

高频地震

(苏联) И. С. 别尔宗 著

俞 寿 朋 译

中 国 工 业 出 版 社

高频地震

(苏联) И. С. 别尔宗 著

俞 寿 朋 译

中国工业出版社

本书詳細介绍了高频地震法的物理基础和工作方法。分析了許多野外调查所得的资料，指出了高频地震法与中频地震法相比所具有的优点。

本书可供从事地震勘探的野外工作人员、研究人员以及大专院校有关专业师生参考。

И. С. Берзон

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СЕЙСМИКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

МОСКВА—1957

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

* * *

高 频 地 震

俞 力 朋 译

*

地质部地质书刊编辑部編輯（北京西四羊市大街地质部院内）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业許可証出字第110号）

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张13¹/₂·插頁6·字数310,000

1962年10月北京第一版·1963年7月北京第二次印刷

印数 1,091—1,803·定价（10-7）2.10 元

*

統一书号，15165·1529（地质-156）

目 录

緒論	3
第一章 創立高頻地震法的前提	3
§ 1 地震波振幅吸收系数与頻率的关系的数据簡述	3
§ 2. 高頻地震儀器的頻率特性	11

第一篇 实际介质中弹性波传播速度参数測定

第二章 在小基綫上測量速度时的观察和解釋方法	15
§ 1. 測量方法	16
§ 2. 解釋方法	19
§ 3. 据小基綫上的参数測量数据測定速度的准确度	21
第三章 在各种岩石中測量速度的結果	24
§ 1. 在小基綫上測量沉积岩中的速度	24
§ 2. 在水平坑道內測量沉积岩中的速度	25
§ 3. 在露头上測量沉积岩中的速度	33
§ 4. 沉积岩中速度参数測量的地震地质成果	38
§ 5. 在变质岩中測量速度	39
§ 6. 在露头上和不深的露天采掘坑中測量变质岩中的速度	43
§ 7. 在矿井內測量变质岩中的速度	46
§ 8. 变质岩中速度参数測量的地震地质成果	49
§ 9. 方法上和物理上的結論	51

第二篇 水平层状介质的研究

第四章 研究水平层状介质时地震法的分辨能力	53
§ 1. 表征地震研究法分辨能力的基本参数	54
§ 2. 反射波法的分辨能力	56
§ 3. 折射波法的分辨能力	60
§ 4. 方法上的結論	70
第五章 用高頻地震法研究埋藏在小深度上的水平层	70
§ 1. 观察方法	70
§ 2. 相当于埋藏在小深度上的界面的高頻波之記錄图特性	75
§ 3. 高頻折射波随距离的衰减	80
§ 4. 研究小深度时观察結果定量解釋的准确度	84
§ 5 方法上和物理上的結論	88
第六章 用高頻地震法研究埋藏在中等深度上的水平层	89
§ 1 观察方法	89
§ 2 相当于埋藏深度 $20 < H \leq 300$ 米界面的高頻波之記錄图特性	91
§ 3 記錄高頻反射波的某些特征	95
§ 4. 高頻折射波的始点	96

§ 5. 折射波的干涉带	98
§ 6. 记录高频波时的屏蔽效应	99
§ 7. 与高频地震法数据相联系的几个中频折射波对比问题	104
§ 8. 高频反射波和折射波相位时距曲线的定量解释	105
§ 9. 当转到记录高频时地震法分辨能力变化的实验数据和观察数据的比较	108
§ 10. 方法上和物理上的结论	110

第三篇 垂直层状介质的研究

第七章 垂直层状介质的几何地震学	112
§ 1. 两种介质的一个垂直界面。爆炸点位于较低速的介质中	112
§ 2. 两种介质的一个垂直界面。爆炸点位于较高速的介质中	119
§ 3. 与较高速介质相接的低速垂直层	121
§ 4. 多层垂直层状介质	126
§ 5. 水平层复盖下的垂直层状介质	127
§ 6. 方法上的结论	132
第八章 垂直层状介质中传播的波的一些动力学特征	133
§ 1. 两个半空间的垂直界面	133
§ 2. 垂直层	144
§ 3. 有复盖介质时的垂直界面	152
§ 4. 方法上的结论	157
第九章 垂直层状介质条件下的实验研究	158
§ 1. 研究区的地震地质条件	158
§ 2. 选择高频地震法的根据	159
§ 3. 高频波在垂直层状变质岩中的传播	162
§ 4. 复盖变质岩的介质对记录高频振动的影响	164
§ 5. 频率范围的选择	166
§ 6. 观察方法	167
§ 7. 相当于变质岩和结晶岩顶面的波的动力学特征及其时距曲线的特征	171
§ 8. 纵测线上波的动力学特征及其时距曲线的特征	177
§ 9. 横测线上波的动力学特征及其时距曲线的特征	181
§ 10. 在纵、横测线法中所得记录图动力学特征的比较	183
§ 11. 在记录不同主频的波时所得记录图的动力学特征	186
§ 12. 测定界面速度的结果	191
§ 13. 普通折射波置换时记录图动力学特征的物理性质	199
§ 14. 不均匀垂直层状介质的制图方法	201
§ 15. 据折射波动力学特征编制地层平面图的方法	204
§ 16. 方法上和物理上的结论	207
结论	209
参考文献	211
译名对照表	214

緒 論

地震勘探法正被人們广泛用以寻找各种矿产，它的基础是记录主頻自25至70赫芝的反射波和折射（率領）波。

在苏联，各种地震方法的应用使人們成功地解决了一系列重要問題，特别是在寻找石油及天然气产地方面。但是，对于解决正在日益发展的社会主义工业所提出的新的构造問題說来，目前在勘探实践中所用的各种地震勘探法并不适用。这是因为它們的分辨能力不足，同时由于工业上对大深度区以及小深度区都提出了一些新任务，使深度的研究范围扩大了，因此現有的地震法就不能适应需要。为了克服这些困难，必須进一步改进地震勘探方法。这种改进的一个必然的步驟就是扩大地震波的頻率范围：既向高频方面扩大，也向低频方面扩大。扩大了頻率范围，就不但有可能会扩大地震法的研究深度，也可能增加地震法能解决的勘探問題的数量。

