

文章编号:1005-0523(2013)03-0096-05

# 互相关技术在钳口法接地电阻检测中的应用

余为清

(华东交通大学载运工具与装备省部共建教育部重点实验室,江西 南昌 330013)

**摘要:**论述了钳口法接地电阻检测的工作原理。通过对信号互相关的分析,重点对带有噪声的微弱感应电流信号的提取方法进行了分析。给出了以AD630锁相器为核心的信号处理模块,利用DDFS芯片ML2035信号作为参考信号,实现了对接地回路感生电流信号的锁相放大,通过实验标定的方式,确定出接地电阻计算的系数,该方法能够有效地抑制噪声,提高接地电阻的测量精度,简化了信号提取电路,同时由于输出信号为直流,降低了信号采样的难度。

**关键词:**接地电阻;互相关;锁相放大;AD630

**中图分类号:**TM934.15

**文献标志码:**A

建筑物防雷网通过引线引入大地,防雷网与大地之间的接地电阻,直接关系到防雷的效果,为此,应定期对接地电阻进行检测。钳口法作为一种新型的免地桩接地电阻检测方法,具有施工简便,测试效率高等突出优点,在日常巡检或对重点单位接地电阻连续在线监测方面有着广泛的应用,检测结果可以作为数据参考,以及时发现接地问题,报告气象部门进行精确检定。钳口法是利用互感原理而工作的,仪器回检的信号非常微弱,且伴随大量的噪声信号,如何有效提取有用的感应信号,抑制噪声是提高钳口法检测精度所面临的主要问题,目前,异频法通过信号放大、滤波、频谱分析及复阻抗计算等方法可以有效削弱工频的干扰。提高接地电阻测量仪的抗干扰性,为了避开某些固定频率的干扰,部分接地电阻检测仪具备自动变频能力<sup>[1-2]</sup>。

## 1 钳口法接地电阻检测原理

钳口法测量接地电阻是基于法拉第电磁感应原理工作的。钳口法适用于检测有多条接地线的建筑物防雷接地电阻。检测原理如图1。钳口法一般采用电压钳口与电流钳口的双钳结构,电压钳口将激励信号耦合到接地网,电流钳口对回路中的电流进行检测。常见工频测量接地电阻的方法,由于接地网中,除有较大的功率零序电流外还有较大的谐波电流,传统的工频测量难以消除<sup>[3-4]</sup>。

图1中, $R_z$ 为除被检测接地线外,其他接地线接地电阻的并联值, $R_x$ 为待测接地电阻; $N_g$ 为绕在电压互感钳口内的线圈匝数; $N_i$ 为绕在电流钳口内的接收线圈匝数。电压互感器

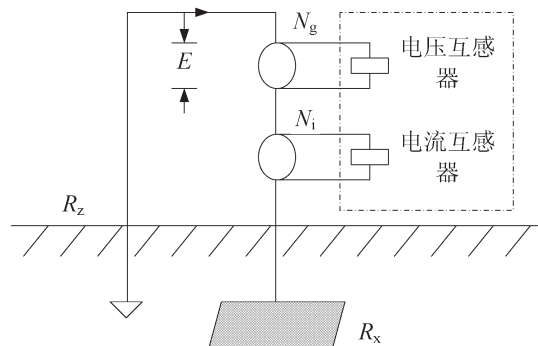


图1 钳口法测量原理图  
Fig.1 The schematic diagram of clamping measurement

收稿日期:2013-03-10

作者简介:余为清(1979—),讲师,硕士。研究方向为智能仪器仪表,机电一体化,设备故障诊断技术。

在被测接地回路内发生一个频率一定交流电压  $E$

$$E = e / (N_g k_1) \quad (1)$$

式中:  $e$  为电压互感器激励电压,  $k_1$  是由于磁场泄露等造成的损失系数。

闭合回路内将产生感应电流  $I$

$$I = E / (R_x + R_z) \quad (2)$$

该电流同时形成同频感应磁场, 电流互感器上感应到该磁场后, 产生感应电流  $i$

$$i = I / (N_i k_2) \quad (3)$$

式中:  $N_i$  为电流互感器的线圈匝数,  $k_2$  为由于磁场泄露造成的损失系数。当电压互感器及电流互感器的物理结构固定后,  $k_1, k_2$  为常数, 可由实验法测量得到。由于  $R_z \ll R_x$ , 可以认为  $R_z$  为 0, 则建筑物的接地电阻为

