

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201705090

密封式继电器触点形貌与腐蚀类型关联性分析

李文华^{1,2}, 李 爽¹, 周露露¹, 王立国¹

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津 300130;

2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学), 天津 300130)

摘 要: 为深入研究密封式继电器触点的失效机理, 开展腐蚀形貌特征与腐蚀类型的关联性分析. 选取密封式继电器触点 DEAX SEM 图为分析样本, 在分析可能存在腐蚀反应类型的基础上, 提取对应元素分布图的不规则边缘轮廓, 从而将无腐蚀部分排除, 同时还还原了腐蚀区域形貌, 量化提取其腐蚀形貌特征值并对应可能的腐蚀类型进行分析, 最终利用 BP 神经网络算法进行关联性验证. 结果表明: 密封式继电器触点中 Ag 与 Cl 的原子百分比近似为 1 : 1, 在特定区域内极有可能产生 AgCl 化合物, 并确定触点形貌与腐蚀类型存在映射关系. 得到了在多种腐蚀反应共同作用下, 每种反应本身的腐蚀形貌特征仍然存在的结论, 并提供了一种探究腐蚀类型与腐蚀形貌特征关系的方法.

关键词: 密封式继电器; 触点形貌; 腐蚀类型; 边缘轮廓检测; BP 神经网络; 分类预测

中图分类号: TM58

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)09-0180-06

Correlation analysis between contact topography and corrosion type of sealed relay

LI Wenhua^{1,2}, LI Shuang¹, ZHOU Lulu¹, WANG Liguo¹

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment(Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province(Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China)

Abstract: In order to deeply study the failure mechanism of sealed relay contact, it is necessary to investigate the correlation analysis between corrosion topography and type. The contact DEAX SEM diagram of sealed relay was selected as the analysis sample. Based on the analysis of possible types of corrosion reaction, it extracted irregular contours on the extraction distribution of corresponding elements, thereby eliminating the non-corrosive part and restoring the 3D shape of the corrosion area. The eigenvalues of the corrosion morphology were analyzed quantitatively and matched the possible corrosion type. Finally, BP neural network algorithm was used to verify the relevance. The results showed that the percentage of Ag and Cl atoms in the contact of sealed relay was approximately 1 : 1, so it was highly possible to produce AgCl compounds in certain areas. At the same time, the mapping relationship between contact topography and corrosion type was determined. It is concluded that the corrosion topography characteristics of each reaction still exist under the combined action of various corrosion reactions, and this paper provides a method to explore the relationship between corrosion types and corrosion morphology characteristics.

Keywords: sealed relays; contact topography; corrosion type; edge contour detection; BP neural network; classification prediction

密封式继电器触点是否正常工作直接关系到继电器的工作寿命和可靠性. 研究密封式继电器失效机理常采用分析其触点形貌特征的方法^[1]. 自二十世纪七十年代末开始, 初步将形貌图像处理技术应用于腐蚀评价系统中^[2]. 在腐蚀科学领域中, 腐蚀图像与腐蚀数据是判断各种腐蚀类型、研究腐蚀规律与特征的重要依据^[3]. 文献[4]收集了 39 种金属

单一腐蚀状态图像及电位-PH 图. 文献[5]在扫描电镜下观测材料的蚀孔剖面轮廓结构. 随着腐蚀与形貌关联性研究的逐步深入, 文献[6]观察分析活性金属腐蚀前后表面膜图像. 文献[7]利用数字图像处理技术, 对多种合金的表面腐蚀图像进行腐蚀区域提取. 文献[8]对同一电解液中不同金属材料的腐蚀性能进行分析比较. 这些研究侧重观测某一种腐蚀产生的外观轮廓变化, 对研究多种腐蚀中的形貌特征鲜有涉及.

