

团 体 标 准

T/CGS ×××-2023

微 动 探 测 技 术 规 范

Technical Specifications for Microtremor Survey Method

2023-××-××发布

2023-××-×× 实施

中国地球物理学会 发布

目 次

前 言	1
1 范围	2
2 规范性引用文件	2
3 术语、缩略语和定义	2
4 总则	4
5 施工方案设计	4
6 仪器设备	5
7 野外工作	6
8 数据处理	8
9 成果资料解释	10
10 成果报告编写	11
11 成果报告评审验收	11
12 资料归档	11
附录 A（资料性附录）微动探测台阵示例	12
附录 B（规范性附录）微动探测方案设计提纲	14
附录 C（规范性附录）微动探测数据采集野外记录班报模板	15
附录 D（规范性附录）微动探测原始记录质量评级表	17
附录 E（规范性附录）野外工作总结报告提纲	18
附录 F（规范性附录）微动探测单点反演成果图册模版	19
附录 G（规范性附录）二维微动剖面及地质解释成果图模版	20
附录 H（规范性附录）微动探测成果报告提纲	22
条文说明	24
参考文献	29

前 言

本标准按照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》给出的规则起草。

本标准由中国地球物理学会提出并归口。

本标准起草单位：中国科学院地质与地球物理研究所、北京中科吉奥能源环境科技有限公司、山西省煤炭地质物探测绘院有限公司、山东省煤田地质规划勘察研究院、广州地铁设计研究院股份有限公司、中国铁路设计集团有限公司、中铁二院工程集团有限责任公司、中铁第四勘察设计院集团有限公司、福建工程学院、中国石油大学（华东）、西安西北有色物化探总队有限公司、福建省交通规划设计院有限公司、中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司、上海勘察设计研究院（集团）有限公司、黄河勘测规划设计研究院有限公司、核工业航测遥感中心、湖南奥成科技有限公司。

本准备主要起草人：徐佩芬、凌甦群、李传金、杜亚楠、游志伟、张胤彬、田忠斌、王怀洪、姚金、张华、李世豪、李志华、李坚、刘铁、孙成禹、马玉龙、朱裕振、郭文波、徐成光、林文太、田连义、肖长安、胡绕、崔庆国、徐正宣、刘铁华、陆礼训、陈靖、王志宏、姜文龙、王文浩。

本标准主要审查人：

微动探测技术规范

1 范围

1.1 本规范规定微动探测相关的工程设计、仪器设备、数据采集、数据处理、成果解释、质量控制和评价、成果报告编制和提交成果资料等全过程技术要求。

1.2 本规范适用于城市地质调查、工程地质勘察、水文及环境地质调查、煤田（采区）及其它资源勘察和地热资源勘查等领域的微动探测技术工作，其它领域的微动探测工作也可参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本规范的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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。

CJJ/T7-2107 城市工程地球物理探测标准

TB10013—2010 铁路工程物理勘探规范

DZ/T0170—2020 浅层地震勘查技术规范

DZ/T0153—2014 物化探工程测量规范

JTG/T 3222-2020 公路工程物探规程

3 术语、缩略语和定义

3.1 微动 microtremor

微动是一种任何时间和地点都可以观测到的地面微弱振动，振动幅度一般只有 10^{-4} ~ 10^{-2} mm，其震源具有随机性，也称为环境噪声（Ambient noise）。微动主要由潮汐、气压、刮风下雨等天然因素和人类生产、生活等人为因素引起，包含体波（P、S波）、面波（瑞雷波、拉夫波）等多种振动，但面波（瑞雷波）能量占优，达到总能量的70%以上。

3.2 微动探测 microtremor survey

基于台阵技术采集微动数据，通过特殊的数据处理方法从台阵微动数据中提取瑞雷波相速度频散曲线，经反演计算获得台阵下方介质的S波速度结构，或通过速度变换和成像获得微动（视S波速度）剖面，进而推断地质结构、构造达到探测目的地球物理探测方法。

3.3 面波频散 surface-wave dispersion

面波在地层（不均匀）介质中传播时，其传播速度（相速度）随频率变化的物理现象。

3.4 频散曲线 dispersion curve

面波的频率 f （或波长 λ 、周期 T ）与波速（相速度 V_r ）之间的关系曲线（ $V_r \sim f$ ），用于描述面波的频散现象。

3.5 基阶瑞雷波 fundamental mode Rayleigh wave

频散现象是同一频率 f 的瑞雷波具有多个传播速度 V_r ，瑞雷波具有不同传播速度的状态称之为瑞雷波的不同模态。相速度最小的瑞雷波模态称为基阶（模态）瑞雷波。

3.6 高阶瑞雷波 higher modes Rayleigh wave

基阶模态以上的瑞雷波依次称为一阶、二阶等，统称为高阶（模态）瑞雷波。

3.7 观测台阵 observation array

微动探测是通过多个观测台站（拾震器+记录仪或采集站）组成观测台阵采集微动数据。根据探测目的并结合野外地表条件，按照圆形、十字形等排列形式构成观测台阵。

3.8 观测半径 observation radius

圆形观测台阵的半径。

3.9 空间自相关法（SPAC 法） spatial autocorrelation method（SPAC）

一种从圆形观测台阵采集的微动数据中提取频散曲线的数据处理方法。

3.10 扩展空间自相关法（ESPAC 法） extended spatial autocorrelation method（ESPAC）

空间自相关法的一种扩展方法，既适用于圆形也适用于非圆形等不规则台阵的微动数据处理。

3.11 空间自相关函数 spatial autocorrelation function

对于台阵中两个台站记录的微动数据，由 8.1.4 中的公式（1）计算空间自相关函数。

3.12 空间自相关系数 ρ spatial autocorrelation coefficient ρ

对于不同方向的空间自相关函数，由 8.1.4 中的公式（2）进行方位平均计算空间自相关系数。

3.13 频率-波数法（F-K 法） frequency-wavenumber spectral method（F-K）

通过傅里叶变换把时间域的微动信号转换到频率-波数域，拾取频率-波数谱的最大值从而获得面波频散曲线的方法。

3.14 视 S 波速度 V_x apparent S wave velocity V_x

一种由面波相速度 V_r 换算的地下介质横波速度表示方式（计算公式见 8.2.1），视 S 波速度 V_x 不是地下介质的真实横波速度，但可以反映地下介质的横波速度相对大小。

3.15 微动测深法 microtremor sounding method

从单个台阵的观测数据提取瑞雷波频散曲线，通过对频散曲线反演，获得台阵中心点下方的横波速度结构。

3.16 二维微动剖面法（视 S 波速度剖面） 2D microtremor profile method

通过单个台阵获得勘探点的频散曲线后，采用速度变换方法（见 8.2.1）将相速度 V_r 转换成视 S 波速度 V_x ，再通过测线上多个勘探点的视 S 波速度曲线的内插和光滑计算，得到的二维视 S 波速度剖面。

3.17 微动谱比法（H/V 法） microtremor spectral ratio method（H/V）

指单点微动记录的水平分量和垂直分量的傅里叶谱比值 ($H/V = H(f)/V(f)$)。利用谱比曲线峰值频率 f_0 与土石分界面深度 h 之间存在幂指数函数关系 ($h = af_0^b$)，估算土石分界面深度。

