

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2017.03.011

铝电缆镀铜电流密度的快速监测系统设计

焦贺彬¹, 王 桔²

(1. 河南工业和信息化职业学院 电气工程系 河南 焦作 454000; 2. 山东医学高等专科学校, 山东 临沂 276000)

摘要: 在铝电缆表面镀铜工艺中, 电流监测系统采用有线传输的方式, 监测速度较慢、实时性不高。设计了一种用于铝电缆镀铜电流密度的快速监测系统, 阐述了铝电缆电镀铜机理, 选用铝片进行实验, 利用测量镀层厚度和镀层耐腐蚀性评定方法, 进行电流密度对镀层耐蚀性的影响、电流密度与镀层厚度的关系实验, 确定电流密度的监测范围。在此基础上, 依据系统需求设计总体结构, 介绍了主控芯片、电流传感器电路和无线通信芯片, 最后进行了软件代码设计。结果表明, 所设计的监测系统精度高、监测速度快, 可有效利用资源。

关键词: 铝电缆; 镀铜; 电流密度; 监测

中图分类号: TP933.13 文献标识码: A

Design of Fast Monitoring System for Current Density of Copper Plating on Aluminum Cable

JIAO Hebin¹, WANG Jie²

(1. Henan College of Industry & Information Technology, Department of Electrical Engineering, Jiaozuo 454000, China; 2. Shandong Medical College, Linyi 276000, China)

Abstract: In the process of copper plating on the surface of aluminum cable, wired transmission mode is adopted in current monitoring system, the monitoring speed is slow and the real-time is not high. In this paper, a fast monitoring system for current density of copper plating on aluminum cable surface was designed, mechanism of the copper plating on aluminum cable surface was expounded. Influence of current density on coating corrosion resistance and the relationship between current density and coating thickness were investigated on aluminium sheet by testing coating thickness and using coating corrosion resistance evaluation. On this basis, the overall structure was designed according to the system requirements, the main control chip, current sensor circuit and wireless communication chip were introduced in details, finally, the software code was designed. Results showed that the designed system had high precision, fast monitoring speed and could utilize the resources effectively.

Keyword: aluminum cable; copper plating; current density; monitoring

引 言

镀铜层为光亮紫色, 具有稳定性高、结合力强和导电性高的特点, 被广泛应用于铝电缆表面

中^[1-2]。铝电缆作为一种关键的电能传输介质, 其电流状态决定了电能传输的安全性, 成为电力部门监测的关键指标^[3-5]。因此, 设计一种电流快速监测系统具有重要意义, 是相关学者亟待解决的

收稿日期: 2016-08-19

修回日期: 2016-09-22

问题^[6]。

文献[7]向表面镀铜的铝电缆绝缘层负半周期导入较多负电荷,在正半周期导入较少的正电荷,使正负电荷分布不均,导致负电荷逐渐向屏蔽层移动,形成直流分量,通过传感器对该直流分量进行采集实现电流密度监测。该方法实现过程简单,但监测电流很小,容易受到其余杂散电流干扰,导致监测结果不准确;文献[8]通过A/D采集电路将铝电缆表面镀铜线芯中的电流密度进行检测,发送至监控终端实现电流的监测。该方法抗干扰能力强,但局限性较差;文献[9]设计了一种基于低频叠加法的铝电缆表面镀铜的电流快速监测系统,利用叠加电压对铝电缆表面镀铜中形成的相应电流进行监测。该方法运行时间短,但监测电流会受到环境中其它因素的干扰,导致监测结果不可靠;文献[10]设计了一种局部放电监测系统,依据铝电缆表面镀铜局部电流与绝缘状态之间的关系获取局部电流,将得到的电流传输至监控中心,实现电流的监控。该方法可直观体现铝电缆表面镀铜的绝缘状态,但其特征信号很小,容易受到噪声的影响。

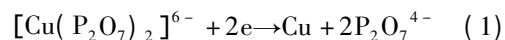
针对上述系统的弊端,本文设计了一种用于铝电缆表面镀铜的电流密度快速监测系统,并通过相关实验对其监测性能进行验证。

