

软土层检波器一体化埋置工具的 优化设计与应用效能分析

周 颜 高怀军 王 冲 周永华 陈 成
陈 孟 殷 军 李成毅

中国石油集团东方地球物理勘探公司西南物探分公司, 成都

摘 要 | 针对“两宽一高”高密度地震采集排列工序, 传统检波器埋置工具在软土层埋置环境存在埋置检波器效率低、耦合度较差、倾斜度大和携带不便等问题, 本文基于以上问题研发了一款软土层一体化专用工具。研究基于功能集成与模块化设计理念, 将锄头、榔头及不同类型检波器的引锥集成为一体, 根据使用环境及场景优化材料与结构, 实现了工具的轻量化和便携化。在四川盆地不同工区软土层的现场应用表明, 使用该工具后, 单点检波器平均埋置时间从72.33秒降至57.03秒, 作业效率提升逾21%, 同时有效提升检波器埋置耦合质量, 减少埋置倾斜度并降低操作人员劳动强度。该工具为高密度地震采集中、检波器在软土层的埋置作业, 提供了高效、规范、实用的专用技术装备, 具有显著推广应用价值。

关键词 | 地震采集; 两宽一高; 检波器埋置; 一体化工具; 耦合质量; 作业效率

Copyright © 2026 by authorx (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



在地球物理勘探采集环节中, 原始地震数据的信噪比及保真度, 均由检波器与地层的耦合质量所决定。理想耦合状态要求检波器与地层介质整合为统一的振动系统, 噪声与信号畸变均会因检波器埋置不当引发的耦合失效而被引入, 最终影响地下构造解释的精度。

特别是在以四川盆地为代表的西南复杂地表区域, 东方物探公司西南物探分公司统计2021—2023年度 47个采集项目, 软土层检波器埋置占比达99.76%, 该区域软

土层(农田、林区、荒地)表土特性独特: 含水黏腻, 失水坚硬, 区域内植被分布密集。现有的检波器埋置工具繁杂多样: 主要由锄头、引锥、榔头、压埋器等组成(图1), 这些工具种类多携带不便、总质量大, 且在搬迁过程中易与检波器碰撞造成损伤, 更重要的是, 其作业效率低下, 实测平均埋置单点耗时达72.33秒; 在“两宽一高”高密度采集观测系统推广背景下, 现有的埋置工具需要进一步改进, 以提高埋置效率, 方便野外作业人员携带。

通讯作者: 高怀军, 中国石油集团东方地球物理勘探公司西南物探分公司副高级工程师, 研究方向: 石油勘探采集。

文章引用: 周颜, 高怀军, 王冲, 等. 软土层检波器一体化埋置工具的优化设计与应用效能分析 [J]. 环境与资源, 2026, 8(2): 143-149.

<https://doi.org/10.35534/er.0802019>



图 1 现有软土层检波器埋置工具示意图

Figure 1 Schematic diagram of existing embedding tool for geophone in soft soil layer

随着“两宽一高”高密度地震采集观测系统的推广，四川盆地地震采集单炮接收道超万道，传统工具埋置方式的瓶颈显著，制约了埋置质量、生产效率和成本控制。尽管业界存在如沙漠手摇式埋置工具、冻土区域电钻打孔埋置方式、盐碱水域检波器埋置工具等专用工具，但它们或限于特定介质，或工具笨重、操作复杂，未从根本上解决软土层检波器埋置工具“多、杂、重、慢”的难题。因此，研发一种集多种功能（挖、锤、快速定位）于一身、轻便易携、适配不同类型检波器的一体化埋置工具，是地震勘探排列工序中极具迫切性的需求。本文基于东方物探公司西南物探分公司的生产实践，结合软土层检波器埋置工艺特点，研发软土层检波器一体化埋置工具，通过功能集成、结构优化、模块化设计解决传统工具的一系列问题。并通过严格的野外试验，量化分析其在提升作业效率与耦合质量方面的应用效能，以期为高密度地震采集项目的提质增效提供可靠的装备解决方案与实践依据。

1 现有埋置工具问题剖析与创新需求

在石油勘探领域的软土层区域，软土层是地震勘探

检波器埋置的主要地表环境，地震采集作业的效能长期受限于传统埋置工具固有的系统性缺陷。本节从检波器埋置工具的作业体系与质量风险两个维度，深入剖析现有工具的突出问题，明确创新需求的核心方向。

