

油气勘探检波器尾椎-大地扫频振动耦合性能研究

黄志强¹ 段宇星¹ 宋晓伟² 王杰¹ 付铭威¹ 李刚¹

(1. 西南石油大学 机电工程学院, 成都 610500)

(2. 中国石油集团 东方地球物理勘探有限公司, 涿州 072750)

摘要: 油气勘探检波器作为采集信号的关键设备,其与大地振动耦合性能影响着采集信号的质量,决定了勘探准确度。为提高检波器勘探能力,以检波器尾椎结构为研究对象,基于单自由度耦合振动理论,提出一种用于扫频信号下检波器尾椎与地表耦合的振动模型,提取并分析了扫频情况下检波器尾椎接收信号的加速度、速度、位移响应情况,建立了振动位移均值、振动加速度标准差的耦合度评价指标,掌握了检波器尾椎与大地的耦合度响应情况。通过检波器接收测试试验,检波器尾椎所接收的加速度信号与试验所接收的加速度信号最大误差小于15%,验证了模型及方法的正确性。最后基于响应面法对不同形状下检波器尾椎的长度、半径关键参数进行优化研究,结果表明,三棱锥形状下尾椎耦合度最好,优化后的大地-检波器尾椎位移耦合均值降低了7.94%,加速度标准差降低了6.42%,有效提高了检波器尾椎接收信号的能力。

关键词: 振动耦合性能; 检波器尾椎; 扫频振动耦合性能; 结构优化

中图分类号: TE132 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.03.013

0 引言

油气勘探检波器作为油气勘探中采集反射波信号的关键设备,其实质是将机械振动转换为电信号的一种传感器,表示回波信号传到大地的波场特征,但在石油地震勘探过程中,检波器尾椎难以按“平、稳、正、直、紧”^[1-4]的要求插入地表以保证较好的耦合效果,它与大地表面的振动耦合性能直接影响采集数据的质量,进而影响勘探的准确性。其中检波器尾椎结构与大地介质的耦合作用最为关键,改进其结构减少信号接收误差,扩展接收地震波的频带宽度,对实现高精度地震勘探具有重要意义。

针对检波器与周围介质的耦合问题,国内外学者在理论和实践方面开展大量研究工作。魏继东等^[2-5]指出检波器与大地耦合取决于两者的牢固程度、接触面积、检波器的质量等,并根据野外试验获得响应参数,通过计算获得解耦反褶积,可以消除耦合响应对地震数据的影响。孙超等^[6]从振动力学角度推导倾斜检波器与地表双自由度耦合振动系统,指出倾角的增加将衰减信号的幅频响应。于富文等^[7]采用单自由度有阻尼的自由振动系统来描述检波器-大地耦合响应,用参数扫描法对振动模型进行识别并还原介质振动,消除耦合响应。张凤蛟等^[8]从理论上分析了双自由度

耦合模型,揭示了检波器尾椎与地表之间的阻尼对地震信号的影响,尾椎与表土的固结程度影响耦合系统的阻尼,土壤固结程度越紧密则耦合系统阻尼越大。李培超等^[9]对加速度和速度型检波器建立相对应的机电耦合动力学模型,揭示了耦合共振频率与检波器质量和长度的关系。石战结等^[10]分别针对沙漠地区地表条件设计多种尾椎结构,优化了与介质的耦合性能。陈高翔等^[11-12]开展了检波器-大地耦合理论分析,研究以泊松比、横波速度、尾椎长度及半径为代表的介质与检波器条件对耦合响应的影响。董世学等^[13-14]在调查了地表物性的基础上,研制了检波器-地表的特殊耦合传递函数,即保证装置底面与表土保持水平接触。陈铸^[15]以边坡为研究对象,采用有限元的方法分析了水与地震力作用下边坡加速度响应和应变响应规律,结果指出,水骤降对边坡加速度峰值放大效应更明显。江学良等^[16]研究地震作用下边坡的加速度响应特性和动位移响应特性,探究三种激振方式下边坡对其的影响规律。张兴臣等^[17]从频谱特性的角度分析黄土边坡地震动峰值加速度下的动力失稳机制,提出将反应谱的凸显作为坡体破坏的依据。

国内外学者基于互易弹射理论、波动力学、振动力学等理论开展了检波器与大地的耦合研究,并通过试验探究了影响耦合性能的因素,结果表明,检波器

收稿日期: 2023-06-24 修回日期: 2023-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902326); 四川省科技计划项目(22GJHZ0284); 中国石油前瞻性基础性战略性技术攻关项目(2021DJ3601); 南充市-西南石油大学市校科技战略合作专项(SXHZ048)

作者简介: 黄志强,男,1968年生,四川眉山人,博士,教授; 主要研究方向为石油装备与地震勘探等; E-mail: huangzq@swpu.edu.cn。

引用格式: 黄志强,段宇星,宋晓伟,等. 油气勘探检波器尾椎-大地扫频振动耦合性能研究[J]. 机械强度,2025,47(3):104-112.

HUANG Zhiqiang, DUAN Yuxing, SONG Xiaowei, et al. Study on coupling performance of tail vertebra-earth sweep frequency vibration of oil and gas exploration geophone[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(3):104-112.

尾椎的形状取决于检波器和土壤的不同参数,增加尖峰半径和长度会降低共振频率^[18-22],但对扫频信号下检波器尾椎结构优化缺乏深入研究。因此,本文针对检波器在接收信号过程中出现的问题,采用有限元瞬态响应方法,基于单自由度振动系统,建立检波器与大地耦合振动模型,以振动位移均值和振动加速度标准差作为评价检波器-大地耦合度的指标,开展了扫频谐振载荷作用下不同形状下的检波器尾椎长度、半径与大地振动耦合性能的研究,掌握尾椎结构形状参数对检波器与大地耦合振动性能的影响规律,并开展尾椎形状参数以及结构尺寸优化设计,以进一步提升检波器与大地表面的振动耦合性能,保障油气勘探的质量,确保精确找油找气。

