

7657

56.2577

深井地震(波)观测研究

李凤杰等著

学术书刊出版社

深井地震波观测研究

李凤杰 等著

7-465/4



学术期刊出版社

1989

内 容 简 介

本书主要包括国家地震局下达各直属机构以及各省地震局承担的有关井下地震观测技术的研究成果,反映了我国在深井地震波观测方面的长足进步。书中收集了综合性介绍1篇、井下与地面记录对比分析研究11篇、仪器改进及故障分析4篇以及井下地震波理论分析2篇,共计18篇,可供从事地震学、地球物理学以及其他有关专业的科研人员、分析人员和大专院校的有关专业师生参考。

深井地震波观测研究

李凤杰 等著

特约责任编辑:苏公望

学术期刊出版社出版(北京海淀区学院南路86号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京印刷三厂联营厂印刷

开本:787×1092毫米1/16 印张:9 字数:235千字

印数:0001—1500

1989年7月第1版 1989年7月第1次印刷

ISBN 7-80045-324-3/p·9

定价:6.00元

前 言

井下地震观测技术是本世纪60年代才发展起来的测震学的一个分支,由于它在避免地表干扰,获得更多更真实的地震信息方面取得了显著的科学效益,从而引起了世界各国地震学者们的重视。近年来,这门技术又有了长足的发展。由于新技术、新材料的应用,仪器灵敏度不断提高,体积则更趋小型化,仪器工作深度也由初期的百米以内浅井发展到目前数千米深的深井中,能在高温高压的条件下长期工作。其应用范围已由原来只适于陆地覆盖层较厚的平原地区,扩展到海洋沉积层下的海底井下观测。仪器工作频带也由原来的只能记录近的短周期地震而发展到可同时记录中、长周期的远震,其动态范围则由原来的40dB扩到120dB。记录方式也由原来的模拟记录发展到了数字式触发磁带记录。

就观测领域而论,原来主要是井下地震观测,现已发展到井下地声、地温、地形变、应力应变及井下液、气体的物理化学量的变化测量及其它地球物理量的观测。

我国深井地震观测技术,开始于70年代,由国家地震局地球物理研究所首先研制成功了具有我国特点的JD-2型三分向深井地震观测系统。该系统具有体积小、灵敏度高、性能稳定、适用范围广(可以利用油、气、水废井)等优点,并成功地解决了深井密封,不同井径及任意深度的锁固,井下陀螺定位及方位补偿,电缆应力解除及便于安装维修回收等一系列技术难题;还可通过电子放大及电讯传输系统将地震信号通过通用型电测井电缆传至地面或记录中心,为井下综合观测指出了方向。该仪器还进行了海底井下观测试验。

目前全国已有近70个深井观测台站,分布在河北、河南、山东、云南、甘肃以及京、津、沪等十多个省、市。仪器工作深度一般为300~500m,其中几个油田区观测台站工作深度超过1000m。这些台站有的已连续工作10年以上,获得了大量的观测资料。

1986年5月国家地震局和中国地震学会地震专业委员会在天津联合召开了“井下地震波学术讨论会及工作会议”。会上主要就地震观测技术、国外现状、观测资料的分析应用、井下地震记录特征及井下地震波传播理论等方面研究成果进行交流;与会代表对井下观测资料的分析应用进行了讨论。一致认为,在沉积层覆盖较厚的平原地区,井下与地面记录对比,信噪比有着明显的提高,一般可达1~3个量级。如地面放大为千倍级,井下则可达万倍乃至数十万倍,视井深及地质环境条件而定,大大提高了仪器监测的灵敏度。同时也发现地动位移幅度偏小、主要震相到时提前、尾波拖长、波形变异等问题,这给资料统一使用带来诸多不便。大家认为,从学术和实验对比观测结果看,井下地震记录比地面更逼真于地震波动的实际。上述差别还随井深和地区而异。在确定地震基本参数时,可以根据统计结果对有关公式的系数加以校正。这些研究表明,我国深井地震观测已由实验性转向实用化阶段。

本书共收录文章18篇,其中综合性1篇,井下与地面记录对比分析研究11篇,仪器改进及故障分析4篇,以及井下地震波理论分析2篇。这些研究成果均以近年应用JD-2型深井地震观测系统所获资料为依据。有些已在其它刊物上发表过的文章(个别除外)、本书均未选入。