通常密封式继电器触点会处于特定的保护气氛下, 但由于各种原因, 环境气氛有所改变或迄今尚不

收稿日期: 2017-05-16

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2015051)

作者简介: 李文华(1973—), 男, 博士, 教授

通信作者: 李 爽, dunhelian@foxmail.com

明确的内部污染源,致使触头表面发生氧化以及多种电化学腐蚀,改变触头形貌特征与膜电阻,接触性能下降,使继电器使用寿命缩减^[9]. 目前研究集中于分析触点形貌特征,将腐蚀触点形貌与腐蚀类型相结合研究继电器失效的文献仍显欠缺. 腐蚀图像灰度与实际腐蚀深度在 0.95 置信度下线性相关,提供了探究腐蚀与形貌间关联性的基础^[10].

针对腐蚀图像形貌与其不同腐蚀类型相关性研究缺乏现状,本文选取密封式继电器触点 DEAX SEM 图作为试验样本,提取腐蚀区域轮廓对应区域的三维形貌特征值,与腐蚀类型对应,并利用 BP 神经网络进行关联性验证.

1 试验

1.1 密封式继电器贮存寿命试验

本文试验样本为密封式继电器试验后的触点. 河北工业大学电器研究所进行的贮存寿命加速试验选取某型号密封式电磁继电器 100 台,平均分为 4 组,每台试品有 4 对转换触点. 长期贮存寿命加速试验后,继电器的电参数与触点腐蚀形貌发生明显变化. 将触点进行电镜扫描,得到试验样本 DEAX SEM 如图 1 所示.

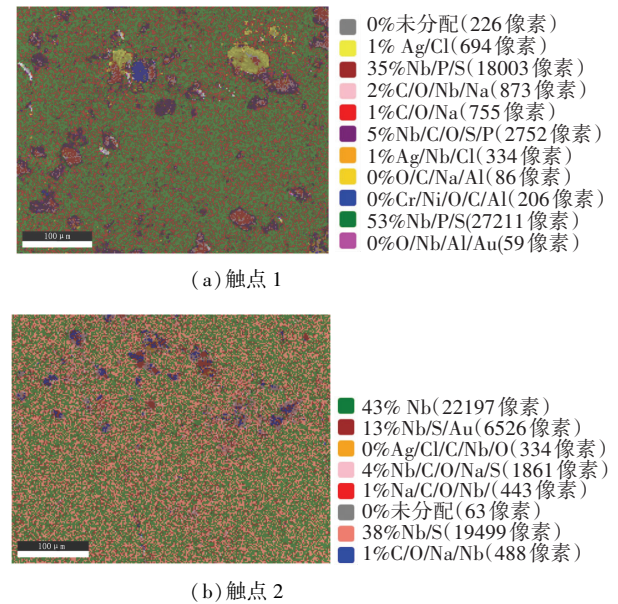


图 1 触点元素分布图
Fig.1 Distribution map of contact elements

1.2 元素分布分析

元素分布图中,Nb(铌)金属室温下在空气中是极其稳定的,不与空气作用并抵御各种侵蚀,且单质状态下的熔点较高(2 468 ℃)^[2]. 根据图 1(a)中的两相 Nb/P/S (像素比 35%)、Nb/P/S (53%),图 1 (b)中的两相 Nb(43%)、Nb/S(38%)所占比例巨大,Nb 为密封式继电器防腐金属.

根据元素分布图,相对无腐蚀区域为上述元素复合区域. 根据原子百分比表,无腐蚀区域为金含量最多且 Nb 大量存在的像素点,即元素分布图 1(a)中相 Nb/P/S(35%)Nb/P/S(53%)及图 1(b)中相 Nb(43%)Nb/S(38%)分别构成无腐蚀状态.

为合理判断可能存在的反应类型,需要制定一个无腐蚀元素原子百分比标准值. 利用权值计算公式(1)与折算后相对无腐蚀元素原子百分比公式(2)计算得腐蚀元素原子百分比标准值,即

$$\frac{w_j}{\sum_{j=0}^n w_j} \times 100\% = w_{j1}, \tag{1}$$

$$\sum_{j=0}^n w_{j1} \times f_j = F_{j1}. \tag{2}$$

式中 w_j 为样品像素百分比, n 为样品元素个数, w_{j1} 为折算后数据权值, f_j 为样品数据的各元素原子百分比, F_{j1} 为折算后各元素的原子百分比数据.

