

电力电缆半导体屏蔽电阻率测试仪

王锦程, 胡 燕

(中南民族大学 电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 根据 GB/T 12706-2002 和 IEC 60502 标准设计了电力电缆半导体屏蔽电阻率测试仪。仪器采用导体屏蔽、绝缘屏蔽、加热后导体和绝缘屏蔽等 4 个体积电阻率测量模块, 由 C 8051 高速单片机集中控制; 对于单个测量模块, 采用了 4 探针的测试方法; 针对高的电压测量范围, 设计了多档精密电阻分压网络; 面对高电压、低功耗的难题, 采用了测量节点电位的方法。仪器同时具有 USB 接口, 可将测量数据送入 PC 机的数据库中, 进行数据分析和处理。该仪器直接显示电缆导体屏蔽与绝缘屏蔽体积电阻率, 运行稳定, 单组测量模块功率小于 0.1 W, 测量误差为 $\pm 1\%$ 。

关键词: 电力电缆; 导体屏蔽; 绝缘屏蔽; 电阻率测量

中图分类号: TM 934.1

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)07-0090-03

在中、高压电力电缆中, 为缓和电缆内部电场集中, 改善绝缘层内外表面电场应力分布, 提高电缆电气强度, 在导电线芯和绝缘层、绝缘层和金属屏蔽层之间分别加有一层半导体屏蔽层, 称为导体屏蔽层和绝缘屏蔽层。研究表明, 控制半导体屏蔽层性能是改善电缆运行特性、提高电缆运行寿命的重要技术措施, 而屏蔽层电阻率则是其中一项重要指标^①。

为了检验电力电缆的性能, 需要测量其屏蔽层电阻率, 我国中高压电力电缆现行标准 GB/T 12706-2002^①等效采用了 IEC 60502(1997)的实验要求^②, 对每种型号的电缆, 分别测量其正常状态与高温状态(90℃)的导体屏蔽层和绝缘屏蔽层电阻率。传统的测量方法采用万用表作为唯一工具, 这种纯手工的方式需要反复操作、重复记录, 相对比较繁琐, 数据的记录、分析、处理也很不方便, 在需要测试大量不同的电缆时尤为明显。这里研制的半导体屏蔽电阻率测试仪正是针对上述不足而设计的, 可以同时测量电缆样品的 4 组不同状态, 实时存储数据, 并通过运算直接显示结果。同时具有 PC 机接口, 可将测量数据通过 USB 接口送入 PC 机的数据库中, 进行数据分析和图像化显示。

1 测量原理

按照国家标准(GB/T 12706-2002)和 IEC 标准的要求, 取 4 段 150 mm 长的成品电缆试样, 其中 2 段先进行相容性老化试验, 即将样品放入预热到规定温度(90℃)的烘箱中老化, 30 min 后进行测量^[1-2]; 另外 2 段则处于自然状态。之后对 4 段电缆试样分别采用 4 探针方法^[3]进行测试, 其接线方式见图 1。

在测导体屏蔽层电阻率时, 需将待测电缆试样按图 1 所示剖开, 其中 1 为绝缘屏蔽层, 2 为导体屏

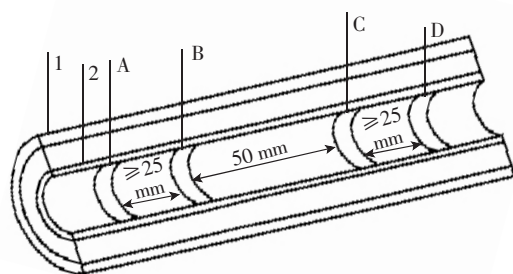


图 1 半导体屏蔽体积电阻率测量

Fig.1 Semiconductor shield volume resistance measurement

蔽层。再按要求接入 A、B、C、D 4 只涂银电极(B、C 为电位电极; A、D 为电流电极), B、C 间取长度 $l_{BC} = 50$ mm, A、B 与 C、D 间距离(l_{AB} 、 l_{CD})略大于 25 mm, 一般在测量时取 30 mm。测量绝缘屏蔽电阻率时方法类似, 所不同的是无需将试样剖开, A、B、C、D 4 只涂银电极直接从外围的绝缘屏蔽层引出。

根据 4 探针的测试方法^[4-5], 如果能测出 A、D 间的电流与 B、C 间的电压, 即可据公式 $U=IR$ 以及 B、C 的确定长度求得 B、C 之间的电阻率。为了测得电流与电压, 需在两端加入直流稳压电源。知道了电阻率, 则可根据电阻率公式(1)计算出导体屏蔽的体积电阻率。

$$\rho_c = R_c \pi (D_c - T_c) T_c / (2L_c) \quad (1)$$

式中 ρ_c 为体积电阻率($\Omega \cdot m$); R_c 为测量电阻(Ω); L_c 为电位电极间距离(m); D_c 为导体屏蔽外径(m); T_c 为导体屏蔽平均厚度(m)。