欢迎批评指正。

目 录

前言

我国的井下地震观测研究	修济刚 (1)
深井观测随深度的变化规律	
——复合对数模型	张少泉、李凤杰、林云松 (5)
井下与地面记录的地震波动力学特性的某些理论分析及其应用	
.....	冯德益、吴国友、聂永安、郭瑞芝、何柏荣、(24)
深井观测的噪声、信号和信噪比研究	林云松、李凤杰、张少泉 (47)
一个复杂的非线性系统	
——平原地区复盖层	卫鹏飞、王俊国、吴晓芝 (61)
噪声随深度的衰减在垂直和水平分量上的差异及噪声振动的波型性质	
.....	林云松、李凤杰、张少泉 (66)
华北平原地区井下地震波的记录特征和近震震级 M_L 的测定	
.....	王俊国、卫鹏飞、吴晓芝、李彦林、周焕鹏 (72)
联合使用井下与地面地震观测台网的三维地震定位方法初探	
.....	吴国有、冯德益、聂永安 (81)
任北油藏区1986~1987年震群活动特征研究	李凤杰 (85)
邯郸无线传输地震台网中的深井摆记录特征及其测震效果	方健 (96)
井下与地面地震仪背景噪声及地震动的对比分析	王洪德 (101)
瞬时长周期干扰的分析及解决办法	周璐璐 (106)
深井摆地震仪的软标定	李留藏 (113)
菏泽地震台深井与地面三分向同步对比观测	林云松、张少泉、李凤杰 (117)
井下地震尾波衰减的研究	张裕中、徐之跃、嵇才建、王正庆 (124)
井下常见故障及其处理	胡履端、周光宇、李凤杰 (127)
聊城井下与地面记录的对比研究	杨学军 (132)
JD-2型深井地震仪密封技术	胡履端、王明、李凤杰、周裕铭 (136)

我国的井下地震观测研究

修 济 刚

(国家地震局科技监测司)

摘 要

本文简要回顾了国内外井下地震观测研究工作状态,阐述了我国在井下测震工作中总结出的井下记录的某些特征和规律,介绍了国内组织井下专题研究和综合观测研究的思路 and 实际进展。本文还提出今后井下测震工作的研究重点,即:一方面开展深井观测特征的对比、分析等专题研究,改造现有的观测系统;一方面需加强与国家其他部门、企业的横向联系,利用现有的技术和仪器装备为国民经济建设服务,反过来也促进学科的发展。

井下地震观测技术在近20年来发展很快,由于仪器和钻孔技术的提高,国内外均可在深度大于3000m的井孔中完成连续可靠的地震观测。国外有的还实现了宽频带、低噪声、大动态范围数字化记录的井下地震观测系统(例如象SRO等),已极大地提高了资料的分辨率。近年来的实践表明,井下地震观测已成为在沉积层较厚的城市及附近地区监测微震活动的有效手段。

一、国内外的井下地震观测研究工作现状

目前由美国建立的SRO(地震研究观察台)系统的13个台,都是孔深为100m的井下地震台;分布于北美大陆的区域试验台网(RSTN)的5个台,也是井下地震观测台。日本为监测东京地区的微震活动,1980年已在东京附近建成由3口深井组成的台网,而苏联在中亚等地区也建有井下地震台网。

SRO台站的仪器均安装在约100m深井下的基岩上(如花岗岩),SRO系统遍及全球各地。对比观测表明,和地面相比,井下记录基本不受到干扰影响。日本深井最深达3510m,穿过第四纪沉积达到第三纪变质岩,不仅在10Hz时放倍率达百万倍,而且井下干扰水平比地表小1.5~2.0个量级。苏联的千米深井的井下噪声水平降低且变化小,信噪比和观测能力大幅提高。^{*}

我国开展井下地震波观测研究也有近20年的历史,尤其是在第四纪覆盖较厚的冲积平原地区建设了一些井下观测台,在西部以及东部沿海也有少量井下地震观测仪器。大部分利用石油废井,在重要地区也专门打少量井孔。目前国内井下观测的台站已有50多个,主要分布在京津、上海、江苏、山东、河北、山西、陕西、甘肃、四川、云南昆明等地。天津地区所属地震台站由于所处位置覆盖层厚、仪器放大倍数低、因而除蓟县外都是井下摆;云南地区基岩台多,仅在昆明市有一口452m深井用于速报;陕西地区黄土层厚,第四纪达1400m,在西安和咸阳有深井观测。江苏和上海地区,由于人烟稠密,干扰大,覆盖层150m厚,在这一地区观测井深一般为300m深。

我国的井下地震观测深度一般为几百米,深井地声台网最深的在四川江油,深达3300多米。测震井下仪器大部分固有频率1Hz,放大倍数几万倍,现在全部为可见笔绘记录,

^{*} 冯德益、范广伟:《国内外井下地震观测与分析的现状综述》,国际地震动态1986.9

我国从70年代中期开始对深井系统进行开发研究,研制了具有我国特点的小型、高灵敏度、适应性强、可控的JD-2型三分向深井地震仪,并成功地解决了深井密封、井下定向、方位补偿、电缆应力解除、不同孔径井孔的锁固装置等一系列观测技术难关。成功地研制了具有国际水平的SD-1型深井地声仪,该仪器不仅耐高压(300kg/cm²),而且耐高温(85℃)、耐酸碱腐蚀,带宽可达0.01~10 000Hz,采用自压密封技术下井,已在2000~3000m深的井内连续观测记录。这些观测技术方面的困难逐渐得到解决,为在我国推广使用奠定了基础。

二、井下地震观测记录的某些特点

随着深井观测技术的不断改进、完善和井下监测能力的扩大,我国的井下观测系统正在从实验性试用观测转变到实用化阶段。井下台网和台站在监测预报和记录微震活动的研究中正在发挥越来越重要的作用。井下测震系统属整个测震常规工作系统的一部分,例如,北京一天津台网对唐山地震活动的监视,上海一苏南台网对南黄海地震活动的监视等。近年来,国家地震局组织一些专业人员对井下地震波记录与地面记录(包括平原沉积盖层的记录和基岩露头上的记录)在运动学和动力学方面的差别进行了对比分析,为井下记录资料的实用化提供可靠的定量化依据。

