

噪音水平	1 微伏 V_{P-P}	1.8 微伏	<1.5 微伏 RMS
输入范围	20V $P-P$	20V $P-P$	20V $P-P$
硬盘容量	6G~30G 字节	4G 字节	无
电子盘容量	64M~4G 字节	无	340M~2G 字节
前放增益	16	1、16、32	、 1、 100
时钟精度	< +/- 1 毫秒	< +/- 2 毫秒	< +/-100 微秒
仪器功耗	<0.3 瓦	2.2 瓦	1~2 瓦
价格	约 2 万人民币	约 20 万人民币	约 10 万人民币

下面为 MC1 微功耗地震仪的实物图片：

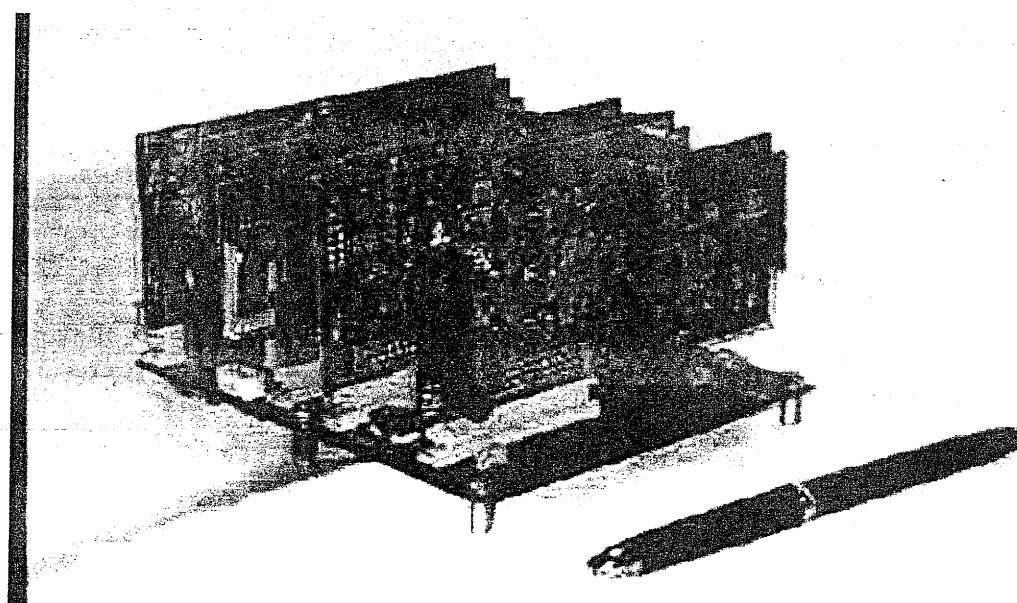


图 3.48 MC1 微功耗数字采集器样机的内部结构

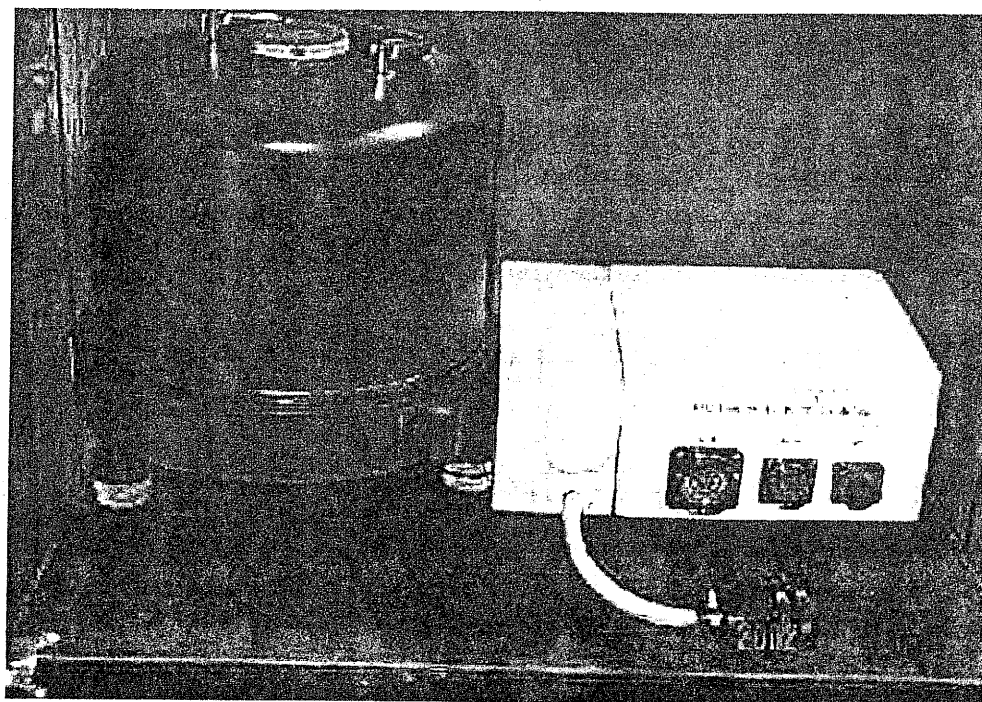


图 3.49 MC1 型地震仪整机图

3.5 测试与应用

2001 年 6 月研制出了 MC1 型微功耗地震仪的第一台样机。在实验室经过性能测试和连续记录试验后, 进行了一系列地震台试验。

3.5.1 MC1 型微功耗地震仪的测试实验

2001 年 9 月至 10 月在北京马道峪地震台连续记录近一个月, 仪器样机工作正常, 并记录到多个大小地震。

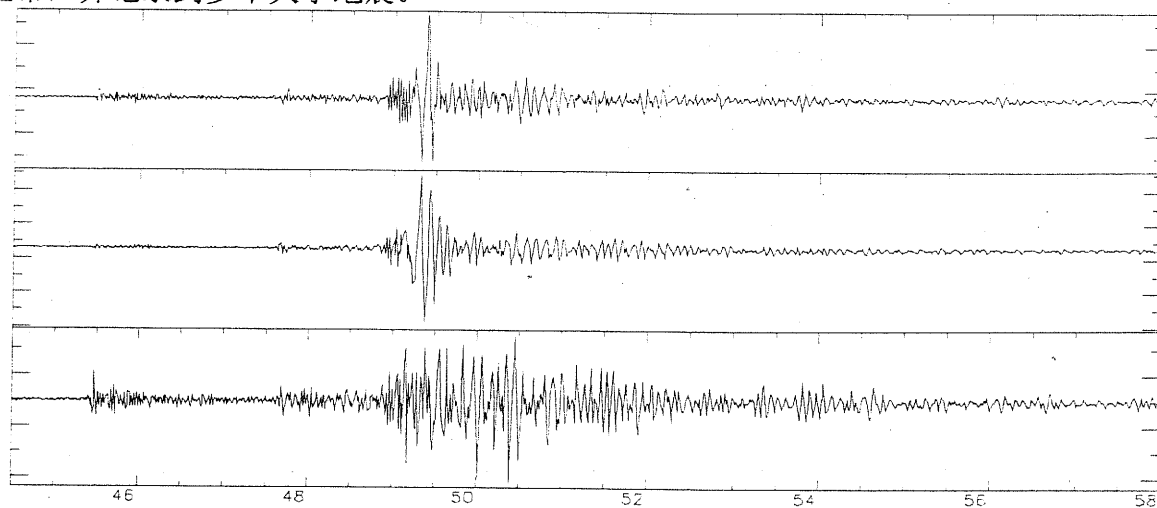


图 3.50 MC1 地震仪在马道峪地震台记录的 2001 年 10 月云南永胜 7.1 级地震

2001 年 10 月 3 月对样机的电路板和安装结构进行了改进, 同时完成了 6 套设备的制作。将其中的 4 套送到北京白家疃地震台进行了观测对比试验, 另 2 套仪器借用在中科院地质与地球物理研究所台阵实验室摆墩进行连续工作的试验。6 套仪器工作状态正常, 在北京白家疃地震台的 4 台仪器在连续工作的近一个月的时间里接收到了一系列的大小地震。试验结果达到了预想的目的, 说明该仪器用于地震流动观测试验的条件已基本成熟。

