

一种跟踪接触电阻变化趋势的测量装置

石颀,施海宁,姚建林,涂丰盛

(苏州热工研究院有限公司,江苏 苏州 215004)

摘要:应用智能型多功能数/模和模/数转换单元、电压跟随单元、取样单元以及可调电压信号放大单元,通过 USB 接口与计算机的数据交换并配合编程软件,实现了自动跟踪接触电阻随电流增大的变化趋势。

关键词:接触电阻;微电流;数/模、模/数转换单元;数据交换;触点老化状态

中图分类号:TM501+.3

文献标识码:A

An equipment for following the trend of contact resistor

SHI Jie, SHI Hai Ning, YAO Jian Lin, TU Feng Sheng

(Suzhou Nuclear Power Institution, Suzhou 215004, China)

Abstract: An equipment which is made up of an intelligent multi-function D/A, A/D convertor, voltage follower, sampling unit, voltage amplify selector, connected with computer by USB interface, cooperated with LabView software, and for searching the law that the trend of contact resistance follows the changed current was developed.

Key words: contact resistance; micro-current; D/A and A/D convertor; data exchange; contact ageing

小容量触点(继电器、仪控开关、接触器辅助触点等低压电气设备的触点)一般应用于电力、机械等工业部门的各种控制系统中,其一旦失效可能导致严重后果,所以小容量触点的可靠性问题一直受到学术界的重视。对小容量触点来说,其主要失效模式为接触电阻过大或接触不稳定。接触电阻直接反映触点接触的可靠性。在研究触点可靠性的过程中,一般都要对接触电阻进行监测,这是触点可靠性研究中的重要环节。

当电流通过接触件时所呈现的电阻称为接触电阻。目前,对接触电阻的研究已经较为完善,且已有大量的文献可参考,如参考文献[1-4]。接触电阻的测量方法有很多种,包括电桥法、伏安法等。随着科技的发展,很多新型的接触电阻测量方法与测量装置被提出^[5-9]。然而这些测量方法均是在给定电压或电流的条件下测量接触电阻,得到一个静态的接触电阻值。而实际上,在不同的电流条件下,接触件呈现出来的接触电阻是不同的。

为了克服现有方法的不足,文章提出一种新的测量接触电阻的方法并开发了相应的测量装置。

1 接触电阻的组成

无论两导体的接触表面经过怎样的精细加工,其在微观上总是凹凸不平的。在显微镜下观察接触件的表面,尽管

镀金层十分光滑,但仍能观察到 5 mm~10 mm 的凸起部分,如图 1 所示。

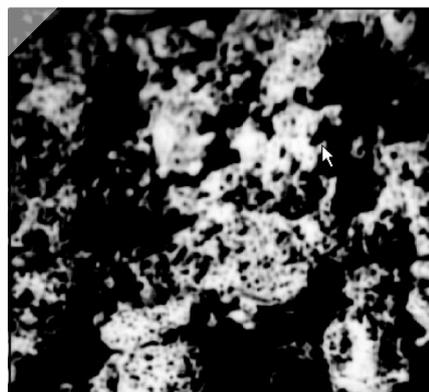


图 1 触点系统接触面微观示意图

由于任何金属都有返回原氧化物状态的倾向,在大气中不存在真正洁净的金属表面,即使很洁净的金属表面,一旦暴露在大气中,便会很快生成几微米的初期氧化膜层。此外,大气中的尘埃等也会在接触件表面形成沉积膜。因而,从微观分析任何接触面都是一个污染面,所以在接触斑点接触区域内,真正能够传导电流的区域只是那些金属直接接触或金属与导电的表面膜接触的区域,这些区域称为导电斑点。名义接触面 A_s 、接触斑点 A_f 与导电斑点 A 的关系

应用奇葩 Example of Application

如图 2 所示。

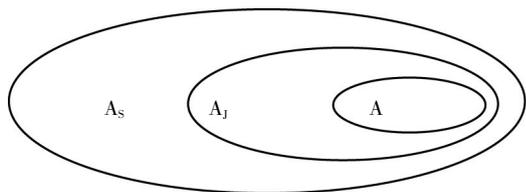


图 2 名义接触面 A_s 、接触斑点 A_j 与导电斑点 A 的关系

真正的接触电阻应由以下几部分组成：

(1) 收缩电阻特性

电流流经接触面时，收缩于导电斑点处，如图 3 所示。由于电流线收缩显示出来的电阻，将其称为收缩电阻。收缩电阻除与触点材料本身的性能和生产工艺有关外，还与触点负载种类、大小有关。随着负载电流的增大，温度随之增高，收缩电阻也逐渐增大。当达到再结晶温度时，收缩电阻便显著减小；温度再继续增高，收缩电阻再次显现增加的趋势。当达到触点材料的熔融温度时，触点金属熔接在一起，收缩电阻便急速降低。