一般来说,对于平原覆盖地区井下记录与地面记录相比,一方面有效地降低了噪声,突出了信号;同时相对地面记录而言存在地动位移振幅偏小、到时提前、拐角频率模糊、尾波拖长、波形变异等五个特征。但也有个别例外,例如深井地声仪记录的振幅和地面记录相比并不偏小。

总之,这些差别给整个测震资料的统一使用和解释带来很大困难。一方面从学术上看,井下地震记录较之地面记录的确更为“逼真”;另一方面从技术上看,井下观测更为复杂(如国外的海底钻孔地震观测),这样就需要在分析其特征规律的基础上作出包括各种参数测定在不同条件下的校正,以期达到资料分析的统一。近年来地震系统一些研究人员在参数测定中已陆续提出一些统计公式用于井下观测资料的校正,如震级改正公式(包括幅度改正与持续时间改正)、走时改正公式等、带有区域性的特征,都是可行的。

结合资料的分析解释,还针对井下观测特点进行一些相应的实验和理论计算,基本上可以讲,上述各种差异(或井下地震波特征)可以通过对软盖层的运动学和动力学响应进行研究来加以阐明。

一些台站观测结果表明,同样在基岩上放置仪器,则井上、井下效果没有什么区别,象太原台、白家疠台和甘肃天水台,都是此种情况,只有高程的修正,这样的地区井下观测意义不大。

三、我国近年来的井下地震观测研究工作

(一)近年来的工作内容

国家地震局近两年专门组织力量进行讨论,理出问题并进行专题研究。首先对井下地震波的观测,在我国自己的基础上,十年研究所取得的进展应予充分肯定。观测技术日趋完善,观测台网初具规模,尤其是平原覆盖地区,井下测震研究工作的发展无论是对于地震预报还是对于石油、煤炭、地震工程应用等方面都有极为重要的实际应用价值。

为逐步实现井下观测台网资料的规范化,解释上的定量化,一些单位组织所属地震台点进行各自的震级改正、走时改正的研究,针对本台具体情况给出统计经验关系;同时也在可能的条件下逐步实施记录系统的改造,采用磁带记录方式,以使记录更为准确和可靠。

另一方面,一些研究人员为拓展井下地震资料的使用范围,就震源参数和介质参数两个方面从理论上探讨并分析,试图给出相宜的模型,在此基础上开展地震波前兆、孕震构造条件以及软盖层特征的研究工作。

为推进井下观测资料实用化,也注意到抓紧基础资料的工作,如:建立已有井孔台站的技术资料档案,整理、编辑井下记录典型图集,以及出版井下地震波研究进展的文集,及时汇集和交流井下工作的进展情况。

(二) 1987年井下地震观测研究的主要课题有:

1. 深井地震观测特征及资料应用的实验研究

包括有北京地震台网的地面与井下观测资料对比分析,任丘油田台网三分向对比观测研究;平原地区覆盖层介质特征的研究;平原地区地震波运动学参数的计算与分析;不同台基条件下地震波记录真实性的研究;软盖层对井下和地面记录地震波传播特性的影响,理论地震图计算与频率响应计算等。得出可用于实际井下地震分析的结果;完善井下与地面联合观测确定地震参量的程序;探讨井下记录地震波在地震预报与震源研究中的应用。

2. 开始进行深井综合观测技术的试验研究

除维持我国唯一的3 000m以上深井观测点——四川江油观测点连续观测以外,1987年开始在四川西昌地区建立井下综合试验观测系统,将高灵敏度、大动态、宽频带的深井综合地声、极微震、地震观测、综合地温、体应变、电磁波、运动加速度等观测项目。实施井下、井上的综合对比观测,主要用于监测分析空间地声场、热场、地震波场的变化特征以及与地震的关系。

3. 海底井下地震的观测试验研究

利用渤海石油钻井平台井孔,进行海底井下地震初步观测(1986年6月在渤海8号平台初步观测)。

(三) 井下综合技术工程的开发应用研究

井下测震及其它观测研究工作,不仅是地震监测预报提出的课题,同时也直接涉及到诸如石油、煤炭、地质、物探、水利等部门所面临的一些迫切需要解决的问题,因此更加深了从事这方面研究的意义,也为其实际应用开拓了更加广泛的领域。

就地震系统现有的井下观测技术和相应的配套仪器而言,首先可应用于宽频带、大动态范围内地震波的监测研究;油田深井地声、地震监测;解决油田由于水压致裂而引起大量油田油管破裂报废的生产技术问题;近场、远场核爆测试乃至全球核爆监测;大型水电枢纽工程的前期基础勘探和水库诱发地震的观测研究;能广泛用于大滑坡稳定性的现场监测;煤矿及各类矿山的矿坑冒顶、边坡失稳的现场监测,冲击地压的“地音”监测;高层建筑、高桥墩、深埋基桩的断桩承载能力的超低频测试。

可以涉及的领域很多,以上提及的开发内容,一些正在进行,一些还在酝酿,由此可以看出,井下观测技术的发展不仅仅限于井下,它所带而起的相应技术上的发展,象下井技术,固壁技术、声波探测技术,以及涉及资料分析解释要用到的弱信号提取、滤波技术和其它的信号处理方法,其应用的前景是非常乐观的。七五计划期间,不仅井下工作促进地震预报工