1 检波器-大地耦合系统建模

1.1 单自由度耦合振动系统

油气勘探检波器主要由壳体 and 尾椎组成,与大地进行耦合振动的主要是尾椎。基于单自由度有阻尼的自由振动系统理论^[11-14]研究检波器尾椎插入大地地表时,检波器尾椎与地表构成单自由度耦合振动系统,并由此分析影响耦合性能的因素。

单自由度耦合振动系统可以用质量-刚度-阻尼的模型进行描述,图 1 所示为检波器耦合振动系统模型,其基本运动方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

式中, M 、 C 、 K 分别为检波器整体质量(包括检波器外壳内部质量)、系统阻尼系数、系统刚度矩阵; u 为位移矢量, \dot{u} 为速度矢量, \ddot{u} 为加速度矢量; $F(t)$ 为外界施加力。

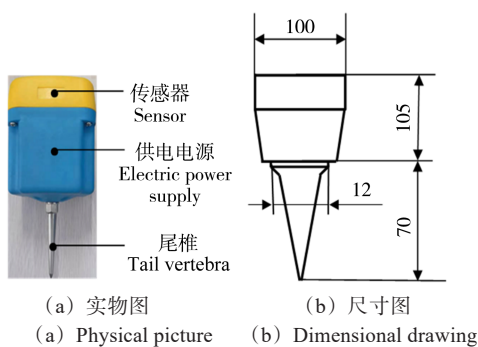


图 1 检波器实物与尺寸结构图

Fig. 1 Physical and dimensional structure diagram of the geophone

为简化方程,引入两个系数,即等效固有频率 $\omega_0^2 = k/m$ 和质量阻尼系数 $C/2m = \xi\omega_0$,对系统运动方程进行归一化处理,并引入模态坐标 x 做线性变换。所推导的模态运动方程为

$$\ddot{x} + \omega^2 x = -\mu [2\xi\dot{x} + x^3] \quad (2)$$

式中, μ 为摩擦因数; ω 为角频率; ξ 为阻尼比。检波器与大地耦合振动为“欠阻尼”振动,影响大地-尾椎系统参数的耦合质量 M 、耦合阻尼 C 、耦合刚度 K 的因素复

杂,既包括尾椎的结构参数,又包含土壤本身的力学参数和尾椎插入土壤的力学参数。

1.2 检波器-大地耦合振动模型建立

参考东方地球物理勘探有限责任公司研制的 eSeis 检波器外形结构参数,检波器由尾椎、电源、微机电系统(MEMS)、传感器等构成,其实物及结构尺寸如图 1 所示。检波器外壳宽度 $L_1=100$ mm;外壳高度 $H_1=105$ mm;尾椎长度 $L_2=70$ mm;尾椎直径 $D_1=12$ mm;锥度 $\theta=9.8^\circ$ 。

为降低计算量,并保证计算精度,简化检波器中的局部结构,如倒角、圆角、螺纹孔等。由 WEI 等^[23]通过有限元分析可知,可控震源平板捕获的大地大约为一个半径为 1.8 m 的半球,所建立的大地反射波回收有限元模型能够包括被激发的大地模型。为准确表征检波器所接收信号的川渝地区的硬质黏土地,因此建立尺寸为 2 m×2 m×2 m 的大地模型,检波器与大地耦合振动三维模型如图 2 所示。

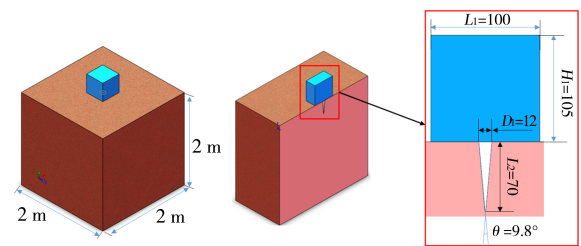


图 2 检波器-大地耦合振动三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of geophone-earth coupling vibration

1.3 检波器尾椎载荷分析

为准确合理地分析检波器尾椎的受力情况,采用试验的方法,如图 3 所示,将 eSeis 检波器插入硬质黏土中。检波器尾椎插入地面时,主要考虑尾椎与大地之间的紧密接触,两者之间的摩擦力、挤压力。通过试验测出检波器回收时所需拔出力,约为 70 N。



图 3 检波器回收试验

Fig. 3 Recovery test of the geophone

依据检波器尾椎与大地之间的摩擦系数、检波器回收时所需拔出力,开展检波器尾椎与大地的挤压力分析,如图 4 所示^[24],其中 μ 为摩擦因数,取值为 0.3^[25]。

因此,已知拔出力,可由公式计算出挤压力为 50 N。

$$2F_f \cos \theta + F_{N1} \sin \theta + F_{N2} \sin \theta + G = F \quad (3)$$

$$F_f = \mu F_{N1} \quad (4)$$

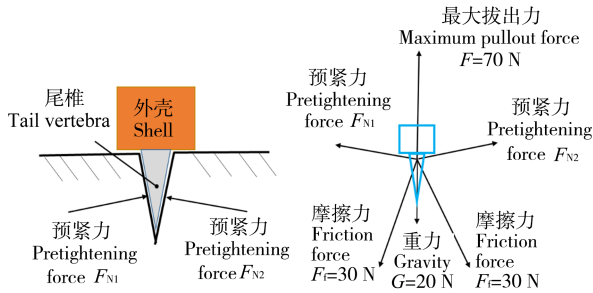


图4 检波器尾椎与大地挤压力分析

Fig. 4 Analysis of the extrusion force between the geophone's tail vertebra and earth

2 考虑扫频下检波器-大地耦合系统振动响应分析

2.1 网格无关性验证

为了验证网格无关性,以检波器尾椎接收信号的位移均值与加速度标准差作为参考值来验证网格无关性。设计6套网格数量对重要部分(尾椎与大地接触部分)和非重要部分(外壳)进行不同程度的加密处理。另外,检波器在工作时,大地的变形均处于弹性变形阶段,故将大地的材料设置为弹性材料,尾椎材料、检波器外壳分别参考实际选择结构钢、工程塑料,参照如表1所示的材料参数所设置的检波器整体质量小于2 kg,符合实际工程要求。网格无关性验证结果如图5所示。

