



24位遥测地震仪

24 WEI YAOCE DIZHENYI

■ 柴书常 编著

石油工业出版社

24位遥测地震仪

● 遥测 ● 24位 ● 地震仪

24 位遥测地震仪

柴书常 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书讲述了 24 位遥测地震仪技术发展的历程,按上、中、下三篇,分述关于有线、无线以及网络仪器在系统结构,工作原理以及测试方法方面的特点。

本书可供石油勘探工作者及高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

24 位遥测地震仪 / 柴书常编著.
北京:石油工业出版社,2008.1
ISBN 978-7-5021-6457-7

I. 2...

II. 柴...

III. 地震仪-遥测仪

IV. TH762.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 004360 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址: www.petropub.com.cn
发行部: (010) 64523620

经 销:全国新华书店
印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13.25
字数: 328 千字 印数: 1—1500 册

定价: 45.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前言

遥测地震仪是在地震勘探中,用来进行数据采集和记录工作的重要设备。

为了如实地记录地震信号,务必要设法排除各种干扰因素。这些干扰有的来自外界,如天电干扰和大地微震;有些则是来自内部,即传感器和记录仪器本身所引起的信号畸变。只有排除这些干扰,才能达到如实记录地震信号的目的。为此,人们进行了不懈的努力。从最早的模拟记录仪,到15位数字记录仪,数据精度得到明显的改善。从车载集中式记录仪,到野外分布式记录仪,在克服外界干扰和道间串音方面,取得一定的成效,但是内部干扰因素依然存在。因此,更深刻的技术变革在酝酿中。1993年,法国Sercel公司推出了全新的基于 $\Delta-\Sigma$ 技术的24位遥测数字地震仪SN388,从此开始了地震勘探的新时代。

24位模数转换器的数据精度,虽然有效位数达不到真正的24位,但至少要有18位是可靠的。所以24位仪器所记录的地震信号,其动态范围可以达到110dB左右。这固然得益于24位 $\Delta-\Sigma$ 模数转换器,更有赖于模拟滤波电路的去除以及数字滤波技术的运用。

24位仪器研制成功,不仅仅是记录精度的新突破,还开创了整个地震仪器系统的新格局。SN388主机采用模块化设计,用单个机箱集中了所有的控制与处理功能,实现了单机采集1200道(2ms)。SN388可以通过扩展机箱的办法,扩展采集道数,最高可达10000道。在人机界面的友好程度,以及整个系统的可靠性方面都是前所未有的。

为了继续扩张系统的规模,追求更高的使用性能,Sercel继续前行。2003年他们推出了具有网络数传功能的遥测地震仪408UL。在408UL中,利用网络技术它把整个野外排列连接成为一个局域网。除主机接口外,局域网上的节点分为两种,一种是大线采集单元(LAUL),另一种是交叉站单元(LAUX)。地震数据从大线采集单元传送到交叉站,然后从交叉站传送到主机。在两个LAUL之间,分布着若干个离散的FDU,叫做一个采集段(Segment)。段内的每个FDU上接检波器串(相当于一个单道采集站),用数传电缆相连接,构成一个采集链。FDU的数据,以数据链的方式传送到LAUL,并在LAUL中进行处理和压缩。地震数据以采集链为单位,组成数据包(帧)。数据包在网络上可以沿任何路径传输。因此在施工中,仪器车可以在排列的任何位置,就近利用交叉站连接排列,从而给施工带来极大的便利。因为数据传输的路径不是唯一的,所以即使排列偶然在某处中断,数据仍然可以沿其他路径继续传输,而并不会丢失。

408UL继承了SN388的主机模式,只是更新了大接口和采集模块,用一对新的接口板加以取代。408UL主机单机道采集能力为1800道(2ms)。为了扩展系统的采集能力,跟SN388一样,也是要采用多台主机并机工作的方式。

