

引用格式: 席伟. 基于 ARM 平台的声呐换能器绝缘自动测试仪[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 470-474. [XI Wei. ARM-based automatic insulation tester for sonar transducer[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(4): 470-474.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.04.005

# 基于 ARM 平台的声呐换能器绝缘自动测试仪

席 伟

(91114 部队, 上海 200434)

**摘要:** 针对声呐换能器绝缘检查中存在的自动化程度低、检查效率低和检查有一定危险性的问题, 研制了一款声呐换能器绝缘自动测试仪。该测试仪采用 ARM 作为主控, 用电压比较法和全桥法进行组合测试, 通过高压电路产生测量所需的高压, 利用选通控制和串口实现测量通路的自动化和远程控制, 实现了测量自动化, 提高了装备维修保障效率。

**关键词:** 声呐换能器; 绝缘测试; 装备保障

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-04-0470-05

## ARM-based automatic insulation tester for sonar transducer

XI Wei

(91114 PLA Troops, Shanghai 200434, China)

**Abstracts:** To solve the problem of low automation, low efficiency and certain dangerousness in the inspection of sonar transducer insulation, an automatic sonar transducer insulation tester is developed. In the tester, ARM is taken as the main control, the voltage comparison method and the full-bridge method are used for combined tests, the high-voltage circuit generates the high voltage required for measurement, and the gate control and serial port are used to achieve automation and remote control of measuring path. Therefore, the measurement automation is realized and the efficiency of equipment maintenance and support is improved.

**Key words:** sonar transducer; insulation test; equipment support

## 0 引言

声呐换能器是声呐装备的核心部件之一<sup>[1]</sup>, 需要进行定期检查和维修。绝缘电阻值是换能器非常重要的指标, 也是声呐湿端修理和保障工作的重要的指标依据<sup>[2-3]</sup>, 需要进行定期测试。传统的换能器绝缘测试是采用数字绝缘表或者摇表进行。目前采用传统的普通绝缘表、摇表或电容表进行测试时存在以下几个问题: (1) 工作效率低; 每次只能对一路进行测量, 随着声呐装备的发展, 声呐基阵越来越大、换能器数量越来越多, 几十个甚至上百个阵元的声呐越来越常见, 对换能器全面检查一次共需测量几百次, 完成一次测量需要 30 min 甚至更长时间。(2) 测量时有一定危险性。基阵工作电压大部分为高电压, 几百伏、上千伏或者更高, 测量电缆

芯线之间间距较小, 在遇到需要大量绝缘测量的情况时, 稍不小心, 测量人员就容易被高压电击, 虽然电流不大, 但测量时仍然需要非常小心。(3) 测量精度不高, 读数标准不统一。由于被测绝缘值随着测量时间的变化而变化, 然后逐渐稳定, 传统的绝缘测试通常凭着经验进行绝缘值读取, 没有统一的读取标准。这种方法对于远高于指标要求的换能器影响不大, 不会影响其正常使用。但对于绝缘值处于指标边缘的声呐换能器来说, 如果绝缘值读取值偏差过大, 将直接影响技术人员对该换能器真实工作状态和性能的掌握, 影响后续维修保障的方案和实施。

本测试仪采用电压比较法和全桥法进行组合测试, 利用 ARM 主控控制继电器进行测量通道切换, 同时控制高压产生模块产生直流高压, 通过漏电流采集后计算绝缘值, 并记录绝缘值与时间变化的曲线, 全程全自动化测量。

## 1 绝缘测试方法

当前绝缘电阻测试主要原理是“加高压、测漏

收稿日期: 2020-05-08; 修回日期: 2020-06-11

基金项目: 海军装备维修专项项目支持。

作者简介: 席伟(1981—), 男, 江苏兴化人, 硕士研究生, 研究方向为舰载声呐装备保障。

通信作者: 席伟, E-mail: 13585977600@139.com

流”<sup>[4]</sup>。实现方法有串联法、并联法、电压比较法、全桥法、半桥法和电容充电法等<sup>[5-7]</sup>。其中电压比较法和全桥法测量精度较高，本文采用电压比较法和全桥法进行组合测试，原理如 1 图所示。