以图 1 (a) 为例, 将 Nb/P/S (35%) Nb/P/S (53%) 共 88% 的无腐蚀状态按照所占比例折算成 100% 无腐蚀状态后, 得到 Nb/P/S (35%) 中元素含量的权值为 0.4, Nb/P/S (53%) 中元素含量的权值为 0.6, 则加权各元素原子百分比为折算后相对无腐蚀元素原子百分比, 即无腐蚀元素原子百分比标准值, 见表 1.

表 1 折算后相对无腐蚀区域原子百分比
Tab.1 Atomic percentage in the corrosive area after conversion

元素	C	N	O	Na	Nb
原子百分比/%	60.28	6.91	16.31	0.20	3.14
元素	Cl	Ag	Al	Cr	Au
原子百分比/%	0.08	0.51	0	0.03	11.21

1.3 化合物存在分析

折算后值为无腐蚀元素原子百分比参考(表 1), 利用折算后与原数据对比分析可能存在的化合物.

密封式继电器中区域元素分析, 存在 4 组数据中 Cl 与 Ag 成对出现, 其余部分数据约为 0, 且原子百分比近似为 1 : 1, 见表 2. 特定区域内极有可能产生 AgCl 化合物, 即

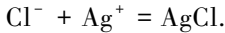


表 2 部分相的 Ag、Cl 原子百分比
Tab.2 Ag/Cl atomic percentage data for some phases

元素	相的原子百分比/%					
	Ag/Cl	Ag/Nb/Cl	Ag/Cl/C/Nb/O	Cr/Ni/O/C/Al	C/O/Nb/Na	C/O/Na
Cl	14.21	3.75	5.33	1.37	0.14	0.07
Ag	11.98	3.59	4.86	1.23	0.09	0.06

由原子百分比差值分析,在 C/O/Nb/Na/S (2%),C/O/Na(1%),C\Na\O\Nb(1%)等共 5 组数据中,N、C、Na 元素含量异常.考虑到 N 和 C 元素是变价元素,利用原子百分比,见表 3,推断可能存在的化合物,并结合 XPS 价态分析,如图 2 所示,确定元素 N 和 C 的价态,进一步推断可能出现的反应类型.

表 3 部分相的 C、N、O、Na 原子百分比

Tab.3 C/N/O/Na atomic percentage data for some phases

元素	相的原子百分比%					
	C/O/Nb/ Na	C/O/ Na	O/C/ Na/Al	Nb/C/ O/Na/S	C/Na/ O/Nb	C/O/ Na/Nb
C	64.99	53.80	62.67	59.33	52.93	64.99
N	0.44	10.57	10.42	9.71	7.37	0.44
O	19.38	31.90	24.24	27.04	33.91	19.38
Na	1.79	2.34	1.87	0.97	4.87	1.79

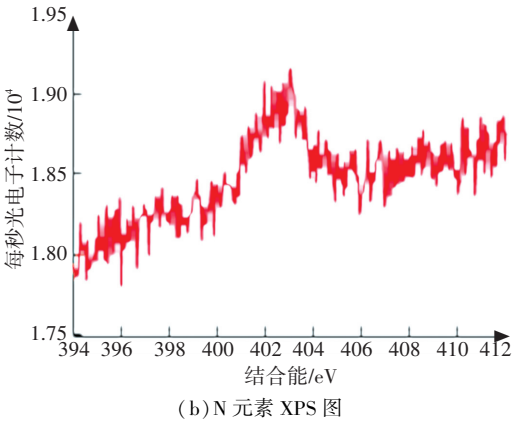
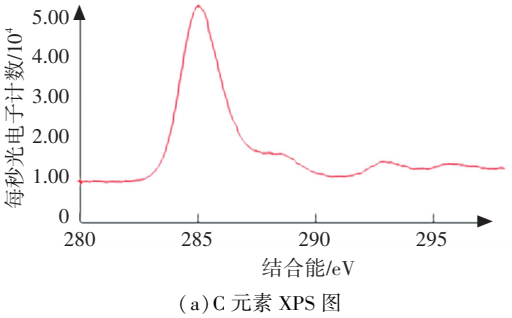