表1 检波器-大地耦合模型材料参数设置

Tab. 1 Material parameter setting of geophone-ground coupling model

部件名称 Part name	材料名称 Name of the material	密度 Density/ (kg/m ³)	弹性模量 Modulus of elasticity/GPa	泊松比 Poisson ratio
尾椎 Tail vertebra	结构钢 Q235 Structural steel Q235	7 850	200	0.3
外壳 Shell	工程塑料 Engineering plastics	1 900	35	0.38
大地 Earth	硬土层 Hardpan	2 600	0.28	0.32

当网格数量在15万以上时,尾椎接收信号的位移均值和加速度标准差趋于稳定,保持在0.000 63 mm和201.354 mm/s²,无明显变化,故选网格数量为15万进行模拟计算。这样在保证计算精度的同时减少了计算时间,故可认为此时的数值仿真结果已经收敛,网格无关性验证完毕。

检波器外壳结构规整,采用六面体网格划分;对于大地模型采用渐变型网格,检波器尾椎模型采用四面体网格划分,大地最终网格质量为0.85,符合计算要求,如图6所示。

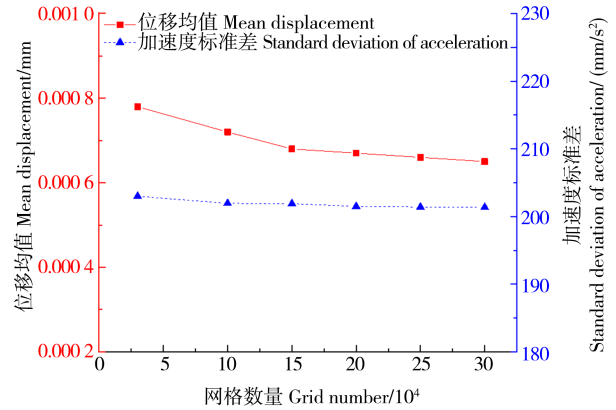


图5 网格无关性验证

Fig. 5 Independence verification of the grid

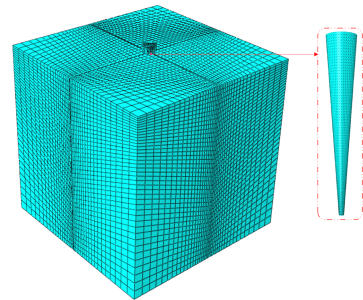


图6 检波器尾椎-大地耦合模型网格划分

Fig. 6 Grid division of the tail vertebra-earth coupling model

2.2 边界条件

大地接收反射波时,沿重力方向有微小的位移量,因此在大地底部施加远端位移约束,并模拟激振系统所反射于检波器时的正弦线性回收信号,线性扫描信号的瞬时速度振幅参考GOUJON等^{[26]91-95}在 seismic勘探时给出的检波器振动峰值速度8 mm/s,以此作为大地回波信号的幅值^[26]。

检波器在接受大地所反射波信号时,所接受的线性扫描信号是瞬时速度振幅与时间的线性单调函数,频率的变化率为常数。速度正弦线性扫描信号可表示为

$$Q(t) = A \sin \left[2\pi \left(f_s + \frac{f_e - f_s}{2T} t \right) t \right], \quad 0 \leq t \leq T \quad (5)$$

式中, A 为速度的幅值(扫描幅值); f_s 为扫描起始频率,也就是可控震源开始振动时的频率; f_e 为扫描终止频率; T 为扫描信号持续时间,又称为扫描长度; t 为记录时间; $f_e - f_s$ 表示频带宽度。最终获得检波器所接收的反射波速度信号函数为

$$y(t) = 8 \sin [2\pi(3 + 50t)t] \quad (6)$$

施加给大地的速度激振信号是频率为3~96 Hz的扫频信号,控制信号长度为0.5 s,峰值为8 mm/s。

2.3 检波器-大地耦合瞬态响应特性分析

检波器接收反射波信号过程是承受任意随时间变化载荷结构的动力学响应的过程之一,可以用瞬态动力学分析确定结构在稳态载荷、瞬态载荷、简谐载荷及其随机组合作用下,随时间变化的速度、位移、加

速度等。

对检波器尾椎初始模型进行检波器-大地耦合振动瞬态特性分析,分别提取检波器尾椎 A、B、C 三点的节点振动速度、振动加速度、振动位移数据与大地接触面上对应的 A₁、B₁、C₁ 特征点数据,如图 7 所示,取这三点数据曲线的平均值,对检波器-大地耦合性能进行评价分析,并对所获得时域数据进行傅里叶变换,分析频域下的位移、速度、加速度响应如图 8~图 10 所示。

