

DCM-1 型数字地磁脉动观测系统

周军成 周 勋 程安龙
安郁秀 韩克礼 郑沙樱*

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

DCM-1 型数字地磁脉动观测系统,是为开展地磁测深及地磁脉动观测工作而研制的。该系统由高灵敏度磁通门磁力仪、多路数据采集器、盒式磁带记录与回放器,以及时间服务装置等部分组成。系统具有大动态、低噪声、高精度、低功耗,以及操作简单、使用方便等特点。系统可直接与计算机接口,也可直接回放进行模拟恢复。利用该系统进行了多次野外观测,取得了较好的野外观测资料,并显示出比进口的模拟系统能记录到较为丰富的信息^[1]。

一、前 言

地磁测深是探测地下电性构造及其震前异常变化的重要地球物理方法之一,它对于研究震磁关系及地震成因具有重要意义。DCM-1 型数字地磁脉动观测系统正是为广泛开展地磁测深研究工作而研制的。地磁测深所涉及的地磁场变化的频谱很宽,一般从几赫兹的频率至上万秒的周期,变化幅度也很大,从百分之几 nT 直至上千 nT。因此,仪器应能满足高灵敏度、宽频带、大动态、高分辨率和高精度的要求,还要求仪器能适合野外工作条件。我们研制的 DCM-1 数字地磁脉动观测系统能较好地满足这些要求。

DCM-1 型数字地磁脉动观测系统的研制成功,改变了我国尚无自制的数字化地磁脉动观测仪器的状况,为广泛开展地磁测深和地磁脉动观测提供了条件。

我们研制的 DCM-1 数字地磁脉动观测系统具有以下几个主要特点:

1. 仪器的磁场探测器——磁通门磁力仪,噪声低和灵敏度高。仪器的数据采集记录系统,动态范围大、精度高,因此,仪器可以记录极为丰富的信息。
2. 仪器比较轻便、操作简单和功耗较低,适于野外应用。
3. 仪器的电源采用了直流—直流变换技术,这样,用单组电池供电,就可在仪器内部产生所需要的多种正负电源,还可交直流供电,并能自动切换。因此,使用方便。
4. 系统可直接与计算机接口,将记录在磁带上的数据送计算机快速处理;系统也可直接回放进行模拟恢复,给出模拟曲线,并附有时标。
5. 仪器的数据采集记录系统具有多用性,既可记录短周期信号,又可记录长周期信

本文 1984 年 10 月 23 日收到,1985 年 7 月 15 日收到修改稿。

* 滕台湾、任道容、冒祖华、姚同启、刘建本、李 宣、金海强、刘庆芳、张廉强也参加或曾参加过观测系统的研制工作。

号,既能记录无中止的连续信号,又能触发记录突发性信号。

6. 仪器的电路设计也有许多独立的特点。

二、系统的组成及主要性能指标

DCM-1 型数字地磁脉动观测系统主要由三个分量的 GM-1 磁通门磁力仪、多路数据采集器、数据记录与回放器,以及编码数字钟等部分组成,各部分之间的关系如图 1 所示。

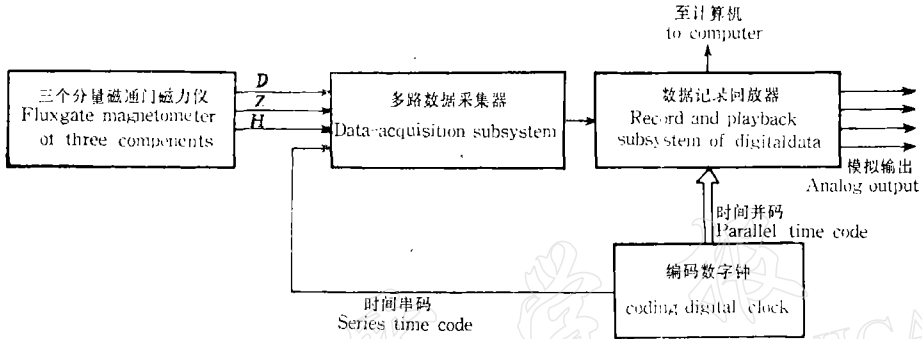


图 1 DCM-1 型数字地磁脉动观测系统的组成

Fig. 1 Block diagram of Model DCM-1 digital observation system for geomagnetic pulsations

由图 1 可见,该数字系统的多路数据采集器有四个信号输入道,它可以将三分量 (D , Z , H) 磁通门磁力仪输出的地磁信号以及编码数字钟输出的时间串码——时标,按时分方式依次转换成一定格式的二进制数字串码,然后在数据记录回放器中以数据块的形式记录在盒式数字磁带上。记录在磁带上的数字信号,又可以回放恢复出三个分量的地磁模拟信号和一路时间串码(即时标)。回放的数字信号也可以直接送计算机进行分析处理。

