

# 互相关技术在海底沉积物电阻率测量中的应用

马斌<sup>1</sup>, 罗柏文<sup>2</sup>, 陈奇<sup>3</sup>, 吴来杰<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 武汉机电学院, 湖北 武汉 430074; 2. 湖南科技大学 先进矿山装备教育部工程研究中心, 湖南 湘潭 411201;  
3. 国土资源部 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

**摘要:**海底沉积物的电阻率测量技术广泛应用于海洋地质调查、海洋环境研究等领域, 基于海底钻机的原位探测仪为平台, 开发了一套电阻率测试系统, 为精确处理电阻率探头输出的微弱电压信号, 对互相关算法进行了理论推导和 MATLAB 仿真, 并在实际电路中以互相关算法在 DSP(TMS320F28069) 的移植为核心设计了相关软硬件, 大量的对比试验表明, 互相关技术是一种有效的微弱信号处理方法, 可提高海底沉积物电阻率测量的精度和抗干扰能力。

**关键词:**海底沉积物; 电阻率; 互相关; 微弱信号处理

**中图分类号:** TP216      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2013)03-0031-04

电阻率是海底沉积物导电性能的总体特征, 利用海底沉积物电阻率的差异, 可以探明海底地质构造及矿产资源的分布, 评价海底土质环境的腐蚀性. 因此海底沉积物测量技术广泛应用于海洋地质调查、海洋资源勘探、海洋环境研究、海洋工程等领域<sup>[1]</sup>.

随着海洋开发活动的逐步增多以及开发环境由浅海逐步走向深海, 迫切需要研制高精度高可靠性的海底沉积物电阻率测量装置, 从而指导海洋开发的各工程领域.

目前荷兰、美国等国家已将海底沉积物电阻率测量技术广泛应用于海洋地质调查中, 并生产了商业化的海底沉积物电阻率测量装置, 测量探头常采用对称四级装置, 通过供电电极 A, B 给沉积物通入激励信号, 测量接收电极 M, N 上的电压和供电电极 A, B 的电流, 从而确定介质的电阻率<sup>[2-4]</sup>.

国内海底沉积物电阻率测量技术起步晚, 电路结构相对简单, 处理微弱信号的能力有限, 测量精度低于国外海底沉积物测量装置.

本文结合国内外现状, 研制了最大作业水深

2 000 m 的海底沉积物电阻率测量探头, 设计了电阻率测量电路, 在测量电路中应用数字互相关技术处理探头的微弱测量信号, 有效滤除信号传输过程中的各种噪声干扰, 从而提高海底沉积物电阻率测量精度和抗干扰性.

## 1 海底沉积物电阻率测量方案

在广泛调研国内外常用海底沉积物电阻率测量装置的基础上, 结合自己的技术创新, 研制了海底沉积物电阻率探头, 如图 1. 图中 A, B 为供电电极, M, N 为接收电极, 电极间距相等且相互绝缘. 探头右端通过防水插头将四电极信号引到测量电路. 测量电路密封在探头右面的电子舱里, 跟探头配合使用. 测量时将探头贯入到沉积物中, 测量电路向 A, B 电极发出交流激励信号, M, N 电极上获取的测量信号返回测量电路进行处理, 从而计算得到沉积物的电阻率<sup>[5]</sup>.

测量电路硬件框图如图 2, 正弦波发生电路产生频率为 200 ~ 2 K 可调正弦信号, 经推挽功放后加到供电电极 A, B 上. 在接收电极 M, N 上得到经沉

收稿日期: 2013-05-14

基金项目: 国家“十二五”863 计划海洋领域课题(2012AA091301)

通信作者: 吴来杰(1970-), 男, 江西南昌人, 博士, 副教授, 主要从事机电一体化技术与自动化技术研究. E-mail: wulaijie@foxmail.com



图1 海底沉积物电阻率探头

Fig.1 Submarine sediment resistivity probe

积物传导后的微弱信号,再经前置放大、低通滤波后形成测量信号  $x(t)$ ,它包含有用信号和模拟器件的各种噪声.参考信号为取自正弦波发生电路的  $y(t)$ , $x(t)$  和  $y(t)$  通过高速 AD,形成离散信号  $x(n)$ , $y(n)$  进入 DSP 处理器 TMS320F28069,由 DSP 处理器对两路信号进行数字互相关处理,滤除噪声干扰后得到跟参考信号同频的有用测量信号,再测量出供电电极 A,B 上的电流.从而计算出海底沉积物的电阻率<sup>[6]</sup>.