环顾目前流行的各种电脑和 workstation 产品,有的不仅可以满足作为人机界面的基本要求,甚至可以满足作为一台数据处理机的更高要求。于是,人们用作为人机界面的 workstation 吸收了主机箱体的处理功能,一个改良型的408UL出现了,这就是408XL。在408XL的主机中只剩下了一对接口板。为了扩展系统的道采集能力,只需要增加接口板的对数。每对接口板相应的采集能力为2000道(2ms),箱体中最多可插5对接口板。所以408XL的最大道采集能力可达10000道。然而,由于大规模三维地震的开展,特别是再加上单点三分量的要求,

人们对于进一步扩展采集能力以及进一步提高采集作业的工作效率,还有更高的期待。于是 428XL 应运而生。

在 428XL 的主机中,接口板只剩下一块 LCI-428,所以结构进一步简化了。但是,428XL 的功能却更加强大了。由于采取了更快的传输速率,使得系统的道采集能力实现了 1:5 的扩张。当系统只接一块 LCI-428 时,实时采集的道能力就有 10000 道(2ms)之多。通过增加接口板还可以继续扩展采集能力。接口板最多可接 10 块,即 428XL 的最大道采集能力可以达到 100000 道。利用如此规模的仪器系统,可以相当好地完成当前的各种陆上采集作业。

428XL 的特点不仅在于采集能力之强,还在于监控能力之强。该系统特别强化了网络功能,可以利用本地局域网和国际互联网,来附加一些本地用户和遥控用户。这些附加的用户能够通过网络对现场的施工进度进行实时监控,并且能保持同操作员的互动。因此,428XL 亦有别名 e-428。

虽然 24 位仪器具有十分理想的记录精度,然而实际应用的效果却与预期相差甚远。原因何在?关于数据采集系统,除了记录仪器之外,地震传感器也是一个重要的组成部分。所以地震传感器的状况不容忽视。结果人们发现,原有的检波器串本身信号畸变太大,致使它所响应的地震信号失真度太大。假如失真度按 0.3% 计算,信号的动态范围只有约 50 dB。如果地震信号最大为 1V,则只有大于 3mV 的地震信号才能被记录和识别,而小于 3mV 的地震信号则统统被噪声所淹没。所以,开发具有更大动态范围的地震传感器,自然成为人们的下一个重要目标。

以 MEMS 技术为基础的新型加速度地震传感器(DSU),于 2004 年正式面世。在信号保真度和频率响应特性方面,DSU 都使传统的地震检波器串相形见绌:在地震频段(0~800Hz)其失真度仅为 0.0032%(-90dB);在频率响应方面具有恒幅(无衰减)和零相移的特性。以这样的超精度地震传感器与 24 位记录仪相匹配,正是珠联璧合。

用 DSU 采集链取代 FDU 采集链,一方面,可以发挥 DSU 高指标的技术特性,另一方面,使外界的电磁干扰因输入媒介(检波器串线)的消失而被彻底排除。至此,地震信号在采集和记录方面,已经具备了相当好的条件。然而能否得到满意的地震资料呢,还需要看施工现场的激发条件和接收条件如何。

关于陆上遥测地震仪,具有两个技术分支,其一是有线遥测地震仪,其二便是无线遥测地震仪。目前主导无线遥测系统的两家公司是法国的 Sercel 公司和美国的 Fairfield 公司,其代表作分别为鹰-88(Eagle-88)系统和 Box 系统。

无线遥测系统的技术优势在于山地和过渡带的施工。然而其致命性的弱点在于数据回收的速度不快,原因是系统的射频信道的设置有限,只能对野外采集的数据进行分组回收。例如鹰-88,共有 4 个射频信道,每次只能回收四个采集站(24 道)的数据。由于受仪器车机舱空间的限制,无法容纳大量接收机的箱体,因此无法大量扩展实时采集的道数。这是传统的射频技术——调制与解调的局限性。

因此,Box 系统放弃了传统的调制与解调的方法,转而采用新的调制与解调技术——16QAM,如此便极大地扩展了无线信道的数量,在 214~234 MHz 的频率范围内,可提供多达 1000 个射频信道,每次可回收采集数据 8000 道(采集站单站 8 道)。以这样的规模和能力,能否与有线系统一争高下?