图 2 密封式继电器 C、N 元素 XPS 图

Fig.2 C,N element XPS diagram of sealed relay

由图 2(a)对比 NIST 数据,价态分析得出存在大量结合能为 285.18 eV 的单质 C 以及少量结合能为 289.4 eV 的+4 价 C 元素,可能出现的化合物为 Na_2CO_3 . 由图 2(b)价态分析得到结合能为 403.8 eV 的 N 为+3 价,可能出现的化合物为 NaNO_2 .

Nb/C/O/S/P (5%) 中除氧原子百分比突增 (51.08),其他各项指标均在正常,仅存在 $\text{O}_2 \rightarrow \text{O}^{2-}$ 的反应.

对单一价态元素如 Cl,可从原子比推断其发生

反应类型;多价态元素如 N,则需采用 XPS 能谱仪分析元素化合价进而确定反应类型. 本文选取 Cl 元素作为研究对象,进一步研究反应类型与腐蚀形貌之间的关联性.

2 腐蚀形貌的获取

密封式继电器面扫图是一个灰色图像,本文选取了图中 11 个 65 像素×55 像素点区域作为研究对象,其中 3 个作为验证对象,验证腐蚀形貌特征与腐蚀类型的关联性,如图 3 所示,黑色方框为所选择区域,红色方框为验证区域.

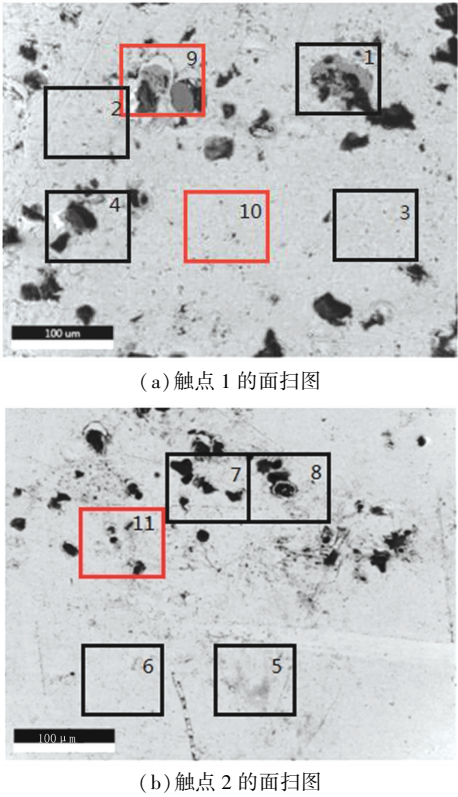


图 3 密封式继电器的面扫图

Fig.3 Surface scan of sealed relay

结合图 1 得到 C、S、O 等元素对于同一区域分布无较大差异,Cl 分布相对集中,选取 Cl 元素作为切入点,探讨其腐蚀形貌特征与腐蚀类型的对应关系. Cl 元素分布与区域形貌对应图如图 4 所示.

研究密封式继电器腐蚀形貌特征与反应类型的关联性需要精确提取到各反应类型对应形貌特征值. 为得到精确非规则的腐蚀区域需要将无腐蚀区域排除,采用方法为图像二值化与 8-邻域算法提取轮廓区域,并灰度还原腐蚀形貌.

2.1 提取腐蚀区域轮廓

根据上文分析的可能反应类型,采用元素分布图提取其不规则边缘轮廓才能将无腐蚀部分排除. 精确提取腐蚀区域的形貌特征必须将元素分布图进行二值化处理.

