

doi: 10.7690/bgzdh.2026.04.010

# 基于单片机的绝缘电阻检测电路设计

潘泽涛, 陈机林, 姬裕莹, 李 勃

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对现有的绝缘检测电路抗干扰性差、测量精度不高等问题, 设计一种绝缘检测电路。以 STM32 单片机为核心控制部件, 采用光电隔离和陷波电路对采样信号进行处理, 采用 AD7192 采样芯片完成电压采集, 将测得的数据传送至单片机。对检测电路进行测试的结果表明: 该设计提高了测量精度, 满足检测需求。

**关键词:** 绝缘检测; 单片机; 光电隔离; 陷波电路

**中图分类号:** TM934.1 **文献标志码:** A

## Design of Insulation Resistance Detection Circuit Based on MCU

Pan Zetao, Chen Jilin, Ji Yuying, Li Bo

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of poor anti-interference and low measurement accuracy of the existing insulation detection circuit, an insulation detection circuit is designed. The system uses STM32 microcontroller as the core control component, uses photoelectric quarantine and trap circuit to process the sampling signal, uses AD7192 sampling chip to complete the voltage acquisition, and then transmits the measured data to the microcontroller. The test results of the detection circuit show that the design improves the measurement accuracy and meets the detection requirements.

**Keywords:** insulation testing; MCU; photoelectric isolation; notch circuit

### 0 引言

为了用电安全, 大型设备系统内部电缆的绝缘电阻一般在兆欧级以上。因为长期积污和运行发热等原因导致绝缘材料老化<sup>[1]</sup>, 绝缘性能下降。为了设备正常运行, 通过定期进行绝缘电阻检测, 能有效避免绝缘故障。目前, 对于绝缘电阻检测大部分仍采用人工检测<sup>[2]</sup>, 检测效率慢、耗时长且易漏测错测; 采用的检测电路原理方法多为电桥法、电流计法, 检测误差较大。为提高检测效率和检测精度, 设计一种基于单片机的绝缘电阻检测电路。电路中采用光电隔离法实现电气安全隔离, 保证检测准确性和安全性, 使用 24 位精度的 AD7192 芯片完成电压的采集, 实现电阻的精确计算。

### 1 绝缘电阻检测电路

绝缘电阻检测电路由电阻分压电路、信号调理电路、过压保护电路和电压采集电路组成。

#### 1.1 电阻分压电路

电阻分压采样电路由隔离驱动电路, 开关电路和分压测量电路组成。隔离驱动电路主要由光耦芯片 6N137 和电压跟随器构成, 如图 1 所示。

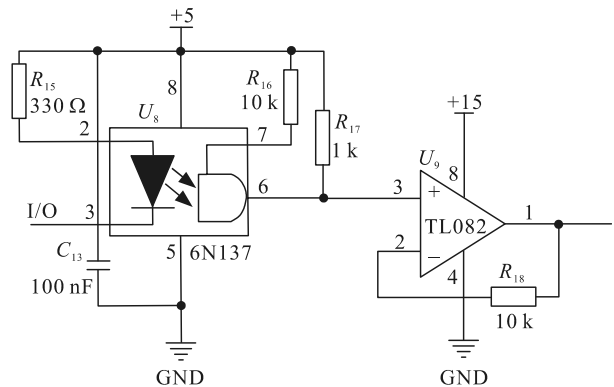


图 1 隔离驱动电路原理

光耦芯片实现电气隔离, 单片机的 I/O 口通过引脚 3 接入到电路中, 通过 I/O 口输出高低电平来控制整个驱动电路的输出。驱动开关电路中的晶体管需要足够的电流驱动能力, 在输出处增加一个电压跟随器来实现负载驱动功能。

开关电路主要由 2 个晶体管构成<sup>[3]</sup>, 通过控制晶体管 2 的基极电压来控制晶体管 1 的导通与断开, 实现电路的开关功能, 如图 2 所示。分压测量电路由 2 条测量回路构成, 测量电阻  $R_{23}$  和  $R_{24}$  组成回路上  $R_2$  的压降  $A_{IN1}$ , 可得实际电压:

$$U = (R_{23} + R_{24})A_{IN1}/R_{24} \quad (1)$$

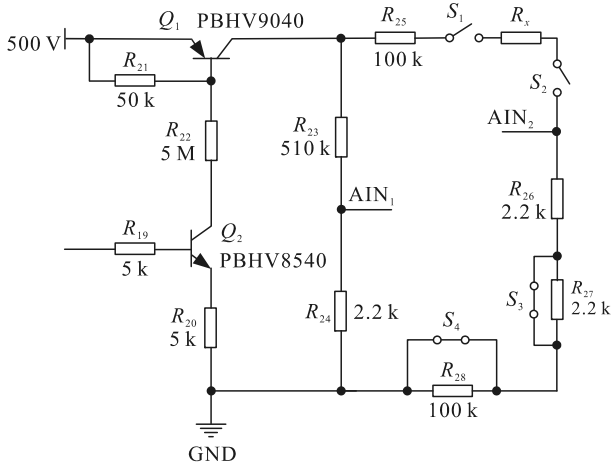


图 2 开关和分压测量电路原理

将待测绝缘电阻两端通过继电器开关  $S_1$  和  $S_2$  接入测量回路中。 $R_{26}$ 、 $R_{27}$  和  $R_{28}$  组成采样电阻， $R_{27}$  和  $R_{28}$  为量程切换电阻，通过  $S_3$ 、 $S_4$  决定是否接入测量回路中，进而改变电路测量范围。另外， $R_{25}$  为限幅电阻，防止绝缘短路时采样点电压过大。测量回路上采样电阻上的压降  $A_{IN2}$ ，结合实际电压  $U$  可得：

$$R_x = \frac{(R_{23} + R_{24} - A_{IN2}R_{24})R}{A_{IN2}R_{24}} - R_{25} \quad (2)$$

式中  $R$  的值由  $S_3$  和  $S_4$  的开关状态决定，分别为 2.2、4.4、102.2、104.4 K。

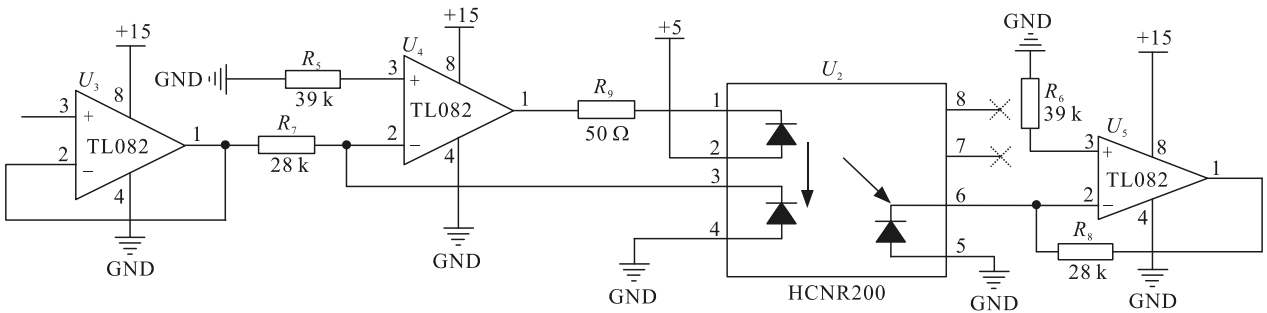


图 4 光电隔离电路原理

输入端是一个电压跟随器电路，提供足够大的输入阻抗和趋近于零的输出阻抗，有效降低导线内阻对电压信号采集的影响。 $U_4$ 、 $U_5$  和光耦芯片 HCNR200 构成了隔离电路。

由于光耦芯片内部是由电流信号进行传输，而采样信号为电压信号，因此需要信号转化电路。输入端的运放电路完成电压到电流的转换，输出端则完成电流到电压的转换。输入端的运放  $U_4$  的反相端与芯片引脚 3 相连从而形成负反馈电路，在理想运放的情况下可得：

$$I_{PD1} = A_{IN} / R_7 \quad (4)$$

## 1.2 信号调理电路

信号调理电路由光电隔离电路和陷波电路组成。绝缘电阻检测时被测电阻两端加载直流高压，其对微弱模拟信号存在干扰作用。同时检测回路采用电阻分压形式，一旦发生故障，存在高压击穿芯片问题。为了保证检测的准确性和安全性，需要在采样信号与采集电路之间增加一个隔离电路，实现在电气上的完全隔离。采用 HCNR200 线性光耦芯片作为检测电路的隔离芯片<sup>[4]</sup>，芯片内部主要包含高性能发光二极管 LED、反馈光电二极管  $PD_1$  和输出光电二极管  $PD_2$ ，其中  $PD_1$  与  $PD_2$  在制造时高度匹配，芯片原理如图 3 所示。

