

惯性式传感器性能特点及原位测试实验分析

朱德兵 ,任青文

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 结合工程实践中的传感器安装固定方式 ,通过理论模型论证了检波器附加质量、接地弹性支撑系数、检波器尾锥长度等给检波器的幅频特性或相频特性带来的改造或歪曲 ,通过原位测试实验数据 ,系统分析获得的振动记录 ,从实验上证实了理论模型分析结果的正确性 .

关键词 超浅层地震勘探 ;惯性式传感器 ;频响特征

中图分类号 :P631.4+25 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2004)05-0030-04

常规超浅层反射波地震勘探以反射波的走时特征为依据 ,从波动学的角度分析地下介质赋存状态和物性参数 ,通过提高主频频率来提高分辨率 .然而地表记录的振动信号是一种多振相的强干涉信号 ,多数条件下 ,当浅部介质横向变化或地下界面起伏较大时 ,单纯从提高主频频率来提高分辨率是不够的 .各种超浅层地震勘探技术对地表获取的响应记录保真性有较高的要求 ,保真内容同时包括频率响应特性、相位特性和空间分布特性等 ,作为直接记录信号的传感器 ,研究其在特定安置环境下的响应特征极为关键 .

对于常用的插入式传感器 ,在接地不稳时 ,加压固定或加长传感器的插入头是最常见的方式 .从弹性力学的角度理解 ,加压固定方式对传感器的影响机理可以归结为提高传感器的接地刚度或附加质量 .研究表明 ,加长传感器的插入头 ,对原位测试记录也有一定的影响^[1] .本文考虑到超浅层地震勘探所需要的高频特性以及道间信号的相位一致性 ,对各种固定方式对传感器频响特性的影响进行分析 ,并通过原位测试实验 ,验证了惯性式传感器的性能特点 .

1 惯性式传感器的频响特征

从图 1 可以看出 ,惯性式传感器是数字地震采集系统中的关键环节 ,它是振动信号传入采集系统的门户 ,其自身硬件性能的优劣和检地耦合的性能直接关系到地震勘探的效能 .

由于传感器和地震仪生产厂家往往属于不同的公司 ,地震仪上所给出的传感器频响特征是一个模

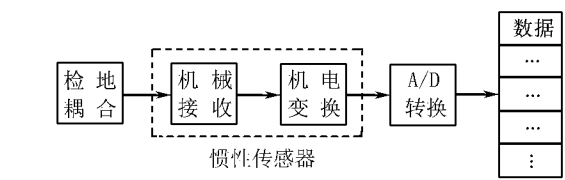


图 1 与惯性式传感器相关作用

糊的概念 ,如 28 Hz 或 100 Hz 传感器 ,并不能明确表述传感器的响应特征 .对于工程物探工程师来说 ,只有系统了解惯性式传感器的频响特性 ,才能保障原始数据的保真性 .

1.1 附加质量与增大弹性支撑系数 K 的影响

通过两自由度模型可以对传感器频响特性进行相关分析^[2] ,本文目的是讨论安装因素对给定传感器的频响特性影响 ,而不去考虑传感器内部结构因素对传感器频响特性的影响 .用角频率 ω_1 和 ω_2 作为表征传感器频率响应的特征参数 ,通常所说的传感器的使用频率下限认为与 ω_1 相当 ,而上限往往要低于 ω_2 ,在两值之间形成频率响应通带 ,如图 2 所示 .建立两自由度微分方程 ,通过谐波分析 ,可以解析出 ω_1 和 ω_2 的计算表达式 :

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} [p_1^2 + p_2^2 + \omega_n^2 \mp \sqrt{(p_1^2 + p_2^2 - \omega_n^2)^2 + 4 p_1^2 \omega_n^2 }] \quad (1)$$

式中 : $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$; $p_1 = \sqrt{\frac{k}{M}}$; $p_2 = \sqrt{\frac{K}{M}}$;其中 k 为传感器惯性体与外壳之间的等效弹性系数 ; K 为传感器与安装表面之间的弹性支撑系数 ; M 为传感器整体质量 ; m 为传感器内部惯性体质量 .以上分析中忽

基金项目 水利部科技创新项目(SCX2000-56)
作者简介 朱德兵(1968—) ,男 ,湖北仙桃人 ,博士 ,从事无损检测基础理论及无损检测方法和技术研究 .