4 总则

4.1 探测目的

微动探测可用于地表到地下数千米深度范围内的地层结构和构造探测，在不同工程中具有不同的探测目的：

(1) 在城市地质、水文及环境地质调查中（探测深度数百米以内），微动探测可用于探测基岩面、软土层、滑坡体结构、含水层、活动断裂带、岩溶、人防工程等；

(2) 在铁路、公路、地铁等工程建设地质勘察中（探测深度数百米以内），微动探测用于查明土岩界面和风化层，以及土洞、岩溶、孤石、断层破碎带等不良地质体；

(3) 在地热资源调查中，微动探测用于查明热储盆地结构、地热储层、断裂构造带（地热通道）等；

(4) 在煤田（采区）探测中，微动探测用于查明覆盖层厚度，陷落柱、采空区范围等；

(5) 在水利水电工程地质勘察中，微动探测可用于查明冲积层厚度、堆积体和滑坡体结构、断层破碎带、岩性分界面、堆石坝体碾压压实度等。

4.2 适用条件和环境

(1) 探测对象（地质目标体、不良地质体）与围岩（或充填物）有明显的速度差异，探测对象的规模与埋深比要足够大；

(2) 测区地形、地貌、地物、道路等野外施工场地条件满足微动台阵布设要求；

(3) 不宜在水域、陡峭山地等地区开展微动探测工作。

5 技术设计

5.1 资料收集与现场踏勘

5.1.1 施工方案设计前，应系统收集测区相关地质、钻探及物探等已知资料，分析测区探测程度和存在问题。

5.1.2 收集测区地层岩性、纵波速度、横波速度、密度等资料，分析测区地层和探测对象的地球物理特征，掌握探测对象与围岩的物性差异，了解开展微动探测的地球物理基础及技术难点。

5.1.3 现场踏勘，查看测区地形地貌、植被、交通、居民点等工况条件，了解野外数据采集作业的施工环境及条件。对于工况复杂、交通流量大（或交通要道）的城镇测区，宜选择夜间施工。

5.2 采集方法试验

5.2.1 选择测区典型地段，开展采集方法试验，确定台阵形式和采集参数。

5.2.2 台阵形式试验

(1) 根据探测任务及精度要求、测区地形地貌条件和噪声特征等综合情况，有针对性地选择圆形、L形、十字形、直线形等台阵形式。

(2) 台阵的观测半径宜根据探测深度估算确定，也可据实测频散曲线的反演计算结果判断确定。

(3) 宜采用多个不同半径的台阵组合观测，以满足不同勘探深度和勘探精度要求。

5.2.3 采集参数试验

(1) 通过试验确定放大倍数和采样率等参数。

(2) 根据记录仪器的增幅情况确定合适的放大倍数，确保微动波形记录完整，振幅适中。

(3) 采样率一般不低于 100Hz。

5.3 观测系统设计

5.3.1 微动探测法分成微动测深法和微动剖面法两种观测系统。根据探测目的和精度要求，设计相应的观测系统。

5.3.2 微动测深法，即单点微动探测，应以勘探点为中心设计观测台阵，台阵形式和观测半径的确定可以参考 5.2.2。

5.3.3 微动剖面法应根据探测任务要求设计测线、勘探点间距。勘探点间距应根据横向分辨率（探测目标体的水平尺度）确定，一般应小于探测目标体宽度之半。以勘探点作为台阵的中心点，台阵形式和观测半径的确定可以参考 5.2.2。

5.3.4 在测区平面图上确定勘探点及台阵观测点的位置。当遇到建筑物、水塘（河流）等障碍物时，可调整观测点位置。原则上，圆形台阵上的观测点可沿圆周整体转动，观测点位置的调整幅度应小于观测半径的 1/20。

5.4 微动探测方案设计

5.4.1 在现场踏勘和采集方法试验基础上，编制《微动探测方案设计》。设计书提纲见附录 B。

5.4.2 设计书编写应以本规范及相关技术规范为依据，结合需要解决的具体地质问题，分析已有资料情况，论证项目实施的可行性，分析存在的风险。设计书应明确项目的探测目的，有针对性地提出项目实施的技术方案、路线及参数，预期探测成果，项目的组织保障措施，经费预算及施工进度等。

6 仪器设备

6.1 基本要求

6.1.1 应选用微动探测专用仪器，不宜采用锤击、电火花或爆炸等人工源作为激发震源的工程地震仪。

6.1.2 仪器符合一致性要求（见 6.2）。

6.1.3 拾震器宜采用速度型传感器，电压输出灵敏度 $\geq 2\text{V} \cdot \text{cm/s}$ ，固有频率应满足勘探深度要求，自重 3~5kg。

6.1.4 模/数转换不宜低于 24 位，采样时间间隔 $\leq 10\text{ms}$ ，动态范围不宜小于 128dB。

6.1.5 仪器折合到输入端的噪声水平应低于 $1\mu\text{V}$ 。

6.1.6 各台站（记录仪）间的时间同步误差小于 0.5 个采样间隔。

6.1.7 记录仪连续工作时长不宜低于 24 小时。

6.1.8 仪器设备的防水等级在 IPX4 以上，避免观测期间突然下雨导致仪器出现故障。

6.2 仪器一致性测试

6.2.1 野外实测施工前，同一台阵的观测仪器需进行一致性测试。只有一致性测试结果达标才能正式开始施工。

6.2.2 将全部仪器放在同一场地，同步采集 10~20min 的微动数据。计算微动数据的功率谱、功率谱之比、相干系数和相位差。在有效的工作频率范围内，要求仪器的一致性优于 95%。

6.2.3 日常施工过程中，每天对实测微动数据进行波形回放，检查仪器是否具有较好的一致性。如出现波形异常，需重新进行仪器一致性测试。

7 野外工作

7.1 测量放点

7.1.1 勘探点及台阵各观测点宜采用高精度定位仪测量放点，并符合 DZ/T 0153 的要求。

7.1.2 对于小半径的观测台阵，除勘探点外，台阵各测点可采用钢尺或测绳测量放点。

7.1.3 根据设计的采集台阵和观测系统进行测网布设。当遇到水域、高架桥、陡崖等特殊地形地貌的场地时，可适当调整台阵形式，重新布置观测点，避开障碍，并记录实际点位坐标。

7.2 数据采集

7.2.1 野外数据采集按《项目施工方案设计书》执行。调整施工方法需经甲方技术人员同意。

7.2.2 仪器放置到勘探点/观测点位，拾震器调平放稳，应与地面保持最佳的耦合状态。

7.2.3 台阵中各台仪器应都设置好、进入正常工作状态后，才能开始采集数据，每个勘探点采集时长 15~30min。微动采集时长与观测台阵形式、勘探深度和噪音环境有关。