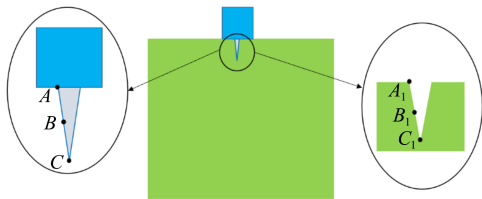


图 7 检波器-大地耦合模型特征点选取

Fig. 7 Feature point selection of geophone-earth coupling model

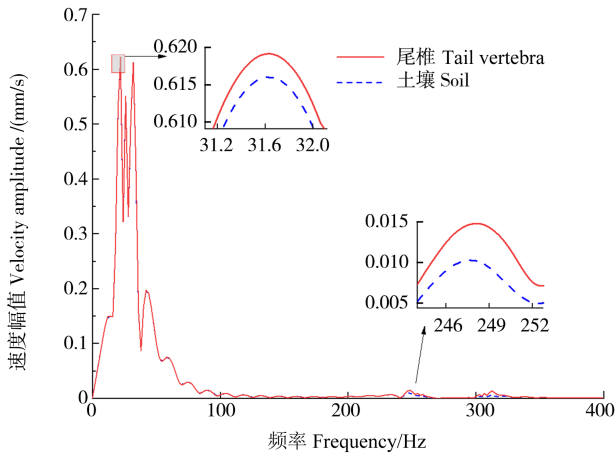


图 8 速度振幅对比

Fig. 8 Comparison of velocity amplitudes

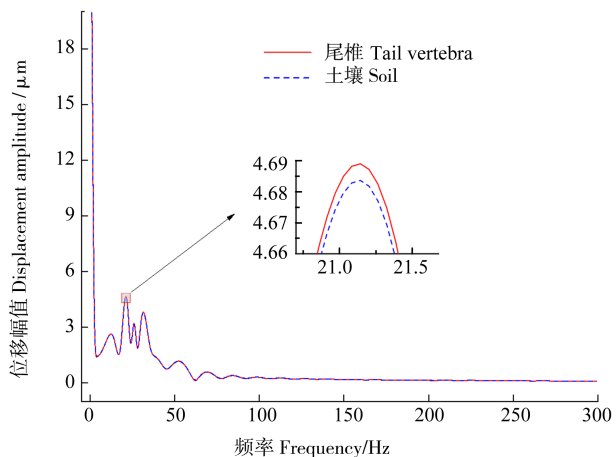


图 9 位移振幅对比

Fig. 9 Comparison of displacement amplitudes

由图 8 可以看出,在 31.68 Hz 时尾椎振动速度峰值为 0.618 3 mm/s,土壤速度峰值为 0.615 2 mm/s,两者峰值点对应的振幅差为 0.003 1 mm/s。定义土壤和尾椎接收值的值差为检波器-大地振动系统的速度耦合度:

$$\zeta = v_0 - v_i \quad (7)$$

式中, v_0 为土壤响应值; v_i 为尾椎接收值。

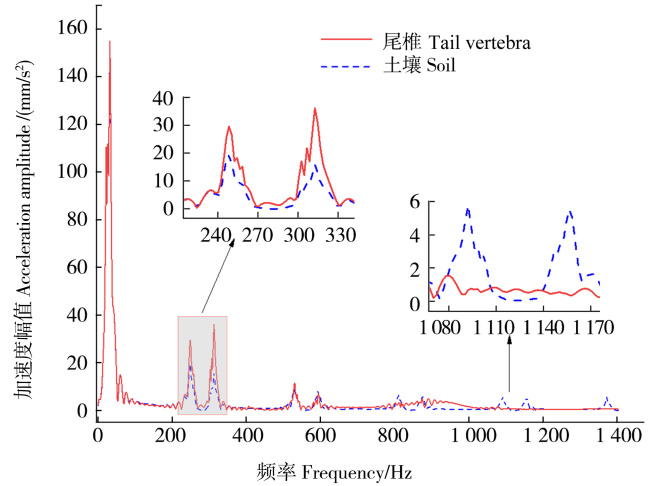


图 10 加速度振幅对比图

Fig. 10 Comparison of acceleration amplitudes

在频率为 3~96 Hz 的扫频信号作用下,土壤速度与尾椎接收速度的耦合度均值为 0.001 3 mm/s,速度耦合度的标准差为 0.074 7 mm/s。

由图 9 可以看出,21.13 Hz 时尾椎接收位移达到振动峰值 4.689 2 μm ,土壤位移的振动峰值为 4.682 3 μm ,两者振动峰值位移差为 0.006 9 μm ;输入位移与尾椎接收位移耦合度均值为 0.000 6 mm,来表征检波器尾椎所接收信号相对于土壤位移信号的整体数据平均脱耦量。

位移差均值计算式为

$$u = \sum_{i=1}^N (x_i - x_j) / N \quad (8)$$

式中, u 为位移耦合度均值; x_i 为检波器尾椎接收的位移; x_j 为土壤位移; N 为数据点的个数。

由图 10 可以看出,32.06 Hz 时尾椎接收加速度达到振动峰值 154.935 3 mm/s^2 ,土壤加速度峰值为 153.768 1 mm/s^2 ,两者振动峰值加速度差为 1.167 2 mm/s^2 。加速度表示物体所受力大小的变化量,对比尾椎接收加速度与土壤的振动加速度可表征大地变形对检波器尾椎所作用的力。土壤加速度和尾椎振动加速度耦合度标准差为 287.608 8 mm/s^2 ,加速度标准差越大,加速度波动就越大,则尾椎结构对接收信号影响越大。

加速度标准差计算式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a}_i)^2} \quad (9)$$

式中, σ 为加速度耦合度标准差; N 为数据点个数; a_i 、 \bar{a}_i 分别为各采样点处加速度耦合度值与其平均值。

上述研究了检波器-大地土壤耦合情况在垂直分量上的响应特性,将振动位移响应耦合度的平均值、振动加速度响应耦合度的标准差作为川渝地区耦合介质与检波器耦合信号的整体变动量和离散程度的评价指标,检波器尾椎初始模型位移耦合度均值为

0.000 6 mm, 加速度耦合度标准差为 287.608 8 mm/s², 为减小检波器与大地介质的耦合误差, 需要对检波器尾椎结构进行改进。

2.4 试验验证

为了验证仿真模型的准确性, 开展了检波器与大地耦合振动试验, 选用了平整且土质均匀的试验场地, 场地附近人烟稀少、建筑物少, 对试验结果影响小。采用了震源车模拟扫频信号进行激振, 将 eSeis 检波器插入土壤, 进行检波器响应测试, 读取检波器内传感器所接收的试验信号。试验所用的仪器主要包括一台可控震源车、一套振动控制系统、检波器和数据采集器等, 设计了 8 道检波器排列方式, 道距为 1 m, 每道有一个检波器, 检波器布置及炮点位置如图 11 所示。调整检波器与震源激发中心点距离与仿真中一致, 均为 1 m。



图 11 检波器布置及炮点位置示意图

Fig. 11 Diagram of geophone arrangement and shot point position

图 12 所示为仿真模型所获得的检波器接收信号与试验所接收到的检波器信号曲线对比。由图 12 可以看出, 试验曲线中检波器实测地震信号的加速度振幅在 26.4 Hz 处出现振动峰值 172.9 mm/s², 仿真模型在 32.1 Hz 处出现振动峰值 154.9 mm/s², 两组振动峰值数据相差 10.38%; 在后期趋于稳定之后, 两组数据在 3~96 Hz 扫频信号范围内仿真振幅趋势与试验所测趋势基本一致, 两者的最大误差在 15% 以内, 满足工程实际要求。这表明构建的耦合模型能较好地描述检波器在扫频信号激振下的响应运动, 仿真信号与试验信号在实际数据与仿真数据中的契合度较高, 说明该仿真模型准确性较高。

