

季节性冻土对可控震源激发信号的影响分析

罗春波 蔡培莹* 张庆斌 余圣华 解广宇

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司大庆物探二公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14380

[摘要] 近年来,随着勘探程度、难度的加大,三维地震采集工程进入了高密度的地震采集阶段,激发点多,炸药激发的工程造价高,因此可控震源被广泛应用于三维高密度地震采集中。可控震源的激发效果与地表因素密切相关,本文通过建立高寒地区的近地表模型,采用有限元仿真的技术,模拟了不同冻土层近地表结构条件下相同节点的振动情况及振板所获得的能量变化,阐明了冻土层的存在,对可控震源激发的效果是有影响的,近地表地层的弹性模量是影响激发效果的主要因素。

[关键词] 季节性冻; 可控震源; 无限无仿真

中图分类号: TU471.7 文献标识码: A

Analysis of the Impact of Seasonal Frozen Soil on the Excitation Signal of Controlled Seismic Sources

Chunbo Luo Peiying Cai* Qingbin Zhang Shenghua Yu Guangyu Xie

Daqing Geophysical Exploration Company, China National Petroleum Corporation Eastern Geophysical Company Limited, Songyuan City, Jilin Province

[Abstract] In recent years, with the increase in exploration difficulty and intensity, 3D seismic acquisition projects have entered the high-density seismic acquisition stage. Due to the large number of excitation points and the high cost of explosive excitation, controllable seismic sources have been widely used in 3D high-density seismic acquisition. The excitation effect of controllable seismic sources is closely related to surface factors. This paper establishes a near-surface model of a high-cold area and uses finite element simulation technology to simulate the vibration conditions and energy changes obtained by the vibration plate at the same node under different permafrost layer near-surface structures, clarifying that the existence of permafrost layers has an impact on the excitation effect of controllable seismic sources, and the elastic modulus of the near-surface strata is the main factor affecting the excitation effect.

[Key words] Seasonal freezing; Controllable seismic source; Finite element simulation

引言

在地球物理勘探领域,三维地震采集技术已成为揭示地下地质结构的核心手段。近年来,随着油气资源勘探向复杂地貌与深层领域推进,勘探工程面临激发点密集、施工成本高企等挑战。传统炸药激发方式在高密度采集场景中因造价昂贵、环保限制等问题逐渐受限,而可控震源作为一种低能量密度、可重复激发的地震源,凭借其可控性强、环境友好等优势,在三维地震采集中的应用愈发广泛。

可控震源的激发效果与近地表地质条件密切相关,尤其是在高寒地区,季节性冻土的冻融循环会显著改变地表介质的物理力学性质,进而影响地震波的激发与传播。季节性冻土作为一种特殊的多相介质,其弹性模量、压缩性等参数随温度、含水率的变化呈现动态特征,这种特性可能导致震源能量耦合效率降

低、信号畸变等问题。然而,当前针对冻土区可控震源激发机制的研究仍存在不足,缺乏对冻土层与震源信号相互作用的系统性分析。

为此,本文以高寒地区季节性冻土为研究对象,通过构建考虑冻土层结构的近地表模型,结合有限元仿真技术,定量分析不同冻土物理参数(如弹性模量、泊松比)及下伏地层条件对震源振板能量传递、振动信号特征的影响规律。研究旨在揭示季节性冻土对可控震源激发信号的作用机制,为冻土区地震采集工艺优化、信号处理方法改进提供理论依据,推动复杂地表条件下地震勘探技术的发展。

1 季节性冻土的物理特性

在季节性冻土的冻结和融化过程中冻融土壤的物理学特性会发生改变,具有不同于非冻结土壤的特点。

表 1 五种模型材料参数

模型	模型1(冻粘土)				模型2(冻粘土)				模型3(无冻土)				模型4(冻沙泥)				模型5(冻水田)			
类别	密度	弹性模量	泊松比	速度	密度	弹性模量	泊松比	速度	密度	弹性模量	泊松比	速度	密度	弹性模量	泊松比	速度	密度	弹性模量	泊松比	速度
第一层	1800	4.8	0.3	2000	1800	4.8	0.3	2000	1600	0.3	0.35	500	1900	8.6	0.3	2600	1750	9.1	0.3	2800
第二层	1600	0.3	0.35	500	2000	4.32	0.3	1800	1600	0.3	0.35	500	1600	0.3	0.35	500	1600	0.3	0.35	500
第三层	2000	4.32	0.3	1800	2000	4.32	0.3	1800	2000	4.32	0.3	1800	2000	4.32	0.3	1800	2000	4.32	0.3	1800