$$R_x = \frac{e / (N_g k_1)}{i N_i k_2} \quad (4)$$

可以看到, 电压互感器的激励电压  $e$  可以被 A/D 变换器直接采样测量, 但感应电流  $i$  十分微弱, 且往往是伴随大量的噪声的周期信号, 为此必须对感应电流信号进行分离噪声的处理。

### 3 信号的互相关分析

对于伴有噪声的周期信号<sup>[5]</sup>

$$X(t) = S(t) + N(t) = A \sin(\omega t + \phi) + N(t)$$

其中:  $S(t)$  为有用信号; 其幅值为  $A$ ; 角频率为  $\omega$ ; 初相角  $\phi$ ;  $N(t)$  为随机噪声。为  $X(t)$  提供一个同频的简谐信号  $Y(t)$  作为参考

$$Y(t) = B \sin \omega(t + \tau)$$

其中:  $B$  为同频简谐信号幅值;  $\tau$  是时间延迟, 则两者的互相关函数为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)Y(t + \tau) dt = \frac{AB}{2} \cos(\omega\tau + \phi) + R_{NY}(\tau)$$

$R_{NY}(\tau)$  是  $N(t)$  与  $Y(t)$  的互相关函数。由于  $Y(t)$  与  $N(t)$  互不相关(不同频情况下), 所以  $R_{NY}$  一项为零, 这样

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t)Y(t + \tau) dt = \frac{AB}{2} \cos(\omega\tau + \phi) \quad (5)$$

由此可见, 两个均值为 0, 且具有相同频率的周期信号, 其互相关函数中反映了各自的幅值信息和相位信息<sup>[6]</sup>, 而噪声对互相关的输出没有贡献, 可以大幅度的削弱噪声的影响。由电磁感应定律可知, 电压钳口的激励电压  $e$  与电流钳口的检测电流  $i$  具有同频的性质, 可以通过信号的互相关运算, 抑制噪声, 提取有用信号。

### 4 互相关分析的硬件实现

对于存在噪声的非周期信号, 一般采用带宽压缩法抑制噪声, 对于存在噪声的周期信号, 采用频域窄带化处理的方法更为有效<sup>[7-8]</sup>。利用集成锁相放大器芯片 AD630 可以实现频域窄带化处理, 实质就是一个高品质因素的滤波器。

锁相放大器实际就是一个模拟的傅立叶变换器, 相敏检波器是锁相放大器的核心, 由相敏检波器完成互相关运算中的相乘运算。

设输入信号为  $U_s = E_s \sin(2\pi f_1 t + \phi_1)$ , 参考信号为  $U_c = E_c \sin(2\pi f_2 t + \phi_2)$ , 那么

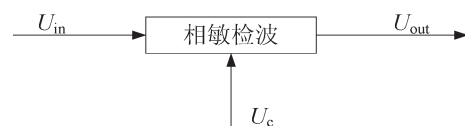


图2 互相关运算乘法电路  
Fig.2 The multiplying circuit of cross correlating operation

$$U_{\text{out}} = U_s U_c = \frac{E_s E_c}{2} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] - \frac{E_s E_c}{2} \cos[2\pi(f_1 + f_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)] \quad (6)$$

相敏检波器的输出包含着两个信号的和频与差频分量,当 $U_s$ 与 $U_c$ 同频时,这时候差频分量为0,该项变成了相敏直流分量输出,当两信号相位差为0时有最大输出,当两个信号正交时,输出为0;和频分量成为倍频信号,可以通过低通滤波器将倍频信号滤除。