然而,在有线网络系统中,已经彻底革除了模拟大线。而 Box 系统的遥控采集站,仍不

免带有模拟电缆。此外，在有线网络系统如 428XL 中，由于无线采集站（LAUR）和无线中继站（LRU）的存在，其实已经成为一个有线和无线的混合系统。因此，有线网络系统的技术优势仍然是明显的。

遥测地震仪结合了多种不同门类的专业技术，是一个综合性的操作平台。24 位 $\Delta-\Sigma$ 模数转换器，是整个系统的灵魂。发展中的计算机和网络技术，使系统充满了不断进化的活力。如今，100000 道的实时地震采集系统已经出现，加之 MEMS 加速度型超精度地震传感器的应用，一个规模空前的高分辨率地震勘探的新时代即将到来。

纵观遥测地震仪的技术发展，解读其关键技术，冀与同道共享心得，是本书编写的目的。

全书分上、中、下三篇，顺序讲述有线遥测系统、无线遥测系统及网络遥测系统。所述具体机型主要是 Sercel 系列。由于 Sercel 系列在技术发展上具有很好的连续性和继承性，代表着仪器发展的主流趋势，因此成为人们的主要兴趣所在。

由于编者的学识和眼界有限，缺漏和谬误在所难免。幸得洪祖扶先生对本书稿的校阅和斧正，特此致谢。更望读者不吝指正。

目 录

上篇：24 位有线遥测地震仪 SN 388

1 主机系统	(3)
1.1 系统结构	(3)
1.1.1 系统模块	(3)
1.1.2 流水线作业	(5)
1.1.3 地震信号与数据格式	(5)
1.2 人机接口与系统软件	(7)
1.2.1 人机接口 (HCI)	(7)
1.2.2 接口安装 (HCI Install)	(8)
1.2.3 GO 388 主窗口 (GO 388 Main Window)	(10)
2 功能模块与单元板	(13)
2.1 大线接口与输入/输出	(13)
2.1.1 AXC 板和 LIO 板	(13)
2.1.2 数据传输	(14)
2.1.3 锁相原理与锁相环	(15)
2.1.4 接收与转发	(16)
2.1.5 数传信道	(17)
2.1.6 交叉站	(19)
2.2 采集处理器	(20)
2.2.1 LCP 板	(20)
2.2.2 MPM 板	(22)
2.3 噪声编辑器	(24)
2.3.1 模块构成	(24)
2.3.2 噪声编辑算法	(25)
2.4 相关/叠加器	(30)
2.4.1 总体构成	(30)
2.4.2 相关与叠加算法	(31)
2.5 记录/显示模块	(39)
2.5.1 模块功能	(39)
2.5.2 记录格式 (SEG-D)	(40)
3 人机界面与以太网	(42)
3.1 以太网	(42)
3.1.1 网络结构与通信协议	(42)

3.1.2	IEEE 802.3 标准	(43)
3.2	网络地址与数据格式	(43)
3.2.1	网络地址	(43)
3.2.2	数据帧格式	(44)
3.2.3	数据编码	(45)
3.3	关于以太网	(46)
3.3.1	局域网的基本构成	(46)
3.3.2	局域网通信标准	(49)
3.3.3	常见以太网	(51)
4	采集站	(53)
4.1	总体结构	(53)
4.1.1	SU-6A 型	(53)
4.1.2	SU-6B 型	(56)
4.2	Δ - Σ 24 位模/数转换器	(58)
4.2.1	Δ - Σ 图解	(59)
4.2.2	系统构成	(59)
4.2.3	卷积运算与抽取滤波	(64)
4.3	采集延迟与滤波延迟	(66)
4.3.1	同步采集与延迟处理	(66)
4.3.2	滤波与延迟	(66)
4.4	增益微调与去漂移	(68)
4.4.1	增益微调	(69)
4.4.2	去漂移	(69)
4.5	技术指标与测试方法	(70)
4.5.1	仪器测试项目	(70)
4.5.2	野外测试项目	(75)