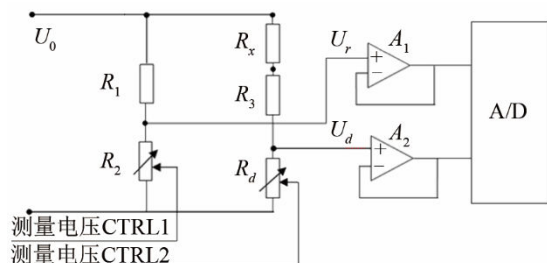


图 1 测量电桥原理框图

Fig.1 Schematic diagram of measuring bridge

图 1 中  $R_1$ 、 $R_2$  是标准电阻、 $R_x$  是被测绝缘电阻、 $R_3$  是限流和保护电阻、 $R_d$  是取样电阻、 $A_1$  是参考比较电压缓冲放大器、 $A_2$  是被测绝缘电阻缓冲放大器， $U_r$  是已知参考电压、 $U_d$  是被测电阻的取样电压。 $R_2$  和  $A_1$  组成高压采样信号调理电路， $R_d$  和  $A_2$  组成被测电阻信号采样调理电路。

随测试高压不同选择不同的  $R_2$  阻值，即选择对应 100、500、1 000 V 三种测试电压有 3 种阻值，测量控制信号(CTRL1)来自仪器的控制器 ARM。

$R_x$  绝缘阻值可以通过式(1)计算得到<sup>[8]</sup>：

$$R_x = \frac{U_r}{U_d} \times \frac{R_d}{R_2} \times (R_1 + R_2) - (R_3 + R_d) \quad (1)$$

式(1)中  $U_r$  和  $U_d$  是测量得到的值，其余电阻是已知值。在测量中，由于被测绝缘电阻阻值过大或过小，则  $U_d$  就会偏大或偏小，超出 A/D 的最佳测量范围。解决的方法有两种：(1) 采用程控放大器，对  $U_d$  信号进行放大调节；(2)  $R_d$  使用数控电位器。通常程控放大器的放大倍数只能选择有限的几档，而数控电位器可以有 64、128 或 256 个档位，较之前者可调台阶更多；同时由于被测量电阻的电流很小，只有 mA、 $\mu$ A 甚至更小的 nA 量级，因此对放大器的要求很高，如果放大器本身性能较差，不仅不能提高测量精度，反而会降低测量精度，所以采用数控电位器。通过调控  $R_d$  不同阻值，使  $U_d$  电压总能在合适的测量范围内进行测量。所以  $R_x$  值为

$$R_x = \frac{U_r}{U_d} \times \frac{nr}{R_2} \times (R_1 + R_2) - (R_3 + nr) \quad (2)$$

式中： $n$  是数控电位器抽头数，是已知量； $r$  是每一级电阻值，也是已知量。

## 2 测试仪组成

ARM 是应用非常广泛的嵌入式平台，非常适

合做为小型便携式设备的主控芯片<sup>[9-10]</sup>。电路以 ARM 为核心，通过各功能键控制各电路部分工作，实现以下功能：(1) 产生三种测试高压并实现测试高压输出的选择切换；(2) 将测试数据由模拟量转换成数字量(BCD 码)，由 ARM 进行量程判断，控制电子开关自动实现量程转换。测量结果在液晶显示器上显示，同时以串行方式将测量数据和控制信号发送给远端上位机；(3) 可预设报警值和测量时间；(4) ARM 读取的 BCD 码与存储的报警值进行比较，小于报警值则报警。测量原理如图 2 所示。