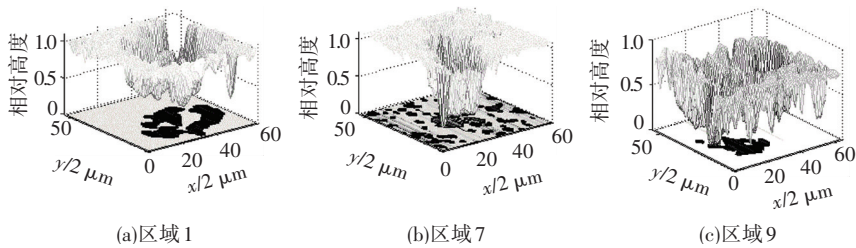


图 4 触点 C1 元素集中区域的形貌对应图

Fig.4 Topographic map of the concentrated area of contact element C1

将密封式继电器的元素分布图进行灰度处理, 得到灰度图像. 此时腐蚀区域内部的灰度值具有一致性, 而两种区域的交界处具有灰度阶跃^[9]. 若腐蚀图像中, 腐蚀区域和材料基体的灰度阈值为 (T_1, T_2) , $g(i, j)$ 为图像中位置为 (i, j) 处的像素点的灰度值^[6]. 则在二值化图像中, $g(i, j)$ 为

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, & T_1 < g(i, j) < T_2; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3)$$

由于二值化后的元素分布图为二维函数, 边缘检测的目的即是检测其二维腐蚀区域边缘^[6]. 对于一个分割好的二值腐蚀图像 $g(x, y)$, 如图 5 所示.

$(x-1, y-1)$	$(x, y-1)$	$(x+1, y-1)$
$(x-1, y)$	(x, y)	$(x+1, y)$
$(x-1, y+1)$	$(x, y+1)$	$(x+1, y+1)$

图 5 对应图像像素点的 8-邻域

Fig.5 8-neighborhood corresponding to image pixel points

元素分布图存在单独像素点, 对应的形貌只是一个单独的值而不具备形貌分析价值. 利用 MATLAB 的 ‘bwmorph’ 函数可以提取二值图像的不规则轮廓. 在 ‘bwmorph’ 函数中采用 ‘thin’ 操作, 可以减薄目标成线, 没有孔洞的目标缩成最低限度的连通边, 有孔洞的目标缩成连通环; 再采用 ‘Majority’ 操作, 即如果该像素的 8-邻域中至少有 5 个像素为 1 则该像素置 1, 否则将该像素置 0. 通过这两步可以将单独像素点忽略, 得到所需腐蚀区域不规则轮廓.

在图像二值化后, 采用 8-邻域的二值特征提取算法, 提取选取区域腐蚀部分轮廓, 可以将无腐蚀区域排除. 使下一步还原腐蚀形貌并提取特征值更加可靠.

2.2 灰度还原腐蚀区域形貌

密封式继电器面扫图实质上是一个连续的二维函数^[9], 该函数被离散为 $M \times N$ 的矩阵, 表示为 $f_{i,j} = [f(i, 0), \dots, f(i, j), \dots, f(i, N-1)]^T$. (4) 式中 $f(i, j)$ 为矩阵中位置为 (i, j) 处像素点的灰度值, $i = 0, 1, \dots, M-1, j = 0, 1, \dots, N-1$.

该矩阵的每一个像素点的灰度值通常在 0~255

之间, 即共 256 个灰度级^[9-10]. 由于三维数据为灰度矩阵所得, 归一化处理可以将数据无量纲化, 增加数据可比性并方便提取其形貌特征值. 归一化处理公式表示为

$$p(i, j) = \frac{f(i, j) - \min |f(i, j)|}{\max |f(i, j)| - \min |f(i, j)|}. \quad (5)$$

本文中利用 MATLAB 将密封式继电器触点面扫图进行灰度处理, 得到灰度矩阵, 在选定研究区域矩阵中, 根据选取区域腐蚀部分轮廓, 排除无腐蚀部分数据, 从而还原得到腐蚀区域三维形貌图, 如图 6~8 所示.