中篇：24 位无线遥测地震仪

5	鹰-88 系统	(81)
5.1	采集处理器	(81)
5.1.1	无线信道与辅助道接口	(81)
5.1.2	数据接收处理器 (DRP)	(83)
5.2	射频单元 (RF Unit)	(83)
5.2.1	射频发射机	(84)
5.2.2	射频接收机	(88)
5.2.3	收/发转换器 (T/R Switch)	(90)
6	遥控采集站 SU6-R	(95)
6.1	总体结构	(95)
6.1.1	构件与功能描述	(95)
6.1.2	数据板	(95)

6.2 射频发射/接收机	(96)
6.2.1 接收机	(96)
6.2.2 发射机	(101)
6.2.3 频率合成器	(106)
6.3 射频信道	(110)
6.3.1 调制方法	(110)
6.3.2 接收与解调	(112)
6.3.3 编码与解码	(117)
6.4 16-QAM 与无线遥测地震仪	(118)
6.4.1 16-QAM 编码与调制	(118)
6.4.2 16-QAM 发射与接收	(118)
6.5 SU6-R 测试	(119)
6.5.1 测试信号与测试电路	(120)
6.5.2 测试项目	(120)

下篇：24 位网络遥测地震仪

7 主机—CM408	(129)
7.1 系统结构	(129)
7.1.1 结构框图	(129)
7.1.2 流水线与无等待	(129)
7.1.3 大容量动态存储器	(130)
7.1.4 单元模块与总线	(130)
7.2 采集模块	(131)
7.2.1 大线控制接口板	(131)
7.2.2 大线存储处理器板	(132)
8 FDU 与采集链	(134)
8.1 FDU 的结构	(134)
8.1.1 功能模块	(134)
8.1.2 数据通路与初始化	(135)
8.2 Δ - Σ 模数转换器	(137)
8.2.1 概要	(137)
8.2.2 Δ - Σ 24 位模数转换器	(139)
8.3 交叉站与大线采集单元	(146)
8.3.1 交叉站单元 (LAUX)	(146)
8.3.2 大线采集单元 (LAUL)	(149)
8.4 DSU 与 DSU 采集链	(150)
8.4.1 数字化超精度地震传感器	(151)
8.4.2 采集站与采集链	(153)
8.4.3 关于震源	(154)
8.5 测试与校准	(154)

8.5.1	FDU 测试说明	(154)
8.5.2	FDU 仪器测试	(156)
8.5.3	FDU 传感器测试	(165)
8.5.4	FDU 校准	(173)
8.5.5	DSU 测试	(182)
9	地震网络	(187)
9.1	采集段与数据帧	(187)
9.1.1	采集段 (Segment)	(187)
9.1.2	寻径原理与数据传输	(190)
9.2	通信协议	(191)
10	400 系列与 428XL	(192)
10.1	三种系统的比较	(192)
10.1.1	408UL	(192)
10.1.2	408XL	(192)
10.1.3	428XL	(193)
10.2	428XL 系统构成	(193)
10.2.1	主机设备	(193)
10.2.2	野外设备	(194)
10.3	e-428 系统	(198)
10.3.1	操作员和本地附加用户	(198)
10.3.2	互联网遥控方案	(198)
	参考文献	(200)