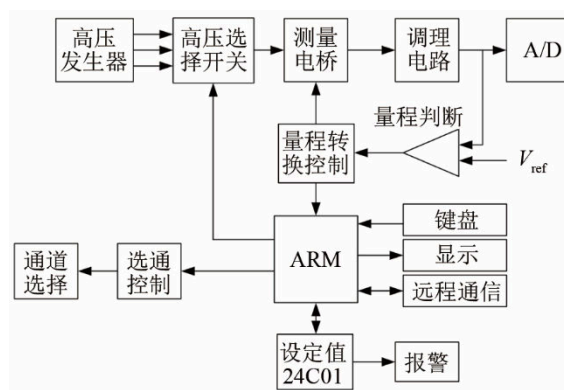


图 2 绝缘电阻测试仪原理框图

Fig.2 Block diagram of insulation resistance tester

由图 2 可知，测量高压由高压发生器产生，由键盘输入选择高电压，微控制器(ARM)控制高压选择开关，接通需要的高压，高压加入测试电桥，由测试桥取出电压，信号调理电路对其电压进行变换成  $U_x$ 。 $U_x$  分成两路：一路送到量程判断电路，当超量程时，量程转换控制电路切换量程，同时将对应该量程送给 ARM，另一个量程送给 A/D 转换电路，经 A/D 转换成数字量后，送 ARM 作相应处理产生绝缘电阻值；送液晶显示，同时该值与设定的报警值比较，如果绝缘电阻数据小于设定的报警值时，则显示“不正常”。通过配置好的选通电路自动切换测量通路，从而实现测量通道的自动化。如果需要远程传送数据，通过 RS232 或 RS485 传送到上位机，并把上位机设定的值传回给测试仪。

## 3 硬件设计

### (1) 高压产生电路

高压发生器是绝缘电阻测试仪的关键部分之一。不仅需要产生 100、500、1 000V 直流(DC)高压，而且输出需要稳定和保护。原理框图见图 3 所示。调制控制器(PWM)输出一定频率的脉冲信号去驱动功率变换单元，把低压的直流输入变成高压的交流输出。这种高压交流信号经过倍压电路，根据

需要变换为不同量程的直流高压, 经过低通滤波器输出。取样电路单元是保证输出高压稳压的重要环节, 它利用脉冲宽度调节器内部的误差比较电路, 将从输出端取样信号与预先设计的参考输出高压进行比较, 当输出高压变化时, 引起 PWM 控制器的输出宽度变化, 从而使输出高压维持原值不变。过载保护包括过流保护和过压保护, 以保护电路在外部发生或内部发生故障时, 高压发生器不被彻底损坏, 提高本测试仪的可靠性。

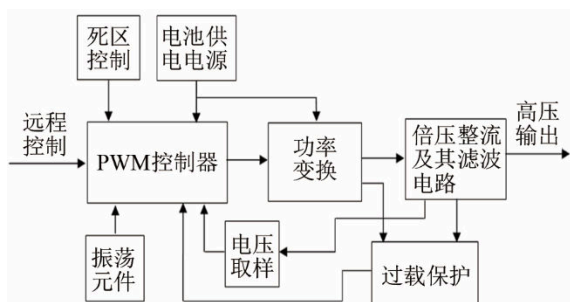


图3 高压产生电路原理框图

Fig.3 Block diagram of high voltage generating circuit

高压电路核心控制器件(PWM 控制器)采用 TI 公司的 TL494。它由一个独立的死区时间比较器、两个误差放大器、脉宽调制比较器(PWM)、振荡器、基准参考源、输出方式控制以及功率驱动组成。其特点:(1) 输出调整速度快; 被测对象阻值变化较大, 要保持输出电压值稳定。(2) 输入动态范围大, 输入直流电压为 7~40 V, 满足电池供电时电压变化范围大的情况。(3) 具有输出保护功能, 被测对象既有绝缘电阻值大的情况也有可能处在短路的情况, 特别短路情况发生时, 能迅速保护, 终止输出。功率变换电路是把直流低压变换成直流高压, 如图 4 所示, 由功率变换电路和保护电路组成。功率变换电路主要由功率开关器件 Q1、Q2 及高频变压器 T 组成。Q1、Q2 接收由脉宽调制器来的脉冲驱动信号, Q1、Q2 交替导通, 导通时间由脉宽调制的输出脉冲决定。在变压器 T 次级上得到平均电压  $U_0$ :