1.1 作业体系的低效性与大质量

现有检波器埋置工具的弊端主要集中在“分散化”与“大质量”。传统一套埋置工具需由锄头、榔头及多类型引锥（适配 eSeis、GTsies 节点及单点检波器等）组成，导致：野外作业需携带多件设备，工具总质量逾 6kg（图2），增加作业者的搬运负重与携带难度；工序切换（如挖坑→定位→夯实→回收）繁琐、更换工具降低埋置效率。同一类型的引锥加工标准不统一，导致检波器埋置倾斜度波动大，耦合质量较差；多工具交替使用易出现工具遗漏、操作失误（定位角度大、夯实不紧实），影响地震数据采集的保真度。多工具携带与反复取放导致现场作业人员频繁起身和弯腰，容易引起腰肌损伤和体力消耗；分散工具加工标准不统一，后期维护耗时耗材，进一步推高成本。



图 2 传统埋置工具重量图

Figure 2 Weight diagram of traditional embedding tools

1.2 埋置质量的风险与现有技术的局限

传统检波器埋置工具的质量风险在于其技术设计与高密度地震采集的“精度要求、效率要求、标准化要求”不匹配，传统的锄头、榔头、不同检波器的引锥等独立设备缺乏统一的质量控制标准，操作流程闭环难度大，工具设计的缺陷无法约束人为操作误差（如夯实力度、定位角度）。分散化设计导致操作不规范与质量失控，适配性不足引发设备配错与定位偏差不一，结构缺陷造成环境适应性差与可靠性不足，最终导致检波器接收的原始地震数据质量下降，埋置效率低和一致性差则引起作业成本上升。

软土层检波器一体化埋置工具的研制，有利于精准解决“两宽一高”高密度地震采集中埋置“效率低、质量差、负荷重、成本高”的核心痛点，保障高密度勘探项目采集环节的高效推进，特别是在技术创新、安全环保、成本优化等方面形成了多重闭环，为本论文软土层检波器一体化埋置工具的创新设计指明了方向。

2 一体化埋置工具的优化设计与实现

本研究基于前述明确的创新需求，系统性地开展了一体化埋置工具的工程设计工作。本文将围绕设计理念、结构创新与材料工艺三个层面，详细阐述该工具的优化设计与实现路径。

2.1 基于功能集成的总体设计理念

软土层检波器一体化埋置工具创新设计围绕四个思维构架：（1）锄头为核心；（2）斜面螺旋+自锁连接方式；（3）引锥模块库集成；（4）轻量化+镂空。设计过程并非不同埋置工具简单的叠加，而是通过借鉴多功能工兵铲、采用STC算法分析，根据埋置工具的应用环境和使用场景进行分析与解构。

具体而言，根据野外现场各部件的使用场景、使用频次及受力情况的原则为设计理念：

（1）以锄头为核心功能集成。以锄头挖坑为核心，连接榔头增加势能，降低人工动能；引锥垂直锄头面连接，脚踏施压实现快速精准定位。

（2）斜面螺旋+自锁连接方式。工兵铲为了便于徒步，折叠后占用空间跟小；而检波器埋置工具折叠不仅设计难，造成折叠处不够坚固，一天埋置几十个检波器反复折叠容易损坏；因此各部件采用螺纹连接不仅有便于拆卸与组装的优点，兼顾结实。

（3）引锥模块库集成。构建不同检波器适配引锥模块库，实现标准化存储、灵活替换与快速组装，根据施工需求配置相应检波器引锥。

（4）轻量化+镂空。根据野外实际使用场景，引锥和手柄、附属配件受力小因此采用轻量化材料，引锥采用镂空技术进一步减重方便野外携带。

据上述设计理念实现了“一具多能”，即一套工具只通过现场需要更换相应检波器的引锥，即可替代传统作业中所有分散工具的功能，实现挖、定位、夯实的功能，从根本上解决传统埋置工具繁多、携带不便、埋置效率低和埋置质量有待提高的核心痛点（图3）。