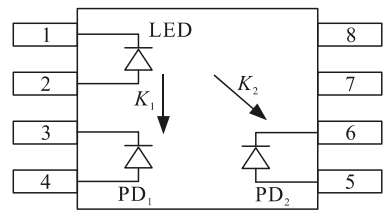


图 3 HCNR200 原理

电路正常运行时，LED 导通发光，产生电流  $I_f$ ，通过  $K_1$  和  $K_2$  电流传输比产生光电流  $I_{PD1}$  和  $I_{PD2}$ ，电流计算公式为：

$$I_{PD} = K I_f \quad (3)$$

光电隔离电路如图 4 所示。

输出端的运放  $U_5$  反相端与其输出端口通过电阻相连形成反馈通道，引脚 6 输出的电流和反馈通道流过电阻的电流方向大小均相同，可得：

$$U_{out} = I_{PD2} \cdot R_8 = \frac{K_2 R_8 A_{IN}}{K_1 R_7} \quad (5)$$

当  $K_1 = K_2$  时，输出电压与输入电压之比由  $R_1$  和  $R_2$  决定，实现了线性隔离。

经线性隔离后的信号，仍会受外部存在的各种干扰信号影响，其中主要的干扰信号为 50 Hz 的工频干扰。为了消除干扰，采集有效信号，将信号接入到有缘滤波电路进行滤波。采用双 T 陷波电

路<sup>[5]</sup>对信号进行滤波处理，电路如图 5 所示。

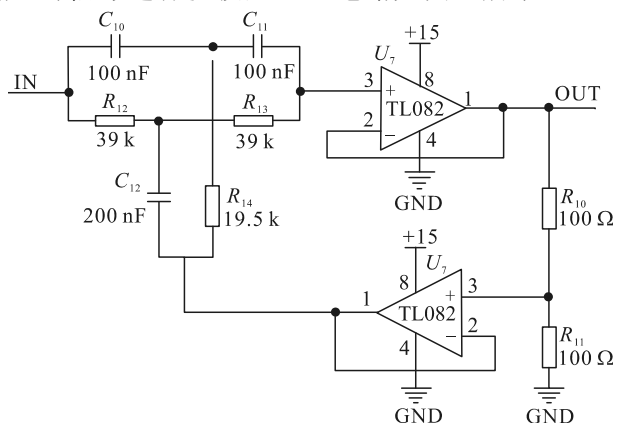


图 5 双 T 陷波电路原理

通过双 T 网络将电路的中心频率设置为 50 Hz，频率计算公式：

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6)$$

电阻  $R_{10}$ 、 $R_{11}$  和运放  $U_7$  构成正反馈通路，通过正反馈能更快更有效的滤除工频干扰，提高信号质量。

### 1.3 过压保护电路

过压保护电路<sup>[6]</sup>由电压比较器和光耦芯片 6N137 组成，如图 6 所示。

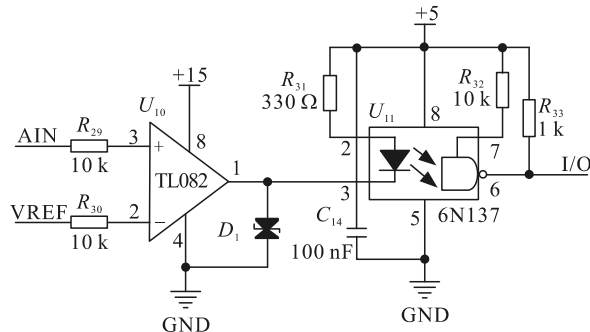


图 6 过压保护电路原理

运放的同相输入端来自电阻分压采样点的电压，反相端则来自单片机的 I/O 口的输出电压为参考电压。若采样点的电压大于参考电压，即电路过压时，电压比较器输出高电压，经过光耦芯片输出为 5 V 的高电平，对应的逻辑信号 1。初始化相应 I/O 口的中断，检测到 I/O 口输入电压从低到高的上升沿变化时，进入中断处理程序控制驱动电路的 I/O 输出为零，将开关电路关闭，从而实现电路保护功能。

### 1.4 电压采集电路

采用 AD7192 芯片<sup>[7]</sup>进行电压采集，该芯片内置一个低噪音、24 位  $\Sigma$ - $\Delta$  型模数转换器，适合高精度测量应用，如图 7 所示。