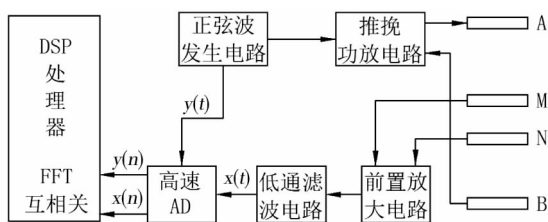


图2 测量电路组成框图

Fig.2 Measurement circuit diagram

## 2 互相关理论推导及 MATLAB 仿真

测量信号包含干扰信号和有用信号,其波形为有用正弦信号叠加噪声.互相关技术处理后的测量信号滤除了噪声干扰,得到跟正弦激励信号同频的包含沉积物电阻率特性的有用信号,能更精确的测量海底沉积物电阻率.

相关技术在信号和系统分析中占有重要地位,从本质上讲,相关技术是基于信号和噪声的统计学特性的应用.供电电极的正弦激励信号在不同时刻取值具有较强的相关性,而测量过程中干扰噪声是随机的,在不同时刻取值与参考信号的相关基本为零,利用这一特性可以把接收电极的测量信号中有用信号和噪声区分出来.互相关技术的原理示意图如图3所示<sup>[7]</sup>.

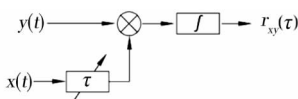


图3 互相关技术示意图

Fig.3 Schematic of Cross - correlation detection

图3中, $x(t)$ 为接收电极的测量信号,包含有用信号  $s(t)$  和干扰噪声  $n(t)$ ; $y(t)$ 为取自正弦波

发生电路的参考信号,设:

$$\begin{cases} x(t) = s(t) + n(t) = C\sin(2\pi ft + \varphi) + n(t), \\ y(t) = D\sin(2\pi ft). \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f$ 为正弦波发生电路的频率, $n(t)$ 与 $y(t)$ 互不相关,则 $n(t)$ 对互相关函数没有贡献,测量信号  $x(t)$  和  $y(t)$  的互相关为

$$r_{xy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(t-\tau)y(t)dt = \frac{CD}{2} \cos(2\pi \times 500 \times \tau + \varphi). \quad (2)$$

由式(2)可知,假若参考信号  $y(t)$  的幅度  $D$  已知,再计算出互相关函数  $r_{xy}(\tau)$  在某一时刻的取值后,就可计算得到测量信号中有用信号的幅值  $C$ ,而与参考信号不同频的干扰信号  $n(t)$  在相关函数结果中没有体现,这样就从噪声中有选择性的提取了跟参考信号同频的有用信号频率分量.达到降噪的目的<sup>[8]</sup>.

使用 MATLAB 软件对互相关原理进行理论仿真,产生参考信号序列:  $y(n) = 2\sin(2\pi \times f \times n/f_s)$ ,信号振幅  $D = 2$ ,频率  $f = 500$  Hz,信号采样率  $f_s = 10\ 240$  Hz,采样点数  $n = 256$ ;产生白噪声序列  $n(n)$ ,振幅为4,产生测量信号:  $x(n) = y(n) + n(n)$ ,它可以模拟接收电极上接收到的含噪声的测量信号.信号波形如图4所示.

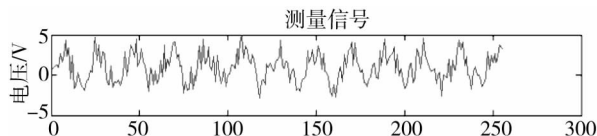


图4 含有噪声的测量信号波形

Fig.4 Wave shape of measurement signal with noise

图4模拟的测量信号中,有用信号幅值为2,噪声幅值为4,信噪比很小,波形图中基本分辨不出有用的正弦信号,不能直接用来计算电阻率.

在 MATLAB 中调用互相关函数求测量信号  $x(n)$  和参考信号  $y(n)$  的互相关  $r_{xy}(\tau)$  并输出函数波形如图5所示<sup>[9]</sup>.