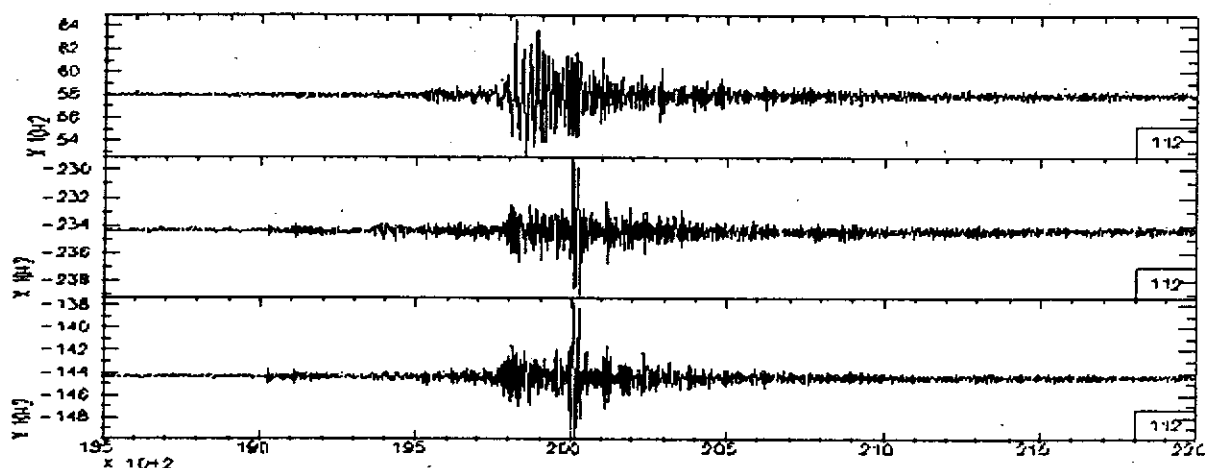


图 3.51 MC1 地震仪在白家疃地震台记录的 2002 年 3 月 23 日阿富汗 6.0 级地震

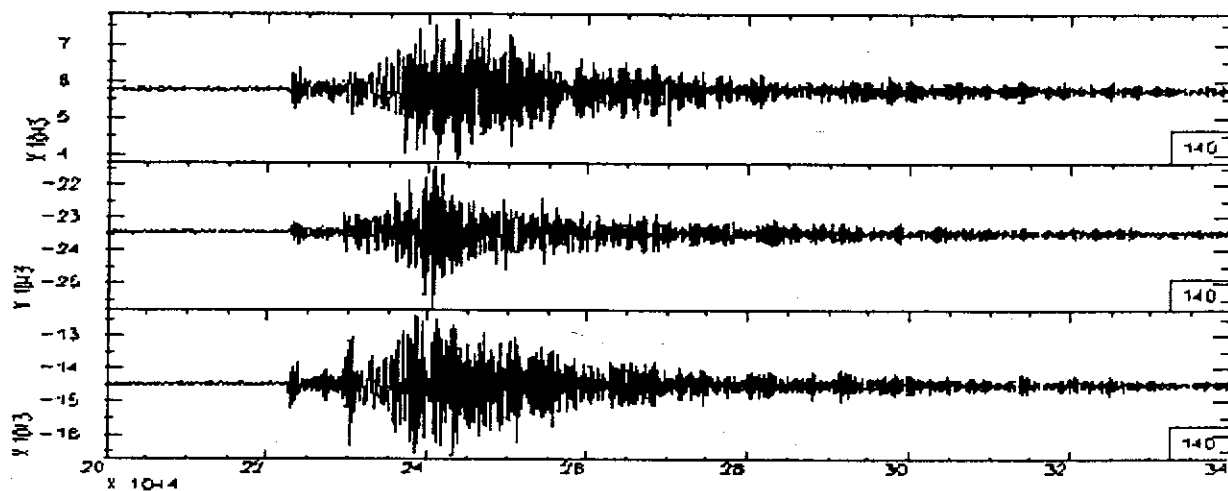


图 3.52 MC1 地震仪在白家疃地震台记录的 2002 年 3 月 26 日阿富汗日本琉球 7.5 级地震

3.5.2 MC1 型低功耗地震仪的应用实验

对于用于地震流动观测的野外工作仪器实际的应用实验是一个必不可少的过程

(1) 在云南三江地区的野外流动观测实验

四台 MC1 型微功耗地震仪于 2002 年 5 月布置在元江县、墨江县进行野外流动观测的。经历了当地高温、高湿的雨季。仪器工作基本正常。

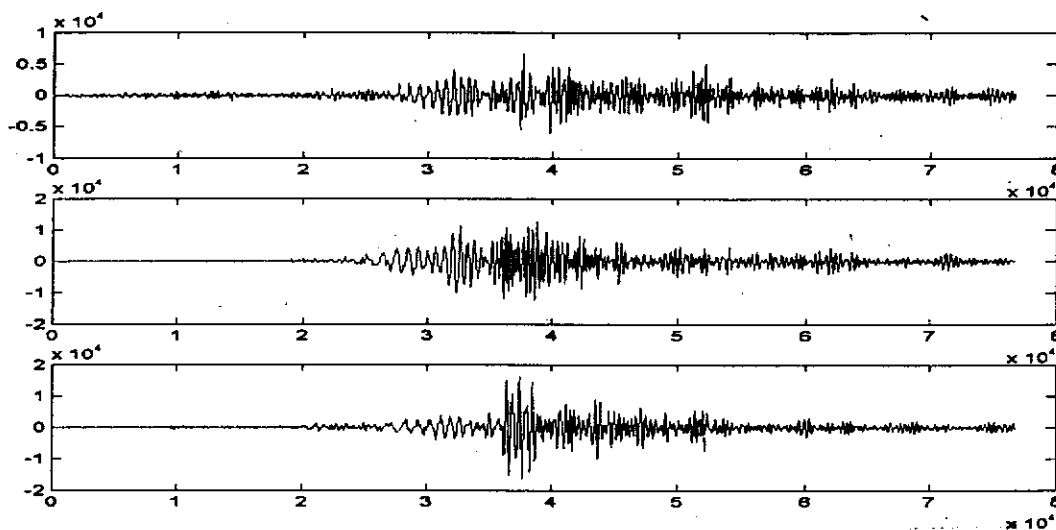


图 3.53 MC1 型地震仪在云南三江地区记录到的西藏 6.1 级地震

(2) 在新疆天山地区的野外流动观测实验

南京大学地球科学系,借用了一台 MC1 型地震仪与他们进口的 Reftek 地震仪一道从 2002 年 7 月起,在新疆天山地区进行野外流动观测。因对该仪器性能较为满意,南京大学地球科学系决定用其作为地球物理实验室的教学设备。

(3) 在澳大利亚的日全食观测实验

2002 年 11 月至 12 月,中国科学院地质与地球物理研究所汤克云研究员,携带 MC1 型地震仪采集器,配以两套重力计及其他仪器,赴澳大利亚进行了日全食的地球物理观测。两套重力计除了连接在 MC1 型地震仪采集器的两个通道上同时还并联在另一套数据采集器上。观测地点在沙漠地带,没有交流电源,所有仪器都靠蓄电池供电。另一套数据采集器因为电源耗尽,中途停止工作,而使用相同类型电源的 MC1 型地震仪采集器由于功耗很低,保证了观测的连续进行。

上述事例可以看出微功耗的特性不仅仅对于用于流动地震观测的地震仪来说,对于所有野外工作的地球物理数据采集仪器都有着重要的意义。MC1 型地震仪采集器在其他地球物理观测领域都有广泛的应用前景。

第四章 高频海底地震仪

“九五”期间,我们完成了 863 计划大动态、宽频带、三分量数字海底地震仪(OBS)的研制,该仪器主要用于天然地震观测,服务于海洋岩石层深部结构造研究。其频带为 20s-10Hz。“十五”863 计划“深水油气地球物理勘探技术”中要研制的是高频海底地震仪,频带是 2-100Hz,主要用于深水油气资源的地震勘探,两种仪器之间虽然有一些共同之处,但又有重大的差别。需要我们解决 OBS 性能向高频扩展的一系列技术问题。

表 4.1 高频海底地震仪(“十五计划”)和宽频带海底地震仪(“九五计划”)对比:

(1) 不同点

	“九五”宽带地震仪	“十五”高频地震仪
接收信息	天然地震	人工震源
研究用途	岩石圈深部结构	深水油气资源的地震勘探
工作频率	20s-10Hz	2-100Hz
总体结构	双球结构,水声释放器、信标机外置	单球一体化,水声释放器信标机内置
水声释放器厂家	国内定制	法国 OCEANO 公司
采集器功耗	2.2 瓦	0.3 瓦
灵敏度	192 伏·秒/米	3200 伏·秒/米
信标机性能	发射模拟信号,利用有向天线定位	发射数字信号,利用 GPS 提供的经纬度信息定位
数据存储方式	1.3G 或 2G 硬盘	硬盘和 Flash Memory 双备份
船上工作方式	船上封球,单次作业	岸上封球,连续作业
投放体积	117 公升	62 公升
投放重量	130 公斤	82 公斤

4.1 高频海底地震仪设计思路

(2) 相同点

记录方式	24 位连续数字纪录
工作最大水深	3000m
水下通讯方式	声纳
地震计换能方式	速度型
地震计姿控系统	硅油阻尼重力常平架方式
释放脱钩机构	电腐蚀脱钩
搜寻方式	信标机与频闪灯相结合

海底地震仪的研制是一个较复杂系统的技术集成过程。其主要问题首先由高压玻璃舱球、沉耦架、保护罩刚性连接而成的仪器结构需要有较好的力学特性,才能在海底复杂的地形环境下低失真地拾取地动信号。其次要将包括传感器(地震计)及姿控系统、采集器、水声通讯系统、GPS、数传模块、电源等等集中安装在体积和重量都有严格限制的玻璃舱球内。最后包括脱钩机械装置在内的各个模块要完善协调的配合,形成一个有机的整体。

(1) 确保海底地震仪可靠记录和成功回收是海底地震仪设计的基本出发点。

仅就记录系统的基本组成而言, 海底地震观测和陆地地震观测系统差别不大, 但要成功进行海底地震观测, 首先要解决可靠记录和成功回收问题, 其核心技术是仪器的耐压密封和仪器遥控释放。为此采用国外知名公司法国 OCEANO 的水声应答测距和释放技术及其成熟产品。同时, 把水声通讯、GPS 定位技术与 MCU 综合运用用于仪器回收过程, 以期提高回收成功率。

(2) 提高谐振频率

谐振频率是指地震仪结构共振频率。在短周期地震仪设计中, 谐振频率是重要技术指标, 应该使其远离仪器工作频带 (2~100Hz)。因为海底地震仪体积大、重量重, 且携带有电源和附属设备, 导致系统结构刚度降低, 此外, 检波器与介质之间存在多个连接环节, 都有可能成为寄生共振源。因此, 高频海底地震仪设计中提高谐振频率更为困难。在仪器结构中采用单球一体化设计方案是解决这一问题的最佳选择。

还要提到的是海底地震仪与海底介质的共振频率。正因为海底地震仪体积大、重量重, 而海底介质与陆地基质相比刚度低得多, 因此耦合问题应予考虑, 而提高耦合频率是海底地震仪设计中的另一难点。

理论、试验和大量观测结果为提高海底地震仪谐振频率提供了可借鉴的资料。仅从观测角度看, 布台选点应尽量避免松软介质。

(3) 建立在先进计算机技术和成熟的功能模块基础上的微功耗电子系统集成。

采用为 PDA 设计的 32 位单片机技术和成熟功能模块, 将软件作为整个系统的核心, 大大简化了硬件设计, 从而提高了仪器的整机性能和工作可靠性, 同时使功耗大大降低, 实现了微功耗, 为单球一体化设计提供了保证。同时简化的硬件设计和便于改进的编程控制方案, 有利于降低研制费用、提高研制速度。

(4) 提供友好人机交互界面, 简化现场检测、安装操作, 尽量减小仪器整机体积和重量, 便于海上作业, 使海上多次连续作业成为可能。

高频海底地震仪就其记录地震信号的基本功能而言, 其核心是高频(短周期)地震测震系统。因其工作在海底特定环境下, 因此, 其结构要比一般陆地用地震仪复杂。又因其是在无人值守环境下连续记录, 因此有较复杂的电子控制系统。

4. 2 仪器舱和水声释放器单球一体化结构

结构设计的目标是确保测震系统能够在要求的海底环境条件下可靠地记录地震信号, 并便于仪器的安全投放和回收。

从提高高频海底地震仪谐振频率出发, 海底地震仪采用单球一体化结构。这种方案的前提是, 单球结构必须能够提供足够的浮力和空间。

经初步估算, 采用外径 17 英寸 (432mm)、耐压 (水深达 6000m) 玻璃球, 重 17.2kg, 可提供 26.5kg 的浮力。仪器舱内设备及电源总重量约为 16kg, 考虑到高强度沉耦架重 38kg 和其他辅助设备, 总的投放重量为 85kg, 回收重量 43kg, 可获得 6.5kg 的浮力。从而验证了单球结构的可行性, 见下表:

表 4.2 设备及电源附件重量估算

设备名称	空气中重量 (kg)	水中重量 (kg)
姿控检波器	7.85	7.85
数字采集器	0.8	0.8

GPS 及信标机	0.85	0.85
微型电子罗盘	0.1	0.1
测距释放水下机	4	4
电源电池组*	3.5	3.5
耐高压玻璃舱球	17.2	-26.5
球舱罩	5.3	1.16
球舱加强环	3	1.62
频闪灯	0.4	0.2
高强沉耦架	42	38
投放重量	85	31.58
回收重量	43	-6.42

在实际中,将在舱球的中部加装浮力材料,会进一步增加仪器的回收浮力,并提高上浮以后的姿态稳定性。由于浮力材料在海水高压下体积会缩小,具体数值较难确定,估计在 1 公斤左右。

*电源重量计算:

数字采集器工作 30 天: $0.06 \times 24 \times 30 = 43.2\text{Ah}$

信标机工作 48 小时: $0.45 \times 48 = 21.6\text{Ah}$

测距释放器侦听、应答、释放功耗: $5.4 + 0.18 + 0.8 = 6.38\text{Ah}$

合计约 71.8Ah, 共需电池 24 节, 约 2.5 公斤。

单球一体化结构设计的特点是:

大大简化了系统结构,有效的提高了系统的谐振频率。如果按照“九五”时的双球模式经过试验,谐振频率最多只能达到 30Hz 左右无法满足合同的性能要求。

省去了水声释放器耐高压钢质外壳,减轻了系统重量,提高了回收时的浮力。外置的水声释放器,需要很厚重的钢质外壳,以承受海水数千米的高压,如用外置的水声释放器,在单球的条件下,系统将没有足够的浮力浮出水面。

降低了购置成本。如果采用刚质的外壳水声释放器购置成本将增加 50%以上,如果为了降低重量,采用钛合金的外壳,购置成本将增加 150%以上。这样我们所有的课题经费也仅够购置水声释放器。

减小了重量和体积,便于海上作业。在无风三尺浪的海面上作业,如果设备比较笨重,在投放回收时尤其是在海况较差的情况下难度会大大增加。

水声测距应答释放器采用法国 OCEANO 公司 ET361 产品。水下机可耐压 6000m 水深,甲板机具有应答测距功能,测距范围 10Km。德国 NAUTILUS MARINE SERVICE GmbH 公司提供高压玻璃舱球,耐压 6000m 水深,并按我们的打孔尺寸、位置要求进行加工。OCEANO 公司按照我们的设计要求,完成水下机与仪器舱共用高压玻璃球的集成。

4.3 沉耦架设计

沉耦架设计应考虑海底地震仪的投放和下沉过程具有良好的流体力学性质,着底后获得良好的耦合效果。沉耦架要有足够刚度,谐振频率远离仪器工作频带。沉耦架重量宜轻,以提高耦合频率。对沉耦架的设计、沉耦架与高压玻璃球的刚性连接固定方案进行实验,验证了该结构谐振频率大于 150Hz,能够保证系统性能。根据实验采用下列措施提高性能:提高材料刚度、减小结构的尺寸、增加支撑梁数目、基座采用钢材、支架采用铝合金材料,这样既保证了性能要求,又使其重心较低,提高了水平向

谐振频率。见下图 4.1。

沉耦架分为两个部分：上半部分为圆柱形，与高压玻璃舱球刚性连接，半径为 600mm ；下半部分为矩形，面积较大为 $1100 \times 900\text{mm}$ 可与海底较好的耦合。

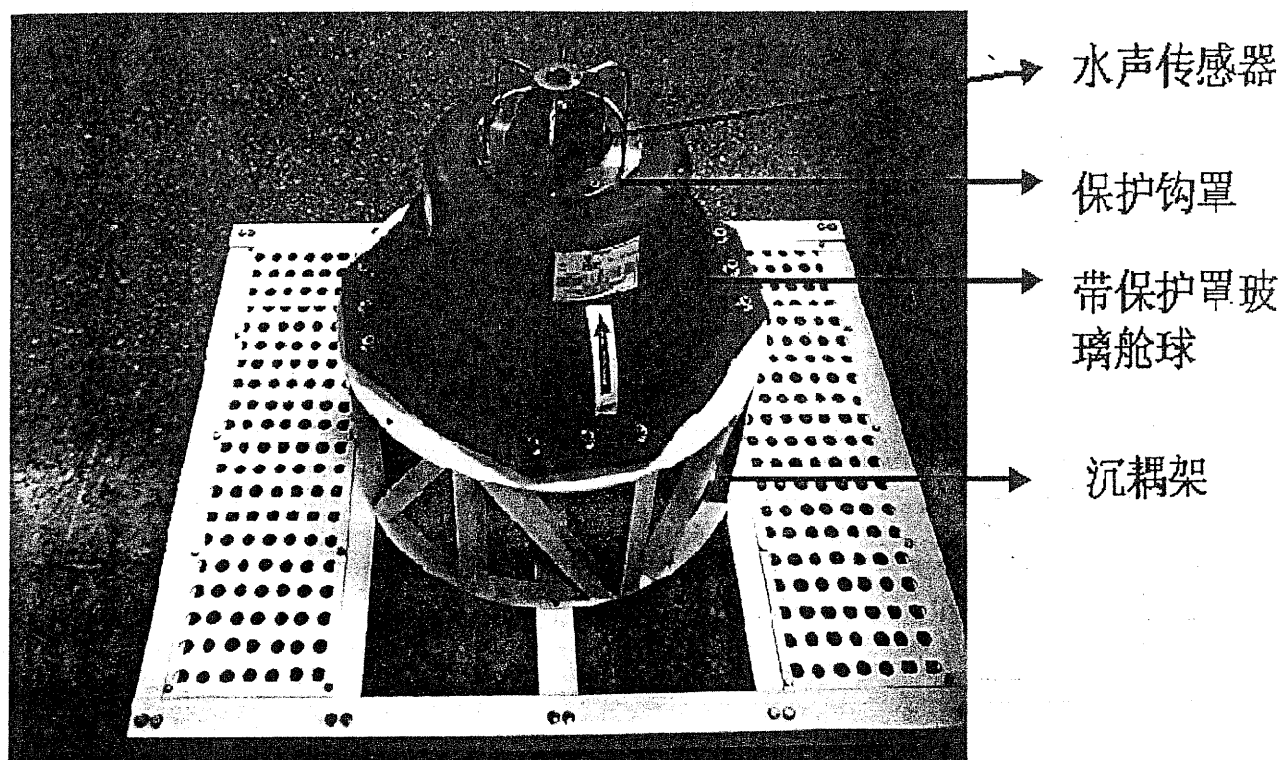


图 4.1 高频海底地震仪的总装效果图

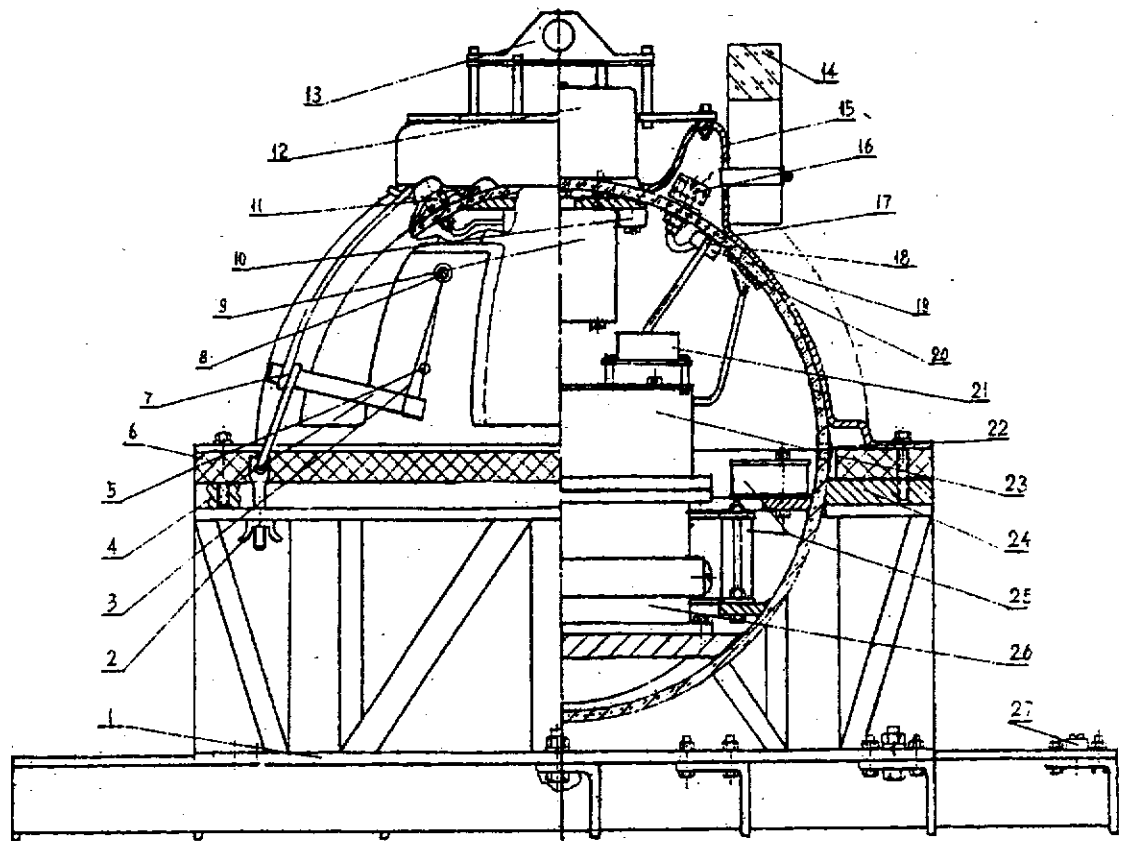


图 4.2 高频海底地震仪单球一体集成方案

- | | | | |
|----------|----------|-----------|----------|
| 1、高强度耦合架 | 2、刚联拴 | 3、不锈钢丝套 | 4、释放杠杆 |
| 5、电蚀负极 | 6、浮力环 | 7、绳套 | 8、释放正极 |
| 9、测距释放电路 | 10、磁罗盘 | 11、释放信号座 | 12、水声换能器 |
| 13、挂钩保护罩 | 14、闪光灯 | 15、ABS加强罩 | 16、数据座 |
| 17、高强玻璃舱 | 18、信标机天线 | 19、GPS天线 | 20、干簧管开关 |
| 21、信标机 | 22、密封条带 | 23、数字采集器 | 24、高强环 |
| 25、组合电源 | 26、姿控检波器 | 27、平衡重物 | |

4.4 短周期测震系统设计

高频海底地震仪的核心是短周期测震系统，它由短周期检波器和数据采集器组成。

4.4.1 短周期检波器

短周期检波器目前选用重庆地质仪器厂生产的 CDJ-2C2C 型垂直向和 CDJ-PC2C 型水平向速度换能检波器，自振频率 2Hz，检波器谐振频率大于 150Hz，温度试验符合设

计需要。

(1) 主要技术指标:

自振频率 $2 \pm 0.2 \text{ Hz}$

灵敏度 $200 \pm 2\% \text{ v}\cdot\text{s}/\text{m}$ (10~80Hz)

阻尼系数 $0.7 \pm 10\%$

线圈内阻 $6100 \pm 5\% \Omega$

谐波失真 $\leq 0.2\%$

绝缘电阻 $\geq 10\text{M}\Omega$

温度范围 $-25^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$

重量 400g

在订货时向厂家做出了详细的性能要求, 在收到供货后我们对每一个检波器的每个分量进行了严格的测试。包括了灵敏度、温度特性、幅频特性、各分量一致性等等。将未满足性能要求的个别不合格检波器退回厂家。保证了检波器的性能和质量。

(2) 检波器的安装

一般来说, 单分量的短周期检波器本身频响范围是很容易满足我们的需要。但测试发现, 安装的方式能强烈的影响检波器系统的频响, 对于垂直分量尤为明显。经过反复对比试验, 对于垂直分量检波器没有采用厂家的顶部安装方式, 而是采用了底部安装方式, 使检波器本身频响范围提高了 20 赫兹左右。