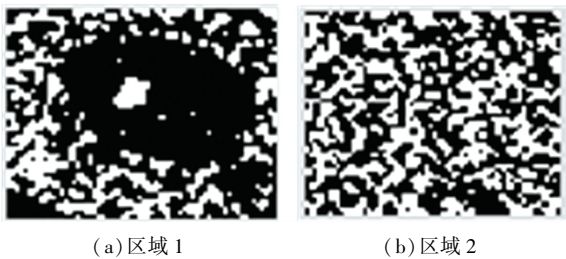


图 6 区域二值图

Fig.6 Binary graph of regions

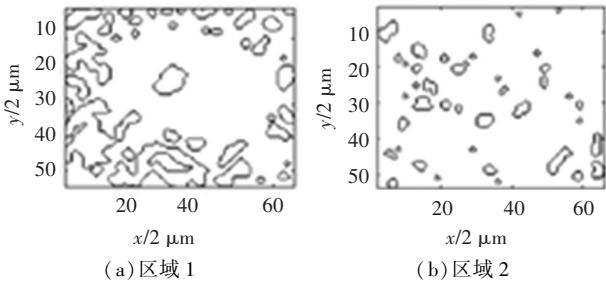


图 7 区域轮廓图

Fig.7 Contour map of regions

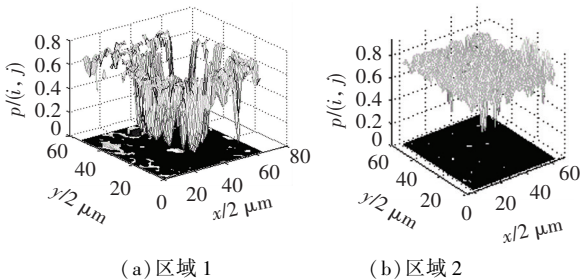


图 8 区域三维图

Fig.8 3D map of regions

3 腐蚀区域形貌特征提取

数字化的腐蚀图像中蕴含着大量的腐蚀信息. 根据腐蚀图像的特征值, 计算机可以进行智能化的分类和诊断, 腐蚀图像特征值对于描述腐蚀类型具有重要意义^[11].

经过图像处理, 根据腐蚀图像中像素点的灰度值, 能够提取灰度腐蚀图像的统计特征值, 本文选取灰度共生矩阵的 4 个典型纹理特征值对比度 (Contrast)、相关性 (Correlation)、二阶矩 (Angular Second Moment) 以及逆差距 (Homogeneity) 进行分析研究.

对比度返回整幅图像中某个像素与它的邻居之间的反差. 常量组成的图像的对比度 Con 是 0. 则第 k 区域的 Con 计算公式为

$$\text{Con}(k) = \sum_{i,j} |i - j|^2 p(i,j). \tag{6}$$

相关度反应整幅图像中某个像素与它的邻居之间的互相关性. 取值为 $[-1, 1]$. 相关度 1 和 -1 分别对应完全正相关和完全负相关^[8]. Corr 公式为

$$\text{Corr}(k) = \sum_{i,j} \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)p(i,j)}{\sigma_i \sigma_j}. \tag{7}$$

二阶矩用于衡量图像纹理的灰度变化稳定程度. 取值为 $[0, 1]$. 常量组成的图像的二阶矩 Asm 是 1.

$$\text{Asm}(k) = \sum_{i,j} p(i,j)^2. \tag{8}$$

逆差距反映了矩阵中元素相对于矩阵对角线的分布的紧密度. 逆差距 Hom 取值为 $[0, 1]$.

$$\text{Hom}(k) = \sum_{i,j} \frac{p(i,j)}{1 + |i - j|}. \tag{9}$$

本文选取 Cl 元素作为研究对象, 区域 4、8、11 为无氯腐蚀, 区域 1、7、9 为含氯腐蚀, 区域 2、3、5、6、10 为无腐蚀. 其中区域 9、10、11 进行形貌特征与腐蚀类型的关联性验证. 腐蚀图像提取的特征值见表 4.