系统所达到的主要性能指标

1. 磁通门磁力仪的性能指标

测量磁场的范围: $0-60,000 \text{ nT}$

动态范围: $\pm 500 \text{ nT}$

频率响应: $0-6 \text{ Hz}$

输出灵敏度: 10 mV/nT

输出噪声: $0.05 \text{ nT}(P-P)$

线性度: 优于 0.5% ($0-\pm 500 \text{ nT}$)

温度系数: 小于 $1 \text{ nT/}^\circ\text{C}$

工作环境温度: $-10^\circ\text{C}-40^\circ\text{C}$

单分量功耗: 2 W

2. 数据采集记录回放系统的性能指标

输入信号路数: 4 路

频带范围: 分三档(即三个频段)

(1) 10Hz—0.0166Hz, (2) 0.2Hz—0.002Hz, (3) 0.01Hz—DC

采样频率: 分三种

(1) 每道每秒: 40 次, (2) 每道每秒: 1 次, (3) 每道每秒: 0.05 次

动态范围: 优于 110dB

道间串音: 优于 -100dB

浮点放大增益: 2^0 — 2^{10} (台阶为 2^1)

A/D 转换位数: 12 位

系统总精度: 满量程时为 0.05%, $< 5\text{mV}$ 的小信号时为 0.5%

系统线性: 优于 0.5%

盒式数字磁带记录: 单轨 PE 记录方式, 记录密度为 800bpi, 误码率优于 10^{-6} .

数字钟的频率稳定度: $\pm 5 \times 10^{-6}$ (-40°C — 60°C) $\pm 3 \times 10^{-7}$ (室温条件)

工作环境温度: 0°C — 45°C

功耗: 3.5W

三、磁通门磁力仪

DCM-1 数字地磁脉动观测系统中 GM-1 磁通门磁力仪, 采用了大尺寸的环形芯磁通门传感器, 因此在提高传感器的输出灵敏度和降低仪器输出噪声方面取得了较好的效果。在电路方面, 由于采用了低二次谐波含量的方波激励电路和低噪声低漂移的补偿电流源, 并采用了二次谐波反馈检测方法, 使仪器具有较高的磁场分辨率(高于 0.1nT)和较好的稳定性。

GM-1 磁通门磁力仪的方框图如图 2 所示。

传感器的环形磁芯是用 1J86 玻莫合金带绕制而成, 带厚为 $20\mu\text{m}$, 宽为 4mm , 共绕 10 层, 磁芯骨架选用热膨胀系数与该玻莫合金近似相等的 GH128 合金钢, 磁芯平均直径为 70mm 。

传感器的结构如图 3 所示。

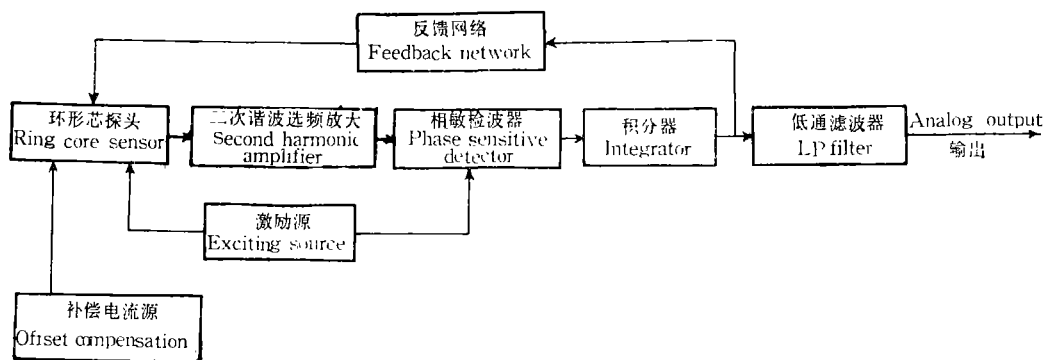
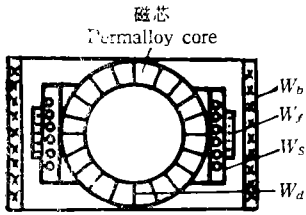


图 2 磁通门磁力仪方框图

Fig. 2 Block diagram of fluxgate magnetometer

由于磁芯的平均直径较大,因此,传感器的输出灵敏度较高,其输出灵敏度为 $100\mu\text{V}/\text{nT}$,等效噪声为 $0.03\text{nT}^{[2,3]}$.