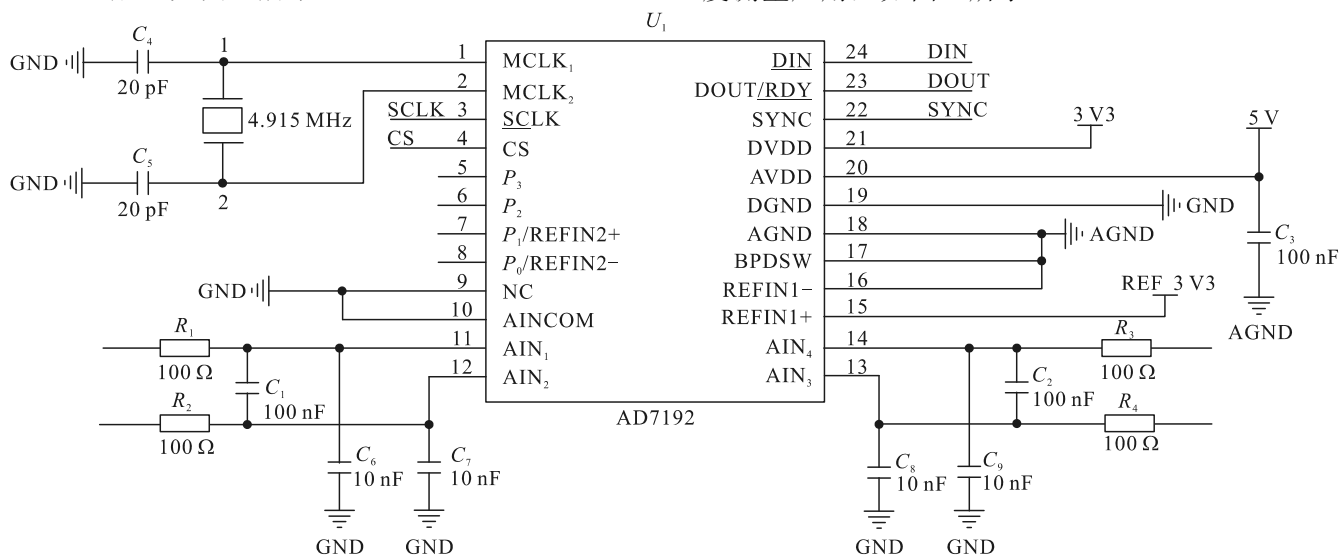


图 7 电压采集电路原理

可配置为 2 路差分输入或 4 路伪差分输入。片内通道序列器可以使能多个通道，按顺序在各使能通道上执行转换，简化与器件的通信。通过单片机控制片内寄存器的读写操作，完成电压数据的采集。

## 2 电路仿真分析

通过 Multisim 电路仿真软件<sup>[8]</sup>进行电路的搭建

和仿真，通过实验进行误差分析与修正。

### 2.1 滤波仿真分析

将 50 Hz、0.2 V 的干扰电压信号串联进滤波电路的输入端，通过示波器 2 个通道同时进行测量，可以得到接入滤波电路和未接入滤波电路的电压信号对比，如图 8 所示。

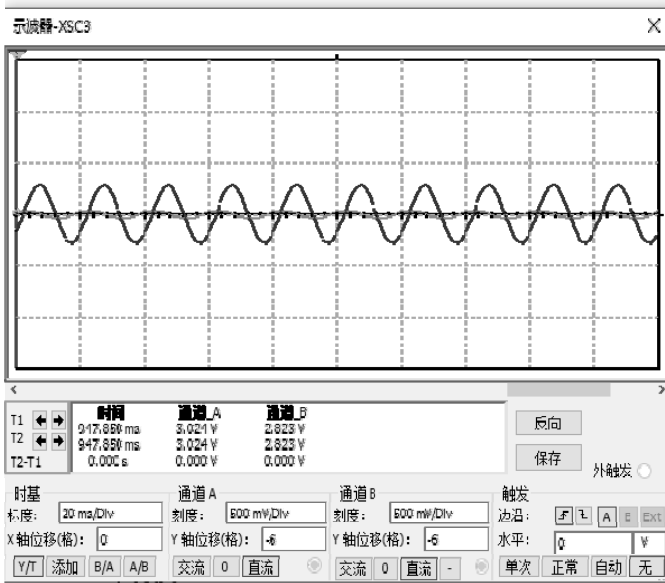


图 8 滤波电路仿真

图 8 中，通道 A 得到的数据为接入滤波后得到的电压信号值，通道 B 为未接入滤波得到的电压信号值。可以明显地看到：在接入滤波后，对于 50 Hz 的干扰信号进行了较好的衰减，衰减为原本的 13%。