在地震勘探所面临的新任务之中，最复杂的一个任务就是小深度詳細勘探，而这个問題对于各种金属矿和煤矿的寻找，以及巨大建筑物下的工程地质調查都有重要的意义。

有关利用地震法研究小深度的最初的著作是В.Ф.邦契科夫斯基（Бончковский）[1]，以及以后的П.Ф.費多托夫（Федотов）[2]所写的。在这两位作者的著作中指出，研究小深度必須提高地震记录图上時間讀数的准确度。为此建議对仪器作一些改进，主要是提高照相紙的牵引速度，以及隔較短的时间間隔标一時間标记。但即使进行了上述改进，对于以记录約25—70赫芝的較低頻率为基础的普通地震法來說，其分辨能力对研究小深度仍是不够的，因此采用这些改进并不能保証以必要的詳細程度和准确度来进行探查。有鉴于此，1946年Г.А.甘布尔采夫（Гамбургцев）[3]建議利用波的較高頻的成分来勘探小深度，并創立了地震法的一种新形态——高频地震法（俄文縮写 ВЧ），以记录頻率达数百赫芝的波为基础。向记录高频过渡在原則上应导致提高地震法的分辨能力，对于詳細的小深度勘探，这是极为重要的。

到那时为止，不論在苏联和国外的文献中，都还没有关于记录由实际介质中爆炸所激发的高頻波的实验数据，因此为了創立上述方法，首先应在野外条件下进行研究，以查明记录高频波的可能性，并确定其在各种介质中传播的頻率范围、高频波能通过的距离和透过的深度。

1946年在Г.А.甘布尔采夫的领导下，由Н.Е.費多先科（Федосеев）和А.Я.麦拉穆德（Меламуд）参加，在苏联科学院地球物理研究所內創制出第一套高频地震仪器——ВЧ-9站；这一年內布置了高频地震法的第一批野外实验研究，工作条件为埋藏深度 $H \leq 300$ 米的水平层状介质。

1947—1952年間由作者担任技术指导，进行了大規模的研究，条件是埋藏在水平层状沉积下的深度 $H \leq 150$ 米的多层垂直层状介质。人数众多的科学工作人員、工程师、实

驗室工作者参加了这个工作，其中有А.М.耶皮納齊耶娃 (Епинатьева)，М.И.拉茨·希茲吉亞 (Рац-Хизгия)，Н.И.達維多娃 (Давидова)，А.Я.麥拉穆德，Г.Н.帕里斯卡婭 (Парийская)，С.П.斯塔羅杜布羅夫斯卡婭 (Стародубровская)，Н.Г.馬卡羅夫 (Макаров)，Н.Е.費多先科，Н.С.希皮林 (Шипилин) 等。这个研究的結果查明了一系列关于垂直层状介质中地震波传播的基本物理学問題，并指出了适合用高频地震法解决的一些新的問題，这些問題用中頻地震法原則上是不可能解决的●。

1947—1949年間，在Ю.В.黎茲尼欽柯 (Ризниченко) 的技术指导下进行了工作量不大的高频地震法工作，条件是埋藏深度不大的結晶岩侵蝕帶。参加这一工作的有И.С.帕尔霍明科 (Пархоменко)，Ю.И.华西利耶夫 (Васильев)，Н.С.希皮林。

在1953—1954年布置了用高频地震法借記錄反射波的高频成分研究大深度 (約 1.5—2.0 公里) 的試驗[7]。試驗說明，高频地震法不仅可以勘探小深度，也可以勘探大深度，这是很有意义的，特別在解决有关寻找石油的問題时。

在所有上列研究中，除了采用高频地震仪器外，也采用典型的中頻仪器。对比記錄不同主頻的波的記錄图，可以查明高频波传播的一系列特点，并且肯定利用高频波与利用中頻波的优缺点。

在研究高频地震勘探方法的同时，在高频仪器的进一步研究和改进方面也做了大量工作。1947年在Г.А.甘布尔采夫领导下，由Н.Е.費多先科和А.Я.麥拉穆德参加制成了多道的高頻站 ВЧ-22。以后这种地震站又为 А.Я.麥拉穆德和 Н.С.希皮林所改进。

除了研究制定一种利用高频的勘探方法外，在1946—1950年又創立了以記錄高频波为基础在小基綫上作速度参数測量的方法。起初用 ВЧ-9 仪器来进行这种研究，到 1948 年 Н.Е.費多先科在 Г.А.甘布尔采夫的领导下制成了 ВЧ-9п 型便携式地震站，專門供小基綫上的速度参数測量使用[8]。

上述研究的結果創立了一种新的地震勘探方法——高频地震法，它基于記錄由爆炸激发的頻率為70—500赫芝的波。这样一来，勘探中所用的頻率范围向高频区大大地扩展了。向記錄波的高频成分过渡，改进了記錄图上波的分辨能力，开辟了在解释中研究和广泛利用地震波动力学特征的可能性。

我們指出，在高频地震法的研究中，除了用爆炸来激发振动外，也进行了利用撞击的試驗。試驗表明，这种高频波激发方法适用于小深度的勘探和小基綫上的速度参数測量。小深度研究中利用撞击的專門試驗在1947—1950年К.К.查波爾斯基 (Запольский) 也进行过[9]，为此目的他采用了頻率特性曲綫很寬的仪器。

在苏联以外各国文献中关于在地震勘探中利用波的高频成分的第一个报导发表于1952年，即在苏联开始高频地震法工作之后六年。关于記錄頻率达300—500赫芝的地震站的参数，在著作[10—12]中进行了簡短的报导。在論文[10, 11]中，也敘述了記錄反射波高频成分(100—125赫芝)的試驗数据，反射波系来自埋藏深度 20—800 米的界面。在著作[13]中敘述了井中小基綫上速度測量时記錄直达波高频成分 (200赫芝) 的試驗数据。