作的发展,而且要为国家经济建设提供有效的服务。

四、今后井下地震观测研究工作的主要课题与任务

国家地震局于1986年专门成立了“井下地震观测和研究工作协调组”,以从技术上协调、组织全国地震系统井下观测分析工作的开展。这个工作小组和“地声协调组”紧密配合,将继续开展一系列的科研组织工作。

(一)首先在深井观测与分析方面,由协调组织有关人员进行以下方面的专题研究:

- 1.深井观测对震源参数测定的可能影响。
- 2.推进包含三分量(垂直、水平)三参量(、位移、速度、加速度)和不同深度(一井内不同深度测量)的地震综合观测。
- 3.深井地震波记录图集。
- 4.深井地震仪的软定向(软标定)。
- 5.软盖层谱特征的实测与理论计算。
- 6.深井记录的位移、速度、加速度的对比分析。
- 7.深井噪音的流动观测和最佳深度确定的专用仪器。
- 8.深井测定震级的统一规范。
- 9.深井脉冲响应函数的研究。
- 10.深井纵向多点观测技术的研究。
- 11.深井资料的模拟实验研究。
- 12.深井地震波理论地震图的计算与实施。
- 13.海底井下地震观测与分析。
- 14.深井观测在地震区划、工程地震、矿震、岩爆、油田压裂等国民经济中的应用。
- 15.深井地震、地形变、地应力、地声、地温等综合地球物理场观测的实验研究。

(二)将加强与国家其他部门和企业的横向联系,采取合作、指导等多种形式,利用现有观测技术为国民经济建设服务,反过来也促进学科的发展。

(三)逐步改造井下观测的记录系统,实现磁带记录,使波形特征的实验和理论研究建立在坚实的基础上。

我国的井下测震工作经过十多年的努力已经取得一些显著的成果,总结出一些平原沉积层井下测震的特征和经验。经过1986、1987年的整理和总结,将已有的成果筛选、分类,实用性强的及时推广应用,尽快编制出版典型图集,以适应工作需要,通过一些专题的深入研究和观测系统的改造,井下测震工作还会有新的进展和飞跃。

深井观测随深度的变化规律 复合对数模型

张少泉 李凤杰 林云松

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本文从介质对振动的吸收、介质阻抗变化和自由面与浅层对振动的响应等基本物理关系出发,忽略不同类型振动的具体机制,用唯象方法,对地面与井下不同深度观测到的振动(噪音和地震信号)记录资料进行分析,提出复合对数模型。对于单层均匀介质:

$$\lg(N_0/N) = \alpha_N h + \beta_N \lg h$$

$$\lg(S_0/S) = \alpha_S h + \beta_S \lg h$$

$$\lg\left(\frac{S}{N} / \frac{S_0}{N_0}\right) = \alpha h + \beta \lg h$$

式中, S、N为地震信号和来自地面的噪音,下角标“0”表示地面处(井口)的观测值。 α 、 β 分别表示深井所在介质层的吸收因子和阻抗因子。 h 为以m为单位、自地面算起的深度。不同介质层的差异、地震信号和地面噪音的差异主要反映在 α 和 β 数值的大小。

利用复合对数模型,比较有效地解释了地面噪音随深度的衰减、地震信号随深度的减弱以及它们之间的信噪比随深变的变化现象。同时还在文中给出黄土盖层、砂土盖层和基岩地层三种类型的吸收因子和阻抗因子的数值。

文中对单层均匀的对数模型进行了扩充,引入多层对数模型、水平分量 and 频率效应,并且就噪音和信号在类型、强度等方面加以限制。

文章最后,就深井观测的最佳经济深度、震级改正和振动随深度变化曲线的计算等应用问题,提出建议。

一、引 言

近20年来,继美日苏等井下地震观测技术比较发达的国家之后,为提高对天然地震的监测能力,除部分专门投资钻井外,大部分是利用石油钻探和水文地质钻探废井,共建设了50多个井下地震观测点,有的地区已连结成网。^(1, 3, 5)

经过长期的连续观测和专门试验,进一步证实井下观测可以有效地压低地面噪音。尤其是在第四纪覆盖较厚的黄土盖层和砂土盖层地区,效果更为明显。观测和试验还揭示出另一个重要现象,那就是:伴随噪音随深度衰减,地震信号在不同深度上观测,随深度也有一定程度的减弱。幸好,地面噪音随深度衰减比地震信号随深度的减小要快,因而随深度增加,可以提高信噪比。

对上述观测事实如何进行解释,是人们很关心的问题。因为这个问题与确定钻井深度(或下放仪器的深度)和震级校正等问题有关,所以有不少文章已就噪音的衰减机制、类型和原因进行探讨,但这些探讨往往局限某一种噪音或者停留在一般的定性分析阶段,未能得出一般的便于应用的定量关系。

本文拟采用唯象分析的方法,即不从已知的多种多样的具体机制入手,因为这样就会陷

入难以理清的盘根错节之中,被复杂的现象和冗长的数学公式所淹没,而是要抓住贯穿所有现象、体现所有公式的物理本质,用尽可能少的物理参数将其描述出来。然后,再对模型有限制地加以扩充,结合实际情况确定模型参数。