试验测试曲线中出现畸变的主要原因是周围环境噪声的影响和机电转换过程中滤波响应干扰, 造成信号的叠加, 此外试验所测得的信号包含了部分来自地下深部反射层的反射信息, 因此频率成分也相对丰富^{[3,4]11-417}。

3 基于响应面法的尾椎结构优化研究

为降低检波器接收信号的误差, 基于响应面法改进检波器尾椎结构, 提高其与大地振动耦合度。响应面法是指对实际数据的拟合方程, 该方程能建立设计

变量和目标变量的函数表达式, 来预测不同自变量对响应值的影响^[27]。结合工程实际, 基于扫频激发信号的影响, 建立了圆锥、三棱锥、四棱锥三种不同尾椎的有限元模型, 如图 13 所示, 探究不同形状下检波器尾椎结构参数对信号接收效果的影响规律。

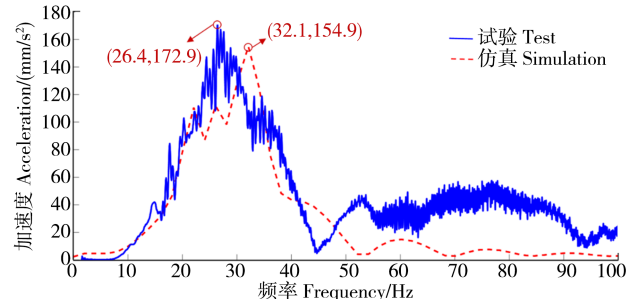


图 12 检波器加速度响应仿真与试验对比

Fig. 12 Comparison of acceleration response simulation and test of the geophone

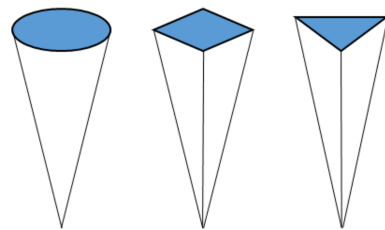


图 13 圆锥形、四棱锥形、三棱锥形尾椎

Fig. 13 Conical, quadrangular and triangular pyramid tail vertebrae

3.1 结构设计变量选定

由于接触面积影响着检波器尾椎-大地耦合性能, 而尾椎可控结构参数如半径、长度等的改变会间接影响着尾椎-大地的接触面积, 所以, 为探究尾椎半径、长度及形状对耦合性能的隐式关系, 基于响应面法, 开展检波器尾椎的结构参数对信号接收效率的影响规律研究。以振动位移的平均值 u 和振动加速度的标准差 σ 作为优化目标, 选取尾椎的长度、半径、形状作为设计变量。对于尾椎长度、半径的下限, 取值为初始尾椎的 10%; 上限参考文献和工程实际选取, 检波器尾椎长度为 200 mm^{[26]91-95}、尾椎半径为 16 mm^[28]。尾椎初始形状为圆锥, 用 1 表征; 为三棱锥, 用 2 表征; 为四棱锥, 用 3 表征。优化分析时具体参数及变量优化参数范围如表 2 所示。

3.2 优化仿真及结果分析

从表 3 的 13 组试验中获得各参数对优化目标的灵敏度, 分析可知, 评价指标与尾椎半径、尾椎长度正相关, 形状对其影响较小, 如图 14 所示。

图 15 分析了尾椎长度、半径以及形状对检波器-大地耦合度的影响规律。图 15(a) 表明位移耦合均值与尾椎长度基本呈现正相关的变化趋势, 而加速度耦合标准差随着尾椎长度的增加呈现先减后增的变化趋势, 在尾椎长度为 108 mm 时达到最小。图 15(b) 表明, 在尾椎半径为 5~12 mm 范围内, 位移耦合均值基

表 2 变量优化范围

Tab. 2 Variable optimization range

序号 Serial number	说明 Explanation	初始值 Initialization value/mm	优化参数范围 Optimize parameter range/mm
①	尾椎长度 Length of tail vertebra L_2	70	60~200
②	尾椎半径 Radius of tail vertebra r	6	5~16
③	尾椎形状 Shape of tail vertebra	2	1~3 1-圆锥 Cone、 2-三棱锥 Triangular pyramid、 3-四棱锥 Quadrangular pyramid

本无变化,之后随着半径增大而增大,加速度标准差与其关系基本类似;与尾椎长度基本呈现正相关的变化趋势,而加速度耦合标准差随着尾椎长度的增加呈现先减后增的变化趋势,在尾椎长度为 108 mm 时达到最小。图 15(c)表明,尾椎形状变化影响位移耦合度均值和加速度耦合度标准差,尾椎形状为三棱锥时

表 3 响应面优化试验设计与结果

Tab. 3 Response surface optimization test design and results

序号 Serial number	尾椎长度 Length of tail vertebra L_2 /mm	尾椎半径 Radius of tail vertebra r /mm	尾椎形状 Shape of tail vertebra	振动位移均值 Mean value of vibration displacement u /mm	振动加速度标准差 Standard deviation of vibration acceleration σ /(mm/s^2)
①	200	11	1	0.000 91	1 326.408
②	135	6	1	0.000 88	407.550 1
③	135	16	1	0.000 98	260.222 7
④	70	11	1	0.000 783	335.578 9
⑤	200	6	2	0.000 912	232.675 8
⑥	200	16	2	0.001 732	2 017.953
⑦	135	11	2	0.000 828	1 001.013
⑧	70	6	2	0.000 63	287.608 8
⑨	70	16	2	0.002 92	2 062.109
⑩	200	11	3	0.001 02	1 332.408
⑪	135	6	3	0.000 818	138.252 7
⑫	135	16	3	0.001 808	1 453.28
⑬	70	11	3	0.000 797	340.401 1

