

工程物探译文集
(原位测定技术)

工程物探

(原位测定技术)

译文集

1272

地质出版社

工程物探译文集

(原位测定技术)

陈昌礼 芮仲清 等译

地质出版社

工程物探译文集
(原位测定技术)

陈昌礼 芮仲清 等译

责任编辑: 张怀素 曹玉

地质出版社出版

(北京西四)

河北省蔚县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 。印张: 15 $\frac{3}{4}$ 。字数: 368,000
1987年9月北京第一版·1987年9月蔚县第一次印刷
印数: 1—1,305册 属内定价: 3.75元
统一书号: 13038·新434



写在前面

国际工程地质协会和国际岩石力学协会于1983年5月在法国巴黎联合召开原位测定学术会议，并在“Engineer Geology”月刊1982—1983年第26—27号合刊号发表了原位测定技术专辑。该文集上卷共三部分。第一部分为地面物理测量，第二部分为井下物理测量，第三部分基本内容为抽水试验。因为前二部分二地面和井下物理测量本质上是地面和井下各种物探方法，我们于1983年下半年组织翻译前二部分。译文集正标题为“工程物探”，但加一个副标题保存“原位测定”这一国际工程地质界通用术语，以引起工程地质和工程物探两学界人士的共同兴趣。

岩石和土壤的物理性质测定是工程地质评价的重要资料，这是国内外工程地质界所共同认识的。但是，当今国际工程地质界已将岩石和土壤的若干物理参数测定逐步地从室内标本测定转向野外现场（包括露头、深部探测、井中和坑道内）原位测定。国际工程地质界一致认为：井中取样，不论岩石和土壤样品（特别是土壤样品）由于离开样品的母体而失去了样品原有物理条件从而改变了它的物理性质，其中包括：密度、含水量、孔隙度，特别是抗压、抗剪、弹性等参数已不复是原来的数值。这里还没有考虑由于取土壤样品而搞乱固有层次这种不应有的错误，而这些错误在实践中是常见现象。另一点是：室内测定的标本只有很小的体积，它不具有代表性，而原位测定是对体积大数百倍至数万倍的地下原位标本进行测定，这样取得的参数更符合工程实用的数值。当前我国出版的工程地质书籍很少含物探内容，几乎还没有涉及地球物理内容的原位测定技术。本文集表明原位地球物理测定技术是工程地质勘察岩石和土壤物理参数测定的技术发展方向。

地球物理勘察在大陆和海洋油气调查中是不可缺少的手段。当前地球物理测量在工程地质勘察中，已远不止于提供基岩埋深（第四系覆盖厚度）和断层资料——显然这两项资料仍然是极为重要的。随着世界许多国家工程建设迅猛发展，工程物探投资在许多工业化国家近20年正以每年达20%的速度增长而超过金属矿物探投资。工程物探所开发的新课题（原位测定技术）正迅速发展和扩大。这本译文集提供了一个良好起步经验，相信物探在工程地质勘察中将日益成为不可缺少的手段。

国际原位测定学术会议是1983年召开的，译文集脱稿于1985年。这二年内，国际上原位测定技术又有迅速发展，值此译文集与读者见面时当会又有所进展。惟希望我国工程地质界尽早推广原位物理测定技术，工程物探界进一步努力开发原位测定技术，更好地为工程勘察提高地质效果和经济效益服务。

本文集由陈昌礼主编，芮仲清统一校核。此外，张宝田同志做了大量组织工作；熊维纲、罗延钟、沈孝宇等同志审看了部分译稿，并提出了许多宝贵修改意见；王骁虹和陈爱国同志承担了图件的贴、绘和照相工作。在此向他们表示感谢。

由于编者水平所限，集内不当之处，欢迎广大读者指正。

陈昌礼

1985年2月于北京

目 录

1. 用研究地震信号频率的方法探测地层…… [法] P.RASOLOFOSAON等 (1)
2. 用跨孔地震法确定岩体品质 …… [芬兰] C.Calin等 (12)
3. 用跨孔地震法研究变质沉积岩地基的动力学性质
…… [加拿大] I.G.BRUCE等 (20)
4. 岩体内地震波速的各向异性 …… [法] D.FABRE等 (28)
5. 地震折射法与地表风化层 …… [比利时] A.BOLLE等 (37)
6. 用锤击地震仪测定岩体弹性模量 …… [芬兰] K.AIKAS等 (45)
7. 用作 V_s 和 V_p 跨孔测量的自动发生器 …… [意大利] E.CARABELLE等 (49)
8. 深部岩体的跨孔测量 …… [瑞典] H.CARLSSON等 (55)
9. 地层的S波速度和阻尼因素 …… [日本] K.TONOUCHI等 (65)
10. 拦河坝坝址的地震折射测量 …… [西德] W.A.HAUPT等 (73)
11. 调查土壤建筑特性的地震方法 …… [苏联] L.D.BELY等 (78)
12. 在土壤勘查中联合使用地面探测雷达和电剖面法的研究
…… [日本] T.SAKAYAMA等 (82)
13. 在地质地下调查中的雷达 …… [瑞典] L.BJELM等 (89)
14. 地下脉冲雷达数据的计算机处理 …… P.ULRIKSEN (95)
15. 测定石灰岩基岩的传统方法与航空电磁法测量的对比
…… [法] P.DELETIE等 (103)
16. 电测深和复合四极电剖面法在地下工程勘查中的应用、意义和局限性
——法国普罗旺斯100多公里输水隧道勘查经验总结
…… [法] J.L.BARBIER (111)
17. 人工磁大地电流法在浅部工程项目上的应用
…… [法] R.LAGABRIELLE等 (121)
18. 用重力测量法直接测定土体和填土的密度 …… [法] M.BICHARA等 (128)
19. 在岩石、土壤和混凝土内的声波测量 …… [意大利] E.CARABELLI等 (132)
20. 用动力测试法测定地下采场的稳定性 …… [法] J.BONVALLET等 (138)
21. 铁路工程中天然和人工洞穴的勘查与水泥灌浆处理
…… [法] G. ROQUES等 (148)
22. 怎样勘查无法取样的粗碎屑土 …… [法] C.AZIMI等 (160)
23. 应用地球物理调查方法测定岩体的非聚合各向异性
…… [西德] A.BLINDE等 (172)
24. 用井中流量计研究含水层 …… [意大利] D.BRUZZI等 (179)
25. 破碎岩石中的应力和水量的相互关系 …… [瑞典] A.CARLSSON等 (184)

