

# 基于电阻率测量的海床蚀积过程原位监测技术研究

## 摘 要

本论文基于国家863项目“风暴过程中海底沉积物再悬浮通量原位监测技术”（编号2008AA09Z109）开展研究，研制了一套基于电阻率测量的海床侵蚀淤积过程现场动态原位监测系统，该系统能够实施海水-沉积物界面位置的原位监测。

本文研究内容主要包括以下两个方面：1 系统设计：① 设计电阻率蚀积监测系统整体结构；② 完成该系统三个部分的设计：机械探杆、主控部分及分析处理软件部分，通过实验选择探杆的直径、材料和极距，确定环形电极电阻率计算方法，完成探杆设计，对主控部分划分模块完成硬件和软件设计，对分析处理软件划分模块完成设计；③ 对系统进行误差和精度分析；④ 系统参数实验测试与调整；⑤ 进行系统机械组合总装，完成整个系统的设计；2 系统实验验证：① 室内对比实验：和现有的商业化仪器测试数据进行对比分析，验证系统测试数据正确性；② 室内实验验证系统的有效性；③ 进行现场原位实验，进一步对系统进行原位测试的有效性验证。

本论文采用的研究方法：在整个系统的设计中，采用了自上而下、分模块的设计方式，保证了系统具有很好的整体性；在系统调试和实验验证过程中，设计了多种实验，采用分步骤进行验证的方式，确保系统验证过程有序进行和经过验证系统的测试稳定性。

本文主要结论概括如下：

1.系统设计：① 探杆：通过实验对比分析，选择探杆电极布设方法为环形布设、探杆直径 7cm 和电极间距 1cm；② 主控部分：采样频率 64 次/s，采样间隔初步确定为 8s，经误差分析可以达到静态  $0.012 \Omega \cdot m$  电阻率精度。③ 上位机数据处理软件：开发完成了仪器参数设置、数据处理和曲线拟合三个模块，采用的 VC++6.0 完成界面部分和计算部分，matcom 4.5 完成曲线绘制及曲线拟合。

2. 系统实验验证：① 室内对比实验：与商业化 E60BN 高密度电法仪和电导率仪数据对比，验证了本系统测试土体和海水电阻率数据的有效性；② 室内界面测试实验：经实验确定自制系统界面测定误差在 0.80cm 以内，提出了中间值-

直线界面分析方法，对得到的数据进行了分析，获得的界面位置 and 实际观察到的结果具有很好的一致性，在多次反复实验中验证了系统电阻率数据测试的有效性、测试界面的正确性，和系统的工作稳定性；③ 现场测试实验：实验结果表明，在海洋水动力条件较为平静时，测试结果很好的反映海水-沉积物界面；当水动力作用较强时，目前仪器所用电极的极化效应对测试结果影响较大，将在下一步研究中通过改变电极材料来完善。

本论文创新点主要包括以下三个方面：1 多电极自动切换自动记录，基于电阻率测量的海床蚀积监测系统设计；2 分级电极开关转换结构和相应的主控软件，极大的减小了多电极电路的硬件开销，缩小了整个系统的体积；3 提出了海水-沉积物界面的中间值-直线分析方法，并在多次实验中验证了其分析数据的有效性。

本论文设计的系统有待进一步工作改进系统设计，主要包括：系统的软硬件功能的进一步完善、系统电极探杆的材料改进，及系统整体结构的进一步调整。

**关键词：**海床蚀积；动态过程；现场原位；高密度电阻率；监测系统

# **In-Situ Monitoring Technology Study of Seabed Erosion and Deposition Process Based on Resistivity Method**

## **Abstract**

The work in this thesis was based on National 863 Project “Marine Sediment Re-suspension Flux in-situ Monitoring Techniques during the Storm Process” (No. 2008AA09Z109). A set of in situ system monitoring seabed erosion and deposition dynamic process, based on the resistivity measurement, was developed. It could implement in situ monitoring water - sediment interface location.

In this thesis, the work consists of two parts, 1 Monitoring system design: ① Design the whole structure of monitoring system based on resistivity measurement; ② Completion the three components design of the system, that is mechanical rod part, control part and analysis software part. Rod design was completed by choosing rod diameter, material and electrode distance through experiments and determining the ring electrode resistivity calculating method. Control part was realized by dividing hardware and software into modules to design respectively. Processing and analysis software was completed through modularization design; ③ system error and precision analysis; ④ experimentalize for testing and adjusting system parameters; ⑤ assemble the whole system, and finish system design. 2. System verifying experiments: ① indoor comparative experiment: The measured data from self-designed instrument was compared with the data from commercialization E60BN high-density electrical instrument to verify the system testing data validity of soil and water resistivity. ② indoor testing experiment to verify system effectiveness; ③ field experiment to verify system in-situ monitoring validity.

The research methods in this thesis: the top-down, dividing modules design manner was used in the design of the entire system, which ensured the system a very good overall; in the system debug and test validation process, a wide range of experiments were designed, and step-by-step validate manner was used, which ensured verification process conducting orderly and testing stability of the verified system.

The main conclusions of this thesis could be summarized as follows:

1. System design: ① mechanical rod: ring electrode collocation manner, diameter 7cm and electrode spacing 1cm; ② data logger: sampling rate 64 times / s,

the total system error-- $0.012 \Omega \cdot m$ , sampling interval 8s; ③ host computer data-processing software: VC ++ 6.0 was used in the interface and the calculation parts, and matcom 4.5 completed curve drawing and curve fitting. 2. System experiment verify: ① indoor comparative experiment: the measured data was compared with the data from commercialization E60BN high-density electrical instrument, which verified the system testing data validity of soil and water resistivity; ② indoor interface testing experiment: the apparatus developed in this thesis was used to conduct the indoor contrast experiment to test the accuracy of the results of electrical conductivity; and test effectiveness of sediment - water interface location, which was proved to be a less than 0.80cm error; ③ Field test results showed that when the hydrodynamic conditions in the ocean was relatively calm, the test results reflected a very good water - sediment interface; When it has strong hydrodynamic effect, the electrode used by the current equipment has polarization effects on the impact of test results. Changing the electrode material in the next step would be executed to improve it.


The main innovations in this thesis: 1 seabed longtime monitoring system which could automatically switch between multitrode; 2 classified electrode switching structure and corresponding control software, would greatly reduce the hardware cost of multi-electrode circuit, and reduce the size of the entire system; 3 Intermediate Value-Straight Line (IV-SL) water-sediment interface analysis method was advanced, and its validity was verified in a number of experiments.

The system designed in this thesis would be further improved in future work, including: further perfecting the function of hardware and software, improving electrode rod material, and further adjusting the overall structure of the system.

**Keywords: seabed erosion and deposition, in-situ and field test, high resolution resistivity, monitoring system**

## 独 创 声 明


本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含未获得（注：如没有其他需要特别声明的，本栏可空）或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期：2009年6月12日

---

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权学校可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：

导师签字：

签字日期：2009年6月12日

签字日期： 年 月 日

# 1 绪论

## 1.1 研究背景

沉积物的蚀积过程及在波浪作用下发生再悬浮运移是非常普遍的现象。其传输与运移对分析在潮流作用下沉积物的稳定性,生态状况的可持续性,相关污染物的迁移、贮存、消散等过程具有十分重要的意义。因此沉积物蚀积过程的研究对于保护生态环境至关重要。

河口岸滩地区细颗粒粘性沉积物的侵蚀淤积通常不能通过了解沉积物的几个有限可方便测得的参数来预测蚀积量,如粒度、比重、水或有机物含量等<sup>[1,2]</sup>。对于河口附近细颗粒粘性沉积物泥沙运移情况复杂,给出再悬浮特性和蚀积状况的主要困难在于,粘性沉积物的传输受多种因素的影响<sup>[1,3-9]</sup>。研究发现,对河口地区沉积物侵蚀及泥沙运移影响最为严重的,是风暴潮等极端海况<sup>[10-14]</sup>。而在此极端海况下,沉积物侵蚀淤积过程的监测十分困难<sup>[15]</sup>。因此,科学家对极端海况进行的直接观测稀少,长期以来缺乏简单可靠的能在正常海况及风暴事件过程中都能实施海床沉积物蚀积过程现场观测的装置,影响了对事件过程中形成的沉积物运移与地层记录的认识<sup>[16]</sup>,制约了对地质记录中保存事件的沉积物特征形成过程及通量的深入认识<sup>[17]</sup>。

为解决以上难题,国家863项目资助了“风暴过程中沉积物再悬浮通量原位监测技术”的研究,开发一套基于电阻率方法的海床沉积物再悬浮通量自动观测分析系统,实现风暴过程中海洋沉积物-水界面沉积物通量监测。

本论文结合此863项目开展研究。

## 1.2 海床蚀积过程原位监测技术国内外研究现状

国内外学者都对河口泥沙的运移和岸滩侵蚀淤积状况开展了大量的研究工作,包括观测仪器的研制、模型的建立、测定运移和侵蚀情况的方法等。目前已有的原位设备,有些适用于监测侵蚀,有些适用于监测淤积,有些既可以监测侵蚀又可以监测淤积。现场监测方法,按照监测时间连续性,可分为非连续监测和

半连续-连续监测；按照监测原理，分为悬砂量测量或沉降量测量和沉积物-水界面高程变化测量。目前主要的原位蚀积监测方法概括在表 1-1 中：

表1-1 海床蚀积监测方法

非连续监测方法		半连续-连续监测方法	
悬砂量或沉积量测量	高程变化测量	悬砂量或沉积量测量	高程变化方测量
泥沙捕获	木桩方法	测量SSC变化方法	光学方法
沉积物陷阱	水平标记法	OBS测量沉积量方法	声学方法
示踪剂	SET侵蚀台方法		电阻率方法

### 1.2.1 非连续测试方法

非连续监测方法，该方法监测周期一般大于 24 小时，通常采用简单的机械设施，在退潮的时候选择合适位置布设在岸滩浅水地区。在一个或者多个潮周期后，观察岸滩高程变化或测试悬砂量和沉积量，得到一段时间内的蚀积量。测量时间分辨率低是它们的共同特点和缺点。下面对主要的非连续测试方法进行简介。

#### 1.2.1.1 测试沉积量或悬沙量的称重方法

##### 1) 泥沙捕获法

利用泥沙捕获装置，结合流速测量，经室内分析计算得出沉积物通量，该类方法一直沿用至今<sup>[16]</sup>。此类观测方法设备简单，随时可以实施测试，但自动化程度低，同步性差，恶劣海况时无法开展工作。

##### 2) 沉积物陷阱方法 (Sediment Trap)

又称为沉降管 (Setting Tube)，低波能量环境下的垂直沉积物通量可以通过采集下沉颗粒的沉积物陷阱来估计。Emerson (1991) 设计了一个进行侵蚀淤积测试的沉积物陷阱，如图 1-1 所示。该设备采用透明玻璃材料进行沉积物采集，在多个潮周期持续进行采集后，可以看到沉积物的固结分层现象<sup>[19]</sup>。

虽然沉积物陷阱已经获得了广泛应用，但采样偏移是一个问题，因而陷阱得到的沉积物蚀积量需要仔细推断解释。该方法允许收集移动颗粒样品，并保留以备今后分析；实施简单，造价低廉，易于在潮滩地区使用<sup>[19]</sup>；比较适用于测量净运移量，不能记录沉积物运移随着时间变化的过程，因而也很难进行沉积物运移

机理分析；更适合测量淤积情况，而不很适合于测试侵蚀状况，尤其是风暴海况下的大量侵蚀状况。因为，侵蚀情况下，测试设备周围的沉积物被侵蚀掉，设备和沉积物就不在一个水平面下；设备突出于沉积物的存在会改变其周围的流状态，影响沉积物运移产生而较大误差，侵蚀越严重误差越大。

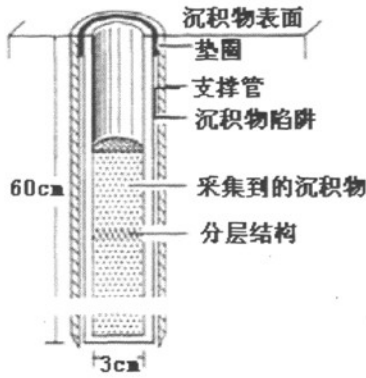


图 1-1 沉积物陷阱采样设备的纵剖面图 (EMERSON, 1991)

沉积物陷阱方法设计巧妙，但很难获得基于过程的实时数据。在没有更好的精密采样仪器的条件下，对于一个潮周期的数据获取还是很方便实用的方法。另外，为确定沉积物的在一段时间内的沉积量，可以经常添加标记粒珠等方法<sup>[20]</sup>。

### 3) 示踪剂方法

Richardson (1902) 最先在科学传感里面使用了示踪技术，20 世纪 50 年代和 60 年代早期，这一技术得以快速发展<sup>[21]</sup>。沉积物颗粒示踪方法是把示踪剂放入环境中，经过一段时间后，在周围区域进行沉积物或者水采样。实际中可以采用各种各样的采样方案，也可以采用上述的沉积物陷阱方法。采样方法的设计十分关键，最后处理和分析采样数据，也对结果有很大影响<sup>[22]</sup>。示踪剂可以采用荧光或者磁性的<sup>[22]</sup>，也有采用放射性核的<sup>[22]</sup>。放射性核示踪剂，还可以用来确定沉积物的年代等信息，及通过长期监测重建沉积的季节及年变化等情况。示踪剂方法虽然采样方便，但后续数据处理工作烦琐。

## 1.2.1.2 测量沉积物-海水界面高程变化的方法

### 1) 木桩方法

很多人采用过木桩和杆的方法实施岸滩蚀积过程测试，如：Pestrong (1965)，Reed (1989)，Daborn et al. (1991)。这些方法是在沉积物中设立木桩，或者



测距塔尺<sup>[23]</sup>作为参照物,定期观测海底面高度相对变化量来确定蚀积状况。对该方法的一个改进方法是桥方法<sup>[24]</sup>,如图1-2所示。木桩方法是简单易行,成本低廉的一个测试方案,但木桩会对周围环境产生扰动,从而影响其附近的侵蚀淤积变化情况。

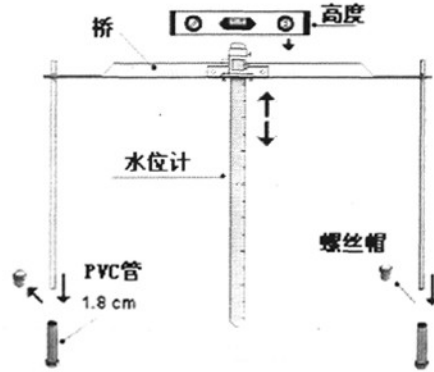


图1-2 桥方法示意图 (Perillo, 2003)

## 2) 水平标记法 (Marker Horizon)

在自然沉积物表面用一些稀有物质或者埋置金属板,扩展一个水平面。一段时间以后,一般为6个月,采样或用直尺测量并记录扩展水平面距离表面的高度<sup>[25]</sup>。

该方法可以达到 $\pm 1\text{mm}$ 数量级的分辨率,但只能测量出淤积量,而不能测量侵蚀量。通过Cahoon(1995年)的测试对比,从图1-3的测试数据对比也可以看出这一点。侵蚀的不能测量导致了基准平面发生变化,从而导致其后续数据出现相对错误。

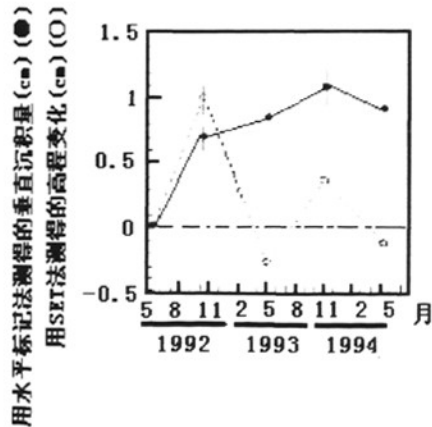


图1-3 水平标记法测得数据与SET方法测得数据对比图 (Cahoon et al., 1995)

## 3) 沉积物侵蚀台方法 (Sediment Erosion Table, SET)

SET 侵蚀台是适用于潮间带地区的便携式测试仪器, Cahoon (2003) 研制的 SET 如图 1-4 所示。测量台放在预先用水泥固定在岸滩底部的底座管中。底座管有连续均匀间隔的 4~8 个凹槽, 允许 SET 锁定在不同水平位置。锁定 SET 高度后, 需要仔细的将台面校准使其处于水平, 然后从台面放下探针到海床沉积物表面, 这时就可以记录探针在 Table 上面的长度。在四个方向上重复这个测量, 可以给出 36 个数据。该方法可以给出  $\pm 1.4 \sim \pm 2\text{mm}$  的测量分辨率。

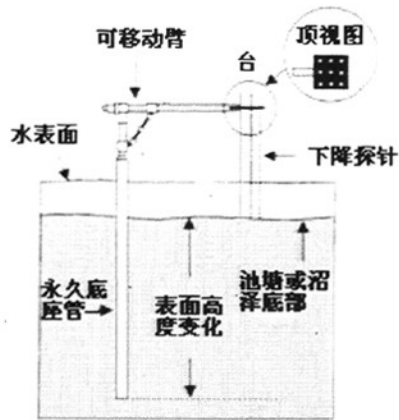


图 1-4 SET 沉积物侵蚀台 (Cahoon et al., 2002a)

侵蚀台方法和木桩方法相比, 测试更为复杂些, 成本也更高点, 而且测量前需要仔细的保持侵蚀台的水平状态, 但其测试的是距离底座管一小段距离处的岸滩蚀积状况, 这在一定程度上避开了底座管周围受底座管影响的区域, 测量数据和真实情况更为接近。

### 1.2.1.3 非连续监测方法特点

上述非连续测试方法, 目前为止应用和研究最广泛的为木桩方法和沉积物陷阱方法。从总体上看, 此类方法具有简单易行、成本低廉、实施方便的优点, 因而这些方法很多都得到了广泛的应用, 且一直沿用至今, 并在使用过程中不断的改进和创新, 得到了很好的发展。但这些方法存在的共性问题: ① 测试靠人工操作和人工记录测试数据, 属劳动密集型, 测试过程简单, 但测试耗费的时间和人力都很多, 后续数据处理工作烦琐, 需记录后输入计算机然后处理; ② 测试时间分辨率低, 一般测试间隔为几天到几个月不等, 无法得到海床蚀积的精确变化过程, 只能得到上次测量到本次测量的净变化量<sup>[26]</sup>; ③ 测量数据的不精确,

也导致了无法分析波浪作用及不同水动力条件<sup>[20]</sup>与海床蚀积的关系及影响, 和分析蚀积变化的机理。

## 1.2.2 半连续-连续测试方法

高时间分辨率的仪器设备的缺乏, 导致很多相关的研究受到阻碍<sup>[26]</sup>。D. M. Lawler 在其文中也特别指出了低时间分辨率的危险性和高时间分辨率的重要性<sup>[27]</sup>。1991 年出现了最早的半连续-连续监测设备——Lawler 的 PEEP 监测系统及 Sedimeter。

半连续-连续监测方法监测周期在几分钟到几小时时间范围, 一般采用电子监测仪器, 布设在选定位置, 一次布设, 长期监测, 数据在测试结束后可直接读入计算机。半连续-连续监测方法相对于上述的非连续监测方法最大的优势就是时间分辨率高。

### 1.2.2.1 测量悬沙量或者沉积量的方法

1) 测量悬浮沉积物含量 (Suspended Sediment Content, SSC) 变化的方法  
该方法是用 SSC 的值来推断沉积物的沉积量, 前提假设测量区域的沉积为均一的沉积, 具体实施方法有以下三种:

#### ① 出入相减法

现场采用该方法通常是在监测区域的出入口处分别进行 SSC 和流监测。出口处颗粒通量减去入口处颗粒通量, 即为监测区域内泥沙沉积量。该方法通常进行沉积量数量级的估计, 而非精确的测量沉积量<sup>[28]</sup>。

#### ② 侵蚀水槽方法

很多人应用 SSC 数据, 采用水槽方法进行实验室和现场实验, 测得侵蚀率。从 1978 年 Young 的第一次应用水槽进行实验测试后<sup>[29]</sup>, 先后产生了很多种不同结构的水槽<sup>[30-36]</sup>, 并有相应的计算侵蚀率的公式。图 1-5 给出了常用的四种不同类型的水槽的结构, 具体的水槽原理等这里不在详述, 请参考有关文献。水槽方法通过构造流, 启动水槽底部的泥沙, 模拟实际的水流, 然后用流速计和 SSC 设备实施测试。测试数据很大程度上依赖于水槽结构的设计, 因而多种水槽方法测得的数据结果相差较大<sup>[36, 37]</sup>。值得一提的是, 1992 年, Amos 采用环形水槽

(flume, Sea Carousel) 对两个自然条件完全不同的区域进行了测试, 并根据观察到的侵蚀过程和测量结果, 在前人划分的基础上, 把侵蚀分成了类型 I a, 类型 I b, 类型 I, 类型 II 等不同的类型<sup>[30]</sup>, 这种分类方式被很多人借鉴, 如<sup>[38]</sup>。

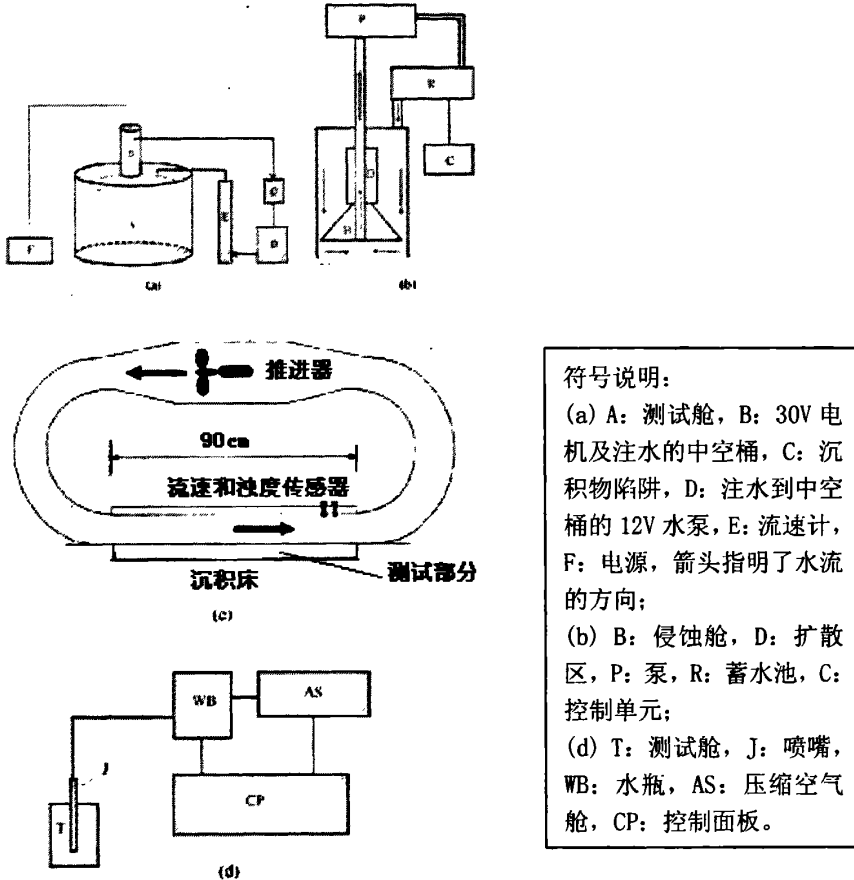


图 1-5 (a) Microcosm 系统示意图; (b) SedErode 示意图; (c) ISEF 示意图; (d) CSM 示意图 (Tolhurst, 2000)

### ③ 三脚架方法

将自容式浊度计、激光粒度仪、流速计、压力计等传感器, 固定在三脚架不同位置上, 三脚架的底部有防止三脚架陷入泥沙中的承重板。将三脚架放置在海底, 经过一段时间的自动观测记录后 (一般记录时间长达几个月), 取回三脚架, 对记录的数据进行输出、处理, 计算得出观测期间观测点位置处的海洋沉积物通量<sup>[39]</sup>。图 1-6 给出了一个典型的三脚架结构。D. A. Cacchione 把三脚架方法发展过程划分为三个阶段: 1960s 早期到 1970s 中期; 1970s 中期到 1980s 中期; 1980s 中期到现在。其发展主要体现在三脚架上配置电子仪器的升级换代和沉积

物传输理论方面的进展<sup>[39]</sup>。当然,除了三脚架,也有四脚架等类似的测量方式<sup>[40]</sup>。

利用此技术, STRATAFORM 项目在美国 Eel River 河口开展为期五年的研究,现场观测了海洋沉积物的传输过程<sup>[10, 11, 41]</sup>。基于类似方法技术,南京大学研发了用于潮滩同步测量多层位流速和悬沙浓度的现场高分辨率数据采集与分析系统,精确地测量了江苏王滩港潮滩沉积物通量<sup>[42]</sup>。在过去的 40 年里,海洋沉积物通量的三角架观测装置在世界各地被广泛应用<sup>[43]</sup>,对揭示海底沉积物传输过程起到了至关重要的作用<sup>[39]</sup>。

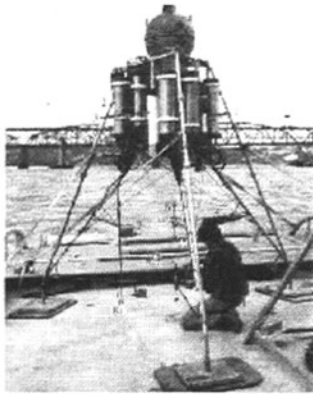


图 1-6 1996 年拟用于旧金山的 USGS GEOPROBE 三脚架 (Cacchione, Sternberg et al., 2006)

## 2) 光学反射测量法 (Optical Backscatter Sensors, OBS)

把 OBS 面向上放置,这样沉积物就会沉积在 OBS 表面,随着颗粒聚集量的增加,OBS 的响应也会增加,即可测得沉积物的沉积量<sup>[44]</sup>。Ridd 在仪器上附加了一个自动清洁器,在选择的时间清除 OBS 上面的沉积物,该 OBS 结构如图 1-7。优点:高时间分辨率和高垂直分辨率、可以长期使用(长达几个月的时间)。缺点是由于传感器表面和周围沉积物表面的差异性,导致沉积物沉积到 OBS 表面的情况和实际情况会有所差别。



图 1-7 带有自动清洁刷的 OBS 沉积物测试仪器 (Thomas et al., 2002)

### 1.2.2.2 测量沉积物-海水界面高程变化的方法

#### 1) 光电方法

##### ① 沉积测量杆

Erlingsson (1991 年) 研制了一个沉积测量杆 (sedimeter), 是采用红外 LED 及带红外滤波的光电三极管构成的光电探测装置, 如图 1-8 所示<sup>[45]</sup>, 该仪器由传感器及放在密封舱里面的数据采集记录仪构成。如果探杆外部有沉积物阻隔, 就会反射红外光, 从而被光电三极管接收。

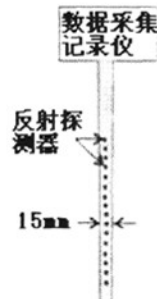


图 1-8 Sedimeter 仪器 (Erlingsson, 1991)

##### ② 光电沉积物陷阱

传统沉积物陷阱的共同缺陷是, 它们是被动测试系统, 不能确定沉积物何时沉积。Lamoureux (2005) 研制了一个采用发光管阵列和对应的光敏三极管阵列构成的沉积物沉积传感器, 布设在一个沉积物采集管两侧, 测量沉积物的沉积量, 从而确定沉积物通量的仪器, 图 1-9 给出了该设备的结构示意图<sup>[20]</sup>。右端的光敏

三极管，根据是否接受光照给出不同的电流信号，所有这些电流信号连接在一起给出一个输出是从 0 到最大值之间的一个电流。根据输出信号的大小来判定接受是否到光照，即没有被沉积物阻隔的光敏三极管的个数，从而确定沉积物的高度变化。该系统测量沉积物深度的分辨率依赖于转换三极管的个数。

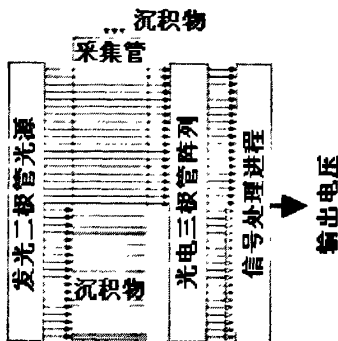


图 1-9 沉积物沉积传感器结构图 (Lamoureux, 2005)

### ③ 光电侵蚀杆 (Photo-Electronic Erosion Pin, PEEP)

1991 年 Lawler 研制了一个 PEEP 系统，自称是第一个半连续-连续记录侵蚀情况的电子设施。事实上，Lawler 的 PEEP 系统和 Erlingsson 的 Sedimeter 几乎同时出现<sup>[26, 45]</sup>。PEEP 系统由一系列封装在防水透明聚丙烯管中的多个光电单元构成，这些单元在有光入射时会产生一个小的模拟电压，并输入到数据记录仪以进行持续不断的监测。另外还有一个参考光电单元，对测得的数据按照环境光照情况进行归一化处理。应用该仪器，Lawler 在 1992、1994 及 1997 年，分别在不同的地区进行了监测试验，期间不断的对该仪器进行改进，2008 年产生了 PEEP-3T<sup>[27, 46, 47]</sup>。在原有仪器基础上，添加了一个参考单元，整合 TCT (Thermal Consonance Timing) 概念，实现了夜间的监测，这样就构成了一个日夜连续监测系统，如图 1-10 所示<sup>[47]</sup>，其光电单元安放位置具有相互重叠区域，可以产生连续响应。

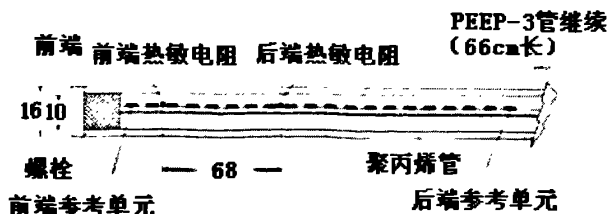


图 1-10 重新设计的 PEEP-3T 自动侵蚀淤积监测传感器 (Lawler, 2008)

沉积测量杆、光电沉积物陷阱及光电侵蚀杆 (包括 PEEP-3 和 PEEP-3T) 这三

种方法都是利用光电监测原理,实现海底沉积物侵蚀和淤积的监测。监测系统的输出都是所有感光器件信号的和,根据这一和信号得到侵蚀淤积情况。在侵蚀发生时,会引起海水的高浊度,导致水的透光度变差,影响该类型的方法测试数据的正确性,这是该类方法最大不足。

## 2) 声学方法

采用声纳高度计测量海床平面高度的变化,数据自动记录和存储,结构示意图如图 1-11 所示。声学监测仪器在实施监测过程中需要固定在一个距离海床底面有一定距离的支架上,<sup>[48, 49]</sup>。该仪器体积小,易于实施测量,但测得参数唯一,只能在海水以下区域实施测试,如果因为退潮导致仪器露出水面,则无法实施测试;该仪器测试的垂向范围小,测量准确性不高。

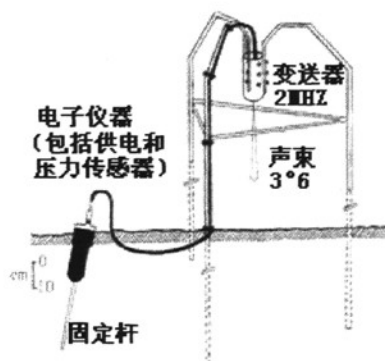


图 1-11 海床面声~学监测系统 (ALTUS) 示意图 (Bassoullet, Hir et al., 2000)

## 3) 电阻率方法

电阻率方法最初主要应用于地质勘探中,通过探测介质深层电阻率来探测矿藏和地下水等地层资源。一些学者发现电阻率和沉积物的很多参数存在密切关系,可以采用电阻率方法来测量沉积物的孔隙度、渗透性及含水量、结构因子等物理参数。

WON 于 1987 年首次采用环形电极,实施了现场测试海底沉积物电性探测。将电极放置在沉积物上的方法是,在一个 PVC、玻璃纤维或者是其它电绝缘体的垂直探杆上,沿着探杆表面以等间距放置环形电极。这样的探测器可以附在振动取样器或者是一个常规取样设备上面,在外加重力的帮助下,投入海底。探测器放好以后,就可以选择任意四个连续的电极构成 Wenner 配置进行测量。如果探测器包含很多个电极,就可以滚动测量电阻率,得到电阻率随深度变化的函数<sup>[50]</sup>。



WON 的这种采用环形电极垂直布设在探杆上的方法，可以方便的进行海底电阻率的探测。WON 电极探杆典型的直径选择 2~10cm，典型的电极间距选择为 5~30cm。四个电极的探测器结构如图 1-12 所示。

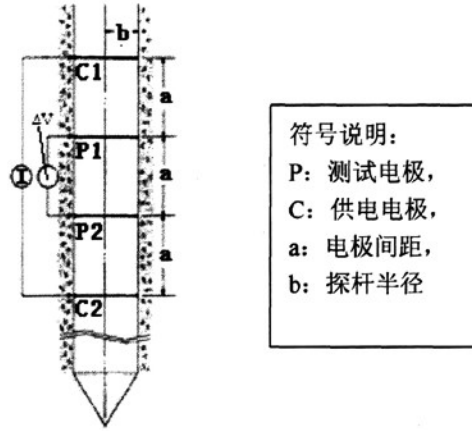


图 1-12 Wenner 配制电阻率探测器结构图 (WON, 1987)

1992 年, Ridd 采用在 WON (1987) 设计的电极布设方式基础上, 进行了海床侵蚀和沉积作用的测试。Ridd 利用海水和沉积物电阻率的明显差异, 把电阻率方法用于海底沉积物-水界面的测量<sup>[50, 51]</sup>。Ridd 仪器结构如图 1-13 所示。Thomas et al. 于 2002 年又改进了该测试仪器<sup>[52]</sup>, 仪器结构如图 1-14 所示。

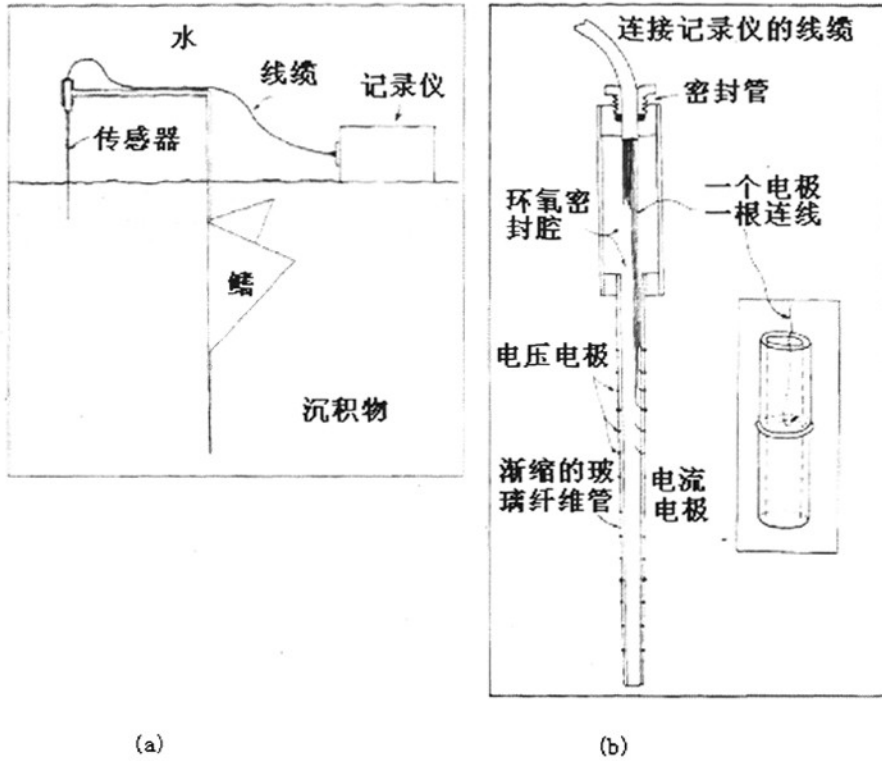


图 1-13 (a) 沉积物水平位置测试仪器示意图；(b) 沉积物水平位置测试仪器剖面图 (Ridd, 1992)

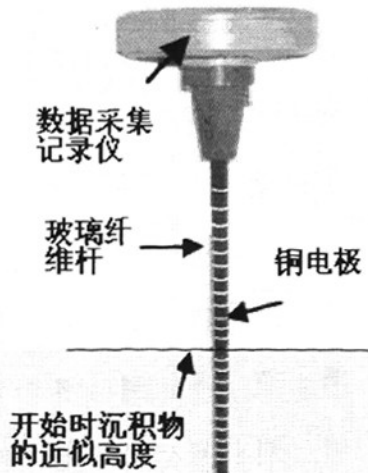


图 1-14 采用电阻率方法的海床高程传感器 (Thomas et al., 2002)

Ridd 仪器的总体结构图如图 1-13(a) 所示: 最左侧是布设了多个电极的探杆, 文中称为是一个传感器, 依靠通过旁边插入沉积物中的鳍状结构支撑, 在支撑桩上的鳍可以确保在强流和波作用时, 传感器不会移动。支撑桩的长度和鳍的尺寸

可以根据沉积物类型确定。对于软粘土，支撑桩的尺寸通常要比沙土大。最右边是采样电子设备，其中包括产生电流的振荡器和采集电压的记录器。电极在探杆上的布设示意图见图 1-13(b)，在探杆上布设 2 个电流电极，其他为测量电极。电流电极对及待测量的电压电极对的位置都是固定的。

该传感器共有七个通道，其中六个是提供给电压电极对的，另外一个是为提供给电流电极对用的。通常来说，电压电极均匀的分布在电流电极的周围。当沉积物界面上升到高于最顶部电极很多时，或者低于底部电极很多的时候，敏感性就会迅速降低。应用该方法，Ridd 分别构建了 0.5m 长和 0.15m 长的探杆进行了实验测量，发现不管探杆长短，分辨率总可以保持在全范围的 2%。进行了四个星期的现场监测表明，测量结果没有任何敏感度漂移和失败。这毫不奇怪，因为传感器响应只依赖于探杆的物理尺度和电极间距。

Ridd 在文中给出海水和沉积物两者的电阻率大约是 4 倍的关系。另外，海水和沉积物电阻率的显著差异，也可以从在 2002 年 Wheatcroft 为了研究沙滩上波谷和波峰孔隙度的不同，而实施的测试中发现这一点。该测试采用一个电机，驱动一个携带水平布设 Wenner 电极的探杆，不断的向下贯入沉积物中，步长为 0.25mm，测得电阻率随深度的变化，并得到了一个精确度变化数据图如图 1-15 所示<sup>[53]</sup>。从图 1-15 可以看出，Wheatcroft 测试表明，水中的电阻率大约是 0.22  $\Omega\text{m}$  左右，而沉积物中的电阻率约为 0.52 左右。两者大约是 2.5 倍的关系，这与 Ridd 测得的 4 倍关系略有不同<sup>[53]</sup>。分析两个学者得出不同的倍数关系的原因：主要是因为沉积物类型不同导致的电性差异<sup>[51, 53]</sup>；其次，在 Wheatcroft 的测试中，由于探杆的移动造成对沉积物的扰动，测试存在一定的误差。但即使是 2.5 倍的关系，也已经足可以根据水和沉积物的电性差异，找到沉积物-水界面位置。

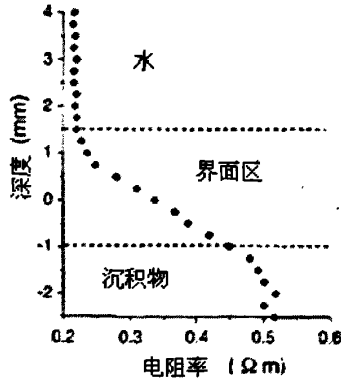


图 1-15 电阻率随深度变化数据图 (Wheatcroft, 2002)

这种应用电阻率方法实现海床界面测量的方法由于以下原因也许比声学方法有利：① 设备开销相对较小；② 没有侧扫的由于悬砂颗粒或者气泡问题，这些有时会严重的降低声学数据；③ 因为沉积物电阻率是密度的函数，也许最终会推断出沉积物密度信息。和声学方式比的缺点：① 高度非固结泥滩中分辨率会降低；② 电压问题：如果在沉积物中有非常低的电导率变化，可以和水与沉积物电导率差别相比的话。这种情况可能很少，但是已经采取工作考虑三层电导率方法；③ 盐度变化大的河口地区问题。已经发现，沉积物中的水和水柱相比通常交换缓慢，水的电导率也许会小于几乎是淡水的低潮的水。这种现象可能可以用来给出水和沉积物营养交换和其他化学交换信息<sup>[51]</sup>。

Ridd 电阻率方法是测量海水-沉积物界面一个较好的半连续-连续监测方法之一，但其设计中存在以下局限性：

- 14 个电极 (7 对)，7 个通道：增加电极，通道也相应增加
- 供电电极和测试电极固定不变：供电电极和各个测试电极之间的距离不同，当两对测试电极处于相同的环境中，如都处于沉积物中，它们的周围的电场并不相同，测试系统的高程分辨率无法保证；
- 分辨率为有效长度的 2%：由于电极数量不变，长度增加，电极间距增大，使得测试的绝对精度降低。。

### 1.2.2.3 半连续-连续监测方法特点

半连续-连续监测方法中应用最为广泛的是三脚架方法和水槽方法，主要由于测量 SSC 的方法在理论上比较有成熟的计算侵蚀量的方法，仪器容易购买，有

成型的产品可用。而其他的方法,如测量高程变化的三种方法,理论上尚不完善,没有准确的关于泥沙蚀积量的计算方法,有待于进一步研究。

### 1.2.3 非连续和半连续-连续方法比较分析

非连续测试和半连续-连续测量方法的对比如表 1-2 所示。

表 1-2 非连续监测方法和半连续-连续监测方法对比表

	非连续监测方法	半连续-连续监测方法
设施	简单,可自行构建	复杂,一般需购置
布设	劳动密集型	一次布设,无需人工干预
数据处理	人工记录数据	自动记录,
时间分辨率	低,几天到几个月	高,可达到几秒数量级
空间分辨率	与人眼分辨率有关	可达mm级
过程数据	无,得到的是一段时期的总蚀积量	有,可以用于分析蚀积机理等
数据分析理论	简单,完善	复杂,有些不完善

