

基于 STM32F4 的绝缘耐压测量系统的设计

张淑杰, 程武山

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 绝缘电阻和耐压强度是评价电力设备绝缘状态的重要指标; 通过结合 Cortex-M4 系列的 STM32F4xx 设计了绝缘耐压一体化测量系统; 通过上位机程序实现不同通道的切换, 从而实现不同测量模式的切换, 进而实现被测对象绝缘电阻和耐压强度的测量; 通过 RS232 串口将测量得到的结果上传到上位机, 分析处理得到的数据, 从而能准确的判断设备的绝缘状态; 给出了绝缘耐压测量的基本原理、测量公式以及软硬件的实现方法, 并通过硬件测试、软件测试以及系统整体调试, 验证了系统运行的稳定性和可靠性; 对实现测量的自动化具有重要的意义, 同时对绝缘耐压的研究具有一定的价值。

关键词: Cortex-M4; STM32F4xx; 耐压测试; 绝缘电阻测试; A/D

Design of Insulation Withstand Voltage Measurement System Based on STM32F4

Zhang Shujie, Cheng Wushan

(College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Insulation resistance and compressive strength are important indexes to evaluate insulation state of power equipment. Combined with the Cortex-M4 series of STM32F4xx, an integrated measurement system is designed. Switch between different channels through the host computer program, so as to realize the measurement model, and then realize the measurement of insulation resistance and compressive strength, and the measurement results will be uploaded to the host computer through the RS232 serial port, for data analysis and processing, which can accurately judge the insulation status of the equipment. The basic principle of measurement, the formula of measurement and the realization of hardware and software are given. And through the hardware test, software testing and system debugging, the stability and reliability of the system is verified. It is of great value for the application and popularization of the digital meter.

Keywords: Cortex-M4; STM32F429; withstand voltage test; insulation resistance test; A/D

0 引言

耐压测试是指对各种电器装置、绝缘材料和绝缘结构的耐受电压能力进行的测试^[1]。由于测量方法、指标含义等的差异, 在很多情况下, 人们便认为绝缘和耐压是两个相互无关的概念。比如对于电缆来说, 随着其长度的增加, 绝缘电阻呈递减趋势, 而耐压强度和长度之间则并不存在明确的关系。但在正常情况下一般服从统计规律—电缆愈长, 击穿的概率就愈大^[2]。

耐压对绝缘的考验严格, 能保证绝缘具有一定的绝缘水平或裕度, 但可能在测量时给绝缘造成一定的损伤。绝缘电阻测量是在较低电压下测量绝缘的各种情况, 从而判断绝缘内部的缺陷, 但它对绝缘耐压水平的判断比较间接。两类测量是相辅相成的, 耐压测试往往在绝缘测量之后进行, 而如果绝缘测量已表明绝缘有不正常情况, 则必须查明原因, 消除不正常情况后再进行耐压测试, 以避免不应有的击穿。很多标准也作出明确规定, 耐压测流程为绝缘—耐压—绝缘, 且前后两次测试绝缘电阻偏差不得超过 10%^[3]。因此为保障耐压测试的安全及可靠进行, 在耐压测试前必须通过绝缘测量对设备的绝缘性能进行初步测试。

耐压测试分为交流耐压测试和直流耐压测试。交流耐压试验电压一般比运行电压高, 因此通过交流耐压试验后, 设备有较大的安全裕度。但当被测产品为电容性负载或者含有较大的杂散电容时, 无法得到被测产品的真实泄漏电流值, 其实际输出的电流值会比采用直流耐压测试时的输出电流值大很多, 会增加操作人员的触电危险性, 而直流耐压测试能真实地反映出被测产品实际的泄漏电流值。因此本文主要研究直流高压下的耐压测试和绝缘电阻测量。

在许多场合为了测量电子设备的耐压水平及绝缘电阻, 一般是用摇表来做简单测量。但是摇表输出的电压与人施予手柄的转速有关, 且其指针式显示也不够精确^[4]。后来出现的有电源供电的电动摇表, 解决了手摇的麻烦, 保证了工作电压的稳定。但刻度的非线性, 高阻部分分辨力很差, 测试误差较大^[5], 在一些对测量要求较高的场合则不能适用, 更不具备自动测量的功能。本文结合 Cortex-M4 系列的 STM32F4xx 来设计耐压绝缘测量一体化的测试系统, 实现测量结果的存储、显示以及与 PC 机的通信。使测量数据能实时上传到上位机, 并进行数据的保存、显示及分析处理。

