

# 基于 C8051F330 和 RTX51Tiny 的绝缘子串 分布电压测量仪的设计

张 波, 江秀臣, 曾 奕, 仲雁兵

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

Design of Measuring Apparatus for High Voltage Insulator's Distributed Voltage  
Based on C8051F330 and RTX51Tiny

ZHANG Bo, JIANG Xiu-chen, ZENG Yi, ZHONG Yan-bing

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

摘要: 以 C8051F330 单片机为核心, 设计了一种绝缘子串分布电压测量仪, 通过介绍系统硬件的构成, 描述了各个模块的功能和实现, 详细论述了测量触发和测量稳定条件。软件设计采用了 RTX51Tiny 实时多任务操作系统。经过校准和修正, 测量仪具有很高的测量精度。

关键词: 单片机; 实时多任务; 绝缘子串; 分布电压

中图分类号: TM855

文献标志码: A

Abstract: A measuring apparatus for high voltage insulator's distributed voltage based on single chip microcomputer C8051F330 was proposed. The function and realization of each module was described through the hardware system introduction, the trigger device and steady condition of measurement system were described in details. Real-time multitask operation system RTX51Tiny was used in the software design. After calibrated and modified, the measuring apparatus has very high precision.

Key words: single chip microcomputer; real-time multitask; insulator; distributed voltage

## 0 引言

目前, 判断绝缘子的性能主要有 2 种: 以超声波法、红外线法为代表的非电量测量方法和以电压分布法、绝缘电阻法为代表的电量测量方法<sup>[1, 2]</sup>。电压分布法作为一种传统的绝缘子在线检测方法, 能直观准确的判断是否存在有低零值绝缘子, 是目前输电线路采用最多的检测方法<sup>[3]</sup>。沿绝缘子轴线, 正常绝缘子串的分布电压是近似 U 型的曲线, 如果一串绝缘子中存在有低零值绝缘子, U 型曲线的形状就会明显的畸变, 以此为依据, 采用各种判断方法<sup>[4, 5]</sup>,

就可以发现绝缘子串中不良或低零值绝缘子。根据分布电压的低零值绝缘子判断方法在很多文献中都有研究和比较, 笔者不再赘述。基于高压绝缘子串分布电压法的各种判据, 都应该在基于准确测量高压绝缘子串分布电压的基础上, 笔者设计的测量仪正是针对这一要求而研制的。

## 1 C8051F330 单片机的特点

C8051F 系列单片机是完全集成的混合信号系统级芯片, C8051F330 单片机是该系列中的一款<sup>[6]</sup>, 特别适用于电池供电的场合及便携式设备中, 其特点为: ①高速: C8051F330 峰值执行速度是标准 8051 的 12 倍, 最高峰值速度可达 25 MIPS; ②低功耗: 在 2.7 V 电压 32 kHz 条件下工作电流仅为 9  $\mu$ A, 25 M 的高速功耗也仅 6.4 mA, 这时所有的外设模块都可用, 关闭后功耗可以进一步降低; ③丰富的硬件资源: C8051F330 内部集成了两个内部振荡器、UART、SMBus、SPI、4 个 16 位的 Timer、3 个 PCA、内部电压基准、温度传感器、1 个 10 位的多通道 A/D、1 个 10 位的电流输出型 D/A、8 kB 的可在线编程 FLASH。整体为 20 管脚封装, 体积小, 功能强大, 是一款性能优越资源丰富的单片机。笔者所设计的测量仪采用它作为核心 MCU, 大大减少了外围电路的设计。

## 2 测量仪硬件设计

### 2.1 系统概述

该测量仪是一个和后端手持控制器相配合使用的装置。后端控制器用来控制测量仪, 其主要功能包括启动测量、接收测量数据、实时显示、低零值绝缘

子判断以及数据存储。测量仪和控制器之间采用无线数据传输方式,以方便检测人员在杆塔上下远距离通讯操作。测量仪由测量探针、测量套筒、绝缘操作杆组成,其外观见图1。

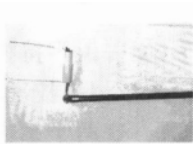


图1 测量仪外观图

测量探针采用具有一定韧性的钢丝,保证与绝缘子金具良好接触。测量套筒外壳为聚四氟乙烯材料,内部放置有铝合金屏蔽舱。由于高压铁塔上电磁干扰很严重,为了提高测量装置的抗干扰能力,整个测量电路板和供电电池都放置在该铝合金屏蔽舱中加以屏蔽。绝缘操作杆为类似钓鱼竿的结构,长度可以由操作人员自由控制伸缩。整个检测仪重量轻,携带方便,抗外界干扰能力强。