从表 1-2 可以看出,非连续和半连续-连续监测系统各有优缺点:非连续测试方法,一般采用简单机械结构,易于实施,但测试需要的人工劳动多,测得数据时间分辨率不够。而半连续-连续测试,一般结合电子记录仪,需要购置仪器,但测试布设简单,测得数据时间分辨率高。

目前,浅水及潮滩地区适用的蚀积监测装置有十几种之多。国内对蚀积原位监测设施研究还比较少,多数停留在简单的机械设备上,而国外研究的较多,仪器的类型也很丰富。众多学者对海床侵蚀发生的运移及沉积情况不断有新的发现,但却无法准确的解释侵蚀运移机理。这些问题的合理解释,还有待于应用高时间分辨率和垂直分辨率的蚀积监测仪器,进行长期连续观测,及对监测结果的深入分析。下一步对于原位蚀积监测仪器的要求不再是简单的可测得数据,而是高时间分辨率、高精度、便携式,易于使用和控制。

## 1.3 论文研究目标

本论文研究拟开发一套,基于电阻率变化的海底面位置动态变化实时观测记录系统,以实现海洋沉积物-水界面沉积物通量过程实时观测。方法原理是,海水与沉积物电阻率差异显著,海底面位置是电阻率跃变处,通过实时观测记录海底面上下一定深度范围内各点电阻率数值动态变化,可准确得出海底面高程的

动态变化过程，据此可以计算得出海洋沉积物—水界面沉积物通量。

## 1.4 本论文的研究内容，研究方法及技术路线

### 1.4.1 本论文研究内容

本论文拟设计一个基于电阻率测量的海床蚀积过程原位监测系统，可以实现风暴极端海况下及一般海况下的海床蚀积过程原位监测，为海床蚀积机理研究及其他相关研究提供实时监测数据。具体研究内容包括以下几个方面：

- 1) 系统总体结构设计研究；
- 2) 主控部分硬件电路设计及软件程序开发；
- 3) 电极探杆参数设计研究；
- 4) 监测数据处理软件开发；
- 5) 监测系统总装与测量精度分析研究；
- 6) 系统室内与现场应用研究。

### 1.4.2 本论文中采用的研究方法

针对以上研究内容，本论文采用的研究方法：

- 1) 分析已有的基于电阻率海床蚀积监测仪器结构，结合本文监测系统的设计要求，设计本监测系统的总体结构；
- 2) 分析电阻率仪器主控部分的设计方法，完成本设计主控部分硬件设计及相应的主控软件设计；
- 3) 在前人研制的基础上，进一步分析问题，提出本文新的硬件设计方案，简化系统硬件电路，并完成相应的主控软件设计；
- 4) 通过实验方法和资料查阅，进行了电极探杆部分的设计和材料选择；
- 5) 采用多软件结合方式，分模块进行监测软件编制；
- 6) 进行系统误差分析和实验方式验证分析结果的正确性；
- 7) 室内模拟实验，验证本论文研制系统的有效性；
- 8) 现场实验，验证本论文研制系统的有效性。

## 1.5 本论文取得的成果与创新

### 1.5.1 本论文取得的成果

1. 本论文设计完成一个基于电阻率测量的海床蚀积过程原位监测系统。该系统包括机械探杆，电子采集记录仪和上位机数据处理软件三个部分，可以实现海床蚀积的长期自动监测，自容式记录测试结果。监测系统参数如下：

- A/D 有效分辨率：20 位（即分辨率：1.2  $\mu\text{V}$ ）
- 电压测试精度：68  $\mu\text{V}$
- 电阻率测试精度：0.012  $\Omega \cdot \text{m}$
- 最大输入信号： $\pm 2.5\text{V}$ （峰-峰值）
- 输入阻抗：2G  $\Omega$
- 自电补偿： $\pm 2.3\text{V}$
- 供电电流：10mA
- 一个 Wenner 测试的时间间隔：8s
- 采样次数：64 次

2. 本论文进行的探杆设计，通过实验对比分析，选择探杆电极布设方法为环形布设、探杆直径 7cm 和电极间距 1cm；

3. 电子采集记录仪设计，包括硬件设计和下位机软件设计两个部分，设计了数据采集模块、时钟模块、存储模块、电极自动转换模块，其中的电极自动转换模块采用了创新的分级电极转换结构和转换算法，海量存储数据，减少系统所需通道数量，缩小系统体积，降低了系统低功耗，能够实现长期观测；

4. 上位机数据处理软件开发，开发完成了仪器参数设置、数据处理和曲线拟合三个模块，采用的 VC++6.0 完成界面部分和计算部分，matcom 4.5 完成曲线绘制及曲线拟合，直接可以进行数据的后处理，方便使用。

5. 本论文通过实验进一步确定系统的采样次数及调整极化算法，并把测得的数据和商业化 E60BN 高密度电法仪数据对比，验证本系统测试土体和海水电阻率数据的有效性。

6. 应用本论文研发的仪器进行了室内测试对比实验，检验了仪器测试电导率结果的准确性，及沉积物-水界面位置判定的有效性，误差在 0.80cm 以内。

7. 现场测试实验的结果表明, 在海洋水动力条件较为平静时, 测试结果很好的反映海水-沉积物界面; 当水动力作用较强时, 目前仪器所用电极的极化效应对测试结果影响较大, 将在下一步研究中通过改变电极材料来完善。

## 1.5.2 本文创新点

本论文创新的包括以下三个方面:

1. 分级的电极开关转换结构设计, 采用两级开关结构和相应的主控软件, 可以极大的减小多电极电路的硬件开销, 缩小了整个系统的体积;
2. 多电极自动切换海床蚀积监测系统设计, 实现了对海床蚀积监测过程中的电极自动切换, 减少了电路系统的数据采集通道。
3. 提出了海水-沉积物界面的中间值-直线分析方法, 首次给出电阻率数据界面的分析判定方法。

## 1.6 本论文结构

第一章: 绪论。根据国内外研究现状, 提出本文研究内容。

第二章: 监测系统总体设计。本部分分析该系统拟完成的功能, 给出系统的总体结构。

第三章: 监测系统主控部分硬件设计。本部分对主控部分的硬件划分模块, 并完成各个模块的硬件设计, 及整合调试。

第四章: 监测系统主控部分软件设计。根据硬件模块的划分, 分模块设计主控部分程序, 并进行整合。

第五章: 监测系统电极探杆设计。给出电阻率方法测试的原理及计算公式, 选定电极探杆材料、粗细及通过实验确定探杆上电极间距。

第六章 监测系统上位机软件设计。本部分完成 PC 机端的系统数据分析及后处理软件设计。

第七章: 监测系统误差分析。本部分对监测系统进行了误差分析, 并对误差较大的部分予以去除, 最终确定系统的总误差和精度。

第八章: 监测系统装配及系统参数确定。设计完成的系统各个部分需要组装, 然后实施测试。通过室内实验选定系统采样次数, 采样间隔, 把自行设计仪器数



据和已有的商业化仪器数据进行对比分析，验证系统测试数据的正确性。

第九章：监测系统室内应用效果评价。采用电阻率方法进行室内实验，验证监测系统测试的有效性。

第十章：监测系统现场应用效果评价。采用电阻率方法进行现场实验，验证监测系统测试的有效性。

第十一章：结论、创新点和进一步研究。本部分总结了整个系统的设计，给出本文的创新点，并指出进一步开展工作的方向。

## 1.7 本章小结

本章分析了国内外对蚀积短时间尺度监测方法，发现其中的电阻率方法适合于在正常海况及极端海况下实施原位监测。在此基础上，提出论文研究内容，即设计一个可以进行海床蚀积原位长期监测的系统，该系统能够实现多电极自动转换监测、海量存储、高分辨率的长期监测。

## 2 监测系统总体设计

本章分析了监测系统的工作原理，通过借鉴前人研制类似系统的结构，设计了本监测系统的结构；根据 1.3 中提出的问题，给出了系统的功能设计；并设计了系统测试有效性的评估方法。

### 2.1 监测系统工作原理

本小节介绍了电阻率监测方法，给出该方法的工作原理；并进一步分析了采用该方法进行海床蚀积监测的原理。

#### 2.1.1 电阻率方法简介

##### 1) 电阻率测量方法基本原理

电阻率是描述物质导电性能的一个电性参数。由物理学可以知道，粗细均匀、材料一定的导体的电阻  $R$  与导体长度  $L$  成正比，与其横截面积  $A$  成反比，即：

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{式 (2-1)}$$

式中的比例系数  $\rho$  就是电阻率，即：
$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \text{式 (2-2)}$$

(2-2) 式表明电阻率在数值上对于电流垂直流过单位截面积，单位长度导体时，该体积内导体所呈现的电阻。也就是说，电阻率越小，物质的导电性越好。电阻率的单位为欧姆·米 ( $\Omega \cdot m$ )。

不同材料物质具有电性差异，图 2-1 给出了各种材料的电阻率典型值<sup>[54]</sup>。

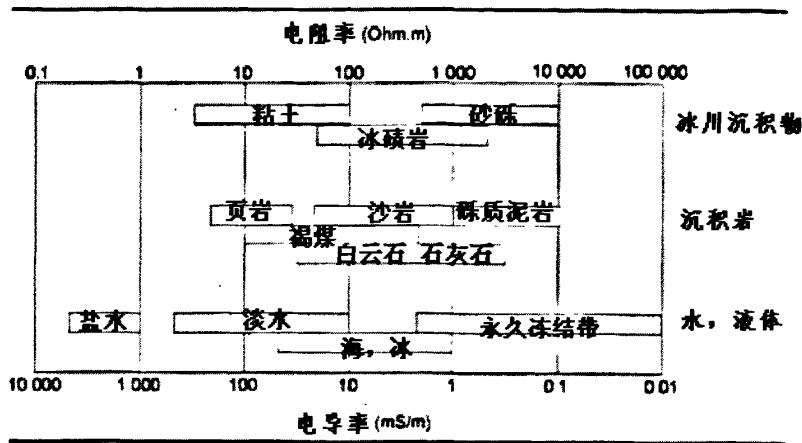


图 2-1 各种材料电阻率的典型范围 (A. Samouëliana, 2005)

从图 2-1 中可以看出, 不同介质, 电阻率有着显著差异。本论文研究的海水的电阻率在 0.2~1 之间, 粘土的电阻率在 5~100 之间, 两者电阻率存在着显著差异。

电阻率方法就是用电导性差异为基础, 通过观测和研究人工电场的发布来分析问题的方法, 最初是用来分析地质问题的勘探方法。Schlumberger (1912) 介绍了使用电阻率测量岩体表面以下的特性。此后, 从 20 世纪 20 年代, 电阻率测量就被地质学家用来进行地质勘探<sup>[55]</sup>, 最初在地质上被石油集团采用来找油库及研究地质层组。

## 2) 一维垂直电阻率测量 (vertical electrical sounding, VES)

电阻率方法最简单的是一维测量: 一维电阻率测量通常用在实验室里校准电阻率, 和现场垂直电阻率测量。后者是由电极之间距离持续增加的电测量构成的。在每一步, 随着土壤深度和体积的增加, 测量数据表明了土壤电阻率随着深度的变化<sup>[56]</sup>。VES 数据解释通常假设表面以下是由几个水平的层构成的<sup>[57]</sup>。一般用 A、B 表示为供电电极, M、N 表示测量电极。则电阻率可以通过下面的公式计算出来<sup>[54]</sup>:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2L} \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right] \quad \text{式 (2-3)}$$

$$A = \left[ \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right] \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad \text{式 (2-4)}$$

电极的排列方式一般有: Wenner、Wenner-Schlumberger、Dipole-Dipole、Pole-Pole、Pole-Dipole 等多种布设方式, 文献[54]给出了各种方式的布设图。

根据(2-2)式可以计算出不同布设方式的K值。不同的电极布设方式适合不同的测量需要,文献<sup>[54]</sup>给出了一个简单的介绍,这里不赘述。

## 2.1.2 海床蚀积电阻率监测方法原理

海水是电的良好导体,泥沙颗粒几乎是不导电的。海底沉积物是含有海水的泥沙,根据其海水含量不同而具有不同程度的导电性,但显然没有海水导电性好,即海水与沉积物两者存在导电差异性。应用2.1.1中所述的VES,假设海水及沉积物是由几个水平的层构成的,通过测量不同层的电阻率,即可分辨海水和沉积物的界面位置或高程变化。

Ridd 和 Wheatcroft 的测试表明:海水与其底部海床沉积物的电阻率有着极大的不同,Ridd 表明两者大约是4倍的关系,而 Wheatcroft 测试沉积物的丘和壑电性差异过程中得到的数据可以看出两者大约是2.5倍的关系(如图2-10所示)。两位学者测试存在明显差异是由于选取的测试位置不同,海水及沉积物的特性也不相同:Ridd 是在河口地区细颗粒沉积物中实施测试,而 Wheatcroft 是在沙质沉积物中实施。不管两者电阻率值之间是4倍还是2.5倍的关系,已经足可以据此确定它们的界面位置了,而且对于细颗粒沉积物两者电性差异更为明显。

## 2.2 相关电阻率测试方法介绍

本小节在分析海洋电阻率探测装置的结构和采用电阻率方法测试仪器的设计方法的基础上,结合本系统拟完成的任务和2.1小节给出的监测系统工作原理,给出了本论文拟设计的监测系统的总体设计,并进一步给出了系统的具体实施方案。

### 2.2.1 海床电阻率探测装置研究介绍

研究发现电阻率和沉积物的很多参数存在密切关系,电法经常被用来测量沉积物的孔隙度、渗透性及含水量<sup>[58]</sup>,其中孔隙度测试尤为常用<sup>[59, 60]</sup>。

围绕海洋沉积物电阻率现场原位测量,国外有大量研究工作的开展,大多数

研究是围绕实测并建立海洋沉积物电阻率与沉积物孔隙度之间关系,不同时期这方面一些代表性研究成果包括在 Kermabon(1969)、Jackson(1975)、Cheesman(1991, 1993)、Laur(1998)的文章中<sup>[61-65]</sup>。

现场原位电阻率探测采用钻孔方式,或者探测器方式。钻孔方式:适用于固结土。探测器方式,一般采用自由落体形式,适用于非固结土。因为非固结土钻孔过程中或者钻孔后,容易坍塌。早在1969年Kermabon就采用自由落体探测器实施原位电阻率测试。Bouma et al. (1971)、Erchul and Nacci (1972)、Jackson (1975)等人先后进行了电阻率现场原位实验,都是为测量电阻率和孔隙度等沉积物物理特性相关性。Lauer-Leredde, Pezard et al. (1998)为了方便地给出浅层沉积物的剖面,进而研究沉积物的物理特性,研制了一个非固结沉积物阵列式成像和取样(Formation Imaging and Coring for Unconsolidated Sediments, FICUS)高密度电阻率设备,采用两层交错的方式在一个探杆上,布设了32组电流电极,结构如图2-2;参考电极在远离电流电极几米处,该设备的剖面图如图2-3。测试电流电极和参考电极之间的电压 $\Delta V$ ;就可以计算不同深度处沉积物的视电阻率<sup>[66]</sup>。



图 2-2 FICU 探测器图片 (Lauer-Leredde, Pezard et al., 1998)

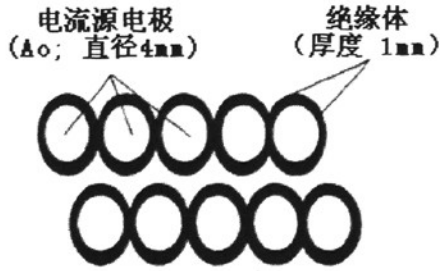


图 2-3 中心电极排列示意图 (Lauer-Leredde, Pezard et al., 1998)

Wheatcroft (2002) 为了研究浅海近表不同位置处沉积物的不同孔隙度, 研制了如图 2-4 所示的测试设备。该设备上部是一个电机, 底部安放四个电极, 整个设备用支架支撑。工作时候, 电机驱动连接电极的探杆向下移动, 从而测得不同深度处的电阻率<sup>[53]</sup>。

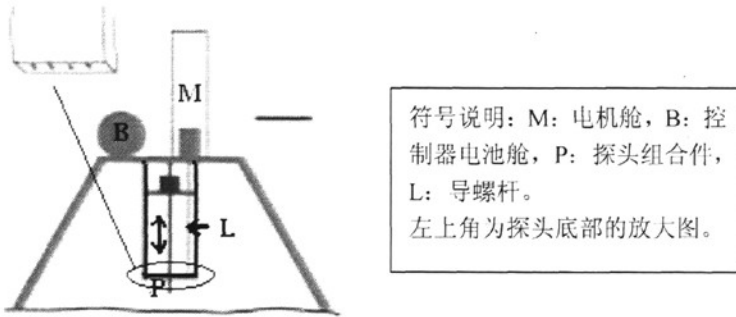


图 2-4 Wheatcroft 设计的测试孔隙度仪器。(Wheatcroft, 2002)

Rosenberger (1999) 为了进行深海沉积物探测, 设计了一个自由落体的电阻率探测设备, 如图 2-5 所示。并用该设备进行了现场实验。该设备有两个独立的电阻率测试部分, 图中的排列 1, 和排列 2, 允许在贯入过程中进行重复测试, 以确认测试的正确性<sup>[67]</sup>。应用该设备, Daniela 等人 (2005) 在 Cascadia 盆地深海地区进行了原位测试<sup>[68]</sup>。

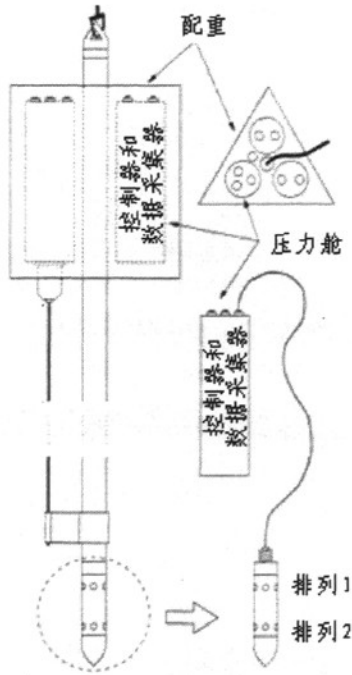


图 2-5 Rosenberger 等研制的电阻率测试设备 (Rosenberger, 1999)

布设方式：对沉积物测得探测，电极布设方式一般采用 wenner 方式。即：中间为测量电极 M 及 N，两侧为供电电极 A 及 B。四个电极直接是等间隔的，一般任意两个相邻电极直接的间隔记为  $a$ 。如图 2-6 所示：

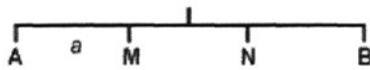


图 2-6 Wenner 电极布设示意图

## 2.2.2 电法仪器研究介绍

### 1) 高密度电法

九十年代后期，高密度电法作为高分辨率电法新技术<sup>[69]</sup>发展起来，此前，一直是人工跑极。高密度电阻率法是在常规电法基础上发展起来的，高密度电法仪是普通的电测仪+电极转换开关，为多电极测量系统。高密度电法是一种阵列勘探方法，野外测量时只需将全部电极(几十至上百根)置于测点上，然后利用程控电极转换开关、总线技术和电测仪便可实现数据的快速和自动采集。

相对于人工跑极的常规电阻率法而言，它具有以下特点：①电极布设是一次

完成的,这不仅减少了因电极设置而引起的故障干扰,而且为野外数据的快速和自动测量奠定了基础;②能有效地进行多种电极排列方式的扫描测量,因而可以获得较丰富的关于地电断面结构特征的地质信息;③野外数据采集实现了自动化或半自动化,不仅采集速度快,而且避免了由于手工操作所出现的错误;④可以对应用处理软件,方便的对资料进行预处理;⑤成本低、效率高,信息丰富,解释方便,勘探能力显著提高<sup>[70]</sup>。

目前国内研究高密度电法技术和仪器的主要有北方地球物理探测技术开发有限公司、中国地质大学、重庆奔腾数控技术研究所、吉林大学、重庆地质仪器厂等单位 and 院校<sup>[71]</sup>。

## 2) 高密度电法监测仪器实现方式

① 最早用电极+连接导线或多芯电缆+机械式电极转换开关(由步进电机控制)+工程电测仪。

② 一极一线制的集中式电极转换器。集中式高密度电阻率仪器却有一个不容忽视的弱点:随着电极数量的增加野外施工中所铺设的电缆数量也同步增加影响野外施工效率,同时由于接线的增加,必然使仪器的可靠性下降,体积变得庞大<sup>[72]</sup>。

③ 分布式电极开关<sup>[73]</sup>:可以说分布式高密度电阻率测试方法是目前最为方便的电阻率测量方法。

## 3) 国内外电法仪研制现状

1997年12月,《地学仪器》杂志又发表了中国地质大学(武汉)在国内首创的分布式智能化高密度电法测量系统的文章<sup>[73]</sup>。此后很多人都对分布式高密度电阻率测试的仪器进行了研究:郑采君(2004年)研究了该设备的电极转换装置<sup>[72]</sup>;利奕年和罗延钟(2006年)、刘海飞、姚健等(2007)研究了该仪器的数据的预处理算法<sup>[74-76]</sup>;董浩斌和王传雷、李聪嫔、管奕、朱栋华研究了测试仪器系统的设计<sup>[73, 77-79]</sup>。如今在屏幕上能进行现场曲线显示的只有中国地质大学(武汉)和原长春地质学院骄鹏公司生产的少数仪器。

国外生产高密度电法仪的主要有日本的 OYO 公司、瑞典的 ABEM 公司、法国的 IRIS 公司及美国的 AGI 公司,这些仪器价位在 6~7 万美元(6 个电极配置)。国外仪器大多数是将电测仪与电极转换开关分开的。2002 年 12 月份,美国的 AGI



公司出品的一款新仪器才将电测量主机与开关单元结合在一起。但未见国外仪器中使用 PC 机或类似 PC 机作为仪器主控制器, 并且没有能实现现场测量曲线仪器的有关报道。

#### 4) 高密度电法系统构成

一般来说, 分布式高密度电法系统, 由高密度电法仪器硬件测试设备和上位机 (PC) 软件处理软件两部分构成。硬件测试设备采用分布式的结构测得电阻率数据, 并存储或者通过串口方式送到上位主机, 一般包括 CPU 主控模块, 滤波和 AD 转换模块, 放大器模块, 多路电极转换装置, 分布式控制模块, 通讯及存储模块、实时时钟等几个模块; 软件处理部分通过对数据的处理得出电阻率剖面图, 一般包括数据的预处理和数据的电阻率的正反演部分。

## 2.3 海床蚀积电阻率监测系统总体结构设计

### 2.3.1 海床蚀积监测的电阻率监测系统的特点

电阻率蚀积监测系统的特点包括以下几个方面:

- 1) 海底 VES 探测: 不能现场布线, 需预制电极布设探杆;
- 2) 多电极集中式探测: 无需采用总线分布式结构, 但需采用开关转换;
- 3) 需要无主机自主工作: 需要采用 CPU 控制系统进行探测, 并能存储数据;
- 4) 定期读取数据, 送入 PC 机: PC 机上应有相应的数据处理软件对得到的数据读取及处理。

### 2.3.2 监测系统的组成

借鉴 2.2.1 中前人设计的采用电阻率方法的海洋监测系统, 结合拟设计系统的特性, 本系统划分为以下三个部分:

- 1) 机械探杆: 是一个布设有环形电极的 PVC 探杆, 通过连接线把电极引入电子采集记录仪器的端口;
- 2) 主控部分: 通过连接线给供电电极提供激励信号并采集测量电极的电压电流信号, 数据采集结果记录在采集仪的海量存储空间;
- 3) PC 机处理软件部分: 本系统设计了一个专用的数据处理软件, 处理数据

更为方便快捷。测试开始前，设置主控部分的控制参数，如采样频率，监测开始及结束时间等，测试结束后，取出主控部分中的存储模块，用 PC 机软件读取其中数据，并在处理软件中进行数据处理分析及绘制曲线等工作。

整个系统结构框图如图 2-7 所示。

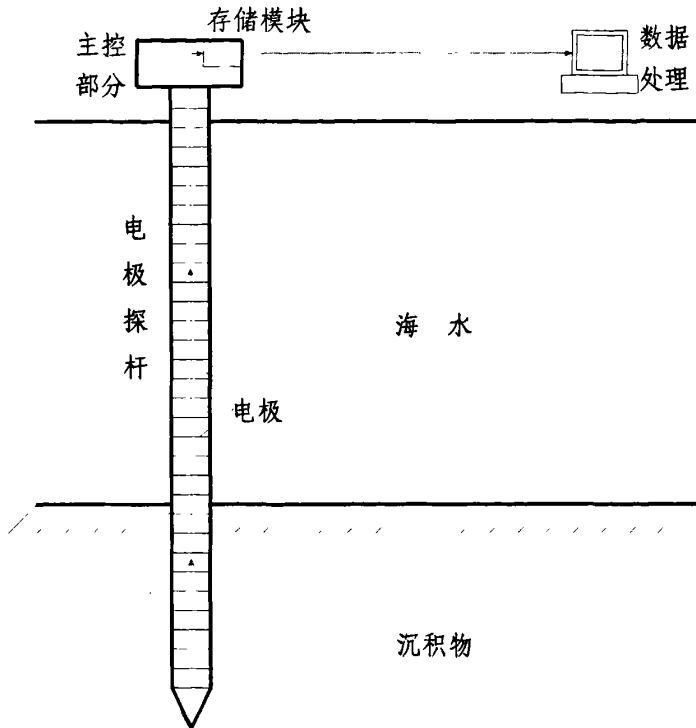


图 2-7 系统结构框图

## 2.4 监测系统各部分结构设计

整个系统分三大部分，机械探杆，主控部分和 PC 机处理软件，在具体设计时，对每个部分分别进行设计调试，然后在进行系统的整合。

### 2.4.1 机械探杆设计

参考 2.2.1 中海床电阻率探测装置的结构设计，本设计中选用 Ridd 类似的环形电极，绕制在 PVC 绝缘探杆上。这种探杆和电极结构可以方便的置入海床沉

积物中，并易于和周围沉积物有更好的接触。探杆结构图如图 2-8 所示。

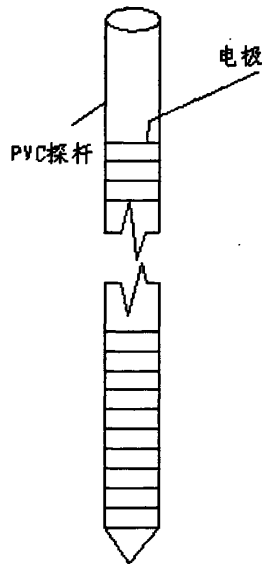


图 2-8 机械探杆结构示意图

机械探杆细节设计需要考虑的问题：如何合理的选择参数，使得测试数据和实际数据更为接近。这些需要选择的参数包括：① 探杆的粗细，也就是环形电极的粗细；② 探杆上电极的极距和粗细；③ 电极的材料，要耐腐蚀，不易变形损坏。合理的选择这些参数，需要制作不同规格的探杆来进行实验室实验、分析对比数据和理论分析。良好的探杆结构设计是数据正确的有力保障。

## 2.4.2 主控部分设计

主控部分是系统的核心部分，此部分的设计直接影响系统性能的好坏。主控部分包括两大部分：硬件设计和软件设计。硬件部分设计：首先要划分模块，然后对每个模块进行电路设计、器件选型和程序设计与调试。

为满足 2.2.1 中提出的要求，本设计给出的基于电阻率方法的蚀积测试仪器的电路系统在 Ridd 仪器基础上进行了改进：① 测试过程中自动切换电极。即一个电极在某一时刻是供电电极，在另外一个时刻可能就是测试电极。这样只需要 2 个测试通道，一个测试电压，一个测试电流。增加电极无需增加测试通道，只需要适当增加切换开关，使得增加电极带来的开销最小化；② USB 自容式真正海量存储，目前可以达到 256M 存储空间，满足长期监测需要；③ 存储的同时

采用 GPRS 技术实时传输数据到岸台，满足实时性需求。上述 3 种改进措施彻底解决了 2.2.1 中提出的几点要求。系统同时采用低功耗设计极大的满足便携式需求，及高精度测量满足系统精细数据分析的需求。图 2-9 给出了主控部分的结构图。

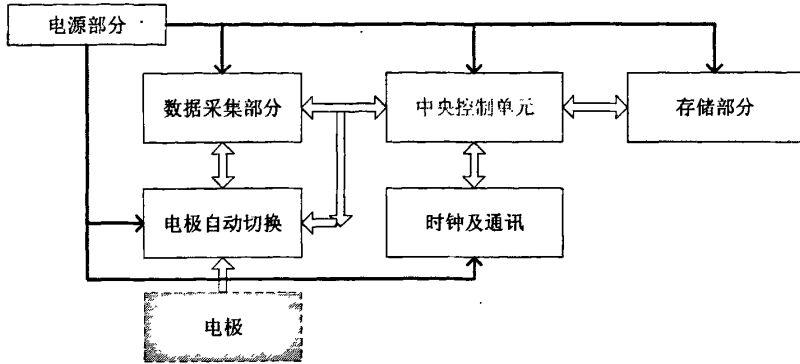


图 2-9 主控部分结构示意图。

### 2.4.3 PC 机处理软件设计

PC 机处理软件可以使得测量得到数据的处理工作更为方便。该处理软件需要和硬件具有良好的接口，VC++6.0 软件无疑是最佳的选择。在软件的设计过程中，也采用了分模块设计的方式。人性化的软件设计会给系统增色不少！

## 2.5 监测系统功能设计

为解决 1.3 中提出的问题，本论文设计的系统拟完成以下功能：

- 1) 电极自动转换：自动切换电极，使电极在不同时刻接入测试电路，减少多电极测量需要的信号通道数量；
- 2) 实时数据采集：实时采集数据，得到高时间分辨率的数据，以便于进一步的数据分析；
- 3) 海量存储：采用真正的海量存储技术，满足系统长期监测的大量数据存储的需求；
- 4) 定时开关：可以根据设定，定时开始及结束数据采集，可以选择更方便的时刻进行监测仪器的布设，而不必考虑浪费电源能量；
- 5) 探杆设计：通过实验及比较分析，选择探杆及其上电极材料，并选择合

适的电极极距；

- 6) 对测试数据的处理：设计软件处理系统，对测试得到的数据进行处理。
- 7) 以上几部分功能设计，共同实现采用电阻率方法进行海床蚀积自动监测的系统设计。

## 2.4 监测系统有效性评估方法

设计完成的系统，需要验证系统测试数据的精度与有效性。本论文通过以下三个实验进行了验证：

- 1) 系统误差分析及误差测试实验：对设计的系统进行实验测试，根据测试结果进行精度与误差分析；
- 2) 数据对比实验：将本论文设计监测系统测试数据和商业化高密度电法仪测量数据进行对比，验证系统测试数据的准确性；
- 3) 室内和原位监测实验：进行室内和原位监测实验，进行海床界面高程变化分析，并和实际观测值对比，验证监测系统的有效性

## 2.5 本章小结

本章在分析监测系统工作原理及其他监测系统设计方法的基础上，给出了监测系统的总体设计，包括系统的总体结构设计、系统的功能设计和有效性评估方法设计。根据给出的总体设计，即可分部分完成系统的各项功能，最终达到实现整个监测系统的设计完成和验证。

### 3 监测系统主控部分硬件设计

本部分主要完成监测系统主控部分的硬件设计。首先对主控部分硬件系统进行总体设计和模块划分，然后对各个模块分别进行分析和设计。

#### 3.1 监测系统主控部分总体设计和模块划分

监测系统主控部分放置在一个压力舱中，采用防水接口和探杆机械部分相连。系统结构框图如图 3-1 所示。整个电路系统选用单片机作为中央控制单元，采用四电极的 Wenner 测量结构，系统包括电源模块、中央控制单元和存储模块、数据采集模块、电极自动转换模块及时钟和通讯模块等五个部分。

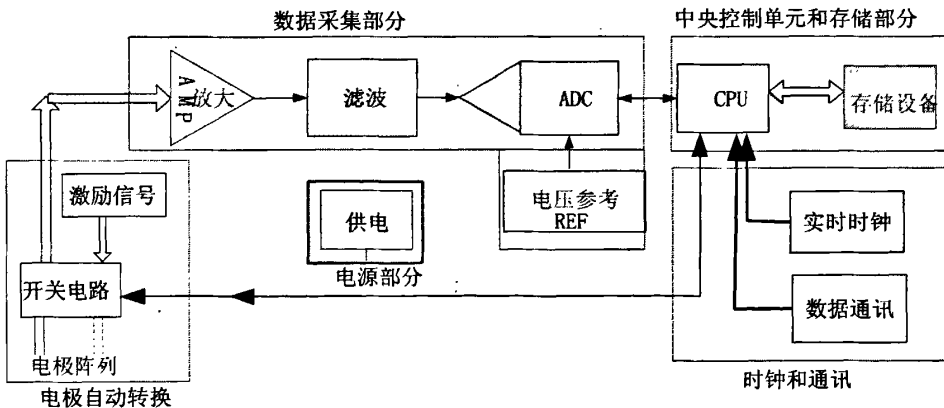


图 3-1 系统结构框图

这几个模块的功能如下：

- 中央控制单元：中央控制单元即 CPU，是整个系统的控制中心，整个的数据采集过程是在 CPU 的控制下有序进行的，对 CPU 的编程即可实现对整个系统的控制和功能的实现；
- 数据采集模块：把输入的 mv 级微弱模拟小信号转换为 CPU 能够处理的数字信号。这部分实现了信号的放大、滤波、及 AD 转换；
- 海量存储模块：存储部分，存储采集到的数据和系统的初始化信息，采用 USB 海量存储技术，满足长期无人值守的数据采集需求；
- 电极自动转换模块：该部分设有开关电路，在 CPU 的控制下，按照预先

设定的逻辑进行开关自动切换，把拟采集的信号送入数据采集模块；

- 实时时钟模块：时钟部分可以为系统提供实时时钟和在任意给定时刻发出中断信号，以便于可以系统根据设定时间开始和结束数据采集；
- 电源模块：给整个系统提供稳定可靠的供电电压。

这六个模块相互协调，共同完成电阻率监测的任务。

为在海床浅水区方便的实施原位长期自动监测沉积物的侵蚀与淤积情况，系统设计过程中考虑了便携性和长期无人值守需求。便携性，要求系统小型化；长期无人值守，要求系统能够完成数据海量存储或实时传输数据，也要求系统低功耗。

## 3.2 中央处理单元设计

由于系统采样率要求低，没有复杂的运算，数据处理送到上位机进行，因而数字信号处理要求少。海床蚀积变化是个相对缓慢的过程，采样速率 1HZ（1s 采样一次）足够了，对处理速度要求不高。CPU 的主要工作是控制几个外部设备协调工作，因而选用具有一般处理频率、高 flash 程序空间的单片机作为中央处理单元较为合理。

### 3.2.1 单片机的选用及最小系统

目前流行的单片机主要有 AVR、Atmel 系列单片机，其中 Atmel 的 51 系列单片机最为常用，有相应的 C51 编程语言，可以实现方便快捷的软件设计，缩短系统的开发周期，十分方便。51 系列单片机提供不同程序空间和数据空间及不同速率的多种器件可供选用，另外，其它采用 51 内核具有多种功能的单片机也十分丰富。本设计中选用 51 系列单片机做为整个系统的 CPU。

单片机系统结构图如图 3-2 所示。

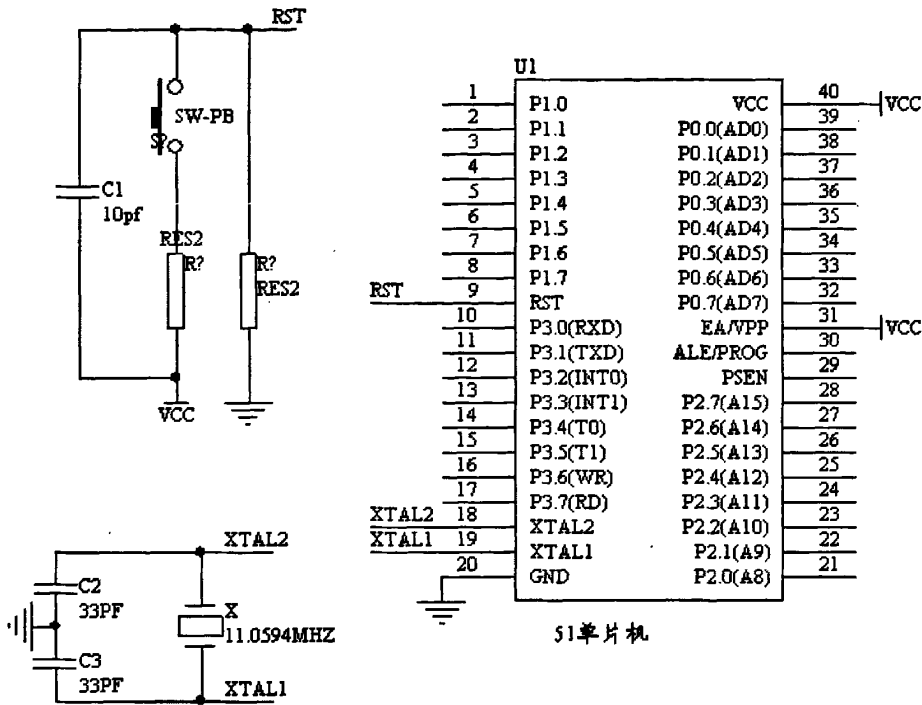


图 3-2 单片机最小系统图

### 3.2.2 ISP 编程方式实现

51 系列单片机的较新产品都具有在线编程功能，因而系统开发过程中，可以采用仿真器在线仿真调试整个系统，也可以采用更为方便的 ISP 方式进行调试。

#### ① ISP 下载方式简介

ISP (In-System Programming) 在系统可编程<sup>[43, 80]</sup>，指电路板上的空白器件可以编程写入最终用户代码，而不需要从电路板上取下器件，已经编程的器件也可以用 ISP 方式擦除或再编程。无论在单片机上还是在 CPLD/FPGA 上，ISP 技术都得到了广泛的应用，是未来发展方向。

传统的编程方式，如果想要对单片机进行写入程序，必须先把单片机从电路板上取下来，然后用编程器进行编程烧写，写入程序后再次插入电路板调试。如果产品的单片机已经焊接到电路板上，想要进行程序升级，那么要拆单片机下来就很困难了。可以看出，这种传统的开发方式有以下缺点：1) 需要频繁地拔插单片机芯片，很容易造成芯片引脚折断，损坏芯片（当然采用了零拔插力 ZIF 插座的实验板除外）；2) 如果单片机学习开发，那么需要频繁的刷新程序，就必须



重复地拔插芯片，大大降低了开发效率；3) 开发产品的可维护性低；

ISP 在系统可编程技术彻底地改变了传统的开发模式，它只要在设计时电路板上预留一个标准的 ISP 接口，配合 ISP 下载电缆，就可以不用拔出芯片，在电路板上就可以对芯片进行编程配置，对比传统的开发系统，有以下优势：1) 工程师在开发产品时彻底告别频繁拔插芯片的烦恼，避免频繁拔插损坏芯片的引脚；2) ISP 技术可以加速产品的上市并降低开发成本；3) ISP 技术帮助工程师缩短从设计、生产到现场调试、简化生产流程并采用经证实更有效的方式进行现场升级和产品维护，大大提高了工作效率；4) 在试验新品或学习试验等经常需要用不同的程序调试芯片的场合中，在线编程技术尤为重要实用。

### ② ISP 编程器的使用方法

- a 用并口电缆将编程器和 PC 机并口连接好；
- b 将 ISP 下载电缆插入实验板或目标板的 ISP 接口；
- c 将 USB 电缆插入编程器的 USB 取电口，向编程器提供工作电源；
- d 启动 ISP 编程器驱动软件，选择编译好的程序代码，按要求操作即可。

### ③ ISP 下载线

ISP 方式在单片机系统加上一个下载线接口，用一个简单的下载线就可以方便的实现在线编程。本设计开发过程中采用了 ISP 方式进行程序下载调试。ISP 下载线可以在 Atmel 官方的销售中心买到，但价格昂贵，简单的下载线价格 800 元人民币。下载线可以根据官方提供的技术资料自己制作，可以采用官方的下载软件。本设计中采用的是自制的下载线，下载电路用万用板焊接，然后装入一个内部空间较大的并口盒内即可。数据下载软件采用网友制作的软件。本质上下载软件就是把程序数据转化为 16 进制数据，并按照 51 单片机的时序把数据写入单片机的 flash 程序空间内。

## 3.3 数据采集模块设计

模拟信号到数字信号的转换通路中一般包括增益/信号调节单元、抗混叠 (anti-aliasing) 滤波器、模数转换器 (ADC) 三个部分。由于 ADC 通常需要一个电压基准源来提供基准信号，因而整个数据采集模块主要由信号调理单元、滤波、ADC、电压基准四个部分构成。这些部分电路的设计中，ADC 是最为重要的，

也是整个系统中成本最高的部分。设计数据采集模块一般是首先确定 ADC 器件，然后再根据选定的 ADC 来完成其他部分的设计。

### 3.3.1 ADC 器件选择

#### 1) 常用 ADC 器件特性比较:

现存的 ADC 器件主要有积分型、逐次逼近型、并行比较型/串并行型、 $\Sigma\Delta$  调制型、电容阵列逐次比较型及压频变换型等六种类型。它们的特性:

① 积分型: 积分型 AD 工作原理是将输入电压转换成时间 (脉冲宽度信号) 或频率 (脉冲频率), 然后由定时器/计数器获得数字值。其优点是用简单电路就能获得高分辨率, 但缺点是由于转换精度依赖于积分时间, 因此转换速率极低。初期的单片 AD 转换器大多采用积分型, 现在逐次比较型已逐步成为主流。