二、物理模型

深井在地面和不同深度处观测到的振动,在这里分为两类:一是来自地面的噪音,如交通干扰、工业振动、和风雨冰雪等,属于我们排除之列;二是来地下的地震信号,包括远震、近震和极靠近测井的地方震,它们相对于地面或井壁的入射角度不同,同时,同是近震,还有纵波、横波之分,但它们均属于我们欲提取的信号之列。无论哪一类,也无论哪一类中的哪一种,在唯象理论看来,它们都是波。其差别仅在于,信号是来自地下向上传播的波,噪音是来自地面向下传播的波。这两种起始于自由面向下和终止于自由面向上的波,必然受到传播介质的影响和自由面的影响。下面我们分别对这两方面的影响加以分析,以便建立我们所需要的物理模型。

1. 介质吸收

波在介质中传播因吸收或散射而衰减,我们总称为吸收项^[7]。为简单计,设平面波沿深度 h 方向传播,当从 h 处传播到 $h+dh$ 处时,其振幅由 $A(h)$ 变为 $A(h+dh)$,遵从线性微分方程,即

$$\frac{dA(h)}{A(h)} = \frac{A(h+dh) - A(h)}{A(h)} = -\gamma dh \quad (1)$$

令 $dh \rightarrow 0$,且取地面处($h=0$)的振幅为 A_0 ,解该方程可得

$$A(h) = A_0 e^{-\gamma h} = A_0 10^{-\alpha h} \quad (2)$$

这里, $\alpha = (\lg e) \gamma$ 。对于上行波(信号), $\alpha < 0$;

对于下行波(噪音), $\alpha > 0$ 。 α 与频率有关。

2. 阻抗变化

波在介质中传播因声阻抗 ρv 不同而造成振幅变化。这种变化与介质吸收不同,不会造成能量耗损,而是在能流密度不变情况下的振幅变化,我们称为阻抗项。^[2]为简单计,考虑质点振动为简谐振动,其能量传播的能流密度 I 可表示为

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2$$

即
$$A = \frac{2I}{\omega} \frac{1}{\sqrt{\rho v}} = k \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho v}} \quad (3)$$

k 与频率有关。若令 $K = \rho v$,并取 $K = K_0$ 时相应的振幅为 A_0 。则有

$$A = A_0 (K/K_0)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

在一般情况下,声阻抗 K 可以写成深度 h 的函数,如幂指数形式

$$K = K_0 (h/h_0)^n \quad (5)$$

代入振幅表达式,则得

$$A(h) = A_0 (h_0/h)^{\frac{\sigma}{2}} = A_0 (h_0/h)^{\beta} \quad (6)$$

这里 $\beta = \frac{\sigma}{2}$ 。β与频率有关。

3. 表层共振 (包括两倍效应)

自由界面及其下方的浅层 (表层) 对于上行波 (信号), 可以通过上下界面的多次反射的迭加作用, 使其信号增强。我们称之为表层共振项。为简单计, 假设底面入射幅度为 A , 地面幅度为 A_0 , 则对SH波而言。有

$$A_0 = 2A \left(\cos^2 \frac{\omega H}{V_0} + k^2 \sin^2 \frac{\omega H}{V_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

近似有

$$A_0/A = 2 + (1 - k^2) \sin^2 \frac{\omega H}{V_0}$$

式中 $k = V_0/V$, V_0 为表层层内速度, V 为表层层下速度。当 $V_0 = V$, 即 $k = 1$ 时, $A_0/A = 2$, 这就是熟知的自由表面对SH波的两倍定律。对于SV波和P波, 自由表面和表层的影响略复杂些, 其 A_0/A 比值, 随入射角变化而变化, 当入射角相当于临界角时, $A_0/A \approx 1$ 。

作为上述情况的推广, V_0 取为某界面至地面的平均速度, 即

$$V_0 = \bar{V} = \frac{1}{h-h_0} \int_{h_0}^h V dh$$

仍取速度随深度幂指数变化形式, $V = V_0 (h/h_0)^{\sigma}$, h_0 相应于 V_0 值, 则

$$k = \bar{V}/V = \left[1 - (h_0/h)^{\sigma+1} \right] / \left[1 - (h_0/h)^{\sigma} \right] \quad (8)$$

在 $\sin \frac{\omega h}{\bar{V}} \leq 1$ 条件下, (7) 式可简化为

$$A_0/A \approx 2 \left[1 - \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\sigma} \left[1 + \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\sigma} \left[1 + 2 \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\sigma} + 4 \left(\frac{h_0}{h} \right)^{2\sigma} + \dots \right] \right] \right] \quad (9)$$

式中 h_0/h 为小量, 如前所述 σ 为反映速度分布的系数。上式表明, 随 h 增大, A_0/A 将减小, 因而主要影响在表层。

4. 表层衰减

自由界面及其下方的浅层 (表层) 对于下行波 (噪音), 由于包含面波成份, 其不同频率和不同方向的分量随深度分布呈不同程度的指数衰减变化, 通常可以写成

$$A = \sum_i A_i e^{-l_i h} \quad (10)$$

A_i 和 l_i 为第 i 个频率分量的表面幅度和衰减系数。这里的衰减不同于介质吸收, 介质吸收是不可逆的能量损耗, 而这里仅仅是由于表面或表层的存在而造成的能量分配现象。一般来说, 能量集中于表面, 大约过 $1 \sim 2$ 波长的深度大部分衰减。

