

文章编号:1673-5005(2006)03-0026-04

地震勘探采集中尾锥因素对检波器耦合系统的影响

刘志田^{1,2}, 吴学兵^{1,2}, 王文争², 宁靖²

(1. 中石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 胜利石油管理局物探公司, 山东东营 257100)

摘要:介绍了检波器耦合的叠加效应和耦合谐振模型, 为提高对耦合系统的描述精度, 提出了检波器耦合系统的二自由度模型。设计了一系列包括实验室测试及室外测试的试验, 测试尾锥在不同长度、质量、材料、土壤等情况下检波器的频率响应特性。测试结果验证了叠加效应模型, 部分支持二自由度模型, 试验结果没有验证耦合谐振模型。新模型和试验结果有助于改善检波器耦合系统, 进而提高地震勘探数据采集的精度。

关键词:石油勘探; 检波器; 尾锥; 耦合系统; 数学模型

中图分类号:P 631.436

文献标识码:A

Effects of tail-cone on geophone coupling system during seismic exploration

LIU Zhi-tian^{1,2}, WU Xue-bing^{1,2}, WANG Wen-zheng², NING Jing²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development in China Petroleum Corporation, Beijing 100083, China;

2. Company of Geophysical Exploration and Development in Shengli Petroleum Management Bureau,

Dongying 257100, Shandong Province, China)

Abstract: The stacking effect model and coupling resonance model were presented. The two-freedom model which gives high description precision of coupling system was proposed. In order to exam the validation of the three models, a series of laboratory and field tests on the frequency response of the detector were performed by systematically changing the length, mass, component material of tail-cone as well as the ground condition. The analysis result didn't verify the coupling resonance model, but verified the stacking effect model. The two-freedom model was supported to some extent. The model and the experimental results can help to improve data acquiring precision during seismic exploration.

Key words: oil exploration; geophone; tail-cone; coupling system; mathematical model

检波器与复杂地表的耦合是一个世界性难题。检波器耦合课题的难度一方面体现在随机因素多, 即地表因素、环境因素(温度、风力、噪音)、人员施工等一系列因素都是随机的, 使得研究工作很难重复并被普遍承认; 另一方面体现在学科交叉密切, 检波器耦合问题跨越地球物理、振动工程、岩土力学、传感器技术等学科, 在各学科中处于边缘位置, 并且与其他学科交叉密切。已经报道的能够符合“物理意义明显、数学表达清晰、对实践具有指导作用”的检波器耦合系统模型很少, “叠加效应模型^[1]”和“耦合谐振模型^[2-6]”是两个比较有代表性的模型, 目前在地震勘探采集行业采用较多。为了能对耦合系统进行更为一般的描述, 并有利于建立数据处理的新方法以消除或

降低耦合系统失真对地震数据的影响, 在中石化“陆上复杂地表检波器耦合技术研究”课题^[7]支持下, 笔者建立一个新的“二自由度模型”, 在此基础上对检波器耦合问题进行更为深入的理论分析及系统试验, 并就尾锥对耦合系统的影响进行分析。

1 尾锥对耦合系统影响的理论模型

1.1 叠加效应模型

叠加效应模型^[1]主要用来评估检波器应用长尾锥所带来的失真程度。徐锦玺等认为: 在地震波的射线到达尾锥尖点时, 尖点的振动在尾锥中以高速向上传播, 在机芯中产生一个信号; 同时波场仍然以地层的速度向地面传播, 并在传播中不断作用于

收稿日期: 2005-11-08

基金项目: 中国石油化工集团公司重点科研攻关项目(P02093)

作者简介: 刘志田(1960-), 男(汉族), 山东寿光人, 高级工程师, 博士研究生, 从事地震勘探采集方法、采集装备研究及管理工作。

尾锥;在不断通过尾锥向上传播过程中,在机芯中产生信号;由于波在尾锥中的传播速度比在地层中传播速度快,使得二者之间形成一个时差,因此机芯接收的是合振动。这样就存在一个叠加效应,它的振幅特性和相位特性分别为

$$|K(j\omega)| = \frac{\sin[\pi fL(1/v_1 - 1/v_2)]}{\pi f(1/v_1 - 1/v_2)}. \quad (1)$$

$$\theta(\omega) = \omega L \left(\frac{1}{2} v_1 + \frac{1}{2} v_2 \right). \quad (2)$$