接地电阻检测仪信号处理简图如图3。

为避开工频干扰,ML2035 DDFS 芯片产生异于工频及其高次谐波的正弦信号,信号频率为63 Hz。该信号一路经过AP功率放大后,驱动电压钳口,电流钳口的回检电流经过I/V变换后,经过LPF1低通滤波器后进入AD630,I/V变换系数为 $k_{I/V}$ 。由ML2035取出的信号经过移相器后,作为AD630的参考信号,AD630的输出信号经过低通滤波器LPF2后为直流信号,方便了微控制器的采样处理,由于ML2035工作在稳压模式下,可以稳定输出5 V的正弦信号,能够保证参考信号的稳定。

由电磁感应定律知,电流钳口能够感应出与ML2035发出信号同频的电流信号。AD630的两个输入信号具有同频的特点,为防止由于电路中存在的电容、电感的影响导致两信号产生正交,设置一个移相器,对ML2035提供的参考信号相位进行调整。

## 5 接地电阻检测仪的标定

由信号处理简图知

$$e = k3U_{\text{ML2035}} \quad (7)$$

其中: $k3$ 是功率放大器的放大倍数,可以被测量; $U_{\text{ML2035}}$ 为ML2035输出电压。

$$U_2 = k_{I/V}i \quad (8)$$

以模拟接地回路中串接标准电阻的方法,调整移相器,使得AD630的输出最大,此时输入AD630的两路信号相位差为零,AD630的输出电压为 $U_{a/d}$ ,可以送微控制器进行采样。

根据式(4)(6)(7)(8)可得:

$$\frac{k3U_{\text{ML2035}}}{N_g k1 R_x} = \frac{2U_{a/d} N_i}{U_{\text{ML2035}} k_{I/V} k2}$$

则接地电阻为

$$R_x = \frac{k3U_{\text{ML2035}}^2 k_{I/V} k2}{2U_{a/d} N_i N_g k1} \quad (9)$$

简记

$$R_x = K_s / U_{A/D}$$

式中: $K_s$ 为待定系数,通过标准电阻,以实验法对该系数进行标定。标定完成后,通过测量 $U_{a/d}$ 值,即可计算出待测接地电阻 $R_x$ 。为进一步提高检测精度,可以加入温度补偿。考虑到不同材料的接地线,具有不同的电阻温度系数,而温度的影响对接地电阻检测结果影响并不大,为简化硬件及软件设计,未做温度补偿。

利用互相关法在实验室条件下对仪器进行检测。测试设备:FLUCK17B万用表、精密电阻电桥测量仪、精密电阻、电磁藕荷线圈及信号发生器。实验方法:利用导线串入待测电阻,模拟接地回路。由电磁耦合线圈对回路施加干扰,第一次加入干扰频率50 Hz,第二次150 Hz,第三次3 000 Hz。测试结果如表1所示。

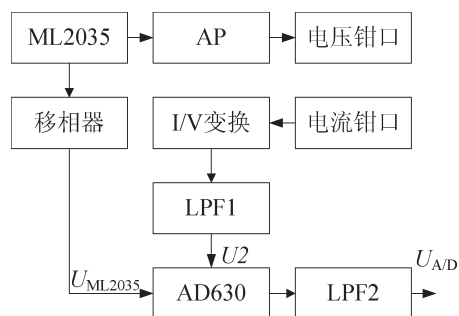


图3 接地电阻检测仪信号处理简图  
Fig.3 The signal processing diagram of grounding resistance detector

表1 实验室条件下电阻测试结果

Tab.2 The test results of resistance under laboratory conditions

标准电阻/ $\Omega$	测量结果/ $\Omega$			最大相对误差/%
	第1次	第2次	第3次	
0.10	0.10	0.11	0.10	10.0
0.47	0.47	0.46	0.46	2.0
0.68	0.68	0.69	0.68	1.5
1.00	1.00	0.99	1.00	1.0
2.20	2.21	2.22	2.21	0.5
4.70	4.70	4.71	4.71	0.2
6.80	6.80	6.80	6.81	0.1
10.00	9.98	10.01	10.00	0.2
22.00	22.03	22.01	22.00	0.1
47.00	46.91	47.10	47.20	0.2
75.00	74.50	44.99	7468	0.6
100.00	101.00	100.00	100.00	1.0