7.2.4 详细记录仪器采集参数设置和野外现场工作环境，野外记录班报参考附录 C。要求字迹清楚，不应出现涂改。

7.2.5 仪器进入正常工作状态后，保持周围环境相对安静，尽量避免人为振动干扰。

7.2.6 收工后应及时读取当天采集微动数据，检查确认采集数据是否有效，并存盘备份。

7.3 野外工作质量检查与评价

为保证野外数据采集质量，采取任务分解、责任落实到专人的质保措施，施工过程中宜建立“自检、互检及抽检”的三级质量监管、保障体系。

7.3.1 每天野外数据采集工作完成后，现场技术人员对当天施工质量、实测数据进行“自检”。

(1) 回放微动波形记录，检查实测数据质量。若发现异常波形，达不到质量要求，应重新补测。

(2) 对微动数据进行初步处理，检查中间结果（如 SPAC 系数）是否符合要求。若不符合要求，应重新补测。

7.3.2 现场项目组成员对当天野外工作质量的“互检”。

(1) 确认初步检查结果正确与否。

(2) 对每个勘探点的原始记录质量进行评级（附录 D）。

(3) 按技术要求每天填写野外施工班报、质量自检、互检表。

(4) 保存和备份原始数据。现场原始资料（班报、质量自检、互检表等）交项目组专人保管。

7.3.3 项目负责人不定期抽检，对项目组现场组织、生产管理、安全措施等情况进行全面检查，重点检查观测数据质量，以确保全部观测数据合格、可靠有效。

7.3.4 实测数据的随机抽样复测检查。对每条测线随机抽取部分勘探点进行重复观测，以检验观测数据的可重复性。抽样复测率宜不少于总勘探点数的 5%。

7.3.5 对以上各项质量检查、监管中发现的施工质量、组织及安全等问题，都及时通知项目组整改。确保野外采集的微动数据合格率达 100%，优良率达到 95%以上。

7.4 野外采集数据的质量评级

原始微动数据记录质量评价宜分为优良和合格二个等级。

7.4.1 满足以下条件的可评为优良记录：

实测波形整体平稳、形态正常，振幅均在正常显示范围内，无超幅、限幅现象，无不正常道。SPAC 系数符合要求，最大值不低于 0.8。

7.4.2 满足以下条件的宜评为合格记录

以三重圆形台阵为例，实测波形整体较为平稳、形态基本正常，勘探点（台阵中心点）波形正常。同一圆周上的三个台站中不正常波形不多于 1 道，整个台阵中不正常道总数宜少于 3 道。SPAC 系数基本符合要求，最大值不低于 0.8。

7.4.3 野外采集的微动数据合格率宜达到 100%，优良率 $\geq 95\%$ 。

7.5 野外工作结束需提交的资料

野外工作结束后，项目组需提交规范、齐全的实测数据和成果资料。

(1) 项目施工方案（含施工实际材料图）；

(2) 野外工作总结（验收）报告；

(3) 实测数据，包括：仪器一致性测试数据及结果，实测微动数据，测点施测资料（测点坐标、高程数据）；

(4) 野外工作原始资料，包括：野外工作班报；野外工作质量自检、互检表；

(5) 其它与项目相关的资料。

7.6 野外工作验收及评价

项目委托方对野外工作的设计、施工、组织管理及实际完成情况进行验收评价，形成验收意见。

8 数据处理

微动数据处理包括微动测深法、二维微动剖面法及微动谱比法（H/V法）三大类。微动数据处理软件应具有瑞雷波频散特性分析、频散曲线反演、速度剖面成像和微动谱比计算等功能。

8.1 微动测深法

8.1.1 微动测深法数据处理包括瑞雷波频散特性分析、频散曲线正反演，可以获得地层介质分层结果（地层S波速度结构）。

8.1.2 瑞雷波频散特性分析方法包括空间自相关法（SPAC法）、扩展空间自相关法（ESPAC法）和频率-波数法（F-K法）。本规范推荐使用SPAC法/ESPAC法。

8.1.3 SPAC法/ESPAC法的计算步骤为空间自相关系数计算、频散曲线提取和S波速度估算。

8.1.4 空间自相关系数计算

(1) 预处理。剔除干扰明显的的数据段，将微动信号按相同的时间长度分成若干段，允许每段数据有部分重叠。

(2) 对每段数据进行快速傅里叶变换，计算功率谱和互功率谱，按照下式计算台阵中任意两个台站的空间自相关函数 C_{ij} ：

$$C_{ij} = \frac{S_i S_j^*}{\sqrt{S_i S_i^* S_j S_j^*}} \quad (1)$$

其中 S_i 和 S_j 分别表示第 i 个台站和第 j 个台站的微动信号傅里叶谱，*表示复数共轭。

(3) 对每段数据，按下式将两台站间距离相同方向不同的所有空间自相关函数进行方位平均，得到空间自相关系数 ρ ：

$$\rho(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{Real}\{C_{ij}\} d\theta \quad (2)$$

其中 ω 为角频率， θ 为方位角， Real 表示取复数实部。将所有时间段的空间自相关系数叠加平均，并计算标准差。

(4) 空间自相关系数要绘制成图，便于查看是否合格，并留档备查。

8.1.5 SPAC法/ESPAC法提取频散曲线

根据空间自相关法的理论推导，空间自相关系数 ρ 满足如下公式：

$$\rho(\omega, r) = J_0(rk) = J_0(2\pi fr/V_r(f)) \quad (3)$$

其中 ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为频率, k 为波数, $V_r(f)$ 为瑞雷波的相速度, J_0 为第一类零阶 Bessel 函数。应用 SPAC 法/ESPAC 法求解公式 (3) 获得瑞雷波相速度频散曲线。

8.1.6 单个半径的圆形台阵采集的数据采用空间自相关法 (SPAC 法), 多重圆形台阵采集的数据采用扩展空间自相关法 (ESPAC 法)。空间自相关系数在低频段 (频率低于第一个零值的部分) 的最大值不宜小于 0.8。采用扩展空间自相关法进行贝塞尔函数拟合时, 修正的拟合优度应大于 0.8。

8.1.7 十字形台阵采集的数据应使用扩展空间自相关法 (ESPAC 法)。台站对间距不宜少于 3 组; 各半径空间自相关系数在低频段 (频率低于第一个零值的部分) 的最大值不宜小于 0.8。采用扩展空间自相关法进行贝塞尔函数拟合时, 修正的拟合优度应大于 0.8。

8.1.8 估算 S 波速度

(1) 通过对频散曲线反演以估算台阵下方地层介质的横波速度结构, 用于地层分层。

(2) 反演初始模型参数包括层数 n , 地层厚度 h 、纵波速度 V_p 、密度 ρ 和 S 波速度 V_s 。应参考测点附近或邻近测区的钻孔资料建立初始模型。

8.1.9 对于成层性较好的地层介质, 可使用全局寻优的分歧型遗传算法等反演方法。给定 V_s 和 h 的搜索范围, 不断调整 V_s 和 h 值计算理论频散曲线, 直至与实测频散曲线达到最佳拟合效果。

8.1.10 对于复杂地层介质 (如含有软硬夹层、不良地质体), 微动测深法难以得到可靠的分层结果, 宜采用微动剖面法。

8.2 二维微动剖面法

沿测线获得多个勘探点的频散曲线 ($V_r \sim f$ 曲线) 后, 将相速度 V_r 转换成视 S 波速度 V_x , 再将相速度频散曲线转换成 V_x 随深度的变化曲线 ($V_x \sim h$ 曲线), 通过内插、光滑得到二维视 S 波速度剖面 (二维微动剖面) 的方法。

视 S 波速度对岩性 (界面) 变化敏感, 能更直观反映地层起伏形态、地质构造、不良地质和特殊地质现象, 便于地质解释。

8.2.1 计算视 S 波速度 V_x

采用以下经验公式计算视 S 波速度:

$$V_{x,i} = \left(\frac{t_i V_{r,i}^4 - t_{i-1} V_{r,i-1}^4}{t_i - t_{i-1}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中: V_r 为相速度 (m/s); t_i 为周期 (s); i 表示第 i 个点。

8.2.2 用下式估算勘探深度 H :

$$H = \alpha \frac{V_r}{2f} \quad (5)$$

α 为校正系数，一般情况下 $\alpha=1$ 。有条件的工区可通过与已知钻孔资料的对比，获得符合工区实际情况的 α 值，从而提高视 S 波速度剖面解释地层深度的精度。