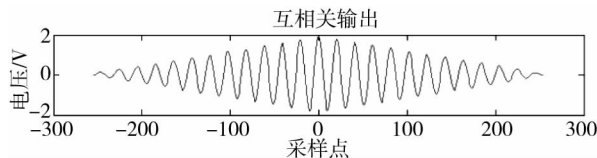


图5 测量信号和参考信号的互相关输出

Fig.5 Measurement signal and reference signal's cross - correlation output

由图5互相关输出波形可知,互相关函数结果可反映出测量信号中跟参考信号同频的有用信号幅值和相位信息,有用信号的幅值可以由互相关函数最大值求出:

$$C = \frac{2r_{xy}(\tau)}{D\cos(2\pi \times 500 \times \tau + \varphi)} = \frac{2\max[r_{xy}(\tau)]}{D} \quad (3)$$

式中,  $\max[r_{xy}(\tau)]$  为互相关函数的最大值。

在不同的噪声幅值背景下,利用 MATLAB 软件和公式(3),计算出有用信号幅值,并列出计算幅值跟实际幅值之间的相对误差,计算结果见表 1。

表 1 不同噪声幅值下互相关检测结果及相对误差

Tab. 1 Cross - correlation result and relative error in different noise amplitude

噪声幅值/V	实际幅值/V	计算幅值/V	相对误差/%
2	2	2.009 3	0.464 5
4	2	1.986 8	0.661 1
8	2	2.097 7	4.886 6
10	2	2.177 1	8.854 1

由表 1 计算结果可知,即使噪声幅值是信号幅值的 5 倍,信噪比小到传统电阻率测量装置不能使用的情况下,应用互相关技术也可以从噪声中提取出有用信号的幅值,其相对误差只有 8.854 1%。

### 3 数字互相关实现

以上互相关技术的理论推导需要在测量电路的 DSP 处理器中实现,才能使数字互相关技术由理论分析变为实际应用。

测量信号和参考信号的离散互相关函数计算公式为

$$r_{xy}(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n-m)y(n), m = 0,1,2,\dots,N-1. \quad (4)$$

在 DSP 处理器中直接进行(4)式的计算,需要计算大量乘累加指令,不能满足海底沉积物电阻率测量的实时性要求,本文应用 FFT 快速相关法实现互相关计算,可以大大减少运算量,提高电阻率测量的实时性。

DSP 处理器控制高速 AD 对测量信号  $x(n)$  和参考信号  $y(n)$  分别采集 1 024 个点,作为一组离散序列来参与互相关计算,首先调用 FFT(快速傅里叶变换)函数,对  $x(n)$ ,  $y(n)$  序列进行 1 024 点快速傅里叶变换,得到  $X(k)$ ,  $Y(k)$ 。

根据离散傅里叶变换的运算性质,可用  $X(k)$  和  $Y(k)$  来表示(4)式的互相关函数的傅里叶变换:

$$R_{xy}(k) = DF[r_{xy}(m)] = X(k)Y^*(k). \quad (5)$$

其中  $DF[ ]$  表示离散傅里叶变换,  $Y^*(k)$  为  $Y(k)$  的复数共轭.  $R_{xy}(k)$  为  $r_{xy}(m)$  的离散傅里叶变换。

由(5)式求出互相关函数的离散傅里叶变换  $R_{xy}(k)$  后,再对  $R_{xy}(k)$  求离散傅里叶逆变换就可以得到互相关函数<sup>[10]</sup>:

$$r_{xy}(m) = IDF[R_{xy}(k)] = \frac{1}{N}[DF[R_{xy}^*(k)]]^*. \quad (6)$$

至此便在 DSP 处理器中完成了互相关函数的计算,再调用排序函数,找出  $r_{xy}(m)$  中的最大值,带入公式(3),便可以求出测量信号中跟参考信号同频的有用信号的幅值  $C$ 。

再计算出供电电极 A, B 的电流,便能计算出海底沉积物的电阻率。

### 4 测试结果

在室内对海底沉积物电阻率测量方案进行了大量对比实验,测量不同含盐量海底沉积物样本的电阻率,并跟 WDDS - 1 型数字电阻率仪的测量结果比较. WDDS - 1 型数字电阻率仪可以直接显示 MN 电极的电压和 AB 电极的电流,方便与本文设计海底沉积物电阻率测量方案结果比较. 测试结果见表 2。

表 2 测试数据

Tab. 2 Test data

MN 电极电压			AB 电极电流		
WDDS - 1 电阻率仪 /mV	设计 方案 /mV	绝对 误差 /mV	WDDS - 1 电阻率仪 /mV	设计 方案 /mV	绝对 误差 /mV
11.02	11.824	0.804	9.12	9.853	0.733
26.02	26.548	0.528	24.67	25.276	0.606
61.69	62.362	0.672	75.33	76.051	0.721
101.02	102.04	0.84	163.8	164.580	0.780
215.30	216.32	1.02	459.10	460.260	1.160

表 2 的比较数据表明,本文设计的海底沉积物电阻率测量方案测量结果跟 WDDS - 1 型数字电阻率仪测量结果仅存在一个系统误差,这是因为两测量系统的参考基准不同造成的,可以对仪器进行标定从而消除系统误差. 验证了本文设计的海底沉积物电阻率测量方案测量数据准确性。