26. 地温和地电法测量土壤中潜流现象	[西德] H. Armbruster 等	(189)
27. 用地球物理方法探测岩溶洞穴	[美] R. F. BALLARD 等	(200)
28. 地球物理测井在边坡爆破设计中的应用	[澳] T. N. HAGAN 等	(206)
29. 用裂隙探测器测量岩体裂隙的原位测定	[日本] R. KOBAYASHI 等	(212)
30. 放射性示踪剂在水文地质钻孔中的应用	[捷克] H. Joseph 等	(220)
31. 用示踪稀释法测定水力传导率.....	[芬兰] E. MALKKI 等	(225)
32. 英格里坝基岩体的地球物理长期观测	[苏] A. I. SAVICH 等	(230)
33. 对格立雅尔凡河锡谷森峡谷段河床基岩的测定	[墨] G. Carlos 等	(235)
参考文献		(239)

用研究地震信号频率的方法探测地层

[法] P.RASOLOFOSAON等

摘 要

文中将土壤和岩石视为地震波的滤波器。

地面上的震动是用锤击地震技术产生的，相应的波动被存储起来。在Firminy地区（法国中央地块）花岗质基岩的表生沉积上试验了这一方法。在存储的不同信号上研究了频率和假频谱。通过与取自标准地震曲线上的数据（速度、深度和走向）对比，指出了地震信号频谱研究对不同层位机械性质的意义。

一、研究目的

本文研究的目的是对地下传播的机械波的形状，地下物质的地质特征及其它特征（含水量，致密程度等），进行相关分析。

要提高地震勘探的解释技术——我们这里涉及的是地震折射法——不应当只限于描述地下空间和评价震波的速度，而应更精确地测定地层。大家知道，光研究地震波在物体内的速度已经不能最终解决问题，而通过频谱研究就可提高评价地下物质机械性质（即适于掘进的性质）的精度。

二、研究地点介绍

研究地点在Firminy幅地质图（1:5万）上位于中央地块南部，主要是一花岗岩岩基Forez深熔花岗岩体。

地表地层可分为四类：

(1) 含有岩石块体的地层。为非均质地层，由沙泥质基质和一系列从小砾石至岩石块体的基本成分构成。主要是由泥流作用冲积而成。

(2) 原地风化地层。总起来说是两种岩相：风化岩（部分风化）和风化砂（全部风化）。还保留着原岩的构造和结构。

(3) 粗砂堆积层。是经重新改造的物质，与原地风化砂不同的是岩石原始结构已遭破坏。

(4) 沉积地层，它又可分为四类：

a, 由有机物质组成的泥炭层，含有与洼地或潮湿气候有关的泥炭藓；

- b. 底杂岩, 构成难于浅水的地带。其特征是泥炭层、砂质层与砂、淤泥、粘土互层产出;
- c. 谷底崩塌堆积物, 特征是砂土层与粘土层互层产出;
- d. 现代冲积层, 特征是上部淤泥、粘土沉积层超覆在夹薄层砾石的粗砂层之上。

三、研究的技术方法

我们用的是两类仪器: 一是BISON轻便型单道地震折射测量仪器, 另一是MINISO-SIE型8道测量仪器, 拥有8个可同时记录道及数据收采系统, 采用8个垂直地震检波器组合与震源排成一线, 震源重5kg。

地震检波器放置成三组:

第一组接收直达波 (2个近震点检波器, 分别距震源1m和3m);

第二组接收初至折射波 (3个中震点检波器, 彼此相距2m);

第三组接收续至折射波 (3个远震点检波器, 彼此相距2m);

第二、第三组检波器在每个测点上的位置, 都要随所测地层厚度的不同 (用传统的时间曲线法计算) 和所要记录的时间的长短不一而变化, 以便能在最小为20ms的时间内分辨出有关的波至, 而不与其它类型的震波发生干扰。