近年来由于創立了地震波的磁記錄方法[14, 15]及地震波的頻率分析方法[16]，制出

●下面，我們称基于利用頻率范围25至70赫芝的地震法为中頻 (俄文縮写СЧ) 地震法，它不同于低频 (俄文縮写НЧ) 地震法，后者是基于利用更低的頻率，約10—20赫芝。低频地震法創立于1950年[4]，是根据地壳的深地震測深的工作經驗創立的[5, 6]。

了可以记录自 10 至 300 赫芝的频率范围宽广的仪器，并且可以用各种滤波在以后复制，这些滤波中也包括了高频的。这种仪器主要是适用于在海洋的深水部分用反射波法进行海洋研究[17]。

本书叙述了在高频地震法的物理基础和方法方面作者进行的理论和实验研究的结果。编写本书时援引了 1946—1951 年由作者领导并参加下所得的丰富的试验资料。书中也参考了一些过去发表过的论文[18—22]。

第一章是绪论，简单叙述了创立高频地震法的基本前提。在这一章中对地震波吸收系数与频率的关系方面的知识进行了简略的叙述，并分析了高频地震法研究中所用仪器的频率特性。以后的叙述共成三篇。

第一篇包括第二章和第三章，是关于用高频地震法在野外条件下在小基线上速度参数测量的研究。在本书这一篇中叙述了小基线上速度参数测量的观察方法和解释方法，并分析了各种地震地质条件下速度测量的实验工作的结果。

第二篇包括第四、第五、第六三章，叙述了关于水平层状介质条件下高频地震法的研究。在第四章内对在记录振动延续度不同、频率不同的波时折射波法和反射波法的分辨能力问题进行了理论考察。在第五章内对记录埋藏深度小的 ($H \leq 20$ 米) 界面的高频折射波的实验数据进行了分析，在第六章内对记录中等埋藏深度 ($20 < H \leq 300$ 米) 界面的高频折射波和反射波的实验数据进行了分析。

根据观察数据的分析，对水平层状介质内高频波传播的一些特点，以及用高频地震法勘探这种介质的特点作出了结论。

第三篇包括第七、第八和第九章，叙述了有关垂直层状介质条件下的研究。

在第七章内叙述了垂直层状介质的几何地震学问题。在第八章中考察了垂直层状介质中波的一些动力学特征问题，并分析了相位时距曲线和振幅曲线的特征。考察了平面波在两个弹性半空间的界面上的法线投射，以及在两个弹性半空间之间的薄层面上的法线投射的情况。在第七章和第八章内根据理论分析作出了一些有关垂直层状介质的勘探方法的结论。在第九章中讨论了在垂直层状介质条件下高频地震法所得的试验数据。特别注意了分析上述介质中折射波的动力学特征及阐明其性质。

在本书最后根据所考察的问题作出了简短的结论

我们指出，本书中所考察的和为作者所研究出的一系列有关高频地震法研究的问题，对于中频和低频地震法也是有意义的。

第一章 創立高頻地震法的前提

在用高頻地震法作首次研究(1946年)以前,在記錄由爆炸激发的高頻反射波和折射波方面,缺乏實驗数据。因此在工作的初期阶段,在大致地选择高頻地震法的頻率范围时,曾不得不依据各种頻率的振动在岩石中传播的實驗室数据和理論研究数据,以及基于記錄頻率約25—70赫芝的地震勘探的工作經驗。

由于脉冲源激发的振动譜中包含了各种頻率,其中也包含了高頻,所以就有可能創立一种以利用波的高頻成分为基础的地震勘探法。但是在进行實驗研究以前,还不了解这样一个問題,即在解决各种勘探任务时可能需要在距爆炸点距离相当远的条件下进行工作,在这种情况下,能否記錄到地震波的这种成分。

为使波的高頻成分能被記錄下来并用于地震勘探,必須滿足以下基本条件:

(1) 选择爆炸条件时应考虑到,在高頻地震法工作所需要的頻率范围内所激发的振动譜中,高頻成分的强度要大大超过較低頻成分;

(2) 因为高頻波随距离的衰减比低頻波剧烈,因此介质的吸收性不应太强,以使高頻波通过这种介质后,其强度仍足以被記錄并在記錄图上显示出来(依据介质的吸收性可以用不同的高頻范围来記錄波);

(3) 地震仪器应适于記錄高頻的。

在研究高頻地震法时,主要注意力曾集中在實驗研究各种介质中高頻波的传播,以及其記錄的最佳条件問題。关于高頻振动的最佳激发条件研究得較少。这是因为:到目前为止,地震勘探中对于有利于激发一定頻率范围的爆炸条件問題几乎还没有被研究过。在这方面几乎没有作过專門的理論和實驗研究;这个領域內的个别問題在著作[23—29]中已有論述。各种岩石中爆炸所激发的振动的基本知識,是由多年来地震勘探的實驗結果得到的,而这种地震勘探的基础是記錄約25—70赫芝的頻率范围[30—32]。在布置高頻地震法的研究时利用了这些經驗,并且在进一步的實驗过程中已选择出了各种地震地质条件下最有利于激发高頻波的条件。这些問題将在第二、第五、第六、第九諸章中來說明。

在本章§1中簡短地概括了地震波吸收系数与頻率关系的知識,这对于論証在实际介质中記錄地震波的高頻成分的可能性來說,具有很重要的意义。在§2中考察了为記錄高頻波而制造的、并在进行實驗时应用的仪器的頻率特性。