上篇：24 位有线遥测地震仪 SN388

关于 24 位有线遥测地震仪，其最主要的特点是，由于采用了 $\Delta-\Sigma$ A/D 技术从而破天荒地实现了 24 位的数据记录精度。

24 位有线遥测地震仪，在系统构成方面，同以往的分布式有线遥测仪无异，由主机和排列两个系统构成，如图 I 所示。

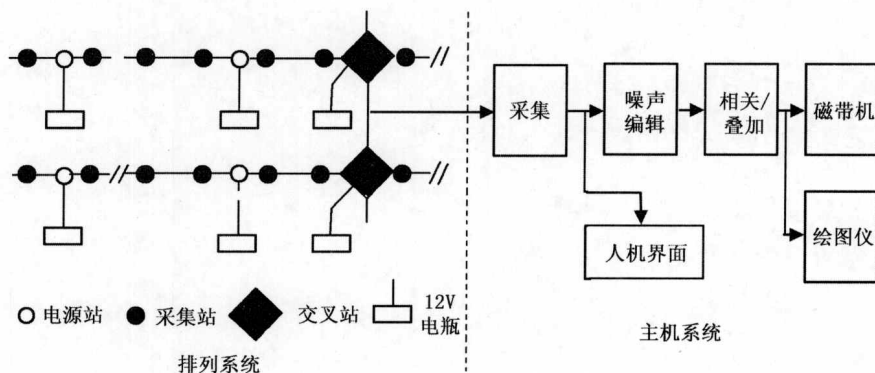


图 I 24 位有线遥测地震仪结构图

SN388 是新型 24 位有线遥测地震仪的代表作。它不仅实现了 24 位的数据记录精度，而且其系统构成的方法也是独树一帜的。

传统的主机系统由输入部件、主控部件和处理部件三大部件所构成，如图 II 所示。三大部件就是三个独立的箱体。

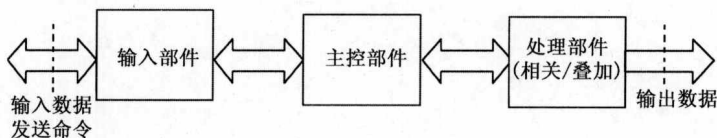


图 II 传统主机系统结构图

SN388 未改三大部件的基本思路，可是它改变了每个部件的存在形式。它把每个箱体的数块大板变成数块小板，把三个箱体合并成为一个箱体。在简化了系统结构并缩小了部件体积的同时，不但没有削弱系统功能，反而更加增强了系统的功能。

1 主机系统

主机系统具有模块化的结构特点。利用每个单元模块完成一个特定的功能，如采集模块（LCP）、噪声编辑模块（NEP）、相关模块（FTP）以及记录模块（TTS）。各模块顺序连接组成一条地震数据采集和处理作业的流水线。另一个重要的特点是，主机系统与人机界面的通信是利用以太网（Ethernet）进行的。

1.1 系统结构

1.1.1 系统模块

SN388 主机为模块化结构，如图 1-1-1 所示。其中每个功能模块都是以 VME 总线相连的一组单元板，姑且称之为“VME 模块”。两个相邻的 VME 模块之间由一组专用的 VSB 总线相连接。各个 VME 模块的输入与输出均借 VSB 总线进行。此外，各功能模块的主处理器板上均带有一个以太网接口，即各主处理器均可以通过以太网与前台（HCI）相连，实现人机对话。人机接口（HCI）是一台 SUN 工作站，是操作员用以干预系统的操作平台。各个功能模块与 HCI 一起构成一个局域网——以太网。操作员通过这个以太网实现同各个系统部件的通信，即发送命令和回收数据。