考虑到震源要稳定和提高信噪比, 必须敲击 $50 \approx 100$ 下。

信号经反褶积滤波器滤波后, 就在25ms的时间内以步长为1ms采样。

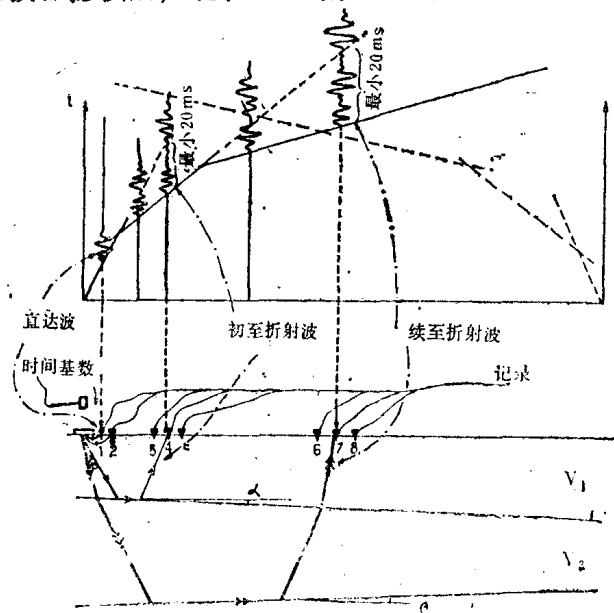


图 1 采用的地震测量装置与相应的波至

a. 近震点检波器1和2; b. 中震点检波器3, 4, 5; c. 远震点检波器6, 7, 8

四、频率和假频研究

我们研究的是地下物质在人工震源下的动态和传震性质。主要目的是查明地下物质的

地质特征及其它参数（致密程度，含水量）在人工震源下的实质性反应（比如不仅是地下物质系统的几何形态）。

地下物质系统的反应一经获得（即地震信号），我们就对以何种信号进行工作作出选择：是以真信号工作（研究的第一步）还是以变换信号工作（研究的第二步）。

——关于用未经处理的真信号工作，我们遇到了几个不小的困难：

(1) 不能比较两个信号的绝对振幅（信号整形问题）；

(2) 不能从信号中排除各种地层的影响（来自近震点检波器的信号除外，因近震点检波器接收的主要是直达波，而反射波的振幅常可忽略不计）。

因此，我们选择了不定任何振幅，而只在直达波上定时间（初至波到达时间，即第一最大值和第一最小值）。

——关于用已经处理的信号工作，我们在好几种变换信号内选择（傅立叶变换，希尔伯特变换，哈达马德变换）。很快选中了傅立叶变换处理信号（T.F），原因是在频率域内易于解释。傅立叶变换解释中的主要困难有：

(1) 不能比较傅立叶变换模量的幅度（信号标准化的问题）；

(2) 傅立叶变换相位的物理解释困难，尤其是有各种因数影响相位（地震仪，电子记录，地下物质的物理性质等等）。

因此，我们只选择傅立叶变换模量进行研究。而研究傅立叶变换模量时，我们只采用频率和相对振幅（没有用任何绝对值）。

1. 假频的研究

这第一步研究，就是采用轻便型地震测量仪器（BISON单道型）直接根据信号工作。这一阶段能直观地感觉到第二步研究的结果。

指导思想是这样的：即用正弦函数 $s(t)$ 逼近初始信号 $f(t)$ （图2）。

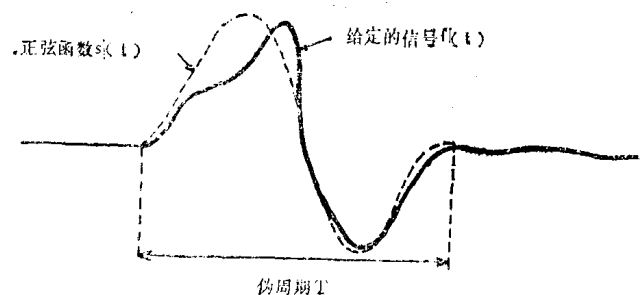


图 2 用正弦曲线逼近一给定信号

所选正弦函数 $s(t)$ 的频率，构成要研究信号的假频〔实际上不能说它是频率，因为根据傅立叶变换理论，信号 $f(t)$ 是由无限多个正弦函数组成〕。这里涉及到要确定正弦曲线，它对正弦函数的组成起的作用最大：是最强的频带。

因而在野外我们对记录到的每个地震信号都给了标号（见图3）：

t_0 ——波至时间

t_{\max} ——第一个最大值出现的时间

t_{\min} ——第一个最小值出现的时间

N ——20ms内的最大值数目

n ——20ms内的最小值数目

(此任意的20ms时限, 我们认为似是一个合理的临界时限, 可保证在此讨论间隔内大致上得到同一类波)

Δt ——信号持续时间

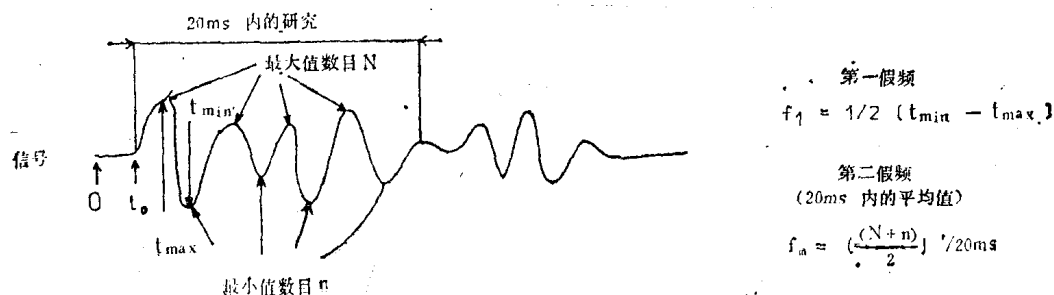


图 3 假频研究中, 在野外测得的峰值

根据对这些数据的测量, 我们可以推导出:

(1) 第一个伪周期 $T_1 = 2(t_{\min} - t_{\max})$, 它是根据第一个弧计算得出的; 或者一个假频 $f_1 = 1/T_1 = (t_{\min} - t_{\max})/2$;

(2) 在20ms内一个伪周期的平均值: $T_m = 20 / \left[\frac{(N+n)}{2} \right]$; 或者一个假频的平均值 $f_m = 1 / T_m = \frac{(N+n)}{2} / 20$.*

(3) 相邻两个检波器之间的假频变化是 Δf , 单位长度上假频降的速度是 $\frac{\Delta f}{\Delta x}$ (Δx = 检波器间的距离)。

