

变电站端子箱电缆屏蔽线的材质识别与修复方法

变电站端子箱用于接地的电缆屏蔽线本应为纯铜材质，但在施工实践中却常因种种原因错用为黄铜或铜包铝材质，而导致发生快速的腐蚀断裂。因而全面排查存在施工用材隐患的端子箱内的电缆屏蔽线材质，并通过采用新型功能性接头修复错用材质屏蔽线的接地端，防止其腐蚀破坏具有重要意义。采用颜色判定材质的新思路，基于RGB色彩识别原理编制了屏蔽线材质识别软件，配合采用工业内窥镜放大技术，便捷准确地判定了屏蔽线的材质归属类别。最后通过实验研究提出了利用热缩带包覆裸露屏蔽线与纯铜护套接地线接头，并采用专用控温模具快速加热此封闭接头的高效修复新方法。

张洲全¹ 万 畅² 高美玲¹ 刘 专¹ 肖文凯³ 阮学锋³ / 1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院 2. 国网江西省电力有限公司南昌供电分公司 3. 武汉大学动力与机械学院

0 引言

在电力系统中，电缆屏蔽线是一种通过将信号线采用电导布、网状编织导线包裹起来的传输线^[1]，可以屏蔽外界干扰源对传输信号产生干扰，以及线内各对线缆之间的串扰，同时降低传输信号的损耗。端子箱屏蔽线用于变电站信号电缆和控制电缆电磁屏蔽。电力施工规范《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》（修改版）及GB/T 9330.1—2008规定，变电站使用的二次电缆屏蔽层应由软圆纯铜线构成。但受利益驱动，市场上有厂商用耐蚀性差的铜包铝线或黄铜线来制作电缆屏蔽线，并供应给变电站施工单位，从而导致屏蔽线与接地端子之间的裸露部位发生严重的腐蚀。更加糟糕的情况下，二次回路的绝缘装置和保护装置中的电子元器件会被

直接破坏，使电网的安全运行受到严重的威胁^[2-5]。因此，检测电缆屏蔽线材质显得尤为迫切和必要。

通过调研排查发现，变电站电缆屏蔽线的使用种类分为三种：纯铜线、铜包铝线和黄铜线。纯铜线是符合要求的，根据美国UL安全标准，推荐使用10%铜层体积比的铜包铝线^[6-10]，但从目前我国的铜带质量和生产技术水平来看，很多企业生产的10%铜层体积比的铜包铝线往往出现表面铜层破裂、漏铝现象^[7-9]，质量控制存在一定困难，迟早会发生严重腐蚀直至断裂从而引发事故。排查发现，使用铜包铝屏蔽线是导致腐蚀缺陷发生的主要原因^[10]。2011年某变电站端子箱电缆屏蔽层材质为铜包铝，发生严重腐蚀损坏现象，如图1所示。



图1 变电站端子箱电缆屏蔽层发生严重腐蚀损坏

对于变电站电缆屏蔽线的检测，仪器和方法众多，例如电子显微镜的能谱、波普、光电子能谱、光谱和色谱等，这些都是通用的测成分方法，而辨别金属材质的主要方法包括金相法^[11]、光谱分析等。一方面，全面排查更换的工作量巨大，要求能在现场快速检测



张洲全/高级工程师

关键词/Keywords

电缆屏蔽线·
材质判别·
修复方法·

材质,但这些方法专业性比较强,且仪器精密度高,不适合户外作业。另一方面,由于屏蔽线很细,光洁度高,反光度大,使得纯铜线、铜包铝线和黄铜线用肉眼观察较难区分。为了能够让非专业人士快速、方便和准确地鉴定屏蔽线材质,避免使用不合格产品,本文介绍了一种基于RGB色彩识别原理的屏蔽线材质判别智能程序设计方案,并且提出了一套修复因使用了不合格屏蔽线导致控制电缆腐蚀失效的完整方法。

1 RGB与HSV色彩模型

依据德国物理学家赫姆霍兹(Helinholtz)的三原色理论可以知道,任何一种颜色都可以用红(R)、绿(G)和蓝(B)这三种基本颜色按照不同的比例混合得到。通常采用RGB颜色模型来对颜色信息进行数字化的采集和显示,如图2所示。在这个颜色模型中,3个轴分别代表R、G和B三原色。在RGB颜色空间内,任意色光F都可以用R、G和B三色不同的分量相加混合而成: $F=r[R]+g[G]+b[B]$ 。每一种颜色都有唯一的RGB值与其对应。