所以，SN 388 主机系统的构成等于四个 VME 模块加三组 VSB 总线，再加上以太网。这

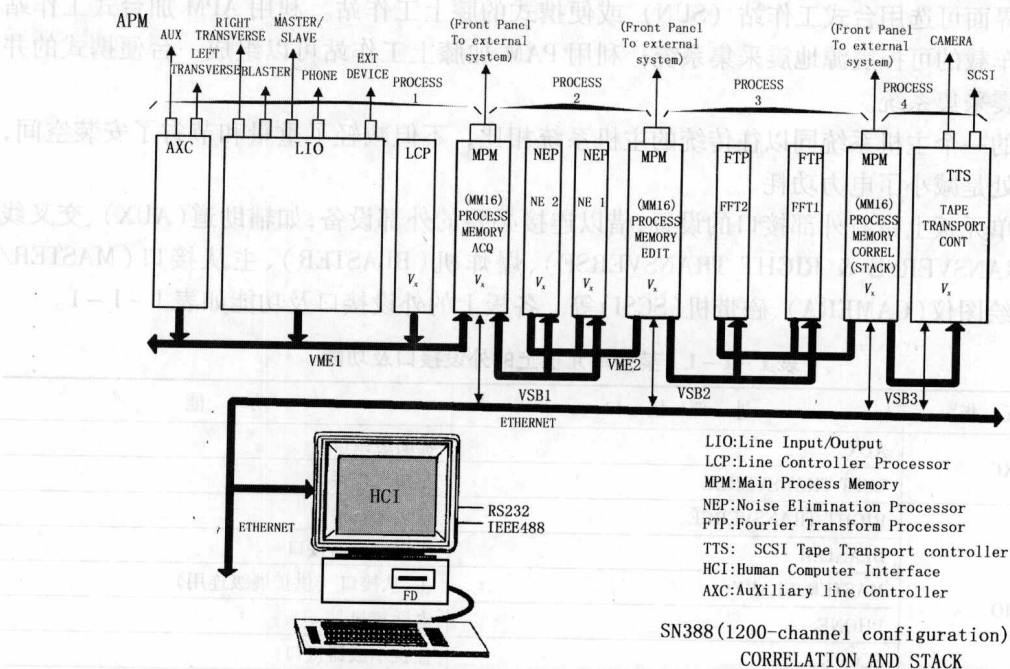


图 1-1-1 SN388 主机系统

样的一个系统是适合于可控震源作业的完整系统。如果去掉 NEP 和 FTP，仅由 LCP 和 TTS 所构成的主机系统，如图 1-1-2 所示，就是仅适合于井炮作业的简化系统。