1. 1物质组成

未冻土属于多孔疏松的多相体系, 由土壤颗粒、孔隙水和空气构成。当土壤温度降至0℃以下时, 部分液态孔隙水冻结成冰, 此时冻土由土壤颗粒、冰、未冻水及水汽组成, 其中土颗粒与冰形成骨架结构。由于各相比例影响土壤物理特性, 且冻土层结构受自然条件变化(如冰结构及粘滞性改变)影响显著, 导致冻土性质具有不稳定性。当前勘探显示, 区域冻土层深度在1-1.5米, 而地下潜水面埋深超5米, 故冻结土层属于非饱和土。

1. 2压缩性

冻土的压缩性体现为土中应力与变形的关联, 常以压缩系数和压缩模量衡量。土体受外力时, 土颗粒、水和气体的相对位移会使孔隙体积减小, 引发压缩变形, 而压缩性高低由物质组成、结构特征及受力条件等因素决定。对于非饱和黏性冻土, 孔隙气会随压力变化胀缩, 进而堵塞水的渗透路径, 致使冻土压缩性改变。

1. 3弹性模量

众多文献研究指出, 冻土弹性模量受温度、颗粒组成、含水量及外压等因素影响, 其中温度为核心影响因子, 且呈现“温度越低弹性模量越大”的动态变化特征。在低含水率冻结土中, 动弹性模量与动剪切模量随含水率增加而升高; 而高含水率冻结黏土中, 该类模量则随含水率增加而降低。此外, 冻土弹性模量还因岩性差异和时间变化表现出不同特性。

1. 4泊松比

与其他弹性力学参数相比, 目前泊松比的研究仍较为有限。数值分析中常采用近似值或在极小范围内取值。冻土作为特殊材料, 其物理力学性质与传统材料差异显著, 故冻土泊松比并非固定物性参数, 而是随加荷方式和受力状态变化的变形状态参量。研究表明, 冻土动泊松比随温度降低而减小, 随含水率增加而增大。以松辽盆地为例, 其冻土泊松比通常取值范围为0.25~0.3。

2 可控震源工作原理

可控震源是一种低能量密度的激发源, 激发能量的积累需要长时间振动来实现。可控震源主要由四部分组成: 驾驶室、振动器、底盘和发动机, 其中振动器是可控震源的核心, 是产生地震信号的源头。可控震源的“可控”在于线性振动信号的时间和频率成分是可控制的。可控震源的作业实施分为两个阶段, 首先提升液压缸将可控震源车车身顶起, 使可控震源车的绝大部分

重量作用在振动器平板上, 保证振动器平板和地面紧密接触; 然后通过液压系统驱动重锤上下运动, 由此产生的反作用力作用于平板上, 引起平板与大地耦合振动, 从而产生地震波^[1]。信号发生器此时向地震记录系统发地震记录启动信号, 将它与采集系统得到的原始地震数据进行相关, 即可形成可控震源地震勘探的相关记录。从可控震源的工作原理可知, 振动器的结构中顶板、活塞杆和空气弹簧等结构属于附属件, 液体系统提供扫描信号(外部激励), 决定振动出力的主要因素是平板、重锤和扫描信号, 本文只研究冻土层对作用在平板上的扫描力信号向下传播过程的影响, 线性升频扫描信号公式如下:

$$x(t) = A * \left(\sin 2\pi \left(f_s + \frac{f_e - f_s}{2T} t \right) t \right)$$

其中, f_s 、 f_e 是扫描的起止信号, 分别取值为3Hz, 120Hz, T 是扫描信号的持续时间, 值为12s, 利用上面的公式可以得到的力信号如图1。

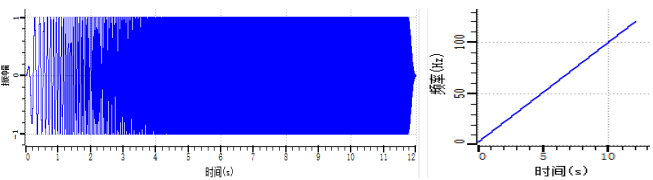


图1 可控震源的力信号及瞬时频率曲线

3 有限元仿真应用

3. 1平板振动几何模型的建立

为了提高计算精度, 缩短计算时间, 提高计算效率, 在保证计算精度与可靠性的前提下, 需要对模型做简化。主要建立震源平板与大地的接触模型。平板模型尺寸为1.2m*2m*0.2m, 大地模型的尺寸不可能建立为无限大, 因此, 大地模型应选取适当的尺寸。大地模型尺寸选取为1.5m*5m*5m, 分为三层, 从上到下依次为冻土层、粘土层、粘泥层。^[2]

3. 2网格划分

在有限元模型网格划分的过程中, 网格密度对于计算误差的影响是很大的。从整体上讲, 增加网格密度确实可以减少误差, 但所需的计算成本(计算时间和存储空间)也会相应上升。因此, 网格密度的选择是一个效率与精度的权衡问题。整个模型采用相同的六面体网格, 划分好的网格数量约为74万。

