

高难山地地震勘探激发点优选技术研究及应用

陈宇*, 杨智超, 曾旭, 杜敏, 郭祥民

中国石油集团东方地球物理勘探公司西南物探分公司, 四川 成都

收稿日期: 2024年11月26日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年1月17日

摘要

随着勘探程度加深, 地震勘探部署向着地表条件恶劣的地区转移。高难山地地震勘探项目陡增, 这里山体高大、沟壑纵横, 地震勘探施工隐患多, 风险大。需要运用先进的激发点布设方法, 最大程度的降低施工风险程度, 保全企业员工的生命健康安全及设备财产安全。本文介绍了高难山地施工中实用性较强的激发点优选技术, 为高难山地地震勘探项目激发点布设开辟了一条可以借鉴的有效途径。

关键词

高难山地, 地震勘探, 风险规避, 激发点

Research and Application of Optimal Selection Technology for Shooting Points in Seismic Exploration in High-Difficulty Mountainous Areas

Yu Chen*, Zhichao Yang, Xu Zeng, Min Du, Xiangmin Guo

BGP Southwest Geophysical Company, CNPC, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 26th, 2024; accepted: Jan. 9th, 2025; published: Jan. 17th, 2025

Abstract

With the deepening of exploration degree, seismic exploration deployment is shifting to areas with harsh surface conditions. The number of seismic exploration projects in high-difficulty mountainous areas has increased sharply. Here, the mountains are tall, ravines crisscross, and there are many hidden dangers and high risks in seismic exploration construction. Advanced shooting point layout

*通讯作者。

文章引用: 陈宇, 杨智超, 曾旭, 杜敏, 郭祥民. 高难山地地震勘探激发点优选技术研究及应用[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(1): 49-55. DOI: 10.12677/ag.2025.151006

methods need to be applied to minimize the degree of construction risk and ensure the life, health and safety of enterprise employees and the safety of equipment and property. This paper introduces the optimal selection technology of shooting points with strong practicability in construction in high-difficulty mountainous areas, opening up an effective way that can be used for reference for the layout of shooting points in seismic exploration projects in high-difficulty mountainous areas.

Keywords

High-Difficulty Mountainous Areas, Seismic Exploration, Risk Aversion, Shooting Point

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高难山地的地震勘探野外采集施工面临着前所未有的巨大挑战。伴随地震勘探项目规模的持续扩张以及采集参数的不断优化,在装备、人力和物力方面的投入呈几何倍数增长。相应地,地震勘探施工过程中的安全风险也急剧攀升。采取何种科学有效的措施来降低施工风险,消除生产过程中的安全隐患,已然成为地震勘探领域的关键课题[1]-[4]。值得关注的是,新兴技术在地震勘探中的应用,有望为降低施工风险发挥重要作用。

2. 高难山地激发点优选技术

2.1. 研究背景

在山地地震勘探采集施工领域,钻井工序始终占据着至关重要的地位。在这一环节中,常常需要数名施工人员合力抬动重达百斤的钻机,在复杂的地形中艰难前行并开展打井作业。整个施工过程中,设备种类繁多且数量庞大,使得施工负担极为沉重。尤其当施工场景切换至高难山地时,设备与施工人员所面临的风险呈指数增长。出于对“以人为本”安全理念的坚守,在施工设计阶段,常常不得不采用舍弃高难山体区域激发点的方式。但这种处理方式却会引发大片激发点空白区的出现,影响地震勘探成像效果,严重降低了勘探质量,进而导致质量与安全之间陷入难以协调的矛盾困境[5] [6]。在一定程度上,这无疑阻碍了高难山地地震勘探工作的顺利推进。