## 2.2 硬件组成与功能实现

根据测量原理,测量仪内部的硬件组成见图2。

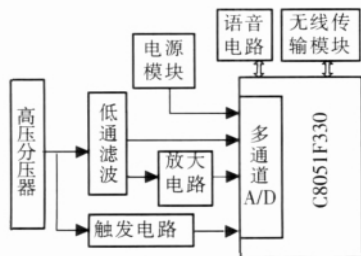


图2 测量仪内部硬件结构图

### 2.2.1 高压分压器

高压分压器采用传统的电阻分压<sup>[7]</sup>,为了保证分压器的线性度,高压臂和低压臂电阻使用的是特制的具有相同温度系数的高压电阻,见图3。为了保证分压器的绝缘强度,把高压臂电阻密封在环氧树脂中。高压分压器设计的测量范围为200V~30kV,可适用于220kV及以下输电线路绝缘子分布电压的测量。

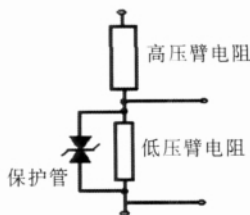


图3 分压电路图

### 2.2.2 测量触发

在测量高压绝缘子分布电压的时候,测量仪在接收到测量命令后,必须知道何时启动测量。为此,测量仪中设计了测量触发这一环节。

触发电路为一个双向限幅电路,输出接到C8051F330多通道A/D的一个通道,用来检测分压

器低压臂电阻上面是否有分压信号。触发判断采用软件的方法实现:利用C8051F330的A/D具有可编程窗口检测功能,设置一个触发门限,当触发电路的输出电压采样值在大于或等于这个门限值时,表明测量仪的探针上面已经感应到非常高的电压了,只有测量探针在靠近或者接触到高压绝缘子的时候,这个条件才满足。因此,测量仪采用测量触发来判断测量仪是否靠近或接触高压绝缘子。

为了防止误触发,测量仪做了如下设定,即必须连续触发10次才算是稳定触发。

### 2.2.3 信号调理与放大电路

测量探针上面感应的信号经过分压器分压后主要为工频信号,还有一些其它的高频噪声信号,为了滤除其中的高频干扰,分压器出来的信号先经过一个低通滤波器滤波。为了使小电压测量也准确,低通滤波器后端又设计了一个放大10倍的放大电路,这样测量就分成了两个量程:大电压测量和小电压测量。测量程序采用先直接测量经过低通滤波后的分压电压,如果测量到的电压有效值小于某一值(非饱和和波形有效值)的时候,就切换到测量放大10倍后的分压电压,这样测量仪在测量大电压和小电压的时候,都可以达到需要的测量精度。

### 2.2.4 电源管理

为了减小体积和重量,测量仪使用一节5号电池供电,经过1.2V转3.3V的高效DC/DC升压模块后,对测量仪内部各模块电路进行供电。为了省电,各个功能模块只有在工作的時候才对其供电。C8051F330具有两种省电模式:空闲模式和停机模式,测量仪在等待命令状态的时候,C8051F330可自动进入空闲模式,空闲模式可以用中断唤醒。测量仪在长时间空闲不用时,C8051F330会进入停机模式,将功耗降低到最低。另外,系统采用软件实时监测电池的电压,在电池电量快用完时,通过语音报警来提示更换电池。

### 2.2.5 无线数据传输模块

测量仪的无线数据传输模块采用的是微功率无线收发模块,此模块使用集成有8051内核的低功耗收发一体化RF芯片CC1010,使用50、1/4波长的绕线天线,串口接口方式。

在杆塔上或者杆塔附近,对无线电设备产生的干扰主要是导线和金具电晕产生的无线电干扰(RI)<sup>[8]</sup>,无线电干扰水平与干扰频率关系密切,随着频率的增加,干扰水平逐渐下降,当频率在0.5~30MHz内,干扰水平随着频率的增加而急剧衰减。一般情况下,无线电干扰对中波影响较大,而对于49.75~222.75MHz的电视广播带及其以上的频率,无线电干扰可忽略。CC1010使用的是ISM频段(300~1000MHz),正好

在输电线路无线电干扰影响的范围外。

在实际应用中,影响无线模块的通讯距离的主要因素是来自测量电路板的电磁干扰,特别是DC/DC升压开关电源模块的开关频率的影响,为了避免测量电路板的电磁干扰对无线传输距离的影响,无线模块和测量电路板用金属薄板相互隔开,以保证无线模块的有效传输距离。

### 2.2.6 语音提示

在测量过程中,一些语音提示会给操作人员带来很大的方便,根据不同的语音提示,操作人员进行相应的操作。测量仪通过软件控制I/O口输出不同频率的方波来使蜂鸣器产生不同的声音。