所测得的结果列于表1。列入表内的值都是计算的平均值。表内我们也列了标准误差。

从此表可总结得出以下几点:

(1) 计算假频 f_1 (第一条弧) 和 f_m (20ms内的平均值), 得到的结果大体上一致, 但就是这种大体上的一致也是视情况之不同而有所差别, 并不是对所测得的数值进行一次平均就结束。因此, 下面我们接着研究第一假频 f_1 。

(2) 我们认为, 最可挑选的自变参数是与信号相伴的假频。实际上, 与上述参数之一相伴的参数 $\Delta f / \Delta x$ (假频降) 所提供的结果, 其可挑选性就很小。

* 原文为 $f_m = 1/T_m = \left[\frac{(N+n)}{1} \right] / 20$, 似有误。这里 $f_m = \left[\frac{(N+n)}{2} \right] / 20$ 为校者加——译者注。

表 1 假频研究结果 (每个值的标准误差列在右下角)

测量次数	地层类型	第一假频		假频平均值		信号持续时间		伪周期数目		假频降速度	
		f_1 (Hz)		f_m (Hz)		Δt (ms)		n_1		$\Delta f / \Delta x$ (Hz/m)	
16	未风化花岗岩	80.2	3.1	79.0	4.2	28.6	4.3	2.3	0.5	1.8	0.4
26	风化花岗岩	69.2	7.0	65.3	5.7	41.6	7.1	2.9	0.8	6.1	1.7
52	原地硬砂岩	50.4	6.3	52.0	6.0	68.9	8.5	3.5	0.9	8.9	2.3
29	粗砂堆积层	32.5	4.1	30.0	5.3	80.6	10.6	2.6	0.7	7.2	1.9
8	含岩石块体地层	54.0	4.1	50.1	3.9	134.5	19.0	2.8	0.6	13.6	2.9
9	现代冲积层	71.8	3.0	70.1	4.9	152.4	26.0	7.3	1.6	3.6	0.8
15	泥炭层与底杂岩	49.3	5.2	56.0	5.0	208.5	17.3	10.3	1.9	4.2	0.8

对每一个研究点，我们都列出了以信号持续时间为函数的第一假频 (见图4和5)。

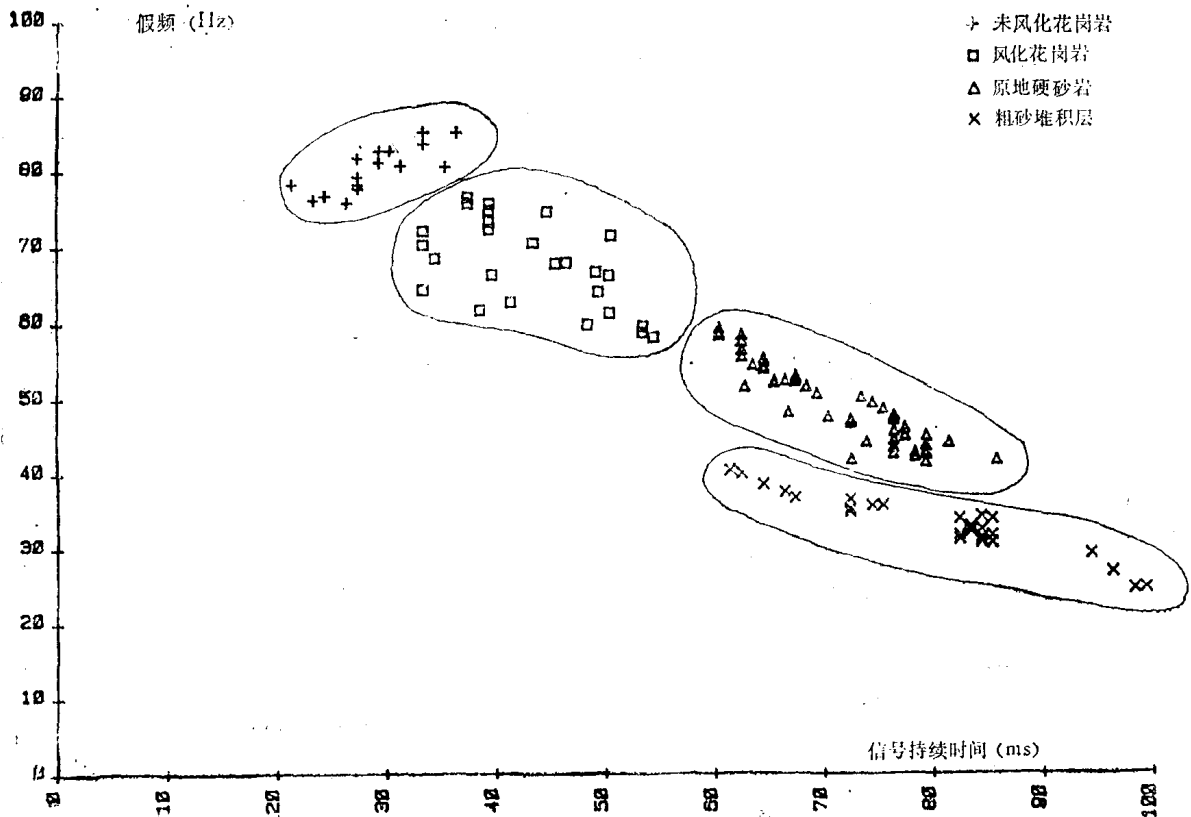


图 4 花岗岩及其派生地层内以信号持续时间为函数的第一假频示意图

由图可见，可以把相应每类地层的不连续带单独地划分出来。

根据此图，可将地层归为两类：

第一类：花岗岩原地风化地层（未风化花岗岩，风化花岗岩，原地硬砂岩）与粗砂堆积层。表现为：信号持续时间增大，假频减弱。这证实了好几种直观的物理现象：地层遭风化越小，成分上越致密，结果就是高频（接近假频）越高，信号越短（频谱展宽）（参见图4）。