在做以上对比试验之后,又做了噪声干扰实验,用 ATTEN - ATF20B 函数发生器产生的均匀白噪声信号,用电极将白噪声加到 M, N 电极中间的沉积物测试样本上,产生一个人工干扰电场,当白噪声幅值为 6 V 时, WDDS - 1 电阻率仪已经不能准确测量样本的电阻率,而本文设计的海底沉积物电阻率测量电路可以在幅值为 20 V 白噪声干扰下准确测量土样电阻率,测量相对误差为 14.36%。

由以上测试结果可知,采用数字互相关技术来处理海底沉积物电阻率探头的微弱测量信号,不仅可以充分发挥 DSP 处理器强大的计算功能,减少昂贵高性能模拟器件的使用,还可以使测量结果更为准确,具有更强的抗干扰能力. 能更好的指导海洋开发。

## 参考文献:

- [1] 王玉. 海床界面蚀积过程原位监测系统探头的设计研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.  
Wang Y. Research on the in-situ resistivity probe for monitoring erosion and sedimentation of seabed [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [2] 王永福, 孙惠凤, 董立峰. 海底土的电阻率特征及其腐蚀性评价[J]. 海岸工程, 2005, 24(2): 48-52.  
Wang Y F, Sun H F, Dong L F. Seabed sediment resistivity characteristics and its corrosivity assessment [J]. Coastal Engineering, 2005, 24(2): 48-52.
- [3] 李冬, 叶银灿, 陈培雄, 等. 宁波外海陆架沉积物电阻率特性研究[J]. 工程勘察, 2010(5): 19-20.  
Li D, Ye Y C, Chen P X, et al. Shelf sediment resistivity property off Ningbo coast[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(5): 19-20.
- [4] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 电阻率静力触探测试技术与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 3127-3129.  
Cai G J, Liu S Y, Tong L Y, et al. Resistivity cone penetration test technique and data interpretation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 3127-3129.
- [5] 曹大军. 静力触探(CPT)测试系统研制[D]. 南京: 东南大学, 2009.  
Cao D J. Design of static cone penetration (CPT) test system [D]. Nanjing: Southeast University, 2009.
- [6] 杜广印, 蔡国军, 汪春桃, 等. 基于海相粘土沉积化学特性的 RCPT 测试影响因素分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(1): 152-153.  
Du G Y, Cai G J, Wang C T, et al. Analysis of some factors affecting RCPT data based on depositional chemistry characteristics of marine clay [J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2008, 38(1): 152-153.
- [7] 刘义国, 董浩斌, 谭超. 基于 LabVIEW 的低频交流电法仪的设计[J]. 工矿自动化, 2010(5): 88-91.  
Liu Y G, Dong H B, Tan C. Design of low frequency AC electrical instrument based on LabVIEW [J]. Industry and Mine Automation, 2010(5): 88-91.
- [8] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
Gao J Z. Detection of weak signals [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [9] 李日忠, 黄俊斌, 谭波, 等. 相关检测技术在应变测量中的应用[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(1): 140-141.  
Li R Z, Huang J B, Tan B, et al. Application of correlation detection in strain measurement [J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(1): 140-141.
- [10] 王兰伟, 赵家骝, 王子影, 等. 相关检测在甚低频电磁信号检测中的应用[J]. 西北地震学报, 2004, 26(4): 339-342.  
Wang L W, Zhao J L, Wang Z Y, et al. Application of correlation detection to ELF signal detection [J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, 26(4): 339-342.
- [11] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.  
Cheng P Q. Digital signal processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

## Application of cross – correlation detection in submarine sediment resistivity measurement

MA Bin<sup>1</sup>, LUO Bo – wen<sup>2</sup>, CHEN Qi<sup>3</sup>, WU Lai – jie<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510760, China)

**Abstract:** The technology of submarine sediment resistivity measurement is widely used in such as the marine geological survey, the marine environment research. A resistivity measurement system was developed in the platform of in-situ measurement which based on seafloor drilling machine. In order to precision manage the weak voltage signal which outputted by the resistivity probe, the cross – correlation algorithm theoretical was derived and MATLAB simulation was carried out. Finally the software was transported in TMS320F28069 DSP processor and hardware was designed. A Mass of contrast experiment shows that the cross – correlation detection is an effective way to process weak signal. It can not only improve the submarine sediment resistivity instrument's accurate, but also improve the anti – jamming ability.

**Key words:** submarine sediment; resistivity; cross – correlation; weak signal process