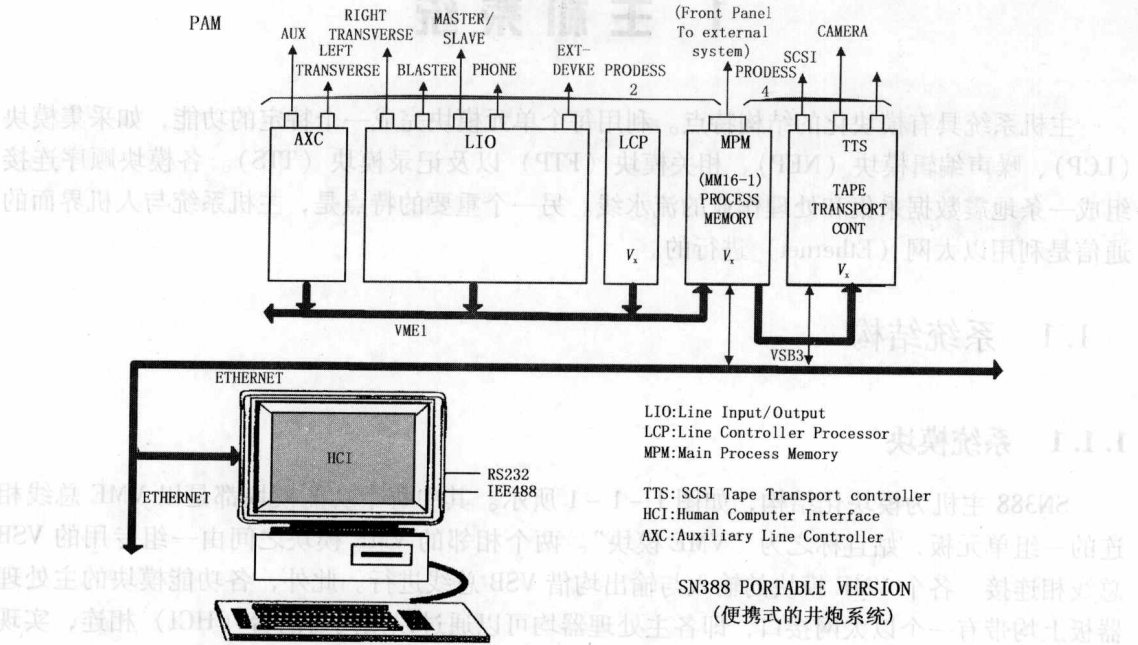


图 1-1-2 SN388 便携式的井炮系统

适合于可控震源作业的完整系统叫做采集处理部件（APM），仅适合于井炮作业的简化系统叫做便携式采集部件（PAM）。

人机界面可选用台式工作站（SUN）或便携式的膝上工作站。利用 APM 加台式工作站可组成一车载的可控震源地震采集系统；利用 PAM 加膝上工作站可以组成一台便携式的井炮震源地震采集系统。

这样的一个主机系统同以往传统的主机系统相比，不但减轻了重量和节省了安装空间，更大的好处是减小了电力功耗。

某些单元板上带有外部接口的设置，借以连接必要的外部设备，如辅助道（AUX）、交叉线（LEFT TRANSVERSE & RIGHT TRANSVERSE）、爆炸机（BLASTER）、主从接口（MASTER/SLAVE）、绘图仪（CAMERA）、磁带机（SCSI）等。各板上的外设接口及功能如表 1-1-1。

表 1-1-1 某些单元板上的外设接口及功能

单 元 板	外 部 接 口	功 能
AXC	AUX	辅助道接口
	LEFT TRANSVERCE	左交叉线接口
	RIGHT TRANSVERCE	右交叉线接口
LIO	BLASTER	遥爆编码器接口
	MASTER/SLAVE	主/从接口（供扩展级连用）
	PHONE	电话接口
	SCOPE	监视示波器接口
	EXT - DEVICE	

续表

单元板	外部接口	功 能
LCP		
MPM		外部系统接口
TTS	CAMERA	绘图仪接口
	SCSI	磁带机接口

1.1.2 流水线作业

主机系统不仅保持了传统三大部件的原有功能，而且拓展了原有的功能。最有意义的是流水线作业。由于有了真正流水线般的操作，使得采集工作实现了无等待的特点。如图 1-1-3 所示，整个流水线包括采集、噪声编辑、相关/叠加以及记录/显示四个功能模块。或者说由上述四个功能模块按顺序组成流水线的四级，即：

- 第一级 采集模块 + 1/2MPM；
- 第二级 1/2MPM + 噪声编辑模块 + 1/2MPM；
- 第三级 1/2MPM + 相关/叠加模块 + 1/2MPM；
- 第四级 1/2MPM + 记录/显示接口模块。

如图 1-1-3 所示，N 为所采集的第 N 炮的数据，每个 MPM 模块均被分为①和②两部分，①用来存放从前一级来的原始数据，②用来存放经前一级模块处理过的数据。如果数据流得很快，处理模块的速度跟不上，则可以在①中暂存而把处理好的数据送入②中。由于①和②的存储空间都足够大，所以不必担心因数据阻塞而发生溢出。无论输入的数据流有多快，数据总可以按道序逐级加以处理直至输出（记录）。这样一来，便解决了输入速度太快而输出设备过慢的矛盾。这个特点的意义在于，当利用可控震源进行采集作业时连续工作，而不必等磁带机记完第一炮的数据之后再作第二炮的采集。这就是采集无等待的意思。