2.2. 研究目的

在高难山地地震勘探中,施工面临着重重挑战,而精准确定激发点位置以最大程度地规避施工风险,无疑成为达成项目成功的关键突破点。行之有效的激发点优选策略能够大幅降低项目在高难山地施工中的不确定性及风险,有力保障项目的顺利开展,为项目的高品质发展与效益提升奠定坚实基础。历经多年的不懈探索与实践积累,形成了高难山体区激发点优选技术。该技术在有效保障设备和人员安全的基础上,能够顺利完成施工任务,为高难山地地震勘探事业提供了强有力的技术支撑。此技术的目的在于提升高难山体区激发点的准确性和合理性,显著降低施工风险,确保山地地震勘探项目在地形环境极其恶劣的情况下能够高效、安全地实施。

2.3. 技术原理

地震勘探从部署到采集施工过程中,首先依据地质目标进行技术设计,均匀布置物理点,即理论点。

随后, 在施工设计中遵循满足目的层覆盖次数等原则, 结合地面障碍、河流以及禁止施工区域等因素重新布设物理点, 即设计点。该激发点优选技术主要应用于施工设计阶段, 在地形极为陡峭、施工风险极大的山体区域, 基于安全考虑, 若按传统方法会出现激发点全部舍弃或难以完成激发点部署的情况。首先计算施工区域起伏度和坡度[7]-[10], 按照表 1 对地形难度进行分级。

Table 1. Terrain risk classification table
表 1. 地形风险分级表

起伏度(米)	坡度(度)	风险分级
$P_6 > 20$	$S_6 > 50$	极高风险
$20 \geq P_5 > 15$	$50 \geq S_5 > 40$	高风险
$15 \geq P_4 > 10$	$40 \geq S_4 > 30$	中高风险
$10 \geq P_3 > 5$	$30 \geq S_3 > 20$	中风险
$5 \geq P_2 > 2$	$20 \geq S_2 > 10$	中低风险
$2 \geq P_1 \geq 0$	$10 \geq S_1 \geq 0$	低风险

起伏度计算方法: 本文选取三阶不带权差分法计算地形坡度[11] [12]。若定义 3×3 的 DEM 网格编号(见图 1), 则有计算公式:

$$S = \arctan \sqrt{\left[\frac{Z_7 - Z_1 + Z_8 - Z_2 + Z_9 - Z_3}{6 \times d_x} \right]^2 + \left[\frac{Z_3 - Z_1 + Z_6 - Z_4 + Z_9 - Z_7}{6 \times d_y} \right]^2} \quad (1)$$

式(1)中, S 为坡度, d 为 DEM 的单元尺寸, d 分别改为对应方向的 d_x 和 d_y ; $Z_i (i = 1, 2, 3 \dots, 9)$ 为中心点 Z_5 周围各网格点的高程。

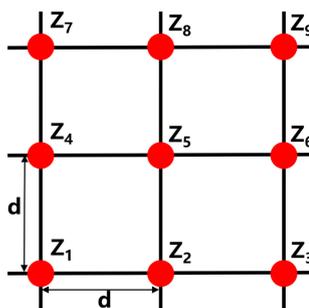


Figure 1. DEM 3×3 partial moving window
图 1. DEM 3×3 局部移动窗口

坡度计算方法: 本文选取标准差法来衡量地形的起伏程度[13]-[16], 其计算公式为:

$$P = \sqrt{\frac{(z_1 - m)^2 + (z_2 - m)^2 + (z_3 - m)^2 + \dots + (z_n - m)^2}{n}} \quad (2)$$

式(2)中, P 是起伏度, 以矩阵格式进行采样, 采样间隔大于 DEM 数据原始采样间隔, Z_1, Z_2, \dots, Z_n 是计算起伏度矩阵各网格高程, m 是 n 个采样点高程算数平均值。

然后在理论激发点部署基础上, 结合地形风险分级, 根据测量施工标准, 三维地震激发点沿激发线方向最大 $< \pm 1/2$ 激发点距, 垂直激发线方向最大 $< \pm 1/2$ 激发线距, 对激发点位置进行优选。尽量将施工