激励线圈 W_d 由频率为 5kHz 的方波电压源激励. 为了减少零场下二次谐波电压输出,激励驱动电路采用了二次谐波失真系数较小的桥式平衡驱动电路,该电路的二次谐波失真为 -70db . 实验发现,传感器输出等效噪声与激励电流的大小有明显的关系(见图 4),适当选择激励电流的大小,可得到较低的传感器输出噪声^[4].



- W_d ——激励线圈 (exciting winding)
- W_s ——感应线圈 (induction winding)
- W_f ——反馈线圈 (feedback winding)
- W_b ——补偿线圈 (compensation winding)

图 3 传感器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sensor construction

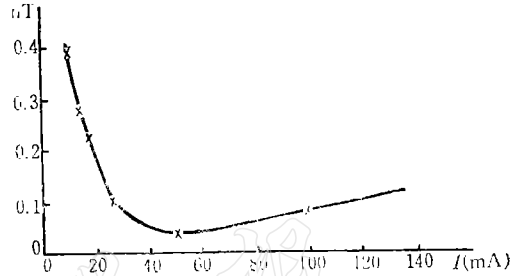
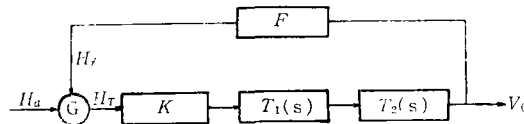


图 4 传感器的输出等效噪声和激励电流(有效值)的关系

Fig. 4 relation between equivalent output noise of sensor and exciting current (rms)

补偿电流源可向补偿线圈提供 $0-6\text{mA}$ 连续可调的稳定电流,产生补偿磁场,将一部分被测磁场抵消,使磁芯工作在零场附近. 磁场补偿范围为 $0-60,000\text{nT}$. 由于采用了低噪声、低漂移稳压二极管 WGY 和运算放大器 FC72,该电流源输出电流的相对噪声小于 10^{-6} .

二次谐波反馈信号检测法,有效地抑制了传感器和前置放大器的高频噪声,负反馈措施又大大改善了仪器的稳定性. 反馈环路的状态框图如图 5 所示.



H_a ——被测磁场强度 (measured magnetic field intensity) H_f ——反馈磁场强度 (feedback magnetic field intensity) G ——传感器的灵敏度 (sensitivity of sensor) K ——放大倍数 (gain) $T_1(s) = \frac{1}{1 + s\tau_1}$ $s = j\omega$ 为复频率 (complex frequency), τ_1 为相检器的时间常数 (time constant of phase sensitive detector) $T_2(s) = \frac{1}{s\tau_2}$ τ_2 为积分器时间常数 (time constant of integrator) $F = A_f/R_f$ A_f 为反馈线圈常数 (constant of feedback coil), R_f 为反馈电阻 (feedback resistance) V_o ——环路输出电压 (loop output voltage)

图 5 反馈环路状态框图

Fig. 5 Block diagram of feedback loop

系统的传递函数为

$$T(s) = \frac{V_0(s)}{H_a(s)} = \frac{1}{F} \left[\frac{1}{s^2 \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{GKF} \right) + s \left(\frac{\tau_2}{GKF} \right) + 1} \right]$$

截止频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{GKF}{\tau_1 \tau_2}}$$

阻尼系数为

$$\xi = \frac{\omega_n \tau_1}{2GKF}$$

闭环灵敏度(即仪器输出灵敏度)为:

$$\frac{V_0}{H_a} = \frac{1}{F} = \frac{R_f}{A_f}$$

仪器的性能测试和标定是在磁屏蔽筒内进行的,屏蔽筒直径为 $\phi 28\text{cm}$,长 108cm ,单端开口,该磁屏蔽筒的屏蔽系数 $S = 10^{-4}$,筒内在距封闭端 30cm 的空间范围内剩磁小于 5nT . 兼作退磁用的标定线圈为一长直螺线管,线圈常数 $A = 1.0\text{nT}/\mu\text{A}$.

仪器性能的测试结果如前所述. 仪器的频率和相位特性见图 6,截止频率为 6Hz , $0\text{--}1\text{Hz}$ 的幅频特性平坦度优于 1% .