② 逐次比较型 (SAR): 逐次比较型 ADC 由一个比较器和 DAC 通过逐次比较逻辑构成, 从 MSB 开始, 顺序地对每一位将输入电压与内置 DAC 输出进行比较, 经  $n$  次比较而输出数字值。其电路规模属于中等。其优点是速度较高、功耗低, 在低分辨率 ( $<12$  位) 时价格便宜, 但高精度 ( $>12$  位) 时价格很高。

③ 并行比较型/串并行比较型: 并行比较型 AD 采用多个比较器, 仅作一次比较而实行转换, 又称 Flash (快速) 型。由于转换速率极高,  $n$  位的转换需要  $2^n - 1$  个比较器, 因此电路规模也极大, 价格也高, 只适用于视频 AD 转换器等速度特别高的领域。串并行比较型 AD 结构上介于并行型和逐次比较型之间, 最典型的是由 2 个  $n/2$  位的并行型 AD 转换器配合 DA 转换器组成, 用两次比较实行转换, 所以称为 Half flash (半快速) 型。还有分成三步或多步实现 AD 转换的叫做分级 (Multistep/Subranging) 型 AD, 而从转换时序角度又可称为流水线 (Pipelined) 型 AD, 现代的分级型 AD 中还加入了对多次转换结果作数字运算而修正特性等功能。这类 AD 速度比逐次比较型高, 电路规模比并行型小。

④  $\Sigma\Delta$  (Sigma-delta) 调制型:  $\Sigma\Delta$  型 ADC 由积分器、比较器、1 位 DAC 和数字滤波器等组成。原理近似于积分型, 将输入电压转换成时间 (脉冲宽度) 信号, 用数字滤波器处理后得到数字值。电路的数字部分基本上容易单片化, 因此容易做到高分辨率, 可达到 16 到 24 位的转换精度, 且价格低廉。弱点是转换速度较慢, 比较适合用于对检测精度要求很高, 对速度要求不是太高的测试设备。

⑤ 电容阵列逐次比较型：电容阵列逐次比较型 AD 在内置 DA 转换器中采用电容矩阵方式，也可称为电荷再分配型。一般的电阻阵列 DA 转换器中多数电阻的值必须一致，在单芯片上生成高精度的电阻并不容易。如果用电容阵列取代电阻阵列，可以用低廉成本制成高精度单片 AD 转换器。最近的逐次比较型 AD 转换器大多为电容阵列式的。

⑥ 压频变换 (V/F Voltage-Frequency Converter) 型：压频变换型是通过间接转换方式实现模数转换的。其原理是首先将输入的模拟信号转换成频率，然后用计数器将频率转换成数字量。从理论上讲这种 AD 的分辨率几乎可以无限增加，只要采样的时间能够满足输出频率分辨率要求的累积脉冲个数的宽度。其优点是分辨率高、功耗低、价格低，但是需要外部计数电路共同完成 AD 转换。

从上面分析可以看出，不同类型的 ADC 有不同的特点，适合不同的系统设计：积分型 ADC 现在已经较少采用；SAR 型适合高速转换的场合使用；并行比较型/串并行比较型适合视频等特别高速的应用； $\Sigma-\Delta$  (Sigma-delta) 调制型 ADC 最适合用于仪器仪表等低功耗、高精度的低频转换系统；电容阵列逐次比较型和 SAR 适合的应用类似；压频变换型分辨率高，但需要接外部电路。

## 2) 系统 ADC 器件的选择

如前面所述，本设计拟完成的数据采集仪器对采样速率要求低，为满足便携性，希望器件低功耗。综合上述问题，对 ADC 器件的需求为：低速率、高分辨率、高精度、低功耗。满足上述需求， $\Sigma-\Delta$  ADC 器件无疑是最佳的选择。 $\Sigma-\Delta$  ADC 能兼备低噪声和低功耗特性，不必牺牲两者任何一个。 $\Sigma-\Delta$  器件特点是可达到高测量精度，但输出数据频率低，因而适用于低频测量及便携式设备中，如：智能变送器、测试设备、传感器、温度与压力测量和电子秤等应用<sup>[81]</sup>。

系统选用具有目前最高精度的 24bit 的  $\Sigma-\Delta$  ADC 器件完成模数转换功能。器件为具有软件可编程序特性，其内部有 16 个寄存器。

## 3) $\Sigma-\Delta$ ADC 器件特点

sigma-delta 是 ADI 公司最先采用的一种先进的 ADC 器件的结构，与传统 Nyquist ADC 存在根本不同<sup>[85]</sup>。一个量程 10 千克的秤若能分辨出 1 克的重量变化，那么这个秤的主要器件通常是  $\Sigma-\Delta$  ADC；若需要温度测量精确度达到 0.01 度， $\Sigma-\Delta$  ADC 也通常是首选方案。 $\Sigma-\Delta$  ADC 能够取代那些前面加一个增益级

的传统型逐次逼近 ADC。这种模数转换器非常适用于量度真实世界的微小变化，所以温度传感器、天平、流量计等精密仪器以及很多其它类型的传感器都非常适合采用  $\Sigma-\Delta$  ADC。

这种类型 ADC 器件表面上看起来也许很复杂，但实际上它是由一系列简单的部件所构成的精确模数转换器，图 4-3 给出了一个一阶 sigma-delta ADC 的结构图。为了进一步改善器件的性能，大多数此类 ADC 器件都采用了二阶以上的 sigma-delta 结构。过采样、噪声功率谱整形、数字滤波和输出降采样滤波是  $\Sigma-\Delta$  转换器用来降低噪声并产生高分辨率输出数据的四种重要方法：

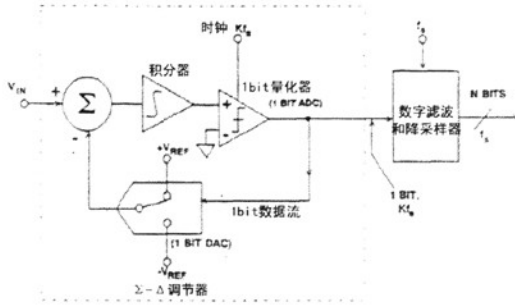


图 3-3 一阶 sigma-delta ADC 结构图<sup>[35]</sup>

① 过采样技术：以高于输入信号频率两倍的频率对输入信号采样，采样频率远远高于 Nyquist 采样频率。将相同量的噪声扩展到更宽的频率范围上，这极大地缩小了在所关注频带中的背景噪声如图 3-4 所示。过采样率每增加 2 倍，理想的信噪比(SNR)就提高 3dB。较大的 SNR 意味着  $\Sigma-\Delta$  转换器可以更好地分辨模拟输入中更小的变化。这样抗混叠过渡带变宽，简化数据采集系统抗混叠滤波器的设计；对元器件失配要求低，易于达到高精度<sup>[78-80]</sup>；降低信号带宽内的噪声功率；

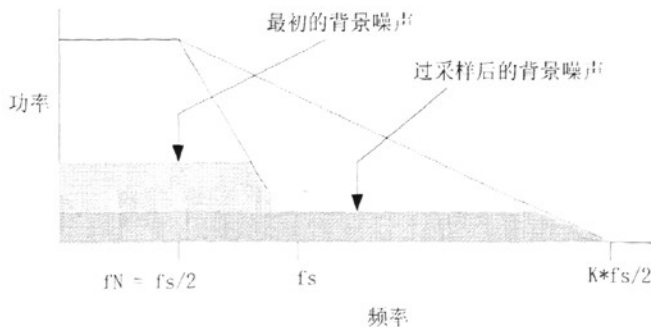


图 3-4 过采样降低了信号带频带内噪声示意图

②  $\Sigma$ - $\Delta$  调制器对噪声功率谱整形：用积分器进行噪声整形，把噪声推向高频段<sup>[82]</sup>，从而进一步提高低频段的信噪比。一阶调制器典型结构如图 3-5 中所示：

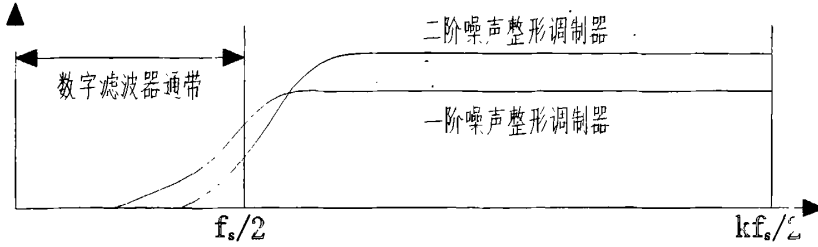


图 3-5 一阶和二阶噪声整形效果<sup>[83]</sup>

③ 数字滤波：数字滤波器的作用有两个：一是相对于最终采样速率  $f_s$ ，它必须起到抗混叠滤波器的作用；二是它必须滤除  $\Sigma$ - $\Delta$  调制器在噪声整形过程中产生的高频噪声，滤波前后信号对比如图 3-6 所示：

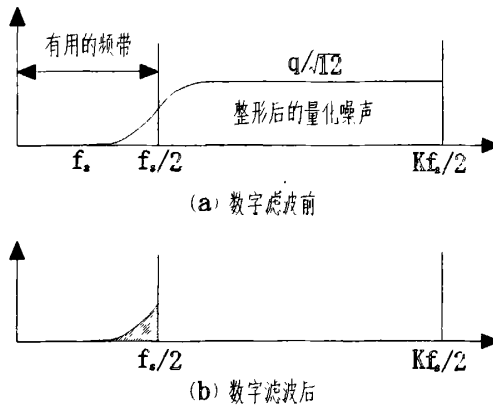


图 3-6 数字滤波前和数字滤波后对比图<sup>[84]</sup>

④ 输出降采样滤波 (Decimator)：把采样频率降为 Nyquist 频率<sup>[85]</sup>，因为数字滤波器降低了带宽，所以输出数据速率要低于原始采样速率，直至满足奈奎斯特定理。降低输出数据速率的方法是通过每输出  $M$  个数据抽取 1 个的数字重采样方法实现的，这种方法称作输出速率降为  $1/M$  的采样抽取去掉由过采样带来的冗余信号信息<sup>[86]</sup>。如果过采样率为 256，那么 ADC 求取 256 个采样的平均值，每 256 个采样产生 1 个数字输出。

前三种技术的结合使得 ADC 的有效分辨率增加，最后一种是用来减小 ADC

输出的有效采样率的。这里面可以看到，大多数转换器只有一个采样率， $\Sigma-\Delta$  转换器却有两个：输入采样率和输出数据率。以上这些决定了  $\Sigma-\Delta$  ADC 的低噪声、高分辨率。缺点：处理速度低，不适合处理高速信号；有数据延迟，当前输出结果落后于输入一个采样周期；配置这种 ADC 常常是一个复杂的过程。

### 3.3.2 抗混叠滤波电路

#### 1) 混叠现象的产生

输入到 ADC 器件的模拟信号通常不只包含系统要采集的信号，还会包含其他频率的干扰信号。当信号频率低于转换器输入级的带宽时，ADC 能可靠的转换输入信号的幅度及频率。当输入信号频率高于 ADC 采样频率的一半时，幅度信息仍将保留，但信号的频率将发生失真。A/D 的转换处理将改变高于 ADC 采样频率一半值的信号频率分量。此类改变及混叠将使得低于采样率一半的频率分量以及高于采样率一半的信号分量之间的差异无法辨别。图 3-7 给出了这一混叠的概念示意图。

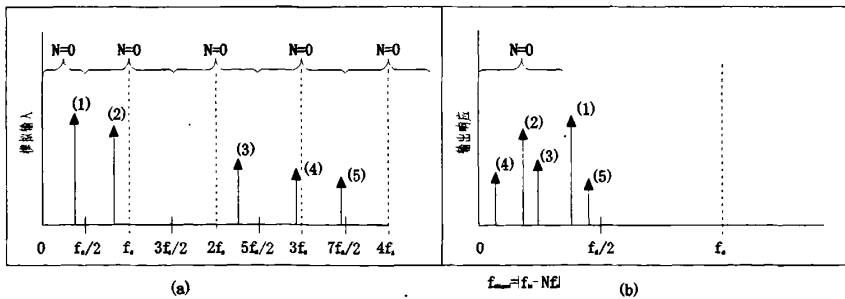


图 3-7 混叠现象

图 3-7(a) 给出了五个属于不同频带段的信号，图 3-7(b) 给出了采样后这些频带段信号的频率变化。N=0 段涵盖了直流至采样频率的一半的频带。在此带宽内，采样系统将可靠的记录模拟输入信号的频率分量及幅度。在数学上，较高频（图中的 2、3、4 及 5 四个信号）将依照以下方程向低频折叠：

$$f_{\text{aliased}} = |f_{\text{in}} - Nf_s| \quad \text{式(3-1)}$$

这样，其它段内的模拟信号频率分量将通过 ADC 记录至左侧的 N=0 段频带内，如图 3-7(a) 所示。采样输出将精确的保留此类输入信号（信号 2、3、4 及 5）的

幅度信息。然而，四个信号将折叠至直流至  $f_s/2$ （或 50kHz）的频率范围，并在转换器输出端输出。也就是说，所有高于  $f_s/2$  的信号频率分量将在转换器输出端发生频率改变，出现在较低频率区域和  $f_s/2$  频段内的信号发生混叠，图 3-7(b) 给出了此类信号转换时的折叠现象。在 A/D 转换之后，此类混叠的频率将不可能消除。在 ADC 器件前面加低通滤波器，可在模拟信号抵达 ADC 之前消除有可能混叠的较高频噪声，同时还可消除由前端放大器带来的噪声及外部的噪声尖刺。

## 2) 抗混叠滤波电路设计

抗混叠滤波器可以采用无源的低通滤波器，最简单的是一阶 RC 低通滤波器；或者采用运算放大器加 RC 网络组成有源滤波器，如巴特沃兹(Butterworth)、贝塞尔(Bessel)、切比雪夫(Chebyshev)以及反切比雪夫(inverse Chebyshev)等类型的滤波器。

滤波器的设计是个复杂的问题，需要考虑的因素很多。 $\Sigma-\Delta$  ADC 器件的特殊结构决定了优异的其抗干扰特性，使得这一抗混叠电路得到最大的简化，且对阻抗匹配很少需要考虑，只需要加一阶的 RC 滤波电路即可，如图 3-8 所示：

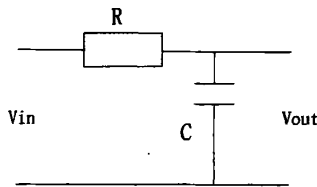


图 3-8 一阶 RC 滤波器

一阶 RC 滤波器的网络函数为：

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad \text{式 (3-2)}$$

式中  $\omega = 2\pi f$ ，一般认为  $|H(jf)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$  处对应的频率为信号截止频率，高于

该频率的信号即被截止，即  $f = 2\pi RC$ 。本系统的测试信号为低频信号，采用频率为 242HZ，低通滤波器截止频率设定为 120HZ。

### 3.3.3 信号放大单元

增益/信号调节单元所实现的功能包括了电流至电压的模拟转换、幅度增益及

(或)电压电平转换。本系统中主要涉及到信号放大。(添加点资料,过渡到后面)

### 1) 信号放大

模拟信号通常都比较微弱,通常为  $\text{mv}$  或  $\text{uv}$  级,ADC 器件的输入典型范围为  $0\sim 2.5\text{V}$  或者  $0\sim 5\text{V}$ 。微弱的模拟信号直接输入 ADC 器件进行转换不能充分发挥转换性能,一般要先经过放大器进行放大,合理选择放大倍数使模拟信号范围接近 ADC 器件的输入范围。

如果采用一只标准的运算放大器来对微弱的模拟信号进行放大,它不仅能放大信号两端电压,也能放大任何 DC 信号、噪声或其它共模电压。因此,真正需要的信号会淹没在 DC 失调电压和噪声之中。因而,即使最好的运算放大器也不能有效地提取微弱信号。

### 2) 仪表放大器

仪表放大器也称为仪用放大器,是一种放大两输入信号电压之差而能进行共模抑制的器件。共模抑制(Common Mode Rejection, CMR)是指抵消任何共模信号(两输入端电位相同)同时放大差模信号(两输入端的电位差)的特性,这是仪表放大器所提供的最重要的功能。因此,仪表放大器在从传感器和其它信号源提取微弱信号时提供非常重要的功能。现代单片集成电路(IC)仪表放大器提供了优良的 AC CMR 和 DC CMR。

仪表放大器是一种具有差分输入和相对参考端单端输出的闭环增益单元。大多数情况下,仪表放大器的两个输入端阻抗平衡并且阻值很高,典型值 $\geq 10^9\Omega$ 。其输入偏置电流也应很低,典型值为  $1\text{ nA}$  至  $50\text{ nA}$ 。与运算放大器一样,其输出阻抗很低,在低频段通常仅有几毫欧( $\text{m}\Omega$ )<sup>[87]</sup>。

### 3) 运算放大器和仪表放大器的 CMR

虽然运算放大器具有 CMR,但是共模电压与信号电压一起被传送到输出端。实际上,信号通过运算放大器的闭环增益被放大而共模电压仅得到单位增益。这种在增益方面的差异确实能按照信号电压的百分比对共模电压提供一些衰减。然而,共模电压依然出现在输出端并且它的存在降低了放大器的有效输出范围,如图 3-9a 所示。

三运放仪表放大器的运算放大器,工作在上述相同条件下。像运算放大器电路一样,仪表放大器的输入缓冲放大器以单位增益通过共模信号,放大信号电压。



来自两个缓冲器的输出信号连接到该仪表放大器的减法器单元。在这里（通常以低增益或单位增益）放大差分信号，而衰减（典型值为 10,000 : 1 或以上）共模电压。对比以上两个电路，两者都提供信号放大（和缓冲）功能，但是由于仪表放大器减法器单元的作用，仪表放大器抑制了共模电压如图 3-9b 所示。

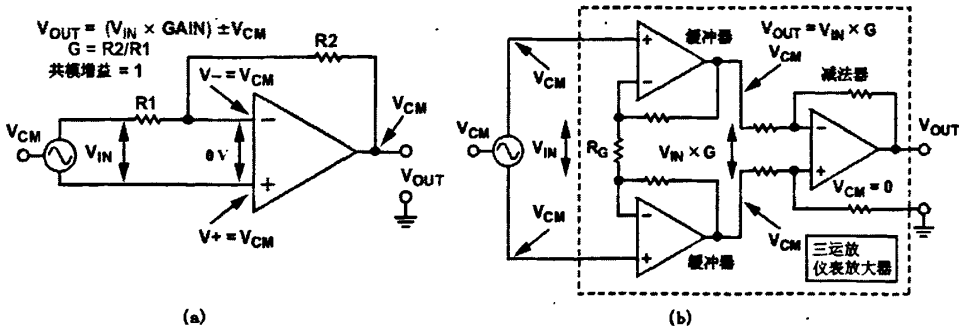


图 3-9 运算放大器和仪表放大器 CMR 示意图 (Kitchin and Counts, 2005)

通常用共模抑制比 (Common-Mode Rejection Ratio, CMRR) 来衡量仪表放大器对共模信号的抑制能力, CMRR 表达式:

$$CMR = 20 \log_{10} CMRR \quad \text{式 (3-3)}$$

式中  $A_D$  是放大器差模增益。  $V_{CM}$  是呈现在放大器输入端的共模电压。  $V_{OUT}$  是当共模输入信号施加到放大器时呈现的输出电压。

更经常用 CMRR 的对数形式 CMR:

$$CMRR = A_D \left( \frac{V_{CM}}{V_{OUT}} \right) \quad \text{式 (3-4)}$$

还有二运放结构的差分放大器, 主要适合与监测高共模电压的情况, 这里不在赘述, 有需要可参考相关资料。

#### 4) 选择仪表放大器需要考虑的因素

一般来说, 选择仪表放大器需要考虑的参数包括: CMR, 小信号带宽, 噪声 (eNI), 失调电压, 仪表放大器增益, 最大输出电压摆幅, 非线性, 电源电压, 电源电流。除了考虑上述技术指标, 还需考虑芯片是否易于购买的问题。

#### 5) 仪表放大器电路图

仪表放大器的外电路十分简单, 只需在电源端接去耦电容, 并外接一个电阻用来调节增益大小, 如图 3-10 所示, 3-10(a)是双电源供电电路, 4-10(b)是单电源供电电路。放大器增益计算公式<sup>[88]</sup>:

$$G = 1 + \frac{100k\Omega}{R_G} \quad \text{式 (3-5)}$$

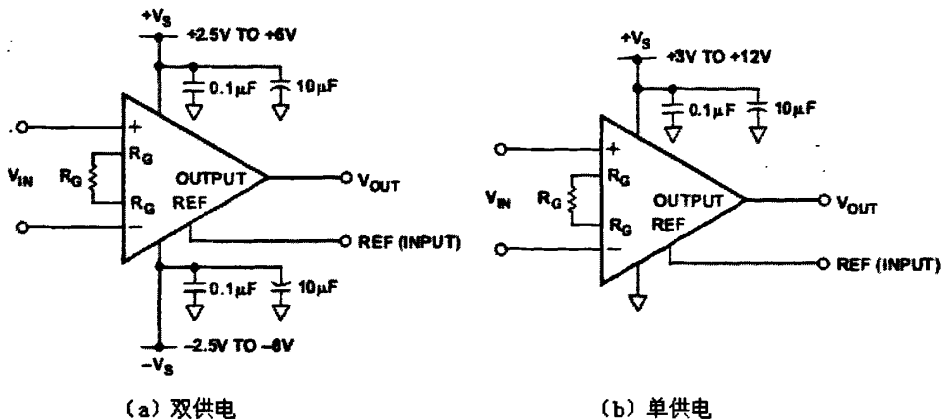


图 3-10 仪表放大器外电路图

### 3.3.4 基准器件选择

系统精度很大程度上依赖于内部或外部 DC 电压基准所建立的电压的精度。电压基准用来产生一个精确的输出电压，以此为数据转换系统设计满量程输入。精密外部电压基准与片上带隙电压基准相比，具有较低的温度系数、热迟滞和长期漂移。所以在需要高精度的应用中，往往需要一个外部精密电压基准。常用基准<sup>[89]</sup>：

#### 1) 带隙基准

带隙基准最简单的结构是用两个晶体管，用不同的发射极面积产生正比于绝对温度的电压。VBE1 和 VBE2 具有相反的温度系数。电压 Vcc 变换为电流 I1 和 I2，I1 和 I2 被镜象反映到输出支路，输出方程为： $V_o = VBE1 + \lambda(VBE1 - VBE2)$ ，式中  $\lambda$  是比例因子，VBE1 是第一个晶体管的基极——发射极电压，VBE2 是第二个晶体管的基极——发射极电压。带隙基准广泛用在 ADC/DAC 转换器中以及外部基准源，因为它相当便宜。通常，带隙基准用在需要最高 10 位精度的系统设计中。带隙基准一般具有 0.5~1.0% 初始误差和 25~50ppm/°C TC。输出电压噪声一般为 15~30  $\mu$ Vp-p(0.1~10Hz)，长期稳定性为 20~30ppm/1000 小时。

#### 2) 齐纳基准

图 3-11 所示的齐纳电压基准及其反馈放大器用于提供非常稳定的输出。用

电流源偏置 6.3V 的齐纳二极管。齐纳电压由电阻网络 R1 和 R2 分压。此电压加到运放的非倒相输入端，并被放大到所需要的输出电压。放大器增益由电阻网络 R3 和 R4 确定，即增益  $G=1+R_4/R_3$ 。用了 6.3V 齐纳二极管，因为它对时间和温度是最稳定的齐纳二极管。

输出方程式为：

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \quad \text{式(3-6)}$$

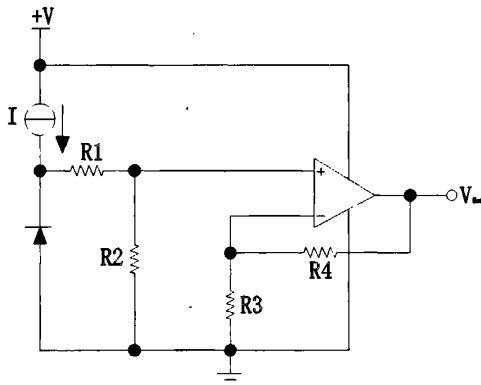


图 3-11 齐纳基准电路

掩埋齐纳二极管基准比带隙基准昂贵，但能提供更高的性能。典型的初始误差为 0.01~0.04%，TC 为 1~10ppm/°C，噪声低于 10 μV<sub>p-p</sub>(0.1~10Hz)。长期稳定性典型值为 6~15ppm/1000 小时。基于掩埋齐纳的基准经常用在 12 位、14 位和较高分辨率的系统中，因为基于掩埋齐纳基准的性能可通过设计中包含非线性温度补偿网络而得到提高。在几个温度点上微调补偿网络可使其电性能在工作范围达到最佳。

### 3) xFET 基准

xFET 是一种新的基准技术，它由两个结型场效应管组成，其中一个多加一次沟道注入来提高夹断电压，其原理电路如图 3-12 所示。两个 JFET 工作在相同的漏极电流下。把夹断电压之差进行放大，用来形成电压基准。方程式是：

$$V_o = \Delta V_p \left( \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \right) + (I_{PTAT})(R_3) \quad \text{式 (3-7)}$$

式中  $\Delta V_p$  是两个 FET 夹断电压之差，IPTAT 是正温度系数校正电流。

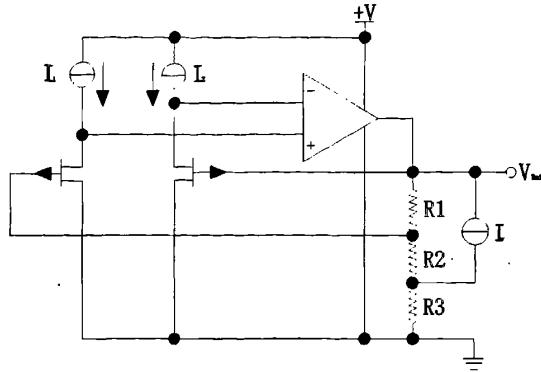


图 3-12 xFET 基准原理电路

xFET 基准是相当新的，它的性能水平处在带隙和齐纳基准之间。典型的初始误差为 0.06%，TC 为 10ppm/°C，噪声为 15 μV<sub>p-p</sub>(0.1~10Hz)。长期稳定性为 0.2ppm/1000 小时。

本系统中选用 2.5V XFET 超过精确电压基准。该器件初始数值可外部校准；温漂 3ppm/°C。选择电压基准最主要需要考虑的参量是：电压基准器件的初始精度、输出电压温度系数（TC）、热迟滞、噪声和长期稳定性。

### 3.3.5 数据采集模块结构框图

根据上述的器件选型和电路设计，数据采集模块的结构框图如图 3-13 所示。

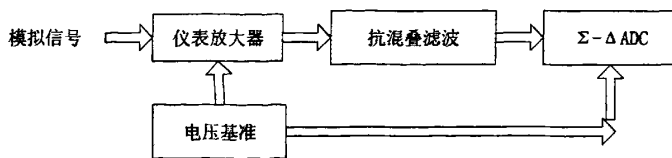


图 3-13 数据采集模块结构框图

## 3.4 海量存储模块设计

达到海量存储的常用方法主要有两种：1) 普通设计单片机系统的存储空间最大可以达到几 MB，对于达几个月甚至几年时间的长期监测系统的数据存储需求来说，称不上是真正海量存储；2) FPGA 系统采用足够多的门，可以达到更大存储空间，但需要硬件开销大，成本高。这两种方法都不是非常实用。

本设计中应用 USB1.1 技术，存储空间高达 256MB，甚至可以更大；以每秒测试一个数据计，可以满足系统 12800 小时（530 天）的持续测试需求。随着技术的进步，以后完全可以把现在 PC 上使用的 USB2.0 技术应用与单片机系统中，按照现在 U 盘的存储空间，可以达到 32GB，对于存储蚀积电阻率方法测得数据来说，是真正可以不用考虑存储空间问题了！

采用 USB1.1 技术设计存储模块，需要在了解 USB 协议的基础上实现，这是个复杂的过程，完全可以构成一个单独的问题。为了缩短研究周期，本系统中应用了商业化的 USB 模块。这样，不需要学习复杂的协议，只了解模块给出的接口即可。本系统中采用的 USB 模块和单片机直接通过 232 接口技术实现通讯，可以实现单片机对 U 盘数据的读写。本系统中选用的 U 盘读写模块如图 3-14 所示，该模块电路板只有拇指大小，可以很方便的接入测试系统。

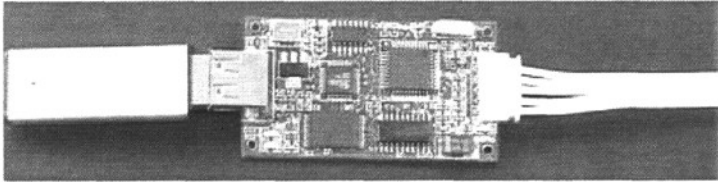


图 3-14 U 盘数据读写模块

### 3.5 电极自动转换模块设计

为达到自动测量循环整个探杆上所有电极所在位置的电阻率数据，本设计采用了电极自动切换测试方式，设计了电极自动转换模块。该模块中包括电极自动转换电路、端口扩展及开关驱动电路，和供电电路三个部分。

#### 3.5.1 电极自动转换电路

系统采用 Wenner 测试方式，用 5ma 电流源作为激励信号接在 A、B 之间，如图 3-15 (a) 所示。一个电极有时作为供电电极，有时又要做为数据采集电极。外部有四路信号输入即：A 电源正极，B 电源负极，M 数据采集端，N 数据采集端。多个电极都有可能与其中一路信号相连接。并且每一时刻每个电极只能于一路信号相接，为了实现四路信号于电极之间的切换，需要一个切换电路。这一切换电路由中央处理器控制、通过晶体开关电路实现自动实时电极切换。每次用四

个电极分别作为 Wenner 测试的 AMNB 电极，从探杆底部电极开始测量，首次选用最底部的四个电极，每次上移一个电极，直到顶部作为一组测试数据，如图 3-15 (b) 所示；然后再回到底部重新测试，不断往复直到结束。

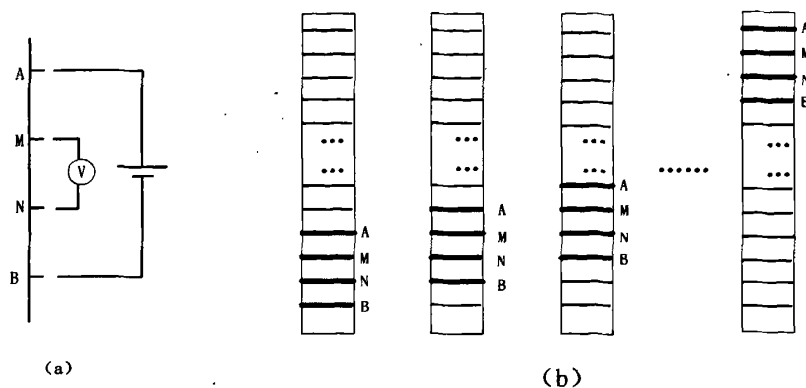


图 3-15 (a) Wenner 测试方式; (b) 电极转换示意图

本设计中采用了和以往不同的两级开关选择结构，大大的节省了需要开关器件的数量。

#### 1) 传统的开关结构:

如图 3-16 (a) 给出了以往的开关选择设计中一个电极的开关结构，每控制一个电极需要 1 个开关。该设计中，每增加一个电极需要增加一个这样的结构，即增加 5 个开关。

控制方法：通过关闭 K1~K4 中的一个开关来选择电极接入 A、M、N、B 之一，然后关闭 R1 开关，使得电极 1 和 AMNB 之一相连。

#### 2) 本论文设计的开关选择结构

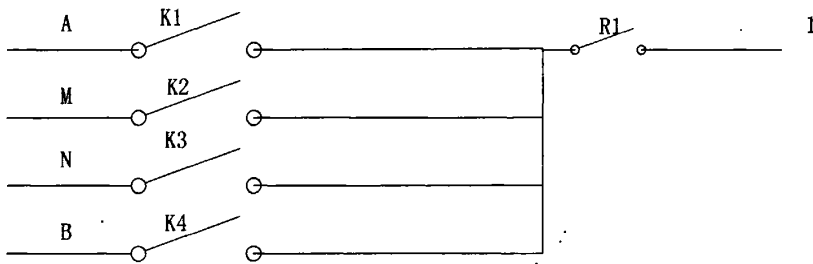
如图 3-16 (b) 所示，该结构需要 16 个开关作为第一级选择，然后有多少个电极添加多少个开关为第二级选择，1~4 连接在 L1~L4 线上，5~8 也相应的连接在 L1~L4 上。当系统需要增加电极时，每增加一个电极，只需增加一个开关，即和该电极相连的开关。

控制方法：这种开关结构适合于选择连续的 4 个电极分别作为 AMNB，这是本论文中系统的要求，也是绝大多数系统的要求。在控制的时候，应首先控制和电极相连的开关，然后再进一步选择和 AMNB 相连的 16 个一级开关。先确定要选择的任意四个连续的电极，以选择电极 1-4 分别顺次连接 AMNB 为例：通过关闭与四个电极相连的 4 个开关，即 R1~R4，选中这 4 个电极；关闭与电极 1

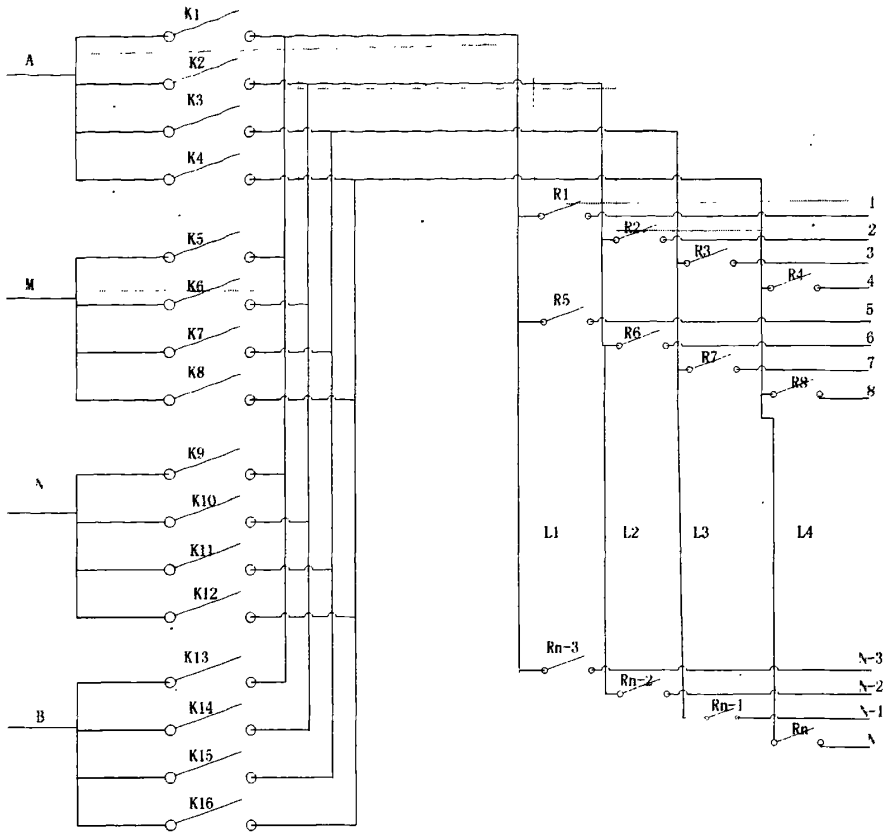
所在线 L1 相连并且和 A 相连的开关 K1，使得 A 和电极 1 相接，关闭在与极 2 所在线 L2 相连并且和 M 相连的开关 K6，使得 M 电极 2 相接，以此类推，关闭 K11 和 K16，使得 N 和电极 3 相接，B 和电极 4 相接。图 3-16(b) 中给出了电极 1 和 A 相连的通路，及电极 2 和 M 相连的通路，另外两个的通路类似可以画出。

3) 两者比较:

① 需要开关数量: 传统的开关结构当电极很少时需要的开关少，而当电极很多时，需要开关的数量十分多。当电极数量为 4 个时，两个系统需要的开关个数一样，当电极数量>4 时，本设计中的二级开关结构需要的开关数量少于传统的开关结构。本系统中设计的开关结构电极很多时，最大限度的节省了开关，降低系统的设计成本和硬件系统的体积。② 软件控制: 传统开关结构，软件控制逻辑简单，一目了然；而本系统中的开关结构在软件控制方面，逻辑复杂，需仔细思考。



(a) 传统开关结构



(b) 两级选择结构

图 3-16 电极开关结构

### 3.5.2 端口扩展及转换开关驱动电路

由于系统的开关多，直接用单片机端口给出 0/1 信号，来控制开关器件明显不够使用。因而，需要相应电路实现用较少端口控制很多的器件，一般有两种方式：1) 端口扩展电路，通过端口扩展芯片实现端口扩展，把较少的端口扩展为较多的端口；2) 串并转换电路，用单片机的一个端口发出串行信号，然后用串并转换电路实现串行信号变并行信号，以实现单个端口多路控制的目的。本系统中采用的是串并转换方式。

开关器件的驱动电流较大，一般的 TTL 器件无法直接驱动开关，需要在电路中添加开关驱动电路。这可以用三极管来提高驱动能力，也可以用驱动器器件来达到此目的。三极管方法比较驱动器器件方法：用分立器件较多，不利于集成化和



小型化，性能也要差一些，因而本设计中选择常用驱动器件 ULN2003。

### 3.5.3 供电电路（电流源）

系统测试的海水及其下面的沉积物电阻率比较小，为了达到较高的界面高程分辨率，系统探杆上电极间距设计为 1cm，极距小。采用电压供电方式，容易电流过大，导致系统器件的损坏。因而，本系统中的供电电路采用电流源供电。电流源的电路原理图如图 3-17 所示。由于运放的“-”端，电流为 0，被测电阻和可调电阻的电流相等， $V_- = V_+$ ，电流大小计算公式：

$$I = \frac{V_+}{R} \tag{4-8}$$

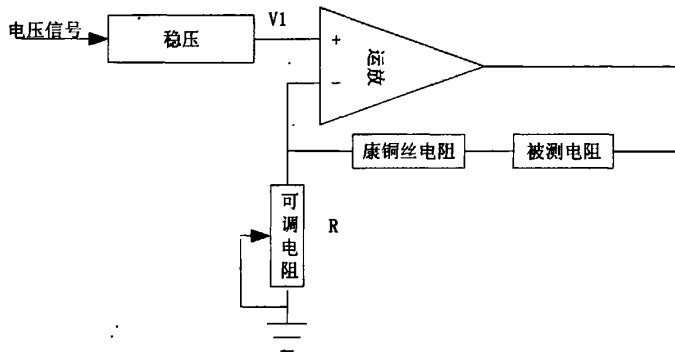


图 3-17 电流源电路原理图

### 3.6 实时时钟模块设计

本监测系统中整合了实时时钟模块，实时时钟的当前时间可以通过软件设置，而后系统可以随时读取实时时钟的当前时间，可在任何需要的时刻给系统中断，以进行相应的事件处理。这样，系统可以在预先设定好的时间开始采集数据，在预先设定好的时间结束工作，以更好的节约电源，防止电池供电不足，导致系统无法完成测试。

根据系统的要求，本设计选用 PCF8563 器件作为系统的实时时钟(Real-Time Clock, RTC)单元。PCF8563 是 PHILIPS 公司推出的一款工业级内含 I<sup>2</sup>C 总线接口功能的具有极低功耗的多功能时钟/日历芯片。

本系统实时时钟特点：

- 1) PCF8563 的多种报警功能、定时器功能、时钟输出功能以及中断输出功能，能完成各种复杂的定时服务，甚至可为单片机提供看门狗功能；
- 2) 内部时钟电路、内部振荡电路、内部低电压检测电路 1.0V 以及两线制 I<sup>2</sup>C 总线通讯方式。不但使外围电路及其简洁，而且也增加了芯片的可靠性；
- 3) 同时每次读写数据后，内嵌的字地址寄存器会自动产生增量；
- 4) 具有超低功耗：典型值为 0.25 uA (VDD=3.0V,Tamb=25)。

当然作为时钟芯片，PCF8563 亦解决了 2000 年问题。因而 PCF8563 是一款性价比极高的时钟芯片。它已被广泛用于电表、水表、气表、电话、传真机、便携式仪器以及电池供电的仪器仪表等产品领域。

该器件的管脚排列图：

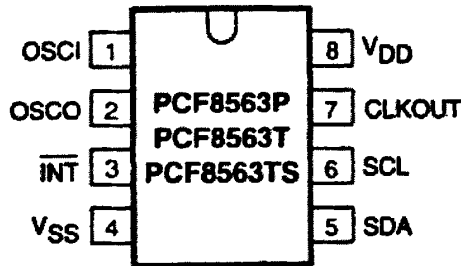


图 3-18 器件管脚排列图

PCF8563 常用电路如下，其中 SCL 和 SDA 接微处理器。

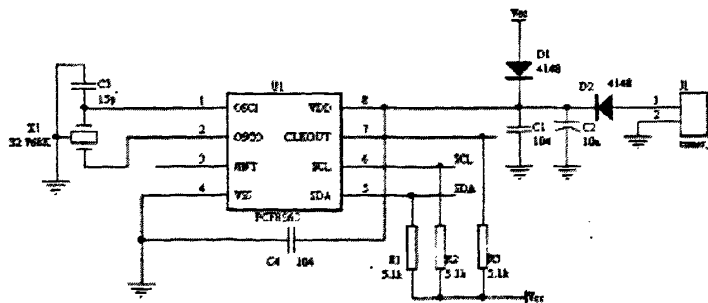


图 3-19 PCF8563 电路图

PCF8563 共有 16 个寄存器 其中 00H~01H 为控制方式寄存器，09H~0CH 为报警功能寄存器，0DH 为时钟输出寄存器，0EH 和 0FH 为定时器功能寄存器，02H~08H 为秒~年时间寄存器。PCF8563 的功能就是通过对这些寄存器的操作实现的。