8.3 微动谱比法（H/V 法）

8.3.1 微动谱比法是微动探测中一种便捷的估算土石分界面深度的方法。

8.3.2 计算单点三分量微动数据的水平分量与垂直分量的功率谱比值 ($H/V=H(f)/V(f)$)，得到谱比曲线。步骤如下：

(1) 去除微动数据中的短时干扰。常用算法为短时窗平均/长时窗平均 (STA/LTA) 算法。

(2) 将水平分量和垂直分量的微动数据分别划分成若干段，每段数据均进行傅里叶变换并作平滑处理。

(3) 计算水平分量和垂直分量的傅里叶谱比值，公式如下：

$$H/V = \sqrt{NS \cdot EW} / V \quad (6)$$

其中 NS、EW、V 分别为微动南北、东西和垂直分量的傅里叶谱， $H = \sqrt{NS \cdot EW}$ 表示水平分量 H 为东西分量 EW 和南北分量 NS 的几何平均值。

(4) 求取所有时间段的 H/V 谱比曲线的平均值，并计算标准差，得到最终的 H/V 谱比曲线。

8.3.3 估算土石分界面深度 h

(1) 利用下式估算土石分界面深度 h ：

$$h = a f_0^b \quad (7)$$

其中 f_0 为 H/V 谱比曲线峰值频率， a 、 b 值为常数。

(2) 一般在钻孔附近采集三分量微动数据，计算谱比曲线并拾取峰值频率 f_0 ，将钻孔标定的土石分界面深度和拾取的峰值频率进行拟合，即可得到 a 、 b 值，获得测区的 $h \sim f_0$ 关系式。

(3) 采用单点三分量微动观测数据，利用 $h \sim f_0$ 经验公式估算测区土石分界面深度。

9 成果资料解释

9.1 资料解释原则

尽可能收集已知地质、钻孔和其它物探资料，从已知到未知。

9.2 定性解释

9.2.1 参考剖面附近的钻探资料，以微动剖面 V_x 速度变化特征为主要依据，追踪、勾画出岩性界面。

9.2.2 分析视 S 波速度 (V_x) 剖面特征，依据 V_x 剖面的背景值、速度及其梯度变化等综合因素，识别并勾画圈定速度异常的范围。再对速度异常进行地质解释，判断断层破碎带、岩溶、软土、采空区等不良地质现象，确定它们的位置及形态。

9.3 定量解释

9.3.1 尽可能利用测线上/测线旁钻探资料对剖面进行标定，以提高确定界面深度的精度。

9.3.2 总结测区岩性与 V_x 的关系，对速度异常做出地质解释，精确勾画出地质异常体的边界，对分布范围、形态做出定量解释。

9.4 测区多条测线成果资料的综合解释，确定探测对象的空间分布范围。

9.5 二维微动剖面解释及成果图模版参见附录 G。

10 成果报告编写

10.1 按附录 H 要求编写“成果报告”。

10.2 成果报告应内容全面、结构完整、重点突出、文字简明、图件齐全、结论明确、建议合理。

11 成果报告评审验收

11.1 报告评审需提交的成果资料

- (1) 项目合同
- (2) 项目施工设计
- (3) 野外工作总结报告
- (4) 成果报告（含各项成果图件）

11.2 项目承担单位内部评审验收及验收意见书。

11.3 项目承担单位提出成果验收申请。

11.4 项目委托单位组织验收评审、出具验收意见。

11.5 项目承担单位根据验收评审意见对成果报告做出修改后正式提交。

12 资料归档

12.1 项目成果资料归档根据项目委托方要求执行。

12.2 归档资料一般包括

- (1) 实测数据类：测点坐标，实测微动数据
- (2) 中间资料：施工方案、野外工作总结报告（及相关资料）
- (3) 成果资料类：成果报告（含成果图件）
- (4) 技术管理文件类：招标文件、中标通知书、项目合同、任务书、工作方案评审意见书、野外工作验收意见书、成果报告验收意见、验收人员名单等。

附录 A

(资料性附录)

微动探测台阵示例

微动探测是通过多个台站组成的台阵来采集微动信号，不同台阵布设方式将影响数据采集质量和探测效果。应用空间自相关法（SPAC 法）要求观测台阵布设成圆形，并在圆心处布设 1 个、圆周上至少布设 3 个观测台站。圆形观测台阵的半径称为观测半径。观测半径与探测深度密切相关，半径越大，探测深度越深，半径越小，探测深度较浅。通常情况下，微动台阵的探测深度大约是观测半径的 3~5 倍。为了满足探测深度要求，可采用多个观测台阵组成的多重观测系统进行组合观测。目前最常用的采集台阵为多重圆形台阵（如图 A.1a 所示的双重圆形台阵）。当场地条件受限难以布置成圆形台阵时，也可布置成直线形、L 形和十字形台阵（图 A.1）。应依据勘探目的，结合场地条件和背景噪音特点，选择多种台阵对比试验，确定最合适的台阵。

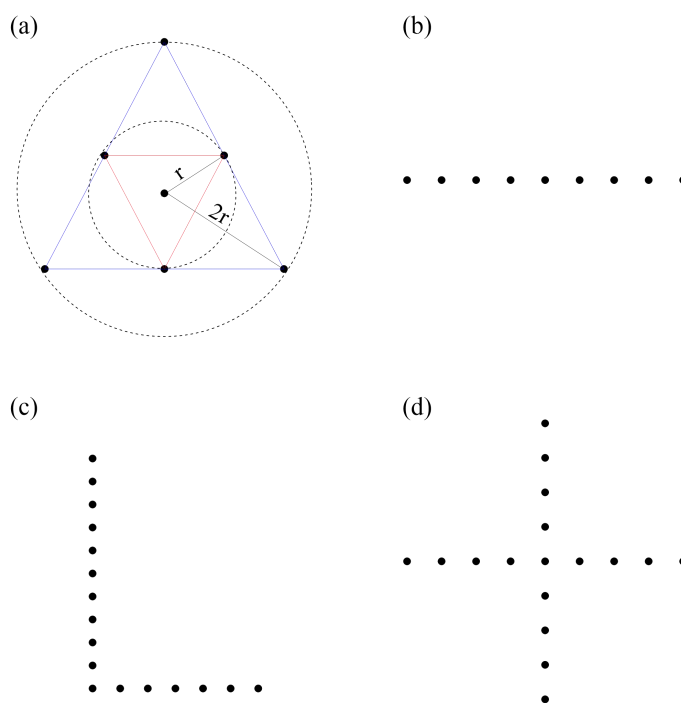


图 A.1 微动探测常见观测台阵示意图

(a) 双重圆形台阵 (b) 直线形台阵 (c) L 形台阵 (d) 十字形台阵

除单点微动探测外，常用方式为二维微动剖面探测。图 A.2 为二维微动剖面观测系统。根据探测目标合理布置剖面观测系统的测线位置、走向和点距。在完成第一个点 O_1 的单点微动观测后，台阵仪器平移到第二个点 O_2 观测，依此类推，直至整条剖面测量完成。