第二类：经改造的或微胶结的地层（粗砂堆积层，含岩石块体地层，现代冲积层，泥炭层和底杂岩）。对此类地层，测得的结果是零乱的，原因是地层的岩性多样，物质的机械特性不一。此类地层内，可用低假频（ $\approx 49\text{Hz}$ ）和长信号持续时间（ $\approx 208\text{ms}$ ）将底杂岩与泥炭层清楚区分开来。

含岩石块体地层与现代冲积层，两者的信号持续时间接近（含岩石块体地层 $\approx 134.5\text{ms}$ ，现代冲积层 $\approx 152.4\text{ms}$ ），但假频极不同（含岩石块体地层 $\approx 54\text{Hz}$ ，现代冲积层 $\approx 71.8\text{Hz}$ ，原因是地层含水，导致震波减弱）。

这一步研究向我们证实了直观的物理现象（在胶结的硬介质内，信号短，频率高）。这就促使我们通过进一步分析频率的方法去作更详细的研究。

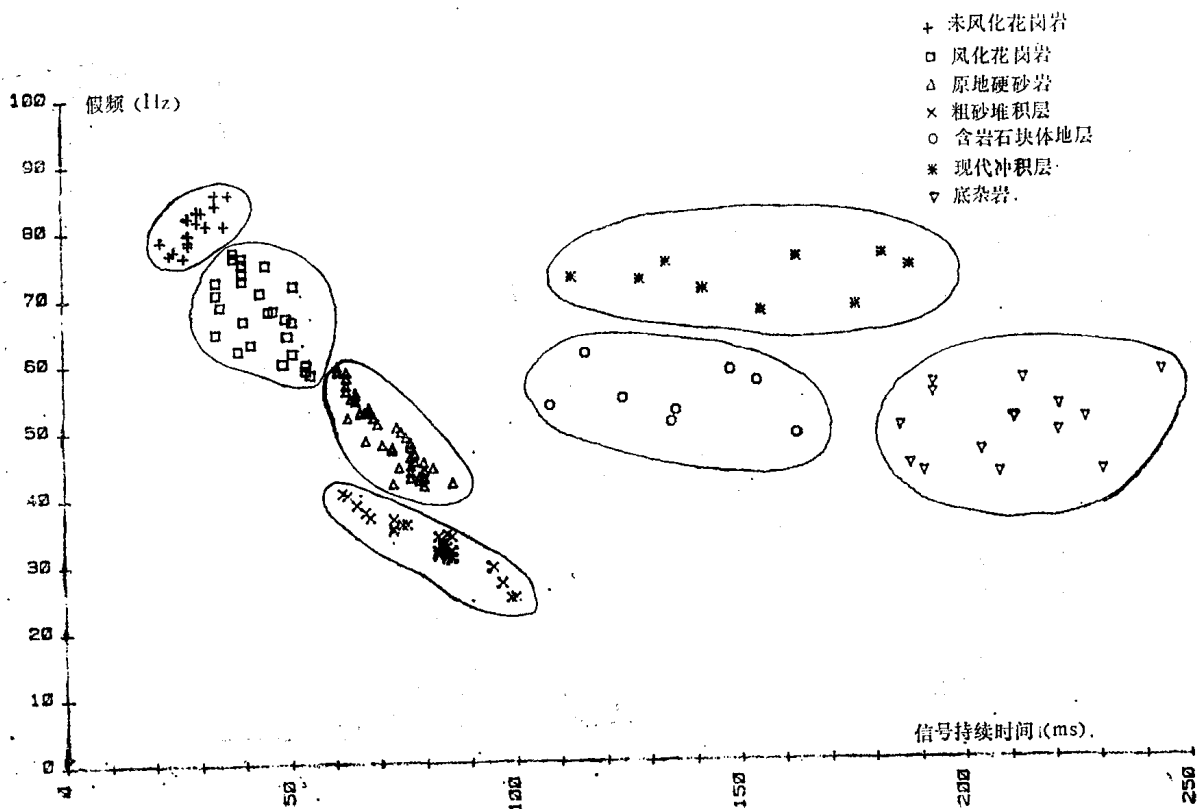


图 5 以信号持续时间为函数的第一假频示意图

2. 频率的研究（傅立叶变换处理信号）

我们的研究目的是弄清地下物质削弱机械波方式的特征。当然，众所周知，天然物质是高截滤波器（低通滤波器）。因此，必然会想到用傅立叶变换（T,F）来研究信号，以

弄清能量最大的频率（参见图6）。

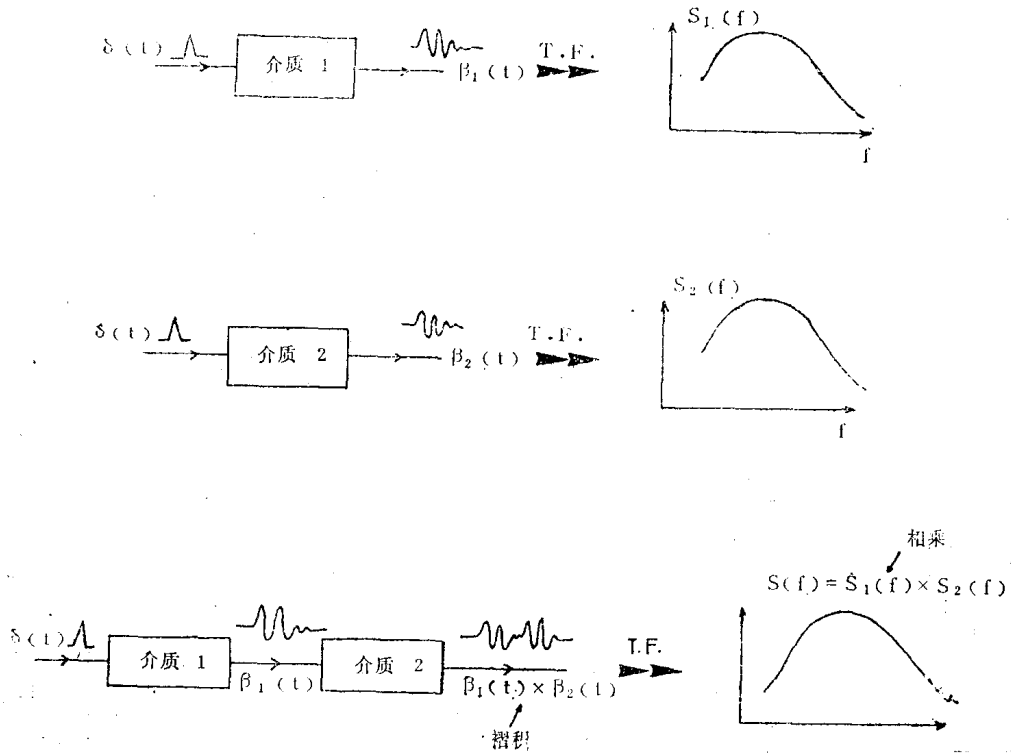


图 6 当量滤波器——傅立叶变换

据图1可得出：

- (1) 直达波只涉及第一类地层；
- (2) 初至折射波涉及前两类地层；
- (3) 续至折射波涉及前三类地层（一般，是两层地表地层与一层基岩；两层地表地层中：一层是风化地层，另一层为原地地层）。