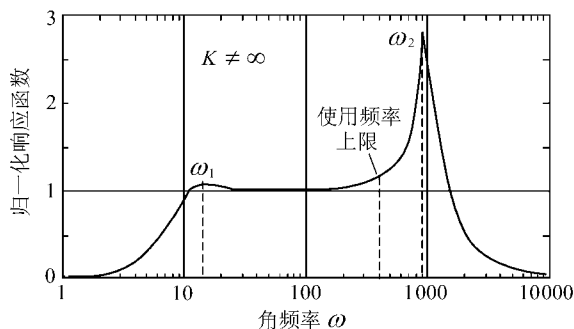


图2 实际安装传感器频响特性示意图^[3]

略了各种阻尼的影响因素。

对于完全刚性固定安装条件,有 $K = \infty$ 和 $p_2 =$

∞ ,由式(1)可得: $\omega_1 = \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$; $\omega_2 = \infty$ 。

根据公式(1)推导,当 K 和 M 变化时,可以计算 ω_1 、 ω_2 的理论变化曲线,如图3所示。这一组理论曲线表明了传感器质量和传感器接地刚度变化时,相应的传感器频率响应通带的变化规律。

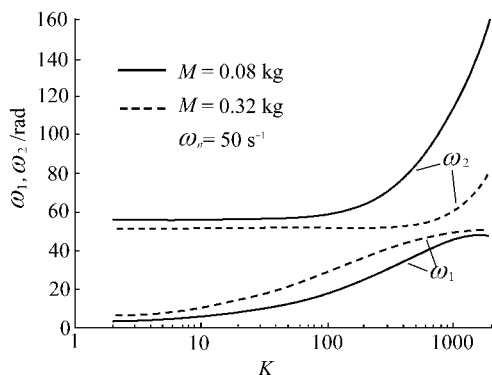


图3 M 不同时固有频率随 K 变化理论曲线

传感器的频响特性有两个主要特征:

a. 传感器安装刚度对频响特征的影响显著。当传感器接地刚度小,比如说传感器安装在极软弱地表时,就会严重影响传感器的理想响应频带特性;由于响应频带的非线性响应干扰,有时甚至会“歪曲”振动信号。这对于以频响特征为主要依据的各种试验分析方法来说极其不利。在实际工作中总是希望安装刚度越大越好,所以安装或埋设传感器应该保证传感器牢靠稳定。混凝土质量无损检测或桩基检测中,用黄油或凡士林来固定传感器不可取,因为没有达到提高传感器接地刚度的效果。用石膏固定传感器,而且等石膏干燥后再施行检测效果会更好。

b. 传感器加压固定时的附加质量直接影响频响特征,而且影响程度极大。如图3所示,随着 M 的增大, ω_1 、 ω_2 的理论曲线特征发生显著变化,使得传感器的有效频带迅速变窄,实际“进入”传感器的信号高频成分和低频成分绝大部分被压制;另外从图3还可以看出,加压固定使弹性支撑系数 K 变大,而

K 的增大可以使 ω_2 迅速增大, ω_1 趋于稳定值,使得传感器的有效频带变宽。由此可以看出,加压固定传感器会给传感器的频响性能带来两种不同影响,前者是不利的,后者是有利的。

结合工程无损检测实践,模态试验分析对弹性波在介质结构中传播的“瞬态”特征极少研究,而主要研究一种介质结构的“稳态”响应特征,一般条件下,低阶模态具有较大的能量优势,因此,提取和模拟低阶模态至关重要。这就要求传感器有较低的频率响应通带,而波勘探对道间信号的幅频和相频特性一致性有较高的要求。在安装检波器时应该具体分析。

在实际应用中,需要最大限度发挥传感器的带通优势,宁愿把部分滤波压制的任务交给软件系统来完成,同时希望在频响特征发生畸变时,给出截止频率,保证在接地状况变化时,需要作对比的传感器有一致的记录频带。