我们先综合上述四种波动现象, 可以看到第一和第二种属于介质内部的影响, 第三和第四种属于自由表面的影响, 因为要研究的是地面与井下的对比, 因此无论介质内部还是介质表面, 在分析上行波和下行波时都是要考虑的。

我们再分析后两种现象, 它们虽然分别为上行波能量分配和下行波能量分配, 但其表现

形式,或者说是最终结果,都是随深度增加而衰减。其中下行波的衰减要比上行波要快。当然这两种所谓衰减,并不是能量的耗损,只是形式上的衰减,其实质都是由于界面和自由面的存在,通过反射透加而造成的能量分配。这种自由面或表层的作用,强烈的依赖于频率,一般对高频作用显著,集中在1~2个波长,如100~200m范围内。因此,在研究地面与井下振动对比时,在这个范围内应单独进行分析,不要和更深范围的资料混在一起。实际观测资料也表明,在靠近地面的100~200m范围内振动幅的衰减不仅剧烈,而且与波的类型、波的强度和波的频率有关。表层共振和表层衰减效应,不同于介质吸收和阻抗变化两项影响。在某种意义上说,表层效应的处理,直接关系到本文能否得出一般的定量关系的成败。

本文对表层效应(即上述第三和第四种效应)采取两种处理方法:其一,将表层与深层分开,做为多层处理;其二,将表层与深层不分开,做为单层处理。无论分开与否,本文作为一种近似,认为表层与深层遵守同样的复合对数规律,只是系数不同。

为此,我们将(2)式和(6)式,综合在一起,写成:

$$A(h) = A_0 \cdot 10^{-\alpha h} \cdot (h_0/h)^{\beta} \quad (11)$$

为表示简洁,取 $h_0=1\text{m}$,进而对(11)式取对数,可写成地面幅度 A_0 与井下深度 h 处的幅度 A 之比的形式:

$$\lg(A_0/A) = \alpha h \pm \beta \lg h \quad (12)$$

据此,写出信号和噪音的深度公式:

$$\lg(S_0/S) = \alpha_s h + \beta_s \lg h \quad (14)$$

$$\lg(N_0/N) = \alpha_N h + \beta_N \lg h$$

两式相减,则得信噪比的深度公式:

$$\lg\left(\frac{S_0/N_0}{S/N}\right) = (\alpha_N - \alpha_s)h + (\beta_N - \beta_s)\lg h \quad (15)$$

式中 S 、 N 分别表示信号和噪音,下角标“0”表示地面的相应数值。公式(13)~(15)是在 α 和 β 不变的单层内适用,如果使用了表层的资料(指1~2个波长范围),则混入了表层影响,此时的 α 和 β 称为广义的吸收因子和广义的阻抗因子。由于公式中包含一个单对数项 $\lg A \sim \alpha h$ 和一个双对数项 $\lg A \sim \beta \lg h$,故称为复合对数模型。

三、模型的检验和模型参数的确定

上一节引入了深井观测随深度变化的物理模型,并以复合对数形式(13)~(15)加以表述。所得模型是否正确,必须经过实际观测资料的检验。同时,通过实际资料可以确定模型参数的大小。

本文为了上述目的,收集了国内部分台站和台网的笔绘记录资料。这些资料主要摘自已发表的论文或报告,由于没有直接参与观测或试验工作,对资料的精度或获取环境了解很少,从而对资料中的问题解释一定会有不当之处。

为了确定模型参数,即给出吸收因子 α 和阻抗因子 β ,本节以下采取这样办法,将式(12)改写成:

$$\frac{1}{h} \lg(A_0/A) = \alpha + \beta \left(\frac{\lg h}{h} \right) \quad (16)$$

即

$$y = a + bx$$

这里 $y = \frac{1}{h} \lg (A_0/A)$, $x = \frac{1}{h} \lg h$, $a = \alpha$, $b = \beta$ 。

只要有一般计算器, 经线性拟合, 则可得到 α 和 β 大小。拟合程度通常以相关系数 r 值衡量。

式中 A_0/A 可以换成 N_0/N 或 S_0/S , 在分别得出 $\alpha_N, \beta_N, \alpha_S, \beta_S$ 之后, 则可得到与 $\frac{S}{N} / \frac{S_0}{N_0}$ 相应的模型参数。

以下选取基岩地层、砂土盖层和黄土盖层三种类型进行验算。

1. 基岩地层的太原台站*

该台为基岩露头。最初是为了压制地面记录中的 0.4s “拍频” 噪音, 请水文地质队在原台址附近钻探 501m 的深孔, 并安置 JD-2 地震仪。钻孔岩性为灰岩 (砂砾灰岩和白云质灰岩)。

在安置井下地震仪过程中, 每隔约 100m 停留几十秒, 记录环境噪音。表 1 根据太原台资料室存档的文字记录, 经整理后得到的不同深度处的噪音水平。噪音记录的主频周期为 0.4~0.5s。处理方法见公式 (16), 结果列入表 1 内。