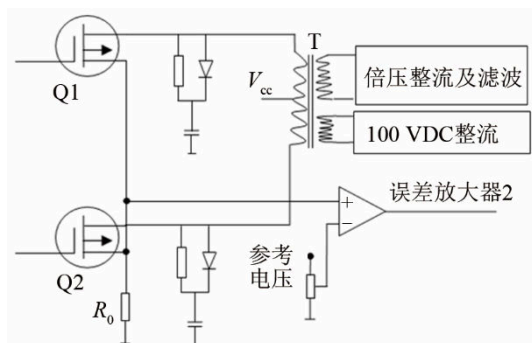


图4 功率变换电路和保护电路原理框图

Fig.4 Block diagram of power conversion circuit and protection circuit

$$U_0 = (N_s / N_p) [D / (1 - D)] \alpha V_{cc}, \quad (D < 0.5) \quad (3)$$

式中:  $N_p$ 、 $N_s$  分别为初、次级绕组匝数,  $D$  为脉冲宽度控制信号的占空比,  $\alpha$  为变压器的效率。

高频变压器的选择主要考虑保证电源的调整率、线圈漏感、外形尺寸等方面综合性能。本磁芯采用铁氧体 MXO-2000。磁通密度取 0.25~0.3 T, 磁芯结构, 采用磁罐形式, 同时为了减少对外部电路的干扰, 采用一个屏蔽壳套住并与地面相联。在变压器制作过程中, 选择压敏高压绝缘膜胶带作为次级层间和初次级间的绝缘材料, 效果良好。

功率开关管的质量好坏决定本高压产生器的可靠性等性能, 它的选取原则是: 开关管最大允许电流  $I_{om}$  大于满载时峰值电流  $I_p$ , 最大承受电压  $BV_{ceo}$  大于集电极反向电压  $V_{cer}$ , 电流放大系数  $\beta = I_p / I_o$ , ( $I_o$  为脉宽调制器输出驱动电流), 开关管导通时间  $t_{on}$  和截止时间  $t_{off}$  之和等于  $0.2/f$ 。为了加强电路的可靠性, 采用冗余设计, 选用与驱动电流大小无关的美国 ONSEMI 公司的 PowerVMOS 器件 MTP10N10, 它的最大负载电流为 10 A, 耐压为 100 V, 开关时间  $t_{on} + t_{off} > 120$  ns。

为减少高压发生器对外部环境的干扰, 同时对功率开关管进行保护, 电路中电阻和二极管并联后串联一个电容接地, 以吸收漏感造成的尖峰电压。

DC 100 V 直接由变压器输出整流得到, DC 500 V 和 1 000 V 由倍压整流获取。整流倍压电路和取样电路见图 5 所示, 变压器 T 输出电压经过二级和四级倍压整流电路, 分别输出 500 V 和 1 000 V 电压。 $R_d$  是对高压输出的电压取样元件, 利用 TL494 脉冲宽度调制器内部的误差放大器和外部参考源完成对稳定输出的控制。稳定输出的高压值大小, 可以通过变阻器 P 调节。当输出高压由于某种原因升高时, 通过  $R_d$  取样送入误差放大器 1 正向端, 将这个误差信号放大后送到脉宽调制器的比较器。这个比较器将控制其输出驱动脉冲变窄, 即输出占空比  $D$  变小, 反之变大。