1 铝电缆表面电镀铜

1.1 铝电缆表面电镀铜机理

在经过常规锌酸盐处理后进行铝电缆表面电镀铜处理,电镀铜是在直流电的作用下,使铜从金属盐的水溶液中沉积出来,令铝电缆表面覆盖上铜。电镀实质上是一种氧化还原反应,在电镀过程中,金属铝作为阴极,铜片为阳极,把阴极与阳极浸入含铜离子的电解液中,通入直流电。在阴极,铜离子获取电子被还原成金属铜,除此之外,阴极出现副反应,也就是氢离子获取电子还原为氢气;在阳极,铜片失去电子产生配合离子,在阳极钝化的情况下,会有氧气析出,其反应式如下:

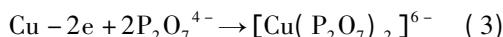
阴极反应:



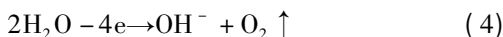
阴极副反应:



阳极反应式:



在阳极钝化的情况下有氧气析出,反应式:



铝电缆表面电镀铜过程实际上是铜的配合离子在阴极还原成铜的过程。当直流电通过电解液时,其中的阴阳离子在电场作用下有规律地移动,阴离子向阳极移动,阳离子向阴极移动,铝表面电镀铜过程的装置如图1所示。

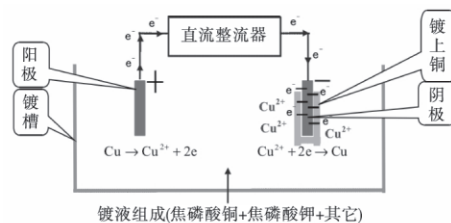


图1 铝表面电镀铜过程装置图

图2描述的是金属阳离子电镀铜沉积在阴极试样表面的示意图。

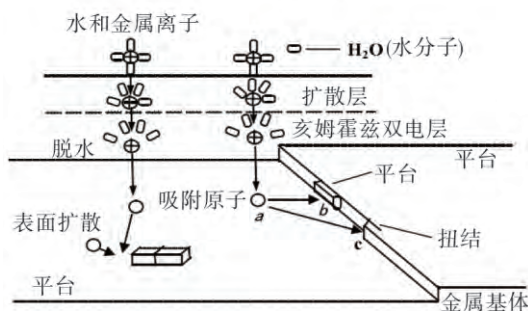


图2 铜沉积示意图

1.2 铝电缆镀铜的电流监测范围确定

1.2.1 实验材料与方法

实验材料选用金属铝片,试片尺寸为25 mm × 30 mm × 7 mm。

实验采用的仪器主要包括金相试样抛磨机(上海机械设备公司),DDZ-10A型整流器,金相显微镜和电子天平。

铝电缆镀铜分为硫酸铜镀铜和焦磷酸盐镀铜两种,其溶液配方及操作条件如下:

硫酸盐镀铜:



H_2SO_4 65 g/L

J_k 1 ~ 2 A/dm²

θ 20 ~ 30 °C

焦磷酸盐镀铜:

$\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ 70 g/L

$\text{K}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 300 g/L

$(\text{NH}_4)_3\text{HC}_4\text{H}_5\text{O}_7$ 25 g/L

pH 8.2 ~ 8.6

J_k 1.0 ~ 1.5 A/dm²

θ 30 ~ 35 °C

实验分析方法如下:

1) 镀层厚度测量方法

镀层厚度可通过下式求出:

$$\delta = \frac{m_1 - m_2}{S \times d} \times 10^4 \quad (5)$$

其中 δ 为镀层厚度, μm ; m_1 为镀铜后质量, g; m_2 为镀铜前质量, g; S 为试样表面积, cm^2 ; d 为铜的密度, g/cm^3 。

