

T/CSOE

中国光学工程学会团体标准

T/CSOE 0002—2023

井中分布式光纤声波传感数据采集规程

Practice for data acquisition of borehole distributed optical fiber acoustic sensing

2024 - 08 - 09 发布

2024 - 08 - 14 实施

中国光学工程学会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 数据采集程序 2

 4.1 采集流程 2

 4.2 任务确定 2

 4.3 地质任务 2

 4.4 资料收集 3

 4.5 现场踏勘 3

 4.6 参数设计 3

 4.7 试验 5

 4.8 施工设计 5

 4.9 施工准备 6

 4.10 施工前试采集 8

 4.11 开工验收 8

 4.12 数据采集和采集验收 8

 4.13 资料归档 8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国光学工程学会提出并归口。

本文件起草单位：中油奥博（成都）科技有限公司、电子科技大学、中国石油天然气股份有限公司浙江油田分公司、江苏华能电缆股份有限公司、华中科技大学、山东省科学院激光研究所、中国科学院半导体研究所、南京大学、南方科技大学、应急管理部国家自然灾害防治研究院、中国船舶集团有限公司第七一五研究所、厦门彼格科技有限公司、安尔普传感技术（上海）有限公司、北京交通大学、国兴汇金（深圳）科技有限公司、中国科学院合肥物质科学研究院、烽火通信科技股份有限公司、长飞光纤光缆股份有限公司、山东星冉信息科技有限公司、青岛汇安谷科技发展有限公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司。

本文件主要起草人：余刚、安树杰、王松、饶云江、冉曾令、梁兴、罗瑀峰、杨恒勇、乔文玮、孙琪真、李豪、尚盈、王晨、徐团伟、邓棣珉、张旭苹、王峰、邵理阳、范凌云、刘爱春、宋翱、李东明、宛立君、李冬、郭亚池、吁乐锋、唐浩、马继辉、蔡云鹏、关帅、陈跃华、张志荣、汤玉泉、胡国华、祁庆庆、项勇、吕大娟、霍佃恒、霍佃星、周素芹、魏茂安、刘江波、任国富。

井中分布式光纤声波传感数据采集规程

1 范围

本文件确定了井中分布式光纤声波传感数据采集程序。程序规定了采集流程、任务确定、地质任务、资料收集、现场踏勘、参数设计、试验、施工设计、施工准备、施工前试采集、开工验收、数据采集和采集验收和资料归档等内容的要求。

本文件适用于井中采用分布式光纤声波传感的数据采集。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 33583 陆上石油地震勘探资料采集技术规程
NB/T 10250 页岩气水平井产出剖面测试作业及资料解释规范（连续油管工艺）
SY/T 5587.5 常规修井作业规程 第5部分：井下作业井筒准备
SY/T 6156 气枪震源使用技术规范
SY/T 6246 可控震源使用技术规范
SY/T 6276 石油天然气工业健康、安全与环境管理体系

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

分布式光纤声波传感地震仪 distributed acoustic sensing; DAS

利用振动引起的光纤中各空间位置瑞利散射光相位变化，通过相位解调，实现光纤作为介质地震波/声波探测的仪器。

3.2

分布式光纤声波传感数据采集 DAS data acquisition

用DAS仪器采集沿光缆延伸方向的地震波或声音信息。

3.3

垂直地震剖面法 vertical seismic profiling (VSP)