3. 3材料参数

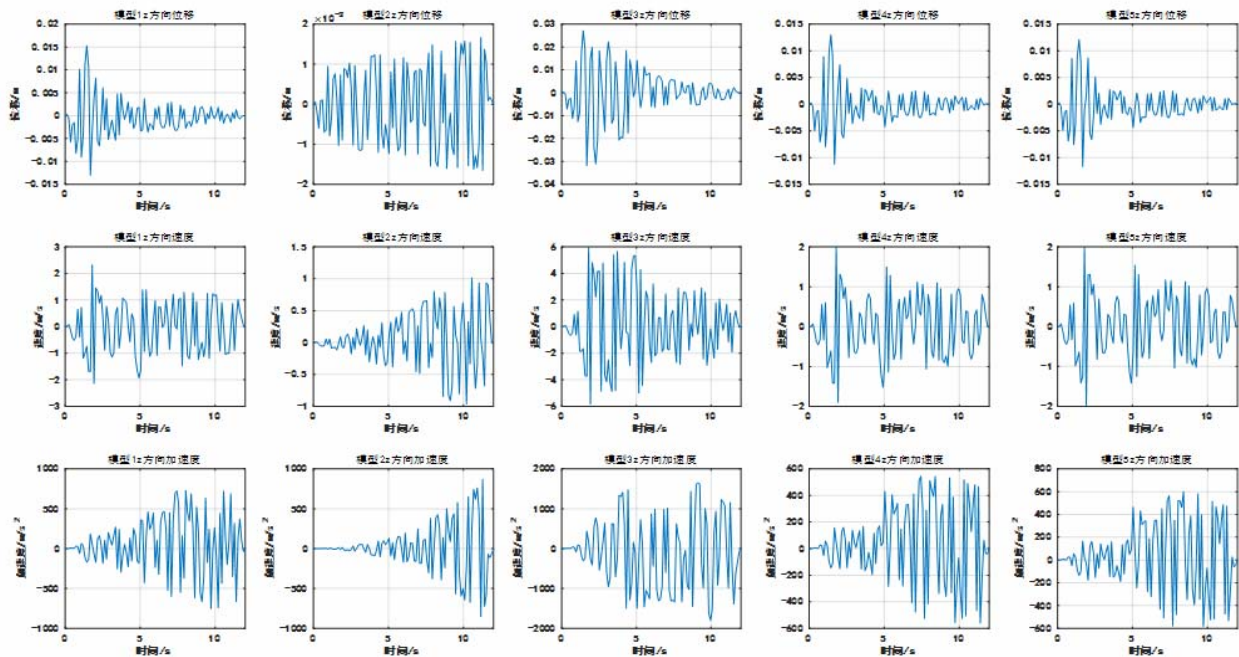


图2 仿真时程结果对比

平板结构的材料结构钢,大地模型材料选择为土,平板及大地的材料参数如表1所示。平板及大地的材料均设置为一属于线弹性材料,密度单位为 kg/m^3 ,弹性模量单位为GPa,速度单位为 m/s ,采用节点实体单元,用缺省常应力公式计算。

3.4 载荷

模型在振动工况下承受静载荷(平板压重)与动载荷(动态液压力),本文仅针对动载荷展开研究。鉴于可控震源工作时为避免输出信号严重畸变,液压力峰值通常取额定值的65%,故仿真时液压力峰值设定为17MPa。所施加液压力采用线性升频模式,频率从3Hz至120Hz,持续时间14s,模拟过程采用显式动力学算法。

3.5 边界条件

在振动过程中,选择“面面自动接触”作为接触类型。在土体模型的周边和底部施加无反射边界条件,避免了应力波在该边界处发生反射,减少求解的误差。^[3]

3.6 求解

将建立好的模型文件导入求解器,即可完成相应求解,得到仿真计算结果。

4 季节性冻土的影响分析

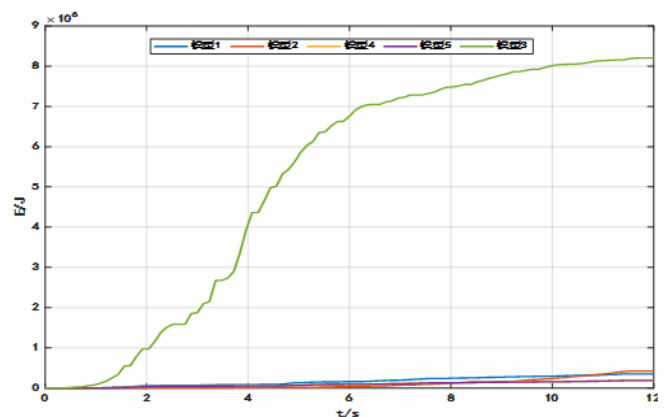
表1共建立了五种近地表的仿真模型,除了模型3,其他模型的第一层均为厚度1.5m的冻土层,模型3的第一层与其他模型的第二层的岩石物理参数一致。选择可控震源近场的同一节点处z方向的位移、速度、加速度(图2)进行对比分析。