2) 镀层耐腐蚀性评定方法

用 1 mol/L 的硫酸浸泡镀铜试样 50 min, 通过金相显微镜对镀层表面进行观察, 求出单位面积的腐蚀点数, 实现镀层耐腐蚀性的评定。

1.2.2 实验结果分析

分析电流密度与温度对镀层耐腐蚀性的影响, 以及电流密度与铜镀层厚度的关系。

1) 电流密度对镀层耐蚀性的影响

在电流密度不同, 镀液 θ 均为 30 °C 的条件下, 在铝表面镀铜 30 min 后测试镀层的耐腐蚀性, 结果如表 1 所示。

表 1 电流密度对镀层耐腐蚀性影响

序号	$J_k / (\text{A} \cdot \text{dm}^{-2})$	表面腐蚀点密度 / (个 $\cdot \text{cm}^{-2}$)			
		1 h	5 h	15 h	30 h
1	0.5	全面腐蚀			
2	1.0	0	0	0	0
3	1.5	0	0	0	0
4	2.0	0	0	0.22	0.32
5	2.5	0.26	0.26	0.26	0.78
6	只浸铝	全面腐蚀			

分析表 1 可知, 在 J_k 为 0.5 A/dm² 的情况下, 所得铜镀层经硫酸浸泡后全面腐蚀, 说明这时镀层耐蚀性很差; 在 J_k 为 2.5 A/dm² 的情况下, 所得铜镀层经硫酸溶液浸泡 1 h 时镀层也出现腐蚀点, 在铝表面镀铜的过程中, 试样边缘出现烧焦现象, 镀层发黑, 这主要是由于电镀时镀层边缘部位电流密度高于中间部位; 而在 J_k 为 1 ~ 2 A/dm² 的情况下, 铜镀层在硫酸溶液中浸泡 5 h 均未出现腐蚀点。铝电缆镀铜后镀层的耐蚀性较只浸铝的耐蚀性要好, 最佳 J_k 为 1 ~ 2 A/dm²。

2) 电流密度与镀层厚度的关系

在 30 °C 下电镀 30 min, 测试不同电流密度下镀铜层厚度, 结果如表 2 所示。

表 2 不同电流密度下镀层厚度

序号	$J_k / (\text{A} \cdot \text{dm}^{-2})$	$\delta / \mu\text{m}$
1	0.5	1.35
2	1.0	2.24
3	1.5	2.68
4	2.0	3.15
5	2.5	3.34
6	3.0	3.45

分析表 2 可知, 随着电流密度的增加, 镀层厚度随之增加。 J_k 在 2.5 ~ 3.0 A/dm² 时, 镀层的厚度增加效果不明显, 为了在保证镀层性能的同时便于电流密度监测统一管理, 将电流密度监测的范围设定为 1 ~ 2 A/dm², 此时铝电缆镀铜性能达到最佳, 作为电流密度快速监测系统设计基础。

2 铝电缆镀铜电流密度快速监测系统设计

2.1 总体结构及硬件设计

在设计监测系统总体结构前, 需对系统总体需求进行分析。作为一个实时快速的监测系统, 需保证其精度、实时性和高效性, 因此对系统提出以下要求: 监测电流密度误差低于 4%; 监测终端需保证连续工作六个月以上; 针对变化的电流密度, 监测时间不能超过 3 s, 依据上述需求设计了监测系统总体结构图, 如图 3 所示。

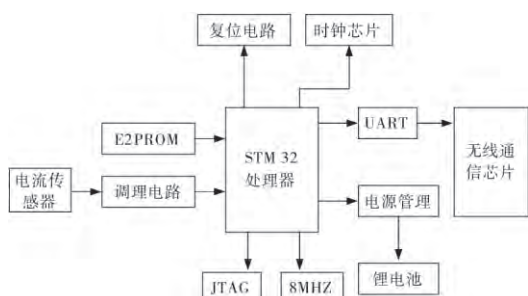


图3 监测系统总体结构

对系统的主控电路、电流传感器和无线通信芯片进行分析。

2.2 主控电路设计

主控电路为监测系统的核心,其性能直接影响电流的采集、传输和监测功能。本节将 STM32 系列微控芯片 ARM Cortex-M3 作为主控芯片(意法半导体公司),不仅性能高,而且能耗和成本较低。ARM Cortex-M3 芯片资源丰富,含有晶振电路和复位电路等,能够满足系统需求,其电路图如图 4 所示。