在近地表激发地震波，沿井筒不同深度接收地震波的勘探方法。

注：垂直地震剖面法又称VSP。

3.4

分布式光纤声波传感地震仪零井源距垂直地震剖面法 DAS Zero-offset VSP

震源激发点布置在距井口150m内，采用DAS接收的地震勘探方法。

注：分布式光纤声波传感地震仪零井源距垂直地震剖面法又称零井源距VSP。

3.5

分布式光纤声波传感地震仪直线变井源距垂直地震剖面法 DAS Walkaway VSP

沿过井的测线布置一系列激发点，逐点激发，采用DAS接收的地震勘探方法。

注：分布式光纤声波传感地震仪直线变井源距垂直地震剖面法又称 Walkaway VSP。

3.6

分布式光纤声波传感地震仪环形固定井源距垂直地震剖面法 DAS Walkaround VSP

震源激发点在不同方位逐次围绕观测井移动，每次保持激发点到井口的距离固定不变，井中采用DAS接收的地震勘探方法。

注：分布式光纤声波传感地震仪环形固定井源距垂直地震剖面法又称 Walkaround VSP。

3.7

三维垂直地震剖面法 3D VSP

震源激发点位于观测井周围一定范围内，并按一定规则布设，逐点激发，井中采用DAS接收的地震勘探方法。

4 数据采集程序

4.1 采集流程

井中分布式光纤声波传感数据采集流程见图1。并应符合下列要求：

- a) 试验测试、表层调查工序应根据项目以及收集资料情况确定。
- b) 试验测试、表层调查、测量放样工序设计可作为施工设计的一部分，可不单列。
- c) 试验总结、表层调查报告、测量总结可作为施工总结中的一部分，可不单列。
- d) 开工检查、收工验收工序应根据项目规模及合同要求确定。

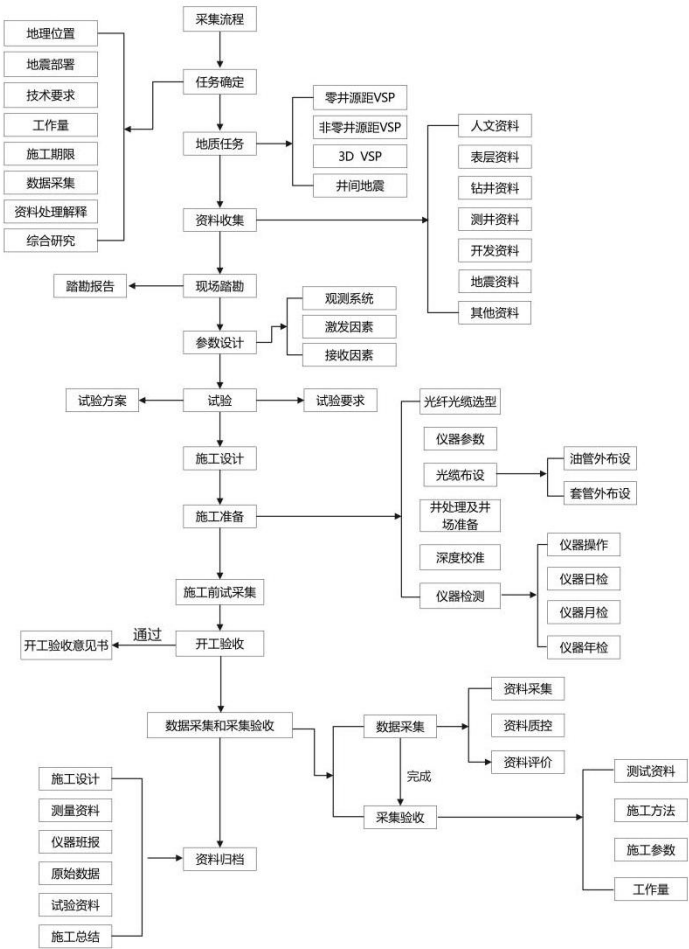


图 1 井中分布式光纤声波传感数据采集流程图

4.2 任务确定

任务应根据地质任务，明确地理位置、地震部署、技术要求、工作量、施工期限、数据采集、资料处理、解释和综合研究目的确定。

4.3 地质任务

4.3.1 零井源距 VSP

零井源距VSP的地质任务宜包括下列内容：

- a) 求取时深关系及速度资料，包括纵波平均速度、层速度；有零井源距横波 VSP 观测时，求取横波的平均速度、层速度以及纵横波速度比、泊松比等参数。
- b) 求取地层真振幅恢复 TAR(true amplitude recovery)因子、吸收衰减因子 (Q)、地震子波及反褶积因子。
- c) 标定地震反射层的地质层位，识别多次波。
- d) 对未钻遇的地层层速度和深度进行预测。

4.3.2 非零井源距 VSP

非零井源距VSP的地质任务宜包括下列内容：

- a) 研究井附近地层构造情况，确定井附近断层及小幅度构造。
- b) 利用纵波、转换横波资料综合解释井旁的地层岩性变化。
- c) 对目的层进行精细描述。
- d) Walkaway VSP 和 Walkaround VSP 资料提供各向异性参数。

4.3.3 3D VSP

3D VSP的地质任务宜包括下列内容：

- a) 4.3.2 规定的内容。
- b) 对上覆强波阻抗界面引起的成像盲区和复杂地质结构引起的强干扰区进行地震成像。
- c) 为研究岩性特征和井位评价提供信息。
- d) 利用纵波、转换横波资料研究地层的反射系数、波阻抗参数，研究地层的吸收衰减特征。
- e) 为地质模型的建立提供依据。