### 3.7 电源模块设计

电源要满足整个电路系统的供电需求。为了能够实现长期无人监控测试，系统采用小体积、高能量的可充电电池作为供电电源。为达到系统的持续稳定供电，系统中采用了稳压模块给系统提供稳定的 5V 电压供电信号。

三端稳压器是最为常用的稳压模块，采用串联型稳压电路。在线性集成稳压器中，由于三端稳压器只有三个引出端子，具有外接元件少，使用方便，性能稳定，价格低廉等优点，因而得到广泛应用。三端稳压器主要有两种类型，一种输出电压是固定的，称为固定输出三端稳压器，另一种输出电压是可调的，称为可调输出三端稳压器。5V 电压是最为常见的电压，因而采用固定输出三端稳压器，这样外电路更为简单。78xx/79xx 系列三端稳压器件是最常用的线性降压型 DC/DC 转换器，简单易用、价格低廉，直到今天还在大多电路中采用。

本系统选用的 7805 5V 稳压输出电路。7805 稳压模块电路连接图，如图 3-20 所示。

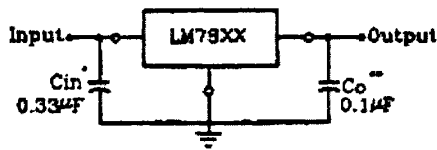


图 3-20 7805 稳压电路图

在使用时必须注意： $(V_I)$ 和 $(V_O)$ 之间的关系，7805 三端稳压器的固定输出电压是 5V，输入电压至少大于 7V，这样输入/输出之间有 2—3V 及以上的压差，使调整管保证工作在放大区。但压差取得大时，又会增加集成块的功耗，所以，两者应兼顾，即既保证在最大负载电流时调整管不进入饱和，又不致于功耗偏大。

另外，一般在三端稳压器的输入输出端接一个二极管，用来防止输入端短路时，输出端存储的电荷通过稳压器，而损坏器件。

考虑上述因素，本系统选用 6 节 1.2V 充电电池供电。按照系统每秒采样一次（Ridd 的电阻率仪器是每两分钟一次），目前电池提供的能量可以满足系统持续工作 2400 小时（100 天）的需要。

### 3.8 本章小结

本章对主控部分的硬件系统进行了模块划分,并完成了各个模块的硬件电路设计。其中电极自动转换模块,采用了创新的自行设计的两级开关控制方式,和以往的一个电极五个开关的结构完全不同。该转换模块可以最大限度的减小由于多电极设计带来的硬件开销和缩小系统电路的硬件尺寸,使得系统更为小型化。

在此基础上即可进行主控部分软件程序设计和编制,主控部分硬件设计和软件设计共同构成主控部分设计。

## 4 监测系统主控部分软件设计

主控部分的软件设计，需要在特定的开发环境下，采用硬件编程语言进行程序设计。本章通过分析系统功能，给出了主控部分软件的总流程图，及其中主要模块的程序设计。系统各个模块的程序需要分别进行调试。在各个模块程序调试通过后，还需要进行系统的整合调试。

### 4.1 软件语言及开发环境

本章的主控软件程序设计过程中，涉及到以下几种类型的软件：

- 1) 编程软件
  - wave6000 软件模拟器
  - Keil uVision3
- 2) 程序下载软件
  - Easy 51 Pro 2.0
- 3) 数据接收软件
  - 串口通讯软件 comm2.2
- 4) 数据初步处理软件
  - 采用 VC++6.0 自行编制软件

#### 4.1.1 编程软件

下位机采用的是 51 单片机作为主控芯片，该芯片可以采用汇编语言编程，也可以采用单片机的 C 语言——C51 方式进行编程。使用汇编语言编制过程复杂，调试不便，编制大型软件较为困难，但生成的代码效率较高。使用 C51 语言是一种类似 C 语言的编程方式，编程过程简单，生成代码一般较汇编要多一点，但其带来的方便很大！目前，大部分对 51 系列单片机的编程都采用先进的 C51 编程语言。

51 系列单片机是目前应用最多的单片机，其系统的研制过程中软件环境也十分方便。可以采用 wave6000 软件模拟器进行编程调试，也可以采用应用广泛的

keil C51 软件进行调试。

### 1) Wave6000

如图 4-1, 是南京伟福公司开发的和其仿真器配套的单片机编程环境。伟福仿真系统已内嵌汇编编译器(伟福汇编器), 同时留有第三方的编译器的接口, 方便用户使用高级语言调试程序。该软件既可以配合适合的仿真器进行单片机程序的仿真运行, 也可以进行单片机程序的软件模拟。界面简单, 使用方便。

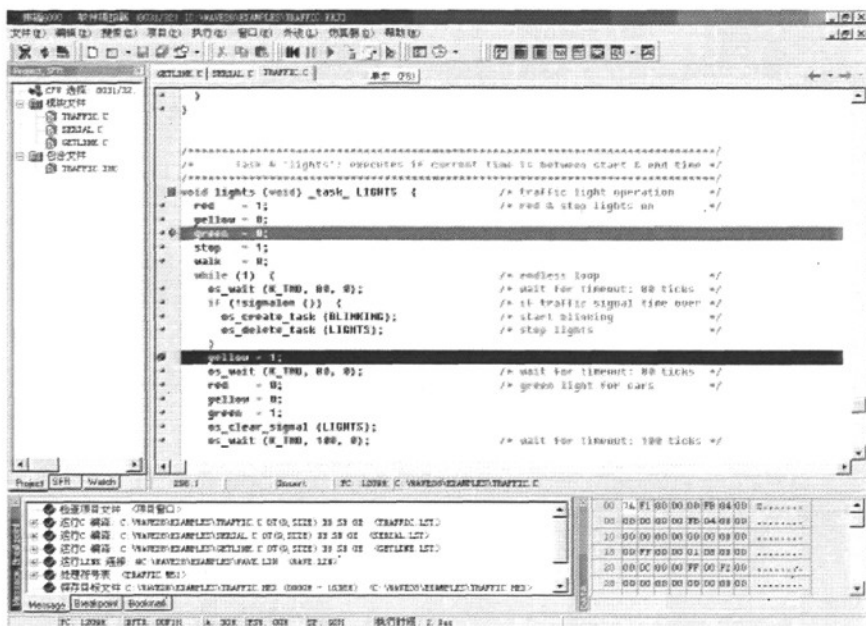


图 4-1 伟福开发环境

### 2) Keil C51

如图 4-2, Keil Software 公司推出的 Keil C51 最新版本 uVision3 是一款可用于多种 8051 MCU 的集成开发环境(IDE)。该 IDE 同时也是 PK51 及其它开发套件的一个重要组件。除增加了源代码、功能导航器、模板编辑以及改进的搜索功能外, uVision3 还提供了一个配置向导功能, 加速了启动代码和配置文件的生成。此外其内置的仿真器可模拟目标 MCU, 包括指令集、片上外围设备及外部信号等。uVision3 提供逻辑分析器, 可监控基于 MCU I/O 引脚和外设状态变化下的程序变量。uVision3 提供对多种最新的 8051 类微处理器的支持, 包括 Analog Devices 的 ADuC83x 和 ADuC84x, 以及 Infineon 的 XC866 等; 也可以支持所有兼容的仿真器, 同时支持其它第三方开发工具。



图 4-2 Keil uVision3 开发环境

比较而言，wave 6000 使用更为简便，而 Keil C51 使用上更注重模块化设计。本系统在开发过程中，采用各个模块先分别调试，然后在调试整个系统的步骤进行的。因而，本系统初步开发使用的 wave6000，而在后期协调整个系统的调试的时候采用的 Keil C51 软件。

### 4.1.2 程序下载软件

程序下载软件选用的 Easy 51Pro V2.0 软件，该软件可以实现下位机程序下载，程序在线擦除，可方便的进行 ISP 下载调试。该软件界面如图 4-3 所示。

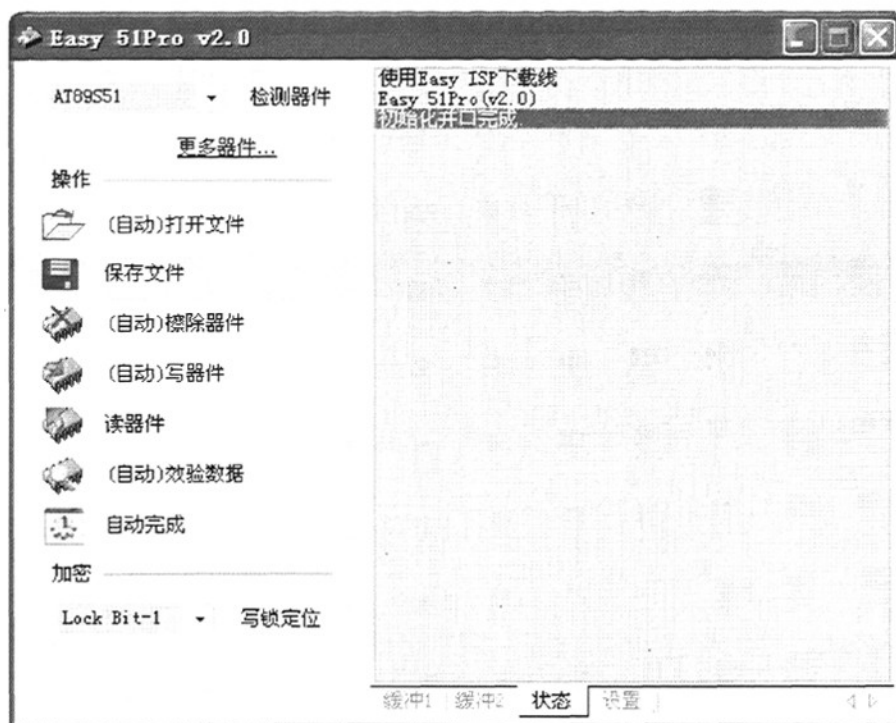


图 4-3 Easy 51Pro V2.0 软件界面

### 4.1.3 数据接收软件

系统调试过程中，采用串口通信传送数据到 PC 机，以便及时读取数据，验证传送数据的正确性。本系统设计过程中采用的 ComPort Debugger V2.00 软件，该软件界面如图 4-4 所示。



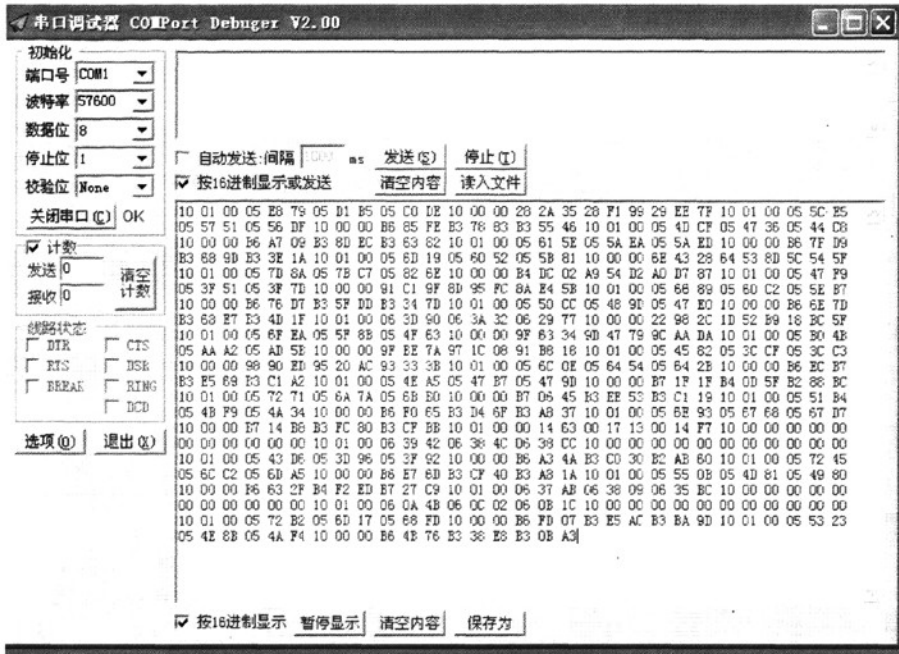


图 4-4 ComPort Debugger V2.00 软件界面图

#### 4.1.4 数据初步处理软件

4.1.3 中接收到的数据为二进制数据，且为电压和电流数据；而实际要得到的是十进制数据，且需要的是电阻率数据。这需要对串口得到的数据进行初步处理，没有现成可用的软件提供，在调试过程中，自行设计了数据初步处理软件，方便调试，该软件界面如图 4-5 所示。

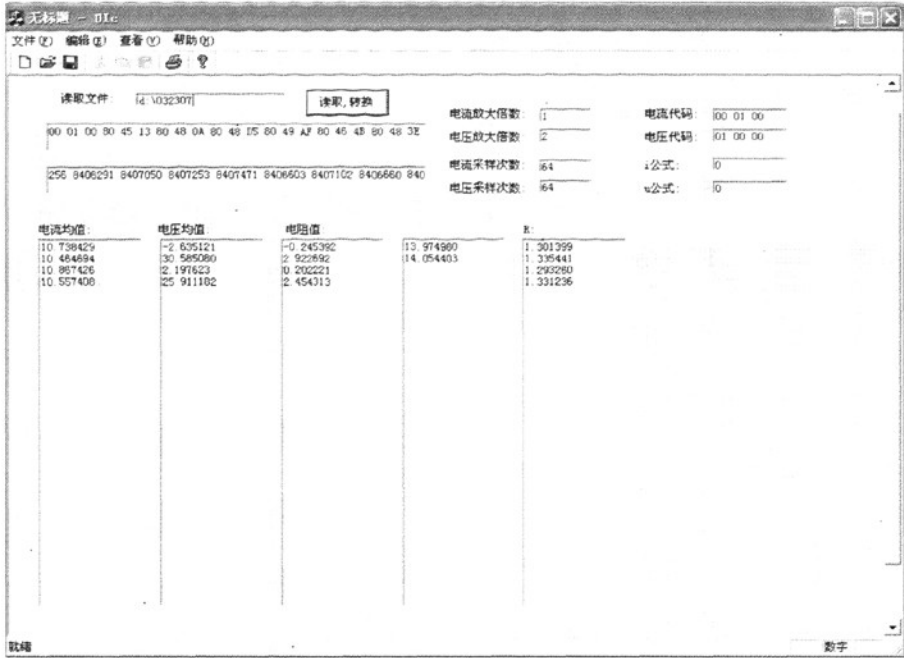


图 4-5 自行设计的数据初步处理软件

## 4.2 软件总流程

配合蚀积信号采集仪器的硬件设计，单片机软件流程如图 4-6 所示。

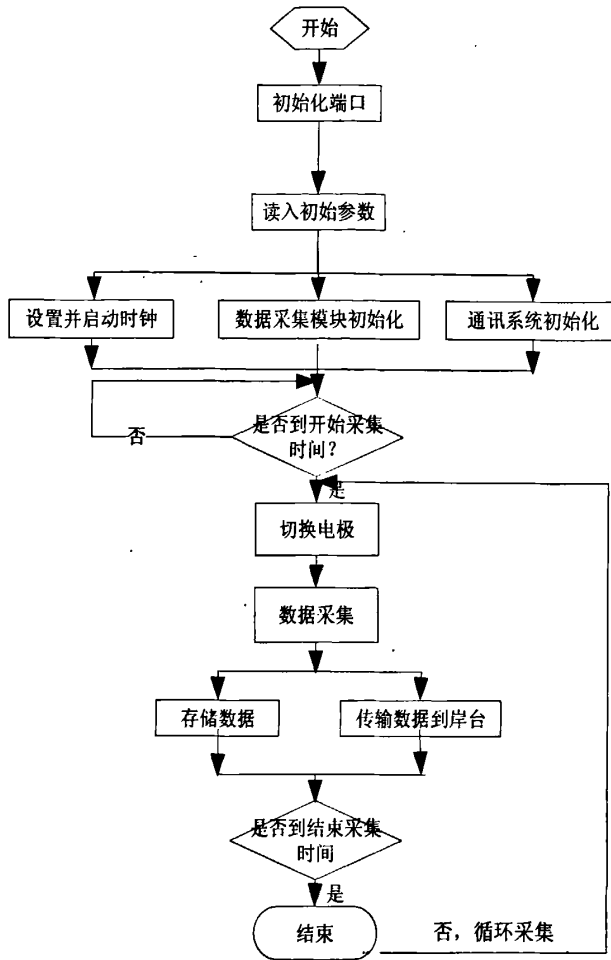


图 4-6 单片机软件流程图

初始化端口：初始化数据传送端口，以便于下一步能读入参数；

读入初始参数：主控部分的参数是通过 PC 机写到 U 盘的文件中，这里是从 U 盘中读入通过 PC 机设定的参数，主要为：采样率、当前时间、采样开始时间及采样结束时间；

设置并启动时钟、数据采集模块初始化、通讯系统初始化：都是根据读入的参数进行的，到这里整个系统的初始化过程完成。然后就可以根据设定的采样开始时间和结束时间进行数据采集，每次采集之前需要先进行电极切换，按照图 4-22 所示的原则选择本次的测试电极和供电电极；采集到的数据通过单片机控制送到存储部分及通过通信部分实时传输到岸台。

这里主要涉及以下几个模块的软设计：

- 1) 数据采集模块：数据采集部分有两个通道，分别用于测量康铜丝电压和

Wenner 方法中 MN 之间的电压；该模块的主要芯片为 ADC 芯片，本系统选用的 ADC 芯片为可编程控制芯片，需要通过对该芯片编程选择合适的参数来进行数据采集；

- 2) 存储模块：本论文设计的监测系统采用的是 USB 海量存储技术，需对 USB 模块进行二次开发，实现 USB 数据存储功能，这就需对该模块进行编程实现；
- 3) 时钟模块：时钟芯片的各个时间，包括当前时间、开始采集时间及结束采集时间，需要通过对该芯片的编程实现。

此外，系统采用了软件自动补偿技术，也是通过 CPU 编程实现的。

### 4.3 数据采集模块软件设计

数据采集部分的 ADC 器件是个可编程序器件。器件采用 SPI 接口和 CPU 通信，系统所选单片机自身不带 SPI 接口，需用普通 I/O 端口进行软件模拟。该器件的各个参数可以通过改变其内部自带的特殊功能寄存器的值来设定，或通过读寄存器来得到器件状态。各个寄存器及其功能如下：① 通信寄存器：访问其他寄存器必须先输入要访问的数据到通信寄存器；② 状态寄存器：存储 AD 器件的当前状态；③ 模式寄存器：用于选择时钟、操作模式和数据更新率；④ 配置寄存器：配置放大倍数等信息；⑤ 数据寄存器：存转换的数字数据；⑥ ID 寄存器：存芯片的 ID 值；⑦ IO 寄存器：设置激励状态；⑧ 偏移寄存器：存放 AD 转换的偏移值；⑨ 全范围寄存器：存放 AD 转换的全范围偏移值。

图 4-7 为一个读循环的时序图：

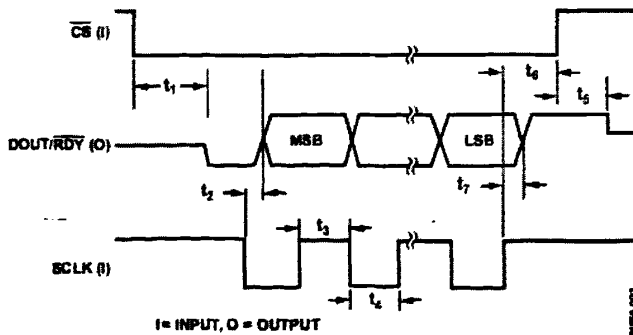


图 4-7 读循环时序图

按照该时序图编写的软件流程图，如图 4-8 所示。

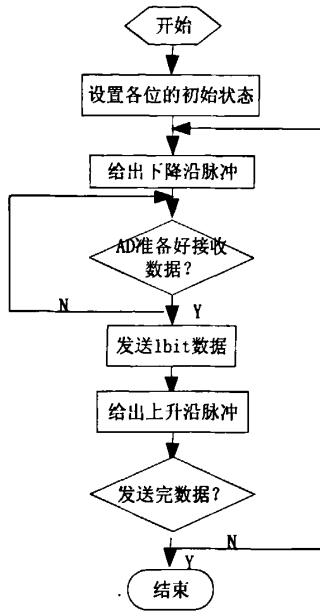


图 4-8 读取数据模块流程图。

#### 4.4 存储模块软件设计

本系统存储部分采用的是 USB 海量存储模块，实现数据的 U 盘存储。该模块和单片机的接口是采用的 232 接口，对该模块的操作即是对 232 接口的操作。为实现数据的存储和读取，对该模块的操作主要是创建文件、打开文件、关闭文件、写入数据到文件、从文件中读取数据等。这些操作都严格按照给定的操作方法进行。创建文件操作的软件流程图如图 4-9 所示。

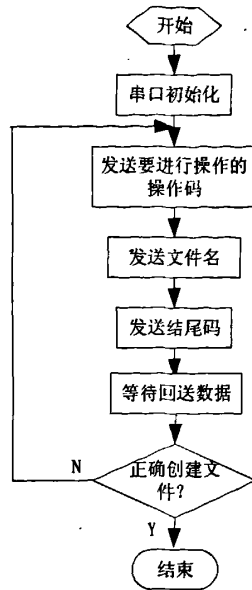


图 4-9 创建文件流程图。

其他相关操作与此类似，这里就不再一一给出流程图。

## 4.5 时钟模块软件设计

具有报警和定时功能的实时时钟，要求能够实现的基本功能有：时间读取，时间写入，到时报警等。PCF8563 时钟器件是采用 I<sup>2</sup>C 总线通信的，而本设计中选用的 CPU 器件不具有 I<sup>2</sup>C 总线接口，因而两者的数据传输要依赖于 CPU 的软件模拟 I<sup>2</sup>C 来实现。各个模块的流程图如图 4-10a，图 4-10b 所示。

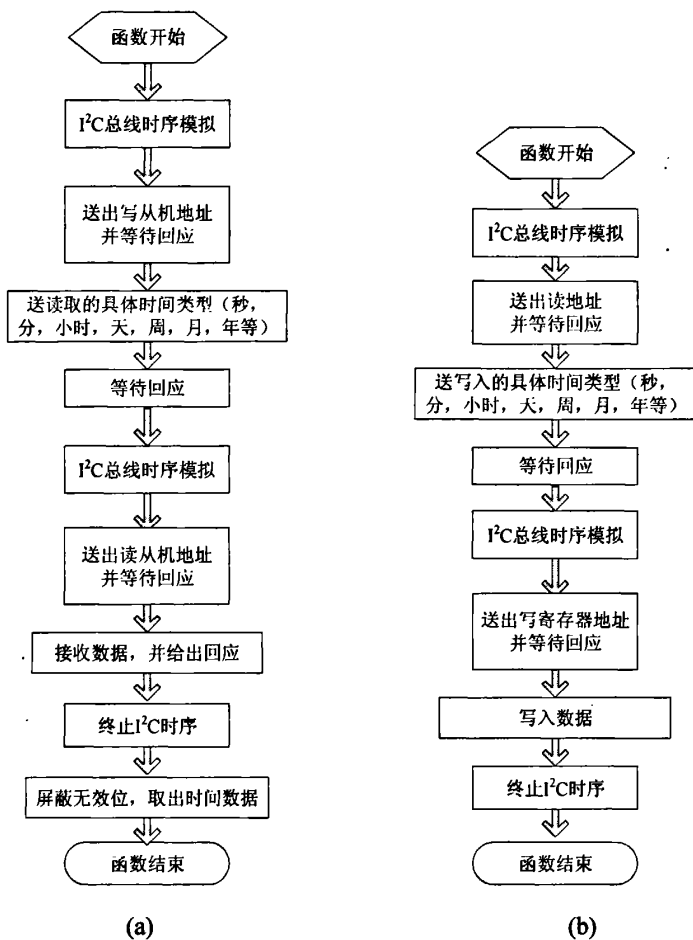


图 4-10 (a) 读时间数据流程图; (b) 写时间数据流程图。

## 4.6 电子自动补偿

电法中的自动补偿, 可以采用硬件补偿方式, 也可以采用软件补偿。

### 1) 硬件补偿

电路如图 4-11 所示。

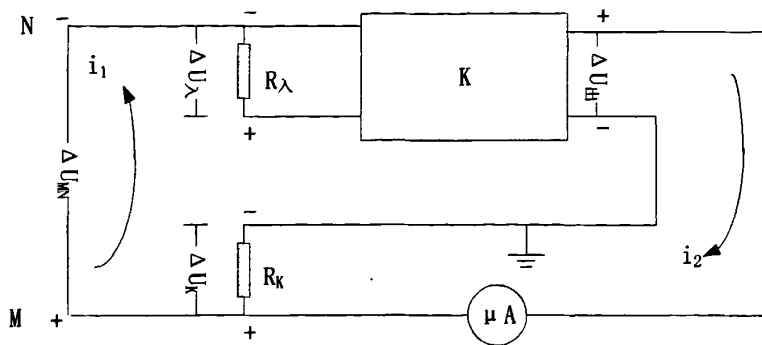


图 4-11 自动补偿仪原理方框图。

硬件补偿电路原理：线路接通后，待测电位差 $\Delta U_{MN}$ 在输入回路形成电流 $i_1$ ，输入电流在放大器的输入电阻 $R_\lambda$ 两端形成电位差 $\Delta U_\lambda$ ，经放大器放大后，其输出端电位差 $\Delta U$ 出便在输出回路形成电流 $i_2$ ，输出电流流经反馈电阻 $R_K$ 后，在其两端便产生电位差 $\Delta U_K=i_2 \cdot R_K$ 。由于上述过程几乎是同时完成的，且 $\Delta U$ 出与 $\Delta U$ 入相位相反，故对放大器而言，输入电位差应包含 $\Delta U_{MN}$ 与 $\Delta U_K$ 。此外，由于放大器的输入阻抗很高，由接地电阻 $\Delta U_{MN}$ 引起的观测误差可以忽略， $i_1$ 在 $R_K$ 上产生的电位降很小，可不予考虑。因此有

$$\Delta U_\lambda = \Delta U_{MN} - \Delta U_K \quad \text{式 (4-1)}$$

显然，仅当 $\Delta U_{MN}=\Delta U_K$ 时，才有 $\Delta U_{MN}>0$ 。若 $\Delta U_{MN}>\Delta U_K$ ，便会有 $\Delta U_\lambda$ 输入放大器，从而导致反馈电流 $i_2$ 的增加， $\Delta U_K$ 亦随之增大。如此往返循环，便会使 $\Delta U_K$ 迅速稳近于 $\Delta U_{MN}$ 。当二者达到动态平衡时， $i_2$ 不再增加，此时

$$\Delta U_{MN} \approx \Delta U_K = i_2 \cdot R_K \quad \text{式 (4-2)}$$

$$\text{因此 } i_2 = \frac{\Delta U_{MN}}{R_K} \quad \text{式 (4-3)}$$

即反馈电流 $i_2$ 与待测电位差 $\Delta U_{MN}$ 成正比。所以当 $R_K$ 固定时，由 $i_2$ 的大小便可指示 $\Delta U_{MN}$ 的大小。为此，只要将串接在输出回路中的微安表的电流刻度改成相应的电位差刻度，就可直接读出待测电位差的大小。

此外，为了测定供电回路的电流，一般在供电回路串联 $R_0=0.1 \Omega$ 的标准电阻，当用电子自动补偿仪测出 $R_0$ 两端电位差 $\Delta U_0$ 后便可得到供电电流的大小。

## 2) 软件补偿：



本系统拟测试海床蚀积监测的具体情况：

① 实际测试极距 1cm 探杆直径 5cm，环形铜电极之间的海水及沉积物，其补偿电压在 100mv 以内；

② 经多次实验验证，海水及其沉积物电阻率在 0.2~0.8 之间；本系统采用 10ma 电流源供电，则可计算出 Wenner 法测试时 MN 之间的电压在 20mv 以内；

综合考虑这两点，测试电压不会超过 120mv，完全可以采用软件补偿技术进行补偿。因而为简化电路设计，采用的软件补偿技术。这增加了系统软件设计的复杂度，但却减低了硬件系统复杂度。

## 4.7 主控部分的调试

整个系统是在单片机控制下的一个数据采集系统，电路设计完成后的主控模块实物图如图 4-12 所示，为方便和探杆结合构成系统，该测试仪器采用细长结构。

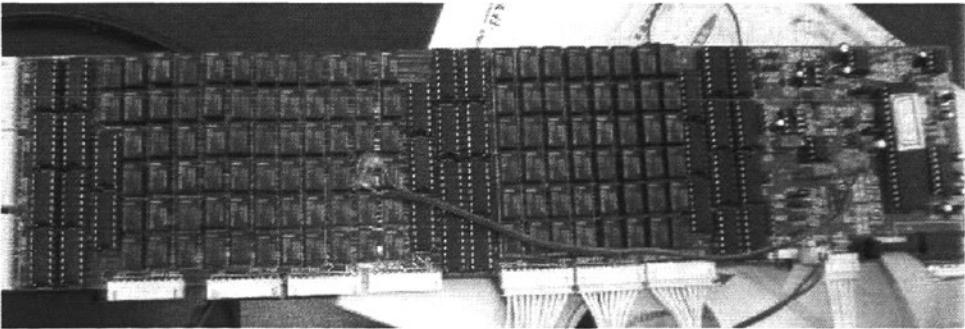


图 4-12 主控模块实物图

该系统的调试过程为分模块调试，每个模块的调试过程如下：

- 1) 在 wave 编译器环境下编制软件，并进行编译；
- 2) 编译通过，使用下载软件及下载线，通过下载接口下载到单片机中；
- 3) 电路设计过程中，添加了串口通信模块；程序在下位机中运行，通过给串口传送数据，来检查是否达到预定的效果，如图 4-6 所示；测试的模块包括上述 4.2~4.7 小节中的各个模块的各个部分，每个部分都需要分别调试确定其硬件连接方式，及软件系统的正确性；
- 4) 没达到，返回 1)，达到完成该模块的测试，继续重复上述过程进行下一个模块的测试；

- 5) 在接电极的接口，接入可调电阻，测试可调电阻的电阻值，来验证系测试数据的正确性。

在所有模块测试完成后，加工电路板，集成所有模块在一起进行综合测试。综合调试过程中，也是每次添加一个模块，逐步调试。

## 4.8 本章小结

本章在第三章中的主控部分硬件设计的基础上，进行了主控部分的软件设计。设计过程中，按照主控部分硬件设计的模块划分，进行了软件部分的模块划分和分模块的程序设计，其中需要进行编程的模块主要有数据采集模块、存储模块、时钟模块和自动补偿模块四个模块。本章和第三章一起完成了主控部分的设计。

## 5 监测系统电极探杆设计

本监测系统采用的环形电极是布设在一个探杆上的,本章进行了探杆的外形设计;并选择了通过实验选定了适合于环形电极的电阻率计算公式;通过查找资料、实验等多种手段,选择了电极的材料和密封方法及探杆直径和极距的选择;通过上述三个方面的工作完成了整个电极探杆的设计。

### 5.1 探杆外形设计

需埋置入海床沉积物的监测设备大多采用锥形探杆结构,在探杆底部或侧面布设所需要的传感器,探杆内部或顶端放置采集仪器,或直接通过电缆连接到船载仪器上。

Ridd 设计电阻率仪器:电极直径为 0.25 mm,分别在有效长度为 10 cm、30 cm、50 cm 的 3 个探杆上布设 14 个电极,使得相邻电极间距最小约 1 cm,最大约 3 cm<sup>[51]</sup>。主要用于潮滩地区的监测仪器,一般有效测试范围为 0.5 m~2 m,有效测试范围较长。如果相邻电极间距小,需要的电极数目会很多,间距大精度会相应降低。Ridd 的仪器精度为有效测量距离的 2%,相对误差不变,但绝对误差随有效长度增大。

综合考虑测量精度和电极数量的多少,初步设计为:相邻两个电极间隔 1 cm,探杆主体采用高强度的 PVC 绝缘材料,直径 5 cm,其上环绕的环形铜电极直径 0.75 cm,共 48 个测量电极(可以根据需要扩展);电极引线从探杆内部引出,如图 5-1(c)所示,连接在探杆顶部的防水接头,便于和电子采集记录仪器相接;探杆底部采用探测仪器常用的锥形设计,便于埋置。探杆结构示意图如图 5-1 所示,监测系统整体结构图如图 5-2 所示。

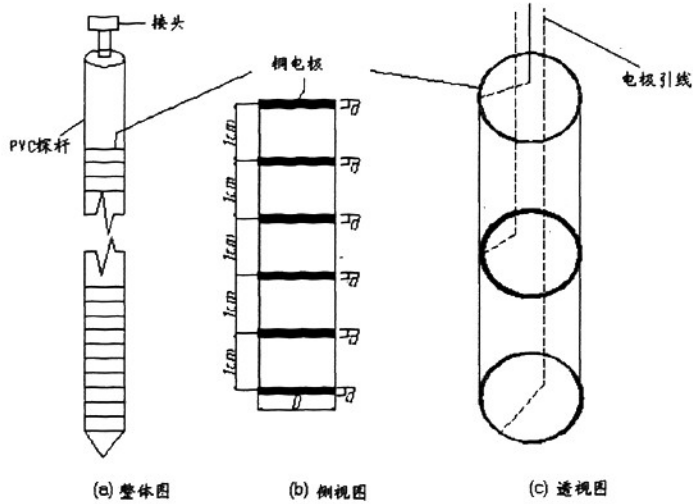


图 5-1 机械结构示意图

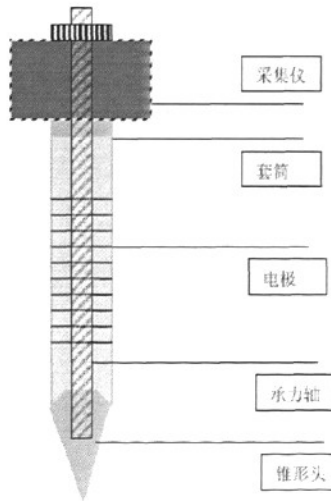


图 5-2 电阻率监测系统整体剖面示意图

图 5-2 所示为采用环状电极探头的电阻率测试系统结构示意图。其主要组成部分为采集仪，探头骨架（由锥形头，承力轴组成），电极阵列，套筒，电缆线及其他附属器件。探头骨架采用高强度不锈钢材料。套筒材料为很多电极探杆采用的高强度绝缘材料 PVC 管。环形电极绕制在套筒的外侧，而环形电极的引线在套筒内部，接到电子采集仪的接线端子。

## 5.2 环形电极视电阻率计算方法

海底沉积物电阻率测量中，采用电极探杆的长度一般为几米或者更长，依赖

于杆长的选择直径，典型的直径为 2-10cm；电极间距一般 5-30cm，相对较小，所以通常的点电极假设的做数据解释在这里不适用<sup>[50]</sup>。即上面 1.2.2.2 小节介绍的点电极测量方法视电阻率的计算公式，并不适用于这里采用的环形电极视电阻率的计算。环形电极视电阻率的计算公式目前主要有两种：WON 计算方法和 Fukue 计算方法。

### 5.2.1 WON 视电阻率计算公式

WON (1987) 通过理论分析给出了适用于环形电极视电阻率的计算公式，式 (5-1)。即：

$$V_a = 4IG \frac{\Delta V}{I} \quad \text{式 (5-1)}$$

这里，G 是几何因子 (geometrical factor)，

$$G = \frac{\pi b}{4} \left[ \ln \frac{4a + 2\pi b}{4a + b} \right]^{-1} \quad \text{式 (5-2)}$$

式 (5-2) 中：a 是相邻电极之间的距离；b 是环形电极的半径，即杆的半径，如图 1-11 所示。

当 a/b 的值远大于 1 时，还可以用下面的公式 (5-3) 来近似计算 G 值：

$$G \approx a \left( 1 + \frac{3\pi b}{8a} \right), \quad \text{for } \frac{a}{b} \gg 1. \quad \text{式 (5-3)}$$

WON 给出了这一关系曲线。已经制造出 a/b 值从 2~30 的多个探测器，进行了测试和实验室的校准。和商业化的电导率测试结果进行对比，证明了该计算方法的正确性<sup>[50]</sup>。

1994 年 Ridd 进一步研究和发展的环形电极理论。发现 WON 给出的公式至少有 5% 的误差，并经过理论分析，给出了更为精确的电阻率计算公式<sup>[56]</sup>。

### 5.2.2 Fukue 视电阻率计算方法

Fukue (1998) 给出一个环形电极视电阻率计算公式：

$$V = I^2 \cdot \frac{\Delta V}{CI} \quad \text{式 (5-4)}$$

$$\text{其中 } C = \frac{1}{d+r_M} - \frac{1}{d+r-r_M} + \frac{1}{d+r-r_N} - \frac{1}{d+r_N} \quad \text{式 (5-5)}$$

C 计算公式中的参数如图 5-3 所示<sup>[90]</sup>。

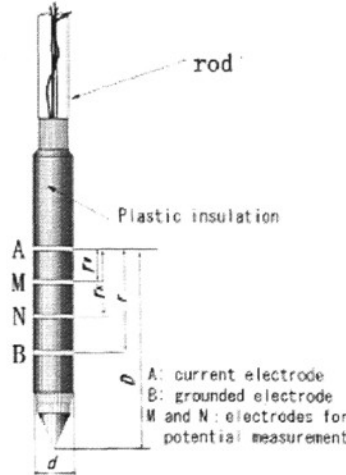


图 5-3 电极参数示意图

电极成等间距布设，间距为  $a$ ，且用  $b$  表示探杆的半径，此时可得  $C$  为：

$$C = \frac{a}{(2b+a)(b+a)} \quad \text{式 (5-6)}$$

### 5.2.3 实验方法确定视电阻率

Lauer-Leredde, Pezard et al. (1998) 采用实验方式确定的  $G$  值，避免了理论计算。被测介质的视电阻率可以用以下公式计算：

$$R_w = G \frac{\Delta V}{I} \quad \text{式 (5-7)}$$

对于特定的仪器， $G$  是一个常数，只于电极布设方式有关，完全可以通过对已知电阻率、各向同性均质介质的测量，计算出来。

$$G = R_r \frac{I}{\Delta V} \quad \text{式 (5-8)}$$

在电极采用特殊布设的时候，理论计算是很烦琐的，采用实验方式无疑是很方便的<sup>[66]</sup>。

本系统涉及的电极布设方式为环形电极布设方式，已有 5.2.1 和 5.2.2 所述的

两种计算方法。本论文在选定电极探杆参数后，用 WON 方法和 Fukue 方法分别计算出电阻率的值，并通过测试真实电阻率值测定来选择适合本系统的计算公式。

## 5.3 参数选择

为了验证不同间距点电极与环电极对于测量结果的影响，分别制作若干规格的环状电极探杆，并进行室内比对测试。

### 5.3.1 电极材料选择

在现实中实际可选材料包括不锈钢，黄金，铂金，黄铜，纯铜，合金这几种导电材料。

- 不锈钢：有些类型的不锈钢耐腐蚀性，不锈钢材料整体来看延展性不好，但极化影响小。
- 黄金和铂金：价格昂贵，不宜采用。
- 黄铜：最易于取材的莫过于黄铜。但黄铜在实验中明显容易被海水腐蚀。在黄铜中加铝能提高黄铜的屈服强度和抗腐蚀性，稍降低塑性。在黄铜中加 1% 的锡能显著改善黄铜的抗海水和海洋大气腐蚀的能力，因此称为“海军黄铜”。锡还能改善黄铜的切削加工性能。黄铜含有少量的锡，耐腐蚀性强于青铜。
- 纯铜又称紫铜，有良好的导电，导热性能及抗蚀，有韧性紫铜则是较为纯净的铜。它充分表现了金属铜的延展性、导电性和耐腐蚀性，其中延展性是铜饰的重要特征。紫铜的熔点很高，不易铸造，而良好的延展性弥补了这一缺点。

比较上面这几种材料，做为环形电极进行海水及其沉积物电阻率测试，可以选择黄铜加锡合金或铝合金材料，或者采用纯铜材料，他们具有良好的抗腐蚀性和导电性，而且相对容易加工制作。

在实验室实验中，由于测试时间短，无需长期放置海水中，考虑成本和加工周期，我们采用的是最为易于获得的黄铜。在进一步的工作中，拟用不锈钢材料来制作环形电极探杆。

### 5.3.2 密封材料选择

环形电极套在 PVC 管的为获得更好的探杆的密封性，在实验室尝试多种密封方法：白色固体胶，环氧树脂，玻璃胶。这三种材料都是良好的绝缘密封材料。

- 白色固体胶：虽然具有粘结较好，进行密封后，在空气中观察效果较好，但一旦置入海水中，其上白色固体胶慢慢脱离电极，而脱落，失去密封效果。
- 玻璃胶：密封粘合裂缝和缺口。使用广泛，防水，防霉，弹力持久。本产品可用于密封玻璃、陶瓷、瓷釉、瓷 砖、塑料、金属和木头。可适用于水族馆、鱼缸。单组分，中性固化，透明性好；对玻璃、金属等多种材料无腐蚀，粘结性好；优越的耐气候卓越，耐老化、耐紫外线、耐臭氧；耐高低温气候卓越，固化后在-50 度的低温不会变脆、硬化或开裂，在 180 度高温下会变软、降解，始终保持良好的弹性。
- 环氧树脂：粘附力强。环氧树脂分子链中固有的极性羟基和醚键的存在，使其对各种物质具有很高的粘附力。环氧树脂固化时的收缩性低，产生的内应力小，这也有助于提高粘附强度。具有优良的耐碱性、耐酸性和耐溶剂性。固化的环氧树脂体系耐大多数霉菌，可以在苛刻的热带条件下使用。

玻璃胶在最初进行套筒外对环形电极连入套筒内部的孔处进行密封，密封效果不错，但是极易被刮破，而失去密封作用。如果灌装到套筒内部应该具有较好的效果，但其由于探杆较长，玻璃胶流动性又不很好，而探杆内部由于有导线存在不易灌装。

环氧树脂各方面性能看来都很不错，强度大，不易损坏，耐腐蚀性能也很好，是个较好的选择。但初期采用环氧树脂进行外部涂抹密封，经几次实验均未获得好的密封效果，特别是长期放置在水中，渗漏现象越来越严重。