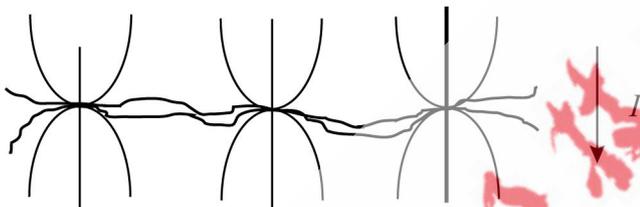


图 3 电流收缩示意图

(2) 膜电阻特性

由于接触表面膜层及其他污染物所构成的膜层电阻，如图 4 所示。从接触表面状态分析，表面污染膜可分为较坚实的薄膜层和较松散的杂质污染层。故也可把膜层电阻称为界面电阻。根据其形成的时间和原因或化学成分，表面膜可分为以下几类：

- ① 表面杂质：如嵌入触点表面的磨料粉粒、成型模具粉粒、其他金属粉等；
- ② 微粒状污秽杂质，如粉尘颗粒、塑料微粒等；
- ③ 无机化学膜，这种膜大多是连续的，如氧化物、硫化物、氯化物等；
- ④ 电化学过程与表面吸附水膜作用引起腐蚀，如触点受手汗作用变暗；
- ⑤ 含有机成分的表面膜，通常是吸收周围环境中的有机蒸气而形成的；
- ⑥ 碳膜，由于焦耳热作用使触点表面或空气中的有机物碳化。



图 4 表面膜电阻示意图

实际上接触电阻在电流很小时，由于膜层不易击穿，会呈现高阻状态。膜层厚度不同，其导电机理不同，因而所显示的膜电阻也必然不同。

在膜层较薄时(0.5 nm~2 nm)，一般隧道电流是主要的，这时膜层电阻可表示为：

$$R_f = \frac{\sigma}{\pi a} \quad (1)$$

其中， πa^2 为接触总面积； σ 为膜层的隧道电阻率，它是金属逸出功及膜层厚度的函数，如图 5 所示。

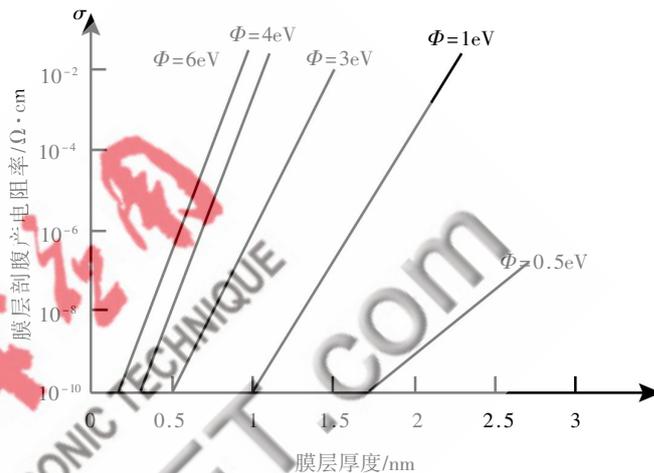


图 5 膜层厚度与隧道电阻率的关系

而膜层较厚时(2 nm~5 nm)，隧道效应也逐渐减弱，热发射电子流则是主要的，热发射电子流与电压和温度之间的关系可表示如下：

$$I_s = AT^2 S_j \exp(-\varphi/kT) \cdot \exp[(e^3/\epsilon d)^{1/2} \cdot V^{1/2}/kT] \quad (2)$$

其中， A 为系数 ($120 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}$)， S_j 为接触面积， ϵ 为膜层介电常数， φ 为膜层势垒高度， T 为触点温度， V 为对触点所施加的电压， k 为玻尔兹曼常数， e 为电子的电荷量。可见随着触点温度的升高，热发射电子流随之增大，又进一步加热接触部位，最后达到金属熔点，膜层破裂，使接触部位像洁净金属表面接触一样。