1 系统结构及原理

系统主要完成交流 220 V 到可调直流高压的设计。对电压、电流模拟信号的采集、处理、数据的显示以及对被测物当前测试环境的温度采集等功能。系统功能结构框图如图 1 所示。

收稿日期: 2017-05-07; 修回日期: 2017-08-31。

作者简介: 张淑杰(1993-), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事多介质的绝缘测量技术与控制系统方向的研究。

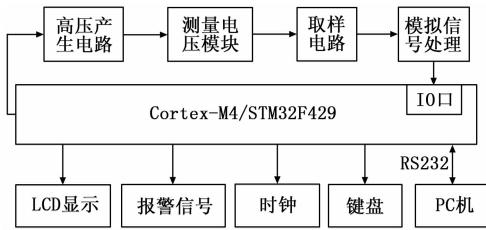


图 1 系统功能结构框图

绝缘耐压测试系统主要由升压部分、控制部分、显示部分三大模块组成。升压部分通过自耦变压器和升压变压器得到直流高压；控制部分采用 AD7705 进行电压、电流信号采样、采用红外仪温度传感器对当前环境温度进行采集，并结合报警电路、时间电路完成信号采集；显示部分用来显示测试结果，通过 LCD 液晶屏和上位机同步显示，并进行数据的保存，方便历史数据查询及对于分析，从而进一步预测绝缘耐压水平未来发展趋势。

STM32F429 内部集成了多路 AD、PWM 脉宽调制、增强复用功能的 I/O 口等。高压和信号采集是绝缘耐压测试最重要的组成部分，因此本文主要对这两部分电路设计原理进行了阐述。

1.1 高压模块设计

高压产生电路基本原理框图如图 2 所示。

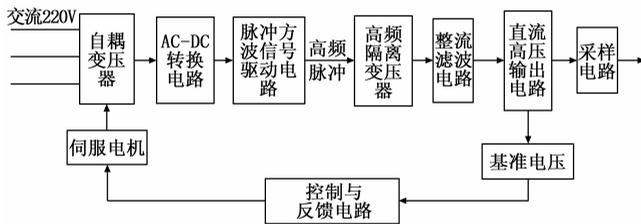


图 2 高压模块基本原理框图

系统将输入的 220 交流电通过自耦变压器调压，并经过 AC-DC 电路转化为直流电压；再由驱动电路驱动反激功率变换电路，将直流电压转化为高频交流方波电压；通过高频变压器耦合到次级，并经过倍压整流滤波电路得到所需的直流高压。将输出的直流高压和基准电压进行比较，通过反馈电路，控制伺服电机的正反转来调节自耦变压器，从而提高输出直流高压的精度。

通过控制 IO 口输出高低电平给继电器来控制测试电源的启、停；绝缘耐压测量要求输出的直流高压可调，可采用手动调压器升降压或通过控制 IO 口输出高低电平控制可逆伺服电机的正、反转，由伺服电机缓慢带动调压器自动升降压，来达到调节输出电压大小的目的，并有零电压起动保护电路；通过控制 IO 口输出脉冲方波信号的频率控制电机的速度，来达到控制输出电压变化快慢的目的，从而实现了测试直流高压的自动调节。

绝缘耐压测试本身的特点决定了 STM32F429 要快速地得到测量结果并快速地作出反应。为解决这一问题，采用真有效值到直流转换器 LTC1966^[6]，在 50 Hz~1 kHz 范围内其总误差误差不超过 0.125%，线性度达 0.102%，提高了测试精度。

1.2 信号调理与数据采集电路

16 位模数转换器 AD7705 具有很高的信噪比和测量精度，

高达 16 位的分辨率，能满足本系统要求。通过 AD7705 将采集的模拟信号转化为数字信号，输入到 CPU 进行数据处理。采用模拟滤波消除进入 ADC 之前重叠在模拟信号上的噪声；在模-数转换之后，采用数字滤波消除模数转换过程中产生的噪声。

在 AD7705 的调制器和数字滤波器内部，建立有峰值储存，可允许超出模拟输入范围 5%^[7]。模拟输入信号范围是 (GND-30 mV) 至 (VDD+30 mV) 之间。由于采集得到的模拟信号较小，因此将模拟信号经过增益为 K 的集成运算放大电路进行信号的放大，再经过电压跟随电路，使信号保持稳定。