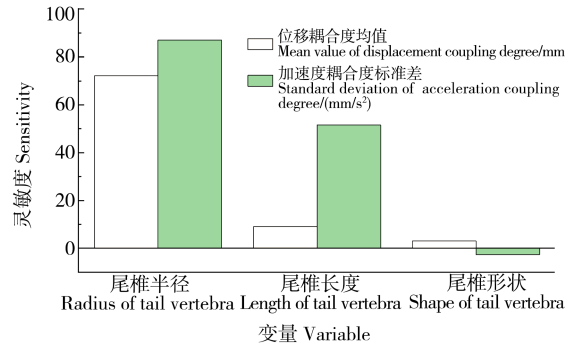
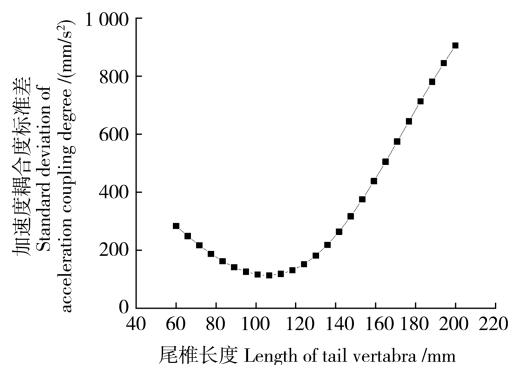
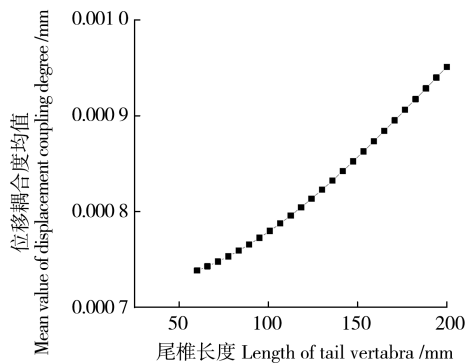


图 14 响应面灵敏度分析

Fig. 14 Sensitivity analysis of response surface

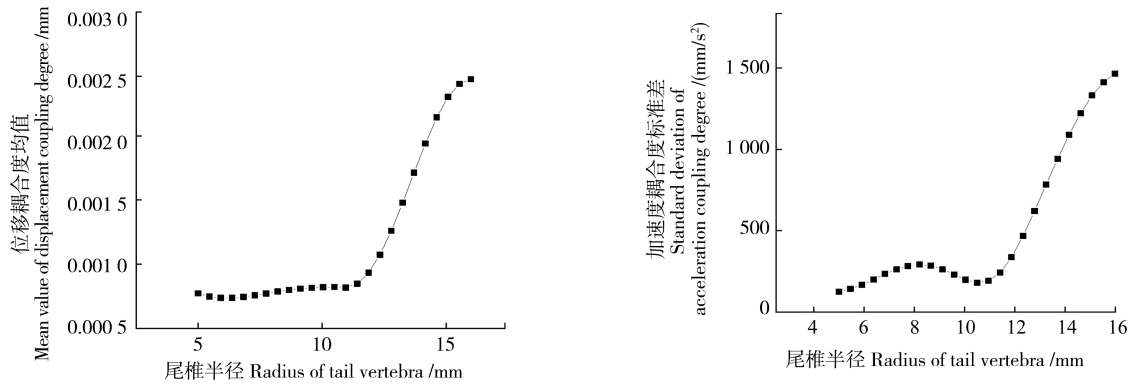
对耦合度评价指标影响最小。

尾椎结构参数与耦合度之间可能存在一定隐式关系,因此需要开展响应面优化研究,求出较为合适的结构参数。采用多目标遗传算法获得圆锥形、三棱锥形、四棱锥形检波器尾椎的最优响应点,尾椎振动速度耦合度均值、尾椎振动加速度耦合度标准差越小,信号质量越好。



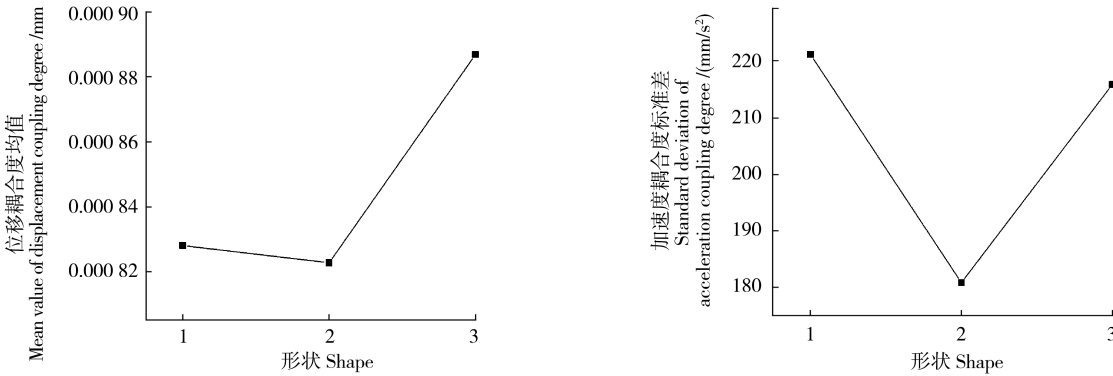
(a) 尾椎长度与加速度耦合度标准差、位移耦合度均值的关系

(a) Relation between the length of the tail vertebra, the standard deviation of the acceleration coupling degree and the mean value of the displacement coupling degree



(b) 尾椎半径与振动加速度标准差、振动位移的均值关系

(b) Mean relation between the radius of the tail vertebra, the standard deviation of the vibration acceleration and the vibration displacement



(c) 尾椎形状与振动加速度标准差、振动位移的均值关系

(c) Mean relation between the shape of the tail vertebra, the standard deviation of the vibration acceleration and the vibration displacement

图 15 尾椎结构参数与耦合度评价指标的关系

Fig. 15 Relation between the structural parameters of the tail vertebra and the evaluation index of the coupling degree

3.3 优化效果评价分析

设置优化目标和约束条件,将振动位移均值和振动加速度标准差两个评价指标设置为优化目标,评价指标值越小且大于0为约束条件,更新完成后,求解出

9个候选点,获得三棱锥形状下3个候选点,选出输出参数值为最小的优化点,对其进行模型重建并仿真,结果如表4所示。

表 4 三种形状的检波器尾椎优化前后结果对比

Tab. 4 Comparison of results before and after optimization of three shapes of geophone tail vertebraes