不过，应当分别弄清某一类地层的信号特征，即这类地层的信号能与其周围一系列地层的信号分辨开来。由此，关于滤波过程，就得出了以下的想法（参见图7）：

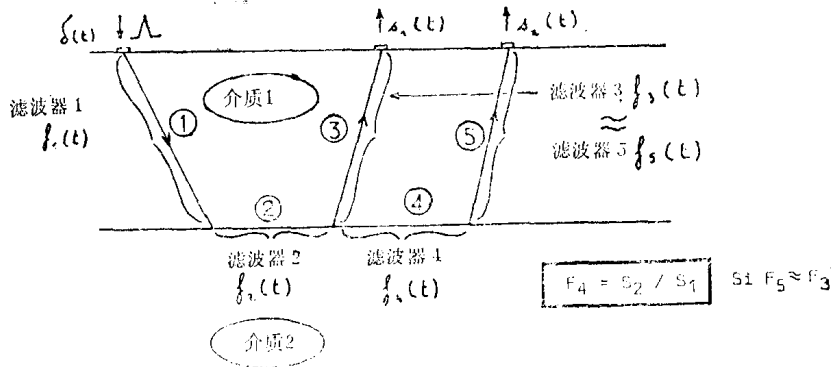


图 7 分辨同一介质内震波效应的滤波过程

假定有平行的两束光线来自同一折射层。

土壤微粒速度垂直分量的傅立叶变换

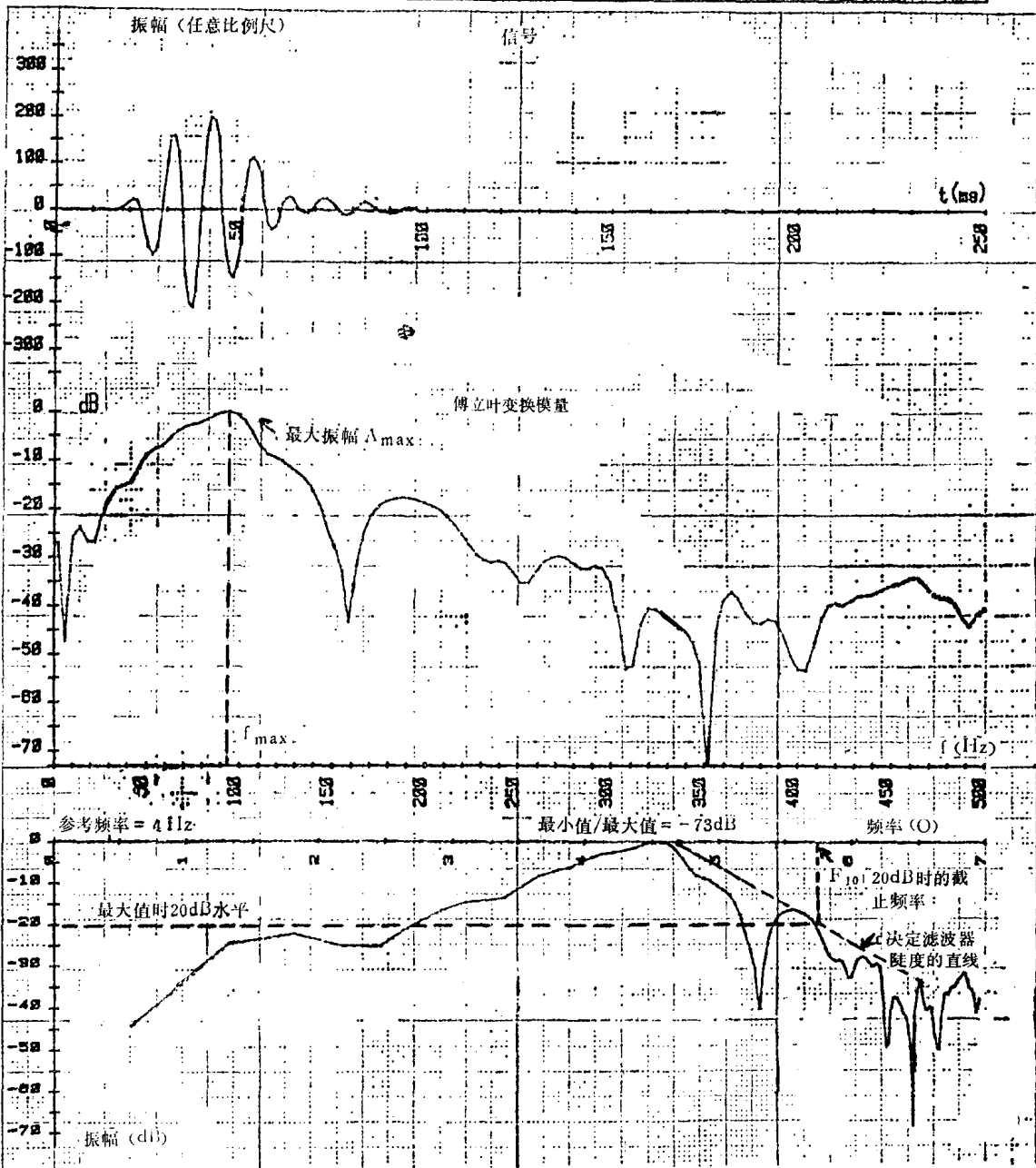


图 8 确定频率研究的参数

第一束光线走的路线是①，②，③；

第二束光线走的路线是①，②，④，⑤；

对于机械波来说，任意一条路线 i ，可以被视作是脉冲响应特征为 $f_i(t)$ 的滤波器 i 。根据滤波理论，如假定入射的初始信号符合狄拉克分布 $\delta(t)$ ：

第一个信号： $s_1(t) = f_1(t) * f_2(t) * f_3(t)$

第二个信号： $s_2(t) = f_1(t) * f_2(t) * f_4(t) * f^0(t)$ 。

路线③与路线⑤相差不大，可以假设 $f_3(t) \approx f_5(t)$ (1)。因此，两条路线不重合的只有④那部分。

此外，如考虑 $S_1(t)$ 与 $S_1(f)$ ，以及 $F_1(f)$ 与 $f_1(t)$ 的傅立叶变换，则可得：