为更好地消除干扰信号的影响，可以接入更大的电阻  $R_{10}$ ，进而令正反馈系数更接近于 1，提高滤波电路的品质因数，使得带阻的范围变窄，对中心频率衰减越快，电路的滤波效果得以提升。将  $R_{10}$  的电阻值调整为原来的 5 倍，相同条件下再次仿真，得到的仿真结果如图 9 所示。

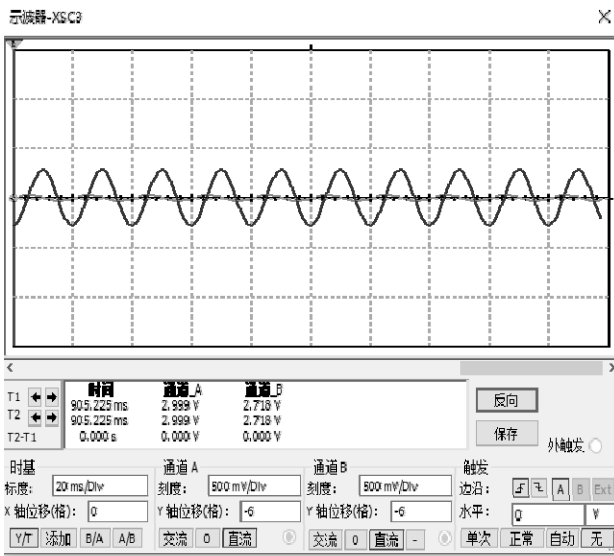


图 9 改进的滤波电路仿真

干扰信号衰减为 0.4%，提高了对于干扰信号的衰减效果，有利于对干扰信号的消除，提高绝缘电

阻检测的准确性。

### 2.2 电阻测量分析

在检测电路中接入不同数值的电阻  $R_x$ ，采集相应的电压，通过式(2)算出对应的测量电阻值，与实际电阻值进行比较，测量结果如表 1 所示。

表 1 电阻测量表

实际电阻值 $R_x/k\Omega$	测量电阻值 $R_y/k\Omega$	相对误差 $\delta/\%$
800	792.4	0.95
1 000	1 016.5	1.65
2 000	2 036.3	1.82
3 000	3 049.7	1.66
4 000	3 972.5	0.79
5 000	5 056.7	1.13
6 000	5 913.4	1.44
8 000	8 094.3	1.18
9 000	9 113.4	1.26

通过计算，可以得出该电路测量误差在 2% 以内，能够满足绝缘检测的测量精度要求。

### 3 结束语

笔者基于单片机设计一种绝缘电阻检测电路，采用光电隔离电路和陷波电路对采样信号进行处理，消除信号干扰的同时也对后级 AD 采集电路进行了电气隔离保护。选用 24 位精度的 AD7192 芯片来完成模拟信号到数字信号的转变，提高了检测的准确性。通过电路仿真验证了滤波电路对于干扰信号的消除作用，以及电路对于 0.8~9 mΩ 范围内的绝缘电阻具有较高的测量精度，能够满足大型设备内部电缆的检测要求，提高检测精度。

### 参考文献：

- [1] 吴双双, 柏文琦, 杨宇祥, 等. 电缆故障测试方法综述[J]. 电线电缆, 2022(1): 1-5.
- [2] 田登辉, 李锦明. 基于单片机的电路设备导通测试装置设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(3): 32-36.
- [3] 欧志新. 改进一种高压开关联锁电路触发保护的研究[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(2): 72-74, 86.
- [4] 赵灵豆, 任勇峰, 贾兴中. 高精度放大隔离电路的研究与设计[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(3): 219-223.
- [5] 蒋亚超, 杨勇, 李兴东, 等. 三种双 T 网络陷波电路分析与比较[J]. 电子技术, 2011, 38(1): 70-72.
- [6] 黄勇煜. 输出过压保护电路的设计思路[J]. 电子产品世界, 2023, 30(4): 73-75.
- [7] 郭照宝, 曹大平. 24 位高精度磁传感器数据采集系统的设计[J]. 电子技术应用, 2014, 40(5): 75-78.
- [8] 赵成雨. 基于 Multisim 的交流电参量检测电路的设计[J]. 电工技术, 2023, (4): 91-92, 95.