection on six gases of H₂, CO, CH₄, C₂H₄, C₂H₂ and C₂H₆.

Key words: transformer; oil dissolved gas; online monitoring; intelligent sensor

1 引言

大型电力变压器是电力系统中的枢纽设备之一,对它的运行状态进行在线监测、保证其安全运行是提高整个电力系统运行可靠性的关键措施。由于电力变压器故障的发展过程与运行环境、负载情况直接相关,采用定期维修的方法往往难以及时发现这些故障,而且定期维修需要离线进行,停电时间长,会造成大量的电量损失。研究表明,变压器油中溶解气体的组分和含量与变压器内部故障的类型、

故障的严重程度有十分密切的关系。变压器油中溶解气体分析法(DGA法)正是利用不同类型的变压器故障对应不同的变压器油溶解气体浓度性质,通过分析故障特征气体(H₂,CO,CH₄,C₂H₄,C₂H₂,C₂H₆等)的浓度来获知变压器故障类型。由于DGA法能够在不停电的情况下进行故障检测,不受外界电磁场的影响,可以定期在变压器运行过程中对其内部故障进行诊断,因此,该方法目前已成为电力系统中对油浸电力设备进行故障诊断的常规监测手段,得到了广泛的应用^[1]。

2 气体传感器阵列系统结构

2.1 半导体气敏传感器及其特性

半导体气敏传感器是利用待测气体与半导体(主要是金属氧化物)表面接触时,产生的电导率等物性变化来检测气体。半导体气敏器件被加热到稳定状态下,当气体接触器件表面而被吸附时,吸附分子首先在表面自由地扩散(物理吸附),失去其运动能量,其间的一部分分子蒸发,残留分子产生热分解而固定在吸附处(化学吸附)。这时,如果器件的功函数小于吸附分子的电子亲和力,则吸附分子将从器件夺取电子而变成负离子吸附。具有负离子吸附倾向的气体有O₂和NO_x,称为氧化型气体或电子接收型气体。如果器件的功函数大于吸附分子的解离能,吸附分子将向器件释放电子,而成为正离子吸附。具有这种正离子吸附倾向的气体有H₂,CO,碳氢化合物等,称为还原型气体或电子供给型气体^[2]。

目前可用于检测气体的敏感元件有很多种,如SnO₂,ZnO,Fe₂O₃等。它们共同的特点是可以检测多种不同的气体,但对气体的选择性差。这种非单一选择性是由其敏感机理所决定的,虽然可以采用一定的方法(如添加适量的贵金属Pt,Pd等)改善其选择性,但仍然会对其它气体有一定的敏感度。

图1和图2给出了半导体气敏元件在不同的温

度和气体浓度下的阻抗值及灵敏度变化情况。从图2中可以看到,由于交差干扰的存在,采用普通的单一敏感元件很难对混合气体进行识别与组分分析。

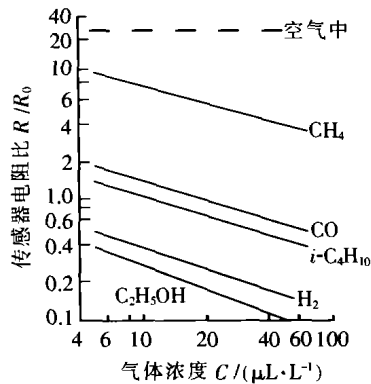


图1 SnO₂元件的电阻与被测气体浓度的关系
R₀—i-C₄H₁₀浓度为1000 μL/L时的电阻值

图1为元件的电阻R与空气中所含有的被测气体浓度C之间的关系,根据经验一般用对数表示,即:logR=mlogC+n。式中:m,n是由传感器元件、测量气体的种类、测量温度等因素决定的常数。因m表示相对于气体浓度变化的敏感程度,所以m愈大,敏感程度愈大,但对通常的可燃性气体,一般其值取为1/2~1/3。设R₀为普通气体(空气)浓度为