设计激发点部署在中、低风险区内。

最后，运用相关软件计算偏移后的覆盖次数，得到覆盖次数图，确保符合设计要求。覆盖次数计算公式为：

$$N = M \times R / (2 \times S) \tag{3}$$

式(3)中， N 是覆盖次数， M 是接收道数， R 为道间距， S 为激发点距。

这样不仅能解决地形特别险峻的山体区激发点部署问题，同时能够提高采集施工设计和实测炮点的符合率。

2.4. 技术实施方法

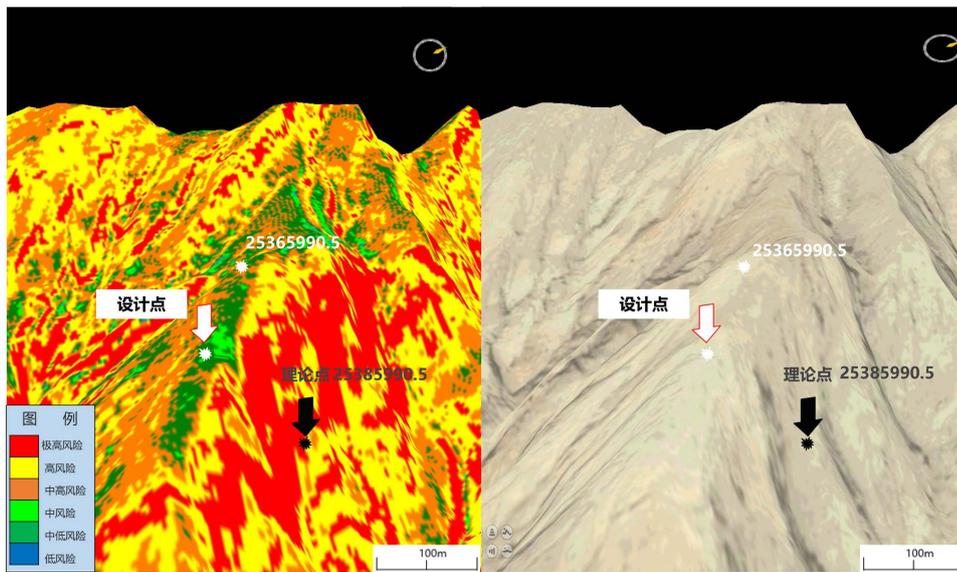


Figure 2. Comparison chart before and after optimization design
图 2. 优化设计前后对比图

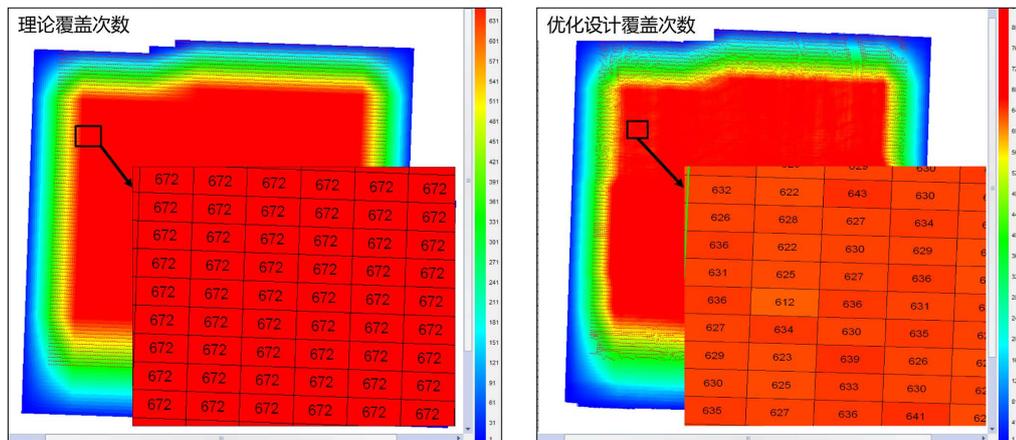


Figure 3. Comparison chart of fold numbers before and after the optimized design of shooting points
图 3. 激发点优化设计前后覆盖次数对比图