表 1 太原台不同深度处的噪音变化

h(m)	100	200	300	400	500	600	700	800
N_0/N 观测值	1.85	2.27	2.70	2.70	3.33	3.63	3.70	3.45
N_0/N 计算值	1.86	2.27	2.68	3.12	3.21	3.46	4.05	4.34
模型参数:	$\alpha_N = 0.00053$		$\beta_N = 0.10862$		$r = 0.98826$			

显然, α_N 和 β_N 都相当小, 这是基岩地层的特征。原来计划压制的 0.4s 的 “拍频” (我们称了 “纹理脉动”), 并没有得到有效压制。

2. 有砂土盖层的上海台网^[4]

上海地震台网位于地面噪音非常严重的典型闹市环境里。地面噪音淹没地震信号, 尤其是淹没那些震级低于 1 级的微震, 给研究地震活动性带来困难, 唯一的出路是向地下钻探深孔, 安装井下微震仪。

由于这个地区的浅部有 300~400m 厚的粘砂土堆积盖层, 为地面噪音的急剧衰减创造了有利条件。在砂土盖层的下面, 有比较坚硬的结晶基底, 如沉凝灰岩 (地震中心)、灰质白云岩 (虹桥台)、花岗斑岩 (南汇台) 和玄武岩 (海运学院台)。当钻孔穿过盖层进入基底后, 噪音的衰减骤然缓慢下来。穿入基岩的深度不等, 一般均在 50~100m。

表 2 给出上海台网四个台的噪音在盖层内的变化情况。为便于比较, 本文将原文中的曲线坐标改为 N_0/N , 即以井下幅度为 1, 从而给出地面相对于井下的倍数。处理方法见公式 (16), 结果列入表 2 内。

表 2 中的模型参数均比表 1 中的大, 表明其衰减效果显著。但同时要看到, 同一个上海台网, 不同台站的衰减情况不同。如 $h = 200m$ 处, 虹桥台的 $N_0/N = 12.5$, 而海运台 $N_0/N = 33.3$ 几乎相差 3 倍。这里给出的模型参数, 用的是所有四个台的数据, 因此是它们的平均结果, 即代表砂土盖层的结果。

表2 上海地震台网不同深度处的噪音变化

$h(m)$	中心	虹桥	南汇	海运	计算值
50	2.5	—	3.3	5.0	3.5
100	6.5	5.0	5.0	10.0	6.2
150	—	—	11.1	—	10.6
200	20.0	12.0	16.6	33.3	17.0
250	—	—	20.0	50.0	27.2
300	33.3	25.0	25.0	50.0	43.1
模型参数: $\alpha_N=0.00367$ $\beta_N=0.2155$ $\gamma=0.8318$					

3. 有黄土盖层的大港深井试验〔2〕

大港处于华北平原黄土厚层沉积处,比之上海台网的砂土盖层或比之太原台的基岩地层,更有利于噪音的衰减和降低信号的衰减。

这里,给出的是根据原文的 N_0/N 、 S_0/S 的变化曲线,经整理后得出600m范围以内的部分数据。据原文介绍,所得振幅经过频响校正,即由最大记录振幅除以相应周期的放大倍数。处理方法见公式(16),计算结果列入表3内。

表3 大港油田深井不同深度的 $\frac{N_0}{N}$ 、 $\frac{S_0}{S}$ 、 $\frac{S}{N} / \frac{S_0}{N_0}$ 观测值与计算的变化

$h(m)$	N_0/N		S_0/S		$\frac{S}{N} / \frac{S_0}{N_0}$	
	观测值	计算值	观测值	计算值	观测值	计算值
100	42	49	2.6	2.7	16.15	17.4
200	240	132	3.8	3.5	63.16	36.1
300	370	291	4.6	4.3	80.43	64.0
400	540	586	4.9	5.2	110.20	106.4
500	740	1129	6.0	6.2	123.30	170.9
600	1000	2100	6.4	7.4	156.25	268.0
模型参数	$\alpha_N=0.00213$		$\alpha_S=0.0006$		$\alpha=0.0015$	
	$\beta_N=0.7364$		$\beta_S=0.1826$		$\beta=0.5438$	
	$\gamma=0.9856$		$\gamma=0.99$			

由表3可知,虽然相关系数 γ 达到0.99,但仔细分析不同深度处观测值与计算值的差异,可以看出,在 $h \leq 400m$ 范围内,符合得相当好,但当超过500m后可以相差1倍。这表明,即使是同一类型的地层处于不同的深度处, α 和 β 仍是有差别的。这也表明单层模型的局限性。

4. 小结

现将上面介绍的三种类型地层的模型系数列入表4内,表中还给出它们的适应范围。由于资料缺乏0~100m或200m的详细数据,所以适应范围的初值标以“?”,有待补充,

但做为近似可取地面(即 $h=0$)。此外,基岩地层和砂土盖层缺乏信号的衰减资料,因此,本文暂时假定:基岩地层和砂土盖层内,噪音参数与信号参数的比例,即 α_N/α_s 和 β_N/β_s ,可用黄土盖层中的相应比例代替。