(3) 检波器常平架设计

为了保证 CDJ 型检波器动圈的平衡位置, 安装时其底座倾斜不能大于 1° 。在海底地震仪中, 检波器必须置于常平架上。常平架采用精密万向姿控结构, 高粘度硅油阻尼。由于采取了较精密的轴承支架和表面处理等措施, 能保证当海底倾斜 30° 范围以内检波器仍能正常工作。

由于有制作宽频带 (0.05~20Hz) 检波器常平架的成功经验, 同时 CDJ 型因为检波器较宽频带检波器倾斜度要求相对较低且体积较小, 检波器常平架设计较宽频带检波器难度相对较低, 加工进展顺利。影响常平架性能的因素主要有轴承支架的质量和引出信号馈线对水平面的作用力矩, 对这两方面因素在加工和安装中我们都特别注意。

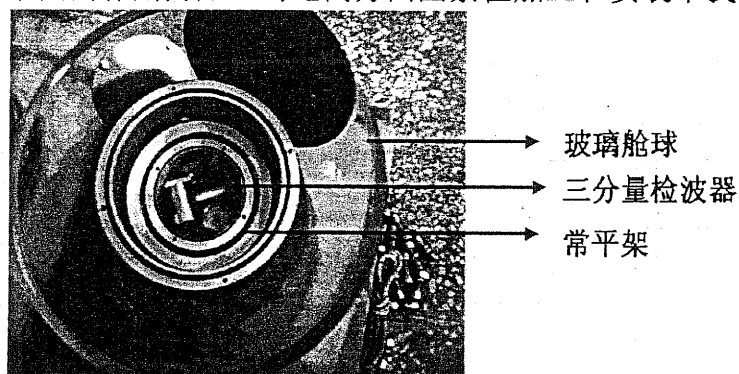


图 4.3 姿控检波器的安装图

4.4.2 微功耗数据采集器

微功耗数据采集器是在“九五”末期自主研发的 MC1 型微功耗数据采集器基础上改进的新一代大动态 (24 位) 微功耗 (0.3W) 数据采集器。它是海底地震仪自主研制

的主要的子系统, 由输入滤波前放电路、24 位模/数转换电路、逻辑控制电路、时钟服务电路、数据存储电路、网络接口以及电源管理电路组成。

仪器采用温补晶振构成的振荡电路作为内部时钟, 在 -10°C 至 60°C 温度范围内其精度优于 2×10^{-7} 。由于影响石英晶体振荡频率精度的主要是温度因素, 而海底的温度相对恒定, 所以时钟精度问题不大。另外, 为减小线路板的噪音, 系统所需的所有不同频率的时钟 (主要是模数转换时钟和单片机时钟) 采用对同一时钟分频获得。

数据存储采用数码相机和播放机上广泛采用的电子盘 (Flash Memory), 具有统一的 Smart Media 接口, 容量可从 1G 扩展到 8G 或更高。当今的采集器一般采用磁盘作为存储介质, 环境温度要求苛刻 ($5^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$)、在碰撞颠簸、电磁场干扰环境下数据易丢失。电子盘的采用有效的克服了这些弊病, 使数据存储的可靠性大大提高。但会导致高成本, 按当前器件价格, 成本上升 1 万元左右 (4G 字节)。

数据提取通过网络实现, 网络接口采用 TCP/IP 协议, 传输速度 10Mbps, 控制 PC 机采用德国 Jump Tech 公司的 DIMM-PC386I-EX, 它具有体积小, 功耗低等特点。

仪器的电源管理: 模拟电源部分摒弃了传统的 DC-DC 变换器对模拟部分电源进行隔离的方案, 采用了电荷泵、低压差串联稳压电路和高阶 $LC\pi$ 型滤波电路, 结合电磁屏蔽措施有效地抑制各种电磁干扰信号, 主要是数字电路对模拟电路的干扰。

4.5 脱钩机构

释放脱钩机构采用电腐蚀脱钩方案自行设计。在借鉴国外产品 (主要是美国 Benthos 公司 Tr6000 系列) 的基础上结合以往宽带海底地震仪的研制经验, 设计了脱钩机构方案。脱钩机构由刚联栓、不锈钢丝套、释放杠杆、电蚀负极、绳套、释放正极组成, 见图 4.2。

沉耦架和仪器舱经分别固定在两者上的绳套通过释放杠杆连接在一起, 绳套作用在释放杠杆的顺时针的力矩由不锈钢丝套平衡。当释放机构启动时, 电蚀负极和释放正极产生电势差, 不锈钢丝套和海水发生电解反应, 迅速腐蚀, 数分钟以后不锈钢丝套腐蚀断裂, 作用于释放杠杆的力矩不再维持平衡状态, 释放杠杆顺时针转动直至绳套滑脱, 仪器舱球上浮, 脱钩释放过程结束。

从上述过程我们可以看到, 整个脱钩过程是一个正反馈过程, 即不锈钢丝套腐蚀断裂后, 释放杠杆顺时针转动和仪器舱球上浮是一个相互促进的过程。释放杠杆所受的初始力矩愈大、仪器舱球上浮力愈大, 整个脱钩释放过程越迅速越可靠。

但是从另一方面看, 仪器舱球上浮力是几乎固定的, 释放杠杆所受的初始力矩越大, 在海底期间不锈钢丝套所受的拉力也将增大, 这对不锈钢丝套的强度提出了更高的要求。不锈钢丝套一旦非正常断裂, 会使仪器不按计划上浮, 造成丢失仪器的严重后果。

根据以上分析, 我们认为这种方案从理论上是可行的也曾经受过实践的检验, 但在实施中必须注意以下的环节:

(1) 反复试验确定不锈钢丝的抗拉强度及其一致性。(2) 尽量增加释放杠杆的长度, 减轻不锈钢丝所受的拉力。(3) 尽量增加不锈钢丝的直径, 对其抗拉强度要求留出充分的余量。(4) 在投放时需要精心施工, 减少仪器搬运作业过程中的震动对不锈钢丝的额外拉力。

释放机构的可靠工作是海底地震仪能否成功的关键环节。所以释放机构是水上模

拟试验需要反复检验的关键环节。

4.6、水声通讯及释放电路

水声通讯及释放电路是实现仪器成果回收的关键部分,对于我们由于有“九五”海陆联合观测的实践经验,始终将这一环节的研制作为研制工作的重中之重。

4.6.1 水上通讯机 TT301B

水上通讯机 TT301B, 是法国 OCEANO 公司新型的深海水声通讯的甲板机, 能与该公司生产的所有系列和信号的水声通讯产品配套使用。我们使用的主要是其两个功能:

- (1) 发射 4 字节的编码信号实现海底地震仪的释放回收控制。
- (2) 接收海底地震仪水声应答信号给出发射后回收信号的时间间隔, 或通过乘以内置的水声速度 (1495 米/秒) 实现测距功能。

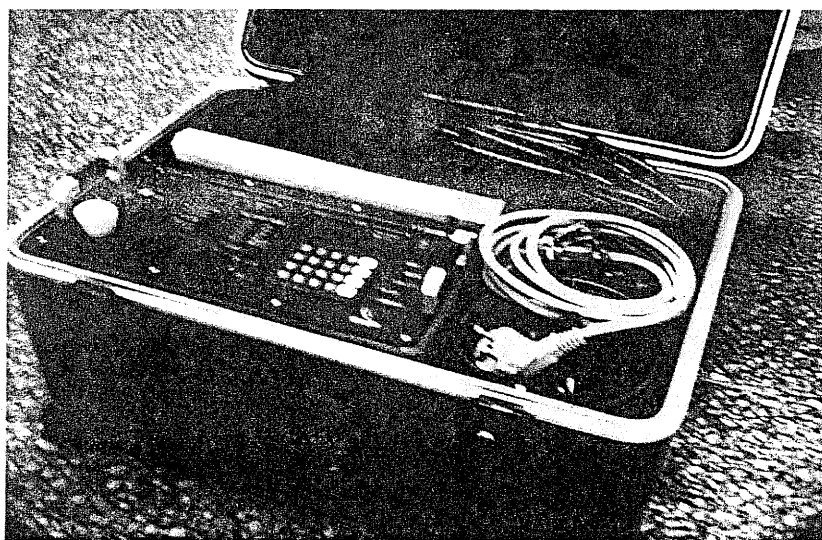


图 4.4 水上通讯机 TT301B 实物图

4.6.2 水下通讯机 ET361

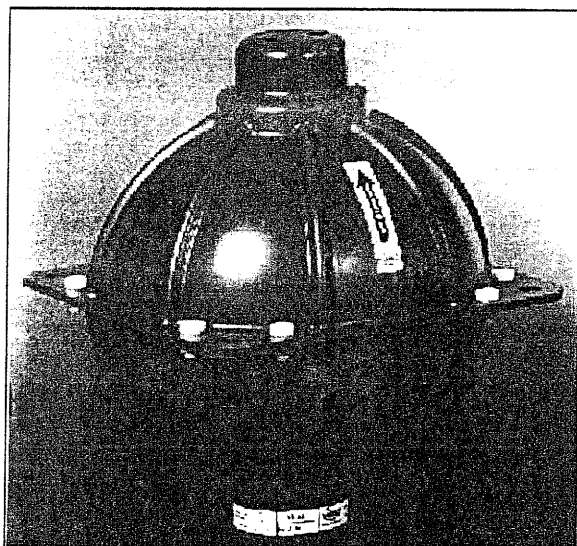
水下通讯机 ET361, 是法国 OCEANO 公司二十世纪九十年代的产品。是我们经过反复调研, 认为性价比最为理想的海底水声通讯设备。ET361 水声测距应答释放器特征如下:

- 低成本
- 双独立应答通道
- 具有内置的中继功能, 适应于快速台网测量
- 可水声控制开启应答功能
- 可靠的 FSK 命令编码 (超过 30,000 独立码字)
- 在整个电池寿命期间工作稳定
- 在较好海况环境下, 工作距离超过 10,000m
- 无外置电源开关

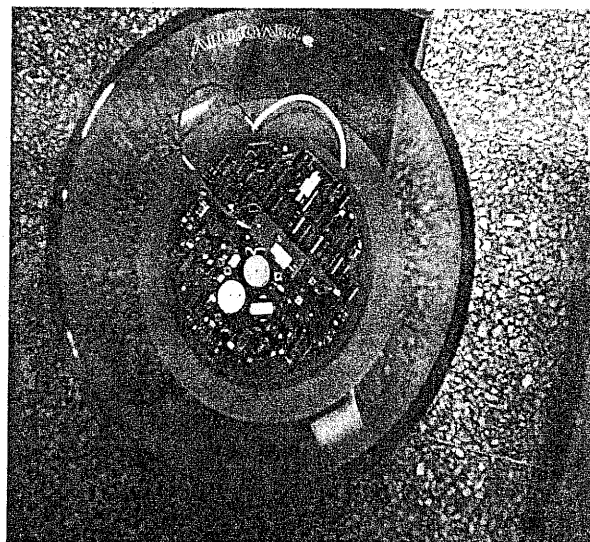
- 无需外置浮力材料
- 单电路板, C-MOS 微功耗设计

表 4.3 ET361技术指标

最大工作水深	6,000m
最大工作时间	5年
工作温度	-5°C to + 50°C
储存温度	-40°C to + 70°C
接收频率	双频点, 7到18KHz可调
最小接收脉冲	6ms
接收频率带宽	200Hz
最小可检测信号	80dB ref, 1u Pa
命令字	FSK 8比特字 (8脉冲)
命令字持续时间	710ms
应答间隔	8秒
脉冲宽度	10m
发射功率	192 $\pm$ 3 dB ref. 1 μ Pa at 1 m