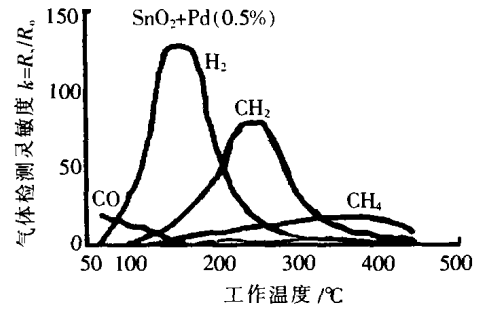


图2 半导体气体传感器的交叉敏感特性

零时的电阻,则气体灵敏度(即响应率)可由R₀/R来表示,它是气体浓度C的函数,为便于气体的检测,用C为定值时的相对灵敏度作比较。从图2可知,相对灵敏度随气体而不同,虽然还随传感器的种类、添加剂、测量温度的不同而有很大差异,但是一般越容易燃烧的气体,其含碳量也越大,它的相对灵敏度也就高,这是因为元件上气体的燃烧在本质上与气体的响应特性有关。

2.2 MQ型系列传感器的特性

通过大量的理论分析和试验研制成MQ型系列气体传感器(MQ₁,MQ₂,MQ₃,MQ₄,MQ₅,MQ₆),分别检测H₂,CO,CH₄,C₂H₄,C₂H₂,C₂H₆。6种传感器分别响应6种气体的特性见表1~6。

表1 MQ₁~MQ₆对H₂的敏感特性 μL/L

H ₂ 浓度	MQ ₁	MQ ₂	MQ ₃	MQ ₄	MQ ₅	MQ ₆
10	14.716	2.117	2.791	6.925	1.132	3.947
40	42.138	3.146	5.265	17.038	1.268	6.379
80	83.076	4.045	7.386	35.458	1.356	9.412
150	146.295	5.326	9.423	60.689	1.746	11.163

表3 MQ₁~MQ₆对CH₄的敏感特性 μL/L

CH ₄ 浓度	MQ ₁	MQ ₂	MQ ₃	MQ ₄	MQ ₅	MQ ₆
10	1.177	1.042	12.466	1.045	1.068	8.025
40	4.053	4.178	43.463	3.822	2.129	23.875
80	7.035	6.987	78.312	6.782	2.865	44.682
150	11.869	10.863	154.523	11.324	3.968	105.642

表5 MQ₁~MQ₆对C₂H₂的敏感特性 μL/L

C ₂ H ₂ 浓度	MQ ₁	MQ ₂	MQ ₃	MQ ₄	MQ ₅	MQ ₆
2	0.128	0.292	0.267	0.172	2.926	0.221
5	0.339	0.601	0.331	0.255	4.673	0.503
8	0.869	1.015	0.903	0.447	9.332	1.078
10	1.158	1.923	1.853	0.968	11.013	1.914

尽管每种气体的传感单元对各自检测气体的灵敏度明显高于其余气体,但存在交叉敏感的问题,特别是有些性质相近的气体成分(如H₂和C₂H₄,CH₄和C₂H₆)交叉敏感程度较深。该交叉灵敏度表现在传感器的输出值不只决定于一个参量,当其它参量变化时输出值也要发生变化。存在交叉灵敏度的传感器,其性能不稳定,测量准确度低。多传感器信息融合技术就是通过对多个参数的监测并采用一定的信息处理方法达到提高每一个参量测量准确度的目的。在只要求测量一个目标参量的场合,为达到提高被测目标参量测量准确度的目的,其它参量都是干扰量,

表2 MQ₁~MQ₆对CO的敏感特性 μL/L

CO浓度	MQ ₁	MQ ₂	MQ ₃	MQ ₄	MQ ₅	MQ ₆
50	2.022	52.745	9.564	4.828	0.904	5.257
100	8.042	111.261	12.331	5.588	1.231	10.580
200	12.638	194.799	16.558	7.559	1.533	13.849
500	17.562	490.610	20.227	10.384	1.662	15.001