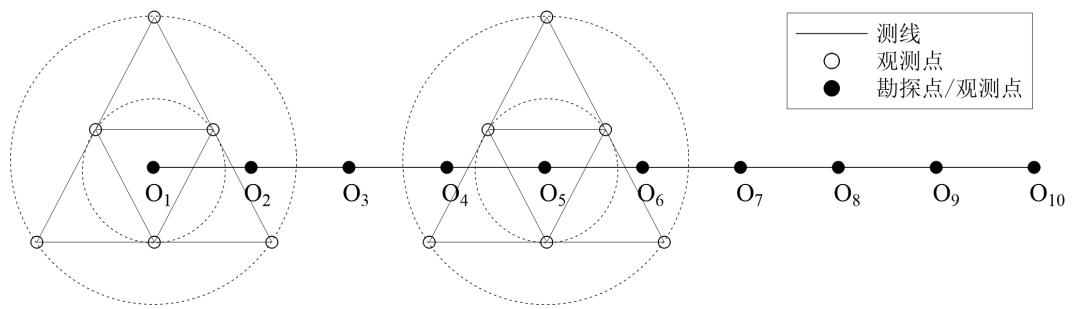


图 A.2 二维微动剖面观测系统

附 录 B

(规范性附录)

微动探测方案设计提纲

B.1 项目概况

工程概况、自然地理与交通位置、任务、目的与要求等等。

B.2 工作区概况

工区场地条件、地形地貌、地质概况及地球物理特征、以往工作程度及评述等。

B.3 工作内容及进度安排

现场踏勘情况、测线测点布置、采集方法试验、仪器设备、观测方式、技术参数、预计工作量、进度计划等。

B.4 预期提交成果资料

B.5 质量和安全措施

B.6 经费预算

B.7 其他需要说明及注意的问题

B.8 附图及附表

附录 C

(规范性附录)

微动探测数据采集野外记录班报模板

微动探测野外记录班报

施工日期：_____ 天气：_____ 仪器操作员：_____ 验收员：_____

项目名称		施工地点	
测线-测点号			
现场描述：			
观测半径：			
放大倍数：			
各仪器所用道数：			
台阵布置示意图：			

附录 D

(规范性附录)

微动探测原始记录质量评级表

微动探测原始记录质量评级表						
工区：		测线号：	测点号：	记录员：	检查员：	
编号	评价内容	是	否	评价结果		备注
1	仪器检查记录是否合格	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	合格 <input type="checkbox"/> 不合格 <input type="checkbox"/>		1-6中任意一项为“否”，则原始记录不合格，全为“是”，则原始记录为合格。
2	观测系统和采集台阵是否正确（是否符合设计要求）	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
3	野外记录表格是否正确和齐全	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
4	观测台阵内是否存在强烈的方位性干扰噪声，导致数据无法使用	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
5	采用 SPAC 法时中心道记录是否正常	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
6	频带范围是否能满足勘探需要	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
7	原始记录信号是否整体平稳，无明显零值漂移	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	优良 <input type="checkbox"/>		1-6项全为“是”，且7-10项皆为“是”，则原始记录为优良。
8	同一半径各道记录有无明显方位性干扰，或明显方位性干扰记录时长是否大于采集时长的 5%	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
9	有无不正常道记录	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
10	野外记录是否规范整洁	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			

附录 E

(规范性附录)

野外工作总结报告提纲

E.1 项目概况

E.2 野外工作概况

E.3 设计规定任务与指标完成情况

(1) 设计规定任务与指标

(2) 工作量情况

E.4 初步成果

E.5 存在问题与建议

E.6 野外工作提交成果资料清单

(1) 《项目施工方案(含施工实际材料图)》。

(2) 《野外工作总结(验收)报告》。

(3) 实测数据,包括:仪器一致性测试数据及结果,实测微动数据,测点施测资料(测点坐标、高程数据)。

(4) 野外工作成果资料,包括:野外工作班报;野外工作质量自检、互检表。

(5) 其它与项目相关的资料。

附录 F

(规范性附录)

单点微动探测成果图册模板

单点微动探测成果图册，应包括实测与拟合频散曲线对比图（图 F.1 (a)）、反演获得的横波速度结构图（图 F.1 (b)）、推断地层结构图（图 F.1(c)）、微动反演 S 波速度结构统计表（表 F.1）。

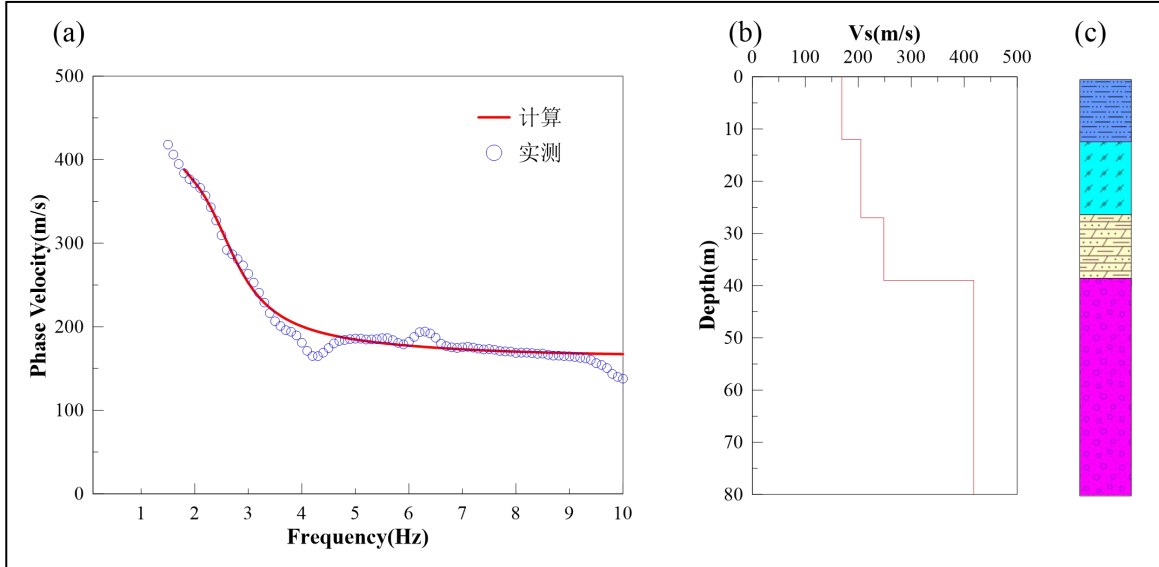


图 F.1 单点微动探测成果示意图

(a) 实测与理论计算的频散曲线对比图 (b) 横波速度结构图 (c) 推断地层结构图

表 F.1 微动反演 S 波速度结构统计表

层号	厚度 (m)	深度 (m)	速度 (m/s)	地层解释

附录 G

(规范性附录)

二维微动剖面及地质解释成果图模版

二维微动剖面法探测获得微动剖面成果图（视 S 波速度剖面图）（图 G.1）。对二维微动剖面进行地质解释应包括以下内容，最终获得地质断面图（G.2）。

1. 勾画地层界线，分析、解释地层岩性。
2. 识别与不良地质相关的速度异常并做出地质解释。
3. 圈定不良地质的边界、确定其形态。
4. 如测区有多条测线，需逐条完成微动剖面的地质解释，并获得测区平面成果图。
5. 根据二维微动剖面地质解释成果图，绘制地质断面图（图 G.2）。