1.2 加长插入头的影响

如图4所示,传感器安装在速度为 v_1 的地面,尾锥的波速为 v_2 ,长度为 L ,弹性波射线由下向上传播。将尾锥的总输出与理想情况下点尾锥传感器输出之比值,记为 $\frac{A}{A_0}$ 。应用谐波分析和微积分的方法可以推导出 $\frac{A}{A_0}$ 的表达式:

$$\frac{A}{A_0}(L, f) = \frac{\sin\left(\pi f L \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}\right)\right)}{\pi f L \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}\right)} \quad (2)$$

$\frac{A}{A_0}(L, f)$ 是传感器尾锥的幅频响应特性,其相频响应特性可表示为

$$Q(L, f) = 2\pi f L \left(\frac{1}{2v_1} + \frac{1}{2v_2}\right) \quad (3)$$

通过一组给定的参数 L, f, v_1, v_2 ,就可以分析和讨论 $\frac{A}{A_0}(L, f)$ 和 $Q(L, f)$ 与 L 的关系,图5和图6为给定地面介质参数 $v_1 = 300$ m/s,尾锥速度 $v_2 = 6000$ m/s,对 $L = 1.0$ m, 0.8 m, 0.6 cm, 0.4 m, 0.2 m,

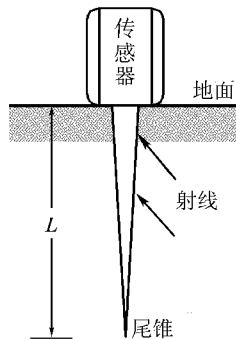


图4 地面传感器安装示意图

0.1 m 分别进行了计算的结果.从图中可以明显看出,尾锥效应使传感器的记录结果发生了剧烈的改造,主要表现在三个方面:①长尾锥对震动信号有明显的压制作用,对高频信号的压制作用尤其突出;②尾锥效应也使高频信号发生明显的畸变;③尾锥作用直接影响到传感器的相频特性.

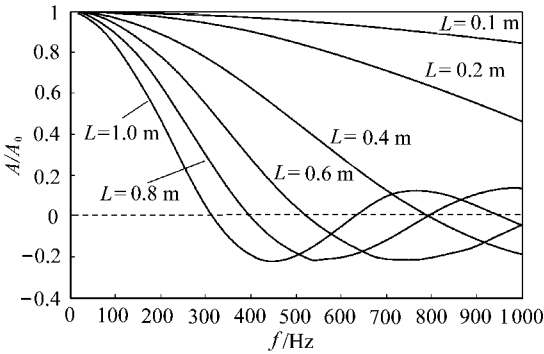


图 5 不同尾锥长度的传感器幅频响应特性

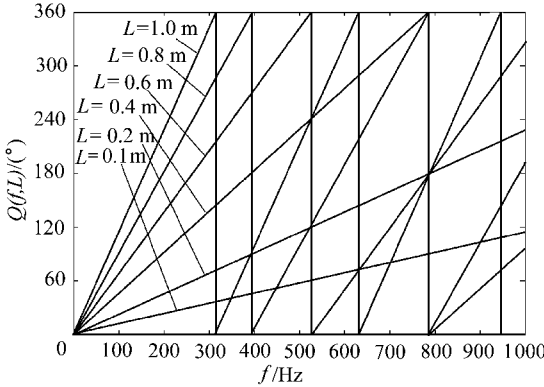
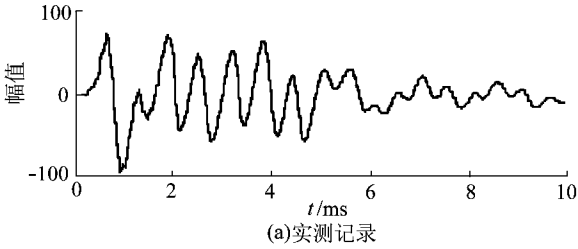


图 6 不同尾锥长度的传感器相频特性

对这些特点,如果需要从提高弹性波的频率来提高超浅层地震勘探的分辨率,则不适合使用加长尾锥的方式来固定检波器,对于以相位特征为主要



依据的浅层地震勘探方法,如瑞利波勘探,必须考虑到尾锥长度不同所导致的传感器响应相位不一致的问题.