对某一建筑物六根接地线的接地电阻检测结果对比见表2。

表2 接地电阻检测结果

Tab.2 Results of grounding resistance testing

检测方法	$\Omega$					
	检测点序号					
	接地线1	接地线2	接地线3	接地线4	接地线5	接地线6
接地摇表法检测结果	6.5	7.1	7.2	8.2	6.3	5.2
互相关钳口法检测结果	6.6	7.2	7.1	8.2	6.5	5.3

从检测结果看,采用互相关处理后,接地电阻检测结果与摇表法的测量值很接近,具有较高的检测精度,能够满足接地电阻巡检精度要求。

## 6 结束语

论述了钳口法接地电阻测量以及信号互相关处理的原理。以锁相放大芯片 AD630 为核心设计了接地电阻检测仪的信号处理电路,能够从复杂噪声环境下,有效提取接地回路的感应电流信号,提高了测量的准确度。在仪器标定过程中,以纯电阻代替接地电阻,而实际接地网络的电感及电容,会导致信号相位产生一定程度的改变,对检测结果产生影响,需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] 余为清. 地网测量仪用数字变频电源设计[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(1): 73-74.
- [2] 刘举平, 余为清, 刘正平. 钳型变频接地电阻检测仪的研制[J]. 电工技术, 2009, 15(6): 73-74.
- [3] 潘辉, 刘举平, 余为清. FFT变换在接地电阻检测仪中的实现[J]. 机电工程技术, 2006, 35(12): 100-103.
- [4] 马海峰, 曹玉兰, 王鹏. 大型电网接地电阻的测试方法[J]. 黑龙江电力, 2008, 30(6): 438-440.
- [5] 夏勇. 锁相放大技术在蓄电池内阻检测中的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2004, 22(3): 71-73.

- [6] 肖寅东,赵辉,王厚军. 基于锁相放大的微弱信号检测电路的前置滤波器设计[J]. 测控技术,2007,26(3):86-88.
- [7] 倪家升,刘统玉,王昌,等. 用于痕量检测微弱信号提取的锁相放大电路设计及实现[J]. 山东科学,2009,22(5):51-53.
- [8] 张国雄. 测控电路[M]. 北京:机械工业出版社,2008:10-11.

## Application of Mutual Correlation Analysis in Clamped Grounding Resistance Testing

Yu Weiqing

(Key Laboratory of Conveyance and Equipment of Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** This paper discusses the clamped grounding resistance testing principle based on the signal correlation analysis, focusing on how to extract the weak induced current signal with noise. With reference to the ML2035 signals, the signal processing module with the AD630 lock-in amplifier as the core is established, which realizes lock-in amplification of the ground loop induced current signal, reduces the noise effectively and determines the grounding resistance calculation coefficient by experiments. The results show the circuit structure is simplified and the signal can be got easily since the output signal is DC.

**Key words:** grounding resistance; mutual correlation; lock-in amplification; AD630

(上接第95页)

- [21] GLENN BEACH, CHRIS LOMONT, CHARLES COHEN. Quantum Image Processing (QuIP)[C]//32<sup>nd</sup> Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, New York: IEEE Press, 2003: 39-44.
- [22] 周日贵,张满群,吴茜,施洋. 新型BCD加法器及其可逆逻辑实现[J]. 华东交通大学学报,2011,28(4):1-6.

## Quantum Gray-Scale Image Processing Based on Quantum Pointer

Ai Jingen<sup>1</sup>, Zhou Rigui<sup>2</sup>

(1. Science and Technology Service Center of Jiangxi Province, Nanchang 330046, China; 2. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In quantum gray-scale image processing, the storage in quantum states is the color information and the position information. According to the advantage of small range of the gray scale in a gray-scale image, this paper proposes and demonstrated a novel storage expression of quantum gray-scale image. Besides, based on the expression, a new concept of "quantum pointer" is put forward. Quantum pointer is the vinculum between the information of gray-scale and position of each pixel in quantum gray-scale images. The paper verifies the feasibility of the proposed quantum pointer and finds it made the storing and other operations of quantum gray-scale image simpler and more convenient with the properties of bi-direction and sub-block.

**Key words:** quantum image processing; quantum gray-scale image; quantum pointer; quantum gray-scale image storing