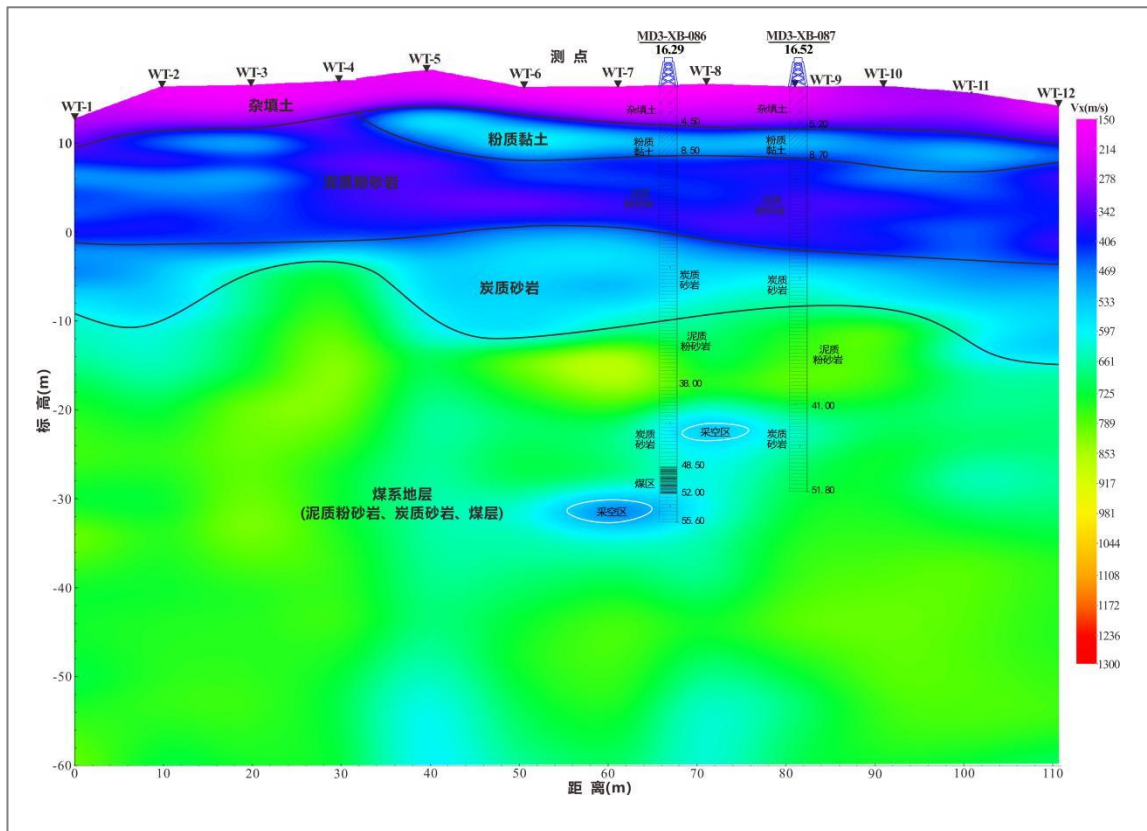
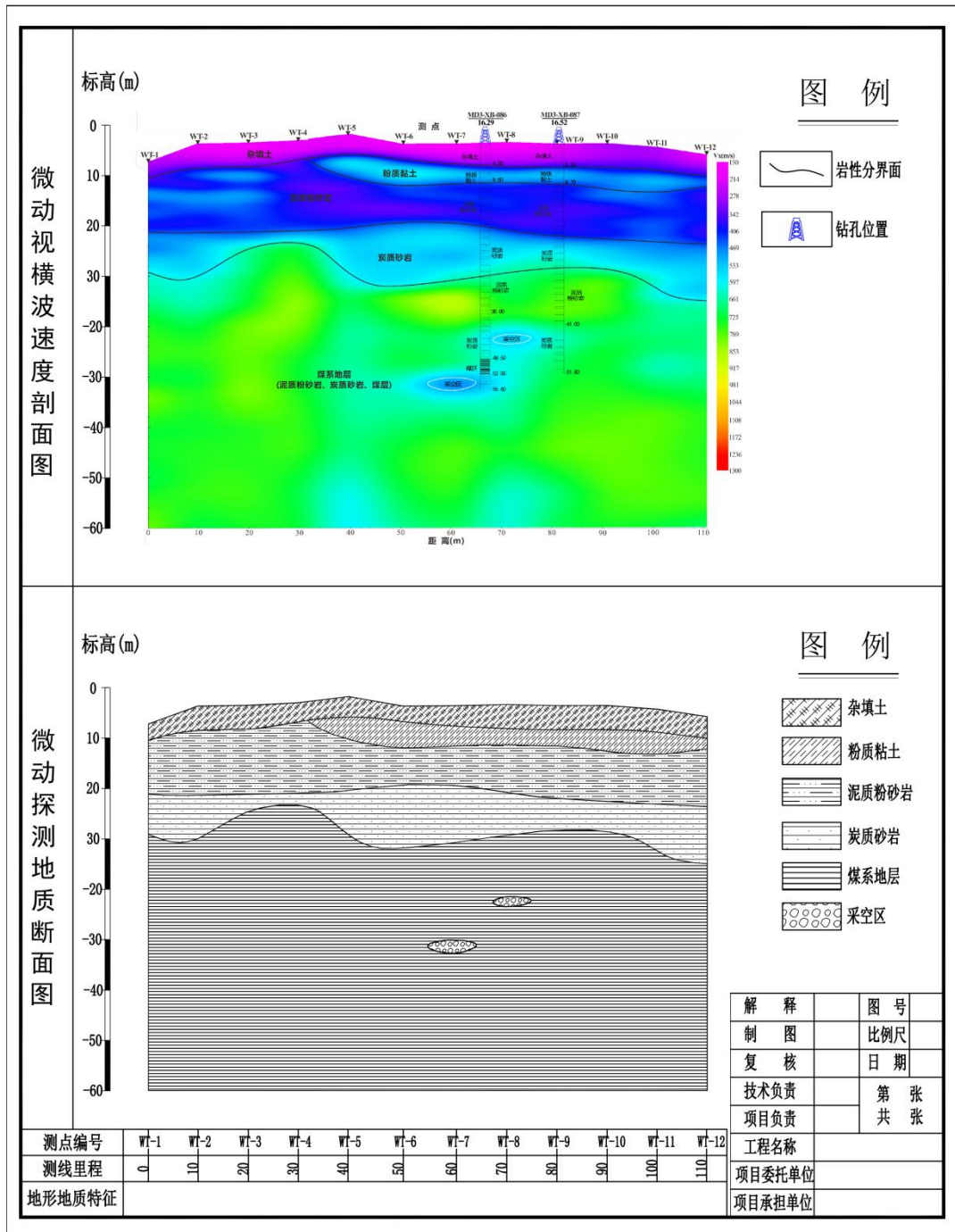


图 G.1 二维微动剖面及地质解释成果图



附录 H

(规范性附录)

微动探测成果报告提纲

H.1 前言

前言应包含以下内容：

- (1) 项目来源、工作任务及目的等
- (2) 工区概况
- (3) 遵循的规范与标准
- (4) 工作完成情况及主要成果

H.2 工区地质及地球物理特征

- (1) 既有工作
- (2) 地质概况
- (3) 地球物理特征

H.3 工作方法与技术

- (1) 方法原理
- (2) 仪器设备及参数
- (3) 测线布置
- (4) 现场工作方法与技术
- (5) 数据处理方法

H.4 工作完成情况及质量评述

H.5 资料解释推断

- (1) 异常判识原则
- (2) 微动测深（单点反演）成果解释
- (3) H/V 成果解释
- (4) 二维微动剖面成果解释

H.6 结论和建议

H.7 附件

附件包含以下内容：

- (1) 实测点坐标
- (2) 勘探点实测频散曲线
- (3) 勘探点实测H/V曲线
- (4) 微动探测成果图
- (5) 地质解释成果图

微动探测技术规范

条文说明

1 范围

1.2 本规范主要介绍微动探测在地质勘察和资源勘察中应用，不涉及微动信号在场地卓越周期计算中的应用。

3 术语、缩略语和定义

3.1 对于在任何时间和地点都可以观测到的地面微弱振动，本规范中称为“微动”，在不同文献中可能有不同表述，有的称为“地脉动”，有的称为“环境噪音”，有的称为“背景噪音”。