用同样的方法测出绝缘屏蔽层的电阻率, 即可根据公式(2)求得绝缘屏蔽的体积电阻率。

$$\rho_i = R_i \pi (D_i - T_i) T_i / (2L_i) \quad (2)$$

式中 ρ_i 为体积电阻率($\Omega \cdot m$); R_i 为测量电阻(Ω);

① GB/T 12706 半导体屏蔽层电阻率测量方法, 附录 C(规范性附录), 2002。

② IEC 60502 额定电压 1~30 kV 挤包绝缘电力电缆。

L_i 为电位电极间距离(m); D_i 为绝缘屏蔽外径(m);
 T_i 为绝缘屏蔽平均厚度(m)。

2 系统设计

2.1 系统框图

所研制的半导电屏蔽电阻率测试仪完全遵循国家标准要求,采用了同样的测试原理和方法。由于需要测量电缆试样正常状态与高温状态的导体屏蔽与绝缘屏蔽电阻率,采用了 4 路模块同时测量的方式,由 C 8051 高速单片机集中控制^[6]。每个模块功能大体相似,只是根据国标要求,测导体屏蔽与绝缘屏蔽时接线方式稍有不同。另外,为达到功耗 0.1 W 以内的限制要求^①,引入的直流电源范围也有所不同,具体分析计算见 2.2 节。系统框图如图 2 所示。

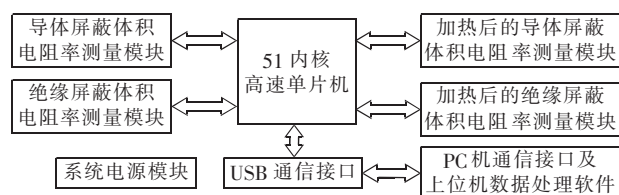


图 2 系统框图

Fig.2 Block diagram of system

C 8051 单片机是整个系统的控制核心,通过分时复用的方式同时对 4 组模块进行数据采样和运算处理^[7]。单次测量的结果可直接通过 LED 显示,也可传送给上位机。与上位机之间通过 USB 接口进行通信,由于数据量不是很大,采用了 Philip 公司的 PDIUSB12 接口芯片,基于 USB1.1 的通信协议来实现^[8]。上位机软件基于 VC 6.5 集成开发环境^[9],应用 MFC 技术实现^[10],其主要功能是将采集到的数据送入数据库中,进行分析、处理和数据显示。

2.2 相关计算

根据电力电缆行业多年的测量经验,导体屏蔽电压电极间电阻介于 $10^3 \sim 10^5 \Omega$ 之间,而绝缘屏蔽的电位电极间电阻一般介于 $20 \sim 2 \times 10^4 \Omega$ 之间^[11-12]。而根据国标的实验要求,测量电路电极间的回路功率 P 不得超过 100 mW^①。

在导体屏蔽电阻率测量电路中,其回路功率:

$$P = I_C^2 R_{BC} \quad (3)$$

将限制条件 $P = 0.1 \text{ W}$, $R_{BC, \min} = 10^3 \Omega$, $R_{BC, \max} = 10^5 \Omega$ 代入式(3)可得: $I_{C, \max} = 0.01 \text{ A}$, $I_{C, \min} = 0.001 \text{ A}$ 。
 $U_{BC, \min} = R_{BC, \min} I_{C, \max} = 10 \text{ (V)}$, $U_{BC, \max} = R_{BC, \max} I_{C, \min} = 100 \text{ (V)}$ 。
 若测量电路中,取 $l_{BC} = 50 \text{ mm}$, $l_{AB} = l_{CD} = 30 \text{ mm}$,则电极间电压: $U_{AD, \min} = U_{BC, \min} \times (110/50) = 22 \text{ (V)}$, $U_{AD, \max} = U_{BC, \max} \times (110/50) = 220 \text{ (V)}$ 。

同理,绝缘屏蔽中,回路功率:

$$P = I_i^2 R_{BC} \quad (4)$$

将限制条件 $P = 0.1 \text{ W}$, $R_{BC, \min} = 20 \Omega$, $R_{BC, \max} = 2 \times 10^4 \Omega$ 代入式(4)可得: $U_{AD, \min} = U_{BC, \min} \times (110/50) = 3.1 \text{ (V)}$, $U_{AD, \max} = U_{BC, \max} \times (110/50) = 96.8 \text{ (V)}$ 。