极高难山体区，沿炮排方向和连续的相对低风险区，对激发点进行优化部署。某工区设计激发点距 100 米，激发线间距 300 米。如图 2 所示，理论点 25385990.5 位于地形风险极大的区域，在它旁边的偏

移允许范围内有一条连续的中、低风险区,可保障人员和设备安全。同时,此区域沿垂直激发线方向并距离理论点 105 米,小于激发线间距的一半,符合选点要求。该线路还经过相邻理论点 25365990.5,能够有效减少人员在施工中的折返里程。因此将理论点 25385990.5 移到 25385988.5 点位处,作为设计施工点位,能够降低作业点风险等级,缩短施工时长,减少人员劳累度,从而保障人员及设备安全。

按照上诉方法对高难山体区的激发点进行偏移,完成施工设计,计算偏移后覆盖次数。如图 3 所示,是某三维工区的覆盖次数图(纵横坐标为工区经纬度位置,出于保密原因隐去),根据色标和覆盖次数值可以看出优化设计后最低覆盖次数 612 次,为部署满覆盖 672 次的 91.07%,完全达到设计要求。能在保障安全的前提下,完成地质任务。

3. 技术应用效果

3.1. 工区概况

某三维勘探项目位于库车坳陷北部构造带,南部进入阳霞凹陷,施工面积达 971.02 km²。如图 4 所示,工区北部山体高大、沟壑纵横。属于典型的山高难山地,海拔高程变化大,复杂山体区切割剧烈。给地震勘探物理点部署和采集施工带来了巨大的挑战。

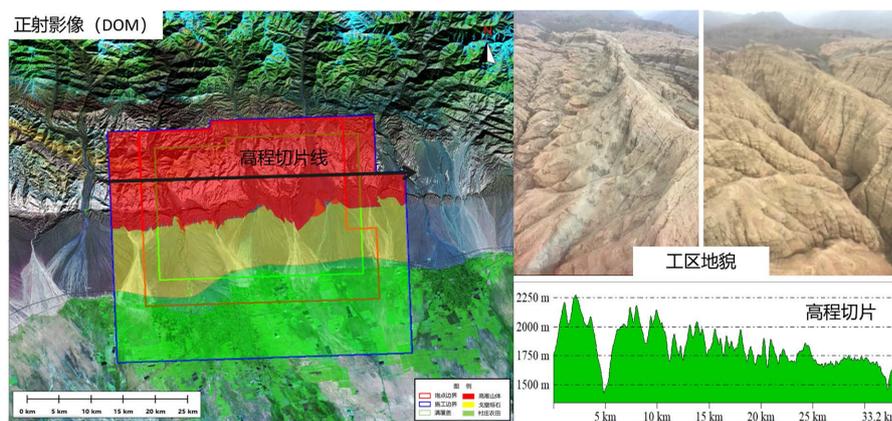


Figure 4. General map of the work area

图 4. 工区概况图

3.2. 应用效果

Table 2. Table of changes in shooting point risk classification before and after optimization design

表 2. 优化设计前后激发点风险分级变化表

地形风险	理论设计	优化设计	变化率(%)
极高风险	3387	383	-88.69
高风险	4910	2117	-56.88
中高风险	5197	4549	12.47
中风险	4744	2211	53.39
中低风险	4391	2564	41.61
低风险	4742	4218	11.05