表4 MQ₁~MQ₆对C₂H₄的敏感特性 μL/L

C ₂ H ₄ 浓度	MQ ₁	MQ ₂	MQ ₃	MQ ₄	MQ ₅	MQ ₆
10	6.925	2.717	2.191	14.716	1.132	3.947
40	18.138	3.864	3.265	37.038	2.268	4.379
80	35.546	4.045	3.586	83.076	2.356	5.412
150	60.689	5.326	4.423	146.35	3.746	8.163

表6 MQ₁~MQ₆对C₂H₆的敏感特性 μL/L

C ₂ H ₆ 浓度	MQ ₁	MQ ₂	MQ ₃	MQ ₄	MQ ₅	MQ ₆
10	5.877	4.042	15.466	7.045	1.268	11.025
40	9.053	7.378	18.875	9.220	1.729	41.463
80	12.035	11.987	34.682	10.782	1.865	78.312
150	13.869	14.563	65.642	13.324	1.968	154.520

其影响应被消除。既然监测了多个参量,每一个参量测量准确度都获得提高,从而使这种多传感器信息融合技术也为开发多功能传感器系统开辟了途径。

经过多年来对气体传感器材料和机理的研究,仍然表明仅依靠提高单个传感器的选择性是困难的,克服这一困难的主要途径是发展气体传感器的阵列技术。阵列技术包括两个方面:其一是以微制造、微机械加工技术为工具,研制集成微型气体传感器阵列;其二是采用多传感器信息融合技术,以尽可能小的误差为代价提高非选择性传感器阵列对单一气体识别的准确性和实现混合气体组分的数量分

析。不论在传感器阵列的集成化方面,还是在传感器的阵列分析理论与技术方面,两者相辅相成发展迅速,成为当前智能传感器领域的研究热点。

与多功能传感器敏感元件的集成化、多传感器敏感元件阵列的集成化技术发展相适应,模糊理论、人工神经网络理论以及各种传感器阵列分析理论纷纷被应用来增强传感器的智能化程度,以有效地克服自身交叉灵敏度、时漂老化等因素而存在的不稳定性、不可靠性。

2.3 阵列式气体传感系统

具有不同选择性气敏元件阵列进行气体识别与测量方法的基本思想是将具有不同选择性的气敏传感器元件组成阵列,建立各种气体对阵列响应的对应关系,当测得阵列响应后,即可通过逆求解对被测气体进行识别和测量。

用气体传感器阵列进行气体识别与测量的原理见图4。设混合气体中共有 n 种成分,浓度分别为 c_1, c_2, \dots, c_n ,气体传感器阵列的维数为 m ,则其响应模式为:

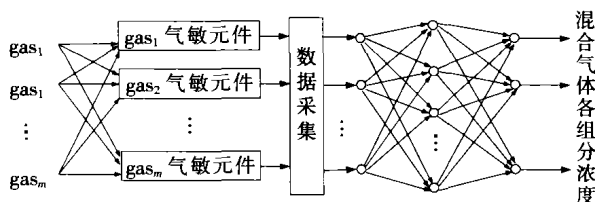


图4 阵列式传感系统气体检测原理图

$$\begin{cases} s_1 = g_1(c_1, c_2, \dots, c_n) \\ s_2 = g_2(c_1, c_2, \dots, c_n) \\ \vdots \\ s_m = g_m(c_1, c_2, \dots, c_n) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)可简写为: $S = G(C)$

上式中:输入向量 $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$; 输出向量 $S = [s_1, s_2, \dots, s_m]$; s_i 为第 i 个敏感元件的输出。

设神经网络的映射关系为: $Y = H(S)$ 。输出向量 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$, 要使 $Y = C$, 必使 $H = G^{-1}$, 系统的测量准确度取决于神经网络的映射能力。

映射关系 H 的形成依赖于网络自身的学习。用足够数量的已知样本对神经网络进行反复训练, 当网络的输出误差趋近于 0 时, 网络各连接权上便存储了从传感器阵列信号到气体浓度的映射关系, 它近似于传感器过程的逆映射, 可用于传感器阵列未知模式的识别。

3 BP 神经网络

采用三层网络结构的 BP 神经网络, 取 SigMoid 函数为神经元的非线性函数, 输出层的神经元数代表被测气体的种类, 期望输出值为各气体的浓度值与所用的测试数据集中气体浓度最大值的比值, 该最大值相当于所使用传感器的量程。这样可以充分