过流保护电路主要由功率开关管源级取样电阻

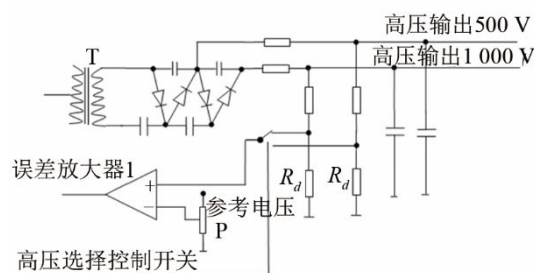


图5 倍压整流和取样电路原理框图

Fig.5 Schematic diagram of voltage doubling rectifier and sampling circuit

$R_0$  和脉宽调制器内的误差放大器 2 组成, 见图 4 所示。误差放大器 2 的反向端设定保护值大小, 当电流过大时, 即流过  $R_0$  的电流也较大,  $R_0$  上电压升高, 误差放大器 2 输出高电平, 其高电平输入到脉宽调制器比较器的控制端, 它使脉宽调制比较器无输出, 这样在驱动管的发射极输出低电平, 功率开关同时截止, 无高压输出, 达到保护目的。过压保护电路由高压输出端的电压检测电阻  $R_d$  和误差放大器 1 构成, 在原理上与过流保护相同。

(2) 量程转换电路

量程转换包括两部分: (1) 高压参考电压的测量的量程转换, 即  $U_r$  转换(如图 6 所示)。(2) 被测量绝缘电阻的测量电压量程转换, 即图 6 中的  $U_d$ 。图 6 中左边部分是高压参考电压的量程转换, 右边是被测电阻量程的转换部分。

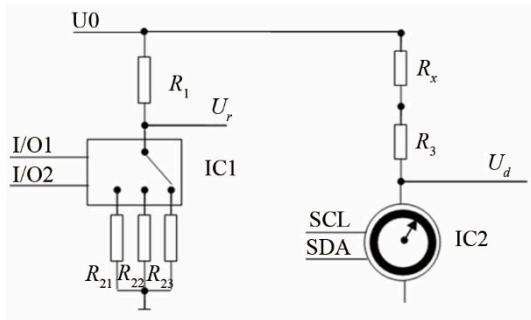


图 6 量程转换电路示意图

Fig.6 Schematic diagram of range conversion circuit

当选择不同的高压来进行测量绝缘电阻时, 主控制器通过 I/O1 和 I/O2 两根逻辑控制线控制电子开关 IC1 接通不同的电阻, 使  $U_r$  电压值始终落在 A/D 转换电压范围内。

被测绝缘电阻的量程转换也是通过数字电位器切换实现, 它可以有 64~256 个不等的档位, 本测试仪选用 128 个档位, 数字电位器与挡位量程的关系如表 1 所示, 和主控制器通过相联接。在每个量程内, 又分成多个档位, 是为了有更好的线性度和精度。调整数字电位器的档位, 使  $U_d$  总能落到一个 A/D 转换的最佳的电压范围, 以便保证有良好的准确度。

(3) A/D 转换电路

A/D 转换电路担负着将采样电压的模拟信号转

表 1 数字电位器档位对应量程转换

Table 1 Range conversion of digital potentiometer

| 序号 | 数字电位器档位 | 量程/MΩ     |
|----|---------|-----------|
| 1  | 00~15   | 0~1.999   |
| 2  | 16~47   | 2~19.99   |
| 3  | 48~79   | 20~199.9  |
| 4  | 80~127  | 200~1 999 |

换成数字信息的任务。它由双斜积分式 A/D 及外围电容、电阻组成。它对输入的采样电压  $U_x$ 、参考电压  $U_r$  的模拟信号先后进行两次积分, 从而将模拟量转化成数字量。该数字量由 ARM 读取后进行处理。

(4) 量程判断

ARM 根据从 ICL7135 读取的数据, 判断出是超量程或是欠量程, 进而由 ARM 输出的量程转换控制信号, 自动切换到不同的量程。量程转换控制信号加到电子开关端, 改变对应的采样电阻值。

(5) 设定报警值和报警

通过键盘将报警电阻值存储到存储器 24C01 中, ARM 将测量得到的绝缘阻值与存储的设定值进行比较, 若小于设定值则发出声(连续的嘟嘟声)、光(连续闪烁)报警, 显示阻值并给出“不合格”提示。同时将测量时间和本次测量值存储, 以备以后调阅。