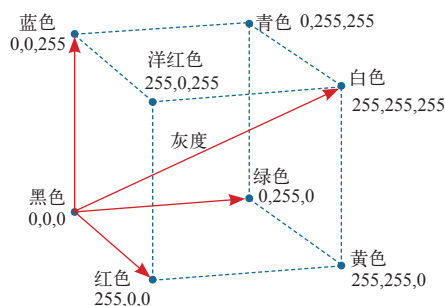


图2 RGB颜色空间

人眼能够直观感受的是光的色调(hue)、饱和度(saturation)和亮度(value),以这三要素来表征颜色的模型就是HSV颜色模型。以RGB颜色空间的对角线为中心轴线,将RGB空间沿对角线方向投影到一个过中心轴线中点的圆面上,就得到了圆锥形的HSV颜色空间,如图3所示。其中中心轴线即为光线的亮度轴V,颜色空间中的点投影到圆面上构成一个极坐标系。投影点的角坐标即为颜色的色调H,它反映了颜色R、G和B三基色

成分的配比。投影点的极轴长度即为颜色的饱和度S,极轴长度达到圆面的最大半径时,饱和度达到100%。根据坐标转换关系,HSV与RGB的关系由以下系列关系式转换

$$\begin{cases} \max = \max(R, G, B) \\ \min = \min(R, G, B) \\ R = \max, H = 60^\circ \times (G - B) / (\max - \min) \\ G = \max, H = 60^\circ \times [2 + (B - R) / (\max - \min)] \\ B = \max, H = 60^\circ \times [4 + (R - G) / (\max - \min)] \\ H < 0, H = H + 360^\circ \end{cases} \quad (1)$$

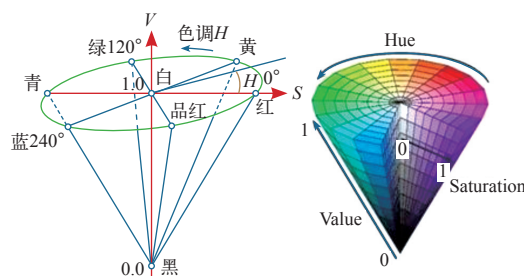


图3 HSV颜色空间

2 屏蔽线材质判别

纯铜在化学成分上为铜单质,生产实践中被称为紫铜,颜色为玫瑰红色;黄铜的化学成分为铜锌合金,颜色为淡金黄色;而铜包铝线为纯铜线和纯铝线的机械复合线,铜层为玫瑰红色,铝层显银灰色,且两者之间具有明显的颜色分层。所以这三类不同材质的屏蔽线在色调上具有差异,利用电子颜色传感器精确识别这些差异即可判别屏蔽线的材质。通过内置CMOS图像传感器且有放大功能的摄像头,即可将屏蔽线的真实彩色图像信号传输到计算机,并对图片中的颜色信息进行一系列的算法处理得到待测屏蔽线的色调值H,把所测色调值与纯铜和黄铜的理论色调值相比较,即可判别屏蔽线的材质,判别原理由下列关系式表达

$$D = |H_{\text{测}} - H_{\text{纯铜}}| - |H_{\text{测}} - H_{\text{黄铜}}| \quad (2)$$

若 $D > 0$,样品的色调与黄铜更相近,判定样品为黄铜;若 $D < 0$,样品的色调与纯铜更相近,判定样品为纯铜。

D的绝对值大小反映了样品在黄铜与纯铜之

间的区分度，绝对值越大，区分度越高，结果越准确。

值得注意的是，不同颜色和亮度的光源会对摄像图像中的RGB值产生影响，所以在进行判别前要对图像进行白平衡，即首先测量出基准光源的RGB光强值，再测量出在标准光源下物体所反映出的光强值，两者之比就是物体的反射（或透射）性质，即物体的实际颜色，算法用下列公式表示

$$\begin{cases} R = 255 \times \frac{P_{\text{物红}}}{P_{\text{源红}}} \\ G = 255 \times \frac{P_{\text{物绿}}}{P_{\text{源绿}}} \\ B = 255 \times \frac{P_{\text{物蓝}}}{P_{\text{源蓝}}} \end{cases} \quad (3)$$

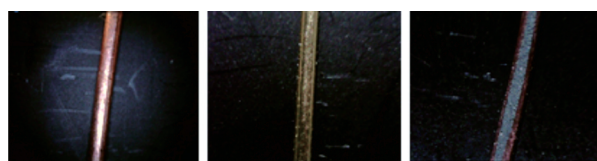
这样所测得的RGB值受到其他条件的影响就会降到最低。图4为采样装置图。图5为三种材质的屏蔽线经轻微打磨表面后，在不同的光源条件下获得的放大图像，统一以纯黑色为背底。通过算法将图像中的黑色背底和由于反光产生的光亮白色区域的像素点排除在外，得到三种材质屏蔽线的RGB直方图，如图6所示。