(a)



(b)

图4.5(a) ET361产品外观图

(b) ET361 水声通讯在 OBS 中的安装内部图

4.6.3 水声释放功能的实现

(1) 水声释放触发电路

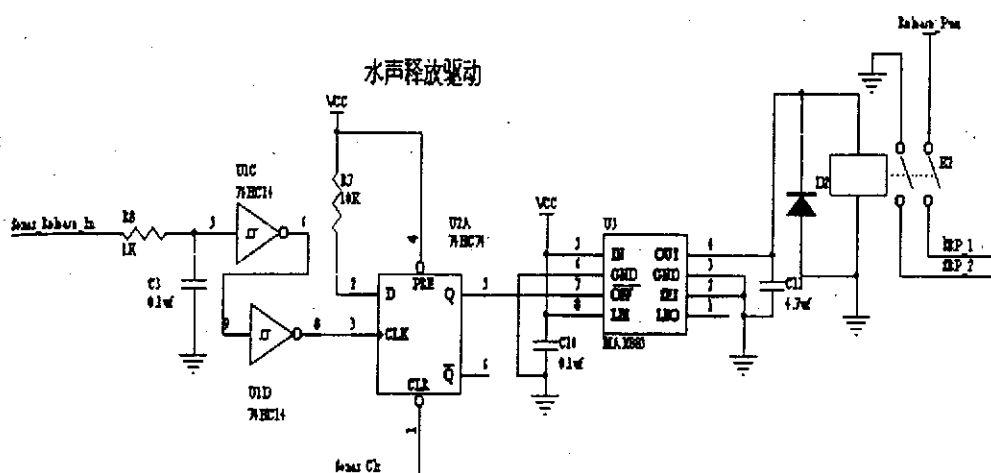


图 4.6 水声释放驱动原理图

接收到释放信号后 ET361G 输出的是一个脉冲，长度为 1~7 秒，远远不能满足电解腐蚀释放的需要。为此必须添加附加电路。R8 和 C3 组成了 RC 滤波器，防止干扰脉冲引起的误触发，经过 U1C 和 U1D 施密特触发器整形上升沿加到 D 触发器 U2A 的 CLK 端，D 触发器被触发，5 脚输出为高电平。触发低压差串联稳压 U3 MAX883 输出 5V 的电压驱动继电器吸合，执行脱钩操作。

由于采用了 D 触发器无论水声释放输出了几次信号，D 触发器 U2A 的输出端均能保持高电平。D 触发器的清零端 (Sonar_Clr) 受 MPU 的控制，为防止加电瞬间引起的误操作，在控制系统初始化时将 D 触发器的清零端置位。在执行脱钩操作持续了设定的时间以后（一般为 10 分钟），为了降低功耗和保护继电器，D 触发器的清零端也将被置位，使电解腐蚀脱钩机构停止工作。

(3) 电解腐蚀脱钩机构

脱钩机构主要有电机驱动脱钩方式和电腐蚀脱钩方式两种。我们采用电腐蚀脱钩。其主要原理为，将固定舱球与沉耦架上的不锈钢丝作为电化学反应的负极，脱钩电路导通后，在阳极和不锈钢丝之间在电场的作用下发生氧化-还原反应。在负极不锈钢丝的铁原子被氧化，失去电子转化为铁离子，不锈钢丝不断被腐蚀变细，直至最后断裂。如上所述，玻璃舱球在自身浮力的作用下上浮，实现脱钩。电腐蚀过程中的电流强度一般在 300mA 左右，持续时间一般在 3~5 分钟。

4.7 微功耗电子系统集成方案

在高频海底地震仪设计中，大量采用了功能模块，而且所有模块都是由高性能 32 位单片机统一控制，而每一模块又有相对独立的功能和机构。电子系统集成方案具有高集成度和统一接口两大特点。

高集成度是指 OBS 的所有电子模块都由数据采集器中的 32 位单片机统一控制，形成了一个有机的整体，每一功能模块又具有相对独立的结构。方案中所有的逻辑控制

基本由单片机的 I/O 端口控制, 由软件开发实现; 所有模块的数据输入输出端口都与单片机相连, 由单片机的相应端口与其进行数据交换, 通讯过程由软件控制实现。这一方案降低了整个系统的复杂程度, 提高了系统模块化水平和可靠性、缩小了体积、降低了功耗。

统一的通讯接口是指所有的外购功能模块(包括 GPS 模块、信标机数传模块、电子罗盘模块)都是以相同 RS-232 协议与单片机通讯, 以多路开关方式实现分时复用。这为功能模块的选择提供了很大的空间。所选择的这些 OEM 功能模块产品具有规范的电气接口、标称指标真实可靠、工作性能稳定, 具有良好的电磁兼容性、性能价格比高等特点, 并且作为成熟的产品都有方便的供货渠道、完善的售后服务和接口一致的后续产品等等, 这些特点使其很适合作为高技术集成项目中的功能模块被采用。实施自主研制开发方式, 采用新型的、高性能、高集成度的器件及功能模块能有效的提高仪器的研制的效率, 缩短研制周期, 并有助于提高仪器的可靠性、降低研制和生产成本, 便于从研制样机到产业化转化的实现, 同时也有利于仪器以后的进一步改进完善以及升级换代。电子系统集成方案见下图 4.7。

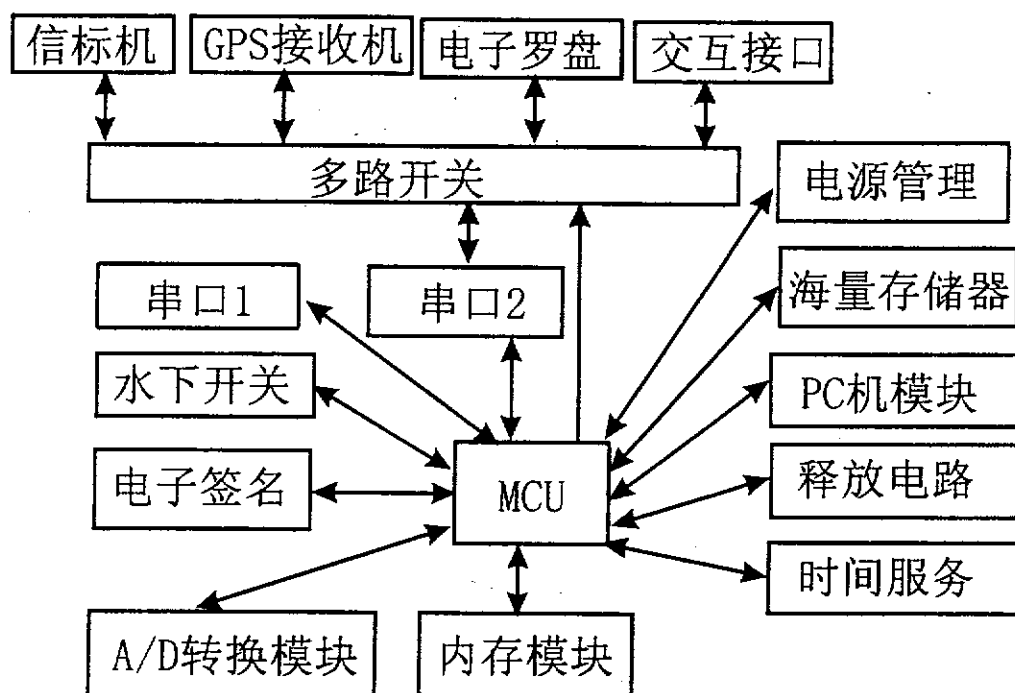


图 4.7 高频海底地震仪电子系统框图

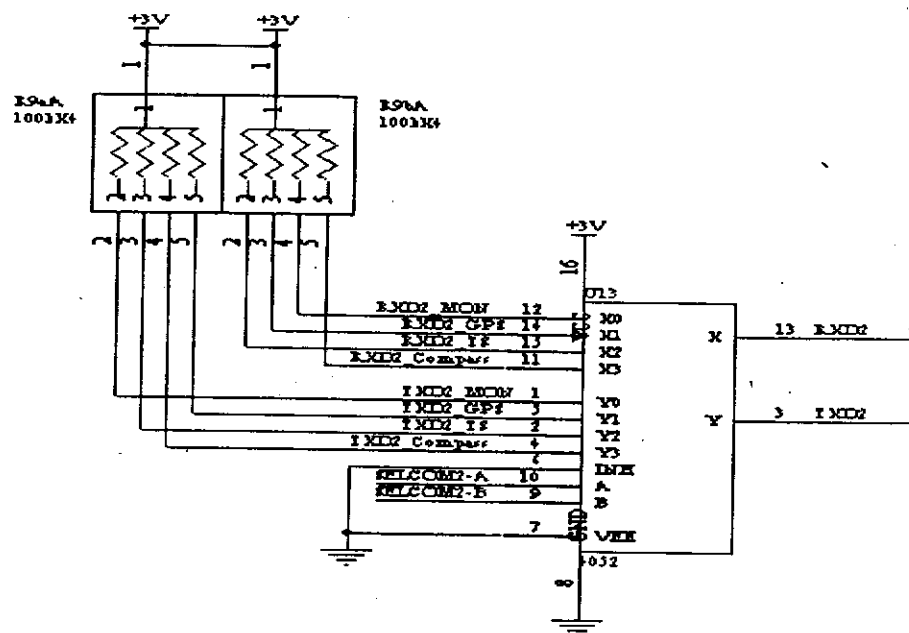


图 4.8 采用多路开关 4052 实现串行口分时复用电原理图

74HC4052 为双路的四选一模拟开关, SELCOM2-A 和 SELCOM2-2 为来自于单片机 (MPU) 的控制信号。下表 4.4 为 SELCOM2-A 和 SELCOM2-2 的值对应于与 MPU 连接的功能模块关系。

表 4.4 4052 的 A、B 值与选通模块关系

SELCOM2-A	SELCOM2-B	选择功能
0	0	交互接口
0	1	GPS 信号
1	0	数传模块
1	1	电子罗盘

4.7.1 时控释放器电子线路设计

时控释放器与水声释放器串联使用, 该模块作为水声释放系统的补充, 当水声释放器失灵时, 可按预先设定时间启动时控释放器。它由单片机中的实时钟 (RTC) 单元、I/O 端口 和电流驱动器电路组成 (如图所示)。逻辑操作由软件控制。