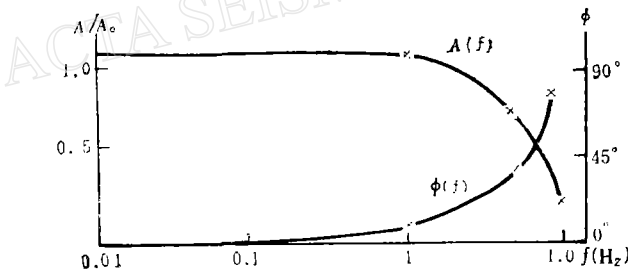


图 6 GM-1 磁通门磁力仪幅频和相位特性

Fig. 6 Amplitude and phase-frequency characteristics of Model GM-1 fluxgate magnetometer

四、多路数据采集系统

多路数据采集系统的方框图如图 7 所示.磁通门磁力仪输出的 D, Z, H 三个分量的地磁信号,先经滤波器滤波,然后在多路换路采样保持器中被分时地采样和保持,将各路输入的连续模拟信号变成离散的样品序列. 编码数字钟输出的日历时间串行编码信号也被当成一路模拟信号而采样离散化. 这些离散的样品依次送往浮点放大器进行放大,浮点放大器根据每个样品值的大小,自动调节其增益值,使样品被放大到 A/D 转换的最佳电平范围,这就保证了大小样品值都能获得较高的数字化精度. A/D 转换器完成了对样品的量化后,串码格式器就并行地接收浮点放大增益码及 A/D 转换数码,并形成一定格式

的数据串码而输出。数据串码的格式如图 8 所示。

由于磁测深所涉及的地磁信号频谱极宽，且信号频率越低其功率越强。为了在这样很宽的频谱范围内分别突出记录某一频段的信号和尽可能减少数据量，采用滤波器将整个工作频带划分为三个频段，并选用相应的三种采样频率，各个频段相互都有覆盖。

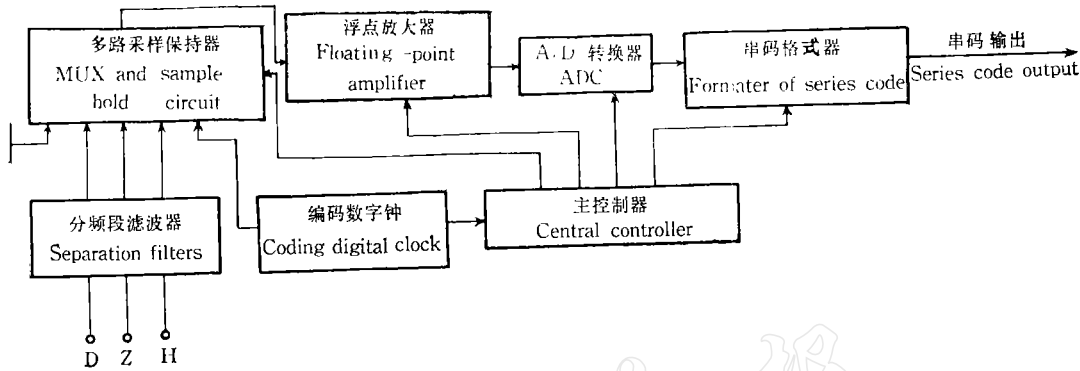


图 7 多路数据采集系统方框图

Fig. 7 Block diagram of data-acquisition subsystem

第一路		第二路		第五路		第一路
帧同步码	增益码	A/D 数码	增益码	A/D 数码	帧同步码	
Frame synchroni	Gain code	A/D Data code	Gain code	A/D Data code	zation code	
zation code	(3bit)	(12bit)	(3bit)	(12bit)	(15bit)	

图 8 数据串码的格式

Fig. 8 Format of series data code

第一、二频段采用带通滤波器，第三频段采用低通滤波器。带通是由低通和高通组合而成。每个频段的低通均为六阶 Butterworth 低通滤波器，带外信号衰减陡度为每倍频程 36db，高通均为 2 阶 Butterworth 高通滤波器，带外信号衰减陡度为每倍频程 12db。每个频段的低通还起去假滤波器的作用，用以消除由于离散采样可能引进的虚假频率信号^[6,7]。

为了提高捕获及保持精度，采用了跟踪保持型换路采样保持器，并且为了减少串音，路间采取严格的动态开关隔离和动态回零措施。

为了扩大系统的动态范围和提高低电平样品的数字化精度，采用了瞬时浮点增益放大器。浮点放大器设有六个增益档，可调范围为 2^0-2^{10} ，共 60db，增益台阶为 2^2 (12db)，其最佳增益值用三位二进制码表示。表 1 列出了不同增益值所对应的增益码。