式中, v_1 为表层的平均速度, m/s; v_2 为尾锥速度, m/s。

这表明地层的反射信息被尾锥改造了,改造程度与地震波在地表中的速度以及在尾锥中的速度密切相关。

1.2 耦合谐振频率模型

国外的相关研究^[2-6]认为,尾锥与大地构成的耦合系统会产生耦合谐振,其谐振频率 f_0 可以作为耦合系统的评价标准。改善检波器耦合的问题可以归结为提高 f_0 使其脱离地震勘探频带。 f_0 可以表达为

$$f_0 = \sqrt{\frac{k_1 \rho b^2 v}{M_0 + M}}. \quad (3)$$

式中, k_1 为检波器与介质的接触刚度; ρ 为介质密度; b^2 为接触面积; v 为地层速度; M 为检波器质量; M_0 为尾锥与大地耦合质量。

按照该模型,由于其他因素很难控制,提高 f_0 的重点是降低检波器质量,增加检波器与大地的接触面积,这就对检波器的制造提出了限制。该模型一直未见实验证实的报道。为此设计了实验,保证该模型中 b^2 , ρ , v 等参数不变,采用增加配重的方法仅增加检波器系统的质量,如果式(3)成立,那么,随着配重 M 的增加, f_0 应该下降,将产生可供记录的耦合谐振。

1.3 二自由度模型

笔者认为,检波器耦合系统是一个包含了机芯内振动子系统、机芯与护壳的接触振动子系统、护壳与尾锥的振动子系统、尾锥与地层的振动子系统等的多自由度振动系统。引入一个非线性弹性分量 F 作为整个系统的非线性因子,仅考虑机芯内的振动系统和“尾锥—地层”两个振动子系统,将检波器耦合系统简化为一个二自由度近线性振动系统,应用牛顿第二定律,并采用矩阵符号,可以写出系统运动方程,即“二自由度”模型为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + Ku + F_n/\delta^3 = 0. \quad (4)$$

式中, M , C , K , F_n , δ 分别为系统质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、非线性矩阵、位移列阵。

经过适当变换^[8-10]得到

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 = -\mu[2\xi_1 \dot{x}_1 + \tilde{\beta}(x_1 + x_2)^3], \\ \ddot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 = -\mu[2\xi_2 \dot{x}_2 + \tilde{\beta}(x_2 - x_1)^3], \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\tilde{\beta} = \beta/4.$$

式中, x_1 和 x_2 分别为“尾锥—地层”和“机芯”两个子系统的位移; ω_1 和 ω_2 为子系统的角频率; ξ_1 和 ξ_2 为阻尼比; μ 为摩擦因数。

该模型的物理含义是:检波器机芯内质量体位移与大地的实际位移存在一定的误差,二者之间的关系可以用式(5)表达。“土壤—尾锥”子系统中,影响耦合质量 M_1 、耦合阻尼 C_1 、耦合刚度 K_1 的因素很复杂,既包括尾锥的结构力学参数和土壤的力学参数,又包括由于尾锥插入引起的土壤力学参数的变化,而且耦合质量、耦合阻尼以及耦合刚度等参数相互影响。例如增加耦合质量 M_1 一方面将降低耦合谐振频率,另一方面将增加耦合阻尼,这将展宽响应频带,所以耦合质量 M_1 的增加究竟是降低还是提高谐振频率,取决于更多具体的土壤力学参数及尾锥结构参数。