根据尾锥改造信号的特点,在实际工作中,可以根据自己所要获取的信号目标对尾锥的长度进行改进,同时避免由于尾锥过长而产生的畸变效应.

2 原位测试实验分析

为了验证理论模型,本文针对传感器的安装固定方式完成了两组对比实验,以验证理论模型的结论.在实验中较严格地保证同源激励和相同的边缘效应,偏移距等各种装置参数也基本相同.

2.1 不同固定方式传感器对比

3 个规格完全相同的传感器安装在混凝土结构表面做接收试验,自由放置、垂直加压以及石膏固定三种情况的共震源记录时域曲线和相应的幅频特征分别如图 7、图 8 和图 9 所示.混凝土表面自由安装的传感器检测信号有两个明显的主频峰,加压固定和石膏固定时低频主频峰基本无变化,高频主频峰被削弱,同时出现更高级的主频峰,石膏固定时这一更高级主频峰能量得到加强.由此可以看出,任何传感器都有其自身的频响特性,用加压或者石膏固定传感器都会导致传感器频响性能的改变,有时获取的振动记录信号甚至被歪曲,在实践中应该予以重视.

2.2 尾锥长度不同的传感器对比

不同尾锥长度的传感器埋设在介质较均匀的黏土场地上,在同源条件下记录它们的响应信号,记录时间域信号和幅频特征分别如图 10 和图 11 所示.尾锥长度不同的传感器其记录信号存在明显的差

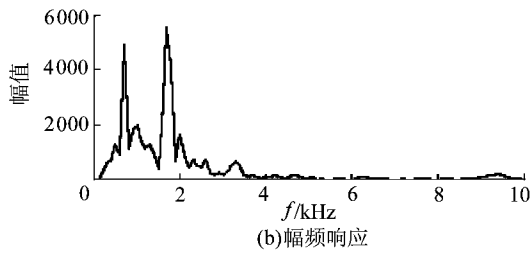


图 7 混凝土桩基表面自由放置传感器实测记录及幅频响应曲线

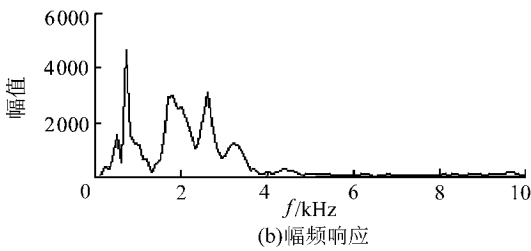
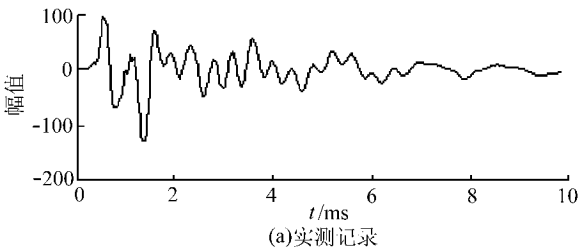