§1 地震波振幅吸收系数与頻率的关系的数据簡述

为了轉变到記錄地震波的高頻成分,了解下面这个問題是很重要的:在远离震源时表示地震波吸收的参数(即吸收系数和吸收減縮)是怎样随頻率变化的。

对于在均匀的有吸收性的介质中传播的平面地震波,波的振幅 A 与自某一点起算的距离 x 的关系,已知可以用指数函数的形式表示:

$$A = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (1.1)$$

式中 A_0 为常量,而 α 为波在空間的振幅吸收系数,它是頻率 f 的函数。

假若波是由点源激发的,在公式(1.1)中应引进一个乘数,它决定了由于波前

表面的扩大而引起的波的振幅变化 ([33—35], 并参看第五章)。

量 α 在下面为简短起见称它为吸收系数, 说明波在单位路程内的振幅变化。吸收减缩 ϑ 与吸收系数的关系为

$$\vartheta = \alpha \lambda, \quad (I.2)$$

式中 λ 为波长。吸收减缩 ϑ 表示在一个波长的距离内由于吸收造成的振幅减小。

地震波振幅吸收系数与频率的关系问题, 在一系列理论的和实验的工作中已经研究过了。现在我们对上述领域内的研究结果作一简短的探讨。

地震波吸收的基本理论 在这个领域内最先从事研究的是现代地震学的奠基人Б.Б. 戈利津 (Голицын) [36], 他考察了面波的振幅由于介质的吸收而减小的问题。

目前在地震学和地震勘探中被最广泛采用的有两种地震波吸收理论, 都是为均匀各向同性介质拟定的。

一种是弹性后效理论, 是为博尔茨曼 (Boltzmann) [37] 提出, 并为傑里亚金 (Дерягин) [38, 39]、索科洛夫 (Соколов) 和斯克里亚宾 (Скрябин) [40], 然后是戈果拉泽 (Гоголадзе) [41] 所发展的。

一种是粘滞损失理论, 是霍查利 (Hosali) [42]、妹泽克维 (Sezawa) [43, 44] 和里克 (Ricker) [45, 46] 所发展的。

弹性后效理论 这一理论的基础是如下假设: 物体内的弹性力不仅依赖于所考察的瞬间的变形量, 并且依赖于以前的瞬间的变形值。

在傑里亚金的著作[38]中, 对后效函数的一个局部情形指出: 纵波、横波和面波的对数吸收减缩 ϑ 不依赖于振动的频率。弹性后效理论导致地震波有反常色散的结论; 因此, 随着波的频率增大, 速度 V 应该增加。在傑里亚金的著作中没有给出速度随频率增加的定量估计。在实际介质中自10赫芝 (地壳的深地震测深 [5, 6]) 至10万赫芝 (地震波动过程的模型实验和岩样中的速度测量 [27, 47]) 频率范围内测定速度的实验数据说明, 速度实际上不依赖于频率, 因此并没有速度的色散。

当速度 V 不变而频率变化时, 吸收减缩不变, 这一事实导致吸收系数对频率有如下线性关系:

$$\alpha = c f \quad (I.3)$$

式中

$$c = \frac{\vartheta}{V}$$

粘滞损失理论 这一理论 [42, 46] 基于假定固体内存在内摩擦, 象液体内的粘滞摩擦一样。这一理论导致存在地震波的正常色散的结论。当粘滞系数象在岩石内所得到的那样小 [36, 46] 时, 速度的色散实际上并不存在 [42]。这时波 (纵波、横波和面波) 的吸收系数正比于频率的平方, 并且以下式表示:

$$\alpha = k f^2, \quad (I.4)$$

式中系数 k 正比于粘滞系数 ν 。这时吸收减缩正比于频率的一次幂。

这样, 粘滞损失理论比起弹性后效理论来导致吸收系数随频率增加更为迅速的概念, 因之对于创立以记录较高频率为基础的地震法的可能性来说, 粘滞损失理论导致更不利的结论。因此, 将实验数据与上述两种理论所导出的结论进行比较就有特别重要的意义。

地震波吸收系数与吸收减缩的实验研究方法 现在已研究出了以下几种方法: 在岩样

上和各種介质的模型上測定吸收性质的實驗室方法；根据記錄脉冲源激发的反射、直达和折射波的地震勘探数据來測定的方法；根据实际介质中譜和源激发的固定正弦彈性振动的观察数据來測定的方法。

實驗室条件下測定岩石的吸收性质 測定各种岩石吸收性质的實驗室方法在很早以前就研究出了，并且已积累了大量的采用本法各种形态結果所得的實驗資料。最广泛传播的方法是基于研究在各种岩石作成的軸中激发的受迫振动的方法（例如〔48—50〕）。这时測得的是振动随時間的阻尼系数和阻尼減縮。在著作〔51〕中指出：根据理論考察，振动随時間的阻尼減縮在数量上等于在空間吸收減縮的量；因此，考察了振动随時間的阻尼減縮的量及其随頻率的变化，就可以作出关于在空間波的吸收減縮随頻率变化性质的結論。

一系列作者所得的数据〔50, 52〕說明，当頻率在很寬范围（自数百赫芝至数十万赫芝）內变化时，振动在各种沉积岩和結晶岩中的吸收減縮实际上不变。仅在某些湿度大的岩石中观察到阻尼減縮与頻率的綫性关系〔53〕。

现在，各种介质中吸收性的研究是在地震波动过程中用模型實驗設備进行的〔27, 35〕。这个方向很有前途，但现在发表的資料还不多，还不能据此作出关于吸收系数和吸收減縮与頻率的关系的結論。

据地震勘探法数据測定岩石的吸收性质 在用高频地震法工作以前，只在个别情况下对岩石的吸收性质作过这样的測定，并且工作量很小。例如，可以提出著作〔52〕，文中通过研究反射波振幅对其到达時間的关系來測定介质的吸收系数〔54〕。高频地震法的創立为广泛利用地震波的动力学特征开辟了新的可能性，并研究出了折射波振幅定量解释的方法〔33, 34, 55〕。用这些方法已經整理出了用爆炸激发振动时所得的實驗振幅曲綫，并測定了縱的直达波和折射波的吸收系数和吸收減縮的值〔33, 34〕。关于撞击激发的波随距离衰减性质的某些数据是 К. К. 查波尔斯基得到的〔9〕。但是在野外地震观察时所得的数据終究还不足以解决地震波吸收系数和吸收減縮对頻率的关系的問題。