3.2 微动探测技术是一种利用台阵观测技术采集微动信号，并通过数据处理方法从中提取瑞雷波频散信息，再对其反演获得地下介质 S 波速度结构的天然源面波勘探方法。微动探测具有无需人工源、不受勘探场地环境振动和电磁干扰影响、仪器设备轻便、勘探周期短、施工方便等技术优势，尤其适用于传统物探方法很难开展工作的城市强干扰复杂环境。由于不受浅层高速层屏蔽作用的影响，对低速软弱层的分辨能力较高。微动探测技术广泛应用于城市地质调查、工程地质勘察、水文及环境地质调查、煤田（采区）资源勘察和地热资源勘查等领域。

4 总则

4.1 对于不同探测目的，微动探测有不同的技术要求。如对于城市地质、水文及环境地质及工程建设层地质勘察等浅部探测，一般采用较小尺寸的微动台阵。对于煤田（资源）、地热等中深部勘探，一般使用较大尺寸的微动台阵。

对于不同探测目的，微动数据处理方法也有所区别。如在城市地质、水文及环境地质及工程建设地质勘察中，有时存在软弱低速夹层或高速硬夹层的情况。在这种情况下，在特定频率范围内高阶波的能量会占主导地位，频散曲线呈现“Z”字形。提取频散曲线时必须考虑高阶波的影响。如果忽略高阶波仅对基阶波频散曲线反演，会对反演精度产生不利影响。对于这种存在低速软弱夹层或高速硬夹层的复杂地层介质，采用小台阵微动剖面勘探技术，可以突破传统微动探测依赖反演计算的技术瓶颈，在实际工程中已经取得了良好效果。

4.2 微动探测是以探测对象与周围介质存在物性差异为基础。探测效果取决于探测对象与周围介质是否有足够速度差异、探测对象的埋深、规模等情况。微动探测需要布置多个台站，地形地貌等野外施工场地条件可能会影响微动台阵布设，从而影响探测效果。水域及

陡峭山地区难以布设微动台阵，不适宜开展微动探测工作。

5 施工方案设计

5.2 常见的微动台阵形式有圆形、直线形、L形、十字形等，推荐使用圆形台阵。圆形台阵形式具有更强的抗干扰性，便于SPAC法使用。观测台阵形式和半径可根据勘探目的开展相关试验确定。

5.2.2.1 若场地条件允许，优先采用圆形台阵。

5.2.2.2 一般情况下，探测深度小于100m时，观测半径不宜小于探测深度的1/10；探测深度在100~500m时，观测半径宜为探测深度的1/3~1/5。探测深度大于500m时，观测半径不应小于探测深度的1/3。

多个观测半径的圆形台阵组合，称为多重圆形台阵。常见的多重圆形台阵有双重、三重、四重圆形台阵等。

5.3.3 微动剖面法的测线、勘探点的设计原则可参考《城市工程地球物理探测标准》（CJJ/T7-2107）等相关规范。

6 仪器设备

6.1 本条的规定，是为了能够切实保证本方法的实际应用效果，对数据采集设备提出的最低要求。

6.1.3 拾震器的固有频率应满足勘探深度要求。勘探深度越深，要求拾震器的固有频率越低。在城市地质、水文及环境地质及工程建设地质勘察等浅部地质勘探中，拾震器的固有频率一般应小于等于2Hz，在煤田、地热等中深层地质勘探中，拾震器的固有频率一般应小于等于1Hz，可以通过周期延拓电路扩展拾震器的频带（如低频端达到5~7s）。要求拾震器有一定重量，自重应达到3~5kg，有利于拾震器与地面保持良好的耦合状态。

6.2.1 仪器一致性测试场地应平整，便于同时放置多台仪器。场地周边环境安静，远离人员和车辆的干扰。在一致性测试期间，尽量避免人员在仪器周边走动。

正式施工前，应对仪器进行一致性测试，可先通过波形记录直观查看波形的一致性。当仪器出现不一致现象时，应先排除仪器线路连接、卫星信号缺失等原因。对无法查明不一致原因的仪器，启用备用仪器替换。

6.6.2 仪器一致性测试结果（功率谱、功率谱之比、相干系数和相位差）如下图所示。

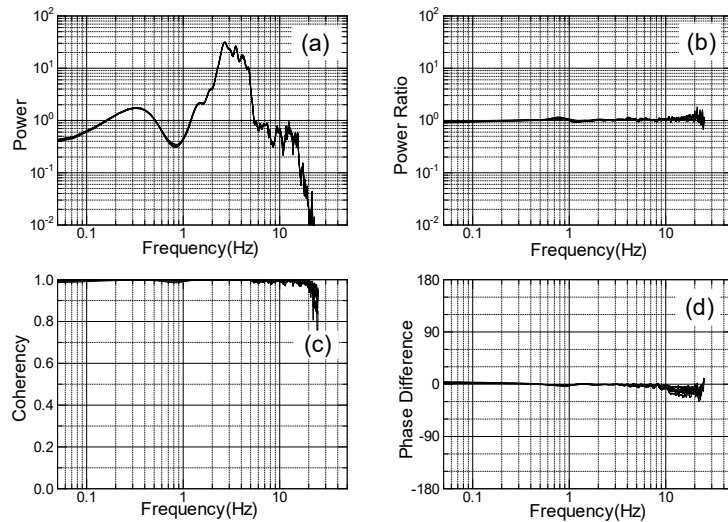


图1 仪器一致性测试

(a) 功率谱 (b) 功率谱之比 (c) 相干系数 (d) 相位差

7 野外数据采集

7.2.2 拾震器应安置稳固，与地面系统保持最佳耦合状态：

- (1) 当地面比较松软时，宜铲除浮土并做压实处理；
- (2) 放置时注意避开下水道井盖，尽可能远离房屋地下室；
- (3) 当风力过大时，拾震器应挖坑深埋。

7.2.3 微动数据采集时长与勘探深度、噪音环境有关。探测深度较浅（如工程勘察）时，观测时间一般为 15min，当干扰严重时应延长采集时间。探测深度较大（如地热探测等）时，观测时间至少 30min。

7.2.5 班报应记录检波器埋置点附近的地形地貌，强干扰源描述（位置、方向等）。

7.2.7 微动信号来源于自然界的自然现象（海浪、河流、风、气压等）引起的振动和人类活动引起的各类振动，其振幅和频率成分具有随机性。因此需要有较长的微动数据采集时间。本规范推荐微动数据采集时间不少于 15 min。

7.4.1 实测波形不正常的情况有

- (1) 波形为一条直线；
- (2) 波形振幅异常；
- (3) 波形与相邻道相关性差。

8 数据处理

8.1.2 F-K 法提取频散曲线时存在多极值问题，从而导致该方法难以有效地提取频散曲线。

与 SPAC 法相比，要获得与 SPAC 法相同的勘探深度，F-K 法往往需要更多数量的台站。因

此，本规范不推荐使用 F-K 法，推荐使用精度高、施工更方便的 SPAC 法/ESPAC 法。

8.1.5 SPAC 法是一种由空间自相关系数提取频散曲线的方法。SPAC 法的计算步骤为：当台阵半径为 r 时，先计算不同频率的空间自相关系数 $\rho(f_i, r)$ ；再由公式 $\rho(f_i, r) = J_0(x)$ 反求出频率为 f_i 时的宗量 x ；接着由公式 $x = 2\pi f_i r / c(f_i)$ 求出频率为 f_i 时的相速度 c_i ；重复上述步骤，计算所有频率的相速度，最终获得频散曲线。