## 3 测量算法和测量稳定条件

高压电网为工频交流电,频率在为50 Hz,上下波动不到0.1 Hz,在频率稳定的情况下,可以直接按照有效值的定义来计算工频电压的有效值

$$U_{ms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1)$$

在C8051F330中可以用式(2)计算

$$U_{ms} = \sqrt{\frac{[u^2(1) + u^2(2) + \dots + u^2(N)]}{N}} \quad (2)$$

一个周期内采样的点数越多,计算结果也越精确。为了保证每次测量值对应绝缘子的真实分布电压,测量程序采用了如下测量稳定条件:等间隔测量9个周期波形的采样有效值,将这9个值按从小到大的顺序排序,如果最大值和最小值与中间值的相对误差在1%以内,说明这一组测量值是有效的,把中间值作为本次的测量值。如果误差超过1%,就需要重新测量9个周波的采样有效值,重新进行判断,直到满足这个条件。

测量程序采用该测量稳定条件的原因为:在测量探针靠近绝缘子过程中,或者测量探针和绝缘子接触不良时,测量探针两端的电压一直是迅速变化的,很难满足这个条件,只有在测量探针稳定和高压绝缘子片接触良好的情况下,条件才容易满足,得出正确的测量结果。所以这个测量稳定条件既可以保证每次测量出来的值真实对应绝缘子的分布电压,同时也对测量的9个值作了一次中值滤波。

50 Hz的工频信号,采样一个周期需要花0.02 s,采样9个周期需要花0.18 s,加上周期之间的间隔时间,完成一次采样所需的时间不超过0.3 s。由于C8051F330运算速度非常快,计算9个周期波形有效值和进行判断所花的时间非常短,所以完成一次测量和判断的时间还不到1/3 s,在测量探针和高压绝缘子接触良好以及电网稳定的情况下,从触发到满足测量稳定条件,一般在1 s内就可以完成,测量速度非常快。

## 4 测量仪校准

测量仪在初次使用时,需要进行校准工作。校准方法如下:在实验室条件下,由工频升压器输出准确的1.5 kV和15 kV工频电压,作为校准电压,校准过程和一次测量过程一样,由手持控制器向测量仪发送校准命令,然后用测量仪去校准这两个值,校准后得到两个浮点数系数,这两个系数就是两个测量量程从高压输入到采样计算的有效值之间的线性放大系数,利用C8051F330有FLASH可在线编程的功能,将这两个系数存放在C8051F330内部的FLASH中。这样做一是可以跳过所有中间的分压和放大环节的分压比和放大倍数,使得放大电路的电阻不必取高精密电阻,只要满足温度系数就可以;二是由于时间长久后,分压电路的分压比可能会有细小变化,可以在使用一段时间后,重新进行校准。

## 5 系统软件设计

在传统的软件开发模式下,程序由一个主循环控制,通过判断不同的标志轮循调用各功能函数,主循环中调用的模块按顺序运行。这种方法的缺点是:除中断服务程序以外,各程序模块没有优先级的区别,被主循环简单地轮转调用,实时性差,响应时间无法预料;而且,当一个任务申请不到资源,或循环过程中由于某种原因无法跳出循环时,其他任务将得不到响应,程序稳定性差。引入实时多任务操作系统就能解决传统软件开发模式下实时性和稳定性较差的问题,大大降低了软件开发的复杂度。

考虑到整个系统任务较多,为了使系统更稳定可靠,并能够充分发挥C8051F330的性能,软件采用了小型操作系统RTX51Tiny,该操作系统是一个专门针对51系列单片机的实时多任务操作系统<sup>[9]</sup>,可以很容易的运行在没有扩展外部存储器的单片机系统上,最重要的是它仅占用800字节左右的程序存储空间,正好适合C8051F330的代码空间不大,外部XRAM较小的特点。

该软件系统主要有7个任务:接收命令、电池电压监测、测量触发、电压测量、发送数据、校准、声音提示。任务的建立和删除是使用RTX51Tiny的系统调用函数os\_create\_task()和os\_delete\_task()来实现;任务和任务之间,中断和任务之间的通讯使用os\_send\_signal()和isr\_send\_signal()来实现;任务主要通过os\_wait()函数来等待时间延时和信号量。除了接收命令任务和电池电压监测任务是永久性任务外,其他任务都是在执行完后,就删除掉自身,在下次接收到命令后再重新建立相应任务。图4为系统软件结构框架图。