根据固定正弦振动观察数据測定岩石的吸收性质 在高频地震法的實驗研究开始以前，只有在記錄較低頻率（自2至40赫芝）的固定彈性振动时得到的各种沉积岩中波的吸收系数和吸收減縮的数据〔56—58〕。按照上述著作作者的意見，在岩石中激发的固定正弦振动是面波。这些波的吸收減縮与頻率无关。

在1947年Е. В. 卡魯斯(Карус)和И. П. 帕謝契尼克(Пасечник)〔59, 60〕根据Г. А. 甘布尔采夫的建議开始了用各种固定振动法的工作，它基于利用較高的頻率，約100—3,000赫芝（地震声学法）。結果在查明固定正弦振源在岩石中所激发的波的性质方面得到了大量的實驗資料，并且在各种沉积岩和变质岩中对这些波的吸收系数和吸收減縮进行了多次的測定。譜和源在岩石中所激发的固定正弦振动是一种复杂的波，是由各种波（縱波、横波和面波）迭加形成的〔60—62〕。根据上述复杂波的振幅与距离的关系曲綫測定的吸收系数，等于优势波的吸收系数〔61, 62〕。根据實驗数据的分析說明，当在地面上观察时，复杂振动中面波占优势，而当在地下巷道中观察时，横波或面波占优势〔60〕。在各种岩石中和矿井中測定的优势波吸收系数，接近于綫性的規律随頻率增加，而吸收減縮实际上与頻率无关。

这样，實驗室研究和固定振动法的低頻形态和低频（地震声学）形态的野外观察数据，都与傑里亞金的理論著作〔38〕中所導出的結論符合得很好，他的結論是吸收系数与頻率

有綫性关系，吸收減縮是常量。

應該着重指出：在实际介质中，吸收減縮和吸收系数对頻率的关系，无疑要比上述对均匀介质研究出的两种理論所导出的关系复杂些。这是由于实际介质是不均匀的，并且是由各种成分（各种薄层、各种大小的晶体等）組成的[63, 64]。如著作[65—67]所指出，不均匀介质，即使由理想弹性的各种层組成，它本身象一个滤波器，在其中一个頻率带可以通过，另外的就被吸收。这个結論也为实验数据所証明。实际介质的非理想弹性和不均匀性的結合，比起前面考察的弹性理論所导出的吸收系数和吸收減縮对頻率的关系来，可以造成复杂得多的关系。今后必須研究以更接近于真实条件的假定为基础的吸收的数学理論。弹性后效理論在象傑里亞金所发展的那样的形式下，可以作为这种理論的第一近似来考察，它可以解释一系列观察数据。

§2 高频地震仪器的頻率特性

如在§1中所指出的，当布置高频地震法的第一批实验研究时，实际上沒有縱波在实际介质中随距离衰减性质的定量数据，因此在进行实验以前，不知道观察时可以指望哪一个頻率带。在实验工作（第三、五、六、九章）过程中已經查明，在各种地震地质条件下可以記錄到直达波、折射波和反射波的哪些极大頻率；因此修改并訂正了对高频地震仪器的要求，并对其各部分的綫路和結構进行了修改。对高频仪器提出的主要要求如下：

1. 仪器应記錄土壤振动的高频成分。在实验工作（其結果将在以后各章介紹）中已肯定，根据地震地质条件，在按高频的反射波法或折射波法勘探时，可以主要指望自70至400赫芝的頻率带；在小基綫上的速度参数测量可以記錄頻率达500—600赫芝的波。为使仪器能記錄上述主頻的波，其特性曲綫极大点的位置，應該比基于利用約25—70赫芝頻率范围的地震勘探仪器在更高頻的区域。

2. 由于波的低頻成分比高频成分随距离衰减得慢，从离开爆炸点某一距离开始，波譜中低頻成分的强度将变得大于高频成分的强度。为了能滤去波的低頻成分，仪器頻率特性曲綫在低于极大頻率的頻率范围内應該有較大的陡度[68]。

3. 仪器应具有高的分辨能力，以使相当于不同界面的、具有相近到达時間的各波在記錄图上有所区别，并且它們能单独地追踪和在以后解释中被利用。

4. 为了較完整地利用各波的动力学特征，并为了提高記錄图上時間讀数的准确度，高频站示波仪中卷紙速度应比标准地震站大。

5. 由于在高频地震法中利用各波的振幅特性有特別大的意义，仪器道的灵敏度必須做成可控制的。最方便的控制方法是对整个地震道用在放大器作分段調节的办法来进行灵敏度的調整。在利用波的振幅时調整道灵敏度的优点詳述于著作[69]中，而实现的方法詳述于著作[70]中。这里我們只指出，当采用調整了的道灵敏度时可以极为充分地解决各波在置換带中的振幅比率問題，以及相当于各界面的波随距离衰减程度的差別問題。在各波的記錄区沒有迭掩，因之不能利用各波振幅比率与距隔的关系的情形下，后一問題有特別重要的意义。

現在我們来对高频地震法試驗研究中所用仪器的頻率特性作簡短的考察。

B4-8地震站 1946年制造，是高频地震仪器的第一种类型。整套地震站包括有电动式高频检波器，其可动和不动质量的比率大为增加；放大器，带有450赫芝高自然頻率检流

計的示波仪。照相紙运动速度可达8—9米/秒。放大器中装有几档滤波，可以在125—415赫芝的頻率范围内变动頻率特性曲綫的极大点（图1）。这种仪器用于沉积岩中和某些变质岩中的速度参数测量（第二章和第三章），在水平层状介质条件下高频地震法的研究（第五章和第六章），以及在垂直层状介质条件下开始研究的阶段。在上述工作中主要利用滤波 I—I，这时仪器頻率特性曲綫的极大位于頻率415赫芝。