根据上述计算,可取测量电路直流电源电压范围分别为:导体屏蔽测量电源 $0 \sim 220 \text{ V}$, 50 mA ;绝缘屏蔽测量电源 $0 \sim 100 \text{ V}$, 100 mA 。

2.3 测量模块

根据分析计算,测量电路所需的直流电源电压范围较宽,远远超出了普通单片机及 A/D 转换器的范围极限^[13]。同时,高的电源电压范围对测量精度及低功耗要求带来了很大的挑战,成为仪器设计中的一个难点。如果直接测量电流,在 220 V 的直流电压下,要达到 0.1 W 的低功耗要求,则电流应小于 0.5 mA,这样的弱电流测量,会很大程度上受环境和测量电路的噪声影响,甚至被干扰噪声淹没^[14]。为了达到低功耗条件下的精度要求,选用了测量电位的方式,对于每个测量模块,具体电路见图 3。

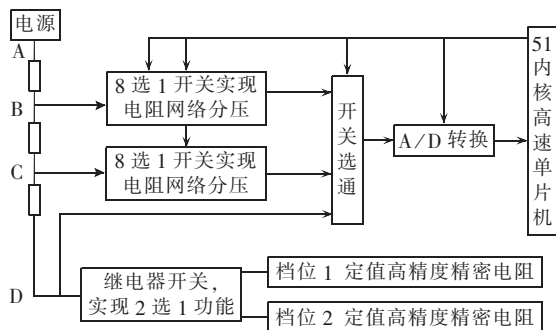
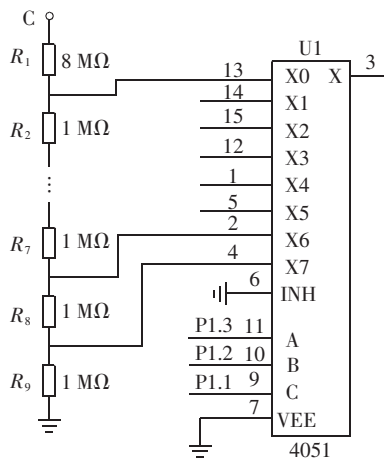


图 3 测量模块框图

Fig.3 Block diagram of measuring module

由于电源电压较高,测量电路采用了电阻分压的基本思想,在 Protel 2004 环境中设计实现^[15]。首先,通过定值高精度精密电阻确定基本分压电位,考虑到量程的不同,采用了 2 档分压电阻,通过继电器开关实现选通。对于关键的 B、C 电极的电位测量,不能直接数据采集送入 A/D 转换器来读取电压,所以分别设计了 8 档电阻分压网络。对 C 电极,分压大小分别为 1/16、2/16、3/16、4/16、5/16、6/16、7/16、8/16;对 B 电极,分压大小分别为 1/64、2/64、3/64、4/64、5/64、6/64、7/64、8/64,通过 8 选 1 开关进行选通。其中 C 电极分压电路如图 4 所示,B 电极分压电路与之相似,但需将 R_1 电阻值取为 56 M Ω 。



由于系统测量精度很大程度上取决于分压电阻网络,因此所有分压电阻均选用精密电阻。同时,为了减小测量过程中的误差,采用了多次测量求取平均值的方式。对每一个电位点,取一定的时间间隔先后测量 10 次,求取平均值。各电极的测量通过开关电路进行选通,分别测得 A、B、C、D 4 只电极的电位,再经过 12 位的 A/D 转换后送入单片机,即可根据档位定值的高精度精密电阻求得 B、C 之间的电阻率。另外,测量出试样上导体屏蔽和绝缘屏蔽的外径及导体屏蔽和绝缘屏蔽的厚度,每项测量 6 个数据后取平均值。然后应用体积电阻率公式,即可求出电缆试样老化前后的半导体屏蔽电阻率。测试完成后,将数据结果通过 USB 接口送上位机,也可直接显示。

2.4 数据采集与处理

本测试仪以 51 系列高速单片机为控制核心,针对电源电压过高而限定功耗又小的特点,设计了多档分压电阻网络,以实现直接测量。测量结果经 12 位的 A/D 转换后送入单片机中,进行多次测量求取平均值处理。求得各点电位后,根据公式进行运算,最后将老化前后的电阻、导体屏蔽电阻率、绝缘屏蔽电阻率的数据送 PC 机中进行数据处理,也可直接显示。具体工作流程如图 5 所示。