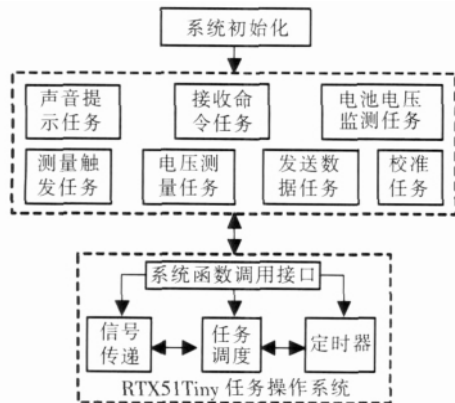


图 4 系统软件结构框架图

## 6 测试与修正

在上海交通大学高压实验大厅内搭建测试环境,由工频升压器输出工频高压,输出接瓷质绝缘子,用数字千伏表测量绝缘子的电压,作为比较。配合手持控制器发送命令对测量仪进行测试。在测量仪校准好后,改变工频升压器的输出,对测量仪测量精度进行测试,测量数据见表 1。

表 1 测试结果

测量读数/V	数字千伏表读数/kV	误差/%
535	0.53	0.943 396
1 179	1.17	0.769 231
1 501	1.50	0.066 667
3 524	3.49	0.974 212
5 281	5.26	0.399 240
8 842	8.77	0.820 981
11 572	11.54	0.277 296
13 903	13.83	0.527 838
15 034	15.02	0.093 209
17 085	17.12	-0.204 44
19 987	20.11	-0.611 64
21 695	21.94	-1.116 68
22 157	22.56	-1.786 35
23 896	24.61	-2.901 26
26 130	27.05	-3.401 11
28 963	30.34	-4.538 56

测试结果表明:测量 21 kV 以下的电压,误差都非常小,但在超过 21 kV 后,测量误差开始超过 1%,而且随着电压的升高,测量值比实际值偏小越来越多。经实验和理论分析发现,在高压情况下,随着测量电压升高,分压器的分压比会逐渐变小。在经过大量测试数据分析后,得出了一个修正系数,通过软件修正后,21 ~ 30 kV 的电压测量精度也小于 1%。

## 7 结语

介绍的高压绝缘子分布电压测量仪充分利用了 C8051F330 单片机的优越性能和片内丰富的硬件资源。软件的设计采用了 RTX51Tiny 实时多任务操作系统,在降低软件开发的复杂度的同时,也提高了系统的稳定性和实时性。

该测量仪在经过校准和修正后,测量精度能达到 1%。在测量触发和测量稳定条件的保证下,能够真实测量每片绝缘子的分布电压,而且测量速度快。在语音的提示下,和后端手持控制器相配合使用,操作过程十分简单方便。

## 参考文献:

- [1] 王雪,张冠军,严璋.国内高压绝缘子在线检测方法综述[J].电磁避雷器,2002(6):3-5,8.
- [2] 聂一雄,尹项根.绝缘子在线检测方法的探讨[J].电磁避雷器,2000(2):3-8.
- [3] 程养春,李成榕,马晓华.电场法带电检测零值绝缘子的研究[J].高电压技术,2002(Z1):8,63.
- [4] 江秀臣,李锋,付正才,等.低零值绝缘子判断方法的研究[J].高电压技术,1995,21(3):72-75.
- [5] 江秀臣,安玲,朱宇,等.检测劣质绝缘子的新方法——敏感绝缘子法[J].中国电机工程学报,2002,22(9):108-112.
- [6] 潘琢金.C8051F330/1混合信号ISP FLASH微控制器数据手册[Z].
- [7] 迟永久,牛海清.电阻分压器及电压传感器的结构设计和实验分析[J].变压器,2002,39(5):21-24.
- [8] 彭育俊.浅谈输电线路的电晕干扰[J].中国科技信息,2005(21):127.
- [9] Keil Company. RTX51Tiny User's Guide[Z].

(上接第 379 页)

间里未有明显气体泄漏检出。说明采用的封堵材料以及封堵工艺是完全有效的,它可以有效解决气体绝缘设备泄漏问题,并能长期保持封堵效果。

## 3 结语

采用双组分粘接剂并结合相应的无机纳米填料,实现了气体绝缘设备气体泄漏问题,具有带压堵漏、工艺简单、堵漏密封效果良好的特点,为气体绝缘电力设备的可靠运行提供了保证。

## 参考文献:

- [1] 徐世晓,赵新全,孙平,等.温室效应与全球气候变暖[J].青海师范大学学报:自然科学版,2001(4):43-47.
- [2] 胡克芳,钱慧河,王锐,等.纳米 SiO<sub>2</sub> 对 PET 熔体的增稠作用及改进方法[J].聚酯工业,2004,17(1):16-18.
- [3] Tom Mctae. Gasvue and the Magnesium Industry: Advanced SF<sub>6</sub> Leak Detection [EB/OL]. <http://www.owr.ehnr.state.nc.us/ref/22/21578.pdf>.
- [4] 吴变桃,肖登明,尹毅.SF<sub>6</sub>气体泄漏光学检测新技术[J].高压电器,2005,41(2):116-118.