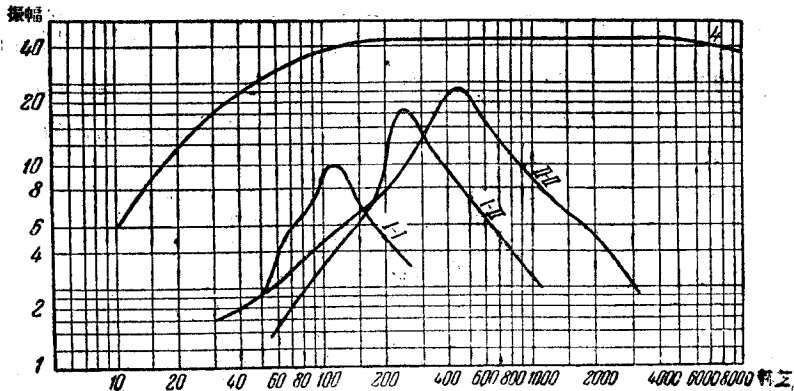


图1 BЧ-9站放大器頻率特性曲綫

I—I 等为滤波

图1—5的纵軸上振幅用假定单位繪出

当在水平层状介质条件下观察时，也利用中頻仪器 CЧ-13，它調整到記錄比标准仪器稍高的頻率。在图2, a 上介紹了 CЧ-13 站放大器的頻率特性曲綫；在这个站上絕大部分观察是在特性曲綫 1 时进行的，它的极大点位于頻率80赫芝，而在极大振幅的0.707的水平綫上确定的通頻帶寬度[31]位于頻率50—120赫芝的范围内。为了比較，在图2, 6 上介紹了ЭХ0-1标准地震站的頻率特性曲綫，这种地震站在垂直层状介质条件下工作时（第九章）。由比較图2, 6 的曲綫 I—I，I—IV（其 $f_{max} = 50—70$ 赫芝）与图2, a 的曲綫 1 可見，CЧ-13 放大器頻率特性曲綫的极大稍移向較高頻方向。

BЧ-22地震站 系 1947年制成，以后又作了改进，使它适合于垂直层状介质条件下高频地震法工作的特点。在这种研究中查明，記錄折射波的高頻成分时必须特別注意抑制同一些波的低頻成分。为此必須在放大器頻率特性曲綫的低于极大頻率的頻率范围内（特性曲綫的左支）增加特性曲綫的陡度。根据实验工作的經驗，А.Я. 麦拉穆德肯定，特性曲綫左支的对数陡度 S_n 应等于5—6，即应大大超过标准地震站的陡度 S_n 。实验研究的结果也肯定，除了放大器頻率特性曲綫的极大点位于較高頻（約150—200赫芝）的滤波档外，还必须設計頻率特性曲綫的极大点位于約80—90赫芝頻率的滤波档（第九章）。图3上表示了 BЧ-22 放大器在較低的滤波 I 和較高的滤波 II 上的頻率特性曲綫，而在图4上表示了 BЧ-22 仪器相当于同一些放大器滤波档的整道頻率特性曲綫。工作中主要利用滤波档 I—I，I—II（图4, a），有些情形下用 II—II（图4, 6）。为了比較，在图5上介紹了中頻站“伊萊”（Илай）的道頻率特性曲綫，它是与 BЧ-22 站同时用于垂直层状介质条件下的研究的（第九章）。特性曲綫是在进行观察时所用的附加滤波档上取得的。由比較图4, a 的特性曲綫 I—I 和图5的特性曲綫可見，BЧ-22 仪器这一滤波上的道頻率特性曲綫的极大点和“伊萊”仪器的实际上位于同一頻率，但特性曲綫左支的平均陡度