后来发现，环氧树脂灌封具有很好的密封效果。灌封步骤：

1) 在探杆一端用塑料胶带封住，并把探杆外部用塑料胶带缠住，以防电极引线处孔洞使得环氧树脂外流；

2) 加热配制好的环氧树脂片刻，待其具有较好流动性时，灌入准备好的电极探杆内部；



3) 静置 2 日, 以使环氧树脂固化, 即可。

采用该方法密封的探杆, 已经在实验室及现场进行过多次实验, 效果很好。

需要说明的是: 本系统在最初的时候采用的探杆是金黄色环氧树脂外部涂抹密封, 后来的测试中采用的探杆是白色环氧树脂灌封方法密度的。

### 5.3.3 探杆直径及电极极距选择

#### 1) 探杆粗细选择

本系统选择广泛采用的 PVC 管作为电极探杆材料。该材料在选择时, 有各种规格的标准件可供选择, 选择探杆粗细需要考虑两个因素: ① 探杆需要贯入海床实施测试, 探杆越细越易于贯入; ② 系统需使用 100 个电极实施电阻率监测, 电极探杆的内部要有足够的空间能容纳 100 个电极的引线, 且要能装入承力轴, 这要求探杆要足够粗。综合考虑上述两点因素, 和标准件的可选尺寸, 选择, 70mm 直径的探杆。

#### 2) 极距选择

制作电极间距不同, 直径相等且均为 70mm 的电极探杆。通过实验对比不同的极距测试得到的电阻率数据, 和真实电阻率的数据, 选择合适的极距, 具体实验步骤如下:

- ① 将适量黄河口海港地区粉土与海水均匀搅拌后的泥浆加入到水槽中;
- ② 测量不同电极间距的电阻率值;
- ③ 根据电阻率测量原理制作沉积物真实电阻率测试装置, 如图 3-4 所示, 测试水槽中泥浆的真实电阻率值;
- ④ 对比②和③的测试数据, 选择合适的电极极距。



图 5-4 真实电阻率测试装置

当采用直径为 7cm, 电极间距为 1cm 的探杆, WON 公式变为:

$V_a = I^2 \frac{\Delta V}{I} * 0.06360167$ ，Fukue 公式为： $V = I^2 \cdot \frac{\Delta V}{I} * 0.36$ ，两者存在不到六倍的关系。直径不变，当电极间距改为 3cm 时，经计算，WON 公式： $V_a = I^2 \frac{\Delta V}{I} * 0.0895601$ ，Fukue 公式： $V = I^2 \cdot \frac{\Delta V}{I} * 0.216667$ ，两者存在 2 倍多的关系。由于本系统拟达到较高界面分辨精确度，故不再对更大间距的数据进行计算。

经对步骤②测得数据计算发现，WON 公式更适合本系统采用探杆的测试需求，因两者计算值存在明显差异，容易比较数据，此处就不在详细给出数据。步骤②得到的数据如表 5-1 所示，其中的电阻率值是采用的 WON 公式的计算结果。注：文中后面部分，环形电极探杆实施测试的视电阻率计算都选用的 WON 方法公式。

表 5-1 电极间距及测得的对应电阻率值

电极间距 m	0.005	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035
电阻率 $\Omega \cdot m$	0.753987	0.661845	0.663633	0.629385	0.523573	0.428356	0.303067

步骤③得到的真实电阻率为 0.66643572，对比步骤②及步骤③得到的数据，电极间距为 0.01m，即 1cm 和 1.5cm 时，测得的电阻率值和真实电阻率值最为接近。为达到更高的测试精度这里选择电极间距 1cm。

## 5.4 本章小结

本章完成了电极探杆的全面设计：

- 外形结构：采用了环形电极的布设方式；
- 电极材料：黄铜；
- 探杆材料：PVC 管；
- 密封材料：环氧树脂；
- 探杆直径：7cm；
- 电极极距：1cm。

## 6 监测系统上位机软件设计

主控部分测得的数据，需要由上位机进行处理；另外，主控部分的参数需要修改，也通过上位机软件来设置完成。论文本部分主要实现上位机软件程序的设计和编制。

### 6.1 模块划分

PC 机上的数据分析处理软件（即上位机软件）需要运行在 Windows 环境下，主要完成的功能包括：与下位机通信及设置下位机的参数；对下位机测得的参数进行分析处理等工作，从而得到需要的结果（包括数据图形及海床沉积物与海水界面位置高度等信息）。根据软件拟完成的功能，把整个软件系统划分为参数设置、数据读取与保存、数据处理及绘图四个模块。软件流程图如图 6-1 所示。

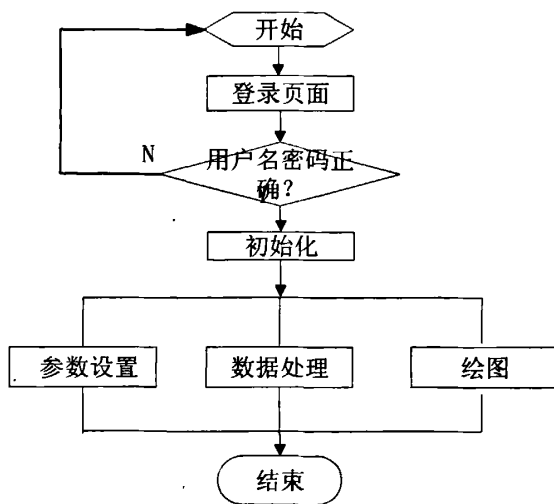


图 6-1 软件流程图

**参数设置：**可以设置电子采集记录仪的采样率、当前时间、采样开始时间和结束时间等初始参数信息。

**数据读取与保存：**通过该软件可以把存储在采集仪中的采集数据读取到 PC 机中，并按照设置保存为 Excel 数据格式，方便日后读取和修改，且这些数据可以随时读入到此软件中进行相应的分析处理。

**数据处理：**采集来的数据很可能存在坏点和根据分析的需要选取部分区域的

数据,在此模块可以选取需要的数据和去掉坏点,分析界面位置和侵蚀淤积量等。

绘图:原始数据及数据处理结果,通常希望不止以表格数据方式显示,而是以更直观的图形方式给出测试数据,可以更清晰的了解数据变化情况,并在图中标注分析结果。以上流程图中的四个模块,前面两个参数设置及数据读取与保存已经基本完成,后两个模块需要根据大量的实验结果,选择合适的分析算法来完成数据分析及进一步的绘图显示。

## 6.2 软件开发语言及环境

目前比较常用的软件编程语言有 VC、VB、Delphi 三种。

VB: 学习容易,但功能有限。

Delphi: 易于掌握、学习和使用,使用方便灵活。

VC: 功能强大,难于学习,和硬件接口及其他程序的接口好。

本设计中由于需要与 MATLAB 程序接口,经常需要与硬件接口,采用的 VC++ 6.0 编程语言。

### 6.2.1 VC++6.0 简介

VC++6.0(Visual C++ 6.0)是 Microsoft 公司开发的采用面向对象的编程方式、可视化的 C/C++ 软件编程环境,它为设计人员提供了一种方便、快捷的 Windows 应用程序开发工具。VC++6.0 使用了 Microsoft Windows 图形用户界面的许多先进特性和设计思想,采用了弹性的、可重用的和完整的面向对象程序语言。它是当前 Windows 下的主要编程语言之一,它能方便地形成应用软件中所需要的各种用户界面和工具并直接与系统及底层硬件交换数据。使用 Visual C++6.0 开发应用软件和数据库应用程序,无疑会大大地提高编程效率。用 VC++ 开发的系统具有容易维护升级、界面友好、代码效率高、执行速度快等一系列优点,因此已成为目前应用软件开发中广泛采用的主要工具之一。

### 6.2.2 Matlab 简介

MATLAB(矩阵实验室的简称)是一种专业的计算机程序,用于工程科学

的矩阵数学运算。但在以后的几年内，它逐渐发展为一种极其灵活的计算体系，用于解决各种重要的技术问题。MATLAB 程序执行 MATLAB 语言，并提供了一个极其广泛的预定义函数库，这样就使得技术工作变得简单高效。在解决工程技术问题方面，MATLAB 比其它任何计算机语言（包括 FORTRAN 和 C）都简单高效。用 MATLAB 进行科技编程的优点 MATLAB 语言相对于传统的科技编程语言有诸多的优点。主要包括：

- 1) 易用性：MATLAB 是种解释型语言，就像各种版本的 BASIC，简单易用。在 MATLAB 集成开发环境下，程序可以方便的编写，修改和调试。许多工具使得 MATLAB 十分简单易用。这些工具包括：一个集成的编译/调试器，在线文件手册，工作台和扩展范例。
- 2) 平台独立性：MATLAB 支持许多的操作系统，提供了大量的平台独立的措施。Windows 98/2000/NT 和许多版本的 UNIX 系统都支持它。在一个平台上编写的程序，在其它平台上一样可以正常运行。因此用户可以根据需要把 MATLAB 编写的程序移植到新平台。
- 3) 预定义函数库：MATLAB 带有一个极大的预定义函数库，它提供了许多已测试和打包过的基本工程问题的函数。成百上千的函数已经在 MATLAB 中编写好，所以让编程变得更加简单。还有许多专用工具箱，以帮助用户解决在具体领域的复杂问题。
- 4) 机制独立的画图：与其他语言不同，MATLAB 有许多的画图和图象处理命令。当 MATLAB 运行时，这些标绘图和图片将会出现在这台电脑的图像输出设备中。
- 5) 用户图形界面：MATLAB 允许程序员为他们的程序建立一个交互式的用户图形界面。利用 MATLAB 的这种功能，程序员可以设计出相对于无经验的用户可以操作的复杂的数据分析程序。
- 6) MATLAB 编译器：MATLAB 的灵活性和平台独立性是通过将 MATLAB 代码编译成设备独立的 P 代码，运行时解释 P 代码。不幸的是，由于 MATLAB 是解释性语言，而不是编译型语言，产生的程序执行速度慢。

但是，由于 Matlab 开发平台的局限性，在其上面开发的程序不能脱离 Matlab 运行环境，因而在处理一些实际应用问题时显得灵活性不足。

### 6.2.3 VC++6.0 与 Matlab 混合编程

VC++6.0 是具有强调界面显示功能的编程软件,直接和系统交换数据,并具有非常优秀的和低层硬件接口的功能,用 VC++编制的程序可以生成可执行文件,在任何计算机上运行。

Matlab 具有多种领域的工具箱,可以十分方便进行数字信号处理,图形图像显示,自动控制,仿真模拟等方面的工作,它是一个完整的数学平台,在这个平台上,用户只需寥寥数语就可以完成十分复杂的功能,大大提高了工程分析计算、图像处理的效率。但是 Matlab 强大的功能只能在它所提供的平台上才能使用,即用户必须在安装 Matlab 系统的机器上才能执行\*.m 文件。

Matlab 与 VC++编程语言两者各有优势,将 Matlab 下开发好的程序或函数直接应用到高级语言开发的程序中,实现 Matlab 与高级语言的混合编程,两者结合可以集成两者的优势,更好和更快的实现丰富的软件功能。目前,C/C++和 Matlab 的混合编程,已经在多个领域得到很好的应用。

本系统上述(6.1中)软件程序中涉及的软件编程:主要包括和硬件接口,读写文件,数字信号处理,图形图像处理,和界面显示几个部分关键技术。这些功能中有些是 VC++6.0 的强项,而有些恰好是 Matlab 的拿手好戏,两者的结合无疑可以为我们的程序设计提供更方面的实现。

如果用 VC 编写的一个软件,其中要求解有 5 个未知数的线形方程组,用 C/C++语言来写程序的话其编程量是很大的,但在 C/C++语言中用 MATLAB 那么简单的代码来实现该功能就可以大大减少工作量,VC 和 MATLAB 接口就是做这个工作的。MATLAB 中提供了大量用 C/C++重新编写的 MATLAB 库函数,包括初等数学函数、线形代数函数、矩阵操作函数、数值计算函数、特殊数学函数、插值函数等等,还可以利用 MATLAB 的编译工具将 m 文件方便的转化为 C/C++语言、可执行程序(exe)、动态连接库文件(dll)、COM 组件等等,并可直接供 C/C++语言调用,利用 VC 和 MATLAB 接口技术可以在 VC 中充分发挥 MATLAB 的数值计算功能,并且可以不依赖 MATLAB 软件运行,我们在编写程序时,可以在 VC 下做出很漂亮的界面,而把复杂的数值处理交给 MATLAB 去做(实际上 MATLAB 也能做界面 GUI (Graphic User Interface),而且做出的界面并不比 VC 逊色,但是需要 MATLAB 软件作为后台运行,如果不依赖 MATLAB

软件运行的话，可以在 VC 中调用 GUI，然后通过接口技术将 MATLAB 集成到 VC 中，这样可以大大减轻编程的负担，并减少程序编写时间。

MATLAB 与 Visual C++ 结合的方法有多种，但其适用程度与范围不同。Matlab 和 VC++6.0 混合编程实现波形绘制，有 4 种常用的实现方法：

### 1) 编译方法

提到 Matlab 与 VC 的混合编程问题，就不能不讲讲 Matcom 软件。Matcom 是第三方控件，使用该工具可以将 m 脚本文件和 m 函数转化成相同功能的 C/C++ 文件。该软件原本属于 Mathtool 公司，后来被 Mathworks 公司合并了。因而从 Matlab6.5 及其以后的版本 Matcom 就不再提供前面讲的编译功能，其编译功能被整合到 Matlab 中，编译工作也有 Matlab 直接完成<sup>[91]</sup>。这种编译方式将 .m 文件编译为：① C/C++ 源文件并嵌入 VC++，② \*.dll 文件，③ .exe 文件三种类型的文件，实现 VC 和 matlab 的混合编程。

该方法的优点：① 转换过程简单（由 Matcom 工具自动实现），容易实现；② 可以方便的生成动态链接库文件（dll）和可执行文件（exe）；③ 不仅可以转换独立的脚本文件，也可以转换嵌套脚本文件；④ 设置环境后，可以使用 MATLAB 的工具箱函数。

### 2) 在 C/C++ 程序中利用 MATLAB engine 调用 MATLAB 函数

采用客户机/服务器(Client/Server)的计算方式，通过 Windows 的 ActiveX 通道和 Matlab 接口。提供了一组 MATLAB API 函数，通过调用这些函数实现以用程序进程之间的数据传递。在具体的应用中，VC 的程序作为前端客户机，通过调用 Matlab Engine 在后台与 Matlab 服务器建立连接，VC 向 MATLAB 引擎传递命令和数据，并从 MATLAB 引擎接受数据信息，实现动态通信。这种方法实现较为简单，不要求连接整个 Matlab，只需要嵌入必要的 Matlab Engine 库，可大大地节省系统资源，但这种 Matlab 在后台运行，运行效率低下。

### 3) 在 Matlab 下做 COM 组件，并在 VC 中调用 COM 组件

组件对象模型（简称 MCR）是以组件为发布单元的对象模型。它提供一种可以共享二进制代码的工业标准，允许任何符合标准的程序访问，所以 COM 作为不同语言之间的协作开发是非常方便的。MATLAB 的 COM 编译器是在 MATLAB6.5 中才开始提供的一个新工具，从 MATLAB7.0 起，这个产品改名为

MATLAB Builder for COM。基于 COM 的混合编程方法也是 Mathworks 公司推荐使用的方法。

#### 4) 利用 Mideva/Matcom 实现

Mideva 是 MathTools 公司推出的一种 MATLAB 编译开发软件平台, 提供对 MATLAB 程序文件的解释执行和开发环境支持。该软件目前版本为 4.5, 软件大小仅为几 MB, 相比较 MATLAB 可以说是体积超小。Mideva 是一个基础的调试编辑环境, MATCOM 是 Mideva 的内核。Mideva 提供的功能相当强大, 它包含了近千个 MATLAB 的基本功能函数, 通过必要设置就可以直接实现与 C++ 混合编程, 不必依赖于 MATLAB。Matcom 的不足: 对 stuct 等类的支持有缺陷, 而且部分绘图无法得到准确的图像尤其是三维图像, 在不涉及到三维绘图情况下适用。

使用 MATCOM 实现 MATLAB 和 VC++ 的混合编程, 是开发数据处理应用软件的有效途径。此种方法的优势主要如下: ① 提供了 MATLAB 中的大量成熟函数; ② 充分发挥出 MATLAB 强大的数据可视化功能; ③ 发挥出强大开发工具 VC++ 的 Windows 平台优势; ④ 程序可脱离 MATLAB 运行环境。

由于本软件中的绘图不复杂, 用方法 4 的 Matcom 方式直接实现, 简单易行, 容易掌握, 这里采用的方法 4。

## 6.3 软件系统的具体实现

如上 6.1 中所述, 软件主体包括三个模块, 如图 6-2 所示。另外为了软件使用, 系统添加了身份验证启动界面。系统设计除了绘图部分采用的 VC 和 matcom4.5 结合的编程方式, 其余部分均采用的是 VC++ 6.0 进行的程序设计。

### 6.3.1 软件主界面

在身份验证登录窗口输入正确的用户名和密码后, 即可进入软件主界面。系统主界面是基于单文档的, 如图 6-2 所示。



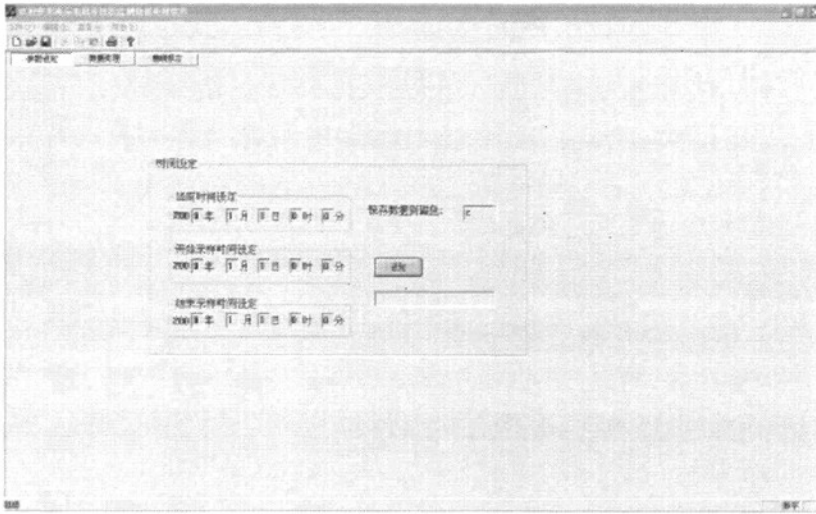


图 6-2 软件主界面

软件主界面上有三个按钮，为：参数设置、数据处理和曲线拟合，它们对于软件的三个功能模块，点击对应的按钮就可以进入相应的界面。三个功能模块的具体功能实现如下所述。

### 6.3.2 参数设置模块

在任何时刻都可通过单击“参数设定”按钮，进入参数设置模块。该部分也是软件的默认选项，即单击该按钮的界面和主界面相同，如图 6-2。主要功能模块放大图，如图 6-3 所示。

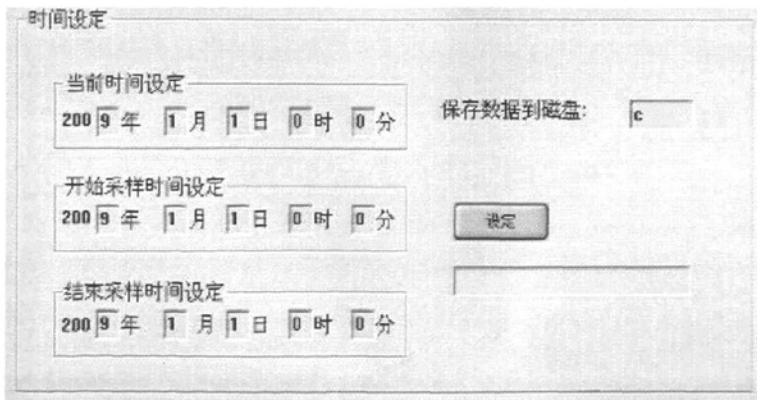


图 6-3 参数设置界面细节

该界面可实现蚀积监测仪器的参数设定。这些设定包括三个时间设定，即：当前时间设定、开始采样时间设定和结束采样时间设定。在相应的位置输入拟进

行蚀积监测的时间，输入保存数据的磁盘，并单击“设定”按钮，即可保存硬件的时间设定数据到 U 盘中。本部分的具体功能都在单击“设定”按钮的函数中实现，该函数具体流程图如图 6-4 所示。

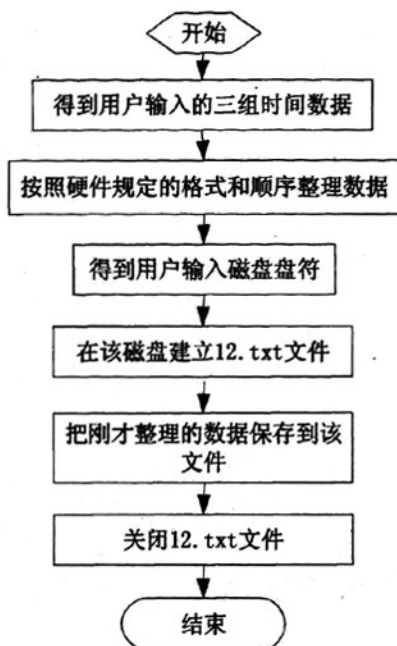


图 6-4 设定参数软件流程图

### 6.3.3 数据处理

任何时刻可通过单击“数据处理”按钮，进入数据处理界面，如图 6-5 所示。

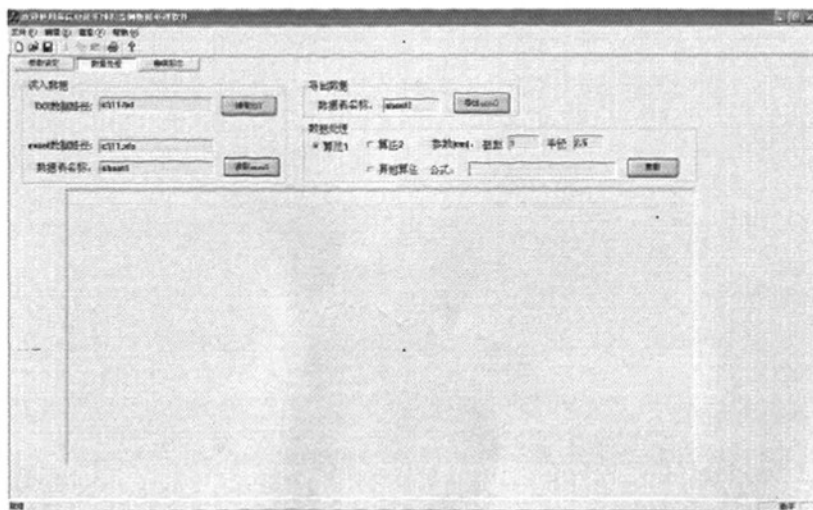


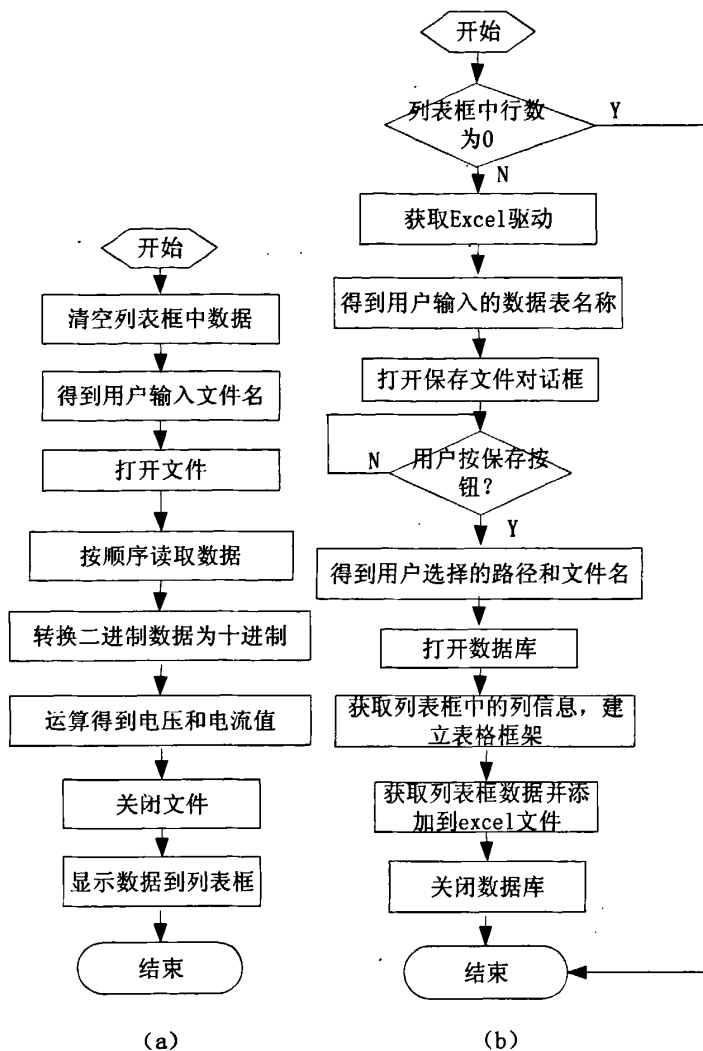
图 6-5 数据处理界面

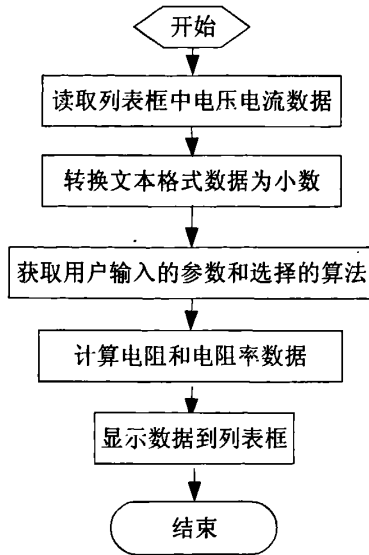
数据处理模块有三个功能：

1 可以读取两种类型的数据，并在列表框中显示读出的数据：硬件测得的数据，以二进制格式保存的扩展名为 txt 的文件；Excel 数据表数据。在“TXT 数据路径：”后面的编辑框中输入 txt 文件路径，并单击“读取 txt”按钮，即可实现该功能。读取二进制 TXT 文件软件流程图如图 6-6 (a) 所示，读取 Excel 文件流程与此类似，不在赘述。

2 可以把列表框中的数据保存为 Excel 文件，方便用户日后的修改，读取等操作。在“excel 数据路径：”后面的编辑框中输入 xls 文件路径，在“数据表名称：”后面的编辑框中输入拟读取的数据表名，并单击“读取 excel”按钮，即可实现 Excel 数据表读入，此部分功能软件流程图如图 6-6 (b) 所示。

3 对应用功能 1 读取到列表框中的、硬件测得的电压和电流数据，进行数据处理，得到电阻和电阻率数据，并在列表框中显示。选择“算法 1”和“算法 2”其中之一：环形电极选择算法 1，点电极选择算法 2；输入仪器参数；单击“更新”按钮，即可把计算出的电阻和电阻率显示在列表框中电压和电流数据的后面。此部分功能软件流程图如图 6-6 (c) 所示。





(c)

图 6-6 数据处理模块三个功能的流程图：a) 读取数据，b) 保存数据，c) 数据处理。

### 6.3.4 曲线拟合

在任何时刻都可通过单击“曲线拟合”按钮，进入数据处理界面，如图 6-7 所示。该模块可以读入 Excel 数据到列表框中，绘制数据曲线，并进行曲线拟合。在“原始数据路径：”后的编辑框中输入数据路径，在“数据表名称：”后面的编辑框中输入拟读取数据表名字，并单击“读取”按钮，可以读入 Excel 数据，并显示在列表框中；单击“绘制曲线”按钮可以画出数据的光滑曲线，如图 6-7 中的蓝色线所示；选择一种曲线拟合方式，单击“matlab 拟合”按钮，右侧的框中即会显示出拟合的曲线。

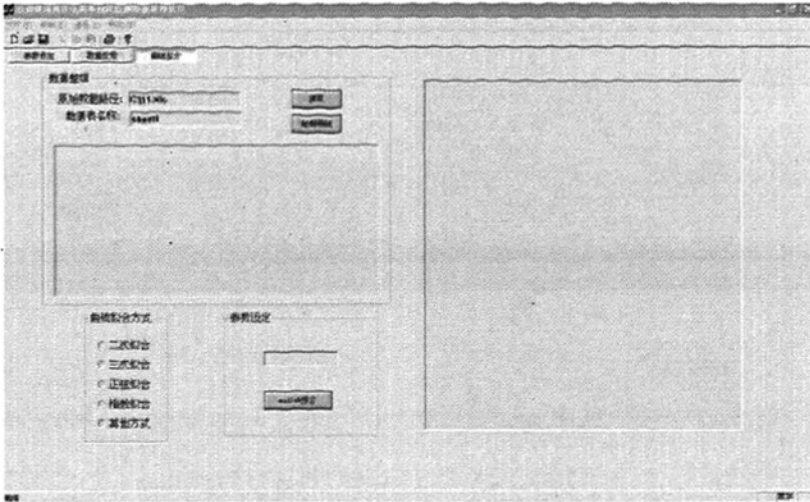


图 6-7. 曲线拟合界面

读入 Excel 数据和数据处理中的读入部分功能一致，这里不再赘述，请参阅 6.3.3。

曲线绘制和曲线拟合，这里采用的是 6.2.3 中所述的方法 4，即利用 Mideva/Matcom 实现 MATLAB 与 VC++ 的混合编程，该方法实现过程一般需进行以下 6 个步骤：

- 1) Matcom 4.5 软件安装，安装过程中 Matcom 搜索到 VC++6.0 编译器的提示，选择“是”；
- 2) VC 中的设置：在 VC++ 的选择 Project|setting，在 project settings 对话框的 Links 选项卡中：category 后面选择 input；在下面的“object/library modules:”中添加“v4501v.lib”；在“additional library path:”添加 matcom 路径“c:\matcom45/lib”；
- 3) 头文件：在需要用到 MATLAB 的文件中添加头文件“matlib.h”；
- 4) 初始化：在需要用到函数的地方先初始化 Matcom；
- 5) 编程：调用相应的语句编程；
- 6) 释放：使用 Matcom 语句完毕，释放 Matcom。

这样就可以实现 Matcom 与 VC++ 的混合编程。

本文中的曲线绘制和曲线拟合的流程图分别如图 6-8 (a) 和 (b) 所示。

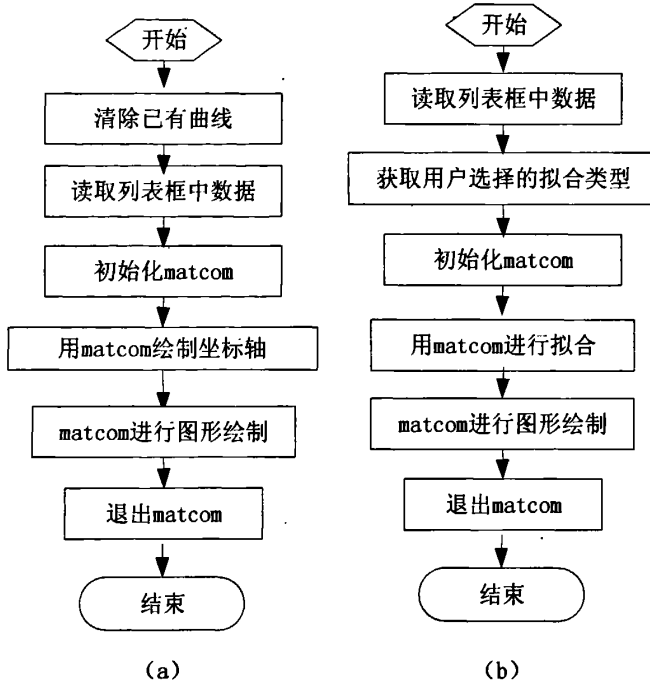


图 6-8 (a) 曲线绘制流程图, (b) 曲线拟合流程图

## 6.4 本章小结

本章通过分析软件系统的功能对系统进行了模块划分, 采用 VC++6.0 和 matcom4.5 混合编程的方式, 分模块设计, 完成了上位机软件的设计。该软件可以完成设置下位机参数、对下位机测得数据进行处理显示和对数据的曲线拟合三个功能, 对应着该软件的三个模块设计。

## 7 监测系统误差分析

上面几章完成了整个系统三个部分的设计。设计完成的监测系统存在着测试误差。本章从理论上对系统的误差进行了分析，给出了系统的总误差，在此基础上，进一步对系统的误差进行了静态测试实验，验证了确认系统的测试误差。

### 7.1 ADC 误差及其校正方法

数据采集系统的误差来源主要来自于：ADC、电压基准、放大器这三种元件。

模数转换器（ADC）是数据采集系统的关键组成部分，其性能对整个系统起着决定性的作用。在很大程度上可以说，选择好了 ADC 也就确定了系统的精度。为了正确选择 ADC，满足设计要求，对 ADC 进行误差分析具有重要意义。Sigma-delta ADC 由于具有高分辨率、低噪声等一系列良好的性能，在低频数据采集系统设计中应用越来越广泛。

采用  $\Sigma-\Delta$  技术设计 ADC 器件可以达到其他技术无法达到的精度，为工业和医用仪器市场的应用提供一种无与伦比的低噪声、低功耗解决方案<sup>[29]</sup>。24 位的 ADC 是目前分辨率最高的模数转换器，但由于采用技术等的不同，不同的 24bit ADC 精度并不相同。

对 A/D 转换器进行误差分析是提高数据采集系统性能的前提条件，也是确定系统最终精度必不可少的一步。一个好的信息处理系统，只有在全面考虑各部分误差的情况下，才能满足各方面的设计要求。因此，对 ADC 性能进行深入了解，有助于在系统设计过程中及时发现一些导致性能指标不尽如意的的问题所在。下面分析该器件的各个静态误差和动态误差及其产生的原因，给出相应的校正方法。最后给出 ADC 的总误差。在本文中对该器件误差的分析方法，可以类似的用于对其他 ADC 器件的分析。分析过程中以基准 2.5V 为例。

ADC 的误差主要分为静态误差和动态误差。静态误差是器件内部电路的误差。这些内部误差包括器件的量化、增益、偏移、积分非线性(INL)和微分非线性(DNL)误差，这些参数说明了静止的模拟信号转换成数字信号的情况。动态误差是指在特定输入信号情况下产生的误差<sup>[34]</sup>。sigma-delta ADC 器件由于采用了和其他类型 ADC 完全不同的新技术，一些特性和其他 ADC 有所不同，误差方面也



存在不同。

### 7.1.1 ADC 静态误差及校正方法

影响模数转换器性能的静态误差主要包括量化误差、偏移和增益误差及非线性误差。本系统中选择：ADC 的更新率为 242HZ，增益为 1，外部 2.5V 参考。下面的参数若非特殊说明，都按照这一给定的条件对应的值来计算。

#### 1) 量化误差 (Quantization Error)

量化是由模拟到数字的过程，当实际模拟值落入两个量化层次之间时，便会产生量化误差。若采用有舍有入的量化方法，即量化将指定最为接近的层次，最大量化误差记为  $\pm 1/2\text{LSB}$ 。

按照上述给定条件下，ADC 有效分辨率为 20（更新率为 120），在满量程为

$$2.5\text{V 时:} \quad 1\text{LSB} = \frac{2.5\text{V}}{2^{20} - 1} = 2.4\mu\text{V} \quad \text{式(7-1)}$$

量化误差为  $\pm 1.2\mu\text{V}$ 。量化误差是任何数据采集系统都有，且无法去除的。

#### 2) 满量程误差

满量程误差是偏移和增益误差 (Offset and Gain Error) 的和。本设计所用 ADC 芯片的满量程误差为  $\pm 10\mu\text{V}$ 。

**偏移误差 (Offset Error):** 也称为失调误差或零点误差，是指理想的 A/D 转换器与实际的 A/D 转换器零点之间的偏差大小，如图 7-1 所示。偏移误差在某些点上可能会比较大，这通常是由一些干扰造成的。偏移误差造成了 ADC 动态范围减小。本设计的 ADC 偏移误差为  $\pm 3\mu\text{V}$ 。对于偏移误差，利用微控制器 ( $\mu\text{C}$ ) 或数字信号处理器 (DSP) 很容易进行修正校准。

**增益误差 (Gain Error):** 增益误差定义为满量程误差减去偏移误差，如图 7-1 所示。增益误差是预估传递函数和实际斜率的差别，增益误差通常在模数转换器最末或最后一个传输代码转换点计算。和偏移误差一样，增益误差也会减小可测量的动态范围。增益误差可通过软件用一个简单的线性函数  $y = (\frac{m_1}{m_2})x$  进行简单

的校正，其中， $m_1$  是理想转换函数的斜率， $m_2$  是实际测得的转换函数的斜率。这里选择器件的满量程误差（包括偏移误差和增益误差），相对于量化误差可以忽

略，且可软件校准。

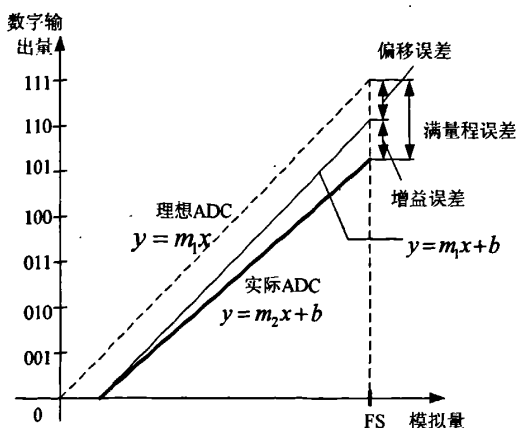


图 7-1 偏移误差、增益误差和满量程误差

### 3) 非线性误差 (Nonlinearity Error)

非线性误差包括微分非线性 (Differential nonlinearity, DNL) 和积分非线性 (Integral nonlinearity, INL)。

微分非线性 (DNL): 也称为差分非线性。对于 sigma-delta 结构的 ADC, 转换结果较少或不依赖于器件的失配性, 微分非线性问题几乎不存在。

积分非线性 (INL): INL 是 DNL 误差的数学积分, 即一个具有良好 INL 的 ADC 保证有良好的 DNL。本系统选用 ADC 的积分非线性 FSR 最大值为  $\pm 15\text{ppm}$  相当于  $37.5\mu\text{V}$ , 典型值  $3.5\text{ppm}$  相当于  $8.75\mu\text{V}$ 。

无论是 DNL 还是 INL 都是难于调整的, 即使失调和增益误差已调到零, 且 ADC 保持在温度恒定的情况下, 并在恒定的电源电压下使用, 仍会有非线性误差。选择非线性偏差较小的器件是减小非线性误差的主要方法。

### 4) 综合分析

由上述分析 ADC 的静态特性可以看出, 量化误差  $\pm 1.2\mu\text{V}$ 。在使用 ADC 时, 只需要考虑静态误差中对系统性能影响最大的误差, 即满量程误差 ( $\pm 10\mu\text{V}$ ) 和积分非线性误差 ( $\pm 37.5\mu\text{V}$  最大值,  $8.75$  典型值)。相对于其他误差, 量化误差可忽略不计, 偏移误差和增益误差可以校准到零, INL 却难以校正。

## 7.1.2 ADC 动态误差及校正方法

影响 ADC 性能的动态误差主要有信噪比及信号噪声失真比、温漂、电压噪声。另外, 对于  $\Sigma-\Delta$  ADC 而言, 过采样技术的精度与过采样程度密切相关, 因而速

度也是影响其性能的一个主要因素。

#### 1) 信噪比 (SNR) 与信号噪声失真比 (SINAD)

对于过采样 A/D 转换器来说, 信噪比 (SNR) 对其动态性能影响最大。另外还有一个和 SNR 类似的指标, 即信号噪声失真比 (SINAD)。两者关系式:

$$\text{SINAD}=[6.02(N)+1.76](\text{dB}) \quad \text{式(7-2)}$$

N 为转换位数, 这一等式可以重写为 N 的表达式:

$$N=(\text{SINAD}-1.76)/6.02 \quad \text{式(7-3)}$$

这就是等效位数 (ENOB) 的定义<sup>[92]</sup>。由 SNR 或 SINAD 引起的误差, 常用 ENOB 来衡量。

#### 2) 等效位数 (ENOB) 与转换速度

$\Sigma-\Delta$  过采样技术决定了精度与速率有关, 即有效位数和转换速率密切相关。转换速率为 123HZ, 有效位数为 17.5, 相当于误差是  $13.45 \mu\text{V}$ 。

#### 3) 温漂

温漂主要包括偏移误差温漂和增益误差温漂两种。ADC 的偏移误差温漂为  $\pm 10\text{nV}/^\circ\text{C}$ , 增益温漂为  $\pm 0.5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。这样在周围温度变化为  $\pm 10^\circ\text{C}$  时, 也会造成  $\pm 5\text{ppm}$  ( $\pm 12.5 \mu\text{V}$ ) 的增益漂移, 远大于偏移漂移。

增益漂移可采用多种不同方法加以补偿, 一个办法是仔细测出增益漂移的完整数据, 并在微处理器的存储器中建立一个表格, 然后随着温度的变化调节测量值。然而, 这是一项繁重的任务, 补偿工序非常费时。第二个办法是只在温度发生显著变化时才执行校准。温漂校准相对较难, 一般温度变化大的情况下, 温漂小的器件是明智的选择。本系统中不做温度补偿。

#### 4) 电压噪声

电压噪声通常用 RMS 或者峰-峰值表示, 两者可以相互转换, 要分析其对性能的影响, 通常采用峰-峰值。本器件在选定更新率和增益下, RMS 为  $4.89 \mu\text{V}$ 。

### 7.1.3 ADC 总误差

通过上述分析, 在基准电压为 2.5V 时, 可以得出影响 ADC 性能的主要误差在上面分析的典型情况下, 有满量程误差 ( $\pm 10 \mu\text{V}$ )、积分非线性误差 ( $\pm 37.5 \mu\text{V}$  最大值,  $8.75$  典型值)、ENOB ( $\pm 13.45 \mu\text{V}$ ) 及增益温漂 ( $\pm 12.5 \mu\text{V}$ ), 偏移漂