表 1 浮点放大的增益码及其对应的增益值

Table 1 Gain code of floating point amplifier and corresponding gain

增益值	2^0	2^2	2^4	2^6	2^8	2^{10}
增益码	000	001	010	011	100	101

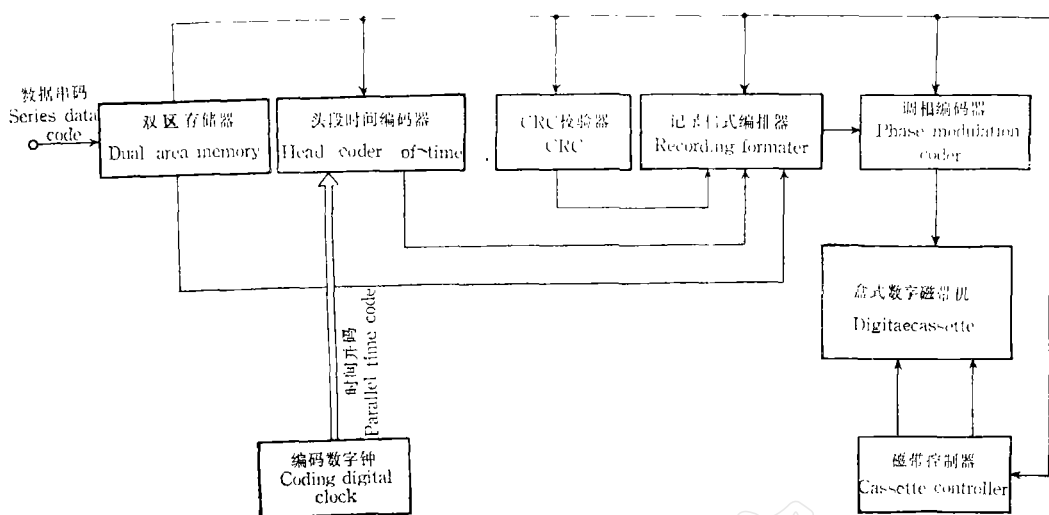


图 10 数据记录系统方框图

Fig. 10 Block diagram of recording subsystem

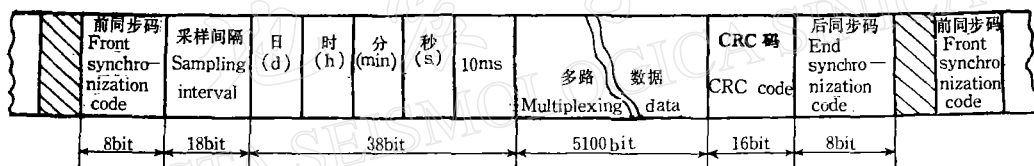


图 11 数据块的格式

Fig. 11 Format of data block

段来说 Δt 都是一个固定不变的数值,为 5ms), 则第 n 道, 第 i 个数据样品的采样时刻可由下式求得:

$$t_{ni} = t_0 + (n-1)\Delta t + (i-1)\tau$$

当系统工作在第二、三频段时, Δt 相对于采样间隔 τ 可以忽略不计, 则上式可简化为

$$t_{ni} = t_0 + (i-1)\tau$$

数据块中的 5100 位多路数据码是由存储器中读出的数码。存储器由两个区组成, 每个区包含五个 1024×1 CMOS 静态随机存储器片。由于两个区交替地工作和对数据进行时间压缩, 使磁带机处于间歇式的工作方式, 且大部分时间是处于停机等待状态。

设置 CRC 校验码是为了检验记录在磁带上的数据在回放时是否有错, 以便保证分析处理时数据的真实性。每个数据块的数据在送往磁带记录的同时, 也送往 CRC 校验电路, 并形成 16 位 CRC 校验码, 记录在数据码的后面。这些 CRC 码就反映了数据的状况, 利用这些 CRC 码就可在回放时判断数据是否出错。

CRC 校验是根据下面的多项式除法而构成的。

$$\frac{a_{n-1}X^{n+15} + a_{n-2}X^{n+14} + \cdots + a_{n-k}X^{n-k+16} + \cdots + a_1X^{17} + a_0X^{16}}{X^{16} + X^{15} + X^2 + \cdots}$$

式中, n 为被检验的数码的位数.

$a_{n-1}-a_0$ 为各项的系数, 取决于数码中相应位是“1”还是“0”^[8].

DCM-1 数字系统采用了 MT-2-01 型盒式数字磁带机插件. 该种磁带机体积很小, 可直接安装在仪器的面板上, 这种磁带机的可靠程度也比较高. 但是, 对于野外应用来说功耗仍显较大. 为了降低功耗, 当磁带机处于停机等待状态时, 自动关掉其电源, 使之仅在记录数据的瞬间耗电. 该磁带机本身不含调相编码及解码电路, 也不含功能控制器, 这些电路都由我们自己配置低功耗的线路. 使用 300 英尺的盒式数字带及 800 bpi 的记录密度, 进行地磁测深观测时, 一盒磁带的一面在第一频段工作时可记录 15 分钟, 在第二频段工作时可记录 8 小时, 在第三频段工作时可记录约 8 天.