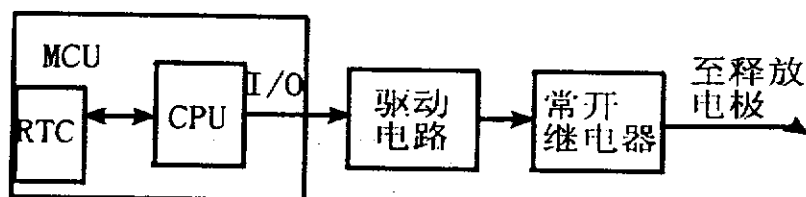


图 4.9 时控释放器原理图

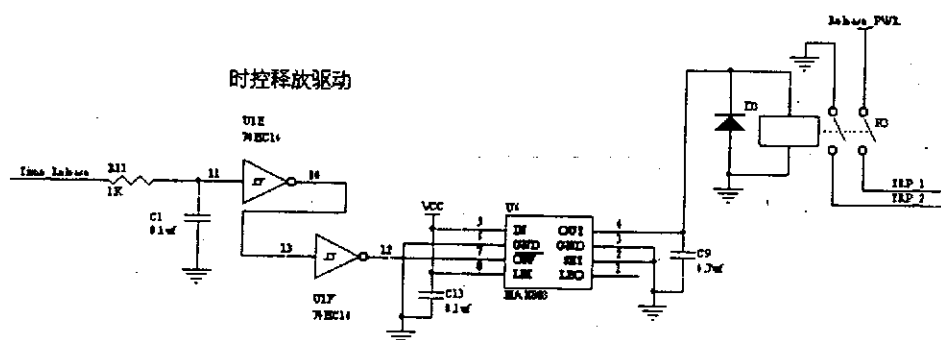


图 4.10 时控电路电原理图

当 MPU 监视到实时钟 (RTC) 到了预设的释放时间。Time_Release 端被置为高电平。R11 和 C1 组成了 RC 滤波器，防止干扰脉冲引起的误触发，经过 U1E 和 U1F 施密特触发器整形，触发 U6 低压差串联稳压芯片 MAX883，输出 5V 的电压驱动继电器吸合，执行脱钩操作。

4.7.2 电子水下开关设计

电子水下开关作为无线电信标机和频闪灯的控制开关，当海底地震仪浮出水面后，使信标机、频闪灯工作。

水下电子开关原理是根据海水和空气的电导率的巨大差异，检测贴在玻璃球顶部两个电极之间电导率变化来判别设备是否浮于海面之上，通过多次检测来避免短时海浪淹没电极所造成的误判断而使电子开关启动，工作原理如下：

在系统收到释放信号（水声或时控信号）后系统定时打开两电极的继电器，电极的电压降由于海水和空气的电导率的巨大差异而有较大的差异，在海水中为低电平、在空气中为高电平。通过斯密特触发器将信号整形和去掉后，输入 MCU，整个控制逻辑由 MCU 软件实现。为了防止海水对电极的腐蚀，电极平常用常开继电器隔离。

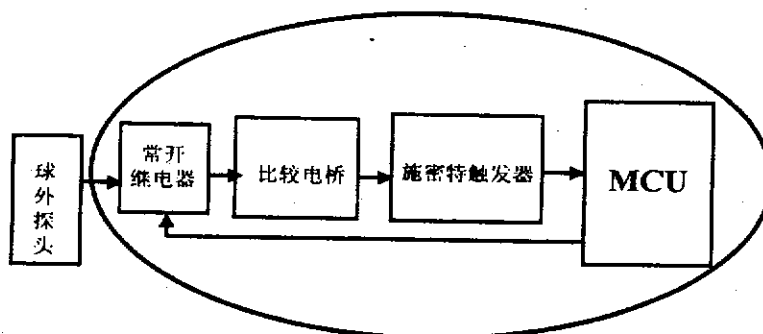


图 4.11 水下电子开关框图

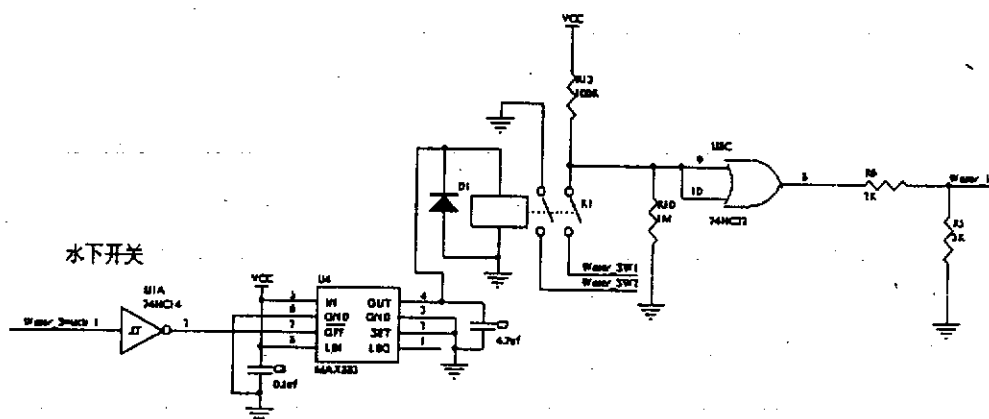


图 4.12 水下电子开关电原理图

4.7.3 GPS 接收机设计

GPS 接收机由 OEM 模块、备份电池、配套高增益微型天线和电源控制部分组成（见图 4.13），其功能是，投放前设定系统时间和投放点坐标；回收时接受仪器坐标信息并记录系统钟差。采用了 Motorola 公司 M12 OEM 模块。它是业界目前功耗最低的模块，除了具有体积小、重量轻、功耗低、定位快、抗干扰能力强等特点外还具有独特的无线检测电路、射频信息抗干扰、熔丝保护功能，并能支持逆向差分和用户自定义坐标输出。与同类国外其他知名公司产品对比，其性能，特别是微功耗优点相当突出。GPS 接收机主要技术指标见表 4.5：

表 4.5 GPS 接收机主要技术指标

接收器结构	12 并行通道, C/A 码+载波跟踪
定位时间（自动搜索）	60Sec
位置精度	25m (RMS)
秒脉冲精度	500nSec
速度精度	0.1m/s
尺寸	40 *60 *10
重量	25g (天线<40g)
电源规格	2.75 至 3.2Vdc, 纹波峰峰小于 50mV
功耗	0.225W, 不含天线 20mA
输出信息	经纬度、时间、高度、航向
串口通讯	Motorola 制 9600bps NMEA0813 格式 4800bps
操作温度	-40~85°C

GPS 工作模式设置为 Motorola 制 9600bps 格式, 数据每 15 秒刷新一次。取每次输出的前 63 个字节数据读取, 包含日期、时间、经纬度、移动速率、可视卫星数、锁定卫星数等信息, 当可视卫星数、锁定卫星数超过 1 时, 时间信息有效, 可执行比时钟误差操作。回收时当锁定卫星数超过 3 时, 经纬度信息有效, 超过 6 时数据比较准确可通过, 无线数传模块发射。

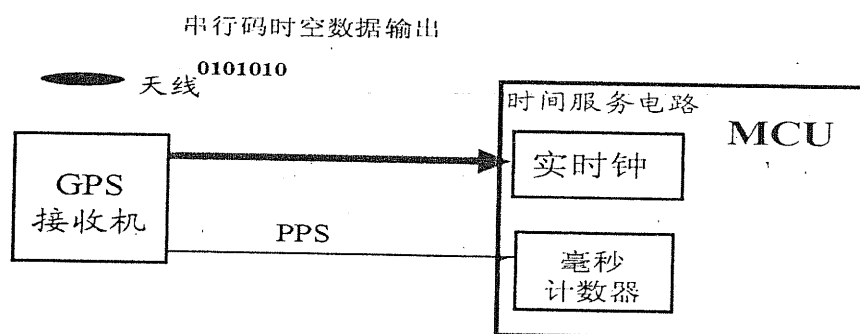


图 4.13 GPS 接收机框图

4.7.4 无线电信标机设计

无线信标机用于海底地震仪浮出水面后的搜寻。无线信标机原理如图 4.14 所示。

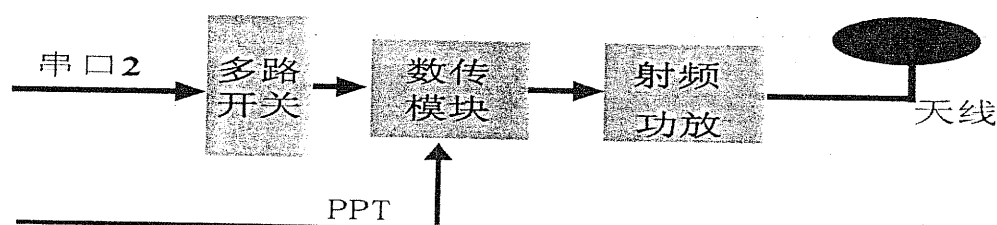


图 4.14 无线信标机原理框图

为保证数据收发正常, 在模块发射数据时应在 PTT 置低电平后, 约 50 毫秒或更长再将数据 DATA 送入数据输入端口 DATA IN, 数据发送完毕后 PTT 再应延时约 30 毫秒置为 TTL 高电平。电平的 PTT 时序如下:

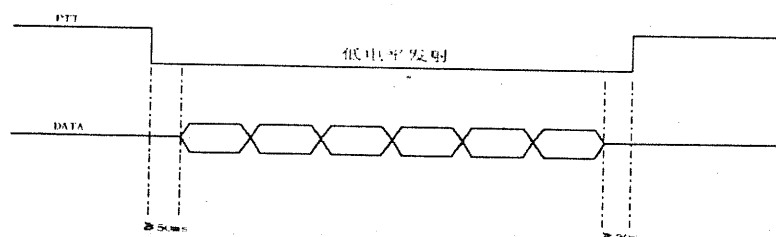


图 4.15 数传模块发射时序

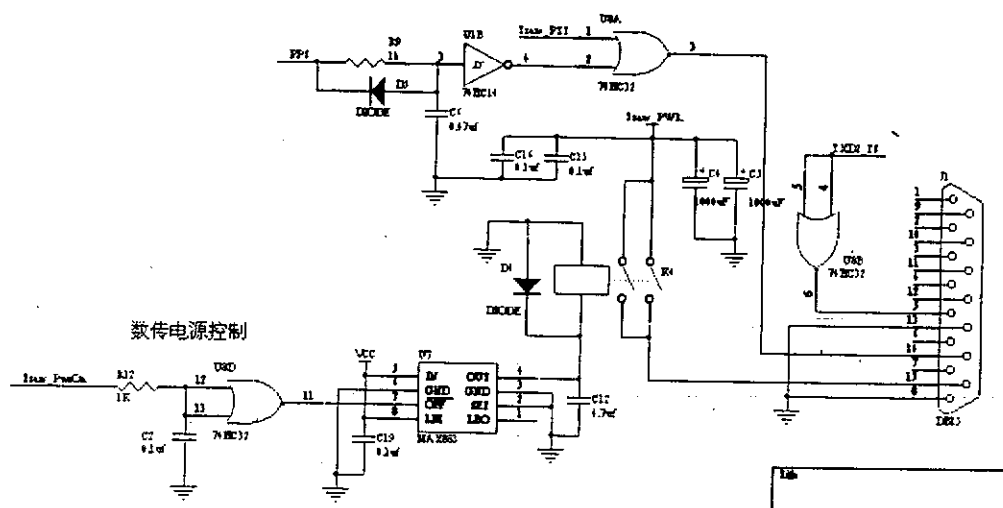


图 4.16 无线数传控制电路原理图

(1) 硬件设计

无线数传模块采用在深圳泰达鑫公司定制的 OEM 产品。其发射功率为 5W，有效距离约 5-10Km 左右。与 GPS 联合使用，定位精度可达数十米以内。考虑到无线数传模块内置于玻璃舱球内空间的限制采用 50 欧 450MHz 鞭装胶套天线与发射机配套；接收系统几乎不受空间的限制所以拟采用 50 欧 12dB 高增益国外原装天线与接收机配套。无线数传模块调制方式采用 FSK（频移键控）方式，抗干扰能力强。为进一步提高抗设备干扰能力，通讯速度采用较低的 1200bps。通讯协议为 RS232 格式：1 位起始位，8 位数据位，偶校验，1 位停止位。