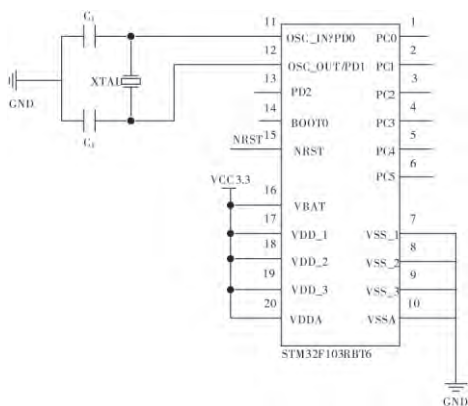


图4 ARM Cortex-M3 电路图

2.3 电流传感器电路

传感器是将物理化学量变成电信号以便采集的装置,本节选用的电流传感器为 FHS40-P/SP600 型号的传感器(瑞士公司 LEM),响应时间短,测量范围广,灵敏度高,其电路图如图 5 所示。

2.4 无线通信芯片设计

将 nRF2401 无线收发一体芯片看作无线通信模块,利用主控芯片对无线传输芯片进行控制,通过无线的形式实现电流数据的传输。nRF2401 支持多点通信,传输速度快,仅需几个外围元件即可构成射频收发电路。而且 nRF2401 的通信协议简单,对用户完全透明,其引脚分布图如图 6 所示。