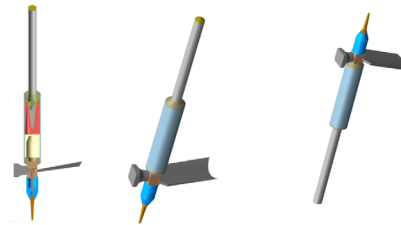


图3 一体化软土层检波器埋置工具3D剖面图

Figure 3 3D sectional view of integrated embedding tool for geophone in soft soil layer

2.2 模块化结构与快速连接机制

工具的物理实现依赖于其精密的模块化结构，其核心部件包括：锄头和手柄、锤头、套筒、引锥模块库，以及相互连接组件（图4）。

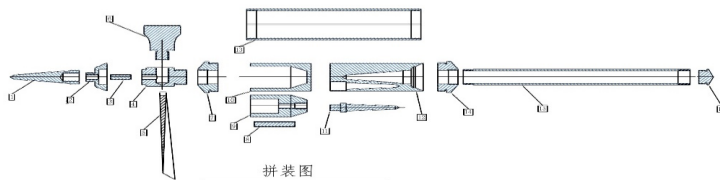


图4 一体化软土层检波器拼装图及各部件名称和材料表

Figure 4 Assembly drawing of integrated geophone embedding tool for soft soil layer, with component names and material list

多功能锄头配件明细表		
编号	名称	材质
1	检波器引锥型号1	45# 钢
2	引锥模具	铝 6061
3	连接螺杆 1	不锈钢
4	锄头转换接头	铝 6061
5	锄头	45# 钢
6	锤头	45# 钢
7	套筒转换接头	铝 6061
8	连接螺杆 2	不锈钢
9	检波器引锥型号 2	铝 6061
10	模具减震套	尼龙 PA6
11	检波器引锥型号 3	铝 6061
12	减震套	尼龙 PA6
13	外套管	尼龙 PA6
14	套筒转换接头	铝 6061
15	手柄	铝 6061
16	手柄螺旋盖	铝 6061

(1) 各部件的连接: 作为检波器埋置环节的主要受力部件, 手柄和锄头的连接处采用大螺纹连接, 既实现便捷化, 也保证了连接处的坚固性; 锄头和锤头采用中螺纹连接, 有效兼顾了敲击的冲击力和减重, 锄头和引锥采用细螺纹连接, 保证了坚固和轻便。

(2) 套筒的功能: 引锥模块库通过套筒组装在手柄处, 既起到连接手柄和锄头的作用, 减轻了手柄质量, 也提升了引锥根据环境适配的效率。

(3) 引锥模块库: 不同引锥通过镂空和小型化设计, 利用模具套实现归一化, 减轻了工具的整体质量。根据不同检波器使用环境的适配统一拿取和储存, 提高了引锥置换的效率。

2.3 材料优选与轻量化迭代^[9-10]

为实现“轻便易携”的目标, 我们在材料选择与设计迭代上进行了优化。根据使用场景各部件的受力大小和时长, 锄头和榔头作为受力主件, 采用锰钢加工, 手柄、套筒、受力小采用6061铝合金管, 引锥要接触地表采用耐腐蚀的304不锈钢, 且利用小型化和镂空技术实现减重, 辅助配件应用尼龙。



图5 第一代理置工具和第二代理置工具对比图

Figure 5 Comparison of 1st & 2nd generation embedding tools

工具从第一代到第二代通过优化设计产品迭代。质量从4.460 kg减轻到1.975 kg, 质量减轻了约2.485kg (55.72%); 长度从(1.34 m)缩短至0.62 m, 长度缩短了0.72 m (53.73%)。相较于传统工具(图2)便携性得到了革命性提升, 极大地减轻了野外高频率搬迁作业的需求(图4)。

3 现场测试与应用效果分析

本研究成果在四川盆地眉山—邛崃三维地震采集项目中, 通过现场科学严谨的野外对比测试。本章将从测试方案、作业效率与综合效益三个维度, 对该工具现场试验应用效果系统性的展开分析。

3.1 测试方案与评价指标体系

测试着重对比新旧工具的埋置效率的差异。现场选取10位有丰富作业经验人员, 分别记录在农田、荒地、林区三种地表埋置作业时长。测试流程和实际生产条件一致, 记录整个作业全流程时间。核心评价指标两项:

(1) 作业效率。以单点平均埋置耗时(秒)作为关键量化指标。

(2) 综合效益。包括工具的质量、便携性以及埋置质量的评估(通过操作规范性与既往问题反馈)。测试阶段共收集使用一体化工具埋置的9153个检波点, 并与传统工具的历史基准数据(72.33秒/点)进行对比分析, 一线操作人员反馈该工具携带方便、劳动强度有所降低; 并通过布设QC数据对倾斜度的对比, 倾斜角度明显减小; 单炮定量分析在能量、频谱和信噪比上都比传统工具有所提高。

3.2 作业效率量化对比分析

现场测试数据经收集分析后, 测试成果显著。如表1所示, 使用一体化埋置工具后, 在农田、荒地、林区三种地表环境下, 单个检波点的平均埋置时间分别降至50.34秒、55.69秒和65.07秒, 综合平均时间为57.03秒。

表1 不同地表环境下平均埋置时间对比(单位: 秒)

Table 1 Comparison of average embedding time under different surface environments (Unit: second)

组长	农田区		荒地		林区		平均时间
	埋置个数(个)	平均埋置时间(s)	埋置个数(个)	平均埋置时间(s)	埋置个数(个)	平均埋置时间(s)	
王冲	698	49.5	139	54.8	79	63.9	56.1
王建国	713	50.2	137	55.7	69	64.5	56.8
苟红	714	51.3	129	54.9	73	67.1	57.8
陈东国	696	50.6	141	55.3	82	66.8	57.6
孟波	713	51.2	123	56.1	78	66.9	58.1
蒲建勇	732	49.3	123	56.3	61	62.7	56.1
刘仕刚	689	48.9	126	55.8	89	63.1	55.9
邱利	693	52.1	134	55.3	87	65.2	57.5
吴波	741	49.6	132	56.2	51	66.2	57.3
邱邦华	729	50.7	125	56.5	47	64.3	57.2
平均时间		50.34		55.69		65.07	57.03

测试结果表明，一体化埋置工具在不同软土层埋置效率均实现了提升，综合效率提升达15.3秒/点，提升幅度超过21%。主要得益于：其一，一体化工具的集成消除了传统埋置工具在埋置检波器期间：准备工具、切换和找寻工具及回收工具的时间（图5）；其二，符

合理置现场环境的一体化和轻量化设计降低了操作人员的劳动强度，使操作人员能更高效的保持工作节奏（图6）。虽在林区效率提升相对较小，这与此类环境地表植被根系复杂、主要依赖锄头功能有关，即便如此，埋置效率依然得到改善。



图6 传统工具埋置检波器流程图示

Figure 6 Flow chart of geophone embedding with traditional tools



图7 一体化埋置工具埋置检波器流程图示

Figure 7 Flow diagram of geophone embedding process for integrated embedded tools

3.3 综合效益与埋置质量评估

(1) 便携性。①质量：从传统工具组合质量的6.655kg大幅降至1.975kg，质量减轻了4.68kg（减重约70%）；②数量：从最少4个（锤头、榔头、不同引锥和

压埋器）减少为1个。③长度：比第二代一体化埋置工具长度缩短了53.73%，仅为0.62m。通过一体化优化设计，无论从质量还是长度上，都给野外作业人员携带和搬迁带来革命性的改变，极大减轻了野外操作人员的负重，获得了一线操作人员的高度认可。

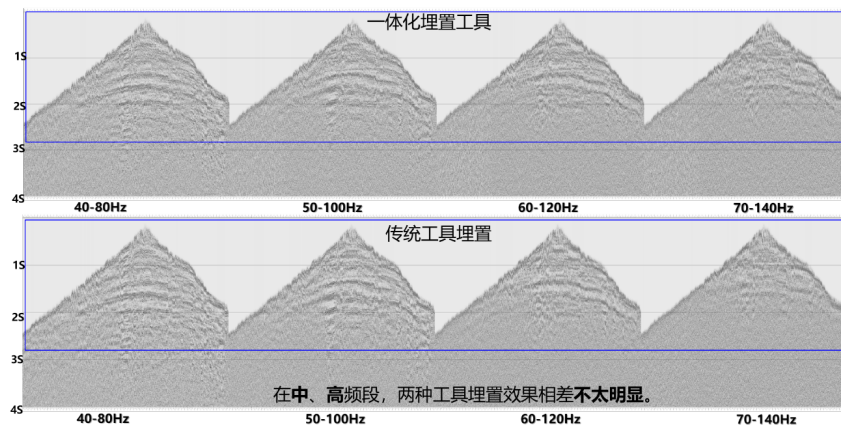


图8 传统埋置工具和一体化埋置工具单炮中、高频段分频对比

Figure 8 Single shot mid-/high-frequency band division comparison: traditional vs. integrated embedding tool