$$S_1(f) = F_1(f) \times F_2(f) \times F_3(f)$$

$$S_2(f) = F_1(f) \times F_2(f) \times F_4(f) \times F_5(f)。$$

但据(1) $F_3(f) \approx F_5(f)$ 。因此，如关系式 $S_2(f)/S_1(f)$ 成立，则 $S_2(f)/S_1(f) \approx F_4(f)$ ，涉及的只是介质2。

经 $F_4(f)$ 型滤波器后，我们确定了4个特征参数（参见图8）：

—— A_{max} = 傅立叶变换模量的最大幅度；

—— f_{max} = 与 A_{max} 相对应的频率；

—— n （以dB/O表示）= 截止速度或截止陡度。是在以频率（以O表示）为函数的傅立叶变换模量（以dB表示）进行双对数表示时，通过高频部分的线性近似确定的。

—— $f_{10} = 20\text{dB}$ 时的最大截止频率。相当于从 A_{max} 至 $A_{max}/10$ 的振幅的傅立叶变换。

应当指出，我们的检波器（Mark Products, L-25B型）得到的是平缓的特征曲线，其频率超过4.5Hz。只有与最高频率相对应的那些振幅才是可以比较的。如将我们研究的所有地层画出以截止频率（单位Hz）为函数的截止速度 $n(\text{dB/O})$ 的图（参见图9），可以发现以下几个有意义之点：