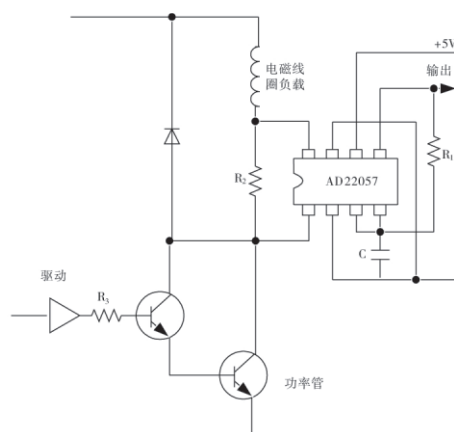


图5 电流传感器电路图

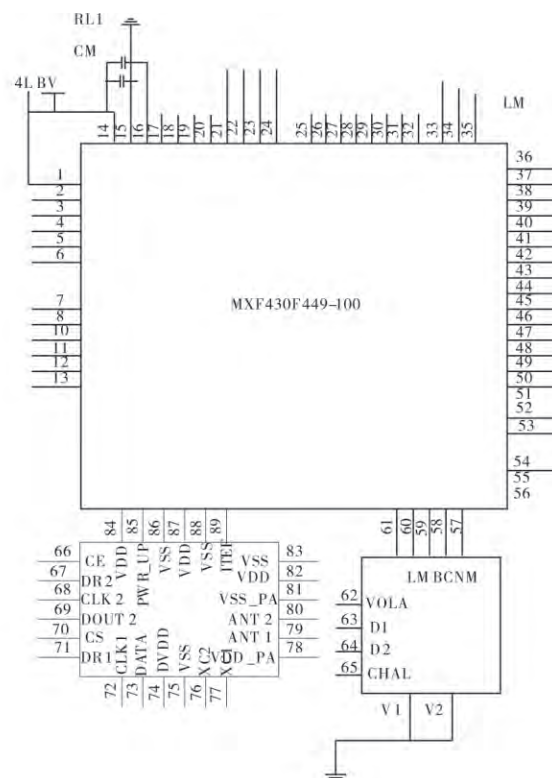


图6 无线通信芯片电路图

2.5 系统软件设计

系统软件设计是该设计的重点之一,它将直接影响功能实现的好坏和运行的稳定与否,本文使用 C 语言编写,在 RealView MDK 下开发完成,软件部分代码如下:

```
< manuscript english = "Platform Manuscript" >
scanf( "%d" , &p -> needtime );
{
    tcl wni IE = fresh Lively Opposite( "Windows.
```

```

WNIE");
    wni IE. start( " TOPIC " ," Fat players. gdv" ,mis-
take);
    //镀件进槽
    tcl Force Grade = function ( wni IE. answer
Nvarchar);
    //调用 running( ) 函数
    Output l; p - > next = NULL;
    if( ready == NULL) ready = q = p;
    //电流区间设置
    else{
        p = min = ready; iden = 1;
        do{
            if( p - > state == 'W' && p - > reachtime <
= times
            //读取数据库记录
            if( iden)
            {
                min = p; iden = 0;

```

```

}
else
if( p - > needtime < min - > needtime) min = p;
//输出结果

```

3 实验分析

为了验证铝电缆表面镀铜电流密度快速监测系统的有效性,需要进行相关的实验分析,并传统的基于差分法的电流监测系统和嵌入式电流监测系统作对比进行测试。

差分电流监测系统即为在检测模块设计时,以差分法为基础设计电流密度监测模块;嵌入式电流监测系统即为以嵌入式为基础设计电流密度检测模块的设计。

分别采用本文系统、差分法和嵌入式系统对铝电缆表面镀铜的电流进行监测,得到的监测结果与误差如表 4,监测误差即实际监测结果与测量结果之差。实际检测电流即为铝电缆施镀铜的电流。

表 4 三种系统监测精度比较结果

$I_{\text{实际}} / \text{A}$	本文系统		差分法		嵌入式	
	$I_{\text{监测}} / \text{A}$	$I_{\text{误差}} / \text{A}$	$I_{\text{监测}} / \text{A}$	$I_{\text{误差}} / \text{A}$	$I_{\text{监测}} / \text{A}$	$I_{\text{误差}} / \text{A}$
8	7.80	0.20	9.40	1.40	11.35	3.35
16	16.15	-0.15	18.50	2.50	19.26	3.26
25	24.93	0.07	22.60	-2.40	27.58	2.58
32	32.16	-0.16	34.80	2.80	29.41	-2.59
40	41.35	-1.35	44.90	4.90	42.87	2.87
63	62.18	0.82	60.10	-2.90	61.22	-1.78
100	101.67	-1.67	96.82	-3.18	104.25	4.25
125	126.33	-1.33	123.54	-1.46	121.34	-3.66

分析表 4 可以看出,采用本文系统对铝电缆镀铜电流进行监测,监测结果和实际电流之间的误差最小。而差分法和嵌入式系统的监测误差明显高于本文系统,说明采用本文系统对电流进行监测,得到的结果精度较高,更为可靠。

为了进一步验证本文系统的有效性,将本文系统、差分法和嵌入式系统的监测时间、服务器响应时间和传输速率进行比较,结果见表 5。

分析表 5 可以看出,和差分法与嵌入式系统相比,本文系统的监测时间、服务器响应时间及传输

速率均更优,说明本文系统的监测效率很高。

表 5 三种系统效率比较结果

效率指标	本文系统	差分法	嵌入式
$t_{\text{监测}} / \text{s}$	1.8	3.4	4.7
$t_{\text{服务器响应}} / \text{ms}$	220	234	251
$v_{\text{传输}} / (\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1})$	8	11	14

一个性能高的系统不仅需要高精度和高效率,而且需最大程度利用资源,减少浪费。本文系统、差分法和嵌入式系统的资源使用率比较结果见表 6。

表6 三种系统资源使用率比较结果(%)