ESPAC 法也是一种由空间自相关系数提取频散曲线的方法，是 SPAC 法的扩展方法。ESPAC 法的计算步骤为：首先给定频率 f ，计算不同台间距 r_i 的空间自相关系数 $\rho(f, r_i)$ ，并组成 $r_i \sim \rho(r_i)$ 曲线；再通过用第一类零阶贝塞尔函数拟合 $r_i \sim \rho(r_i)$ 曲线求出零阶贝塞尔函数的宗量 x ；接着由 $x = 2\pi f r_i / c(f)$ 求出频率为 f 时的相速度 c_i ；重复上述步骤，计算所有频率的相速度，最终获得频散曲线。

8.1.6 空间自相关系数是反映台站对微动数据相关性的重要指标。当相关系数较小时，拟合零阶贝塞尔函数的效果差，获得的频散曲线可靠程度降低。因此，本条文规定空间自相关系数在低频段（频率低于第一个零值的部分）的最大值不宜小于 0.8。

采用扩展空间自相关法进行贝塞尔函数拟合时，应评估拟合结果。评估拟合结果的常见指标有残差、拟合优度、修正的拟合优度等。本规范推荐修正的拟合优度评价拟合效果，规定修正的拟合优度应大于 0.8。

8.1.10 空间自相关法计算的频散曲线是一条复合曲线，由不同阶的频散曲线按能量占比复合而成。当地层包含低速软弱夹层时，在特定频率范围内高阶波的能量占主导地位，频散曲线会呈现“Z”字形。对“Z”字形频散曲线的反演，通常难以获得可靠的结果。所以，对于复杂的工程建设层，应谨慎使用实测频散曲线反演获得的 S 波速度，本规范也不推荐使用 S 波速度剖面。

8.2 微动剖面法是为了满足二维勘探需要而提出的，如探测采空区、断层等需要追踪地质构造的规模、产状等情况。微动剖面法与微动测深法的野外工作方法一样，只是剖面观测需按一定间距沿测线进行多个单点观测。微动剖面法既可以布置单条测线，也可以布置多条测线形成二维面积探测，以圈定与断裂破碎带（含水）、采空区（空洞）等探测对象相关的低速异常的边界范围。

8.2.1 由于相速度 V_r 对于地层岩性的变化反应是不够灵敏的，这就造成划分岩性分界面的困难。为此，有经验的地球物理学者通过大量理论验算和实际检测数据的检验，推出了与 S 波速度有关的、具有同样速度量纲的视 S 波速度 V_x 。视 S 波速度 V_x 既不是瑞雷波相速度

V_r ，也不是真实的地层 S 波速度 V_s ，但它在分层界面处的速度变化比 V_r 更灵敏， V_x 能更有效、直观地反映地下介质的岩性变化。所以， V_x 可提高对地层分层和探测不良地体的分辨能力。

8.3.3 土石界面深度 h 和峰值频率 f_0 关系式为 $h = af_0^b$ 。在 a 、 b 值已知的情况下，可以由谱比曲线峰值频率 f_0 估算出土石分界面深度 h 。一般情况下，在不同工区， a 、 b 值是不同的。对于新的工区，在 a 、 b 值未知的情况下，可以在有钻孔资料的场地开展微动观测实验获得谱比曲线峰值频率 f_0 ，由已知钻孔的土石分界面深度 h 和谱比曲线峰值频率 f_0 通过拟合计算出 a 、 b 值。拟合数据的个数不应少于 5 个。

参 考 文 献

- [1] Suqun Ling, Research on the estimation of phase velocity of surface waves in microtremors. Ph. D. thesis (in Japanese). Hokkaido University, 1994.
- [2] Okada H. 《The microtremor survey method》. Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Monographs Series Vol. 12, translated by Koya Suto. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 2003.
- [3] 凌甦群, 三轮滋, 瞬态面波法和微动勘探法在日本新潟县中越地震灾区地质调查中的应用.《工程物探新技术》, 80~85, 北京: 地质出版社. 2006.
- [4] 徐佩芬, 李传金, 凌甦群, 张胤彬, 侯超, 孙勇军, 2009, 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱, 地球物理学报, 52(7):1923-1930.
- [5] 徐佩芬, 侍文, 凌苏群, 郭慧丽, 李志华, 2012, 二维微动剖面探测“孤石”: 以深圳地铁7号线为例, 地球物理学报, 55(6):2120-2128.
- [6] Peifen Xu, Suqun Ling, Chuanjin Li, Jianguo Du, Dengming Zhang, Xueqiu Xu, Kangming Dai, and Zuohong Zhang, 2012, Mapping deeply-buried geothermal faults using microtremor array analysis. Geophys. J. Int., 188(1), 115-122, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05266.x.
- [7] Peifen Xu, Suqun Ling, Weiyan Ran, Qingxiao Liu, Jinguang Liu, 2013, Estimating Cenozoic thickness in the Beijing plain area using array microtremor data, Seismol. Res. Lett., 84(6):1039-1047.
- [8] 徐佩芬, 李世豪, 凌甦群, 郭慧丽, 田宝卿, 2013, 利用 SPAC 法估算地壳 S 波速度结构, 地球物理学报, 56(11):3846-3854, doi:10.6038/cjg20131126.
- [9] 李传金, 徐佩芬, 凌甦群, 2016, 微动勘探法圆形阵列台站数量和分布方式研究, 科学技术与工程, 16(7):27-30.
- [10] 杜亚楠, 徐佩芬, 凌甦群, 2018, 土石混合滑坡体微动探测: 以衡阳拜殿乡滑坡体为例, 地球物理学报, 61(4):1596-1604, doi:10.6038/cjg 2018L0057.
- [11] 张若晗, 徐佩芬, 凌甦群, 杜亚楠, 游志伟, 王志辉, 孙成禹, 2020, 基于微动 H/V 谱比法的土石分界面探测研究—以济南中心城区为例, 地球物理学报, 63(1):339-350, doi:10.6038/cjg2020M0678.
- [12] 徐佩芬, 杜亚楠, 凌甦群, 游志伟, 姚金, 张华, 2020, 微动多阶瑞雷波 SPAC 系数反演方法及应用研究, 地球物理学报, 63(10):3857-3867, doi:10.6038/cjg2020O0148.
- [13] Peifen Xu, Suqun Ling, Gang Long, Gaoqian Qian, Qiuyue Shen, Jin Yao, Hua Zhang, 2021, ESPAC-based 2D mini-array microtremor method and its application in urban rail transit construction planning. Tunnelling and Underground Space Technology, 115(3), 104070.
- [14] 乔高乾, 徐佩芬, 龙刚, 凌甦群, 2021, 微动剖面探测法在城市轨道交通勘察中的应用及效果:以广州地铁十号线为例, 科学技术与工程, 21(20):8582-8591.
- [15] 杜亚楠, 龚雪, 徐佩芬, 凌甦群, 李传金, 2021, 微动勘探中噪声场分布的不均匀性对圆形和直线形台阵的影响研究, 地球物理学进展, 37(3):1007-1012, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20211110.1305.010.html>.