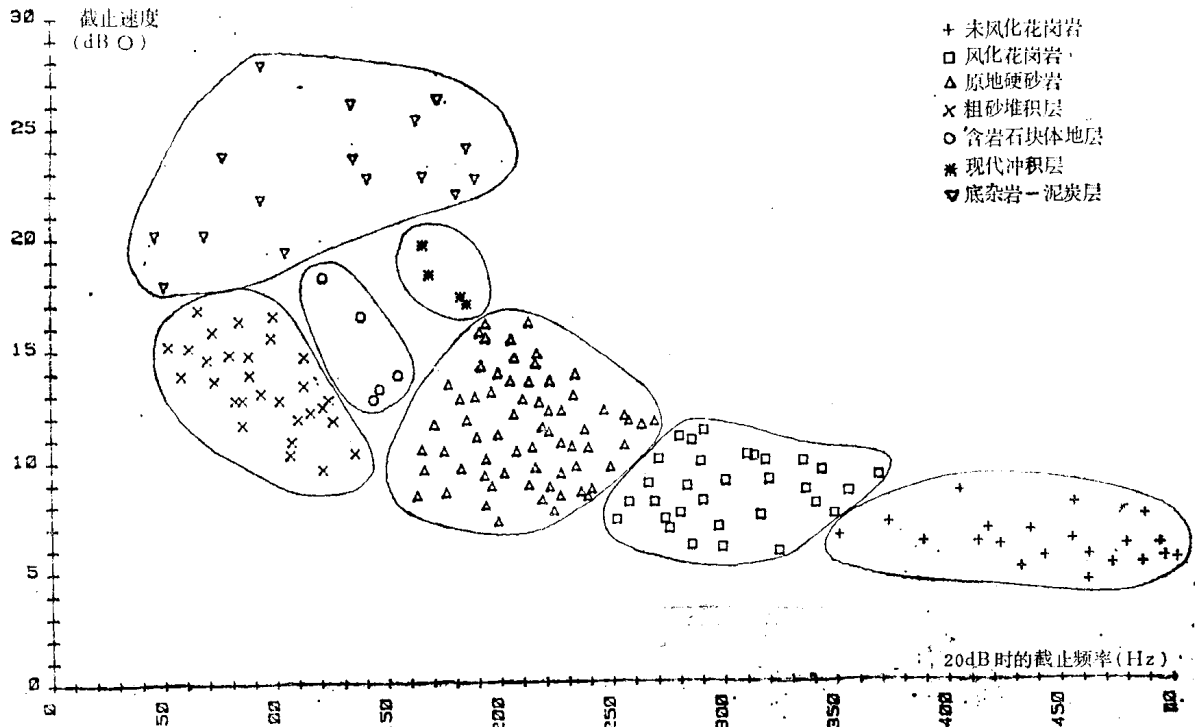


图9 截止速度/截止频率曲线图上对地层的划分

(1) 图上分出了不连续的各个区，每区表示相应的地层类。可以发现曲线是很有选择性的。

(2) 大致可以得出这样的结论：

一是地层愈胶结，致密，高频通过愈好，因而截止速度 $n(\text{dB}/\text{O})$ 就愈低，在20 dB时的截止频率就愈高（比如：未风化的花岗岩）；二则相反：地层风化和剥蚀愈烈，高频就愈易被滤掉，截止速度 $n(\text{dB}/\text{O})$ 就愈高，而20 dB时的截止频率就愈低（例如：泥炭层和底杂岩）。

这些直感性的物理现象在这里得到了极好的检验。实际上，按截止速度的递增和截止频率的递减为序，可得出以下一系列地层：

- a. 未风化花岗岩（测20次）；
- b. 风化花岗岩（测28次）；
- c. 原地硬砂岩（测48次）；
- d. 粗砂堆积层（测20次），含岩石块体地层（测5次）；
- e. 泥炭层和底杂岩（测15次）。

五、频率和假频研究的比较

对上面的两种研究方法，我们主要侧重从以下两个方面进行比较：

- (1) 对假频参数和傅立叶变换的最大频率参数进行比较；
- (2) 对以信号持续时间为函数的假频与以截止速度为函数的频率图象进行比较。

1. 假频与傅立叶变换的最大频率

表 2 BISON/MINISOSIE 仪器在不同地区和岩层类型上应用结果对比例
(每一地区的三个例子)

地层类型	第一假频	20ms内的假频 平均值	傅立叶变换的 最大频率
未风化花岗岩	81.5	80.2	79
	78.0	79.3	80
	85.1	83.2	84
风化花岗岩	64.2	64.6	60
	70.3	73.2	72
	74.7	77.1	76
原地粗砂岩	46.3	45.9	44
	52.1	50.2	54
	55.1	57.3	58
粗砂堆积层	28.7	29.3	30
	32.3	33.2	35
	37.1	40.8	41
含岩石块体地层	50.2	53.2	50
	53.8	54.7	56
	57.9	56.8	59
现代冲积层	70.2	72.9	73
	72.1	74.2	75
	74.9	74.8	76
泥炭层—底杂岩	45.4	46.3	44
	50.2	52.1	50
	54.2	56.9	58

表2可逐点和逐层地对假频和最大频率值进行比较。

由此可见，假频率很接近于傅立叶变换的最大频率值，这证明它也极为接近信号中最强的频率（此最强的频率决定其大致形状）。

2. 以信号持续时间为函数的假频与以截止速度为函数的截止频率图象的比较

从图5和图9看，面对两种相似的图象，特别是相对各类地层分出的区是那樣的相似，我们不会漠然视之。

显然，这不是马马虎虎观察到的结果，实际上：

(1) 陡度或称截止速度 (dB/O) 这一参数，与信号的持续时间 Δt 是有一定联系的。一个短信号（狄拉克分布 $\delta(t)$ 型）的频谱很宽，几乎没有陡度，而一个长信号（时间函数不变型）则相反，频谱很窄，陡度很大；

(2) 如我们所见，接近于傅立叶变换模量最大值时频率的假频：

a. 对致密或胶结地层，此假频以及接近于傅立叶变换模量最大值时的频率都很高，截止速度很小，这就导致20 dB时的最大截止频率很高。

b. 对软地层或风化地层：此假频和傅里叶变换最大值时的频率一般都很弱，而截止速度则相反很大，这就导致20 dB时的最大截止频率普遍相当低。

六、结 束 语

本项研究虽然只对地震勘探这一特定技术方法（地震折射法）以及一种特定的震源类型（锤击）进行的，但它在两个极为不同的方面（技术手段上与所研究的参数上）为我们划分地下物质机制提供了重要的情况：

第一，方法的优点就是只需普通的测量设备（BISON型地震仪），而得到的却是立即可在野外应用的成果（不同于用传统方法测得的有关速度、深度和走向等资料）。此法的缺点是只适用于直达波，也就是说只适用于第一类地层。

第二，必须做进一步更详细的研究，需要有更合理的方法进行数据的收采（密尼索西8道测量仪）和处理（褶积，反褶积）。此外，此法还可用于探测第二和第三类地层，与第一种方法正好相反。

下一步研究，建议从收录的信号中研究其它参数（例如地层的品质系数），以便更好地了解地下不同地层的状态。

（芮仲清译 张肇元校）