本次三维项目高难山地地震勘探激发点优选技术进行施工设计,在高难山体区优选激发点 27,371 个,

大幅降低了高风险区激发点, 变化率见表 2。施工班组尽量沿着风险相对较低的区域施工(如图 5), 保障了 200 多名施工人员的人身安全。

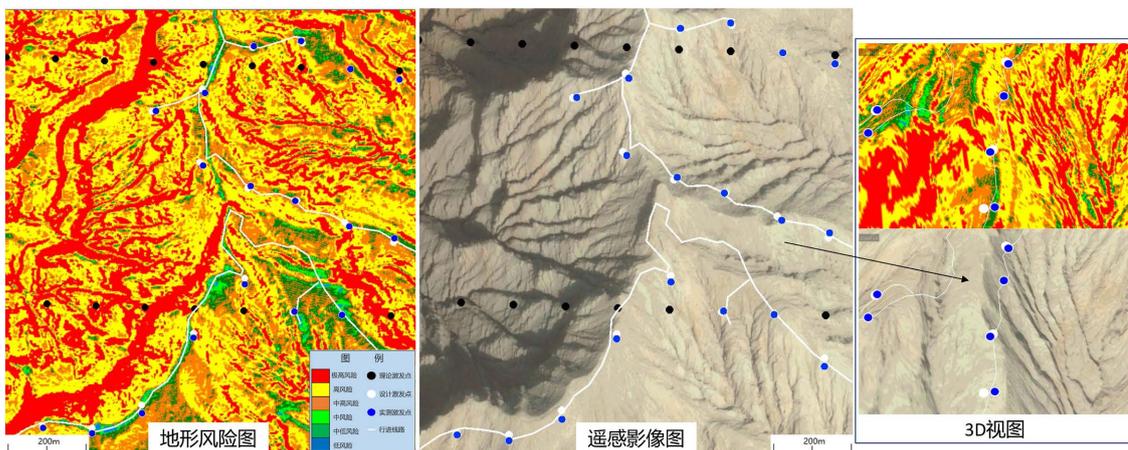


Figure 5. Partial map of the optimized shooting points
图 5. 优选激发点局部图

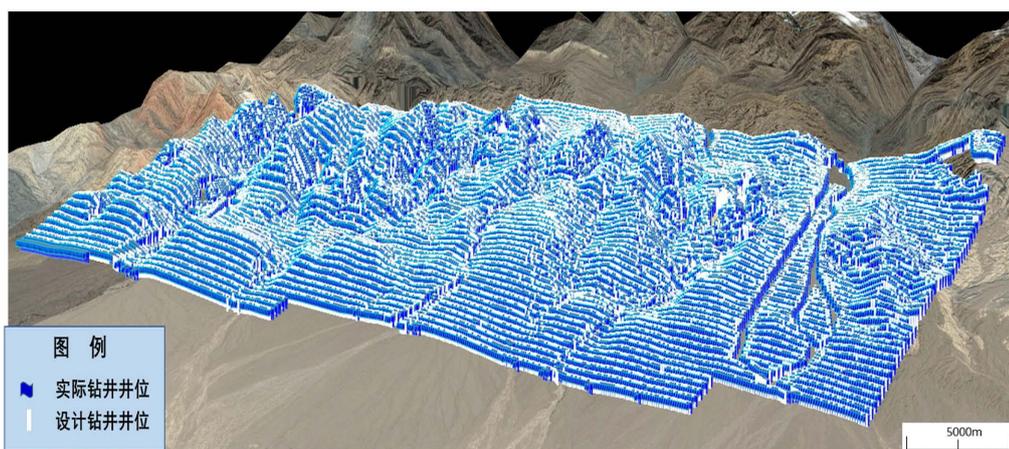


Figure 6. Distribution map of shooting points in high-difficulty mountainous areas
图 6. 高难山体区激发点分布图