六、数据回放及模拟恢复系统

数据回放及模拟恢复系统的方框图如图 12 所示.

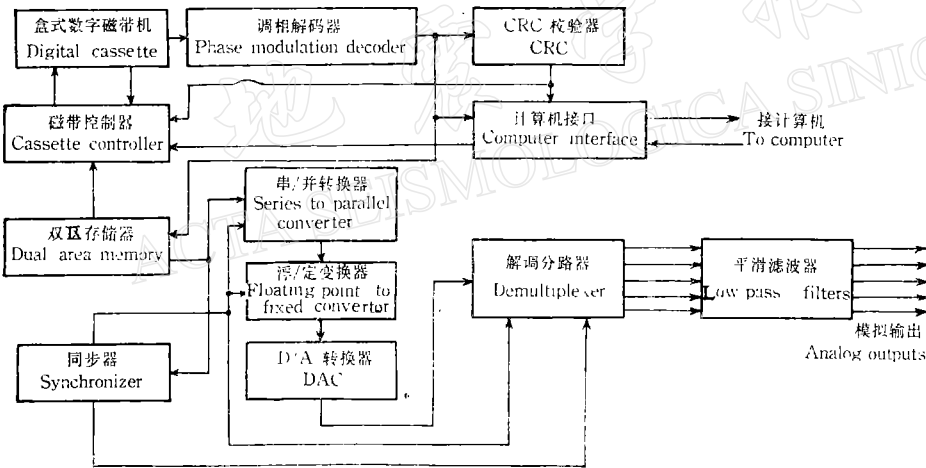


图 12 数据回放及模拟恢复系统

Fig. 12 Playback subsystem of digital data and subsystem for recovering analog signals.

以调相制编码形式记录在磁带上的数据, 经回放和解码, 还原成原始的多路数据, 并经 CRC 校验后送到计算机进行数据处理.

经回放和解码得到的数字信号, 还可以直接进行模拟恢复. 当进行模拟恢复时, 由磁带回放和解码给出的数据需先经双区交替工作的存储器, 将被数据块分割的多路数据码严格地连接起来, 形成连续不断的多路数据串码, 然后再经模拟恢复单元恢复成多路模拟信号, 并含一路时标. 模拟恢复的增益值可以根据实际情况, 通过改变浮/定变换器的固定增益来控制.

在模拟恢复单元中, 采用了我们设计和实验成功的一种“新型的帧同步码组识别器”, 它是帧同步设备中的关键部件, 是一种全数字式识别方法, 并便于容错位数的自动变换, 比国际上常用的巴克码识别器方法有显著的优点^[9].

在数据回放及模拟恢复系统中,还附有我们设计和实验成功的一种“多路正弦数字信号发生器”,它是用比较简单的逻辑电路模仿相当复杂的多路数据采集系统,使之给出多路正弦信号数字串码。这种串码和实际的数字串码一样,也包含一路帧同步码和四路数据码,每一路数据码又都有按规律改变的浮点放大增益码,符号位和 A/D 尾数。利用这种串码信号,可以很方便地检查“记录、回放及模拟恢复系统”的工作状态是否正常,并便于判断故障类型及故障部位。

七、时间服务系统

时间服务系统的核心为编码数字钟。该编码数字钟使用了频率为 1MHz 的温补晶体振荡器。晶体振荡器输出的 1MHz 信号,一方面经分频和适当控制,产生数字系统所需要的各节拍信号和定时信号,另一方面又给出数字系统所需要的时间服务信号。数字钟给出的时间服务信号分两种,一种是并行时间编码信号,可以表示任一时刻的具体时间,包括 a, month, d, h, min, s, s%, 每个数据块第一个数据的采样时刻就是用这种时间编码表示,并记录在磁带上,便于计算机数据处理时确定任意样品的采样时刻。另一种是串行时间编码信号,它可以做为一路模拟信号被数字系统采样和数字化,并同数据码一起记录在磁带上,在数据回放及模拟恢复时,又还原成原始的时间串码形式,做为时标,和多路模拟曲线显示在同一张图纸上。

这种时间串码分为三种:

1. 编码为一分钟一帧,可以表示 a, month, d, h, min, s。数字系统工作在第一频段时使用这种编码。
2. 编码为一小时一帧,可以表示 a, month, d, h, min, 数字系统工作在第二频段时使用这种时间串码。
3. 编码为一天一帧,可以表示 a, month, d, h。数字系统工作在第三频段时使用这种编码。