图 8 混凝土桩基表面垂直加压固定传感器实测记录及幅频响应曲线

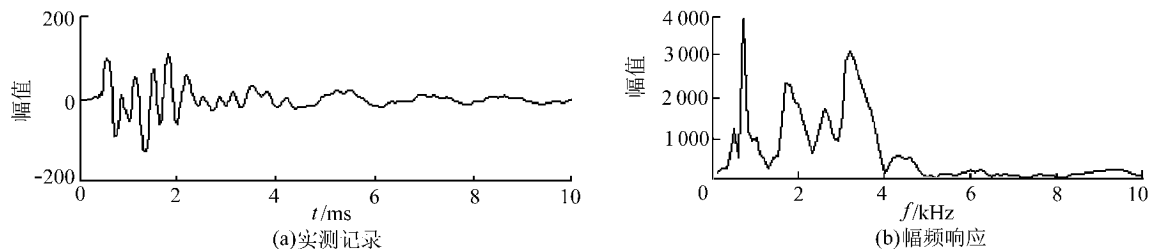


图 9 混凝土桩基表面石膏固定传感器实测记录及幅频响应曲线

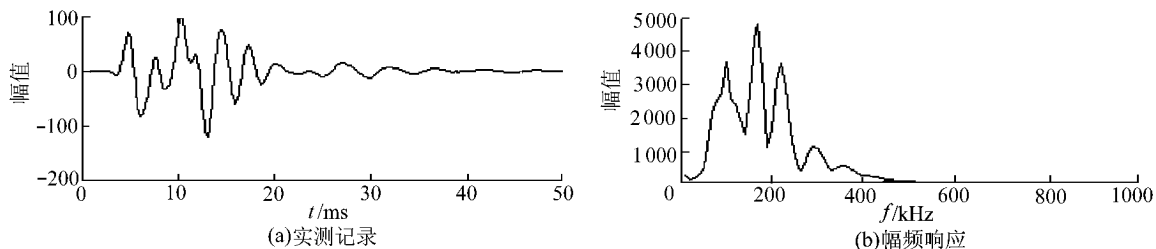


图 10 短尾锥 (10 cm) 传感器安装在黏土介质表面实测记录及幅频响应曲线

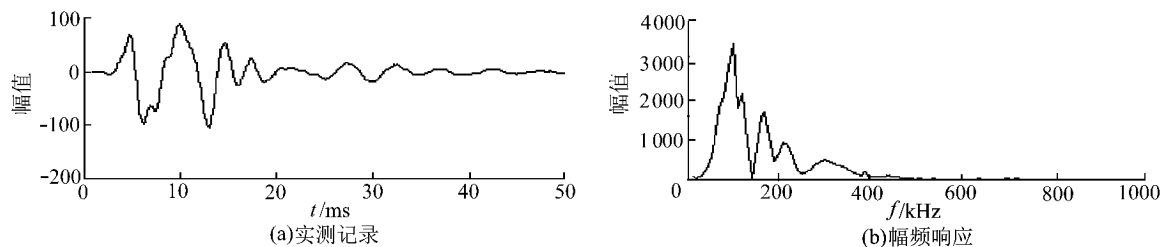


图 11 长尾锥 (30 cm) 传感器安装在黏土介质表面实测记录及幅频响应曲线

异, 主要体现为长尾锥传感器对低频信号的小幅压制和对高频信号的强烈压制, 同时, 幅频特征还发生一定的畸变, 各主频能量幅度的相对变化没有明显规律。

传感器的不同安装方式对相频特性的改造需要在特定的勘探方式下进行分析, 本文没有针对性的测试实验和分析。

野外采集的原位测试记录, 在时间域和频率域进行特征分析对比, 得出的结果十分直观, 尤其是各主频能量的相对变化特别明显, 与理论分析结论基本一致。总的说来, 传感器的不同安装方式或长度不同的尾锥直接影响到采集信号的频谱特性, 主要体现在主频分布、带宽以及相对振幅的改造上, 自然也会在不同程度上影响实际信号的相位特征。

3 结 语

不同的探测技术对地震勘探的信号频率、相位保真性都有一定的要求, 传感器的选择和安装应该根据分辨率、探测能力进行取舍和调整。对于面波勘探, 不仅要保证各道传感器自身特性的一致, 还要在安装固定方式上保证一致性。

介质结构在主动源激励下的频响特征, 其影响因素是相当多的, 包括震源激励特征的可描述性、传

感器记录成分的可靠性和真实性、A/D 转换器以及计算机等采集系统的稳定性和匹配性等。本文仅就惯性式传感器频响特征的某些方面进行了系统描述, 而对于其它类型的传感器、传感器的寄生频率、传感器与地表接触面积和耦合强度、传感器的灵敏度和输出电阻与记录系统输入阻抗的关系、传感器自身相频特性等不应被忽视的问题都没有涉及, 具体情况可以参考有关文献^[3,4]。

参考文献:

- [1] 徐锦玺, 吕公河, 谭绍泉, 等. 传感器尾锥结构对地震采集信号的影响[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(2): 204 ~ 210.
- [2] 李方泽, 刘馥清, 王正. 工程振动测试与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [3] 曹菁. 适合高分辨率勘探要求的传感器[J]. 石油仪器, 1998, 12(6): 31 ~ 33.
- [4] 董世学, 张春雨. 地震传感器的性能与精确地震勘探[J]. 石油物探, 2000, 39(2): 124 ~ 130.

(收稿日期 2003-12-01 编辑 熊水斌)