4.3.4 井间地震

井间地震地质任务宜包括下列内容：

- a) 两井之间储层连通性分析，小断层识别。
- b) 提供两井间高精度速度信息。
- c) 为开发方案优化提供资料依据。

4.4 资料收集

4.4.1 人文地理资料应包括地形图、气候资料、交通状况、文物景点、基础设施等。

4.4.2 表层地质资料应包括表层岩性结构、厚度变化、速度变化，潜水面深度等。

4.4.3 钻井资料宜包括完井报告、钻井地质综合柱状图、井身结构图、井轨迹图、钻井液参数、油气(组)显示井段、井底温度及压力参数、硫化氢等有害物质含量等。

4.4.4 测井资料宜包括声波测井、横波测井、密度测井、中子测井、伽马测井、声幅测井、全井眼地层微电阻率扫描成像测井等测井曲线及数据。

4.4.5 开发资料宜包括油气开采状况、射孔段分布、套管现状、附近井生产状况等。

4.4.6 地震资料宜包括工区内的二维或三维地震勘探采集、处理和解释资料。地震采集资料宜包括原始数据和施工总结报告，工区速度和静校正数据、基准面高程。地震处理和解释资料宜包括地面地震反射层构造图或时间构造图、地质成果报告，目的层的深度、产状、反射波的主频范围等。

4.4.7 其他资料宜包括相邻井的 VSP 或井间地震采集、处理、解释资料和健康、安全、环保资料等。

4.5 现场踏勘

编写设计前应对井场及其周围踏勘，明确落实技术方案和施工方案的影响因素，绘制踏勘简图，并形成踏勘报告。

4.6 参数设计

4.6.1 观测系统

4.6.1.1 零井源距 VSP 应符合下列要求：

- a) 直井零井源距 VSP 的井源距小于 150m。
- b) 观测井井斜大于 24° 时，激发点与井轨迹保持在一个垂直平面，激发点沿接收点移动，并保持激发点在接收点上方 150m 内。

4.6.1.2 非零井源距 VSP 井源距应根据模型论证目的层成像范围和覆盖次数等参数，地质任务要求及地表条件确定。并应符合下列要求：

- a) 对于位移井应将激发点布设在井轨迹的方向或井轨迹的反方向。
- b) 对于水平层状介质，井源距按照公式(1)进行计算。

$$X = \frac{2H-h}{H-h} \cdot l \dots\dots\dots (1)$$

式中：

X ——偏移距，单位为米（m）；
 H ——反射层深度，单位为米（m）；
 h ——观测点上界深度，单位为米（m）；
 l ——反射段长度，单位为米（m）。

- c) 对于单斜层状介质，井源距按照公式（2）和公式（3）进行计算。

$$X_{up} = \frac{-\{\cos c [h_1 + 2h_2 l + h_2^2 \sin(2c) + h_1 h_2 \sin(2c)]\}}{h \csc c + l \sin c - 2h_2 \cos^3 c} \dots\dots\dots (2)$$

$$X_{down} = \frac{h_1 l + 2h_2 l - h_2^2 \sin(2c) - 0.5[h_2^2 \sin(4c)] + h_1 l \cos(2c) + 2h_2 l \cos(2c) - h_1 h_2 \sin(2c) - 0.5[h_1 h_2 \sin(4c)]}{l \sin(2c) + h_2 \cos(2c)^2 + h_2 \cos(2c)} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

X_{up} ——上倾方向井源距，单位为米（m）；
 X_{down} ——下倾方向井源距，单位为米（m）；
 h_1 ——观测点上界深度，单位为米（m）；
 h_2 ——观测点下界深度，单位为米（m）；
 l ——反射段长度，单位为米（m）；
 c ——地层倾角，单位为度（°）。

- d) 对于地下复杂构造情况，井源距应根据模型正演结果确定。

4.6.1.3 Walkaround VSP 应符合下列要求：

- a) Walkaround VSP 井源距按照 4.6.1.2 确定。
- b) Walkaround VSP 激发点在一个或多个以井为中心的圆环上，激发点间隔宜小于 45°。