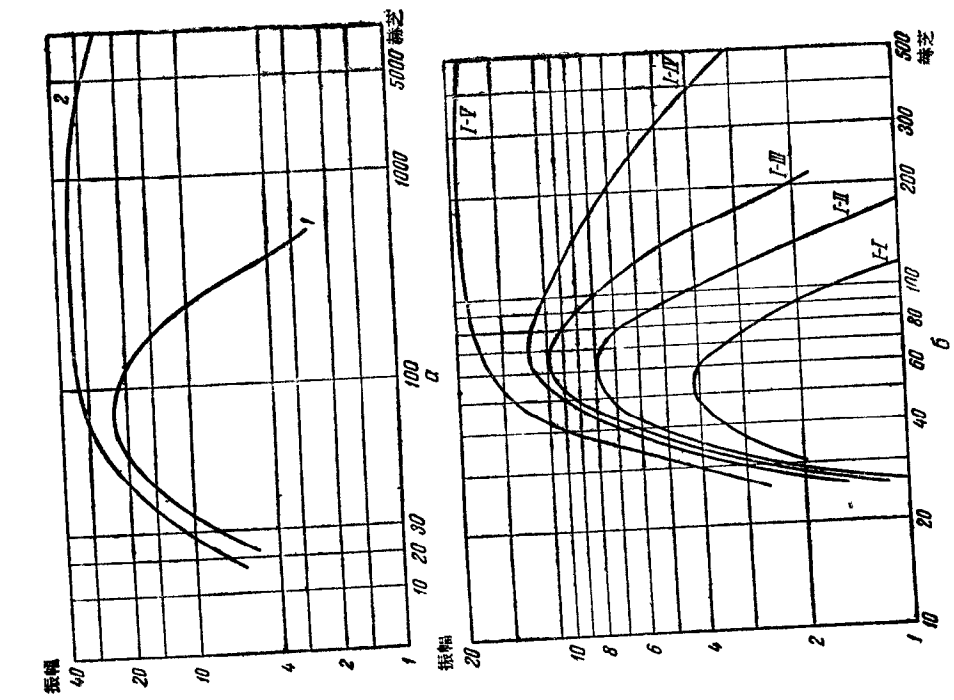


图 2 CЧ-13 站 (a) 和 ЭХО-1 站 (б) 放大器频率特性曲线

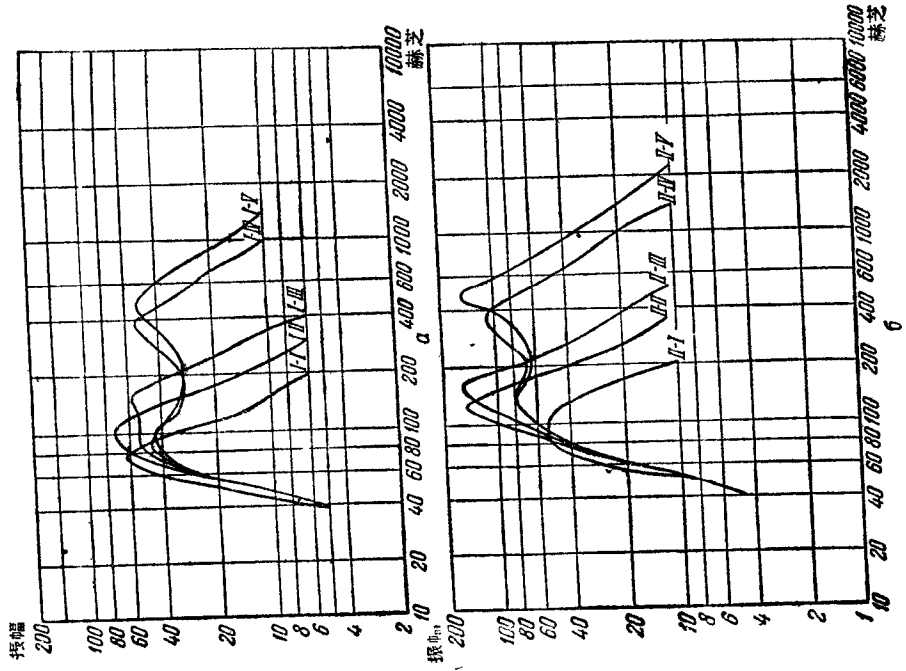


图 3 БЧ-22 站放大器频率特性曲线
a 为较低的滤波 (I), 6 为较高的滤波 (I)

S_{α} 在“伊萊”仪器要比BЧ-22仪器小得多。后者也是两种站所记录主頻量不同（第九章）的主要原因。

用BЧ-22站工作时用 CII-7和“伊萊”型检波器。

BЧ-9n 站（便携式，9道），1948年制成，用以在小基綫上和地下采掘巷道中进行速度参数测量〔8〕。全套仪器包括小型磁型检波器（Г. А. 甘布尔采夫設計）、高频放大器和示波仪。放大器頻率特性曲綫的形状与 BЧ-9站放大器相似；放大器頻率特性曲綫的极大点在两个不同滤波档上分别位于頻率260和560赫芝。这种仪器主要用于变质岩中和矿井中的速度参数测量（第二章和第三章）。

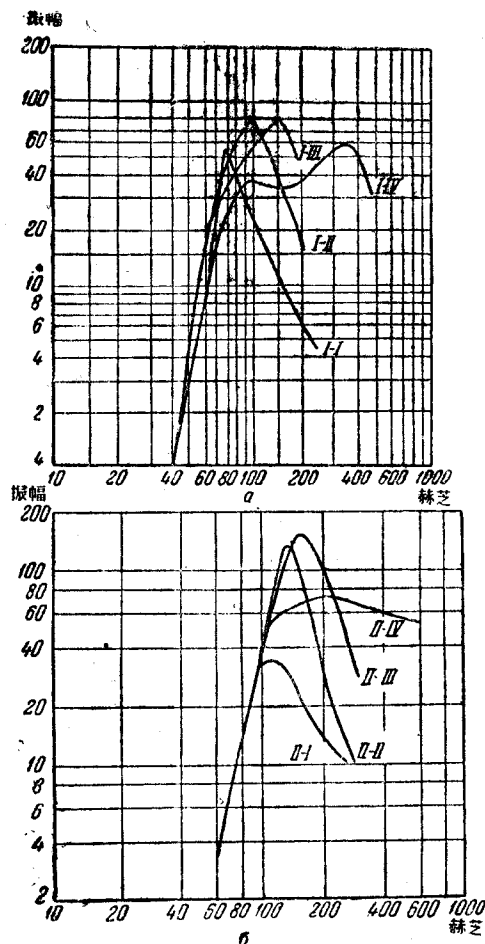


图 4 BЧ-22站道頻率特性曲綫
 α 为較低的滤波 (I), β 为較高的滤波 (I)。各特性曲綫在固定偏压时取得

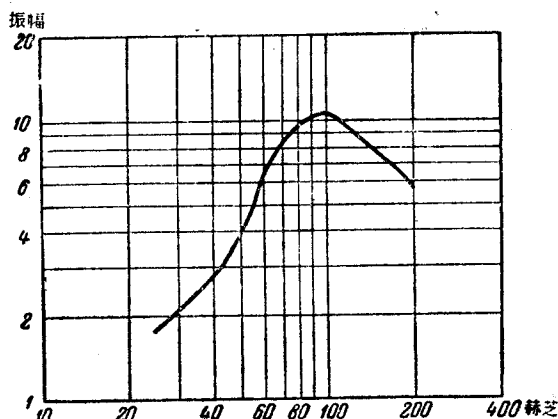


图 5 “伊萊”站道頻率特性曲綫，在实驗工作中所用的滤波上在固定偏压时取得

第一篇 实际介质中弹性波传播速度参数测定

第二章 在小基綫上測量速度时的观察和解释方法

由反射波法和对比折射波法的地震勘探經驗已知,实际介质在速度上是不均匀的。各种岩石中的速度极为不同,它可以“超”量(即小于声音在空气中传播的速度)到約6,000—6,500米/秒的量(例如見[20, 50, 64, 71—77])。岩性相同的岩石中,速度往往可在很寬的范围内变化[20, 50],与年代、埋藏深度、变质程度、存在节理和微觀不均匀性、风化和氧化程度、測量方向与层理方向間的夹角等都有关系。