(6) 远程通信

设置远程通信的功能的目的是为了与上位机进行数据交换。上位机将报警电阻值、测量使用的高压值、何时测量三个参数传给测试仪, 这三个参数组成一次测量设定, 测试仪可以存储 32 次测量设定值, 测量设定值按时间组成测量序列。测试仪根据测量序列, 到时间后以自动方式或询问方式进行测量或跳过本次测量。当上位机需要测试仪的测量结果时, 测试仪通过通信接口将存储的测量结果传给上位机。可以指定上传某次测量结果, 也可以指定上传多次测量结果。

4 软件流程框图

测试程序组成框图如图 7 所示。软件模块包含仪器初始化、电路控制、信号采集、结果分析和判断、存储管理、时间设定、键盘处理、显示和报警以及上位机通信模块。

测量电阻软件流程框图如图 8 所示。初始化后进行测试电压选择, 并确认量程是否合适。如果量程在允许范围内, 进行测量电压读取, 结果如果超

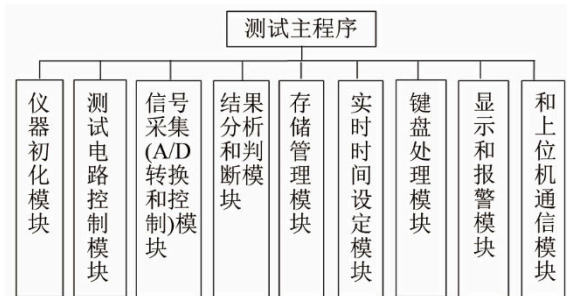


图 7 测试程序组成框图

Fig.7 Composition block diagram of the test program

出量程, 则进行测量电阻切换, 完成区间调整后, 利用程序计算绝缘电阻, 并进行存储和显示。完成该次测量后检查是否全部检测完成, 是否需要切换检测通道。没有完成则切换通道后继续进行测试, 直到全部测试完成。

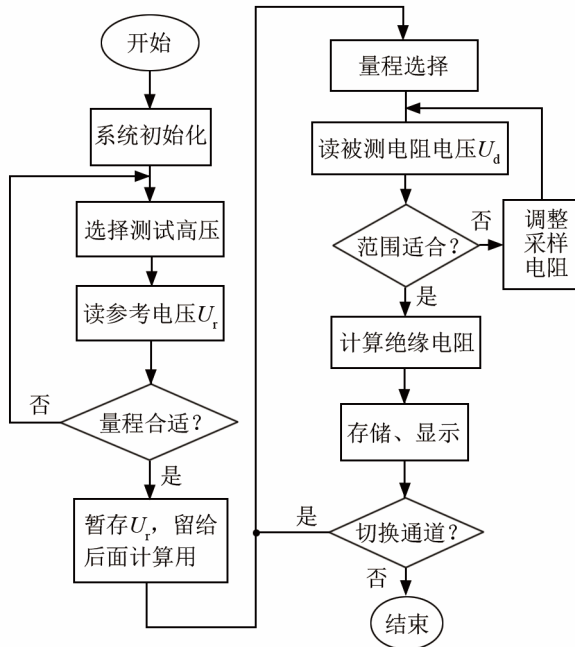


图 8 电阻测量程序的流程图

Fig.8 Flow chart of resistance measurement program

## 5 试验结果

对该绝缘测试仪进行试验验证, 验证工作分为两组, 一组为精度试验, 另一组为速度和一致性试验。精度试验对象为经计量的兆欧表标准电阻箱, 分别进行 100、500 和 1 000 V 三个档位, 阻值分别为 1、10、100 和 1 000 M $\Omega$ 。表 2 为采用绝缘测试仪对标准电阻箱测试的结果, 其中 100 V 档的测试精度最高, 测量结果与标称值最小误差为 0.5%, 1 000 V 档测试精度相对最低, 最大误差为 6.7%。

速度试验对象为 48 路的换能器基阵, 测试电压 1 000 V, 连续循环测试 10 次。考虑到发射信号脉冲宽度最大为 512 ms, 将每次测量的记录时间放宽为 1 s。共耗时 948 s, 即完成 1 次 48 路的测量时