2 试验条件设置

为验证上述3个模型的正确性,在中石化地震勘探重点实验室进行了一系列的试验,包括室内和室外试验。在室内测试(图1)中,由频谱仪发出激励信号,经功率放大后传递给振动台,振动台激发容器及其内部介质振动,检波器以电信号形式记录该运动并传回测试仪被记录下来。同时,在介质中埋入标准传感器,标准传感器所接收到的介质的振动也传回测试仪记录下来进行能量归一化处理,作为检波器的输入。整个试验过程只有单一因素发生变化,可以进行对比。由于测试容器边界条件与野外有较大不同,按国际通行测试做法,室内只进行定性对比。

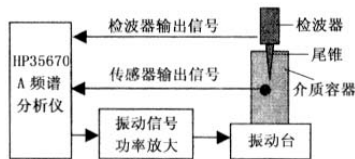


图1 室内测试装置

室外测试装置见图2。在地面挖一个 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的坑,将低频信号发生器埋在地下,覆盖 2 m

深的土壤并压实,地表预留 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的坑,先后在坑内设置粘土、沙子、淤泥等不同的介质。

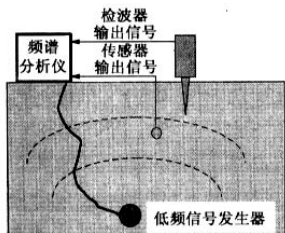


图2 室外测试装置

测试过程与室内基本相同,不同之处是激励信号传给低频信号发生器,低频信号发生器取代室内测试使用的振动台。

测试试验激励信号采用的是方波信号,如图3所示。试验表明,10 ms 和 20 ms 的记录结果已经非常相似,接近其灵敏度极限,故使用 10 ms 和 20 ms 方波来替代 δ 脉冲函数。

试验使用的仪器为 HP25678 动态信号分析仪、振动台、Q3-B 低频信号发生器、数字示波器及信号

分析仪自带的标准传感器。

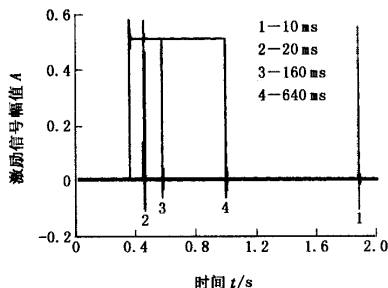


图3 激励信号的测试

3 试验结果及其分析

3.1 尾锥长度对耦合系统的影响

尾锥长度对耦合系统影响的测试结果见图4。

由试验结果可知:(1)短尾锥(7.5 cm)与长尾锥(15 cm)相比具有较宽的频响范围,支持了叠加效应模型;(2)在一定条件下,采用加长尾锥有利于提高地震信号的幅度响应。

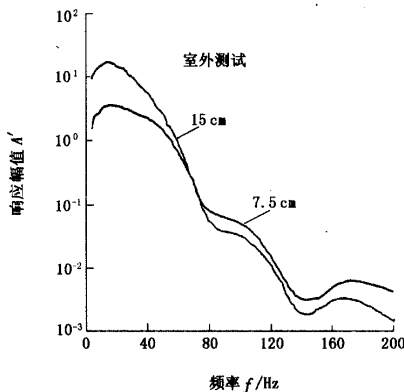
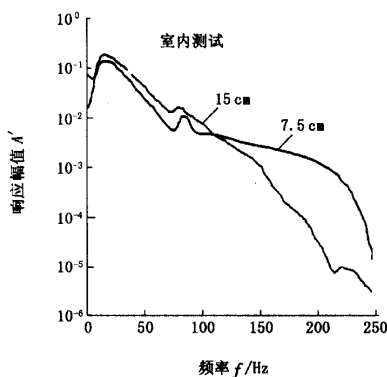


图4 尾锥长度对耦合系统的影响(20 ms 激励,介质为土)