黄土盖层中, $\alpha_N/\alpha_s \approx 3.5, \beta_N/\beta_s \approx 4.0$ (17)

因此,基岩地层和砂土盖层的 α_s 和 β_s ,是利用(17)式的比例关系推算来的,故加以括号表示区别。

表4 基岩地层、砂土盖层和黄土盖层的模型参数

地层类型	信号(S)		噪音(N)		范围(m)
	α_s	β_s	α_N	β_N	
基岩地层	(0.00014)	(0.0272)	0.0005	0.1086	0(?)~500
砂土盖层	(0.00110)	(0.0538)	0.0037	0.2155	0(?)~300
黄土盖层	0.0006	0.1826	0.0021	0.7364	0(?)~400
备注	假定: $\alpha_N = 3.5\alpha_s, \beta_N = 4.0\beta_s$				表层不宜

四、模型的扩充与限制

上一节建立的复合对数模型及三种类型的模型参数,是有局限性的,根据实际情况,需要在以下几个方面加以扩充或加以限制。

1. 多层模型的引入

即使是同一类型地层,浅部与深部的模型参数也可能不同。对于由不同类型组成的复杂地层,更需要建立多层复合模型。

我们假定地面以下直到观测深度,可以以 α 和 β 变化分成若干相对稳定的层次,设各层的深度、厚度和模型参数表示如下:

第一层($i=1$), $H_0(=1) < h_1 < H_1, \Delta_1 = H_1 - H_0, \alpha_1, \beta_1;$

第二层($i=2$), $H_1 < h_2 < H_2, \Delta_2 = H_2 - H_1, \alpha_2, \beta_2;$

⋮

第 n 层($i=n$), $H_{n-1} < h_n < H_n, \Delta_n = H_n - H_{n-1}, \alpha_n, \beta_n.$

如果每一层次内的振动(可以是信号或噪音或信噪比)用 A 表示,则依(12)式形式,可以写出各层次的顶部与顶部的变化公式:

$$\lg \frac{A_0}{A_1} = \alpha_1 (H_1 - H_0) + \beta_1 \lg(H_1 - H_0) = \alpha_1 \Delta_1 + \beta_1 \lg \Delta_1$$

$$\lg \frac{A_1}{A_2} = \alpha_2 (H_2 - H_1) + \beta_2 \lg(H_2 - H_1) = \alpha_2 \Delta_2 + \beta_2 \lg \Delta_2$$

⋮

$$\lg \frac{A_{n-1}}{A_n} = \alpha_n (H_n - H_{n-1}) + \beta_n \lg(H_n - H_{n-1}) = \alpha_n \Delta_n + \beta_n \lg \Delta_n$$

以上各式相加,左端为:

$$\begin{aligned} & \lg \frac{A_0}{A_1} + \lg \frac{A_1}{A_2} + \cdots + \lg \frac{A_{n-1}}{A_n} \\ &= \lg \frac{A_0}{A_1} \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdots \frac{A_{n-1}}{A_n} \\ &= \lg \frac{A_0}{A_n} \end{aligned}$$

右端为:

$$\begin{aligned} & (\alpha_1 \Delta_1 + \beta_1 \lg \Delta_1) + (\alpha_2 \Delta_2 + \beta_2 \lg \Delta_2) + \cdots + (\alpha_n \Delta_n + \beta_n \lg \Delta_n) \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta_i + \sum_{i=1}^n \beta_i \lg \Delta_i \end{aligned}$$

因此, 可以写出

$$\lg \frac{A_0}{A_n} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta_i + \sum_{i=1}^n \beta_i \lg \Delta_i \quad (18)$$

只有当 $\alpha_i = \alpha$, $\beta_i = \beta$ ($i=1, 2, \cdots, n$) 时, 才退化为 (12) 式。如果 α 和 β 随深度的变化不同, 即所分层次不同, 还可写成:

$$\lg \frac{A_0}{A} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta_i + \sum_{i=1}^n \beta_i \lg \Delta_i \quad (19)$$

式中的 A_0/A 可以换成 N_0/N , S_0/S 或 $\frac{S}{N} / \frac{S_0}{N_0}$,

从而得出它们各自的变化公式。

表5 三层模型屋顶与层内不同深度处比值

层序	深度 (m)		S_0/S		N_0/N		$\frac{S}{N} / \frac{S_0}{N_0}$	
	总计	分层	分层	总计	分层	总计	分层	总计
1	50		2.20	2.20	23.10	23.10	10.50	10.50
	100		2.67	2.67	48.87	48.87	18.32	18.32
	150		3.08	3.08	83.97	83.97	27.31	27.31
	200		3.47	3.47	132.47	132.47	38.15	38.15
	250		3.87	3.87	199.37	199.37	51.46	51.46
	300		4.29	4.29	291.25	291.25	67.87	67.87
2	350	50	1.40	5.69	3.42	294.67	2.45	70.32
	400	100	1.65	5.94	5.82	297.07	3.52	71.39
	450	150	1.91	6.20	9.31	300.56	4.87	72.74
	500	200	2.21	6.50	14.53	305.73	6.58	74.45
	550	250	2.53	6.82	22.37	313.62	8.81	76.68
	600	300	2.90	7.19	34.13	325.38	11.70	79.57