对一体化埋置工具和常规工具在软土层埋置的道集开全时窗定量分析:

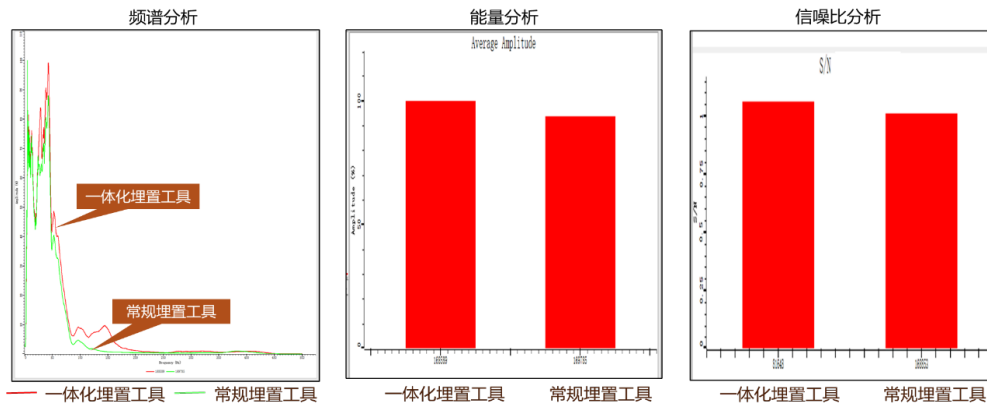


图9 传统埋置工具和一体化埋置工具单炮开全时窗定量分析

Figure 9 Quantitative analysis of full time window for single shot between traditional embedded tools and integrated embedded tools

(2) 埋置质量。该工具采用了统一标准加工, 特别引锥设计更符合埋置标准的要求, 定位的孔洞更为统一、倾斜度更小。从源头上保证了检波器埋置的倾斜度与深度的尽可能一致性, 设计初衷就为检波器与地表的耦合提供了保障, 消除了人为操作差异导致的埋置质量波动。通过现场反馈与后续单炮资料数据分析验证, 使用新工具后埋置的检波器倾斜度一次性合格率明显提高, 一体化工具埋置单炮在信噪比、频谱和能量上都稍优于传统工具(图7、图8)。

(3) 经济效益。在眉山-邛崃三维项目中使用该工具实际应用效果显著。节约了6天, 节约人员费用25万余元。此外, 该工具在甲方的现场观摩中获得了充分肯定, 其创新性设计, 突破了传统设备的局限, 轻量化、便于携带等显著减轻了一线作业人员的劳动强度。该工具产生的经济效益和社会效益表明其具有广阔的推广前景。

4 结论

本文针对“两宽一高”高密度地震采集背景下, 传统检波器埋置工具在软土层区域效率低下、携带不便与埋置质量管控难等问题, 系统性地阐述了一种一体化埋置工具的创新设计与现场实践。通过研究, 得出以下主要结论。

(1) 该工具成功突破了传统检波器埋置工具的局限。借鉴多功能兵工铲的设计理念, 创新性地根据检波器埋置工具的应用环境和场景提出4条思路构架, 将锄头、榔头及不同检波器引锥集为一体。不同部件间通过螺纹连接, 优化重复的构件和构件尺寸, 本着轻量化的原则, 根据部件使用过程中的受力大小、是否接触表土等优选材料, 工艺上根据埋置工具不同连接部位的受力选用不同大小的螺纹连接, 在保证引锥使用功能的前

提下采用镂空加工技术尽可能减轻质量, 最终将工具总质量优化至2kg以内, 长度缩短至0.62m, 相较于传统工具组合, 质量减轻约70%, 从根本上解决了传统工具野外作业携带强度大的痛点。

(2) 野外现场使用该埋置工具的实测数据表明, 单个检波点的平均埋置时间从传统埋置工具的72.33秒降至57.03秒, 埋置效率提高超过21%。为“两宽一高”高密度采集现场检波点埋置提供了更科学的生产工具。