主程序:程序主体,协调与调用各子模块。

初始化:上电后对系统各部分进行初始化,使各模块在正常的状态下工作,它包括时钟初始化程序、A/D 转换模块初始化程序、USB 接口初始化程序等。

采样:通过精密电阻分压网络采样各点电位值,采样次数可预先设定,所得数据经 A/D 转换后送入单片机。

数据处理:从 A/D 转换器采集的结果不是系统所需要的数据,必须经过量程的转换,多次采样求取平均值后才能被系统所接收。

USB 通信:将处理后的数据通过 USB 接口,送入上位机的数据库中。

运算:取数据库中数据,根据导体屏蔽与绝缘屏蔽电阻率的公式进行运算。

显示:将运算结果直观地显示,可直接数字显示,也可以按图像显示,另外还可以显示多次测量结果的历史记录。

3 结论

所研制的半导体屏蔽电阻率测试仪遵循了国标的测量要求,并使之与嵌入式系统相结合,可以同时测量电缆样品的 4 组不同状态。针对高的电压测量

范围,采用了精密电阻分压网络的电位测量方式,且对于每组数据,采用多次测量求取平均值方式提高精度。同时具有 PC 机接口,可将测量数据送入 PC 机的数据库中,进行数据分析和图像化显示,便于操作和管理,而且硬件成本低廉。实际工作表明,该仪器运行稳定,单组测量模块功率小于 0.1 W,测量误差为 $\pm 1\%$ 。

参考文献:

- [1] XU Gang, WU Jiong. Analysis of the resistivity of the semi-conductive shield used in middle and high voltage power cables [J]. Electronic Wire & Cable, 2004(3): 25-28.
- [2] ZHU Yong-hua, WAN Shu-de. Investigation on the measurement of semiconductive screen in XLPE power cables [J]. Electronic Wire & Cable, 2006(1): 23-26.
- [3] 关自强. 四探针电动测试仪设计原理及维修[J]. 南方金属, 2003(1): 55-58.
GUAN Zi-qiang. Design principles and maintenance of four-pin probe electrodynamic instrument for semiconductor wafer evaluation [J]. Southern Metals, 2003(1): 55-58.
- [4] INSTRUMENT K. Four-probe resistivity and hall voltage measurements with the Model 4200 - SCS [J]. Plan Canada, 2002(41): 56-58.
- [5] 徐远志, 晏敏, 黎福海. 数字化智能四探针测试仪的研制[J]. 半导体技术, 2004, 29(8): 47-48.
XU Yuan-zhi, YAN Min, LI Fu-hai. Design of digital and intelligent four-probe meter [J]. Semiconductor Technology, 2004, 29(8): 47-48.
- [6] 鲍可进. C8051F 单片机原理及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 童长飞. C8051F 系列单片机开发与 C 语言编程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [8] 周立功. USB 固件编程和驱动开发[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [9] 孙鑫, 余安萍. VC++ 深入详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [10] 侯俊杰. 深入浅出 MFC[M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [11] 牟磊, 刘家齐, 王晶. XLPE 电缆外半导体层电特性的试验研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 47-49.
MOU Lei, LIU Jia-qi, WANG Jing. Study on electrical characteristics and measurement of electrical parameters for outer semiconducting layer of XLPE cable [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 47-49.
- [12] HUANG Chang-hua. Testing of resistivity of the semi-conductive shield in XLPE power cables [J]. Electronic Wire & Cable, 2005(6): 34-37.
- [13] 赵徽存, 黄进良. 电子测量技术基础[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
- [14] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [15] 谷树忠, 闫胜利. Protel 2004 实用教程: 原理图与 PCB 设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

王锦程(1976-), 女, 湖南常德人, 助教, 主要从事测控技术与通信方面的设计和研究(E-mail: Jc9614@163.com);

胡燕(1972-), 女, 湖北荆州人, 副教授, 主要研究方向为测控技术。

(下转第 112 页 continued on page 112)

Resistivity meter of power cable semiconductor shields

WANG Jin - cheng, HU Yan

(College of Electronics and Information Engineering, South - Central
University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract: A resistivity meter of power cable semiconductor shields is developed according to GB/T 12706-2002 and IEC 60502. It consists of four volume resistance measuring modules for conductor shield, insulator shield, heated conductor shield and heated insulator shield, centrally controlled by high speed MCU C8051. Four-point probe measurement is applied for each module. Node voltage measurement is adopted for high voltage and low power consumption application and multi-step accurate resistor voltage divider is designed for wide voltage measurement range. The meter is equipped with USB interface to send measured data to the database in PC for data analysis and management. It runs stably and displays the resistivities of semiconductor shield and insulated shield directly, with power consumption of single module less than 0.1 W and error within $\pm 1\%$.

Key words: power cable; conductor shield; insulator shield; resistivity measurement