4.6.1.4 Walkaway VSP 提取井驱处理参数时，最大井源距应根据入射角、初至走时与井源距关系确定，并应符合下列要求：

- a) 按照公式（4）和（5）进行计算。

$$x_p \sum_{k=1}^n \frac{pv_k}{V_k \sqrt{1-p^2 v_k^2}} \Delta z_k \dots\dots\dots (4)$$

$$t_p \sum_{k=1}^n \frac{\Delta z_k}{V_k \sqrt{1-p^2 v_k^2}} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$x(p)$ ——井源距，单位为米（m）；
 $t(p)$ ——初始走时，单位为秒（s）；
 n ——层数；
 p ——射线参数；
 v_k ——各层的速度，单位为米每秒（m/s）；
 z_k ——各层的厚度，单位为米（m）。

- b) 以成像为目的时，最大井源距根据目的层入射角与反射系数关系确定，入射角用佐普利兹方程确定，通过模型射线追踪确定最大井源距。

4.6.1.5 3D VSP 应符合下列要求：

- a) 3D VSP 可提取井驱处理参数，也可进行成像研究，最大井源距按照 4.4.1.4 确定。
- b) 激发测线方位与构造方位垂直，测线数量根据地质任务确定。

- c) 激发点距根据模型正演结果和覆盖次数等参数确定, 覆盖次数根据研究的主要地质任务目标、资料品质、震源类型和经济效益等因素确定。
 - d) 面元由纵向和横向组成, 根据处理需求确定。
 - e) 炮点布设方式根据地质任务确定, 海上采用圆形或螺旋形布设, 陆上采用矩形布设。
- 4.6.1.6 井间地震应符合下列要求:
- a) 通过已有资料初步解释, 分析主要目的层段井间地震观测条件, 建立井间地震模型。
 - b) 通过理论模型数值模拟, 理论分析地震响应, 确定震点深度和间距。
 - c) 目的层地震射线分布均匀。
 - d) 穿过目的层的地震射线数或炮检对数大于网格化后的面元数或待求的空间速度点个数。

4.6.2 激发参数

VSP 激发参数应符合下列规则:

- a) 炸药震源激发参数符按照 GB/T 33583 中的规定确定。
- b) 可控震源激发参数按照 SY/T 6246 中的规定确定。
- c) 气枪震源激发参数按照 SY/T 6156 中的规定确定。

4.6.3 接收因素

4.6.3.1 接收因素宜包括观测井段、接收点距、采样间隔、记录长度、光纤长度、空间标距等。

4.6.3.2 DAS 数据采集应采用全井段观测。

4.6.3.3 接收点距应满足空间采样定理, 为防止空间假频出现, 接收点距按公式 (6) 进行计算, DAS 数据采集接收点距不宜大于 2m。

$$\Delta x \leq \frac{v_{min}}{2f_{max}} \quad (1)$$

式中:

Δx ——接收点距, 单位为米 (m);

v_{min} ——最小层速度, 单位为米每秒 (m/s);

f_{max} ——期望最高频率, 单位为赫兹 (Hz)。

4.6.3.4 DAS 数据采样间隔宜分为时间采样间隔和空间采样间隔。在完成地质任务条件下, 时间采样间隔宜选择 0.1 ms~1 ms; 空间采样间隔宜选择 0.1 m~2 m。

4.6.3.5 记录长度应满足最深目的层成像需求, 宜为最深层反射时间加 2s, 井地联合勘探时应与地面地震采集一致。

4.7 试验

4.7.1 试验方案

试验方案应符合下列规定:

- a) 试验方案在方法论证基础上编制。
- b) 试验点选取具备代表性。
- c) 试验内容采取全井段接收。
- d) Walkaway VSP, Walkaround VSP 和 3D VSP 试验点位置和数量根据工区复杂程度选定。
- e) 试验方案内容包括试验目的, 任务, 试验要求、工作量和分析方法等。

4.7.2 试验要求

试验应目的明确, 针对性强, 试验因素单一。因素试验应按生产情况确定。试验资料应进行数据处理和定量分析, 并编写试验总结。试验完成后, 应分析试验结果, 经审批后方可施工。

4.8 施工设计

施工设计应根据参数论证和试验结果编制, 施工设计编制应分析实施的合理性和可行性。施工设计应包括下列内容:

- a) 项目概况: 宜包括项目来源、项目部署依据、地质任务及观测项目。

- b) 工区概况：包括地理概况、地震地质情况、观测井井况。
- c) 技术难点及对策：通过收集到的资料及踏勘情况，分析项目采集中存在的难点，针对难点采取的技术措施。
- d) 采集参数论证：包括激发点位布设、观测井段、观测点距、激发因素、仪器因素等。
- e) 采集技术要求：包括执行的技术标准、质量标准等。
- f) 质量控制：质量管理措施、质量控制措施、质量保障措施等。
- g) 健康安全环境管理：健康安全环境管理按照 SY/T 6276 的规定编写。
- h) 保障措施：包括组织保障、人员保障、设备配备、生产组织管理和后勤保障等。
- i) 运行计划：项目运行时间计划。