表 4 选择区域的形貌特征值

Tab.4 Topographic characteristic value of the optional region

区域编号	对比度	相关度	二阶矩	逆差距
1	0.406 9	0.936 4	0.131 7	0.841 2
2	0.221 7	0.566 5	0.473	0.893 9
3	0.115 1	0.441 1	0.732 3	0.945 1
4	0.396 4	0.937 3	0.247 3	0.851 5
5	0.309 5	0.881 5	0.379 2	0.880 9
6	0.087 9	0.357 8	0.792 3	0.956 7
7	0.688 7	0.928 9	0.166 5	0.809 3
8	0.475 0	0.936 0	0.207 6	0.837 3
9	0.627 5	0.889 7	0.096 7	0.786 0
10	0.148 1	0.500 0	0.711 6	0.934 8
11	0.429 3	0.848 3	0.335 9	0.855 3

4 触点形貌特征与腐蚀类型的关联性研究

为了深入研究触点形貌特征与腐蚀类型对应关系, 需要处理具有多个变量或影响因素的腐蚀形貌数据^[12-13]. BP 网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络, 能学习和存贮大量的输入输出模式映射关系, 并通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值, 使网络的误差平方和最小, 根据误差函数的负梯度力向, 使用最速下降法得到修改的权重^[14-15].

本文建立起一个 4 进 3 出 BP 神经网络分类系统, 以 4 个腐蚀形貌特征值为输入, 腐蚀类型为输出. 其训练结果准确率达到 97.5%, 保存训练模式, 运用此模式进行验证区域 9、10、11 的腐蚀类型判别, 见表 5.

表 5 验证区域腐蚀类型理论结果与实际输出结果对比表
Tab.5 Comparison table between the theoretical results and the actual output results of the verified regional corrosion types

理论结果			实际输出结果		
无氯 腐蚀	含氯 腐蚀	无腐蚀	无氯腐蚀	含氯腐蚀	无腐蚀
0	1	0	7.243 4×10 ⁻⁶	1.000 0	1.189 2×10 ⁻¹¹
0	0	1	4.696 5×10 ⁻⁹	9.062 2×10 ⁻⁹	1.000 0
1	0	0	1.000 0	9.672 3×10 ⁻¹⁰	2.715 1×10 ⁻⁶

注: 1 表示存在, 0 表示无.

利用 BP 神经网络检验了 3 个区域对应的腐蚀类型, 得到验证结果与分析结果对应, 即密封式继电器腐蚀形貌特征与腐蚀类型的映射关系建立成功. 同时表明即使多种腐蚀反应共同作用, 也会显示出每种反应的本身腐蚀形貌特征.

使用密封式继电器触点 DEAX SEM 图结合 XPS 分析可能产生腐蚀类型并还原三维形貌, 在建立两者联系的同时, 可以预测判断区域形貌对应的腐蚀类型.

密封式继电器触点表面存在腐蚀、接触表面粗糙等原因, 触点实际上可以看作是无数微触点并联组成的接触区. 触点腐蚀程度 P 计算公式为

$$P = \frac{A_p}{A_t}. \tag{10}$$

式中 A_p 为腐蚀总面积, A_t 为区域总面积.

触点表面腐蚀不均匀, 导致形貌特征变化明显, 则电流线收缩程度大, 载流能力降低, 且由于腐蚀, 触头表面产生污染层, 膜电阻增加, 缩减继电器使用寿命, 影响可靠性. 研究元素腐蚀形貌与其腐蚀类型的关系, 对分析触点接触性能的变化具有参考

价值.

5 结 论

- 1)分析密封式继电器触点元素分布图及原子百分比表,得到 Ag 与 Cl 成对出现,原子百分比近似为 1 : 1,特定区域内极有可能产生 AgCl 化合物.
- 2)采用图像二值化和 8-邻域法获得腐蚀轮廓,解决腐蚀区域不规则的问题,降低了非腐蚀区域数据对腐蚀形貌特征值提取的影响.
- 3)利用 BP 神经网络算法进行区域腐蚀类型的分类判断,得到了两者的映射关系,表明在多种腐蚀反应共同作用中,每种反应的本身腐蚀形貌特征依旧存在. 同时提供了一种探究腐蚀类型与腐蚀形貌特征关系的方法.