(a) 采样盒 (b) 采样板 (c) 采样装置配合图

图4 采样装置图

从图6a和图6b可以看出，纯铜线和黄铜线由



(a) 纯铜 (b) 黄铜 (c) 铜包铝

图5 三种材质的屏蔽线在不同的光源条件下获得的放大图像于具有单一的颜色，其R、G和B值均集中分布在一个小范围的区间，在直方图中表现出一个类似正态分布的波峰。而铜包铝线由于存在纯铜和纯铝表现出来的两种颜色，所以其R、G和B值分布区间范围更广，且在G和B的直方图中出现了两个峰，如图6c中的红色箭头所示。这一特征即可作为铜包铝线判定的标志性特征。通过统计方法得到图5中纯铜和黄铜的白平衡处理前后的R、G和B平均值，经过换算得到相应的色调H，最后同判别结果一并列于下表中。

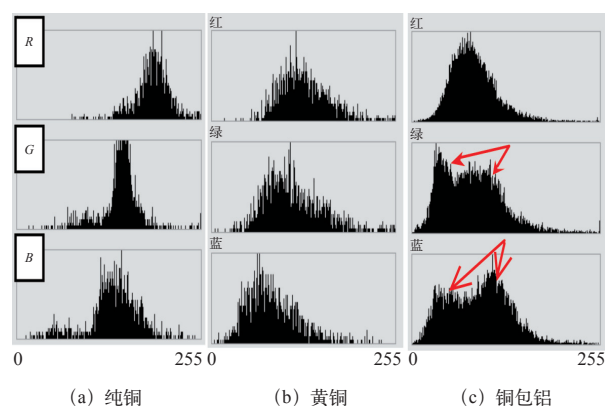


图6 三种材质屏蔽线的RGB直方图

通过下表所示的实验结果可知，未经白平衡处理的实测值也可以准确地判断屏蔽线的材质，但随着光源条件的变化，区分度的波动也很大。经过白平衡处理后，区分度比较稳定。

表 三种材质的屏蔽线判别结果

	R	G	B	H	D	判定
纯铜实测平均值	187.7	142.6	130.0	13.1	-23.9	样品为纯铜
纯铜白平衡后的平均值	178.1	139.0	108.5	26.3	-20.8	样品为纯铜
纯铜理论值	186	110	64	22.6	—	—
黄铜实测平均值	129.3	114.2	85.6	39.3	9.5	样品为黄铜
黄铜白平衡后的平均值	156.8	146.6	90	50.8	23.9	样品为黄铜
黄铜理论值	191	173	111	46.5	—	—

3 不合格材质屏蔽线电缆的接地修复方法

在用上述手段排查变电站屏蔽线材质的实践中，观察到凡使用了不合格材质的屏蔽线的接地端的裸露部分都会发生不同程度的腐蚀破坏，而非裸露段因为在控制电缆的塑料护套内则不会发生腐蚀。因此，为了杜绝隐患，必须对不合格的屏蔽线材质的控制电缆予以修复处理。显然，更换现有的控制电缆将耗费巨大成本，方法是用截面积 4 mm^2 的多股护套软铜线与电缆屏蔽线铰接形成接头，并对此裸露的接头处进行隔绝空气的包覆处理，然后再将护套软铜线与箱体（柜体）绝缘的接地铜排相连接地，这样便达到了对接地屏蔽线真正地长久隔绝外界腐蚀环境的防腐效果，如图7和图8所示。其中图7为变电站端子箱接地屏蔽线接头处包扎示意图。图8为专用自加热热缩带包扎模具模型图。将上述的多股护套软铜线与电缆屏蔽线铰接形成的裸露接头，用高分子热缩记忆带材施行了永久包覆封闭性的处理措施。高分子热缩记忆带材是一种双层材料，内层为热熔胶，外层为热缩材料，受热后会收缩紧紧将接头包裹，达到水汽进不去的效果，从而保证了接头不会受到腐蚀。但热缩带要发挥作用一是需要加热；二是在加热时需要缠绕固定，否则受热时会往外收缩变短而不是往内收缩。为了提高修复质量和效率，制作了专用修复模具解决此问题。如图9所示。该模具按所施工的电缆接头的直径大小设计制作，为半开式连接瓦结构。瓦上开有半圆的通槽，用铝热合金材料加工而成，通电加热，内置热电偶，外联控温控时装置。使用时外夹在包有热缩带的接头外面，打开控制器开关，便迅速升温至确定温度，保温数十秒后，热缩反应完成，即自动断电，打开铰链锁扣，修复完毕，温度时间控制精确，质量有保证。另外，为防止带材受热与瓦片加热模具相粘连不利脱模，还需在瓦片模具上涂覆聚四氟乙烯材料，即不粘锅涂层，该材料耐热 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而瓦片模具加热温度在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，故防粘功能不受影响，从而达到经久耐用的目的。端子箱接地屏蔽线接头处现场修复过