状态 State	尾椎形状 Shape of tail vertebra	尾椎半径 Radius of tail vertebra r /mm	尾椎长度 Length of tail vertebra L_2 /mm	位移耦合度均值 Mean value of displacement coupling degree /mm	加速度耦合度标准差 Standard deviation of acceleration coupling degree /mm/s ²
优化前 Before optimization	1	6	70	0.000 63	287.608 8
	1	5.003 2	152.32	0.000 75	248.684 7
优化后 After optimization	2	8.718	68.272	0.000 58	269.149 3
	3	8.288 3	75.25	0.000 80	257.831 3

由表4可知,与圆锥形、四棱锥形检波器尾椎对比,三棱锥形尾椎耦合效果最好,如图16所示,优化后的模型相比于优化前模型,即初始圆锥形尾椎、位移均值和加速度标准差均减少了7.94%和6.42%,进一步提高了检波器尾椎与大地的耦合性能,提高了信号接收的准确性。

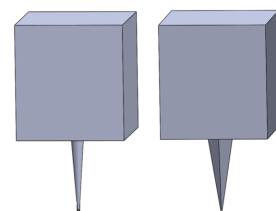


图 16 优化前后模型对比

Fig. 16 Comparison of models before and after optimization

4 结论

通过对检波器尾椎结构进行形状设计和尺寸优化,得到结论如下:

1) 基于单自由度耦合振动理论,建立了一种检波器尾椎与大地耦合振动模型,并通过现场测试,验证了模型准确性。

2) 开展扫频激振下检波器尾椎接收信号分析,构建了位移耦合度均值和加速度耦合度标准差的评价指标,并基于响应面法探究了检波器尾椎形状、长度、半径对其耦合振动的影响。

3) 开展三棱锥形、圆锥形、四棱锥形检波器尾椎长度和半径尺寸优化研究,优化后四棱锥形状态下耦合性能最差,三棱锥形状态下耦合性能最好,相较于初始圆锥形尾椎,位移均值减少了 7.94%,加速度标准差减少了 6.42%,检波器接收信号准确性得到提升。

参考文献 (References)

- [1] 崔宏良,王瑞贞,程展展,等. 检波器与大地的耦合效果对资料品质的影响分析[C]//SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议, 2020:1-4.
CUI Hongliang, WANG Ruizhen, CHENG Zhanzhan, et al. Analysis of the influence of the coupling effect of the geophone and the earth on the data quality [C]//SPG/SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference, 2020:1-4. (In Chinese)
- [2] 魏继东. 检波器-大地耦合系统特性的振动力学解释、模态参数识别及其对地震资料的影响与消除[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4):1983-1995.
WEI Jidong. The vibration mechanics explanation for ground-geophone coupling effect, mode identification and its impacting to seismic data and eliminating [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(4):1983-1995. (In Chinese)
- [3] 魏继东. 检波器-大地耦合响应的野外规模测量与衰减方法[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(3):411-417.
WEI Jidong. Large-scale measuring and correction of geophone-ground coupling effect in field [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(3):411-417. (In Chinese)
- [4] 魏继东,曹国滨,刘斌. 检波器性能参数现场测定方法[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(3):446-461.
WEI Jidong, CAO Guobin, LIU Bin. An approach of sensor parameters measuring in field [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(3):446-461. (In Chinese)
- [5] 宋威. 检波器大地耦合响应的野外规模测量与衰减方法[J]. 现代信息技术, 2018, 2(7):97-98.
SONG Wei. Geophone field scale measurement and attenuation method for geodetic coupling response [J]. Modern Information Technology, 2018, 2(7):97-98. (In Chinese)
- [6] 孙超,孙亮,何登科,等. 倾斜检波器与地表双自由度耦合效应[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4):206-211.
SUN Chao, SUN Liang, HE Dengke, et al. Study on the effect of dual-freedom coupling between the tilt geophones and the surface [J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4):206-211. (In Chinese)
- [7] 于富文,魏继东,冯玉苹,等. 检波器耦合响应定量分析方法及应
用[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(1):27-31.
YU Fuwen, WEI Jidong, FENG Yuping, et al. A quantitative analysis method for geophone coupling effects [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(1):27-31. (In Chinese)
- [8] 张凤蛟,韩立国,董世学. 检波器尾椎与地表耦合阻尼研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006(增刊2):96-100.
ZHANG Fengjiao, HAN Ligu, DONG Shixue. The research of the damping between geophone spike and ground [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006 (Suppl. 2): 96-100. (In Chinese)
- [9] 李培超,盛国泰,谢石林,等. 检波器地面耦合机理研究[J]. 物探装备, 2012, 22(4):218-221, 225.
LI Peichao, SHENG Guotai, XIE Shilin, et al. Research on geophone coupling mechanism [J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2012, 22(4):218-221, 225. (In Chinese)
- [10] 石战结,田钢,谷社峰,等. 检波器与灰岩地表耦合效应的理论和试验研究[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(4):529-534.
SHI Zhanjie, TIAN Gang, GU Shefeng, et al. Theoretical study and tests on geophone-limestone coupling effect [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2011, 46(4):529-534. (In Chinese)
- [11] 陈高翔,田钢. 基于弹性波动力学理论的大地-检波器耦合系统模型研究[C]//浙江省信号处理学会 2015 年年会——信号处理在大数据, 2015:1-8.
CHEN Gaoxiang, TIAN Gang. Research on the earth-detector coupling system model based on the theory of elastic wave dynamics [C]//2015 Annual Meeting of Zhejiang Signal Processing Society—Signal Processing in Big Data, 2015:1-8. (In Chinese)
- [12] 陈高翔. 基于弹性波动力学的检波器耦合系统研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016:1-5.
CHEN Gaoxiang. Research on geophone coupling system based on elastic wave dynamics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016:1-5. (In Chinese)
- [13] 董世学,韩立国,王建民,等. 检波器-地表耦合系统对地震记录的影响[J]. 地球物理学报, 2001, 44(增刊1):161-169.
DONG Shixue, HAN Ligu, WANG Jianmin, et al. Influence of coupling system of geophone-ground on seismic records [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44 (Suppl. 1): 161-169. (In Chinese)
- [14] 罗福龙. 地震检波器技术发展思考[J]. 石油管材与仪器, 2022, 8(1):1-6.
LUO Fulong. Thoughts on the development of geophone technology [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2022, 8(1):1-6. (In Chinese)
- [15] 陈铸. 地震及库水联合作用下岩质边坡动力响应特性振动台试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2018:1-15.
CHEN Zhu. Shaking table test on dynamic response characteristics of rock slope under combined action of earthquake and reservoir water [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018:1-15. (In Chinese)
- [16] 江学良,牛家永,连鹏远,等. 含小净距隧道岩石边坡地震动力特性的大型振动台试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(5):132-141.
JIANG Xueliang, NIU Jiayong, LIAN Pengyuan, et al. Large-scale shaking table test study on seismic response characteristics of rock slope with small spacing tunnel [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(5):132-141. (In Chinese)
- [17] 张兴臣,梁庆国,孙文,等. 地震作用下黄土边坡动力响应的时频特征分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(5):1090-1099.
ZHANG Xingchen, LIANG Qingguo, SUN Wen, et al. Time-