参考文献

[1] 陆俭国,骆燕燕,李文华,等.航天继电器贮存寿命试验及失效分析[J].电工技术学报, 2009, 24(2):54
LUJianguo, LUO Yanyan, LI Wenhua, et al.Storage life test and failure analysis of aerospace relays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009, 24(2):54

[2] 张玮. 金属腐蚀形貌特征提取用于腐蚀诊断的研究[D].大连:大连理工大学,2004
ZHANG Wei. Metal corrosion morphology feature extraction for corrosion diagnosis [D].Dalian:Dalian University of Technology, 2004

[3] 化学工业部化工机械研究院.腐蚀与防护手册·腐蚀理论·试验及监测[M].北京:化学工业出版社,1993:303
Institute of ChemicalIndustry, Ministry of chemical industry · corrosion and protection handbook · corrosion theory · testing and monitoring [M].Beijing:Chemical Industry Press, 1993:303

[4] 唐聿明,郑晓梅.金属腐蚀图库的设计和实现[J].中国腐蚀与防护学报,1999,19(1):60
TANG Yuming, ZHENG Xiaomei. Design and establishment of a metal corrosion image database [J].Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,1999,19(1):60

[5] FELIU S,Jr, MAFFIOTTE C, SAMANIEGO A, et al.Effect of the

chemistry and structure of the native oxide surface film on the corrosion properties of commercial AZ31 and AZ61 alloys [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(20):8558

[6] IZQUIERDO J,JOSES J,GONZALEZ S,et al. Uses of scanning electrochemical microscopy for the characterization of thin inhibitor films on reactive metals: the protection of copper surfaces by benzotriazole [J]. Electro, 2010, 55(28):8791

[7] 纪钢,韩逢庆,张伦武,等.材料腐蚀特征的图像模式识别处理[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2002, 25(2):312
JIGang ,HAN Fengqing ,ZHANG Lunwu , et al. Model recognition of the corrosion image of materials[J].Journal of Hefei University of Technology(Natural Science) , 2002, 25(2):312

[8] MYRZAKVA.Comparison of the corrosion properties of bulk copper samples and an electrodeposited copper nanowire array in a pyrophosphate electrolyte[J].Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2013,49(6): 457

[9] MARTENS R, PECHT M. Effects and interactions of design parameters for gold-plated electriccontacts [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2000, 11(3):209

[10]SFIKAS G, NIKOU C, GALATSANOS N, et al. Spatially varying mixtures incorporating line processes for image segmentation [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision,2010,36(2):91

[11]NIKOU C, GALATSANOS N, LIKASA C. A class-adaptive spatially variant mixture model for image segmentation[J].IEEE Transactions on Image Processing, 2007,16(4):1121

[12]XIONGTaisong, ZHANG Lei, YI Zhang. Robust *t*-distribution mixture modeling via spatially directional information[J]. Neural Computing & Applications, 2014, 24(6):1269

[13]杨周,刘盼学,王昊,等.应用 BP 神经网络分析电主轴频率可靠性灵敏度[J].哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1):30
YANG Zhou, LIUPanxue, WANG Hao ,et al. Frequency reliability-based sensitivity analysis of motorized spindle by BP neural networks [J].Journal of Harbin Institute of Technology, 2017,49(1):30

[14]XIONGJun, HE Junjia,ZANG Chunyan. Dynamic analysis of contact bounce of aerospace relay based on finite difference method [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(3): 262

[15]GAOHongliang, ZHANG Hui, WANG Shujuan. Research on auto-detection for remainder particles of aerospace relay based on wavelet analysis[J].Chinese Journal of Aeronautics, 2007,20(1):75

(编辑 魏希柱)