移 ( $\pm 0.1 \mu\text{V}$ ) 相对于上面的误差很小可以不计。根据均方根误差综合公式:

$$\text{总误差} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2} \quad \text{式(7-4)}$$

影响 ADC 性能的总误差最大为  $42.93 \mu\text{V}$  (0.0017%)。如果采用合适的方法去除其中比较容易校正的误差: 偏移误差、增益误差, 但它们相对于其他误差来说较小。在实际应用中如非非常必要则可以不必加校正电路。当然, 具体情况不同, 比如温度变化范围, 误差也需要根据情况重新计算。上面的计算中还有一个非常重要基准带来的误差没有考虑, 这需要根据选择的基准来确定, 这一误差是不容忽视的。另外需要注意由于其误差的影响, 需要考虑其输入范围减小的问题。上面的分析计算, 可以看出采用  $\Sigma-\Delta$  技术的 ADC 器件 ADC 具有优良的误差特性, 低达 0.0017% 的误差使其可以适应大多数高精度要求的设计中。

## 7.2 电压基准误差及去除

无论是内部基准或者外部基准, 它都是 ADC 的一个最大的潜在误差源。基准电压影响全范围转换, 制约 AD 转换的精度, 选择合适的基准对于数据采集系统的设计至关重要。对于高精度设计, 一般采用外部基准, ADC 内部自带基准通常没有具体的性能指标描述, 其温度特性和漂移等性能指标一般无法满足分辨率大于 12bit ADC 器件的要求。在选择基准的时候应该注意选择初始误差低、温度系数低、调整率低的器件, 一般基准误差应远小于 1LSB 才不至于影响 ADC 性能的发挥, 对于高分辨率的 ADC, 选择不到合适的基准, 就有必要采用一些方法去除初始误差来满足 ADC 对基准的要求。

电压基准源的指标很多, 影响误差的指标主要包括以下几个, 其后附本系统中电压基准源的对应精度值 (温度范围:  $-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ ):

- 1) 初始精度: 可外部校准;
- 2) 输出电压温度漂移:  $3\text{ppm}/^\circ\text{C}$  ( $7.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ );
- 3) 长期稳定性:  $\pm 20\text{ppm}$  (1000 hours@ $25^\circ\text{C}$ ) ( $\pm 50 \mu\text{V}$ );
- 4) 噪声电压:  $4 \mu\text{V}$ 。

初始精度可以通过后期软件校准。

温度漂移通常是可以修正的误差, 但修正工作比较烦琐, 本系统选用了温漂只有  $3\text{ppm}$  的低温漂器件, 可不用修正温漂。

长期稳定性 (LTS) 给出了某一封装或某类器件中潜在的硅片应力或离子迁移的程度。注意在温湿度极端情况下的电路板洁净度对此参数有很大的影响。还要注意 LTS 仅在 25°C 基准温度下有效。这可以用定期校准的方式来改善。

另一个重要参数是电压基准源流出和吸入电流的能力。但是考虑到许多基准源不能吸入电流, 如果偏置电流和漏电流超过基准源的吸入电流能力, 结果会导致输出电压明显上漂, 这里面选择的基准带载能力完全满足负载需求<sup>[93]</sup>。

本系统的测试环境中温度变化不大, 基准的误差在温度变化 1°C 情况下, 不考虑长期稳定性因素为  $7.5+4=11.5 \mu\text{V}$ , 满足小于 1LSB 的需求。

### 7.3 放大器的误差及去除

#### 1) 失调误差

失调电压和失调电压漂移: 本系统选用器件: 输入失调  $25 \mu\text{V}$ , 输入失调漂移  $0.1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , 输出失调  $200 \mu\text{V}$ , 输出失调偏移  $2.5 \mu\text{V}$ 。

由于仪表放大器由两个独立的部分组成: 输入级和输出级。总输出失调等于输入失调乘以增益加上输出放大器 (仪表放大器内部的) 失调。

初始失调电压通过外部调整为零, 但失调电压漂移不能够通过调整来消除。像失调电压一样, 仪表放大器的失调漂移也由两部分组成, 即输入部分和输出部分, 每一部分都对总误差起作用。当增益增加时, 输入级的失调成为主要的失调误差源。本系统选用器件的失调很小。按照上面的计算方法, 在增益为 100 时, 总输出失调偏移为  $12.5 \mu\text{V}$ , 即为放大器引起的失调误差。

#### 2) 输入和输出电压噪声

输入噪声  $eni$  为  $35\text{nv}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 输出噪声  $eno$  为  $50\text{nv}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。一般通常将与输入端相关的误差分类和组合在一起, 称作折合到输入端 (RTI) 误差, 而将所有与输出端相关的误差则称之为折合到输出端 (RTO) 误差。它们的表达式如下所示。

$$\text{RTI 总噪声} = \sqrt{(eni)^2 + (eno/G)^2} \quad \text{式(7-5)}$$

$$\text{RTO 总噪声} = \sqrt{(G \times eni)^2 + (eno)^2} \quad \text{式(7-6)}$$

在增益为 100 时, RTO 总噪声计算值:  $3.5 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 本系统需要用到的频率范围 10HZ, RTO 总噪声为  $1.11 \mu\text{V}$ 。

### 3) 射频干扰引起的整流误差及去除

真实世界应用必须处理不断增加的射频干扰 (RFI)。特别要考虑信号传输线路长并且信号强度低的情况。这是仪表放大器的典型应用, 因为其固有的 CMR 性能允许仪表放大器提取叠加在很强的共模噪声和干扰信号上的微弱差分信号。但是, 一个经常被忽视的潜在问题是仪表放大器内部的射频 (RF) 整流。当有很强的 RF 干扰存在时, 它可能被 IC 整流之后会表现为 DC 输出失调误差。仪表放大器的 CMR 能力通常会大大减小出现在其输入端的共模信号。

不幸的是, 发生 RF 整流是因为即使最好的仪表放大器在 20 kHz 以上的频率条件下事实上没有 CMR 能力。很强的 RF 信号首先被仪表放大器的输入级整流, 然后表现为 DC 失调误差。一旦被整流, 其输出端的低通滤波怎么也不能去除这个误差。如果 RFI 是断续性的, 这会导致无法检测的测量误差。

最实用解决方案是通过使用一个差分低通滤波器在仪表放大器前提供 RF 衰减滤波器。该滤波器需要完成三项工作: 尽可能多地从输入端去除 RF 能量, 保持每个输入端和地之间的 AC 信号平衡, 以及在测量带宽内保持足够高的输入阻抗以避免降低对输入信号源的带载能力。

使用图 7-2 所示的元件值, 该滤波器的带宽大约为 400 Hz。在增益为 100 的条件下, 1 V p-p 输入信号的 RTI 最大 DC 失调电压小于 1  $\mu$ V。在相同增益条件下, 该电路的 RF 信号抑制能力优于 74 dB。

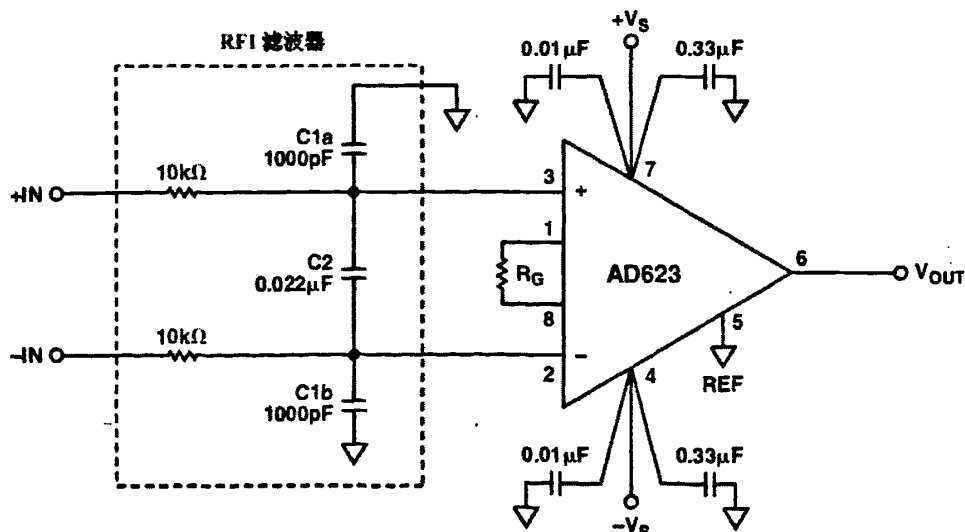


图 7-2 RFI 抑制电路

放大器造成的总误差：失调误差  $12.5\mu\text{V}$ ，RTO 总噪声为  $1.11\mu\text{V}$ ，两者的和即为总误差  $13.61\mu\text{V}$ 。

## 7.4 监测系统总误差

综上，理论上，系统总误差为：ADC 误差 + 基准误差 + 放大器误差 =  $42.93\mu\text{V} + 11.5\mu\text{V} + 13.61\mu\text{V} = 68.04\mu\text{V}$ 。这一值为全范围的  $0.0027\%$ 。即电压测试精度：可以精确到小数点后 4 位。

电阻率计算： $L = G \frac{U_{MN}}{I}$ ，其中  $G$  为根据探杆直径和极距计算得出的系数，

$U_{MN}$  为 MN 之间的电压， $I$  是流过 MN 的电流，是用康铜丝电阻电压  $U_k$  与其  $R_k$  电阻相除得到的。 $U_{MN}$  及  $U_k$  是采用同一个 ADC，在同样的设置下测得的。因而，两者的测量精确度相同。即，都可以精确到小数点后 5 位。两者相除得到的数值，在本测试系统中为  $0.2 \sim 2$  欧姆，精度可达到小数点后 2 位。

## 7.5 静态测试验证监测系统测试误差

选择和测试系统的  $U$ 、 $I$  比值接近的电阻， $0.5\Omega$  的康铜丝电阻 9 个，构成多 AMNB 的 Wenner 结构，如图 7-3 所示。每 3 个相邻的电阻都可以构成一个 AMNB 结构，这些结构从上到下依次记作通道 1~通道 7。接入测试电路，测量这些通道 MN 之间的电阻阻值，从而验证系统测试误差。测试数据更新率设为  $123\text{HZ}$ 。

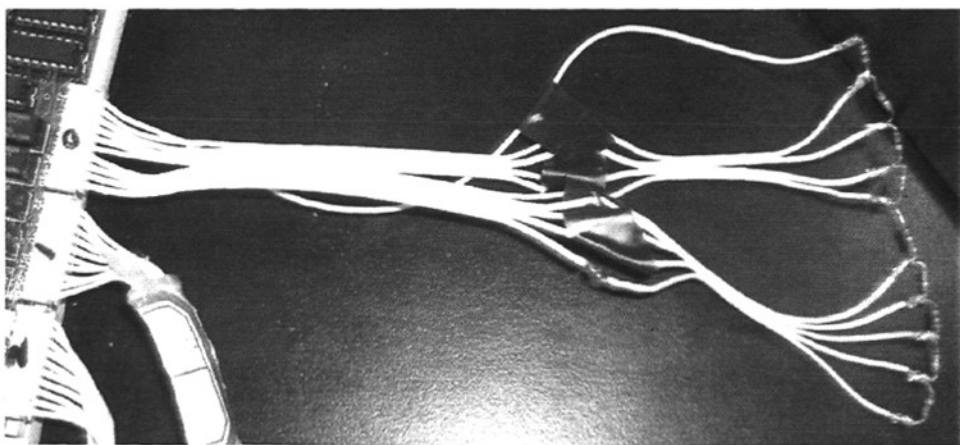


图 7-3  $0.5\Omega$  电阻构成的 AMNB 结构

多次测试同一通道得出测试数据，如表 7-1 所示，这里分别对通道 1 和通道

3 实施了多次重复测试。可以看出，测试得到电压信号精度可以达到小数点后 5 位。其中对通道 1 的测试电压值和平均值最大偏差为  $124 \mu V$ ，但除了这个最大偏差外，其他的偏差均小于  $68 \mu V$ ，可以认为  $124 \mu V$  是由于系统测试过程中的随机误差引起的较大偏差；而对于通道 3 的测试，最大偏差仅为  $36 \mu V$ 。总结前面数据分析结果，系统实际测试得到的电压测试精度和理论分析具有很好的一致性，通过已测得的数据看，甚至好过理论分析数据。

电压电流两个信号相除得到的电阻值数据，从表 7-1 中电阻数据可以看出，其精度能够达到小数点后 2 位，对其后面的小数点后第 3 位进行四舍五入，得到的通道 1 和通道 3 的数据都在 0.48~0.50 之间，精度可以达到 0.02。

表 7-1 测试通道 1 和通道 2 得到的电压、电流数据及计算得出的电阻数据

测试通道	通道 1			通道 3		
	电压 V	电流 A	电阻 $\Omega$	电压 V	电流 A	电阻 $\Omega$
	0.005168	0.010774	0.475717	0.005232	0.010608	0.493348
	0.005204	0.010675	0.487748	0.005228	0.010970	0.476601
	0.005343	0.010672	0.500405	0.005253	0.010553	0.497702
	0.005251	0.010530	0.498565	0.005281	0.010944	0.482524
	0.005170	0.010635	0.486202	0.005214	0.010685	0.487934
	0.005248	0.010798	0.485800	0.005254	0.010633	0.494192
	0.005198	0.010704	0.485627	0.005301	0.010802	0.490609
	0.005181	0.010810	0.479196	0.005249	0.010625	0.493908
	0.005204	0.010569	0.492793	0.005239	0.010785	0.485801
平均值	0.005219			0.005250		
最大差值	0.000124			0.000036		

表 7-2 给出了 3 次连续测试 7 个通道的电阻值，从该数据 3 次测量同一个通道的数据可以看出，第 5 个通道的第一次数据数值明显偏小，数据误差较大，可以认为由随机误差导致；其他通道的数据误差也都保持在  $0.02 \Omega$  以内。按照本系统中选用的探杆，系统电阻率的参数为 0.603，这样，电阻率的测试精度为  $0.012 \Omega \cdot m$ 。

表 7-2 3 次连续测试 7 个通道电阻数据

通道	第一次	第二次	第三次
1	0.493452	0.487006	0.479403
2	0.486606	0.491451	0.472480
3	0.502129	0.498202	0.492254
4	0.497759	0.485964	0.486977
5	0.457017	0.471315	0.485521



6	0.487270	0.493551	0.490257
7	0.503547	0.512157	0.502823

## 7.6 本章小结

本章通过理论分析测试系统，得到了系统的总误差。并通过实验对分析结果进一步验证，得到的实际测试误差要好过理论分析误差。

通过本章的分析可得，本设计完成的监测系统参数总结如下：

- A/D有效分辨率：20位（即分辨率：1.2 $\mu$ V）
- 电压测试精度：68 $\mu$ V
- 电阻测试精度：0.02 $\Omega$
- 电阻率测试精度：0.012 $\Omega \cdot m$
- 最大输入信号： $\pm 2.5V$ （峰-峰值）
- 输入阻抗：2G $\Omega$
- 自电补偿： $\pm 2.3V$
- 供电电流：10mA

## 8 监测系统总装及系统参数确定

### 8.1 电极探杆装配

#### 1) 探杆加工

电极探杆选用的透明 PVC 管，在 PVC 管上面每隔 1cm 做一个环形电极槽，方便电极置入，且每个槽中间都会有一个引线孔，可以把电极连线引到探杆内部。具体如图 8-1 所示。

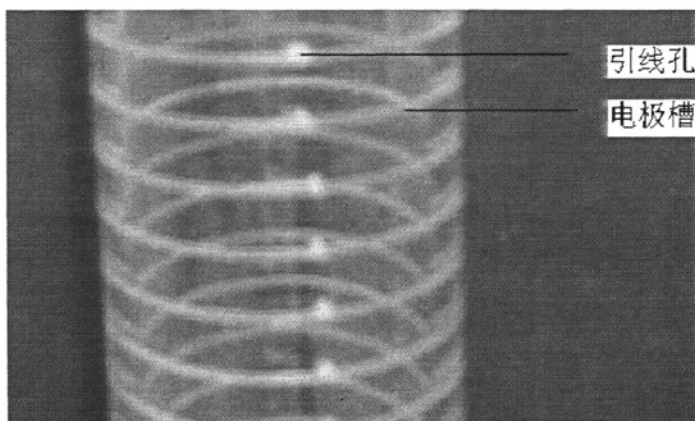


图 8-1 未绕制电极前的探杆

#### 2) 电极连接

在加工好的 PVC 管的电极槽中置入铜电极，并从引线孔中引出电极连接线。接好电极的探杆如图 8-2 所示。

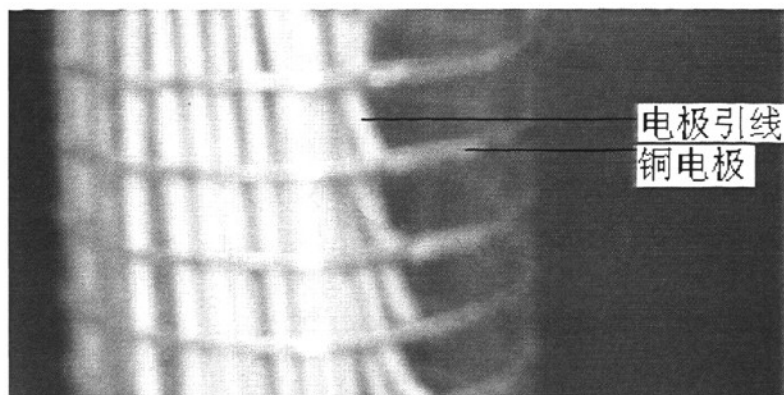


图 8-2 连接号电极的探杆

### 3) 电极密封

接好电极的探杆，引线孔会漏水，这需要用环氧树脂密封，第二日检查电极密封效果。密封后的探杆如图 8-3 所示。

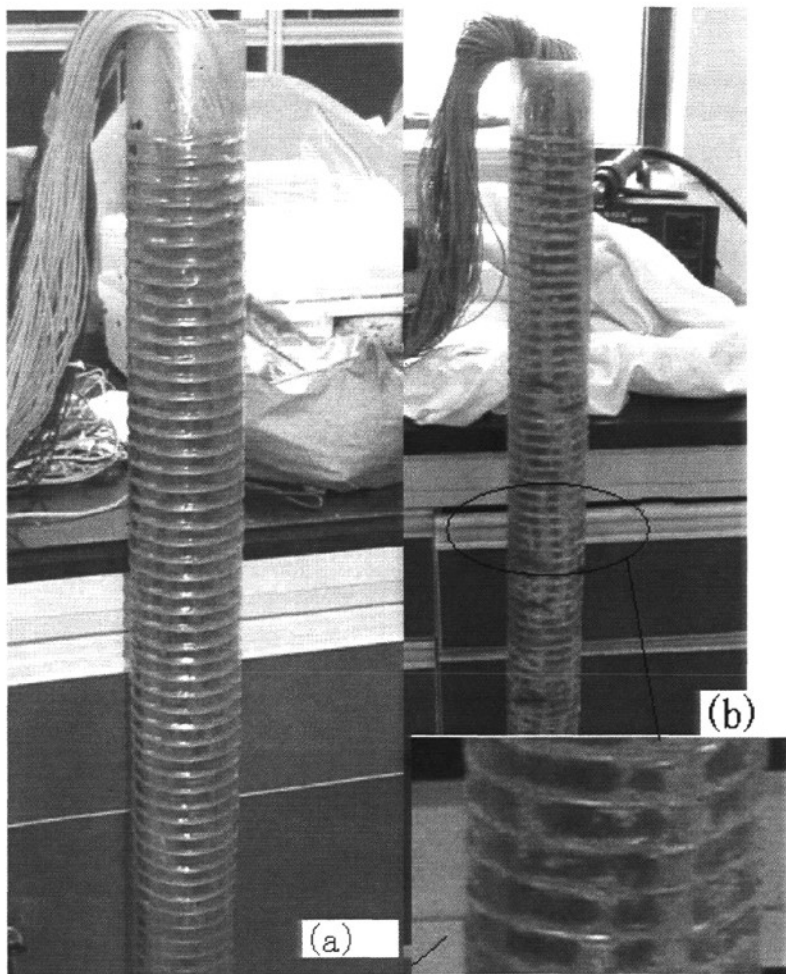


图 8-3 灌封的探杆，(a) 未打磨前的探杆；(b) 打磨后的探杆

### 4) 引出接头

从探杆内部引出的导线，无法和主控部分相接，还需要把导线连接到插针接头上，每十个为一组，如图 8-4 所示。

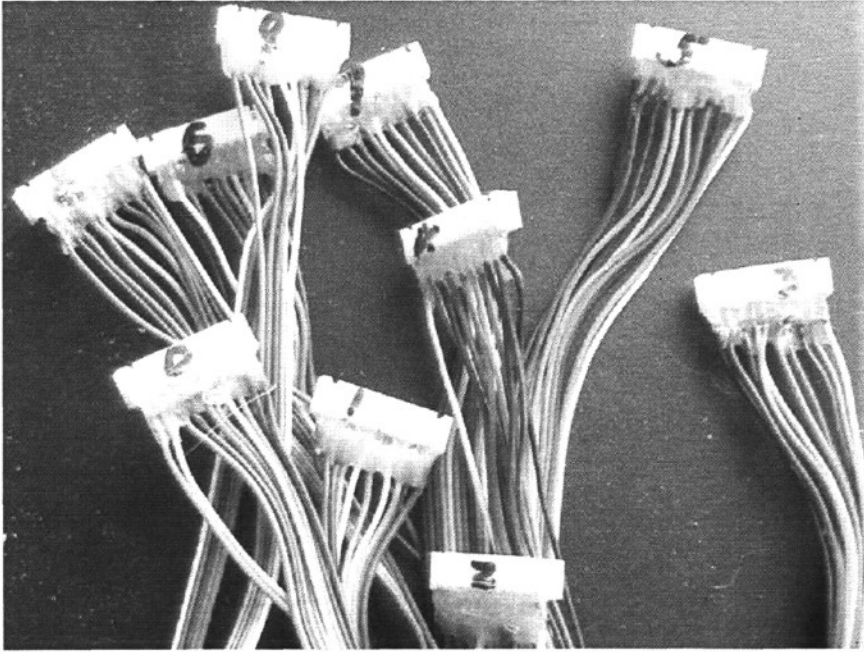


图 8-4 电极引线接头

## 8.2 主控部分装配

主控部分包括自行设计的数据采集板，USB 存储板及 U 盘，电池三个部分。这三个部分都需要放入一个 PVC 外壳中，探杆引线连接到其上，主控部分引线口如图 8-5 所示，然后密封。为方便装配，设计了一个双层支架结构，如图 8-6 所示。在一个塑料盒体内部置入 3 个支撑体，在其中两个支撑体之间的孔隙分别放置 USB 模块和供电电池。支撑体上部放置数据采集电路板。这三个部分均用胶固定，避免震动损坏。这样支架结构就把三个部分连接为一个整体，方便组装。

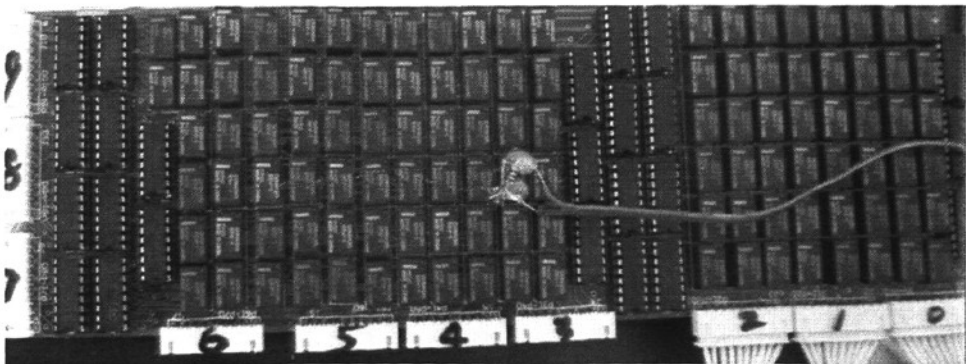


图 8-5 主控部分引线口示意图

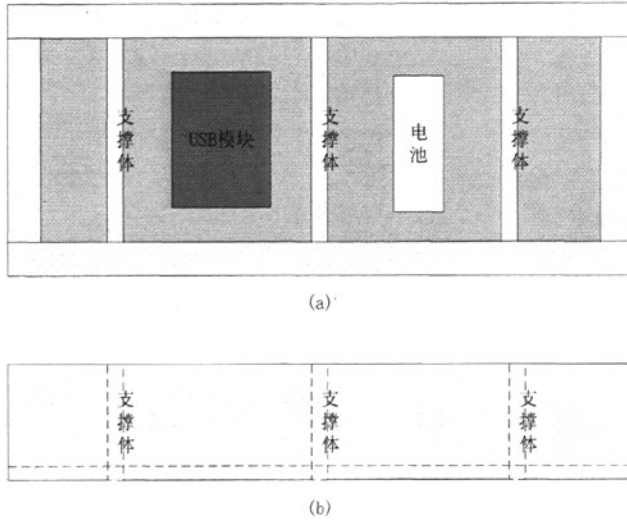


图 8-6 支架结构示意图，(a) 顶视图；(b) 侧视图

### 8.3 整机装配

经过性能测试的系统，即可进行组装，以便进行下一步调试。

系统整机装配重点需要考虑密封性，电极探杆的密封工作已在 8.1 中讨论过，这是保证系统测试数据正确性的重要工作。还有一个密封性，比这个密封性更为重要，就是对主控部分的密封，这里要把 8.2 中装配好的主控部分，放入具有密封作用的外壳中，以保证主控部分正常工作。并且此外壳要和电极探杆引线可以相连，这样两者就需要密封在一起。

这里设计了一个套筒结构，达到了密封主控部分，并和探杆连接在一起的目的。装主控部分的密封结构实物图如图 8-7 所示。

系统整体结构示意图如图 8-8 所示，装主控部分的外壳由顶盖、防水胶垫 1、放置主控部分的桶、和防水胶垫 2 构成，另外，为了和探杆连为一体，系统增加了一个带螺纹连接件。这些部分在进行装配前，先经过了防水测试，以免漏水损坏主控部分硬件设施。

系统装配过程：

- 1) 粘贴“带螺纹连接件”：把“带螺纹连接件”套到电极探杆外部，用环氧树脂粘结，注意粘结牢固并无孔隙，做好防水；

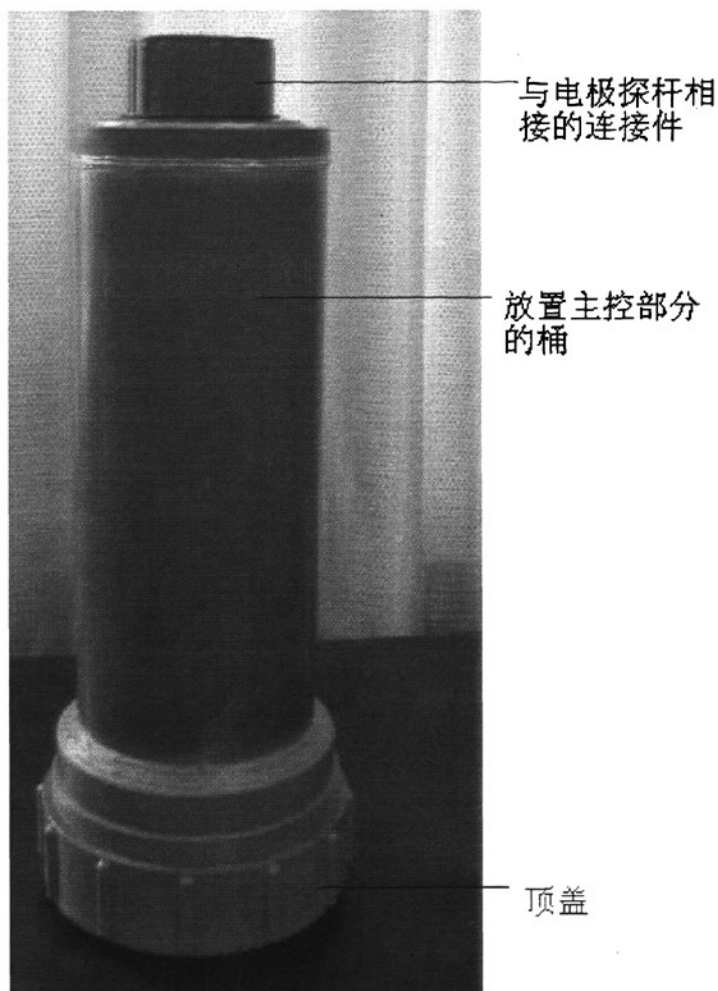


图 8-7 主控部分的密封结构实物图

- 2) 连接“放置主控部分的桶”：放置“防水胶垫 2”，而后把“放置主控部分的桶”与“带螺纹连接件”拧紧；
- 3) 连接电极与主控板：从“放置主控部分的桶”拉出电极引线接头，并按照次序接入固定在支架上的主控板接头中；
- 4) 放入主控板：电极引线先向下顺入“放置主控部分的桶”，然后慢慢将带有支架的主控板置入；
- 5) 盖上顶盖：在“放置主控部分的桶”上面放置“防水胶垫 2”，然后放上顶盖，并拧紧顶盖。至此，系统装配完毕；
- 6) 即可实施测试，测试结束后，打开顶盖，取出 U 盘，通过 PC 机，即可读取和处理测得的数据。

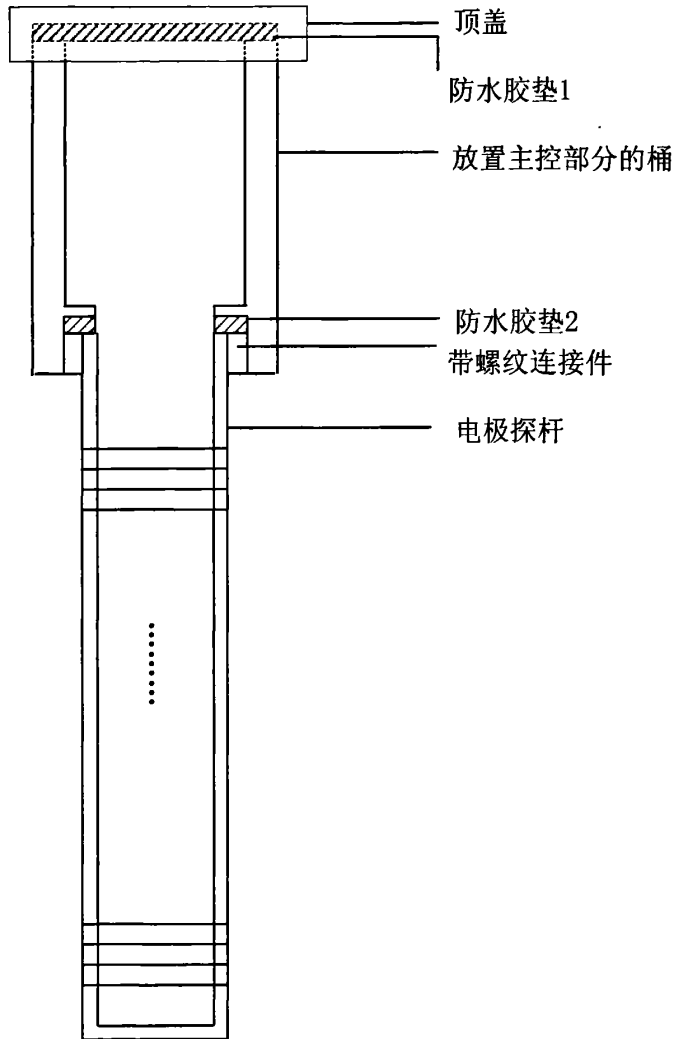


图 8-8 系统整体结构示意图

## 8.4 监测系统参数确定

系统进行最后组装成型前, 先进行实验室实验验证系统对沉积物及海水电阻率数据测试的准确性。这里通过实验选定了仪器的采样更新率指标; 通过对商业化的 E60BN 高密度电法仪采集到的数据和自行研制仪器的数据进行对比分析。并通过与商业化仪器数据的对比, 验证本系统测试数据的正确性。上面的两个测试实验是在室内的实验水槽中完成的。

## 8.4.1 实验准备工作

### 1) 实验仪器及材料

① 实验仪器：上文中所述自行研制的海床蚀积电阻率监测系统；对比数据测试仪器：商业化的高密度电法仪器——GeoPen 生产的 E60BN 高密度电阻率采集仪（E60BN Multi-Electrodes Resistivity Survey System）。

② 采用了两种水槽，厚壁塑料水槽和玻璃水槽：厚壁塑料水槽尺寸：直径约 78cm，高度约 60cm，如图 8-7 所示。体积约为 90L；玻璃水槽尺寸为 78cm × 27.5cm × 60cm，用高为 49.5cm 的玻璃板沿长度方向隔成 30cm 和 48cm 两部分；沉积侧的体积约为 40L。玻璃厚度约为 1cm。

③ 沉积物及海水：试验所选用沉积物为黄河口海港地区粉质土，海水为青岛石老人附近海水。

④ 泥浆搅拌盒：不漏水的塑料盒子，深度适度，开口要足够大，不宜采用小口的盒子，便于搅拌泥浆。本实验中采用的盒子尺寸为：500mm×380mm×300mm。

### 2) 泥浆的配制

取大约使沉积物-海水界面位于水槽一半左右深度处的适量黄河口海港的粉土，放入预先准备好的搅拌泥浆的塑料盒子中，然后向盒子中注入海水，边注入边用手搅拌，直到所有的土都搅拌均匀停止注入海水。把按照这样步骤制备好的泥浆倒入波浪水槽中，静置待其沉降稳定，出现清晰的沉积物-海水界面，且上部海水澄清。等待过程大约需要 3 天。

该测试中使用的探杆如图 8-9 所示。由于系统的最终探杆未加工完之前进行的。本测试实验中采用的探杆为第一次加工的探杆，不是最后成型的拟集成在整个系统中的探杆，该探杆直径为 5cm，电极间距 1cm。



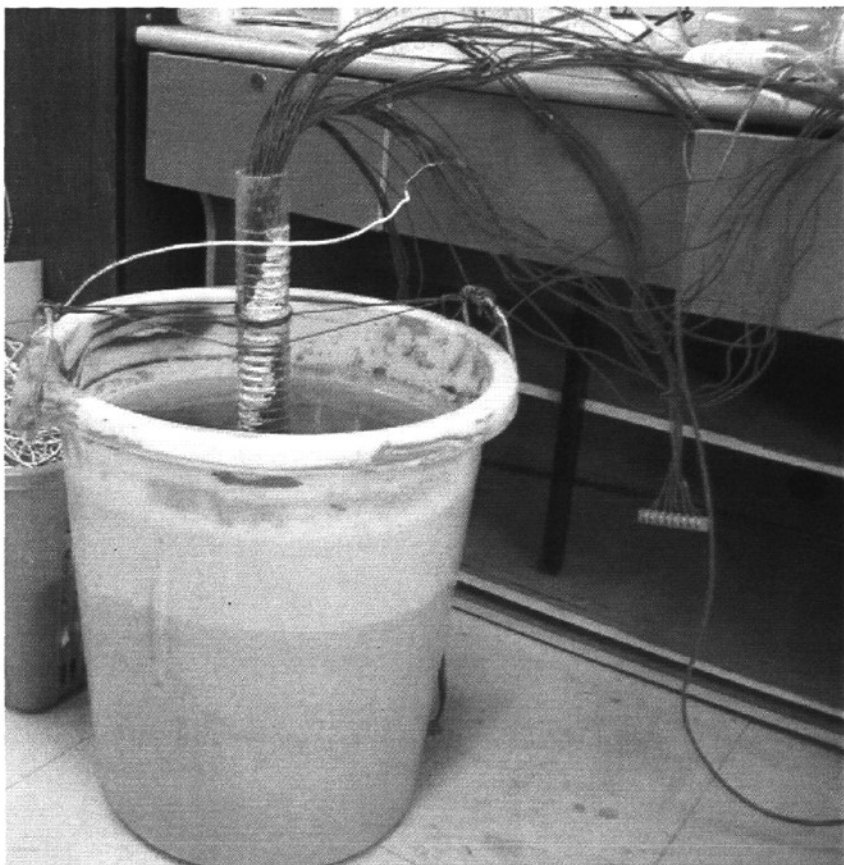


图 8-9 测试用厚壁塑料水槽及探杆

探杆主体为中空透明有机玻璃管制作，其外部每间隔 1cm 有一环形槽，共 50 个，环形槽中间有一圆孔。环形铜电极绕制在环形槽中，电极引线通过槽中圆孔接入中空 PVC 管中，统一连接至外部。该探杆有效长度 49cm。在土中 18 个，水中 9 个，水面以上 23 个。

## 8.4.2 仪器采样次数确定

### 1) 采样次数测定

上述测试系统设计完成并通过一系列的电子调试和误差分析通过后，为了达到最好的测试效果，本论文拟通过对海水沉积物的电阻率测试，选定合适的采样频率。

配好的泥浆静置 10 天后，状态如图 8-10 所示。

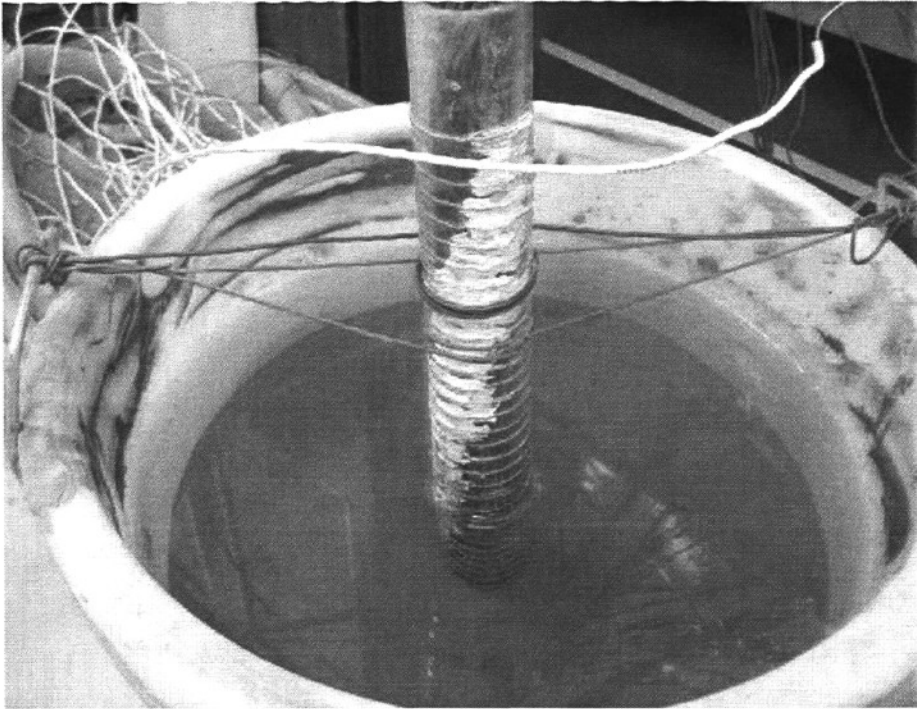


图 8-10 静置 10 天后的泥浆

实验室中用本论文中所述自行研制的电阻率监测仪器实施测试,对仪器设置不同的采样频率,进行测试。设定最底部电极为电极 1,依次向上为 2、3……直到 50,本论文中所有电极的计数方式,都按此方式。实验中,选取电极 1-4 作为实验的 AMNB 电极,分别采用采样次数 3 次,50 次,80 次,100 次,对该四个电极实施测试,并对测试电阻率  $\rho$  结果进行对比。

表 8-1 3 次/秒, 50 次/秒, 80 次/秒, 100 次/秒测试结果对比

采样频率 (次/秒)	3	50	80	100
$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	0.821211836	0.718487148	0.741186637	0.733848581
	0.716735199	0.71466844	0.758681047	0.743093949
	0.701529201	0.737727227	0.734880008	0.728666536
	0.688287073	0.734643672	0.747864077	0.756868176
	0.727301665	0.72952702	0.739544665	0.732347652
5 次测试 $\rho$ 平均值	0.73012995	0.727010701	0.744431287	0.738964979
$\rho$ 与 $\rho$ 平均值最大偏差	0.042725922	0.012342261	0.01424976	0.017903198

表 8-1 的数据对比中的最后一行,给出了每次电阻率值与 5 次测试数据结果的平均值偏差中的最大值。其中每秒测试 3 次的偏差最大,为 0.042725922,明显的大于其他几种频率测试,测试数据不稳定。其他 3 个测试频率的偏差数据相

近。说明，并不是采样频率大，就一定能够改善测试数据的准确性，当频率到 50 及以上时测试的准确性就可以得到保障。考虑以高采样频率达到去除干扰的目的，可以选择 50~80 次每秒进行采样。本系统的测试频率选定为 64 次/秒。

### 8.4.3 去极化测定

按照 4.6 中设计的自动补偿软件算法，进行连续测试，发现：极化作用并不能完全去除，经常会出现测试电阻率为负数的情况。需要调整算法进行测试

#### 1) 初步参数确定：

经过反复测试采用两种算法进行调整：① 对每个 Wenner 结构进行多次连续重复测试；② 在两个 Wenner 结构测试之间，加入等待时间。

经过多次实验验证，加入等待时间 35s，且进行 5 次连续重复测试，依经验分析，基本可以解决极化问题。

#### 2) 进一步改进后，参数确定：

进一步改进算法，在 1) 中的两种反复基础上，加了另外一种方法：使得供电时间和 0 时间相等，这样测试效果要明显好于原来的测试。为了在尽量短的时间内获得正确的测试数据，对等待时间和连续测试时间进行多种组合进行测试，并与 35s 等待，5 次测试的数据进行对比。

为了方便，等待时间记为 DT，测试次数记为 CC。几种组合的测试数据情况如下：

- ① DT = 10 s, CC = 5 次，测试数据较好，减小 DT；
- ② DT = 6s, CC = 5 次，测试数据较好，减少 CC；
- ③ DT = 6s, CC = 3 次，测试数据较好，进一步减少 CC；