资源	本文系统	差分法	嵌入式
CPU	87.48	72.59	73.84
内存	78.5	68.7	72.3
磁盘	77	75	69

分析表6可知,本文系统CPU、内存和磁盘使用率均明显高于差分法和嵌入式系统,说明本文系统能够有效利用资源,大大减少资源浪费。

4 结 论

设计并实现了一种用于铝电缆表面镀铜的电流快速监测系统,利用测量镀层厚度、镀层耐腐蚀性评定方法,进行电流密度对镀层耐蚀性的影响、电流密度与镀层厚度的关系实验,确定电流的监测范围。在此基础上,依据系统需求设计总体结构,包括主控芯片、电流传感器电路、无线通信芯片及软件代码部分。实验结果表明,所设计监测系统不仅精度高、监测速度快,而且可有效利用资源。

参考文献

- [1] 张谦,曹凯,陈福明.脉冲镀铜-化学镀银法制备金属基超疏水表面[J].中国表面工程,2015,28(5):1-8.

- [2] 詹益腾,上官文龙,田志斌,等.无氰高密度碱性镀铜的应用现状和前景[J].电镀与涂饰,2014,33(15):668-670.
- [3] 孔德龙,谢金平,范小玲,等.化学镀铜溶液中稳定剂的研究[J].电镀与精饰,2014,36(3):5-9.
- [4] 叶玉梅,江开勇,张际亮.改性塑料表面亚铜化合物的表征及催化化学镀铜作用[J].材料科学与工艺,2014,22(5):124-128.
- [5] 潘湛昌,张鹏伟,张晃初,等.聚酰亚胺薄膜表面无钼活化化学镀铜[J].电镀与涂饰,2014,33(15):641-643.
- [6] 杨宇峰,孙满法,尤灵伟.接地电流监测在高压电缆在线监测中的应用[J].电力安全技术,2015,17(9):64-66.
- [7] 袁燕岭,周灏,董杰,等.高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J].高电压技术,2015,41(4):1194-1203.
- [8] 王福忠,董鹏飞,董秋生,等.煤矿6kV动力电缆绝缘在线监测系统研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(9):1398-1405.
- [9] 肖睿,刘全桢,胡海燕,等.高压电缆局部放电宽带高频脉冲电流检测技术与应用[J].安全、健康和环境,2015,15(8):14-16.
- [10] 郝魁红,李斌.飞机发动机滑油在线监测系统电流源设计[J].电子设计工程,2014,22(5):102-104.

(上接第40页)

3 结 论

硫酸铜水溶液在照射光波长800 nm左右存在最大吸光度,在不高于0.160 mol/L的浓度范围内,吸光度与浓度之间呈线性关系: $A_{800} = 12.116c_{\text{mol}}$; 350~1020 nm全波长扫描的吸光度最大值与硫酸铜浓度之间本质上是曲线关系,但在0.020~0.160 mol/L浓度范围内近似为直线关系: $A_{\text{max}} = 12.338c_{\text{mol}}$; 照射光波长为600 nm时,在直至饱和的全浓度范围内,吸光度随硫酸铜浓度呈现规律性变化,浓度小于0.50 mol/L时近似于直线关系: $A_{600} = 0.9015c_{\text{mol}}$ 。透光率对波长微分的最小值与硫酸铜浓度之间具有光滑的单调曲线关系。

参考文献

- [1] 郭学益,田庆华.高纯金属材料[M].北京:冶金工业出版社,2010:106-108.
- [2] 范康年.谱学导论[M].北京:高等教育出版社,2001:85-98.
- [3] 张明.分光光度法测定化学镀铜液中硫酸铜含量[J].福建化工,1997,4(3):42-44.
- [4] 赵世亮.分光光度法测定酸性镀铜液中硫酸铜的含量[J].电镀与精饰,1989,11(2):42-29.
- [5] 赵庄,许扬彪,陶宙榕.复方赖氨酸冲剂的一阶导数分光光度测定[J].中国医药工业杂志,1996,27(3):127-129.
- [6] 汪峰.硫酸铜溶液吸收光谱特性实验的改进及研究[J].科技展望,2016,4(5):54.
- [7] 郭崇武.酸性镀铜液中硫酸铜的快速分析[J].电镀与环保,1992,12(3):35-36.