3.2 尾锥材料对耦合系统的影响

尾锥材料对耦合系统影响的测试结果见图5。

由叠加效应模型可以预测,尾锥材料不同对幅度与相位均有影响,地震波传播速度快的材料低频响应好,高频响应差。试验结果再次支持了叠加效应模型。

由于试验仪器的限制,没有测出相频响应的参数。检波器的相位响应是一个非常重要的参数,按叠加效用模型,塑料尾锥的相位特性应该好于铁尾锥,这有待于将来的试验证实。

3.3 检波器质量对耦合系统的影响

测试使用的检波器为 20 cm 常规尾锥,20DX 检波器。试验结果见图6。

在 80 Hz 以下频段,检波器质量变化对耦合系统的影响非常微弱,可以不予考虑。在 80 Hz 以上频段,介质为沙的试验中观测到了耦合谐振峰,但与质量变化对耦合系统的影响没有得出一致的试验结果,该测试结果支持了二自由度模型,没有支持耦合谐振模型。

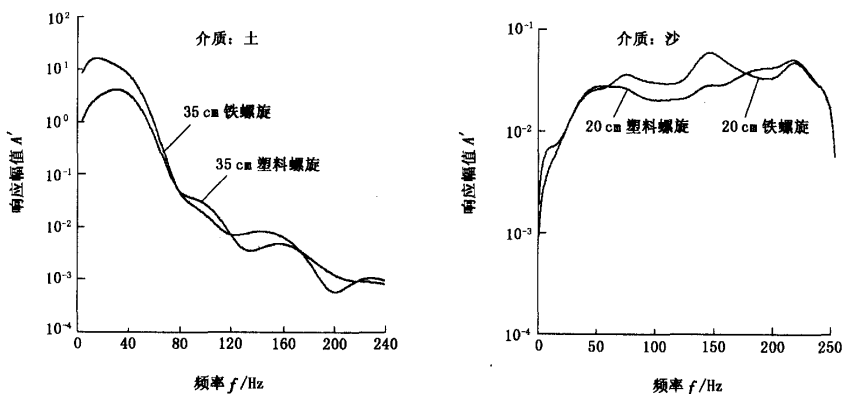


图5 尾锥材料对耦合系统的影响(20 ms激励)

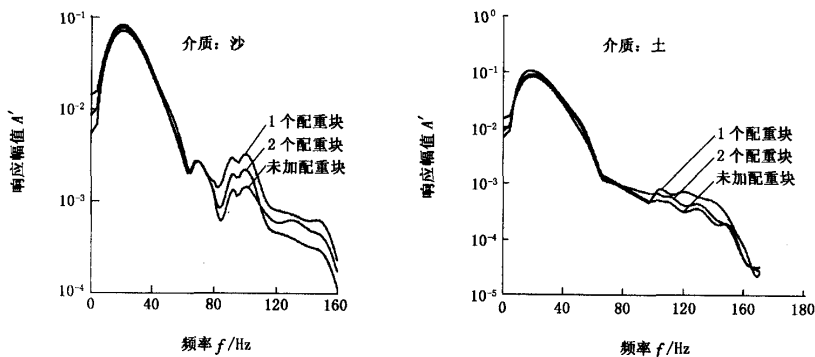


图6 检波器质量对耦合系统的影响

4 结论

(1) 试验结果验证了叠加效应模型,二自由度模型得到了部分验证,耦合谐振模型的正确性或其适用范围没有得到本次试验的支持。

(2) 由于耦合质量、刚度、阻尼等参数相互交叉影响,验证二自由度模型和耦合谐振模型需要更多的土壤力学参数。

参考文献:

- [1] 徐锦玺,吕公河. 检波器尾锥结构对高分辨率地震信号的影响[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(2): 204-209.
XU Jin-xi, LÜ Gong-he. The influence of geophone tail-cone structure upon acquired seismic signals[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, 34(2): 204-209.
- [2] CHRISTINE E Krohn. Geophone ground coupling[J]. Geophysics, 1984, 49(6): 722-731.
- [3] SINGH V, CHANDOLA S K, BHAGAT S, et al. Seismic resolution and geophone ground coupling[C]//67th

Annual SEG Meeting Expanded Abstracts Biography. c1997: 130-133.