AD7705 采用 5 V 供电，与 MCU 之间采用 SPI 通信方式，其片选和复位信号则直接连在 MCU 的普通 IO 口上。数据采集电路如图 3 所示。

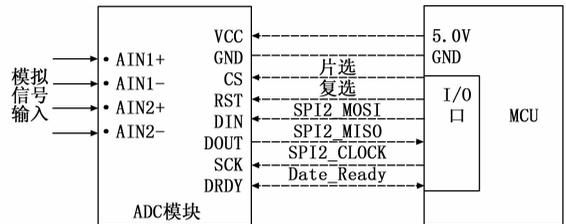


图 3 数据采集电路图

2 测试流程及软件设计

测试系统的软件主要包括下位机软件 and 上位机数据处理分析软件。下位机软件采用 KEIL 编写，包括主程序、通道模式选择子程序、耐压测试子程序、绝缘电阻测试子程序、数据显示子程序、数据通信子程序等。上位机软件采用 C# 和 SQL Sever 软件进行开发，主要完成人机交互、测量参数设置、测试流程控制、历史数据保存查询、报表打印等功能。

2.1 下位机软件

下位机软件主要是用来实现测量模式切换、数据采集及 CPU 和上位机之间的通信，同时下位机可接收上位机的指令信号，并根据指令控制相应继电器的吸合和断开，从而实现绝缘测量和耐压测量。

程序采用模块化编程的设计思想，完成系统初始化，包括按键、系统时钟、测量参数等；RS232 串口通信、按键控制、I/O 口控制、A/D 转换、LCD 显示、测量模式选择、测量通道选择等各个功能模块的软件设计，系统整体软件流程如图 4 所示。软件设计中两个主要的功能模块为直流耐压测试软件设计和绝缘电阻测试耐压设计。

2.1.1 直流耐压测量软件设计

耐压测量是把一个高于正常工作的电压加在被测设备的绝缘体上^[8]，在电压未升到设定值时若泄漏电流猛增，表明设备存在绝缘缺陷或发生绝缘击穿；当绝缘良好时，泄漏电流和电压之间呈线性，且泄漏电流随输出电压的升高上升较小。达到设定值电压之后，观察一段时间（一般为 1 分钟），如果在观察时间 $t_1 \sim t_2$ 内泄漏电流保持不变，则证明试件绝缘良好，输出测试合格信号及试件耐压值；如果在观察时间内泄漏电流出现急剧上升，则证明试件仍然是不合格的，输出测试信号不合格信号、击穿电压值及耐压时间 $t_2' \sim t_1$ 。

$i=f(t)$ 关系曲线可以用来判断绝缘缺陷^[9]。当被测设

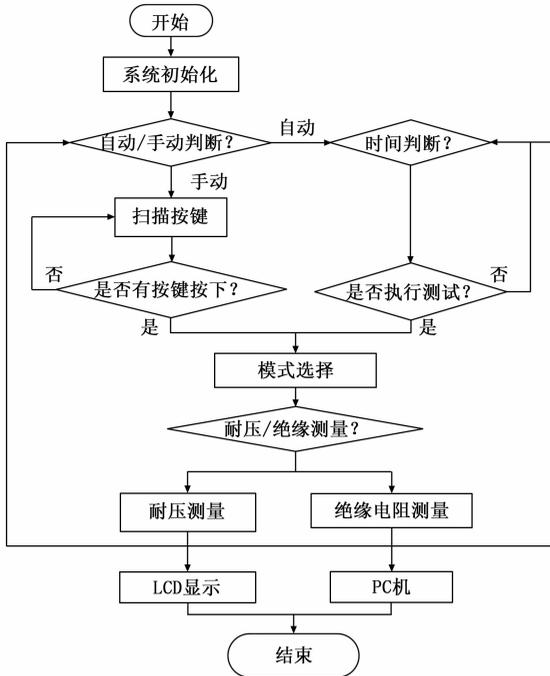


图 4 keil 软件流程图

备受潮或是有缺陷时, 电流随时间下降的比较慢, 最终达到稳态值也比较大。泄漏电流和电压之间的关系也可用来判断绝缘状况, 绝缘良好时, 泄漏电流和电压的关系几乎成直线, 且上升较小; 缘受潮时, 泄漏电流上升较大; 当绝缘有缺陷时, 泄漏电流将猛增。