这三个测试数据结果都很好，与 1) 中参数设定方式的结果吻合。但希望进一步减小参数，达到减少测试时间的目的。

- ④ DT = 6s, CC = 1 次；
- ⑤ DT = 2s, CC = 1 次；
- ⑥ DT = 2s, CC = 2 次；
- ⑦ DT = 6s, CC = 1 次；
- ⑧ DT = 4s, CC = 1 次；

经过这组测试发现，测试次数为 1 的，都不能得到完全正确的数据，进行多次重复测试后，发现数据结果经常会出现负数。测试次数为 2 的，等待时间为 2s 的测试数据结果与 1) 中测试结果偏小。这种情况下，增加等待时间可以解决问题。

⑨ DT = 4s, CC = 2 次；经过多次重复实验，发现该组参数设定测试结果均与 1) 中测试结果吻合。

测试⑨与 1) 中测试数据对比如图 8-11 所示。

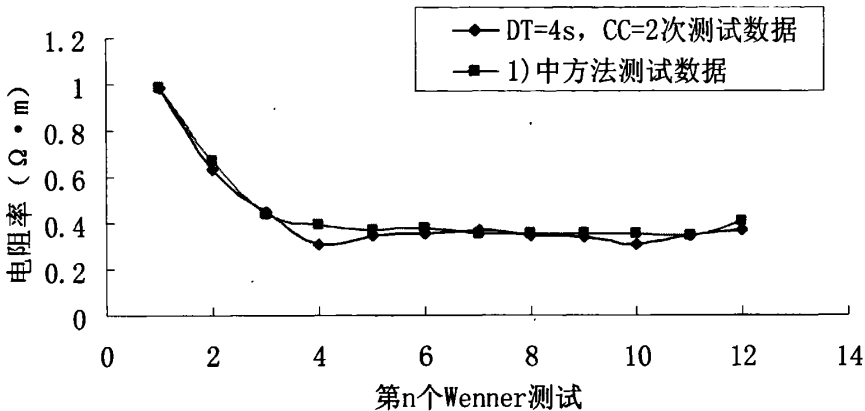


图 8-11 测试⑨数据 1) 中测试数据对比图

综合 1) 及 2) 的测试结果，采用上述的三种算法，设定等待时间为 4s，连续重复测试次数为 2，可以很好的解决极化问题，该方式进行一个 Wenner 测试需要的时间为 8s。

3) 另外极化问题，可以选择不极化材料或者低极化材料来更好的改善，不需要再进行等待和连续测试，这样能够进一步加快数据测试速度。

## 8.5 本章小结

本章工作：

1) 在设计完成整个系统各个部分后，需要把系统的各个部分组装成型。本系统中需要组装的是电极探杆和主控部分。组装过程中，需要考虑海底测试中的密封性问题，和可实施性。

2) 本章对通过实验确定了仪器测试采样次数，并通过实验调整了去极化算

法：确定采样频率为 64，每进行一个 Wenner 测试需要约 8s 的时间。下一步如果采用极化作用小的不锈钢或者紫铜材料的电极完全可以把时间间隔变小，甚至去掉，加快测试速度。

## 9 监测系统室内应用效果评价

为了验证监测系统对蚀积过程监测的有效性，本章主要进行了三种室内实验：

- 1) 为分析该测试仪器测试数据的准确性进行了室内实验，分别采用自行验证系统测试、商业化的高密度电法仪及电导率仪进行三个测试：海水、三分之一海水、三分之二海水测试，并把三个仪器数据进行了对比，验证仪器测量电阻率数据的正确性。
- 2) 界面测试实验：海滨沙-海水界面测试，并对测试数据进行分析，得出判定界面方法。
- 3) 室内沉积过程实验：用自行研制系统进行了室内海床沉积过程测试，验证系统测试海床蚀积的有效性。把配制的泥浆倒入水槽中，并置入探杆，测试不同时间探杆上电阻率数据，把根据此数据得到的海水和沉积物界面位置和实际肉眼观测的界面位置进行对比，验证电阻率方法监测蚀积的有效性。界面位置即为相对高程位置，能够测得不同时刻界面位置也就得到了高程变化情况。

### 9.1 室内比较实验

在水槽中放入单一介质，用三种仪器测试电阻率数据，并进行对比分析。

#### 9.1.1 实验准备工作

实验材料准备：

- 1) 制作水槽：测试需要对探杆上的更多电极进行，因而需要加工一个能容纳允许多达 100 个电极测试的、高度合适的水槽，实施测试，本测试中采用的水槽为一圆形水槽，水槽净高 81cm，直径 40cm；
- 2) 取海水：用大桶两个，取青岛石老人海域海水供测试需要；
- 3) 实验仪器：高精度电导率仪器，E60BN 高密度电法仪，及自制监测系统；
- 4) 泥浆搅拌盒：同 8.4.1；

准备好实验材料，水槽和探杆放置在中间位置，自行研制仪器及高密度电法仪分别放在两侧，方便探杆电极和两个仪器的接线，室内实验现场如图 9-1 所示。



图 9-1 测试实验现场设备布设图

由于设计了插槽式接口，因而仪器的换接十分方便。预先在高密度的连接线上连接有接口的导线，这里的接口称为接口系列 1；在需要和高密度测试仪器相接时，只需要把和探杆电极相接的接口，这里称为接口系列 2 和接口系列 1 相接即可。自行研制的仪器上面已经带有接口设计，其上连出的接口系列，这里称为接口系列 3，在需要使用该仪器进行测试时，只需把接口系列 2 和接口系列 3 相连即可。这样的设计使得整个测试过程进行的十分方便和顺利。高密度电法仪与探杆电极连接示意图如图 9-2 所示，自行研制仪器与探杆电极连接示意图如图 9-3 所示。

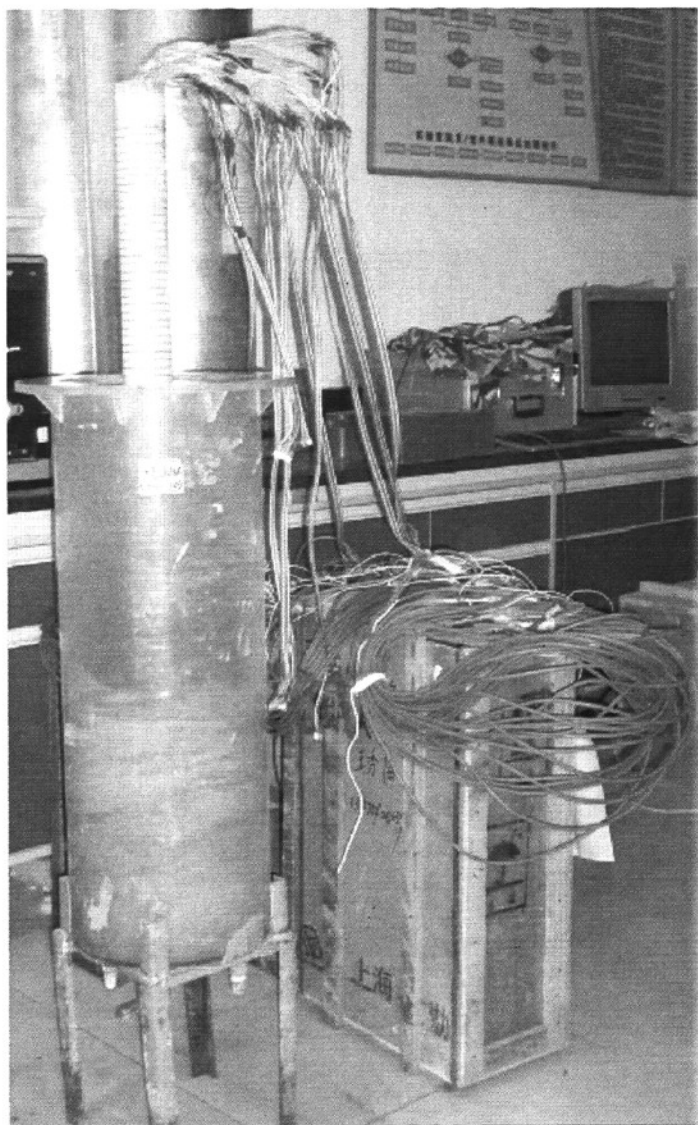


图 9-2 高密度电法仪测试连接方法



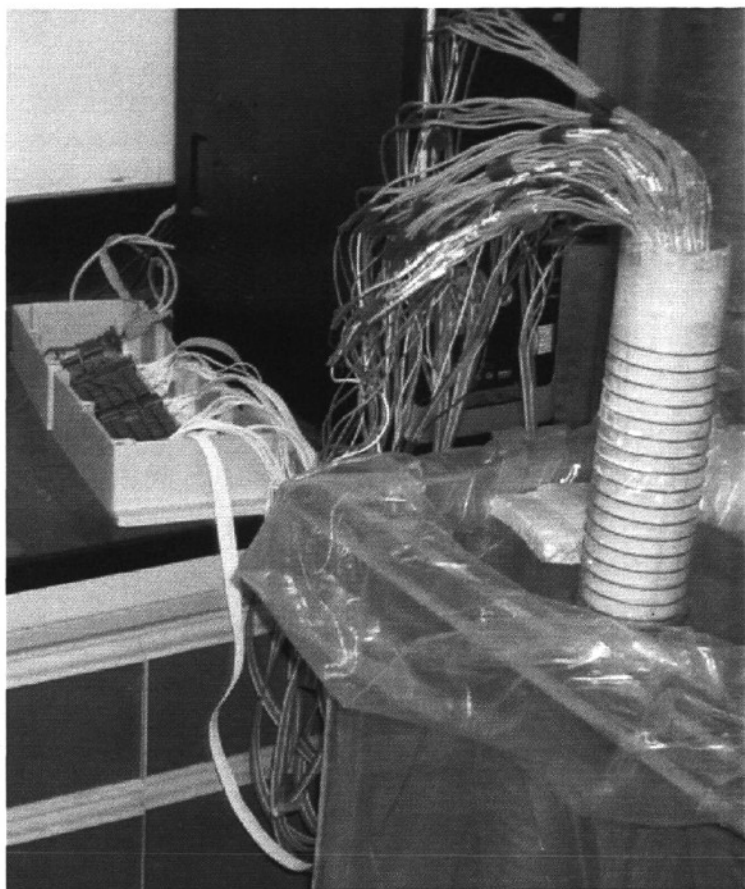


图 9-3 自行研制仪器和探杆电极的连接图

## 9.1.2 仪器说明

E60BN 高密度电法仪为本次进行比对的主要仪器，该仪器和本测试有关的主要参数如下：

- 通道数：最大可接 65535 个电极开关
- 采样精度： $1\mu\text{V}$
- 最大输入信号：10V（峰-峰值）
- 输入阻抗： $20\text{M}\Omega$
- A/D 转换位数：22 位（含 6 位浮点）
- 自电补偿： $\pm 3\text{V}$

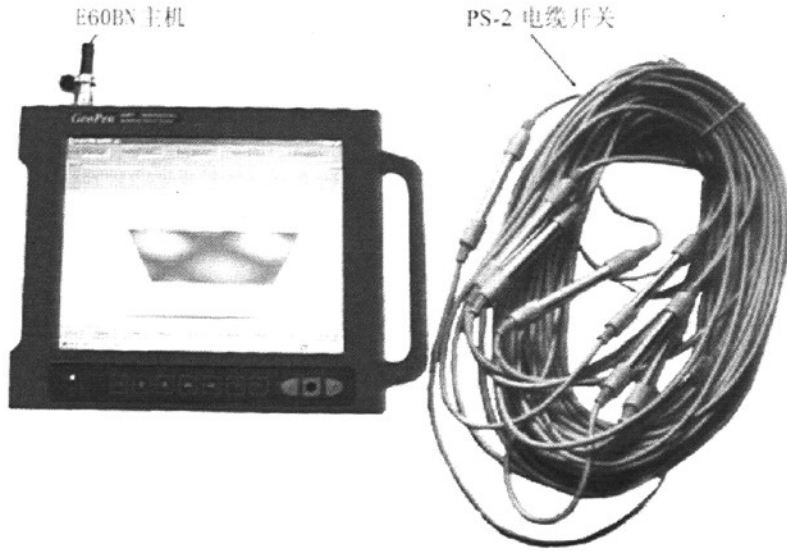


图 9-4 高密度电法仪

电导率仪器:

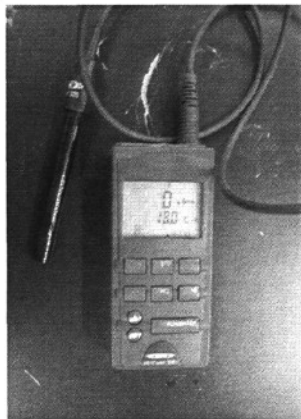


图 9-5 电导率仪

### 9.1.3 测试实验及数据分析

说明：高密度电法仪器测试过程中有坏点，所绘制的高密度仪器的数据图，皆为去掉坏点后的，因而，高密度仪器和自行研制仪器的测试数据的每个 Wenner 测试并非严格的一一对应的。首先对均质介质：海水、三分之二海水及三分之一海水的电阻率进行测试，并对数据进行分析；然后对两种海水和海滨沙存在界面的两种不同介质进行电阻率测试，验证系统对界面测试的正确性。

### 1) 海水测试

在圆柱形水槽中注入海水，置入探杆并固定。

连接 E60BN 高密度电法仪，测试数据如图 9-6 所示。如果用多次测量的平均值作为该仪器测得的海水电阻率，则该仪器测得的电阻率值为： $0.2858 \Omega \cdot m$ 。其单次测量电阻率和平均值最大差值为： $0.1332 \Omega \cdot m$ 。

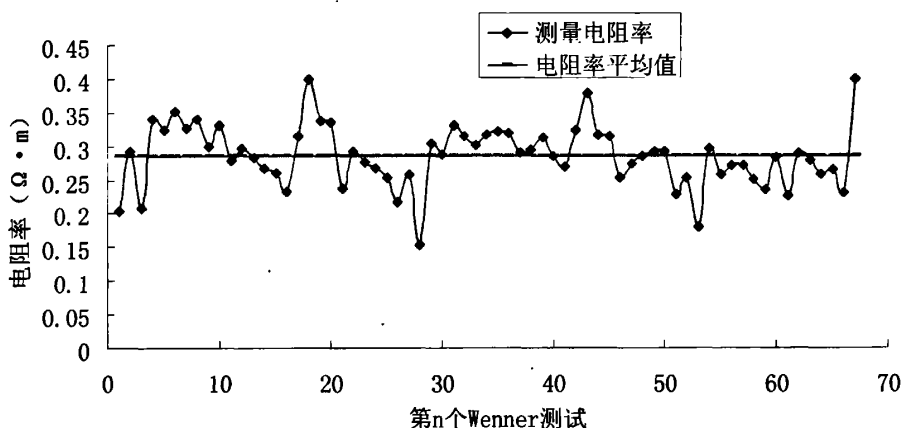


图 9-6 E60BN 高密度电法仪测得的海水电阻率值

断开探杆电极和高密度电法仪器的连接，接入自行研制仪器测试海水电阻率。测得数据如图 9-7 所示。同样，用多次测量的平均值作为该仪器测得的海水电阻率，则该仪器测得的电阻率值为： $0.2672 \Omega \cdot m$ 。其单次测量电阻率和平均值最大误差为： $0.0894 \Omega \cdot m$ 。

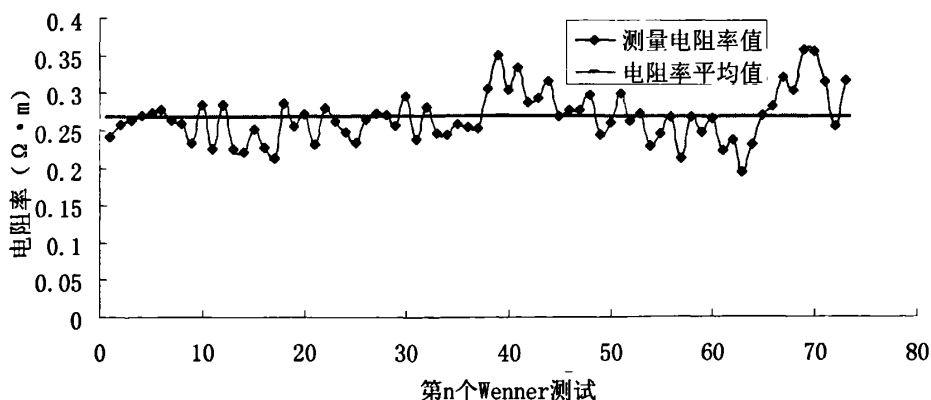


图 9-7 自行设计系统测得的海水电阻率值

测试完成后，再用电导率仪器测试真实电阻率为  $0.2053 \Omega \cdot m$ 。

### 2) 三分之二海水测试

取海水三分之二和自来水三分之一，配置好后放入水槽中，并置入探杆。用与 1) 类似的方法实施测试。

高密度电法仪测得的电阻率数据如图 9-8 所示，电阻率值以平均值计，为： $0.4214 \Omega \cdot m$ 。其单次测量电阻率和平均值最大误差为： $0.1845 \Omega \cdot m$ 。

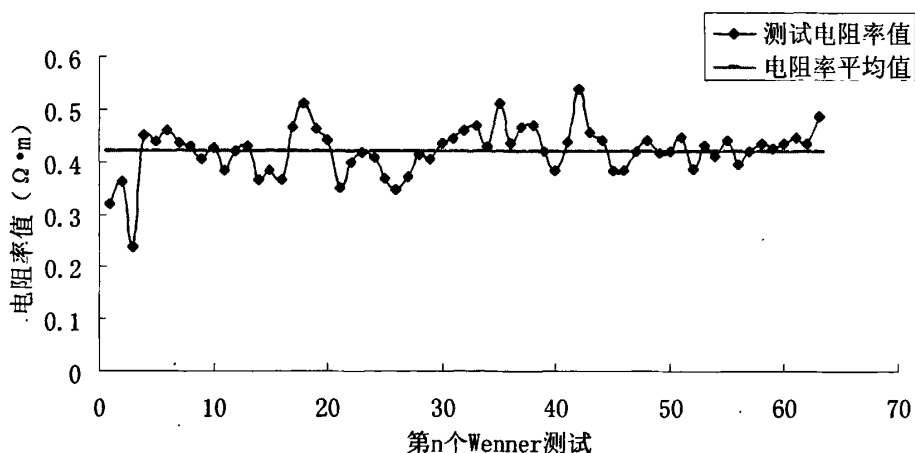


图 9-8 E60BN 高密度电法仪测得的三分之二海水电阻率值

自行研制仪器测得的电阻率数据如图 9-9 所示，电阻率值以平均值计，为： $0.3916 \Omega \cdot m$ 。其单次测量电阻率和平均值最大误差为： $0.0934 \Omega \cdot m$ 。

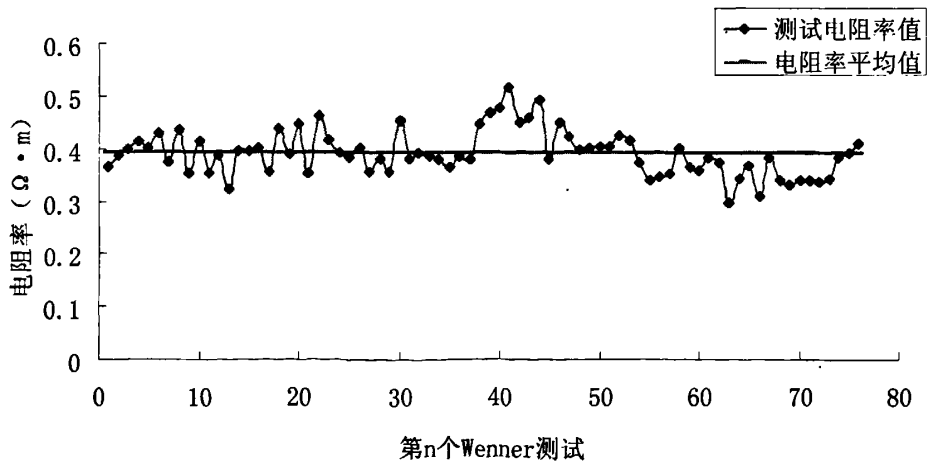


图 9-9 自行研制仪器测得的三分之二海水电阻率值

测试完成后，再用电导率仪器测试真实电阻率为  $0.3145 \Omega \cdot m$ 。

### 3) 三分之一海水测试

取海水三分之一和自来水三分之二，配置好后放入水槽中，并置入探杆。用

与 1) 类似的方法实施测试。

高密度电法仪测得的电阻率数据如图 9-10 所示，高密度仪器和自行研制仪器测得的数据在后半部分都是明显电阻率值偏大，考虑可能是由于海水和自来水搅拌不均匀引起的数据差异性。因而取前 37 个 Wenner 测试的平均值，对于高密度仪器考虑去除坏点变为前 35 个，作为仪器测得的电阻率值为： $0.6022 \Omega \cdot m$ 。其单次测量电阻率和平均值最大误差为： $0.3367 \Omega \cdot m$ 。

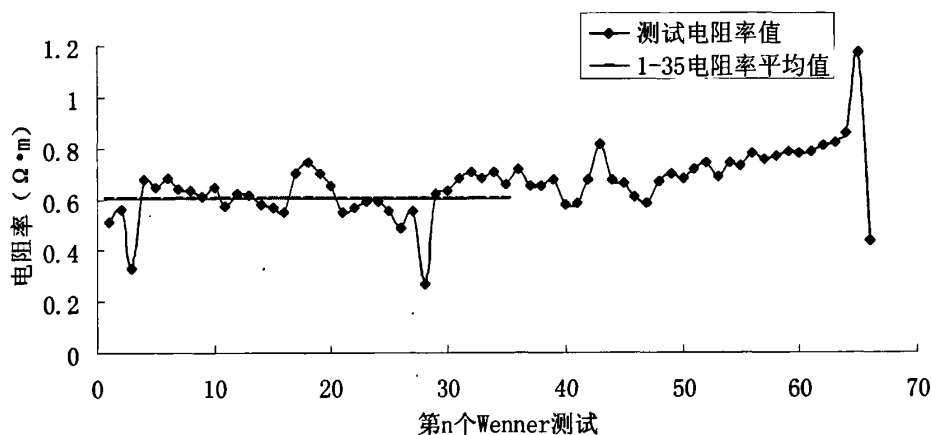


图 9-10 E60BN 高密度电法仪测得的三分之一海水电阻率值

自行研制仪器测得的电阻率数据如图 9-11 所示，电阻率值以平均值计，为： $0.5850 \Omega \cdot m$ 。其单次测量电阻率和平均值最大误差为： $0.0880 \Omega \cdot m$ 。

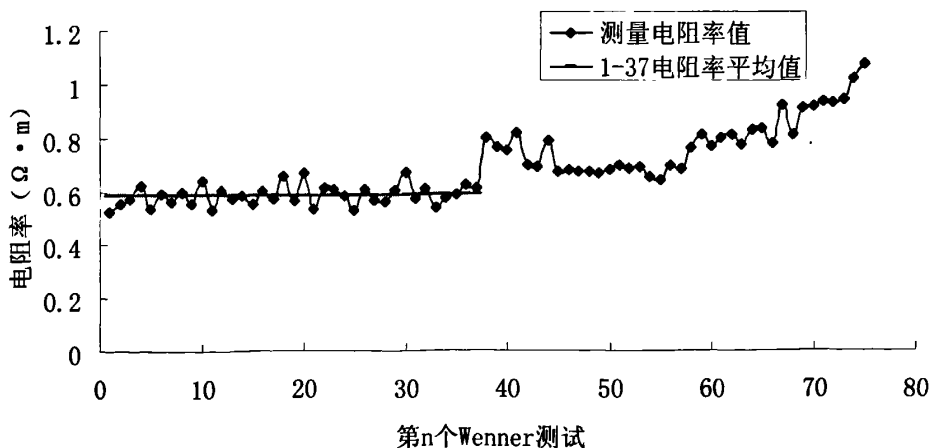


图 9-11 自行研制仪器测得的三分之二海水电阻率值

测试完成后，再用电导率仪器测试电阻率为  $0.4831 \Omega \cdot m$ 。

### 9.1.4 测试数据对比及分析

上面三组数据总结如表 9-1 所示，表中数据单位均为  $\Omega \cdot m$ 。

表 9-1 三个仪器测试的海水、三分之二海水及三分之一海水电阻率数据汇总表

	海水		三分之二海水		三分之一海水	
	电阻率值	最大差值	电阻率值	最大差值	电阻率值	最大差值
高密度仪器测试 $\rho_1$	0.2858	0.1332	0.4214	0.1845	0.6022	0.3367
自研仪器测试 $\rho_2$	0.2672	0.0894	0.3916	0.0934	0.5850	0.0880
电导率仪测试 $\rho$	0.2053		0.3145		0.4831	
$\rho / \rho_2$	0.7683		0.8031		0.8258	

分析：① 高密度数据和自行研制系统测试得到的电阻率值较为接近，高密度数据偏大，但两者的测试电阻率值和真实电阻率值不十分一致，有差异，比真实电阻率值大。分析：仪器的电阻率计算是根据电极布设，按照 WON 公式计算得到的，Ridd 曾经指出这一公式存在至少 5% 的误差，由于公式中系数不十分符合实际情况，造成电阻率和真实电阻率不十分一致。但从表 9-1 可以看出，两者大约存在一个 0.8 倍的关系，即：自行设计的仪器得到的电阻率数据\*0.8，即为真实电阻率。② 两者测试数据波动都较大，明显大于给定的误差性能指标，分析原因：以自行设计的测试系统为例，系统误差已经通过对于标准电阻的测试实验验证，按照本系统中的电极探杆参数，应为  $0.012 \Omega \cdot m$ ；而对于水体电阻率的测试产生了明显高于给定的误差约为 0.09 左右；两者的最大不同就是对水体（及土体）的测试，存在极化作用影响，这一高于给定误差的差值只能是由此而产生的。③ 高密度仪器数据波动更是明显偏大，分析原因：高密度测试仪器非专门为近距离测试设计，这应该是主要原因。另一方面，也验证了自行设计的测试系统，对于近距离电极的电阻率测试具有效果较好。

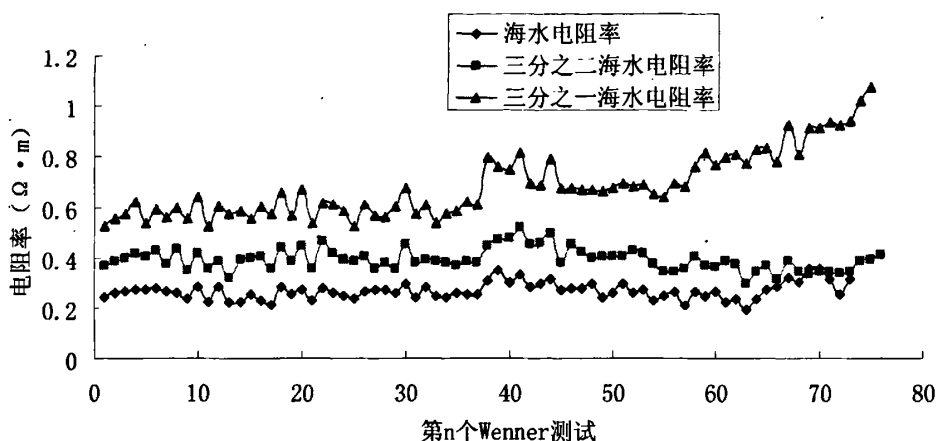


图 9-12 自行研制仪器测试的海水、三分之二海水及三分之一海水电阻率值

分析：三个测试电阻率值变化有一致趋势，说明电阻率测试的误差比较大的原因之一是：手工制作电极具有非均匀性，导致测试电阻率的结果误差较大。

9-13、17-26, 28-33, 39-45 这几个区域数据变化比较明显，仔细观察，不难看出，三个曲线具有十分一致的电阻率值高低变化规律。

## 9.2 室内沙土-海水界面位置测试实验

蚀积过程的监测，就是对界面位置变化的监测。欲监测蚀积状况，就必须监测到界面位置。下面主要是对蚀积监测系统界面测试实验，即对实验数据的分析，从而根据实验数据分析得出界面位置。

### 9.2.1 实验准备工作

实验材料准备：

- 1) 水槽：同 9.1.1；
- 2) 取海水：同 9.1.1；
- 3) 海滨沙：取青岛石老人海域的海滨沙；
- 4) 实验仪器：自制监测系统；

## 9.2.2 测试实验

实验步骤:

- 1) 电极探杆放入水槽中, 并用手扶住使之保持垂直站立状态;
- 2) 圆柱水槽中先放入石老人海域的海滨沙, 约为水槽总容量的 2/5;
- 3) 注入石老人海域的海水至水槽约二分之一高度处;
- 4) 将电极探杆与自行研制的测试仪器相接, 检查线路无误后, 进行测试。
- 5) 测试共进行三次, 实验沙土状态分别为: 未压实沙土, 对沙土进行一次压实, 对沙土进行二次压实。

为压实沙土-海水界面位置为第 26 个电极下面 2cm 处; 第一次压实后界面位置为第 24 个电极上面 1cm 处; 第二次压实后界面位置为第 23 个电极上面 0.5cm 处。

## 9.2.3 分析方法设计

根据 Wheatcroft 的测试实验结果, 如图 1-15 所示, 及我们进行的室内试验, 都可以得到同样的结论: 在两种不同介质中测量的电阻率数据, 会在两者的界面两侧出现一个界面区域。而真正的界面位置, 目前还未见有学者对此进行分析确定。

分析 Wenner 方法进行电阻率测试, 在两种介质的界面附近, 会发生电阻率的渐变过程, 该过程为一种介质到另外一种介质的电阻率的转换, 是反应在电阻率测试曲线上为单调变化的曲线图。该区域被 Wheatcroft 定义为界面区, 曲线上部为一种介质的电阻率, 而下部为另外一种介质的电阻率。分析: 界面位置应该位于界面区的中间位置。那么到底哪里是这个中间位置?

本论文设计了两种找到这个界面位置的方法。

方法 1: 简单的取该段曲线的中间点为界面位置, 在极距为 1cm 情况下, 测试精度最多可以达到 0.5cm;

方法 2: 该测试是对电阻率的测试, 界面位置应该位于电阻率值为界面区两端点电阻率的平均值所在位置, 如果依该思路寻找界面点位置, 找到该平均值对应的位置即可。据此设计方法 2, 找到界面区的中间值, 在界面区测试曲线上找



到该中间值是哪两个测试之间的值，然后，在两者之间画一直线，找到该电阻率值在直线上的位置，即为界面位置。

## 9.2.4 实验数据及分析

1) 未压实：沙土未压实的测试数据如图 9-13 所示。

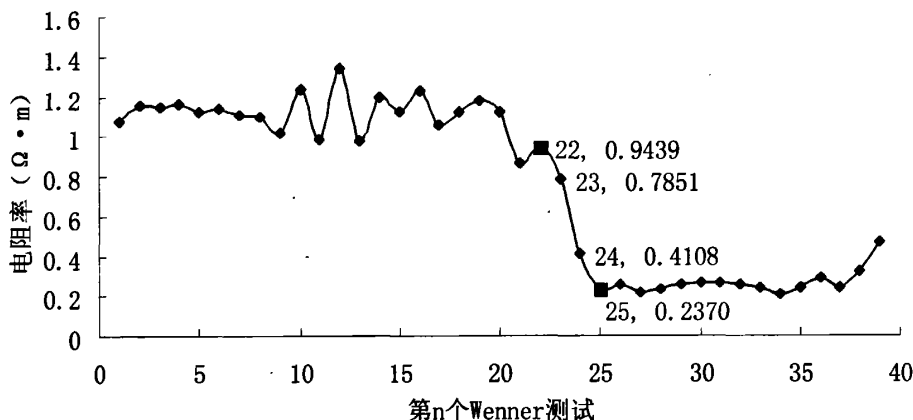


图 9-13 沙土未压实的电阻率测试数据

测试数据如图 9-13 所示。此时实测界面位置位于分析数据图，在第 22~25 个 Wenner 测试之间，图中用红色方块标注的数据点。

界面位置分析，方法 1：在该测试中界面位置位于第 25 个电极处，这与实际界面位置的误差达 0.8cm，误差较大。方法 2：第一步就先计算出电阻率的平均值为  $0.5860 \Omega \cdot m$ ，第二步就是找到该电阻率值对应的点的位置，在曲线数据中发现测得的第 23 个测试处电阻率为  $0.7851 \Omega \cdot m$ ，而第 24 个为  $0.4108 \Omega \cdot m$ ，要找的点位于两者之间，位于 24.5~25.5 电极之间，两者之间做曲线最简单的方法是画直线，而且从图中可以看出两者之间的曲线也近似为直线，这样就可以找到直线上电阻率为  $0.5860 \Omega \cdot m$  点，为 25.03 电极处。

2) 第一次压实：沙土第一次压实的测试数据如图 9-14 所示。

图中用红色方块标示出了界面区的两个端点位置。按照 1) 中的数据分析方法，按照方法 1 得到的界面位置为电极 23 处，与实测界面位置 24 电极上面 1cm 处相差 1.1cm；按照方法 2 得到的界面位置为 23 电极上面 0.48cm 处，与实测位置相差 0.52cm。

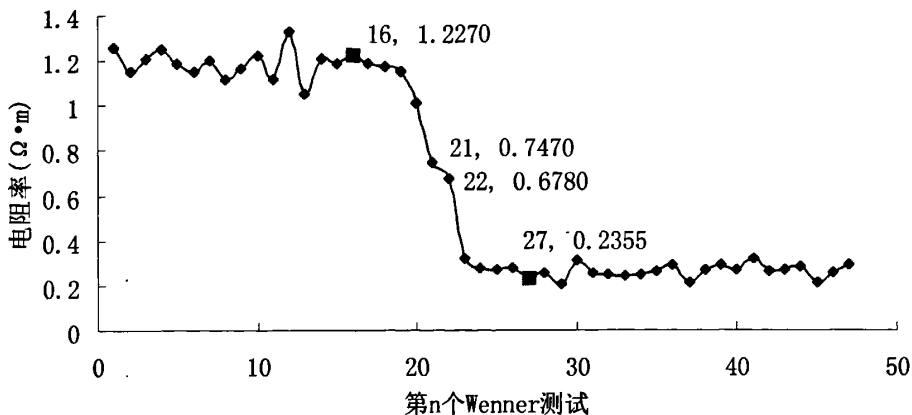


图 9-14 第一次压实的电阻率测试数据

3) 第二次压实：沙土第二次压实的测试数据如图 9-15 所示。

图中用红色方块标示出了界面区的两个端点位置。按照按照 1) 中的数据分析方法，按照方法 1 得到的界面位置为电极 21 处，与实测界面位置第 23 个电极上面 0.5cm 处相差 2.5cm；按照方法 2 得到的界面位置为电极 22 上面 0.77cm 处，与实测位置相差 0.73cm。

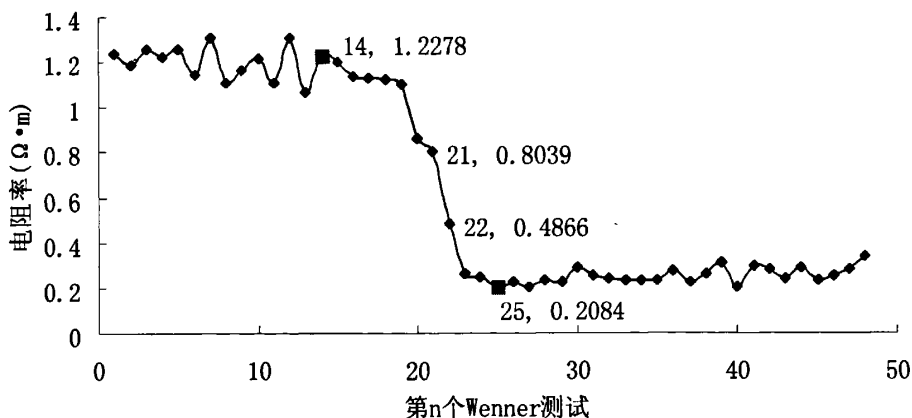


图 9-15 第二次压实的电阻率测试数据

以上三次测试两种分析方法得到的界面位置，及其与实测界面位置总结如表 9-2 所示。

表 9-2 分析界面位置与实测界面位置对比表

沙土状态	未压实	第一次压实	第二次压实
实测界面位置 a0	25.8cm	24.1cm	23.5cm
方法 1 分析得到的界面位置 a1	25cm	23cm	21cm

方法 2 分析得到的界面位置 a2	25.03cm	23.48cm	22.77cm
a0-a1	0.8cm	1.1cm	2.5cm
a0-a2	0.77cm	0.62cm	0.73cm

从表 9-2 中的数据分析界面位置和实测界面位置的差值，可以看出，1) 分析界面位置要比实测界面位置偏低，2) 方法 2 的误差明显小于方法 1，而且误差数据的大小比较稳定，在 0.6 及 0.7 左右。因而，界面分析方法可以采用方法 2。可见，虽然存在电极制作的非均匀性，但完全可以用该系统测试界面位置，提高电极的制作均匀度，应该可以提高界面位置判定的精度。

### 9.2.5 界面位置分析方法总结

9.2.4 中的方法 2，是取界面区间的中间值然后用直线方法得到界面位置，这里把该方法命名为：中间值-直线法界面位置分析方法，总结该方法的分析步骤如下：

- 1) 找到单调且变化显著的区段，并计算处区段两端电阻率值的中间值；
- 2) 在测试曲线上找到该中间值是哪两个测试之间的值；
- 3) 直线法，确定界面位置。

## 9.3 室内沉积过程监测实验

上面对于界面位置的实验及相应的数据分析结果表明，自行研制系统可以通过对电阻率的测试，经数据分析，得到水-海滨沙界面位置。这里对黄河口粉土的沉积过程进行测试，进一步验证该系统对蚀积过程的监测效果。

### 9.3.1 实验准备工作

实验材料：

- 1) 水槽：同 9.1.1；
- 2) 海水：同 9.1.1；
- 3) 土：黄河口新滩地区粉土；
- 4) 泥浆搅拌盒：同 8.4.1；

### 9.3.2 测试实验

实验步骤:

- 1) 第一日晚上, 制备泥浆: 按照 8.4.1 中所述方法进行泥浆配制;
- 2) 注入泥浆, 并置入电极探杆到泥浆中, 实验室固结 12 小时;
- 3) 倒入泥浆, 沉积 2.5 小时后, 待出现肉眼可观测到的界面后, 开始第一次测试;
- 4) 等待一段时间后, 界面发生一定程度的改变后, 实施第二次测试;
- 5) 再等待约 2 小时, 界面发生小量变化, 实施第三次测试;

按照上述方法实施三次测试的测试结果如图 9-16 所示。

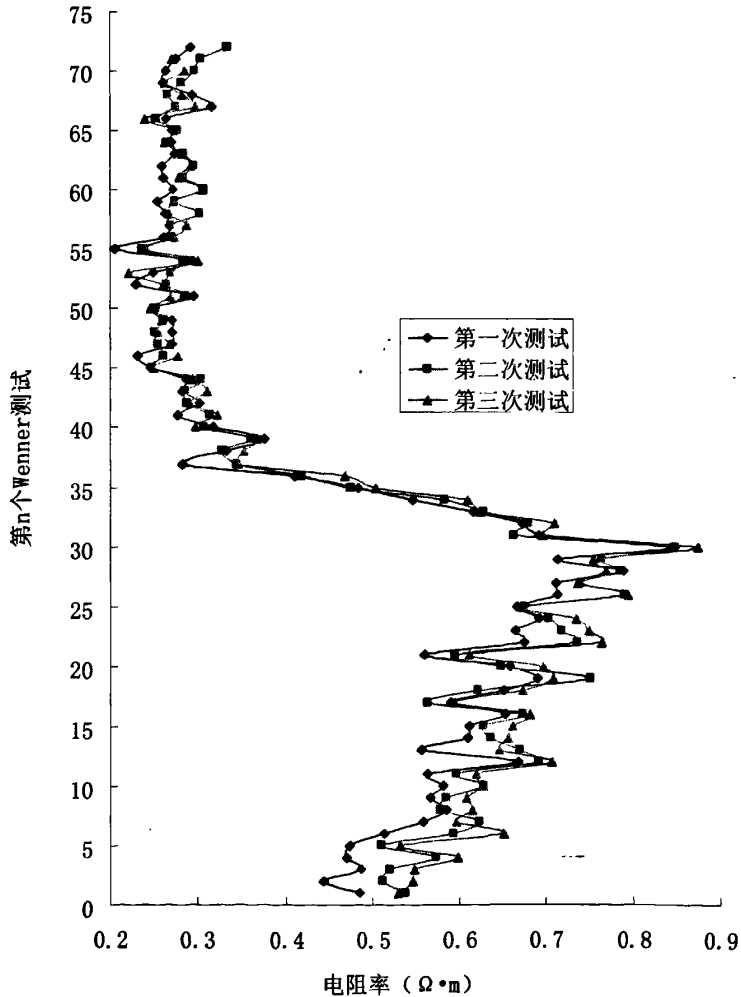


图 9-16 室内沉积过程电阻率测试

三次测试中用直尺测试了肉眼观测的界面位置，第一次测试水-沉积物界面位置位于 35 电极之上 0.5cm 处，第二次位于 35 电极之上 0.68cm 处，第三次测试位于第 35 个电极上面 0.60cm 处。

### 9.3.3 实验数据、分析及对比

对测得的数据进行分析，得出界面位置。

取第一次测试数据中间变化比较显著的部分数据，绘制曲线如图 9-17 所示。

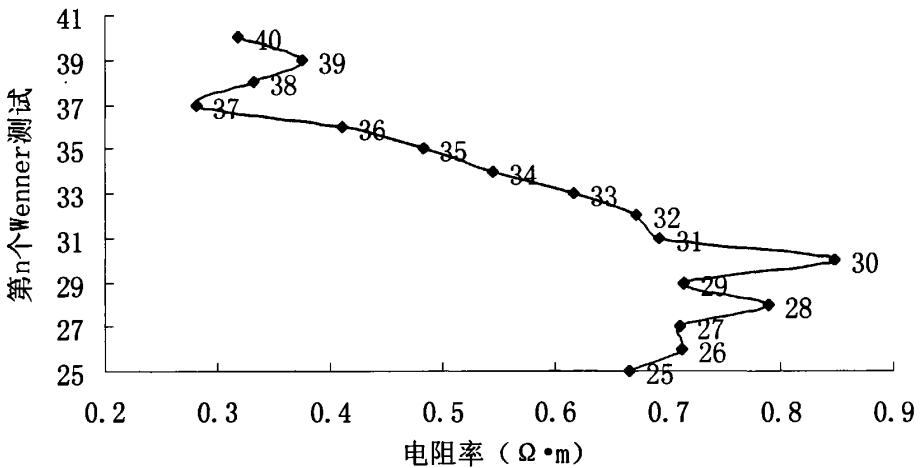


图 9-17 第一次测试的第 25-40 个 Wenner 测试数据

本段中测试数据的单位均为  $\Omega \cdot m$ 。可以看出单调下降的数据位于第 30-37 个 Wenner 测试之间，取 30 的测试数据 0.8477 和 37 测试数据 0.2823 的中间值 0.5650，找到和这一数值所处的位置，在 33(电阻率 0.6167)和 34(电阻率 0.5459) 测试之间，界面位置位于 34.5-35.5 之间的某处，按照直线取值，0.5650 值的位置为 35.23，即 35 电极之上 0.23cm。用同样的方法分析第二及第三次测试，得两次测试的界面位置分别位于 36.03 及 35.50 处。对比实测界面位置和分析系统测试界面位置，如表 9-3 所示。

表 9-3 实测界面位置和分析界面位置对比 (表格中数据单位为 cm)

第n次测试	第一次测试	第二次测试	第三次测试
实测界面位置	35.50	35.68	35.60
分析界面位置	35.23	36.03	35.50
上述两者的绝对差值	0.27	0.35	0.10

从上面 9-3 对比表中,可以看出,在三次测试过程中,界面位置出现了一个先上升,后下降的过程。这一现象反应在土体中的变化是:随着上部泥沙沉积到底部,界面位置升高,而随后,沉积物产生固结作用,界面下降。

实测界面位置误差最大为 0.35cm,即测试分析精度为 0.35cm。而且,尽管三次测试的界面位置变化不大,仅为 0.40cm,但从实验数据上仍然能够反映出来。上面的数据也反应了对于粉土数据分析得到的界面位置误差要比沙土的误差小。本测试也进一步验证了 9.2 中所述的中间值-直线方法数据分析的有效性。

## 9.4 本章小结

本章工作主要有三个方面:

1) 对比分析结果:在均一介质中,把自制系统测试数据与商业化的高密度电法仪及高精度电导率仪器数据进行对比分析。发现自制系统测试数据与高密度仪器测试数据基本吻合;与电导率仪器数据存在一个准倍数关系,即电导率仪器测试电阻率值 $\times 1.2 =$ 自制仪器电阻率值;在该探杆电极布设方式应用中,自制仪器与高密度仪器相比,具有更好的测试稳定性和准确性。

2) 界面分析方法得出:通过室内对沙土-海水测试三组数据的分析,提出了中间值-直线界面分析方法,并发现该方法得到的界面位置与肉眼观察界面位置具有最大 0.77cm 的误差;

3) 界面分析方法进一步验证:通过室内对粉土-海水沉积过程中的三组数据分析,进一步验证了中间值-直线分析方法的正确性,并发现该方法得到的界面位置与肉眼观测的界面位置具有最大 0.35cm 的误差。对比 2) 中的误差,该方法对于粉土-海水界面位置的判定误差更小。

通过上述实验过程,及对数据的分析,可知,虽然电极探杆为手工制作存在不均匀性,但应用该探杆进行测试,仍然可以较好的分析出界面位置,更精密的探杆制作会使界面位置的判定误差更小,和实际情况更为接近。

值得一提的方便的小设计:多次实验及在进行与商业化仪器对比实验中,发现本系统中设计的对接口方式,使用起来十分的方便快捷,接线方便不易出错,且从未发现接触不好的现象。虽前期对接口的接线工作烦琐,但这使得后期的测试工作进行的十分顺利,加快了实验进程!小设计也能产生大影响!