- [4] TAN T H. Reciprocity theorem applied to geophone-ground coupling problem[J]. Geophysics, 1987, 52.
- [5] VOS J. A theoretical and experimental approach to the geophone-ground coupling problem based on acoustic reciprocity [R]. SEG Expanded Abstracts, 1995.
- [6] FABER K, MAXWELL P W, EDELMANN, et al. Recording reliability in seismic exploration as influenced by geophone-ground coupling[C]//5th EAEG meeting and exhibition at Vienna. Austria; 1994.
- [7] 宋玉龙,丁伟,胡立新,等. 陆上复杂地表检波器耦合技术研究[R]. 中石化集团公司科研报告, 2004.
- [8] 宋丽莉,葛洪魁,王宝善. 疏松砂岩弹性波速模型的研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 38-40.
SONG Li-li, GE Hong-kui, WANG Bao-shan. Study of model for elastic wave velocity of unconsolidated sandstone[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(6): 38-40.

(下转第35页)

neering Geology, 2002, 10(1):38-45.

- [11] 伍法权,王学潮,国连杰,等.南水北调西线一期工程断层活动性及其对工程的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1370-1374.
WU Fa-quan, WANG Xue-chao, GUO Lian-jie, et al. Fault activity and its effect on the west line of water diversion project from south to north of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8):1370-1374.
- [12] 李广诚,严福章.南水北调工程概况及其主要工程地质问题[J].工程地质学报,2004,12(4):354-357.
LI Guang-cheng, YAN Fu-zhang. An overview of the China's south-north water transfer project and its major engineering geological problems[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(4):354-357.

(编辑 修荣荣)

(上接第21页)

- [6] 唐立章,张贵生,张晓鹏,等.川西须家河组致密砂岩成藏主控因素[J].天然气工业,2004,24(9):5-7.
TANG Li-zhang, ZHANG Gui-sheng, ZHANG Xiao-peng, et al. Main control factors of forming the tight sandstone gas reservoir in Xujiahe formation in west Sichuan depression[J]. Natur Gas Ind, 2004, 24(9):5-7.
- [7] 于红枫,周文.松华镇-白马庙须二段裂缝分布规律[J].成都理工学院学报,2001,28(2):174-178.
YU Hong-feng, ZHOU Wen. A research on distribution law of fractures in Xujiahe formation in Songhua-Baima region[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(2):174-178.

(编辑 刘艳荣)

(上接第25页)

- [8] 丁白涛.孤东油田馆陶组下段底砾岩低电阻油气层滚动开发[J].复式油气田,2000,4:33-35.
DING Bai-tao. Rolling exploration of low-resistivity layer of the lower interval of Guantao formation of Gudong Oil-field[J]. Multiple Oil-Gas Field, 2000, 4:33-35.
- [9] 赵澄林,朱筱敏.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,2001.
- [10] 孙建孟,王永刚.地球物理资料综合应用[M].东营:石油大学出版社,2001.
- [11] 中石油油气勘探部.渤海湾地区低电阻油气层测井技术与解释方法[M].北京:石油工业出版社,2000:1-5.
- [12] 胡英杰,毛志强.塔里木盆地低阻油层阳离子交换量及含油饱和度评价[J].测井技术,2000,24(6):407-409.
HU Ying-jie, MAO Zhi-qiang. Evaluation of cation exchange capacity and hydrocarbon saturation of the low-resistivity pay zone in Tarim Basin[J]. Well Logging Technology, 2000, 24(6):407-409.

(编辑 刘艳荣)

(上接第29页)

- [9] 朱振宇,刘洪.稀疏反褶积方法及其应用[J].石油大学学报:自然科学版,2005,29(6):26-28.
ZHU Zhen-yu, LIU Hong. Sparse deconvolution method and its application[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(6):26-28.
- [10] 冯兴强,王勋杰,杨长春.基于最大似然准则的 $f-x-y$ 域 l_1 模预测滤波方法[J].石油大学学报:自然科学版,2005,29(4):30-34.
FENG Xing-qiang, WANG Xun-jie, YANG Chang-chun. Prediction filtering method using l_1 norm based on maximum likelihood rule in $f-x-y$ domain[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29(4):30-34.

(编辑 沈玉英)