表 4.6 无线数传模块的主要性能指标

A 综合指标	
工作频段	450MHz
频率容差	5ppm
信道间隔	25KHz
天线阻抗	50 欧
工作温度	-20~60°C
传输速度	1200bps
调制方式	FSK
B 接收指标	
可用灵敏度	<-120dBm
剩余电平输出	<45dB
互调抗扰性	>60dB
杂散响应抗扰性	>60dB
C 发射指标	
发射功率	5W
杂散射频分量	<-60dB

调制失真	<3%
电源电压	12V
静态电流	<50mA
尺寸	96*58*17mm
重量	198g
发射时工作电流	<1.8A
频点数	256

由于通讯距离受环境因素的影响较为复杂,有限的数次试验未必能得到可靠的数据,应在理论计算的基础上进行实际测量、验证。通讯距离估算采用在寻呼行业中普遍采用的Egli模型,Egli模型是根据理论计算和大量实测结果归纳出的中值预测公式:

$$40\lg d = LP - 88 + 20(\lg ht + \lg hr - \lg f) + G$$

式中LP为路径损耗,(因为发射功率为37dB(5W)接收机可用灵敏度为-120dBm, $LP = 37 - (-120) = 157\text{dB}$),d为通讯距离,ht和hr分别为发射和接收天线的高度,f为工作频率450MHz。hr受地形起伏的影响,设ht为0.2米,hr为10米,G因子忽略不记,传输距离d为3.5公里;若设ht为0.3米,传输距离d为4.3公里。Egli模型为平面大地模型,据经验海面上的传输距离在其计算数值的1倍左右。同时通过计算可以看出传输距离对发射机的天线高度非常敏感。由于在方案中发射机天线内置于球内,安装高度受到极大限制。为此考虑采取以下措施:(a)减轻回收重量(b)天线贴近球壁安装(c)通过配重使回收时天线位于球的顶部。

(2) 无线电信标机通讯协议的设计

编码方式采用BCH(21, 31)码具有较高的纠错能力。BCH属于线性分组码中的循环码。前21位为信息位,后10位是附加校验位。其生成多项式为:

$$g(x) = x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^3 + 1$$

BCH(21, 31)码能保证纠正一个码组内发生的任意两错误比特,可将每个码字的传输可靠性提高近两个数量级。编码效率为66%。

交织编码技术能够有效减少突发性干扰引起的误码,其原理为将待发数码按列排成矩阵,再按行的顺序发送,如信道中因突发性干扰发生连续误码,解交织的误码被分散到不同码字能被BCH有效纠错。

采用Flex同步机制可减少前导同步码,有效的减少发射的时间,提高发射效率;同时避免电池在连续大电流放电引起“极化现象”。在大功率发射的条件下保证信标机的有效工作时间。Flex同步机制具有全同步特性,因此,发射机在发送每一帧时,不需要特别地通知接收机“一次发送已经开始”。发送和接收没有必要在每一帧都重新的建立同步,只要保证必要的同步跟踪即可。具体地说,每次发送和接收的起始时间,当仪器上和甲板上同一型号的GPS在锁定足够卫星的前提下,由GPS输出PPS的下降沿确定。

(3) 传输数据格式

传输数据包括前导同步码、仪器编号、经纬度、仪器上浮出海面的时间。

4.7.5 电子罗盘的设计

电子罗盘的功能是为海底地震仪提供水下方位角。

电子罗盘采用TOPTEAM TECHNOLOGY公司TDCM微型电子罗盘模块。它通过串行接口向主系统提供罗盘方向,其功耗几乎可以忽略不计。其内置自动校准算法可改正由于

周边铁磁物质磁场变化而引起的误差。电路如图 4.17 所示,其主要技术指标见表 4.7。

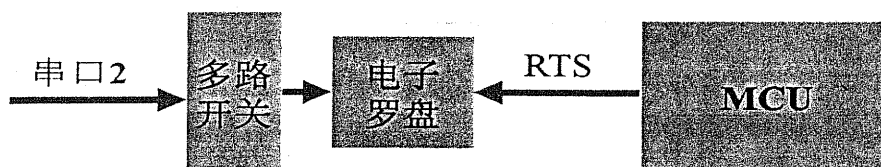


图 4.17 电子罗盘集成原理图

表 4.7 电子罗盘主要技术指标:

精度	3°
分辨率	0.5 °
重复度	3 °
特征	干扰检测、自动校准算法
操作温度	0 °C~70 °C
尺寸	19*19*4.5mm
电流	0.2mA
供电源	3V

电子罗盘输出的数据格式为: 状态字节 + θ_M + θ_L 。
 $\theta = (\theta_M * 256 + \theta_L) / 2$; θ 为系统与北极的夹角。

4.7.6 看门狗(Watch Dog)设计

看门狗电路在工作于恶劣环境中的工业控制设备中被广泛采用,它能在系统受到突发、偶然的干扰出现状态混乱、不能正常工作时将系统复位,重新工作(类似于 PC 机死机后按“Reset”键的效果),使系统工作不中断,提高系统的持续工作能力。

在本方案中利用单片机内置的 Watch Dog 模块,通过软件控制,使系统在“死机”后的一秒钟内能自动重新复位。在具体的实现过程中,需要注意及时保存系统状态参数,保证即使系统复位后仍能连贯的运行,将其停顿造成的影响减至最小。

4.7.7 电子签名模块

采用专用集成电路,由单片机端口直接通讯,及时存储当前的系统工作状态,以备系统复位后调用,同时提供电子签名验证,并可提供当前的环境温度。

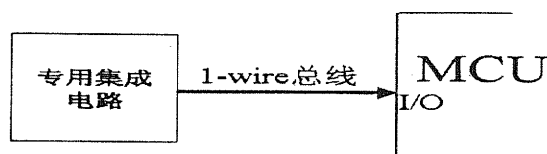


图 4.18 电子签名模块原理图

4.7.8 频闪灯

频闪灯是唯一独立于球外的电子模块。它与“九五”期间的宽带海底地震仪的体积、结构基本相同。采用水压开关控制,仪器上浮到海面后,如果外界光线较暗,频闪灯能以固定频率闪烁,并能连续工作 12 小时以上。

4.7.9 数据提取方案

为了保证海上的多次作业顺利进行,数据提取模块必须操作方便并且需要较快的传输速度。

(1) 硬件设计

数据提取模块的硬件由 FIFO (先进先出) 存储器、芯片 PC、10M 网络适配器组成,如图 4.19 所示。工作流程如下:单片机将 Flash Memory 组中的数据顺序读出,通过数据总线写入现进现出(FIFO)存储器,芯片 PC 通过 ISA 总线将现进现出(FIFO)存储器中的数据读入芯片 PC 内存;外部的电脑用双绞线与芯片 PC 内嵌的 10M 网络适配器与芯片 PC 通讯将数据读出。

单片机的数据总线与芯片 PC 的 ISA 总线通过 FIFO 存储器相连,省去了地址操作,简化了电路,实现了数据的块传输,提高了速度。

外部计算机与地震仪通过 RJ45 插头相连,可靠通讯距离在 100 米以上,有很强的抗干扰能力,适用于海上作业时甲板上的复杂环境。

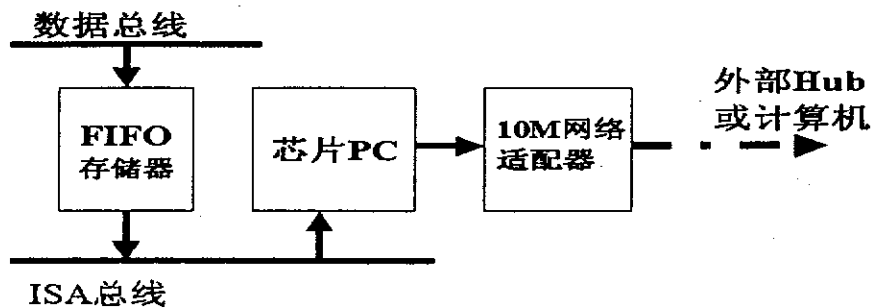


图 4.19 数据提取模块的框图

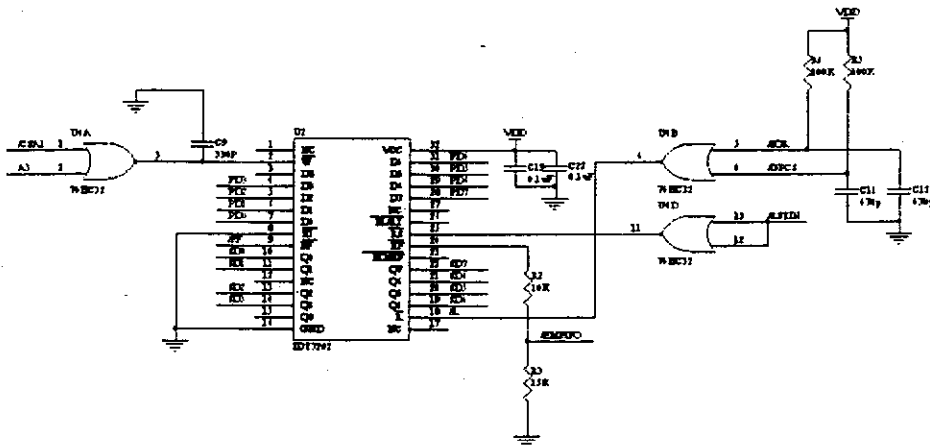


图 4.20 数据提取电原理图

(2) 软件设计

单片机和芯片 PC 机之间利用 FIFO 存储器特有的“EF (Empty FIFO)”和“FF (Full FIFO)”管脚建立握手信号。当单片机查询到 EF 管脚有效时将数据写入 FIFO 存储器，然后从 Flash Memory 中读取数据后，等待 EF 管脚下一次有效。当芯片 PC 机查询到 FF 管脚有效时将数据从 FIFO 存储器读出。然后通过网卡发出请求信号将数据传出。这种设计使单片机和 PC 机都处于接近满负荷的工作状态，减少了查询等待的时间，提高了数据传输的速度。