数字钟的守时精度通常可达 0.05s/d , 这对于地磁测深和地磁脉动观测来说是足够的了。

八、野外实验及实际应用观测

DCM-1 数字地磁脉动观测系统的样机研制成功后,从 1982 年至 1984 年先后在河北省唐山、辽宁省锦西、河北省北戴河以及辽宁省庄河等地进行了野外实验及实际应用观测。除唐山的第一次野外实验时间较短之外,其余每个观测点都连续观测一个月以上。取得了丰富的野外观测资料,多次记录了磁暴、磁扰和各种典型的地磁脉动信号。图 13—图 16 是野外观测结果的一些例子。野外观测过程及结果表明,仪器稳定可靠,性能良好,数字化记录系统比模拟记录系统具有更多的优越性,例如 DCM-1 数字系统所记录的信息比模拟记录系统要丰富得多,而且该数字系统可以记录到模拟系统难于记录到的典型的地磁脉动信号,观测质量和效率也比模拟系统高得多。

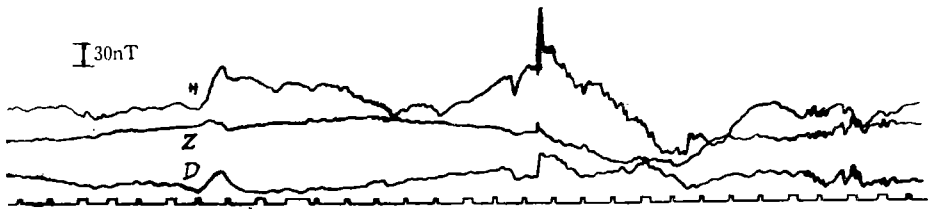


图 13 1982 年 10 月 25 日辽宁省锦西的数字记录回放图,记有磁暴(时标为 h 号)

Fig. 13 Recovered curves of digital geomagnetic storm data by DCM-1 in Jinxi, Liaoning Province on Oct. 25, 1982. Scale of time code is an hour

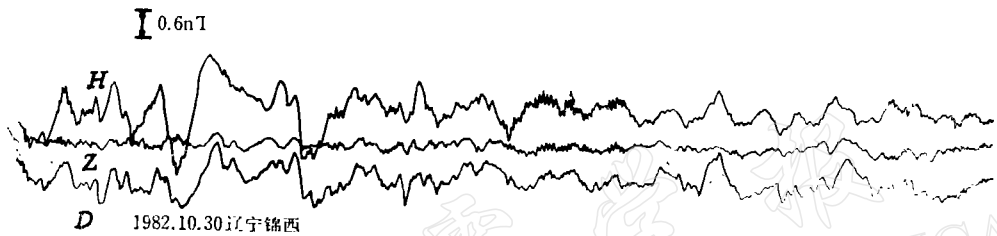


图 14 1982 年 10 月 30 日辽宁省锦西的数字记录回放图,记有地磁脉动信号
(图中时标为 min 号)

Fig. 14 Recovered curves of digital geomagnetic pulsation data by DCM-1 in Jinxi, Liaoning Province on Oct. 30, 1982. Scale of time code is one minute

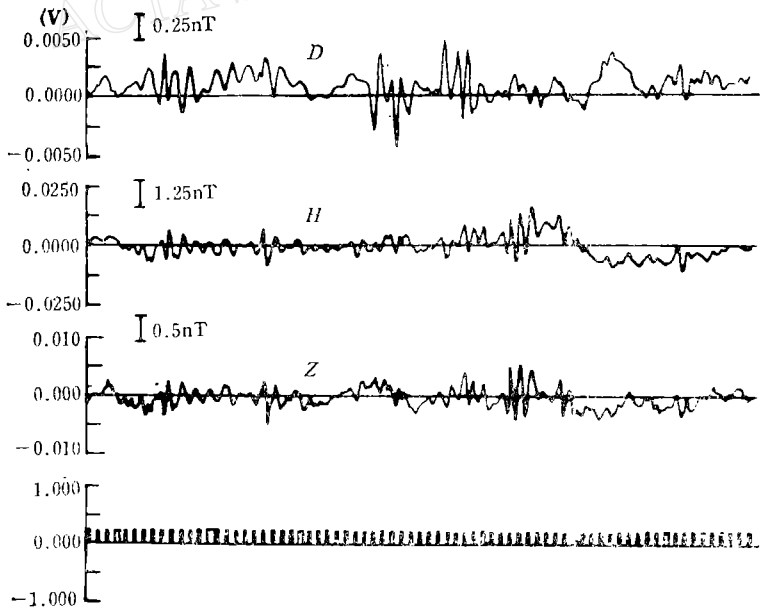


图 15 1983 年 10 月 11 日,河北省北戴河的数字记录送计算机恢复的曲线,记有地磁脉动信号
(图中的时标为 min 号)