表 2 标准电阻箱测试的结果  
Table 2 The result of standard resistance box test

| 标准电阻/M $\Omega$ | 测试电阻/M $\Omega$ |       |         |
|-----------------|-----------------|-------|---------|
|                 | 100/V           | 500/V | 1 000/V |
| 1               | 1.025           | 1.058 | 1.067   |
| 10              | 10.05           | 10.15 | 10.59   |
| 100             | 99.62           | 102.3 | 104.5   |
| 1 000           | 996.4           | 992.1 | 1 037   |

间约为 95 s, 测量结果一致性最大为 0.21%。如果采用传统人工手动切换的方式并完成记录, 测试完成 1 次 48 路的测量时间约为 30 min, 测试结果的一致性约为 10%。可以看出, 绝缘测试仪大大提高了测试效率和测试结果的一致性, 满足实际使用要求。

## 6 结论

本论文根据声呐换能器在绝缘测试中遇到的实际困难和问题, 设计了一款能够快速对声呐换能器绝缘性能进行测试的设备, 在保证测试的安全性和精确性的同时大大提高了测试效率, 提高了装备保障效率。

### 参 考 文 献

- [1] 席伟, 姚直象, 夏羽, 等. 一种自动化声呐换能器测量系统设计与实现[J]. 科技创新与应用, 2017(12): 16-17.
- [2] 温海青. 提高声呐换能器可靠性的修理技术[J]. 电子质量, 2011(12): 20-21.  
WEN Haiqing. The servicing technique for improve reliability of sonar transducer[J]. Electronics Quality, 2011(12): 20-21.
- [3] 李耀波, 孙璉焯, 仲秋, 等. 声呐换能器绝缘电阻自动测量电路设计[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(10): 185-188.  
LI Yaobo, SUN Jinye, ZHONG Qiu, et al. Design of sonar transducer insulation resistance automatic testing circuit[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(10): 185-188.
- [4] SALAM M A, NADIR Z, AKBAR M, et al. Study the effects of different types of contaminants on the insulator resistance. second international conference on electrical and computer engineering [C]/ICECE 2002, 2002: 35-40.
- [5] 程运安, 吴永忠, 魏臻, 等. 电桥法电缆绝缘测试仪的设计及精度分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007, 30(9): 1110-1112.  
CHENG Yunan, WU Yongzhong, WEI Zhen, et al. Design and precision analysis of a cable insulation testing device based on the bridge method[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2007, 30(9): 1110-1112.
- [6] 许中原. 多通道绝缘耐压测试仪控制系统的设计研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017: 20-38.
- [7] 胡纪五, 吴庆明, 马晋嵘. 电缆绝缘电阻在线测量的研究[J]. 电测与仪表, 2000, 37(5): 9-12.  
HU Jiwu, WU Qingmin, MA Jinrong. Study on the on-line measurement of insulating resistance of cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2000, 37(5): 9-12.
- [8] 蔡启仲, 邹光波. 绝缘电阻测试仪高压可控电源与量程切换电路设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2012(1): 98-99, 101.  
CAI Qizhong, ZOU Guangbo. Insulation resistance tester controlled power and high voltage switch range circuit design[J]. Automation & Instrumentation, 2012(1): 98-99, 101.
- [9] 焦新泉, 袁小康, 储成群. 基于 ARM-Linux 平台的 USB 数据存储设计与实现[J]. 现代电子技术, 2019, 42(6): 6-9.  
JIAO Xinquan, YUAN Xiaokang, CHU Chengqun. Design and implementation of USB data storage based on ARM-Linux platform[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(6): 6-9.
- [10] 刘娇, 唐磊. ARM 处理器在舰船压力容器超声波检测系统的应用[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(4): 148-150.  
LIU Jiao, TANG Lei. Application of ARM processor in ultrasonic testing system of ship pressure vessel[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(4): 148-150.