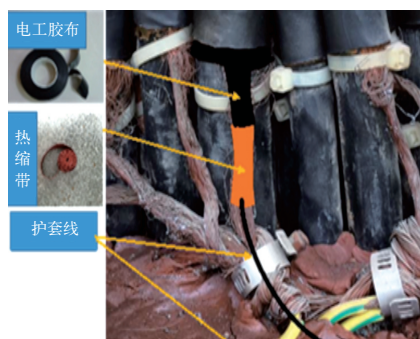


图7 变电站端子箱接地屏蔽线接头处包扎示意图



图8 专用自加热热缩带包扎模具模型图

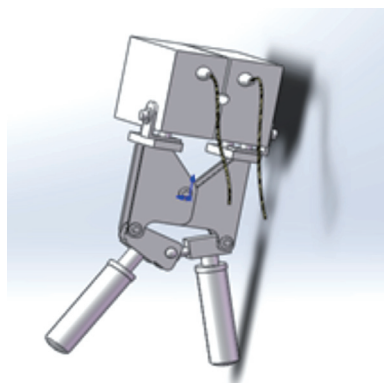


图9 专用修复模具

程如图10所示。

4 结束语

针对变电站端子箱接地屏蔽线腐蚀源头的材质检测，以及如何有效修复的问题，本文创新性地提出了一整套科学的解决方案。屏蔽线材质智能颜色识别方法和接地线接头热缩带包覆模具施工技术的开发，都是以简化变电站工作人员的维护工作为目的，为变电站经济、便捷地解决屏蔽线腐蚀断裂问题提供了有力可靠的新途径。

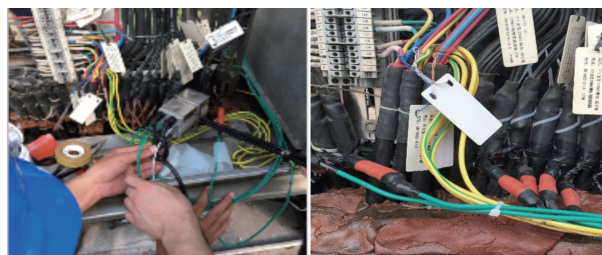
(a) 使用铜线连接后
喷涂导电保护液

(b) 接头处缠绕电工胶布



(c) 热缩带包裹聚四氟乙烯薄膜

(d) 加热模具连接预热



(e) 接头处热缩过程

(f) 修复完毕

图10 变电站端子箱接地屏蔽线接头处现场修复过程

参考文献

- [1] 胡杰, 袁丽. 变电站配电箱屏蔽线腐蚀原因分析[J]. 现代建筑电气, 2013 (1): 20-23.
- [2] 张洲全, 黎小秋, 涂湛, 等. 变电站端子箱铜包铝电缆屏蔽线的腐蚀现象、机理与防护措施[J]. 材料保护, 2015 (9): 63-65.
- [3] 唐毅. 探讨继电保护二次回路抗干扰措施[J]. 广东科技, 2012 (17): 85-86.
- [4] 宁小波. 220 kV以上变电站继电保护与自动装置的抗干扰措施探讨[J]. 硅谷, 2010 (23): 194.
- [5] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 吴云忠. 包覆拉拔法铜包铝, 铜包钢双金属导线的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [7] Wu Y Z, Ma Y Q, Zhan Y, et al. Microstructure and mechanical properties of copper clad aluminum wire by drawing at room temperature [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16 (12): 2066.
- [8] Ma Y Q, Wu Y Z, Gao H T, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Copper Clad Aluminium Wire by Drawing at Room Temperature [J]. Key Engineering Materials, 2007, 334: 317-320.
- [9] 王秋娜, 刘新华, 刘雪峰, 等. 冷拉拔铜包铝细丝的退火工艺与组织性能研究[J]. 材料工程, 2008 (7): 012.
- [10] 石鑫跃, 陈颖敏, 孙心利. 220 kV变电站铜材腐蚀原因分析与对策[J]. 全面腐蚀控制, 2011 (12): 16-19.
- [11] 刘叶. 用金相法检测铜包铝线的铜铝比例[J]. 中国质量技术监督, 2009 (4): 034.
- [12] 谢业琪. 色觉的形成与色觉三原学说示意图[J]. 沈阳体育学院学报, 1991 (3): 15-17.

(收稿日期: 2017-11-20) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告