## 10 监测系统现场应用效果评价

第9章已经通过室内实验，验证了系统对蚀积过程监测的有效性。本章拟对系统在现场进行蚀积过程监测。

### 10.1 第一次现场观测实验

顶部密封套筒未完成时，为验证系统原位测试的有效性，进行了第一次现场原位实验。

#### 10.1.1 实验准备工作

实验器材准备：

- 1) 实验仪器：自行研制监测系统；
- 2) 带串口笔记本电脑：以便及时读取数据，本次实验进行前，海量存储模块出现问题，因而采用电脑串口接收测试数据，对测试数据结果没有任何影响；
- 3) 铁锹：两把；
- 4) 放置仪器及电脑的凳子等物品；

实验位置：青岛石老人海域。实验当天波潮情况：低潮时间为 9: 57；高潮时间为 15: 20。

#### 10.1.2 实验过程

在中午 12: 00 左右到达实验的石老人海域：

- 1) 选取位置距离潮水位置较远，挖制沙坑；
- 2) 把电脑和硬件系统都架到较高位置，避免潮水到来即影响测试；
- 3) 连接

实验过程：测试的现场位置——青岛石老人，此地区皆为沙质土，考虑到海水底部的沙质土电阻率和海水电阻率相差很小。为了测试结果粘性土的原位状

况，从外面运来稍有潮湿的粘性土，挖好试坑，放置探杆，填粘性土，上部再填上沙土，接好测试系统，然后等待潮水到达试坑位置。测试前，记录粘土高度，位于第 10 个电极上面 0.1cm 处，沙土高度位于第 27 个电极下面 1mm 的位置。约 5 分钟后，潮水到达开始实施测试，图 10-2 为潮水到来时实施测试中。当时，实验地区的浪很小。

### 10.1.3 实验数据及分析

图 10-3 为实验测试的第一组数据，此时，海水水位较低，由于潮水的水位不确定，目测约在 4~7 厘米范围内波动。



图 10-2 潮水到来，正在测试中



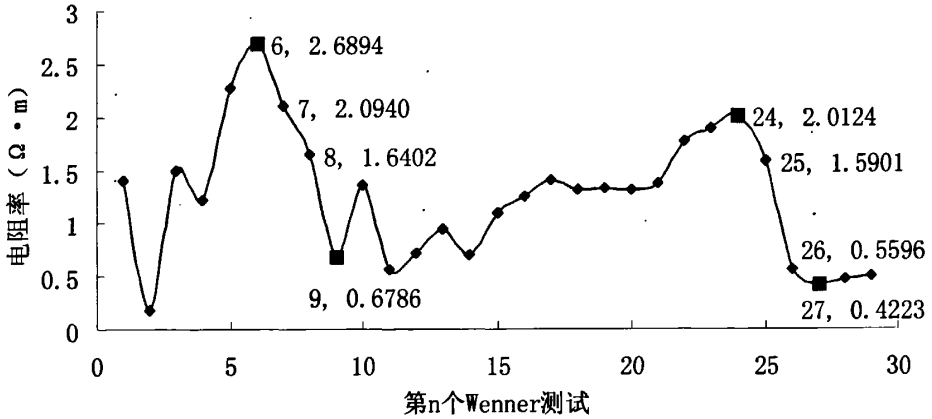


图 10-3 实验测得的第一组数据

按照 9.2 中的分析方法，可以看出数据具有两个界面区，第一个界面区的端点为第 6 及 9 个测试，图中用红色方块标示，该区域对于的界面应该为粘土-沙土的界面，由于海水刚刚到来，渗入不均匀，使得测试数据底部粘土的数据极不稳定；第二个界面区端点为第 24 及 26 个测试，图中用红色方块标示，该区域对应的界面应该为沙土-海水界面。

首先，分析第一个界面位置：按照 9.2 中分析方法，可得中间值为：1.6838，界面位置为：第 9 个电极上面 0.45cm 处，与实测界面位置相差 0.65cm。用同样方法，分析第二个界面位置，可得中间值为 1.2174，界面位置为第 26 个电极上面 0.14cm 处，误差为 0.86cm。

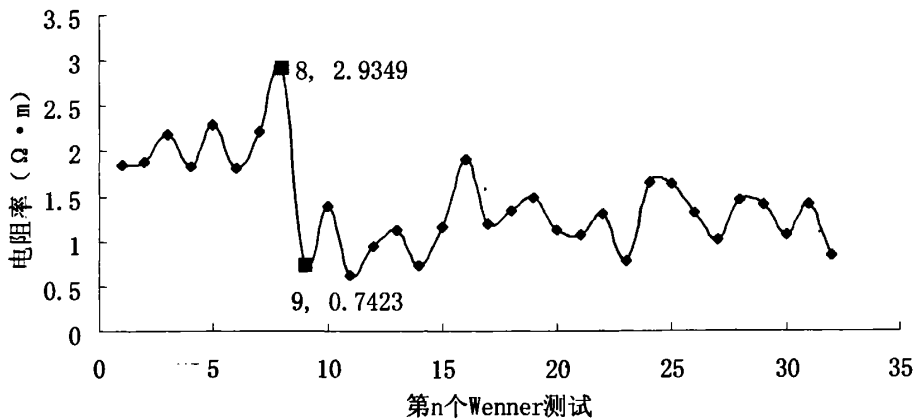


图 10-4 实验测得的第二组数据

待海水进一步上涨后，进行第二次测试，测试数据如图 10-4 所示。分析：

相比第一组测试,该测试进行的时候,粘性土中已经进入大量海水,其电阻率已经处于一个较为稳定的阶段,因而前面测得的1~8测试的数据波动较小,界面位置位于第10个电极处,这与实测结果的误差只有0.1cm。后面的部分,沙土中的水已经不再向粘土中渗透,沙土电阻率也处于基本稳定状态,但未见有沙土-海水界面区存在,分析大概是因为波浪使得沙土在电极探杆附近堆积,导致沙土高度上涨,已有的测试数据未能测到界面位置。

## 10.2 第二次现场观测实验

### 10.2.1 实验准备工作

实验器材:

- 1) 自行研制监测系统。
- 2) 仪器支架及固定杆: 由于时间关系,仪器探杆加工工艺等方面还没有完全满足现场测试需求,主要表现在:电极探杆承压力不够,及探杆底部的置入部分不够长。因而现场实验中拟采用支架及固定杆固定仪器。
- 3) 铁锹两把: 用于挖制沙坑埋置仪器。
- 4) 重锤一把: 用于置入固定杆。

实验区域: 青岛石老人海域。

实验当天青岛海域的波潮情况: 最高潮时间为 13: 07; 最低潮为 19: 48; 波高 3m。

### 10.2.2 实验过程

- 1) 准备好实验器材及调整好仪器;
- 2) 早 9: 30 左右到达石老人海域,选择距离潮位 1m 左右距离处,挖制沙坑,约 0.8m 深;
- 3) 放置支架,并在四角支架的四个底脚边上,用重锤置入四个固定杆,然后用铁丝固定支架的脚到固定杆上;
- 4) 放入测试探杆,并用铁丝固定到支架的一个角上,底部填入部分沙土;
- 5) 把仪器的接口和上部套筒内部引出的电极线相接,打开仪器,检查工作

正常后，放入上部套筒内，并盖上顶盖。至此，测试系统的现场布设完成，如图 10-5 所示。

完成上述工作，测试系统即开始进行采集数据工作。



图 10-5 现场布设测试系统完成

### 10.2.3 实验数据及分析

实验中，共测得四组数据，四组数据的情况是：

- 1) 第一组，1-40 测试部分为正数，数据曲线如图 10-6 所示。其余部分测试均为负值。

正数部分数据曲线图如图 10-6 所示。

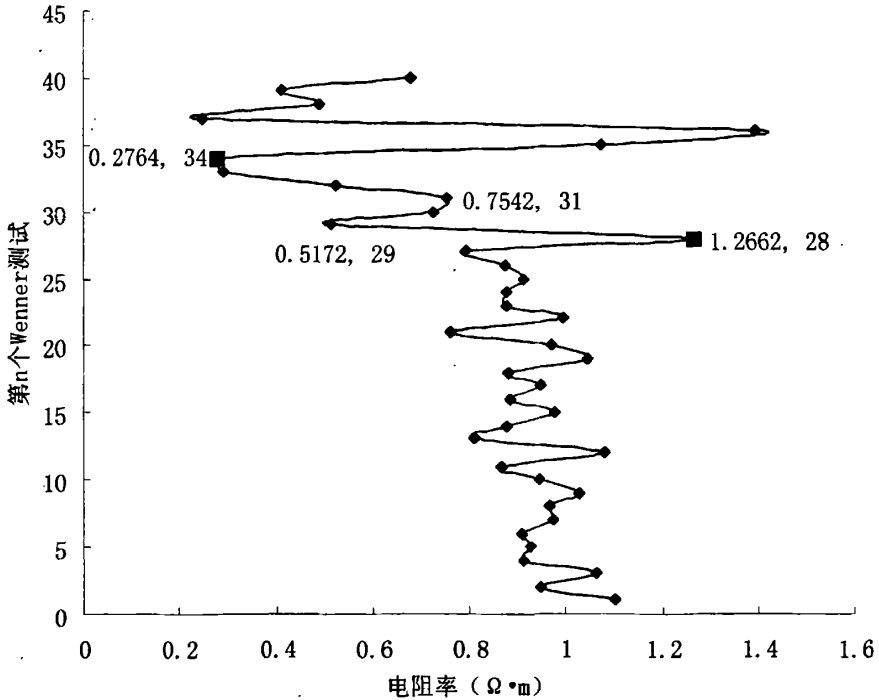


图 10-6 第一组正数部分的数据曲线图

图中可以看出，低下部分电极的测试数据和室内测得数据情况类似，有波动，但波动不是很大，而上部数据波动较大，分析原因大概由于波浪作用影响测试的去自电。仔细看来还是可以找到规律的：图中两个红色方块点之间的部分，具有前面的界面区特点，总体呈现明显的递减趋势，且其上的数据都明显比底部数据小。按照 9.2 中给出的中间值-直线方法分析界面，找到中间值为  $0.7713 \Omega \cdot m$ ，发现图中的曲线并非单调递减，在进行直线分析时涉及如何选定直线端点的问题，发现该中间点数据和测试 31 的数据非常接近，这里测试选取 28 和 31 测试作为直线端点，分析得到的界面位置位于电极 32.40 处。29 及 30 测试可以认为是波浪导致的测试波动。

负数部分：观察负数数据，与前面极化作用产生的数据类似极化作用数据，分析由于风浪作用，影响仪器的去极化效果，出现极化的无法去除或无法完全去除，产生负数数据。

- 2) 第二及第三组数据皆为负值，数据与第一组数据的负数数据情况类似。
- 3) 第四组数据，采集该组数据时，海水处于退潮阶段，数据只采到第 37 个

测试即取出测试系统，并停止数据采集。采集到的数据曲线如图 10-7 所示。

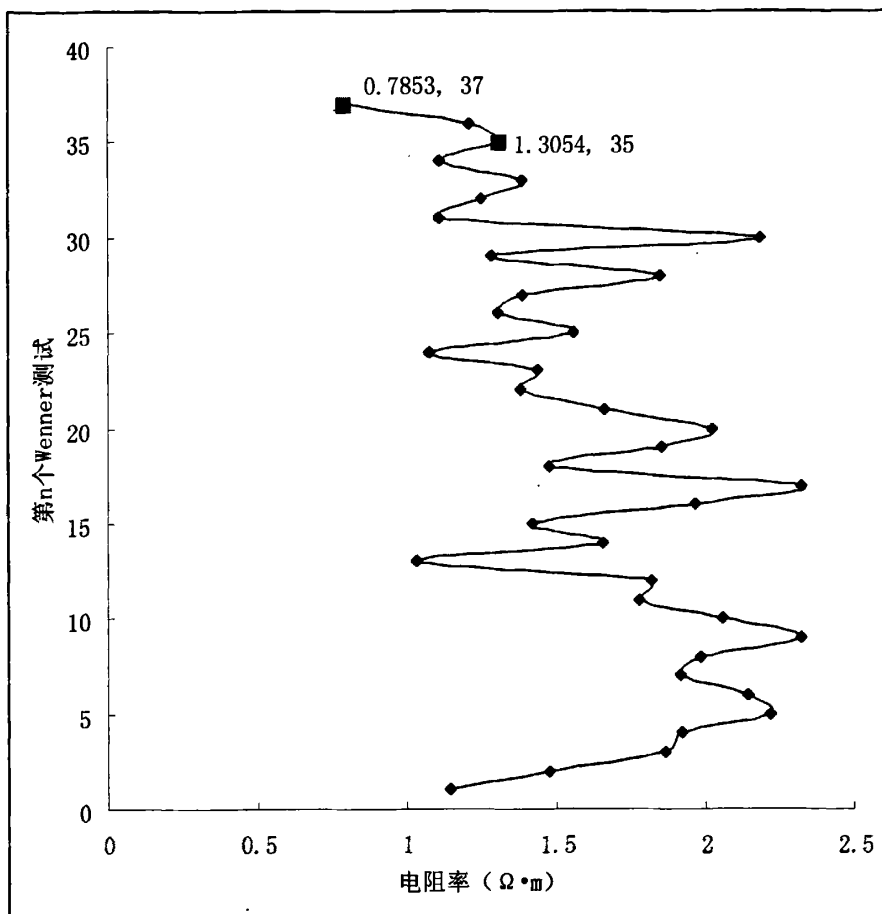


图 10-7 第四组测试数据

分析该数据：第 35 个测试下面的数据，波动很大，但都大于  $1 \Omega \cdot m$ ，分析该部分数据为沙土部分的电阻率数据，但由于受到波浪作用而产生较大波动。而 35-37 三个数据呈现单调性，且 37 数据为明显小于 1 的数据，分析该这三个数据属于界面区域的部分数据，但由于数据未采集完全，界面位置无法具体确定。

由上面的现场实验数据分析，发现电极材料的选择直接影响到去极化效果，对现场实验数据的测定十分重要，在风浪大的海况下，测量极化的消除至关重要。

### 10.3 本章小结

本章在平静海况和风浪时分别进行了一次海水-沉积物界面原位观测实验，并应用 9.2 中的中间值-直线分析方法对测试数据进行了分析，进一步验证了该方

法对界面位置分析的有效性, 测试结果表明, 平静海况时海水-沉积物界面能较好的通过观测数据确定, 风浪对数据的测试结果影响较大, 下一步应该通过选取极化作用小的材料来进一步改进系统在风浪条件下的测试效果。

# 11 结论、创新点及进一步研究

## 11.1 结论

1) 本论文设计完成一个基于电阻率测量的海床蚀积过程原位监测系统。该系统包括机械探杆, 电子采集记录仪和上位机数据处理软件三个部分, 可以实现海床蚀积的长期自动监测, 自容式记录测试结果。监测系统参数如下:

- A/D 有效分辨率: 20 位 (即分辨率:  $1.2 \mu V$ )
- 电压测试精度:  $68 \mu V$
- 电阻测试精度:  $0.02 \Omega$
- 电阻率测试精度:  $0.012 \Omega \cdot m$
- 最大输入信号:  $\pm 2.5V$  (峰-峰值)
- 输入阻抗:  $2G \Omega$
- 自电补偿:  $\pm 2.3V$
- 供电电流:  $10mA$
- 一个 Wenner 测试的时间间隔:  $8s$
- 采样次数: 64 次

2) 本论文进行的探杆设计, 通过实验对比分析, 选择探杆电极布设方法为环形布设、探杆直径  $7cm$  和电极间距  $1cm$ ;

3) 主控部分设计, 包括硬件设计和下位机软件设计两个部分, 设计了数据采集模块、时钟模块、存储模块、电极自动转换模块, 其中的电极自动转换模块采用了创新的分级电极转换结构和转换算法, 海量存储数据, 减少系统所需通道数量, 缩小系统体积, 降低了系统低功耗, 能够实现长期观测;

4) 上位机数据处理软件开发, 开发完成了仪器参数设置、数据处理和曲线拟合三个模块, 采用的 VC++6.0 完成界面部分和计算部分, matcom 4.5 完成曲线绘制及曲线拟合, 直接可以进行数据的后处理, 方便使用。

5) 本论文通过实验进一步确定系统的采样次数及调整极化算法, 并把测得的数据和商业化 E60BN 高密度电法仪数据对比, 验证本系统测试土体和海水电阻率数据的有效性。

6) 应用本论文研发的仪器统进行了室内测试对比实验, 检验了仪器测试电导率结果的准确性, 及沉积物-水界面位置判定的有效性, 误差在 0.80cm 以内。

7) 现场测试实验的结果表明, 在海洋水动力条件较为平静时, 测试结果很好的反映海水-沉积物界面; 当水动力作用较强时, 目前仪器所用电极的极化效应对测试结果影响较大, 将在下一步研究中通过改变电极材料来完善。

## 11.2 本文创新点

本论文的创新点主要有三个:

1) 多电极自动切换海床蚀积监测系统设计: 把电法仪器常用的高密度测量方式和海床蚀积监测系统结合, 进行了海床蚀积监测过程中的电极自动切换, 减少了电路系统的数据采集通道, 从而实现了多电极自动切换的海床蚀积测试。

2) 二级电极开关转换结构设计及相应软件控制算法设计: 在主控部分的硬件设计中, 采用了自行设计的两级开关结构和相应的主控软件设计, 此种电极开关结构可以极大的减小多电极电路的硬件开销, 缩小了系统的体积;

3) 提出了中间值-直线分析方法: 通过对电阻率测量海床蚀积过程的详尽分析, 证实了该方法分析的有效性, 为电阻率方法蚀积过程中界面的分析进行了大量十分有意义的工作。

## 11.3 下一步的研究工作

由于时间原因, 和本人水平有限, 本系统还有很多不完善之处和有待进一步改进的工作, 主要包括以下几个方面:

1) 电极探杆: 电极材料, 在进一步研究中应该选用极化作用小或者不极化电极, 以得到更为精确的数据; 电极探杆的制作, 可以机械化制作而非手工制作, 提高电极布设的均一性, 以获得更为稳定的数据。

2) 主控部分: 主控部分硬件设计中, 可以进一步选择同一器件的小型封装, 来进一步减小系统体积, 在更改电极材料后, 可以调整极化算法, 减小等待时间, 来达到加速测试的目的。

3) 软件部分: 功能尚需完善, 满足人性化需求, 和更多操作方便的需求。

4) 由于时间关系, 系统探杆底部没有加工成锥形结构, 探杆内部没有加承力



杆，这些都有待于后面工作进一步完善。

参考文献

- [1] Black, K.S., et al. *Working with Natural Cohesive Sediments*. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, 2002. 128(1): p. 2-8.
- [2] Black, K., Athey, S., Wilson, P., Evans, D. *Particle Tracking: a new tool for coastal zone sediment management*. Littoral, 2004: p. 20-22.
- [3] Neumeier, U., C.H. Lucas, and M. Collins. *Erodibility and erosion patterns of mudflat sediments investigated using an annular flume*. Aquatic Ecology, 2006. 40(4): p. 543-554.
- [4] Friend, P.L. and C.L. Amos. *Natural coastal mechanisms – flume and field experiments on links between biology, sediments, and flow*. Continental Shelf Research, 2007. 27(8): p. 1017-1019.
- [5] Willows, R.I., J. Widdows, and R.G. Wood. *Influence of an infaunal bivalve on the erosion of an intertidal cohesive sediment: A flume and modeling study*. Limnology and Oceanography, 1998. 43(6): p. 1332-1343.
- [6] Widdows, J., et al. *Influence of biota on spatial and temporal variation in sediment erodibility and material flux on a tidal flat (Westerschelde, The Netherlands)*. Marine Ecology Progress Series, 2000. 194: p. 23-37.
- [7] Shimeta, J., et al. *Resuspension of benthic protists at subtidal coastal sites with differing sediment composition*. MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, 2003. 259: p. 103-115.
- [8] Sutherland, T.F., C.L. Amos, and J. Grant. *The effect of buoyant biofilms on the erodibility of sublittoral sediments of a temperate microtidal estuary*. Limnology and Oceanography, 1998. 43(2): p. 225-235.
- [9] Jie, H., et al. *Differences in the benthic - pelagic particle flux biodeposition and sediment erosion/at intertidal sites with and without clam *Ruditapes philippinarum*/ cultivation in eastern China*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2001. 261: p. 245-261.
- [10] Wheatcroft, R.A. and C.K. Sommerfield. *River sediment flux and shelf sediment accumulation rates on the Pacific Northwest margin*. Continental Shelf Research, 2005. 25(3): p. 311-332.
- [11] Wright, L.D., et al. *Effects of ambient currents and waves on gravity-driven sediment transport on continental shelves*. Marine Geology, 2001. 175(1-4): p. 25-45.
- [12] Nittrouer, C.A. *STRATAFORM: overview of its design and synthesis of its results*. Marine Geology, 1999. 154(1-4): p. 3-12.
- [13] Puig, P., A. S. Ogston, B. L. Mullenbach, C. A. Nittrouer, J. D. Parsons, and R. W. Sternberg. *Storm-induced sediment gravity flows at the head of the Eel submarine canyon, northern California margin*. J. Geophys. Res., 2004. 109(C03019).
- [14] Ogston, A.S., et al. *Observations of storm and river flood-driven sediment transport on the northern California continental shelf*. Continental Shelf Research 2000. 20(16): p. 2141-2162.
- [15] Traykovski, P., et al. *The role of wave-induced density-driven fluid mud flows for cross-shelf transport on the Eel River continental shelf*. Continental Shelf Research, 2000. 20(16): p. 2113-2140.
- [16] Wheatcroft, R.A. and J.C. Borgeld. *Oceanic flood deposits on the northern California shelf: large-scale distribution and small-scale physical properties*. Continental Shelf Research, 2000. 20(16): p. 2163-2190.

- [17] Mullenbach, B.L., et al. *Sediment deposition in a modern submarine canyon: Eel Canyon, northern California*. Marine Geology, 2004. 211(1-2): p. 101-119.
- [18] 印萍, et al. 北戴河海滩泥沙捕获实验及其初步结果分析. 海岸工程, 2003. 22(2).
- [19] EMERSON, C.W. *A Method for the Measurement of Bedload Sediment Transport and Passive Faunal Transport on Intertidal Sandflats*. Estuaries, 1991. 14(4): p. 361-371.
- [20] Lamoureux, S.F. *A sediment accumulation sensor for use in lacustrine and marine sedimentation studies*. Geomorphology, 2005. 68(1-2): p. 17-23.
- [21] Black, K., et al. *The use of particle tracking in sediment transport studies: a review* Geological Society London Special Publications, 2007. 274: p. 73-91.
- [22] Alvisi, F., et al. *Sampling and dating strategies in studying environments with high spatial and temporal variability*. Arch. Oceanogr. Limnol, 2001. 22: p. 207- 216.
- [23] ANDERSON, F.E., et al. *A TEMPORAL AND SPATIAL STUDY OF MUDFLAT EROSION AND DEPOSITION* FRANZ E. ANDERSON AND LUTHER BLACK. JOURNAL OF SEDIMENTARY PETROLOGY, 1981. 51(3): p. 0729-0736.
- [24] Perillo, G.M.E., E.P.D. Santos, and M.C. Piccolo. *An inexpensive instrument for sediment erosion-accumulation rate measurement in intertidal environments*. Wetlands Ecology and Management, 2003(11): p. 195-198.
- [25] Cahoon, D.R., D.J. Reed, and J.W. Day Jr. *Estimating shallow subsidence in microtidal salt marshes of the southeastern United States: Kaye and Barghoorn revisited* Mar. Geol. , 1995. 128: p. 1 -9.
- [26] Lawlar, D.M. *A New Technique for the Automatic Monitoring of Erosion and Deposition Rates* WATER RESOURCES RESEARCH, 1991. 27(8): p. 2125-2128.
- [27] Lawler, D.M. *The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies: examples from estuarine and fluvial systems*. Geomorphology, 2005. 64: p. 1 -23.
- [28] Thomas, S. and P.V. Ridd. *Review of methods to measure short time scale sediment accumulation*. Marine Geology 2004. 207: p. 95- 114.
- [29] Young, R.N. and J.B. Southard, *Erosion of fine-grained marine sediments: Sea-floor and laboratory experiments*. Geological Society of America Bulletin, 1978. 89(5): p. 663-672.
- [30] Amos, C.L., et al. *In situ erosion measurements on fine-grained sediments from the Bay of Fundy*. Marine Geology, 1992. 108(2): p. 175-196.
- [31] Maa, J.P.Y., et al. *VIMS Sea Carousel: A field instrument for studying sediment transport*. Marine Geology, 1993. 115(3-4): p. 271-287.
- [32] Maa, J.P.Y., C.H. Lee, and F.J. Chen. *Bed shear stress measurements for Sea Carousel*. Marine Geology, 1995. 129(1-2): p. 129-136.
- [33] Houwing, E.-J. and L.C. van Rijn. *In Situ Erosion Flume (ISEF): determination of bed-shear stress and erosion of a kaolinite bed*. Journal of Sea Research, 1998. 39(3-4): p. 243-253.
- [34] Maa, J.P.Y., L. Sanford, and J.P. Halka, *Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland*. Marine-Geology, 1998. 146(1-4): p. 137-145.
- [35] Andersen, T.J., J. Fredsoe, and M. Pejrup. *In situ estimation of erosion and deposition thresholds by Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007. 75(3): p. 327-336.
- [36] Tolhurst, T.J., et al. *A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments*. Continental Shelf Research, 2000.

- 20(10-11): p. 1397-1418.
- [37] Widdows, J., et al. *Inter-comparison between five devices for determining erodability of intertidal sediments*. Continental Shelf Research, 2007. 27(8): p. 1174-1189.
- [38] Pope, N.D., J. Widdows, and M.D. Brinsley. *Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach--A comparison of annular flume and field data*. Continental Shelf Research, 2006. 26(8): p. 959-970.
- [39] Cacchione, D.A., R.W. Sternberg, and A.S. Ogston. *Bottom instrumented tripods: History, applications, and impacts*. Continental Shelf Research, 2006. 26(17-18): p. 2319-2334.
- [40] Heffler, D. *RALPH - A Dynamic Instrument for Sediment Dynamics*. OCEANS '96. MTS/IEEE. 'Prospects for the 21st Century'. Conference Proceedings, 1996. 2: p. 728-732
- [41] Ogston, A.S., J.V. Guerra, and R.W. Sternberg. *Interannual variability of nearbed sediment flux on the Eel River shelf, northern California*. Continental Shelf Research, 2004. 24(1): p. 117-136.
- [42] 汪亚平, et al. *长江口水沙入海通量的观测与分析*. 地理学报 2006. 61(1): p. 35-46.
- [43] Schaaff, E., et al., *Field and laboratory measurements of sediment erodibility: A comparison*. Journal of Sea Research, 2006. 55(1): p. 30-42.
- [44] Ridd, P., et al. *Measurement of Sediment Deposition Rates using an Optical Backscatter Sensor*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001. 52: p. 155-163.
- [45] Erlingsson, U. *A sensor for measuring erosion and deposition*. J. Sediment. Petrol. , 1991. 61: p. 620-623.
- [46] Lawler, D.M., et al. *Application of a Novel Automatic Erosion and Deposition Monitoring System at a Channel Bank Site on the Tidal River Trent, U.K.* Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001. 53: p. 237-247.
- [47] Lawler, D.M. *Advances in the continuous monitoring of erosion and deposition dynamics: Developments and applications of the new PEEP-3T system*. Geomorphology 2008. 93: p. 17-39.
- [48] H. JESTIN , P.B., P. LE HIR , J. L'YAVANC , Y. DEGRES. *Development of ALTUS, a high frequency acoustic submersible recording altimeter to accurately monitor bed elevation and quantify deposition or erosion of sediments*. Conference Proceedings, 1998: p. 189-194.
- [49] Bassoullet, P., et al. *Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Olerona "(France)*. Continental Shelf Research 2000. 20: p. 1635-1653.
- [50] WON, I.J. *The Geometrical Factor of a Marine Resistivity Probe with Four Ring Electrodes*. IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, 1987. OE-12(1): p. 301-303.
- [51] Ridd, P.V. *A Sediment Level Sensor for Erosion and Siltation Detection*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1992. 35: p. 353-362.
- [52] Thomas, S., P.V. Ridd, and P.J. Smith. *New instrumentation for sediment dynamics studies*. Mar. Technol. Soc. J. , 2002. 36(1): p. 55- 58.
- [53] Wheatcroft, R.A. *In Situ Measurements of Near-Surface Porosity in Shallow-Water Marine Sands*. IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, 2002. 27(3).
- [54] Samouëliana, A., et al. *Electrical resistivity survey in soil science: a review*. Soil & Tillage Research, 2005. 83 p. 173-193.
- [55] Ridd, P.V. *Electric Potential Due to a Ring Electrode*. IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, 1994. 19(3): p. 464-467.

- [56] Loke, M.H. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. Course Notes for USGS Workshop 2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data, Torr, CT. 2001.
- [57] Pozdnyakova, L., A. Pozdnyakov, and R. Zhang. *Application of geophysical methods to evaluate hydrology and soil properties in urban areas*. Urban Water 2001. 3: p. 205-216.
- [58] 孙永福, 孙惠凤, and 董立峰. 海底土的电阻率特征及其腐蚀性评价. 海岸工程, 2005. 24(2).
- [59] 郭秀军, 贾永刚, and 黄潇雨. 基于电性变化进行黄河水下三角洲饱和粉土触变过程研究. 岩石力学与工程学报, 2006. z1: p. 3131-3136.
- [60] 郭秀军, et al. 黄河口饱和粉土的电性特征及其工程地质应用. 岩土力学, 2007. 28(3): p. 593-598.
- [61] Kermabon, A., et al. *Acoustic and Other Physical Properties of Deep-Sea Sediments in Tyrrhenian Abyssal Plain*. Marine Geology, 1969. 7(2): p. 129-&.
- [62] Jackson, P.D. *Electrical-Resistivity Method for Evaluating Insitu Porosity of Clean Marine Sands*. Marine Geotechnology, 1975. 1(2): p. 91-115.
- [63] Cheesman, S.J., L.K. Law, and R.N. Edwards. *Porosity Determinations of Sediments in Knight Inlet Using a Transient Electromagnetic System*. Geo-Marine Letters, 1991. 11(2): p. 84-89.
- [64] Cheesman, S.J., L.K. Law, and B. Stlouis. *A Porosity Mapping Survey in Hecate Strait Using a Sea-Floor Electromagnetic Profiling System*. Marine Geology, 1993. 110(3-4): p. 245-256.
- [65] Lauer-Leredde, C., P.A. Pezard, and I. Dekeyser. *FICUS, a new in-situ probe for resistivity measurements in unconsolidated marine sediments*. Marine Geophysical Researches, 1998. 20(2): p. 95-107.
- [66] Lauer-Leredde, C., P.A. Pezard, and I. Dekeyser. *FICUS, a new in-situ probe for resistivity measurements in unconsolidated marine sediments*. Marine Geophysical Researches 1998. 20: p. 95-107.
- [67] Rosenberger, A., et al. *Design and application of a new free fall in situ resistivity probe for marine deep water sediments* Marine Geology, 1999. 160( 327-337).
- [68] Jansen, D., et al. *In situ measurement of electrical resistivity of marine sediments, results from Cascadia Basin off Vancouver Island*. Marine Geology, 2005. 216: p. 17-26.
- [69] 董劲松. 电法勘探数据与解释的可视化方法研究: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2006.
- [70] 李银真. 高密度电阻率法物探技术及其应用研究: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学 2007.
- [71] 雷世红. 高密度电法室内模型与工程应用研究: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学. 2005
- [72] 郑采君. 分布式高密度电阻率仪电极转换装置设计. 地质装备, 2004. 5(1): p. 34-37.
- [73] 李聪媛. 新型高密度电法仪器设计与实现: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2002.
- [74] 利奕年 and 罗延钟. 高密度电法视电阻率数据预处理算法. 物探化探计算技术, 2006. 28(4): p. 328-331.
- [75] 刘海飞. 高密度电阻率法数据处理方法研究: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学. 2004.
- [76] 姚健, 曾昭发, and 李. 芳. 高密度电阻率法测量多排列数据拼接及误差校正方法研究. 物探化探计算技术, 2007. 29(3): p. 209-212.
- [77] 董浩斌 and 王传雷. 分布式智能化高密度电法测量系统. 地学仪器, 1997. 4: p. 26-27.
- [78] 管奕. 高密度电阻率法测试系统的研究. 吉林地质, 1995. 14(4): p. 79-83.
- [79] 朱栋华, et al. 基于80C552的高密度电阻率法测量系统设计. 沈阳建筑工程学院学报(自

- 然科学版), 2003. 19(3): p. 232-235.
- [80] ATMEL. *AT89 ISP programmer cable*. cited; Available from: [www.atmel.com](http://www.atmel.com)
- [81] Imeson, A.C., et al. *The erosional response of calcareous soils along a climatological gradient in Southeast Spain*. *Geomorphology*, 1998. 24(1): p. 3-16.
- [82] Anderson, R. 性能最大化  $\Delta\Sigma$  转换器 (TI). 2006. cited; Available from: [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [83] 庞世甫, et al.  $\Sigma$ - $\Delta$  调制器的六阶噪声整形算法. *电子与封装*, 2007. 7(2): p. 23-26.
- [84] 张亮 and 高光天,  $\Sigma$ - $\Delta$  模数转换器基本原理及应用(1). *电子技术应用*, 1997. 23(2): p. 57-59.
- [85] 易婷. 高性能  $\Sigma$ - $\Delta$  模数转换器设计: [博士学位论文]. 上海: 复旦大学. 2002.
- [86] 张亮 and 高光天.  $\Sigma$ - $\Delta$  模数转换器基本原理及应用(2). *电子技术应用*, 1997. 23(3): p. 50-52.
- [87] Kitchin, C. and L. Counts. *A designer's guide to instrument amplifiers*. 2005, cited; Available from: [www.analog.com](http://www.analog.com).
- [88] ADI. *Single Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier*. 1999. cited; Available from: [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [89] Miller, P. and D. Moore. 精密电压基准. 2006. cited; Available from: [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [90] M. Fukue, et al., *Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers*. *Engineering Geology*, 2001. 60: p. 361-369.
- [91] 刘维. *精通 matlab 与 C/C++ 混合程序设计* 2008, 北京: 北京航空航天大学出版社.
- [92] 美信公司. 谈谈 ADC 误差对系统性能的影响. *电子质量*, 2002. 8: p. 29-33.
- [93] 杨振吉. 电压基准. *电子测量技术*, 2003(3): p. 6-7.

## 致谢

论文结稿之际，首先要衷心感谢我的导师贾永刚教授。他严谨求实的治学态度、博学精深的学识和敏锐深刻的洞察力给我留下了深刻的印象，将对我今后的工作和学习产生深远的影响。

感谢同年级、同宿舍的同学兼室友杨秀娟同学和我分享学习和生活的乐趣，帮我了解了很多专业知识。感谢郭磊师弟帮我编制部分软件程序。感谢李红磊、刘晓磊、侯伟、杨忠年和刘辉师弟帮了很多的忙，帮我做很多琐事。感谢在一个实验室里学习的尚浩师弟，在需要他帮助的时候总是那么热心！感谢张民生师弟也是张老师，经常和我讨论问题，给我讲解很多专业知识。感谢田文滨、王虎和房志敏师弟和师妹帮我做了很多实验。

特别感谢吉林大学工程技术研究所的张晓培老师，给我热心和耐心的指导，帮我渡过难关。感谢吉林大学工程技术研究所的杜立志老师，中国海洋大学信息学院的张凯临老师和刘金涛老师，他们在硬件电路方面给我的帮助和指导，给我完成设计的信心和支持。

感谢关心我、爱护我、无言的帮助我的同学、老师和朋友们，是你们给予我进取的力量和源泉！你们的友谊是我终生最大的财富！有你们陪伴的学习生活不再那么枯燥无味！

感谢我的爱人在我读研期间一直陪伴我左右，让我不孤单，给予我精神的鼓励、支持。

最后，要感谢我的父母，他们给予我最无私的爱，让我从琐事中解脱出来，专心工作。可以说没有他们无私的支持，就没有我今天的成就。这么大的人还让他们为我操劳，我真的很抱歉，无以回报，只有加倍努力！

是友谊和爱让我走到今天，谢谢所有关心和爱护我的亲人和朋友！

## 个人简历

1975年8月12日出生于吉林省伊通县

1993年9月考入吉林职业师范学院(现吉林工程技术师范学院)电子系应用电子技术专业,1997年6月本科毕业并获得工学学士学位

2000年9月考入中国海洋大学信息科学与工程学院信号与信息处理专业,2003年6月硕士毕业并获得工学硕士学位

2005年9月考入中国海洋大学环境科学与工程学院环境工程专业攻读博士学位至今。

## 发表的学术论文

- [1] 夏欣, 贾永刚, 浅水岸滩蚀积过程原位监测方法研究技术. 海洋地质与第四纪地质. 2009, VOL.29 (5)
- [2] 戴茜, 贾永刚, 孟祥梅, 夏欣, 单红仙, 基于电导率测定海水悬沙含量试验研究. 海洋学报. 2008, VOL.30(5)



## 研究成果

- [1] 软件著作权一项：软件名称：海床电阻率蚀积监测数据处理软件（SEDEDP），作者：贾永刚，夏欣，单红仙，郭磊，登记号：2009SR014452
- [2] 申请发明专利一项：专利名称：海床蚀积动态过程电阻率监测方法及装置，作者：贾永刚，夏欣，单红仙，李红磊，专利号：（已受理，受理号：200810249769.1，审批中）
- [3] 申请实用新型专利一项：专利名称：海床蚀积动态过程电阻率监测方法及装置，作者：贾永刚，夏欣，单红仙，李红磊，专利号：（已受理，受理号：200820233386.0，审批中）

## 研究生期间参与的研究项目

- [1] 协助导师申请并参与国家 863 项目，编号：2008AA09Z109，负责系统软硬件设计部分
- [2] 参与国家自然科学基金项目，编号：40876042，进行蚀积监测系统研究