当膜厚大于 5 nm 以后，发射电子效应便会逐渐减弱，膜层的固有电阻随之增加。这时膜层的导电是半导体性质，其导电机理主要靠齐纳效应。

当电流很小时，膜层不易被击穿，此时呈现高阻状态；电流较大时，膜层被击穿，显出常态的接触电阻。触点老化程度越明显，膜层越厚越不易被击穿，当正常工作电流不足以使膜层被击穿时，即出现触点接触不良现象。

2 测量设备工作原理

针对现有方法的不足，本文提出了一种微电流接触电阻变化趋势跟踪仪，该设备包括与被测触点相串联的标准电阻以及图 6 所示的单元。

图 6 中各部分功能分别如下。

取样单元：与所述的标准电阻相连接，用于对标准电阻

应用奇葩

Example of Application

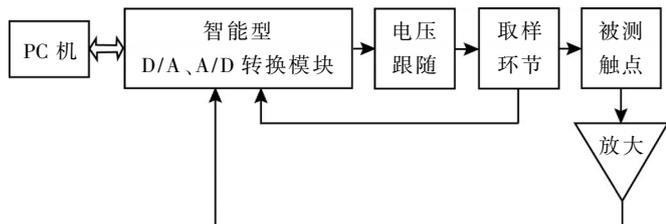


图6 测量装置实现原理示意图

两端的电压进行取样。

信号放大单元:与被测触点相连接,用于将被测触点两端的接触电压信号进行放大,信号放大单元具有多个可调节放大倍数的档位。

智能型 D/A、A/D 转换模块:输入端分别与取样单元的输出和信号放大单元的输出相连接,其中的 A/D 转换单元用于将取样单元输出的取样电压信号和信号放大单元输出的接触电压信号转换为数字信号,由计算机对该数字信号进行运算处理得到接触电阻的阻值,并输出用于控制测量回路中的变化微电流的电压数字信号;D/A 转换单元将计算机输出的电压数字信号转换为电压模拟信号。

电压跟随单元:电压跟随单元的输入信号为智能型 D/A、A/D 转换模块输出的电压模拟信号,其输出电压信号作为取样单元的输入信号形成闭合回路。电压跟随单元用于在保持其输出电压与输入电压相等的情况下增强输出电流的驱动能力。

PC 机:通过计算机程序,实现 PID 控制回路,控制计算机输出的电压数字信号,从而精确地产生测量回路的可控微电流。

3 接触电阻测量

应用 USB 总线供电的智能型 D/A、A/D 转换模块和辅助电路配合,应用 LabView 编程软件,组成触点接触电阻自动测量装置。该装置在软件控制下,有序地控制输出电压,并即时显示电流、电压、电阻值及其变化曲线,这种方法操作简单、直观易懂、可自动存储、功能强大,测试电路如图 7 所示。

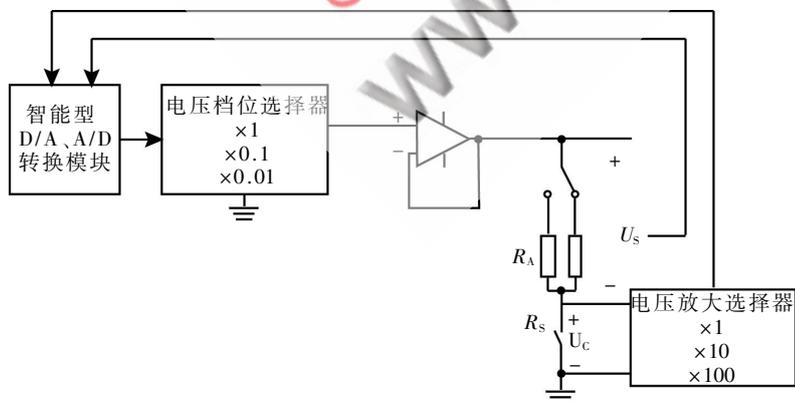


图7 测量装置的电路原理图

在图7的测试电路中,RS为取样电阻,Us为取样电压,取样电阻由2个可切换的不同阻值的电阻构成,用以保证

《微型机与应用》2009年第22期

足够的测量范围;电压挡位选择器的功能是确保能够提供足够低的接触电压;电压放大选择器是为保证微伏级电压Uc的精度,再应用欧姆定律计算接触电阻 $R_c=U_c/I_c$;运算放大器接成电压跟随器,可提高电流驱动力,从而实现宽电压、宽电流范围的测量。

测量步骤如下:

- (1)将测试电路连接好;
- (2)设定测量点的时间间隔及电压增量;
- (3)启动测试软件可自动完成测试,并保存测量数据。

按照以上步骤,分别针对失效样品及良品触点进行测试,结果如表1、表2所列,接触电阻的变化趋势如图8、图9所示。可见失效样品触点接触电阻随电流的增大稳定性逐渐减小,最终保持在180mΩ左右,属接触不良;而良品触点接触电阻随电流的变化很快趋于稳定,保持在12mΩ左右。

表1 失效品触点接触电阻测量结果

电流/mA	0.029 35	0.065 13	0.102 40
接触电阻/mΩ	210.6 04	142.380	180.717
电流/mA	0.264 87	0.62561	1.168 20
接触电阻/mΩ	186.7 18	188.421	188.760
电流/mA	2.073 01	2.43523	2.976 33
接触电阻/mΩ	188.623	187.548	190.671

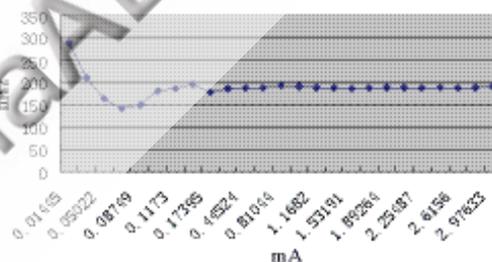


图8 失效品触点接触电阻的变化趋势

表2 良品触点接触电阻测量结果

电流/mA	0.012 96	0.050 22	0.105 4
接触电阻/mΩ	112.831 5	76.515 8	36.467 8
电流/mA	0.269 35	0.449 71	0.718 025
接触电阻/mΩ	38.460 3	20.620 0	24.258 7
电流/mA	1.627 31	2.530 632	3.256 569
接触电阻/mΩ	23.050 5	22.332 8	24.858 1

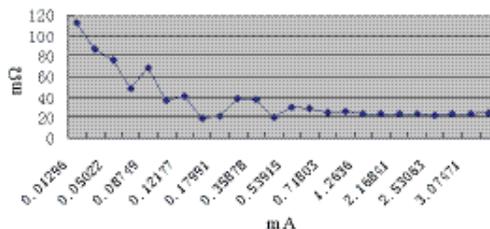


图9 良品触点接触电阻的变化趋势

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 71

应用奇葩

Example of Application

根据上述测量结果可以得出这样的结论:

(1)接触电阻不是定值,随着电流的增大,接触电阻逐渐减小并趋于稳定;

(2)当流过触点的电流很小时,接触电阻呈现较大的阻值。

上文介绍的接触电阻自动测量装置可与 PC 机相结合,在软件控制下能够精确而有序地输出各种电流,同时还能够自动测量不同电流下的接触电阻值,并能通过图表显示并保存。与现有技术相比,它不仅能够实现在 $10\mu\text{A}$ 的微小电流下测量接触电阻,有利于精确地判断触点老化状态,还能够随电流在 $10\mu\text{A}\sim 1\text{A}$ 的较大范围内跟踪接触电阻的变化趋势,有利于判断不同触点的适用场合及在特定场合下正确地进行设备选型。

通过对触点的接触电阻进行测量,得到了接触电阻随电流增大的变化趋势。当负载电流较小时,膜层电阻不易被击穿,此时呈现高阻特性;负载电流增大到足以击穿膜层时,触点呈现出正常使用条件下的接触电阻。这是低电平、微电流条件下易出现触点接触不良的原因之一。

参考文献

- [1] 张海泉. 接触电阻的分析研究[J]. 商丘师范学院学报, 2004, 20(5): 40-43.
- [2] 林晶. 接触电阻数学模型研究[J]. 电工技术学报, 1995, 10(4): 60-64.
- [3] 姚文华. 电触点材料接触电阻分析[J]. 电工材料, 2005, 33(3): 22-25.
- [4] THOMAS T R. Rough surfaces[M]. Longman London, 1982.
- [5] 刘民. 一种测量接触电阻的新方法[J]. 宇航计测技术, 2005, 25(3): 22-26.
- [6] 孙红伟, 张明高. 接触电阻的准确测量[J]. 实用测试技术, 1999, 25(5): 14-16.
- [7] 李奎, 李志刚, 陆俭国. 接触电阻新型测量方法的研究[J]. 电气开关, 1997, 35(6): 26-29.
- [8] 熊经先. 电触点材料接触电阻的测量方法 [J]. 电工材料, 2006, 32(7): 45-46.
- [9] 卢邦洪. 贵金属材料的接触电阻及测量装置[J]. 贵金属, 1995, 16(1): 30-33.