4.9 施工准备

4.9.1 光纤光缆选型

光纤光缆应符合下列规定：

- a) 井中最高温度小于光缆最高工作温度的 70%。
- b) 井中最高压力小于光缆最高工作压力的 70%。
- c) 光缆中光纤的冗余长度不宜超过千分之五。
- d) 光缆具备与井壁耦合的能力。
- e) 光缆具备铠装保护能力。

4.9.2 仪器参数

DAS 仪器参数应符合下列规定：

- a) 噪声底不大于 $10 \text{ p ε} / \sqrt{\text{Hz}} @ 20\text{Hz} @ 10\text{km} @ \text{标距}=5\text{m}$ 。
- b) 最大观测长度不小于 10km。
- c) 动态范围不小于 110 dB@20 Hz。
- d) 频带宽度可支持 0.1 Hz~20kHz，频带宽度不小于 500Hz@10km。
- e) 最小空间采样间隔不大于 2m。
- f) 最小时间采样间隔不大于 1ms。
- g) 井中地震成像时，具备主动触发和连续记录功能，触发时间延时应小于 1 个采样间隔。
- h) 解调数据格式为 SGY, SEG-Y, HDF5, SAC 等。

4.9.3 光缆布设

4.9.3.1 光缆布设方式应符合下列要求：

- a) 套管内、连续油管、油管外光缆布设前，井筒准备符合 SY/T 5587.5 的规定。
- b) 套管内光缆布设后，试采集时，缆波影响初至范围小于全井段 1/50。
- c) 套管外光缆布设后，光缆损耗不大于 0.35dB/km。
- d) 穿光缆连续油管布设，应用于光纤生产动态监测，操作流程按照 NB/T 10250 的规定进行。

4.9.3.2 油管外布设应符合下列要求：

- a) 按设计要求更换监测专用井口，并安装防喷器。
- b) 井口穿越密封耐压等级不低于套管头耐压等级。
- c) 油管尾端安装完毕后，对光缆深度校准。
- d) 前 5 根油管下井时，调整滚筒处于无张力状态。
- e) 水平段油管下井速度控制不大于 10m/min。
- f) 光缆布设过程中每 50m 测量一次光纤通断和衰减情况。
- g) 安装完成后，将光缆截断，穿越专用井口。

4.9.3.3 套管外布设应符合下列要求：

- a) 按设计要求更换监测专用井口。
- b) 井口穿越密封耐压等级不低于套管头耐压等级。
- c) 套管尾端使用专用工具保护。
- d) 每五根套管对光缆进行一次通断与损耗测量，并记录套管节箍米标。

- e) 根据管柱结构中不同深度的受力分析, 调整工具分布。
- f) 安置过程中, 严禁套管钳旋转。
- g) 禁止对管柱猛提猛放和旋转下套管。
- h) 每根套管的节箍处安装专用保护工具。
- i) 有其它特殊管柱的, 对光缆进行保护。

4.9.4 井处理及井场准备

4.9.4.1 井处理过程应符合下列要求:

- a) 先进行洗井, 划眼, 冲砂等作业。
- b) 裸眼井的通井作业使用双扶通井不少于 2 次。
- c) 进行通井测试。
- d) 有射孔时, 应清蜡或清砂。

4.9.4.2 井场准备宜包括井场电源, 测试仪器、施工车辆及物质配件等。

4.9.4.3 井场应满足下列要求:

- a) 满足监测作业车辆和设备摆放要求。
- b) 预留安放仪器操作间的场地。
- c) 外接电源满足监测作业用电要求。

4.9.4.4 地面仪器应符合下列要求:

- a) 供电、监测、存储系统自检正常。
- b) 用电设备无漏电现象, 系统连接线路整齐、规范, 接地装置完好。
- c) 仪器配件、光缆熔接工具应配备齐全。

4.9.5 深度校准

深度校准时, 应利用不小于200Hz的高频震源敲击井口, 通过能量统计方式对井口位置标零, 并记录数据, 通过光时域反射仪 (OTDR)、缆车深度计数器和光纤冗余长度对光缆尾端深度标定。