芯片 PC 和外部计算机（或 Hub）构成了一个最简单的局域网络，为了使芯片 PC 和外部计算机的网卡都有成熟的驱动程序，网络协议的网络层（Network Layer）和传输层（Transport Layer）采用在 Internet 互联网上通用的 TCP/IP 协议。为了提高数据传输速度，利用 Socket 接口提供的 TCP/IP 网络的 API 在芯片 PC 和外部计算机之间建立起 C/S (Client/Server) 结构。为了保证数据传输可靠性需要使用面向连接的协议。外部计算机通讯软件采用 Borland 公司 Delphi5.0 编制，利用其提供的 TServerSocket 建立起服务器程序接收从芯片 PC 机传来的数据。为了提高速度将其设置为阻塞（Blocking）方式。芯片 PC 机采用 Microsoft Network Client 3.0 软件在 Dos 环境下提供 TCP/IP 协议堆栈。利用 Sockets 程序提供的 Winsock1.1 接口在芯片 PC 机建立客户程序。芯片 PC 机通讯软件采用 Borland 公司 BC++3.1 编制。客户程序同样设置为阻塞（Blocking）方式。

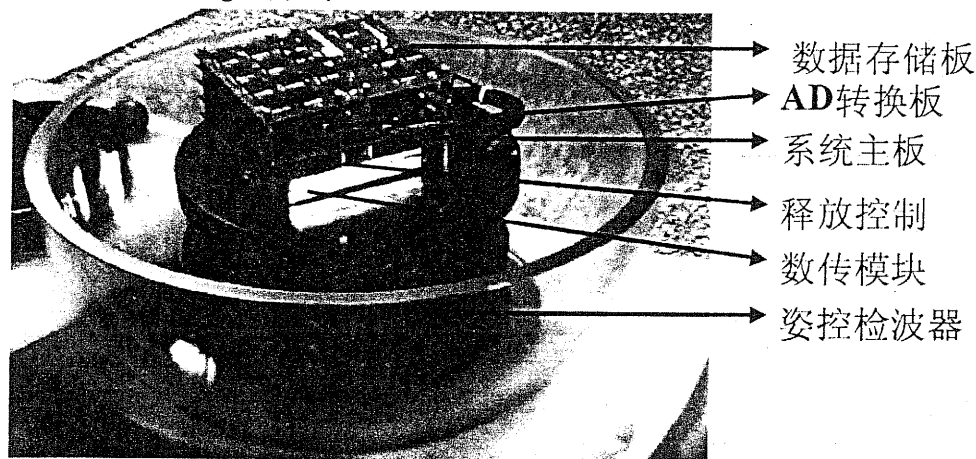


图 4.21 电子集成系统的安装图

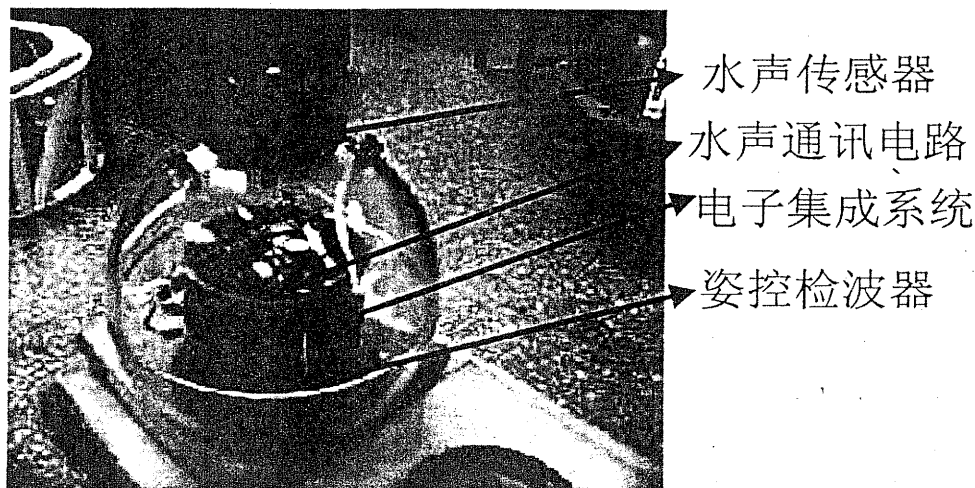


图 4.22 高频地震仪玻璃舱球的总装图

4.8 高频海底地震仪软件设计

4.8.1 地震仪系统软件

地震仪系统软件源代码为 C 语言结合少量汇编语言编制而成, C 语言源代码易读性好, 运行效率较高, 便于调试和升级。软件采用功能模块化结构, 按照功能共分为以下几个模块:

表 4.8 地震仪系统软件功能模块列表

功能	名称	内容
主控模块	Main.c	定义全局变量和主函数 main {}
初始化模块	Init.c	初始化所有全局变量; 初始化全部十组 I/O 端口
GPS 模块	GPS.C	控制 GPS 开关、信息读取
时间服务模块	Time.c	实时钟操作(读、写)
数据转换模块	AD.c	数据采集和存储
特殊功能模块	OBS.C	控制时空释放、水下开关、数传模块、系统钟差记录等等与海底地震仪特有的功能函数
测试模块	Test.c	人机交互完成各个模块的测试和参数设置
SPI 模块	SPI.c	提供 SPI 操作的低层接口, 供其它模块调用
串行通讯模块	UART.c	提供串行操作的低层接口, 供其它模块调用

在以上的模块中除了测试模块 (Test.C) 和特殊功能模块 (OBS.C) 外, 其它模块

都是从 MC1 型微功耗地震仪的控制软件移植而来。

4.8.2 PC 机测控软件

由于海上工作环境的特殊性,仪器必须有较方便的测控方式。交互测控模块必须具有以下功能(1)启动仪器对各个模块的功能进行自检,并显示结果;(2)提供仪器的当前状态;(3)方便的进行必要的参数设置,如采样率、时控释放时间、采集延时时间等等。

本设计通过玻璃舱球上的插头,单片机和外接笔记本电脑通过串口进行通讯,实现人机交互式仪器的测试和控制。

(1) 仪器自检测试功能

- 闪存容量
- 电子罗盘读数
- 开启GPS,并读取信息
- 开启水下开关,读取状态
- 时控释放器自检
- 水声释放器输出状态
- 数传模块发射测试
- 温度、电源电压显示
- 实时波形显示
- 网络传输测试

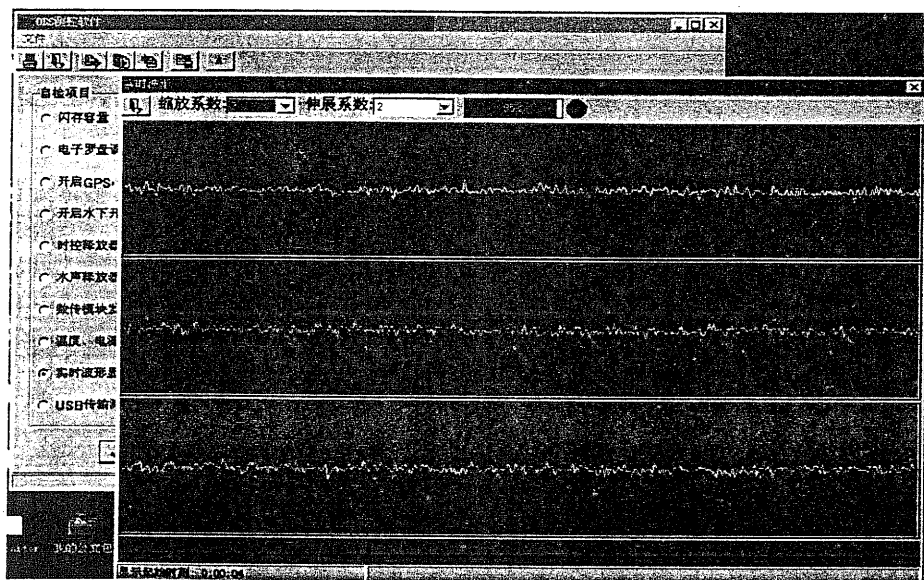


图4.23 PC机测控软件测试采集信号波形

(2) 参数设置的内容

- 仪器编号
- 采样间隔(毫秒)
- AD启动延迟时间(小时)
- 最短工作时间(天)

- 时控释放启动时间
- 时控释放电流持续时间 (分)
- 数传模块发射间隔时间 (秒)

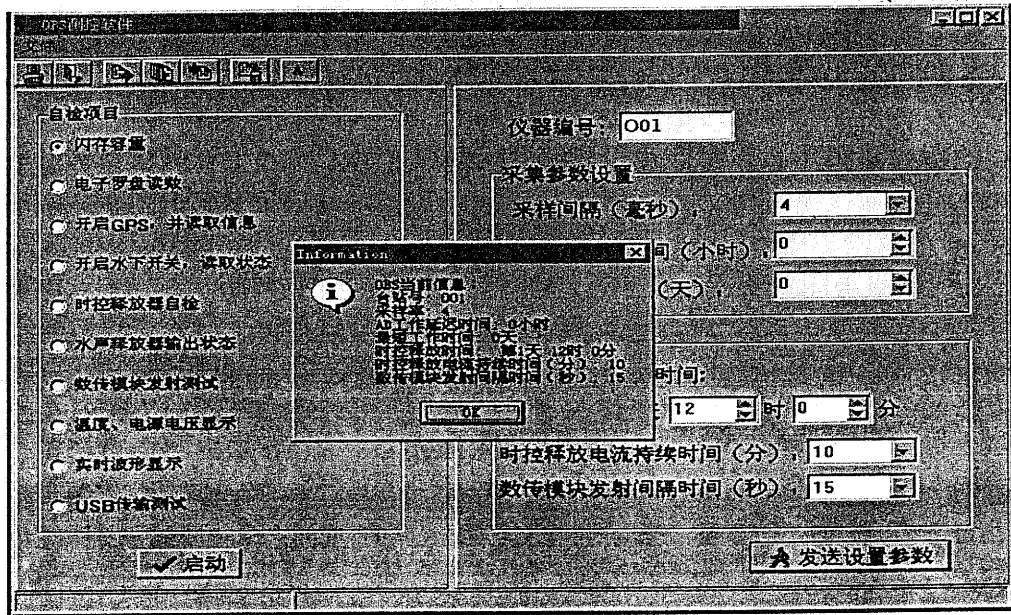


图 4.24 PC 机测控软件参数设置回显

结论和展望

古人云：“欲善其事，必先利其器”。这个道理在以观测、试验为基础的地球物理科学研究中体现得尤为充分。没有通过仪器的观测，获得研究区域和对象可靠、充分的观测数据，任何的理论和技巧都不能为我们提供真实的科学的结论。

地震学是地球物理中重要的分支学科，对地震信号乃至地动信号的获取和分析是我们研究地球内部结构的主要方式。性能稳定、记录可靠的地震仪器是从事地震学研究的技术支撑和物质保障。在一定程度上也是制约我们发展的瓶颈之一。解决这个问题一方面需要积极引进国外先进的设备和借鉴野外观测的技术方法。同时，更重要的是在引进和借鉴的同时提高我们自主开发、积极创新的能力。

地震仪器的国产化研制，是一项很有现实意义又富于挑战性的长期工作。在刘光鼎院士，刘福田研究员等前辈科学家的支持和鼓励下，我近年的工作仅仅是一个初步的尝试。我希望能将此项工作延续下去，为地球物理的观测事业尽绵薄之力。