当根据反射波法和折射波法数据測定速度时,通常測得介质某一地段內的平均量 V 。測量速度平均值的基綫长度愈大,对所求得的速度量可能有影响的因素就愈多。为了能将各种地质因素和物理因素(例如节理、存在薄层或不大的不均匀性等等)对速度的影响区分开来,必須轉变到在介质的不大的地段上測量速度,也就是在小基綫上測量。这时只在介质的不大地段內进行平均,因此在小基綫上測量速度可以認為接近于在各种岩石中測量真速度。

在小基綫上測量速度有巨大的意义,这不但对研究各种介质中地震波传播的物理問題是这样,对于研究各种地震地质条件下波传播的特点以进一步发展地震勘探方法也是这样。

对高频地震法來說,在小基綫上測量速度有特別巨大的意义,因为高频地震法的基本任务是詳細划分介质,查明速度与周围岩石不同的薄层,寻找构造的破坏地带等。

在小基綫上測量速度的基本困难是必須大大提高時間讀数的准确度,就是比一般基于記錄頻率約25—70赫芝的地震勘探的准确度要大为提高。为实现这个基本条件,所記錄的土壤振动成分必須轉变到比一般用于地震勘探中的成分頻率更高。

在苏联,В.С.伏尤茨基(Воюцкий)和А.Е.奥斯特罗夫斯基(Островский)从事拟定自然条件下在小基綫上进行速度参数測量的方法已有多年。

В.С.伏尤茨基[78]拟定了用阴极示波仪在小基綫上測量速度的方法(脉冲法)。这个方法是以只利用单个检波器記錄图上波的初始为基础的。

对比折射波法的工作經驗說明,为了測定速度,不但必須得到波的清楚的初始,并且要得到整个的振动形状。取得不是一道的記錄图,而是若干道的記錄图也有极重要的意义;只有在这种情形下,才能根据波的动力学特征的对比来确定:离源点不同距离上記錄到的初至波是否属于同一层,以及在假定它們是直达波时根据它們的初始来計算速度是否合理。此外,某些波,特别是横波,只能在記錄图的續至区内被記錄下来,因此只有在取得整个振动記錄图的条件才能測定这些波的传播速度。

在А.Е.奥斯特罗夫斯基的著作[79, 80]中拟定了井中在小基綫上測量速度的方法。他利用振动过程的示波方法。照相紙是高速运动的。这时波的主頻达到几百赫芝,有时还

要高些。这个方法比脉冲法大大地前进了一步，因为依据所得的记录图不仅可以确定波的初始，还可以研究其振动形状。

这个测量方法的严重缺点是只用两个检波器记录，因此不能利用追踪波的对比原则。

近年来，国外在发展利用振动的高频成分在井中小基线上测量速度的方法得到很大的成就，振动是由爆炸激发[13]和尤其是利用超声脉冲激发的[81, 82]。

由于高频地震法的发展，产生了拟定小基线上速度参数测量的方法的问题，不仅要在井中测量，也要在各种地面条件（露头上和露天采掘坑中）和地下巷道（水平坑道和矿井）中测量。这些工作在1946年开始进行；工作中用9道的高频仪器，可以在同一次爆炸或撞击时得到几个检波器的记录图。

研究的结果拟定了在地面和地下条件下在小基线上进行速度参数测量的方法。所进行的测量可以对各种岩石在各种埋藏条件下的弹性波传播速度作出一系列结论，也可以对各种介质中高频波传播的特点作出某些结论。

§1 测量方法

主要采用纵测线法和横测线法在小基线上测定各种岩石中的速度；个别情形下也用面积微测量。本节只叙述所采用的观察方法的基础。至于在各种岩石中测定时观察方法上的一些特点，包括在地面上和地下采矿巷道中的测定，将在下一章描述观察数据时叙述。

选择测量速度的基线长度（同一爆炸点所得的纵时距曲线的长度、爆炸点到横测线上检波器的距离、面积测量时测线间的距离）依赖于以下一些主要因素：（1）所记录的波的主频；（2）所研究的岩石中波传播的速度；（3）在其中进行测量的地层的厚度；（4）在所研究的介质中波随距离衰减的程度。现在我们对上面列举的诸因素作简短的考察。

（1）所记录的波的主频愈高，确定波的初始和相位时间的准确度就愈高。时间读数的准确度提高了，相应地就提高了测定速度 V 的准确度。这样在转变到记录高频时就允许在比较不大的（约几米）基线上测定速度，而测得的速度量的误差不超过百分之几；这种准确度为实用的目的已足够了。

（2）为了保证测定速度 V 有足够的准确度和稳定性，测量基线长度应这样选择：所测量的速度 V 愈大，基线也愈大。在§3中我们将较详细地来考察这个问题。

（3）如果在其中进行测量的水平地层的厚度不大，其速度比与它相接触的地层低，则在纵测线法中距爆炸点不大的距离上，记作初至波的就可能是与一个或几个较高速层的界面有关的折射率领波。在垂直层状介质中，若在近于地层走向的方向上测量速度，也可以观察到同样的现象。如果所考察的地层具有很小的厚度，并且速度比邻近地层低，则相当于这个地层的波，只有在离爆炸点的距离不大（往往不超过2—3米）处才能记作初至波。因此，如果只指靠初至波来测量速度，就必须选择小的测线长度，总共只等于几米。

如果测定薄层中的速度时依靠利用在续至区内记录的直达波，测线的长度就必须这样选择：使得这个直达波在与邻近高速层相当的折射波的干涉带之外记录下来。现在有这样一个问题：利用在续至区内记录的直达波，能不能测定包含在高速层中的低速水平薄层（厚度0.7—1.5米）中的速度？为了解决这个问题，在较长的纵测线长进行了观察，这些测线上爆炸点到检波器的距离达22米。在这些测线上，与在其中布置测线的岩石相当的