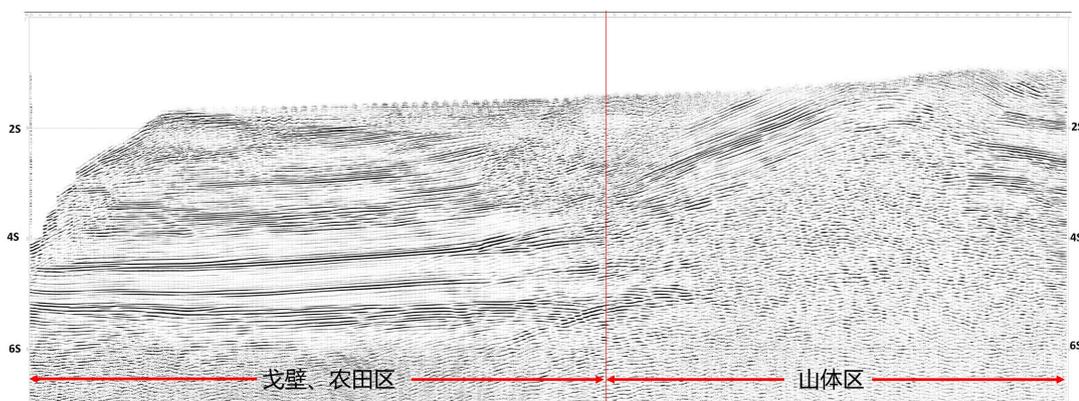


Figure 7. Field processing profile
图 7. 现场处理剖面图

该项目最终完钻符合率高达 92.18% (如图 6), 相较于以往同区域项目提升了 12%。与此同时, 从现场处理剖面图能够清晰看出, 构造顶部成像效果良好, 如图 7 所示。由此可见, 该激发点优选技术不但在极大程度上降低了高难山地区施工人员及设备的安全风险, 减少了成本投入, 而且还能够有力保障地震采集项目质量, 具备极大的推广应用价值。

4. 结论

本文以某高难山地施工设计激发点部署为例, 基于长期的山地地震勘探生产实践, 对高难山地进行了风险分级, 总结提出了针对高难山地的激发点优选技术。通过沿着相对低风险区进行激发点优选, 在满足覆盖次数设计要求的同时大幅降低了高难山体区施工作业风险等级。最大限度的解决了多年来西北无人区施工风险巨大, 激发点部署难, 实测点到位率低的问题。实现了保障企业员工生命健康安全和满足地质任务的双赢。广泛适用于高难山地地震采集施工, 具有极大的推广应用价值。

参考文献

- [1] 李劫. 浅谈如何做好基层的安全管理工作[J]. 电子世界, 2012(23): 138-139.
- [2] 梁强. 野外地震勘探安全生产管理探讨[J]. 现代商贸工业, 2011, 23(13): 253-254.
- [3] 沙仁祥, 刘志强, 王增, 等. 探讨地震外业勘探安全生产管理方法[J]. 时代金融, 2015(15): 183+186.
- [4] 郭有德. 地震勘探爆破安全生产技术条件论证[J]. 经济师, 2012(3): 291-293+295.
- [5] 卞兆津. 试论地震勘探的安全生产管理[J]. 安全与环境工程, 2006(1): 81-84.
- [6] 王秉义. 地震勘探项目安全生产管理措施[J]. 工程管理, 2020(13): 155-157.
- [7] 陈宇, 黄腾, 雷迎春. 地形风险识别与分级技术在山地地震采集施工中的应用[J]. 地球科学前沿, 2021(5): 132-135. <https://doi.org/10.12677/ag.2021.1112157>
- [8] 高艺伟, 白昊睿, 高举红. 基于 DEM 的陕南地区地形地貌研究[J]. 科技风, 2021, 11(12): 1628-1634.
- [9] 王家耀, 崔铁军, 苗国强. 数字高程模型及其数据结构[J]. 海洋测绘, 2004(3): 1-4.
- [10] 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57-62.
- [11] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. 测绘学报, 1991, 20(4): 311-319.
- [12] 郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 131-143.
- [13] 刘学军. 基于规则格网数字高程模型解译算法误差分析与评价[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [14] 陈楠, 王钦敏, 汤国安. 自 DEM 由不同算法提取坡度的对比分析[J]. 测绘工程, 2006, 1(2): 6-9.
- [15] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J]. 测绘学报, 2004(3): 258-262.
- [16] 周晓乐, 张清. 利用 DEM 数字高程模型计算坡度的差异性分析[J]. 水土保持研究, 2006, 4(6): 145-147.