利用神经网络的非线性, 输出也不会仅仅限于几种固定的模式, 其检测值更接近于实际情况。神经网络的训练采用了变步长和带动量因子的 BP 算法, 既可以加快神经网络的训练速度, 又能防止网络限于局部极小点。

为了加快前向网络的训练速度, 另外一种行之有效的办法是 L-M (Lerengberg-Marquardt) 算法^[3]。L-M 算法是建立在一种优化方法基础上的训练算法, 常规的 BP 算法通常需要较长的时间训练, 而 L-M 算法比 BP 算法要快得多, 但是 L-M 算法需要更多的内存空间。一般来说, L-M 算法所需要的内存空间为常规 BP 算法的 $S \times Q$ 倍(其中: S 为输出神经元个数, Q 为训练网络的输入-输出矢量数)。式(2)为 L-M 算法更新参数的规则:

$$\Delta \omega = (J^T J + \mu J)^{-1} \cdot J^T e \quad (2)$$

式(2)中: J 为误差对权值微分的 Jacobian 矩阵; e 为误差向量; μ 为一个标量, 在这种方法中, μ 是自适应调整的。

变量 μ 确定了网络的学习算法是根据牛顿法还是梯度法来完成, 随着 μ 的增大, L-M 规则中的 $J^T J$ 项可以忽略, 式(2)就接近于梯度法; 当 μ 很小时, 式(2)就变成 Gauss-Newton 法。因此学习过程主要根据梯度法下降, 即 $\mu^{-1} J^T e$ 项。只要迭代过程使误差增加, μ 也就会增加, 直到误差不再增加为止; 但是, 如果 μ 太大, 则会使学习停止, 这是因为 $\mu^{-1} J^T e$ 接近于 0, 当已经找到最小误差时, 就会出现这种情况, 所以 μ 达到最大值时要停止学习。

4 结果分析

为了测试传感器阵列, 训练和验证所设计的神经网络, 采集了 $H_2, CO, CH_4, C_2H_4, C_2H_2, C_2H_6$ 6 种气体共 30 组样本, 18 组用于训练网络, 12 组用于测试。

网络经过 1 313 次迭代训练后, 其误差指数收敛到 10^{-2} , 然后将权值和阈值固定, 并用预测样本进行验证, 结果见表 7。

5 结论

(1) MQ 型系列传感器检测各自对应气体具有选择性, 但存在交叉敏感问题。克服交叉敏感问题的有效方法是采用传感器阵列技术。

(2) 将气体传感器阵列技术与 BP 神经网络结合起来, 可以完成对 $H_2, CO, CH_4, C_2H_4, C_2H_2, C_2H_6$ 6 种气体中单一气体的定性识别、定量分析。

参考文献:

- [1] 孙才新, 陈伟根, 李 俭, 等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (下转第 438 页)

闸操作过程中,消耗的能量就大。永久磁铁的质量大,就会增加产品的成本。因此,单从机构本身出发,圆形机构优于方形机构。

表1仅对某种特定结构与尺寸的方形机构与圆形机构进行了比较,为了说明其普遍性,可以从以下两方面进行分析。

(1)从表1可以看出,方形机构中的永久磁铁的质量稍大于圆形机构中的永久磁铁的质量,这是由于圆形机构是一个轴对称结构,铁心沿圆周的磁场是均匀的,而方形机构的磁场在厚度方向是不均匀的。因此,当方形机构沿厚度方向中间的磁场已达到饱和,而边缘的磁场却很小,为了使合闸保持力达到要求,方形机构的永久磁铁的体积大于圆形机构永久磁铁的体积。从表1还可以看出,方形机构中动铁心的质量明显大于圆形机构中动铁心的质量。在圆形机构中,由于永久磁铁是均匀地分布在动铁心的圆周上,而方形机构的永久磁铁只能在动铁心的两侧,要达到同样的表面积,方形机构永久磁铁的高度就大于圆形机构永久磁铁的高度,方形机构中动铁心的高度就较大,因此,方形机构中动铁心的质量明显大于圆形机构中动铁心的质量。