(1)位移分析:通过分析时间历程曲线中不含冻土层的模型3所获得的位移的数据最大值为模型2的10倍,是其他模型获得数据最大值的2~3倍,模型2为冻土层下是高速层,从低频到高频

振动的幅度差别不大,而其他模型的振幅值随着频率的增加而减少,模型2在8s前的幅值均低于其他模型。

(2)速度分析:不含冻土的模型3仿真获得的速度曲线的峰值为模型2的4倍,是其他模型峰值2倍,除了模型2以外,其他四种模型均在2秒和5秒的时间出现极大值,说明这四种模型存在20Hz和50Hz谐振频率点,可以增加该频率处的能量。由于模型2的冻土层下面是高速层,导致了整个模型的有效弹性形变小,向下传播的应力小,振动位移减少、速度增加缓慢,不利于可控震源的能量向下传播。

(3)加速度分:从五种模型的时间历程曲线上可以看出,加速度都是由小到大的增加,但模型2增加的缓慢,其他模型增加的速率基本相当,10秒后模型2增加的速率明显增大,幅值高于其他四种模型所获得的加速度曲线。由于模型1、模型4、模型5的冻土层下伏地层岩石物理参数相同,因此所获得的加速度曲线的形态相似,幅值略有差别。



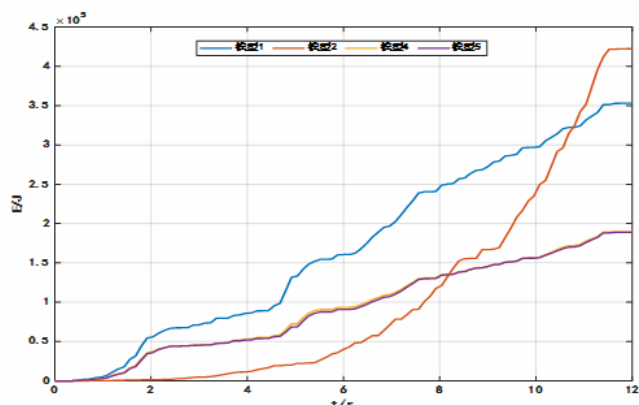


图3 仿真振板能量对比

(4)能量分析:可控震源激发的过程就是能量通过振板向下传播的过程,整个能量是个累加的过程,利用Matlab程序对有限元仿真得到的振板的瞬时能量累加求和,得到如图3所示的振板能量时间历程曲线。

图3左面为五种模型振板能量-时间变化的叠合图,无冻土层激发时,振板的能量是有冻土层存在时能量的10倍,其他四种模型获得的能量曲线数量级相同,位于图的下面无法对比分析。为了准确对比冻土层及下伏地层对振板下传能量的影响,把有冻土层的四个模型获得的能量曲线叠合在一起,如图3右所示。模型1的振板能量增加速率快并且在整体上高于其他模型,模型2的振板能量增加速率最慢且在前8秒能量最低。模型4、模型5在整个模型上冻土层的岩石物理参数差别不大,下伏地表一至,因此振板下传能量的累加曲线基本重合,而与模型1相比,密度上差别不大,弹性模量增加了一倍,因此所获得的能量减少近一倍。虽然模型1与模型2的冻土层参数相同,但下伏地层相差较

大,因此,速度高、弹性模量大、比较硬的地层不利于振板的能量下传。^[4]

5 结论

(1)季节性冻土的存在,会引起可控震源振板振动时间历程中的位移、速度、加速度的差异。

(2)冻土层的岩石物理参数的差异会产生不同的仿真结果,弹性模量的影响是主要的因素。

(3)冻土层的下伏地层速度、密度、弹性模量越大,越影响能量的下传。

(4)可控震源在坚硬的地表施工,不仅影响能量的下传,还会容易产生信号的畸变。

[参考文献]

[1]倪宇东.可控震源地震勘探采集技术[M].北京:石油工业出版社,2013.

[2]张田震.寒区冻土层融化过程传热传质模型构建及应用分析[D].东北石油大学,2023.

[3]Daqing Z,Haoran M,Shuying Z,et al.Simulation of frozen ground distribution in northeast China based on a surface frost number mode[J].Journal of Geographical Sciences,2022,32(8).

[4]苏州.基于综合物探技术的大小兴安岭冻土层厚度反演及其影响因素[D].哈尔滨师范大学,2022.

作者简介:

罗春波(1971--),男,汉族,吉林省松原市人,本科,高级工程师,主要从事地震采集方法研究。