耐压强度测试软件控制流程图如图 5 所示。

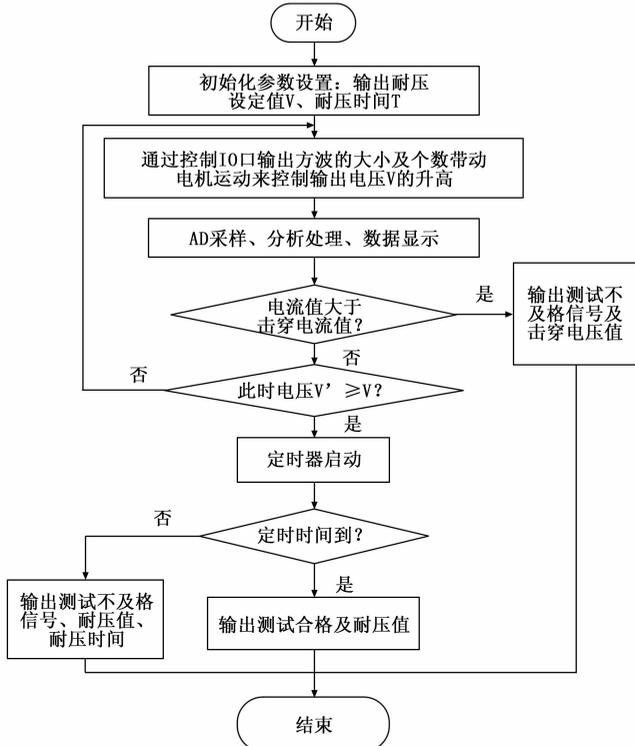
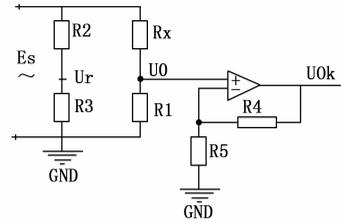


图 5 耐压强度测试流程图

2.1.2 绝缘电阻测量软件设计

绝缘电阻是反映绝缘性能的一个重要指标, 可以提前发现绝缘材料比较大的绝缘缺陷及设备局部或整体受潮、脏污以及绝缘击穿和严重过热老化等缺陷^[10]。本文对绝缘电阻的测试采用双支路法^[11], 这种方法能够消除测量电压 E_s 对绝缘电阻的影响, 准确度高。其原理图如图 6 所示。



E_s 为测量电源电压; R_2 、 R_3 为固定电阻; R_x 为待测绝缘电阻; R_1 为样电阻。

图 6 电桥法原理图

根据欧姆定律可得:

$$U_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_x} E_s \quad (1)$$

$$U_r = \frac{R_3}{R_2 + R_3} E_s \quad (2)$$

当 R_x 很大时, U_0 很小, 为保证测量精度需要对 U_0 信号进行放大, 设放大器输出为 U_{0k} , 放大倍数为 k , 则:

$$U_{0k} = k U_0 \quad (3)$$

U_{0k} 接 AD7705 的 REF (+), U_r 接 AIN1 (+), 由于 AD7705 是全差分输入, 所以将 REF (-)、AIN1 (-) 同时接地。AD 转换输出数为:

$$AD = D \frac{U_r}{U_{0k}} \quad (4)$$

得到:

$$AD = D \frac{R_3 (R_1 + R_x)}{k R_1 (R_2 + R_3)} \quad (5)$$

由于 $R_x \gg R_1$, $R_2 \gg R_3$, 所以:

$$AD = D \frac{R_3 R_x}{k R_1 R_2} \quad (6)$$

则绝缘电阻为:

$$R_x = AD \cdot k \cdot \frac{R_1 R_2}{D R_3} \quad (7)$$

由于采用的为 16 位的 AD7705, 则 $D = 2^{16} - 1 = 65535$, 则:

$$R_x = AD \cdot k \cdot \frac{R_1 R_2}{65535 R_3} \quad (8)$$

绝缘电阻 R_x 与 AD 采样成正比, 适当选择 R_1 、 R_2 、 R_3 及增益 k 的值, 则可使被测绝缘电阻和显示值在数值上相符。

对于电容较大、吸收现象明显的设备, 可结合吸收比 $K = R_{60} / R_{15}$ 和极化指数 $P = R_{10 \text{ min}} / R_{1 \text{ min}}$ 综合判断。K 越大表示吸收现象越显著, 一般认为当 $K < 1.3$ 时, 就可判断绝缘可能受潮。但吸收比不能充分反映绝缘吸收现象的全过程, 可利用极化指数 P 作为另一个判断指标。将所测绝缘电阻、吸收比、极化指数与出厂时的值或历史数据等比较, 或者

(下转第 49 页)