4.9.6 仪器检测

4.9.6.1 仪器使用应符合下列要求:

- a) 仪器不使用时传感光纤接口等光接口盖上防尘帽。
- b) 仪器使用时, 先将光纤接头清洁再将光缆或光纤接入系统, 光纤接头类型为 FC/APC、E2000 等, 最后开启仪器, 禁止带光操作。
- c) 光纤接头连接时, 保证接头处的凹槽对准, 避免未对准带来的损耗或反射光对器件的损坏。
- d) 仪器开启时, 严禁直视传感光纤接口。
- e) 射频接口等电接口旋紧保证信号无误传输。
- f) 仪器初始化开始时, 显示光强的窗口出现白线表示采集仪器准备就绪。
- g) 采集开始前进行检查, 在光缆没有接收振动信号状态下, 井底光缆噪声不大于 $10 \text{ p}\epsilon / \sqrt{\text{Hz@20Hz@10km@标距=5m}}$ 。
- h) 连接触发箱体前, 根据箱体输出的电压变化值, 设置仪器触发电压; 当箱体输出触发电压超过仪器的额定触发电压时, 进行衰减, 避免损伤仪器。
- i) 采集时, 仪器与触发箱体间距离大于 1.5m。
- j) 仪器远离机械干扰设备, 或做好仪器的减震, 减少外界直流干扰。
- k) 生产过程中遭遇雷雨天气, 关闭仪器电源。

4.9.6.2 仪器日检应包括下列内容:

- a) 检查仪器的传感光纤接口处是否接好光纤或光缆。
- b) 检查仪器设备运行是否正常, 状态指示灯正常工作; 软件正常启动, 功能准确; 灰度图显示正常, 无异常杂乱信号。
- c) 利用激发源测试仪器触发性能。
- d) 检测系统工作正常, 噪声底不大于 $10 \text{ p}\epsilon / \sqrt{\text{Hz@20Hz@10km@标距=5m}}$ 。
- e) 仪器接受 GNSS 授时信号误差小于 1 个采样间隔。
- f) 主动触发和被动触发分别模拟采集, 解调结果正常。

g) 采集机软件设置仪器参数正常。

4.9.6.3 仪器月检按照 4.9.2 中的仪器指标进行检测，并做出书面记录。

4.9.6.4 仪器年检应包括下列内容：

- a) 按本文件 4.9.2 中的仪器指标进行检测，并做出书面记录。
- b) 由专业检测机构出具检测合格证书。

4.10 施工前试采集

施工前试采集宜包括下列内容：

- a) 根据施工设计要求，对激发因素和仪器因素试验，了解光缆耦合效果，了解观测井段的能量衰减规律，确定施工方法。
- b) 初至波清晰，续至波能量较强。
- c) 有效波能量、频带宽度达到设计要求。
- d) 数据的转储与备份功能。

4.11 开工验收

完成上述准备工作后，可申请开工验收，开工验收通过后方可进行数据采集。

4.12 数据采集和采集验收

4.12.1 数据采集

数据采集应符合下列要求：

- a) 周围无干扰源。
- b) 采用井口敲击对零验证光缆计数器深度。
- c) 施工前，检查整段光缆无异常噪声、单点噪声幅值，班报中备注异常段，异常原因。
- d) 对影响资料采集、处理和综合研究的情况在班报中备注。
- e) 在施工现场对采集资料进行质控和品质评价。
- f) 主动触发时，连接触发箱体进行测试，触发无误后，才能正式施工；被动触发时，测量触发箱体电压，按最大电压填写触发电压，触发箱体电压大于 3V 时，禁止直接连接仪器。
- g) 当连续采集时，进行仪器或爆炸机或可控震源等激发源 GNSS 时间同步测试。
- h) 采集过程中，每 2h 检查 GNSS 信号。
- i) 将采集的数据及时备份。
- j) 采集数据格式为 SGY, SEG-Y, HDF5, SAC 等。

4.12.2 采集验收

采集验收应满足下列要求：

- a) 设备测试资料齐全、符合规定。
- b) 测量资料完整齐全。
- c) 试验工作符合设计要求。
- d) 仪器班报完整。
- e) 施工方法、施工因素和采集工作量符合设计要求。

4.13 资料归档

采集资料归档应包括下列内容：

- a) 施工设计。
- b) 测量资料。
- c) 仪器班报。
- d) 原始数据。
- e) 试验资料。
- f) 施工总结报告。