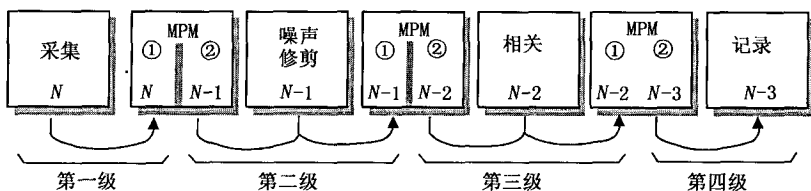


图 1-1-3 流水线系统

如果把上述第二级和第三级合并考虑作为传统的相关/叠加器，则第一级便类似于传统的输入 + 主控部件。第四级仅仅一块接口板而已，在传统结构中属于主控部件的一部分。可见虽然找不到传统部件的箱体了，可是除了主控部件之外，其余两个部件仍然有与之相对应的功能模块存在。而传统的主控部件在这里已化整为零了，它们以微处理器的形式与各功能模块结合在一起。如此看来，流水线与传统三大件的设计思路相同，可视为隐形的三大件。可是流水线的技术却使得主机的功能更加强大了。

1.1.3 地震信号与数据格式

从检波器输出的模拟地震信号，到记录在磁带上的离散数据，地震数据在电路环节上要

经历三个重要阶段：第一，从检波器输出到模拟放大器输入；第二，从采集站（SU）输出的 24 位定点数据，到主机（APM/PAM）输出的 32 位浮点数据；第三，数据以 SEG-D 格式记入磁带的时候，还要加入一些控制参数，以便使得记录在磁带上的数据（样点），能以 mV 为单位恢复其电压值的大小。

1.1.3.1 24 位定点格式

来自检波器输出的地震信号，作为前置放大器的模拟信号输入，其幅度大小必须要与放大器的增益保持恰当的匹配关系。放大器的增益低时，允许输入的最大信号就大；放大器的增益高时，允许输入的最大信号就小。因此放大器增益的档设置原则是，要保证最大输入信号不致使放大器过载。显然，这是野外施工中选择仪器参数的重要依据。增益档与输入信号的匹配关系规定见表 1-1-2。

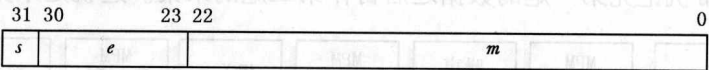
表 1-1-2 增益档与输入信号的匹配关系

增益 (Gain) (dB)	最大输入信号 (Maximum input signal) (mV)
0	2262
12	566
24	141

完成模/数转换是采集站的主要任务之一。模/数转换分作两步来完成。第一步是通过过采样，获得 320 kbps 的高速 1 位数字流；第二步是通过 DSP 处理得到 24 位的二进制数码，格式为 2 的补码，并且把速率降为实际采样率。

1.1.3.2 IEEE 浮点格式

采集站输出的 24 位定点数据，通过数传电缆被送到主机。数据在大线处理单元（LCP），首先完成道序解编，然后再转换成 32 位 IEEE 浮点格式。该格式由符号位、增益码和数据尾数三部分组成，即：



- s——符号位（1 位）：0 表示数据为正数，1 表示数据为负数；
- e——阶码（8 位）：0 ~ 256；
- m——数据尾数，其值在 1 与 2 之间，可表示为 1. m。

2^0 恒等于 1，是格式中的隐藏位。在格式中第 22 位代表 2^{-1} ，而第 0 位代表 2^{-22} 。按此规则编码，数 X 可表示为： $X = (-1)^s \times 2^{(e-127)} \times 1. m$ 。

1.1.3.3 变换示例

1.1.3.3.1 定点到浮点

- (1) $s = e = m = 0$ 。
- (2) +1: $s = 0, e = 127, m = 0$ ，即 $+1 = (-1)^0 \times 2^{127-127} \times 1. 0$ ，

所以： $+1 = \frac{0 \ 01111111 \ 000000000000000000000000}{s \quad e \quad m}$
= 0011 1111 1000 0000 0000 0000 0000 0000
= 3F800000

- (3) 变定点数据 7FFFFFF 为浮点数据（十六进制）：