Fig. 15 Recovered curves of digital data by computer in Beidaihe, Hebei Province on Oct. 11, 1983. Scale of time code is one minute

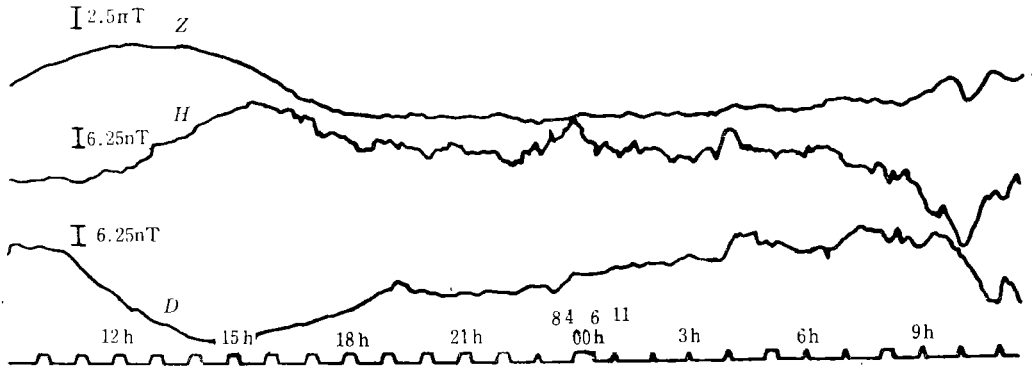


图 16 1984 年 6 月 15 日—16 日, 辽宁庄河的数字记录回放图
(时标为 h 号)

Fig. 16 Recovered curves of digital data by DCM-1 in Zhuanghe county, Liaoning Province on June 15-16, 1984. Scale of time code is one hour

在仪器的多次野外观测实验中, 国家地震局地球物理研究所电磁测深组的同志给予了很大的支持和帮助; 中国科学院地球物理研究所甄殿凯同志在系统的计算机处理工作方面给予了大力协助, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] Chama'aun, F. H. and R. Walker, A microprocessor based digital fluxgate magnetometer for geomagnetic deep sounding studies, *J. Geomag. Geoelectr.*, **34**, 491—507, 1982.
- [2] Primdahl, F., The fluxgate mechanism, *IEEE Trans. Mag.* MAG-6, 376—383, 1970.
- [3] 周 勋、安郁秀、郑沙樱, 环形芯磁通门磁力仪探头的灵敏度, *地震地磁观测与研究*, **4**, 83—88, 1983.
- [4] Scouten, D. C., Sensor noise in low-level fluxgate magnetometer, *IEEE Trans. Mag.* MAG-8, 223—231, 1972.
- [5] Trigg, D. F., P. H. Serson and P. A. Camfield, A solid state electrical recording magnetometer Publ. Earth Phys. Branch, Dept. Energy, *Mines and Resources*, **41**, 66—80, 1971.
- [6] Medford, L. V., C. G. MacLennan, P. E. Rosenfeld, L. J. Lancrotti, and M. H. Acuna, Low-power portable geophysical data acquisition system and its use in geomagnetic measurements, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing* GE-19, 1981, 3: 122—128.
- [7] 程安龙、郑沙樱、顾佐文, 超低频滤波器及其在地磁脉动观测中的应用, *地震地磁观测与研究*, **6**, 24—31, 1985.
- [8] 日本工业标准, C3, 281, 1975.
- [9] 周军成, 一种全数字式帧同步码组识别器, *电子学报*, **13**, 116—117, 1985.

MODEL DCM-1 DIGITAL OBSERVATION SYSTEM FOR GEOMAGNETIC PULSATIONS

ZHOU JUNCHENG ZHOU XUN CHENG ANLONG AN YUXIU

HAN KELI AND ZHENG SHAYING

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

A model DCM-1 digital observation system for geomagnetic pulsations has been developed for geomagnetic deep sounding and geomagnetic pulsation observation. The system consists of a fluxgate magnetometer with high sensitivity, data-acquisition subsystem, digital cassette and time service unit etc. The system features large dynamic range, low noise, high accuracy, low power consumption, and simplicity and convenience for operation. The system can be interfaced with a computer for data-processing, analog curves can be automatically plotted when the cassette is played back through the system. The system has been tested in the field and some valuable data have been obtained which contain much more information than by an analog recorder.