(3) 该工具不仅兼具质控与经济效益, 还带来了一定的社会效益。采用统一的标准化设计、保障了检波器埋置过程定位的倾斜度与耦合性, 从工具源头设计上保证了地震数据接收的质量。现场使用该工具所产生的经济效益, 以及获得生产单位与甲方的认可, 说明该工具具备软土层工业化应用的推广前景。

展望未来, 该工具仍存在优化空间, 例如在手柄端头集成气泡水平仪以精确控制埋置倾斜度, 采用新型材料以在保证强度的前提下实现进一步减重。本研究为解决地震采集野外作业的共性难题提供了一套经过实践检验、行之有效的装备解决方案。

参考文献

- [1] Abraham E, Azuoko G B, Usman A, et al. A Machine Learning Framework for the Investigation of Energy-Critical Mineralized Geologic Structures from Gravity and Magnetic Datasets: Implications for Sustainable Exploration [J]. *Journal of Geo-Energy and Environment*, 2026, 2 (2), 95-117.
- [2] Ma G, Huang R, Dong Y, et al. A High-Accuracy Cost Prediction Model for Shale Gas Drilling in Southern Sichuan Using PCA and BP Neural Network [J]. *Journal of Geo-Energy and Environment*, 2026, 2

- (1), 46–55.
- [3] 卢明德, 王潮泳, 苗哲玮, 等. 基于超高灵敏度检波器的“双高”地震处理技术及应用[J]. 地震工程学报, 2026, 48(1): 157–165.
- [4] 蔺兑波. 矿井微震监测检波器固定装置及安装回收方法[J]. 煤矿机械, 2025, 46(10): 118–121.
- [5] 李兵兵, 王伟辉, 王飞, 等. 悬体偏置法评估检波器关键特性的研究[J]. 物探装备, 2025, 35(3): 203–206.
- [6] 王晨, 林娟, 娄兵, 等. 数字检波器与模拟检波器地震勘探效果对比分析[J]. 地质与勘探, 2025, 61(3): 517–524.
- [7] 王伟辉. 地震检波器失真度若干问题探讨[J]. 石油管材与仪器, 2025, 11(2): 16–20.
- [8] 余正杰, 井乔, 邓凯伦, 等. 硅基MEMS检波器性能改进分析[J]. 今日制造与升级, 2025, (2): 15–17.
- [9] Li H. A review of mechanical mechanism and prediction of natural fracture in shale. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(6), 474.
- [10] 石星辰, 毛伟建, 张延保, 等. 多分量震源和检波器数据弹性波高斯束偏移[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(5): 2059–2068.
- [11] 成新选, 白玉山, 王博, 等. 常用模拟地震检波器接收效果对比[J]. 物探装备, 2024, 34(2): 75–78.

Optimal Design and Application Effectiveness Analysis of an Integrated Geophone Burial Tool for Soft Soil Layers

Zhou Yan Gao Huaijun Wang Chong Zhou Yonghua Chen Cheng
Chen Meng Yin Jun Li Chengyi

BGP Southwest Geophysical Company, CNPC, Chengdu

Abstract: Aiming at the problems of low burying efficiency, poor coupling, high inclination and inconvenient portability of traditional geophone burying tools in soft soil layer environments during the layout process of wide-azimuth, wide-bandwidth and high-density seismic acquisition, this paper develops an integrated tool for soft soil layers. Based on the design concept of functional integration and modularization, the tool integrates a hoe, a hammer and guide cones for different types of geophones into one unit. The materials and structure are optimized according to the application environments and scenarios, achieving lightweight design and easy operation of the tool. Field applications in different work areas of the Sichuan Basin show that after using this tool, the average burying time per geophone is reduced from 72.33 seconds to 57.03 seconds, with the operation efficiency thereby improved by more than 21%. Meanwhile, it effectively enhances the coupling quality of geophone burying, reduces the burying inclination and lowers the labor intensity of operators. This tool provides an efficient, standardized and effective technical equipment for geophone burying in soft soil layers during high-density seismic acquisition, and has significant popularization and application value.

Key words: Seismic acquisition; Wide-azimuth, wide-bandwidth and high-density; Geophone embedding; Integrated tool; Coupling quality; Operational efficiency