- frequency characteristics of dynamic response of loess slopes under earthquake action[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(5):1090-1099. (In Chinese)
- [18] CARCIONE J, ALMALKI H S, QADROUH A N. Geophone-ground coupling with flat bases[J]. *Geophysical Prospecting*, 2016, 64(2):255-267.
- [19] BRUNO A, SALVATORE B, ANGELA B, et al. A seismic sensor based on IPMC combined with ferrofluids[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 62(5):1292-1298.
- [20] QIN Y W, HOU X Y, QUAN Q Q, et al. An arc-shaped front nose for the mole in space exploration [C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). New York: IEEE, 2013:1-2.
- [21] WEN X, LIU J, LI J, et al. Design and numerical simulation of a clamshell-shaped inlet cover for air-breathing hypersonic vehicles [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*, 2019, 20(5): 347-357.
- [22] CHENG S H, CHEN S S, GE L. Method of estimating the effective zone induced by rapid impact compaction [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 18336.
- [23] WEI Z H, PHILLIPS T F. Characterizing the vibrator captured ground mass system using finite element analyses [C]//2013 SEG Technical Program Expanded, 2013:1-6.
- [24] 孟丽霞,王莽宽,刘士明,等. 贯入器头锥外形优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2022, 381(11):148-153.
- MENG Lixia, WANG Mangkuan, LIU Shiming, et al. The shape optimization of penetrator head cone [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2022, 381(11):148-153. (In Chinese)
- [25] 黄志强,欧倩茹,代茂林. 可控震源液压伺服阀滑阀流态扰动规律研究[J]. *机械科学与技术*, 2019, 38(10):1482-1489.
- HUANG Zhiqiang, OU Qianru, DAI Maolin. Study on flow disturbance law of soliding valve in vibroseis hydraulic servo valve [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2019, 38(10):1482-1489. (In Chinese)
- [26] GOUJON N, OURABAH A, SONG Z, et, al. Which sensor for nodal seismic: recording acceleration or velocity? [C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2021: 91-95.
- [27] 倪其军,阮文权. 基于响应面模型的清淤射流泵吸头参数优化设计[J]. *船舶力学*, 2022, 26(3): 365-374.
- NI Qijun, RUAN Wenquan. Optimization design of desilting jet pump parameters based on response surface model [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(3):365-374. (In Chinese)
- [28] 胡立新. 复杂地表区检波器耦合理论与试验研究[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2006:1-8.
- HU Lixin. Geophone coupling theory and experimental study in complex surface area [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2006:1-8. (In Chinese)

Study on coupling performance of tail vertebra-earth sweep frequency vibration of oil and gas exploration geophone

HUANG Zhiqiang¹ DUAN Yuxing¹ SONG Xiaowei² WANG Jie¹ FU Mingwei¹ LI Gang¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

(2. PetroChina Dongfang Geophysical Exploration Co., Ltd., Zhuozhou 072750, China)

Abstract: As the key equipment for collecting signals, the coupling performance of oil and gas exploration geophone and earth vibration affects the quality of collected signals and determines the exploration accuracy. In order to improve the exploration ability of the geophone, the structure of the tail vertebra of the geophone was taken as the research object. Based on the single-degree-of-freedom coupling vibration theory, a vibration model for the coupling of the tail vertebra of the geophone and the earth surface under the sweep frequency signal was proposed. The acceleration, velocity and displacement response of the received signal of the tail vertebra of the geophone under the sweep frequency were extracted and analyzed. The coupling degree evaluation index of the mean value of vibration displacement and the standard deviation of vibration acceleration was established, and the coupling degree response of the tail vertebra of the geophone and the earth was mastered. Through the geophone receiving test, the maximum error between the acceleration signal received by the geophone tail vertebra and the acceleration signal received by the test was less than 15%, which verified the correctness of the model and method. Finally, based on the response surface method, the key parameters of the length and radius of the tail vertebra under different shapes were optimized. The results show that the coupling degree of the tail vertebra under the triangular pyramid shape is the best. The coupling mean value of the displacement of the optimized ground-geophone tail vertebra is reduced by 7.94%, and the standard deviation of the acceleration is reduced by 6.42%, which effectively improve the ability of the geophone tail vertebra to receive signals.

Key words: Vibration coupling performance; Geophone tail vertebra; Coupling performance of swept-frequency vibration; Structural optimization

Corresponding author: HUANG Zhiqiang, E-mail: huangzq@swpu.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China(41902326); Sichuan Science and Technology Plan Project (22GJHZ0284); Petro China's Forward-Looking Basic Strategic Technology Research Project (2021DJ3601); Nanchong-Southwest Petroleum University Science and Technology Strategic Cooperation Project (SXHZ048)

Received: 2023-06-24 Revised: 2023-08-04