(2)圆形永磁机构线圈全部被磁轭包围,线圈的一周都能与铁心、磁轭及工作气隙形成闭合磁路。然而,对于方形机构,它的其中两侧的线圈被磁轭包围,能与铁心、磁轭及工作气隙形成闭合磁路,而另外两侧的线圈不被磁轭包围,不能形成闭合磁路。同样的电流所产生的磁力较小。并且,由于方形机构动铁心的质量大,在分、合闸操作过程中,消耗的能量较大。

但是,圆形机构也有不利的因素,即它的机构不灵活。如在有些产品的设计中,机构所占用的空间在某个方向的尺寸上是有一定限制的,例如ABB公司

的VM1型真空断路器的机构箱深度就只有约160mm,机构的宽度就必须小于160mm。如果用圆形机构,为了克服真空灭弧室的合闸保持力,机构的直径就会大于160mm,因此就不宜实现。而对于方形机构,结构就比较灵活,它可以在保证长度小于160mm的情况下,在厚度方向扩展,使机构满足断路器机构的要求。方形机构的另一个优势是,对于不同开断容量的断路器,机构可以在长度方向保持不变的情况下,在厚度方向扩展,发展出系列产品。由于方形机构的主要部件是冲压件,有利于批量生产。

3 结语

方形机构与圆形机构各有其利弊,应该对不同的具体结构进行具体分析,选择适合所配断路器的机构形式。

参考文献:

- [1] Z Li, L A Renforth, D W Auckland, et al. Computer Aided Optimal Design of Magnetic Actuator for Autoreclose Application [A]. Trends in Distribution Switchgear [C], London, 1998.
- [2] 孟庆龙, 颜威利. 电器数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [3] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [4] You Yiming, Chen Degui. The Optimal Design Parameters Selection of Permanent Actuator for Vacuum Circuit Breaker Based on Dynamic Characteristic Analysis [A]. 10th ISDEIV Proceedings[C], Tours, France, 2002.

作者简介:游一民(1963-),女,山西人,博士,高级工程师,主攻高压电器及其产品设计。

(上接第435页)

表7 神经网络输出结果

样本	气体的标定值 / ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)						神经网络的识别结果 / ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)					
	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆
1	0	0	0	0	0	40	0.738 1	0.698 6	3.526 4	2.444 4	0.797 8	40.676 5
2	0	0	0	0	0	30	0.503 6	2.179 0	2.437 0	2.361 6	0.410 7	29.588 0
3	0	0	0	40	0	0	2.104 3	1.856 2	1.025 3	41.964 9	0.134 2	1.957 8
4	0	0	0	30	0	0	2.023 1	1.677 6	1.010 2	34.520 1	0.220 2	1.823 9
5	0	40	0	0	0	0	1.025 6	37.651 3	1.832 0	1.906 4	0.026 5	1.918 8
6	0	30	0	0	0	0	1.103 5	29.399 0	1.243 6	1.959 3	0.041 2	2.051 4
7	0	0	0	0	8	0	0.234 2	0.126 7	0.320 1	2.072 8	7.623 2	0.448 5
8	0	0	0	0	6	0	0.186 2	0.104 2	0.203 0	2.384 4	5.799 9	0.534 9
9	40	0	0	0	0	0	41.138 0	1.164 0	1.265 1	2.038 0	0.268 0	1.379 0
10	30	0	0	0	0	0	29.351 0	1.635 1	1.023 0	1.863 0	0.102 5	1.201 2
11	0	0	40	0	0	0	1.053 0	2.178 0	41.463 0	1.822 0	0.129 0	2.075 0
12	0	0	30	0	0	0	0.977 0	1.042 0	29.466 0	1.045 0	0.068 0	2.125 0

[2] 黄贤武, 郑薇霞. 传感器原理与应用 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995.

[3] 刘君华. 智能传感器系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

作者简介: 佟继春(1978-),男,硕士研究生,从事电气设备绝缘在线监测研究。