

DZ

中华人民共和国地质矿产行业标准

DZ/T XXXXX—XXXX

微动探测技术规程

Code of practice for microtremor survey

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(报批稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中华人民共和国自然资源部 发布

目 次

前言 IV

引言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义、缩略语 1

 3.1 术语和定义 1

 3.2 缩略语 3

4 总则 3

 4.1 应用条件 3

 4.2 应用范围 3

5 技术设计 4

 5.1 基本要求 4

 5.2 资料搜集与踏勘 4

 5.3 方法有效性分析 4

 5.4 工作部署 5

 5.5 采集阵列设计 6

 5.6 工作精度 6

 5.7 设计书编写 8

 5.8 设计审批与变更 8

6 仪器设备 8

 6.1 仪器选择 8

 6.2 仪器使用和维护 9

7 野外施工 9

 7.1 一致性试验 9

 7.2 数据采集 9

 7.3 安全措施 10

 7.4 原始资料质量检查与评价 11

 7.5 野外资料验收 11

8 数据处理与解释 12

 8.1 数据处理 12

 8.2 资料解释 14

9 报告编写与资料提交 14

 9.1 报告编写 14

9.2 资料提交 15

附录 A （资料性） 阵列微动探测数据采集示例..... 16

附录 B （规范性） 微动探测技术设计提纲..... 18

附录 C （规范性） 微动探测野外采集记录表..... 19

附录 D （规范性） 微动探测技术原始记录评价表..... 24

附录 E （资料性） 微动探测技术方法原理..... 25

附录 F （规范性） 单点阵列微动探测技术成果图册..... 31

附录 G （资料性） 微动探测技术资料解释推断..... 32

附录 H （规范性） 微动探测技术成果报告提纲..... 34

参考文献 35

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。

本文件由中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会（SAC/TC 93）归口。

本文件起草单位：北京市生态地质研究所、中国地质科学院、北京市水电物探研究所、中国地震局地球物理研究所。

本文件主要起草人：李巧灵、雷晓东、张辉、刘云祯、冉伟彦、李晨、田宝卿、王立发、闫广新、关伟、丁连靖、何祎、孙杰夫、尤志鑫、赵旭辰、韩宇达、赵玉。

引 言

微动探测技术是利用地球本身的微弱振动或人类活动产生振动作为信号源,提取面波频散曲线或纵横谱比曲线等信息,通过数据处理与分析,推断地下构造形态和岩土层物理性质的地球物理勘探方法。具有便携高效、绿色无损、不受电磁背景干扰等特点,广泛应用于工程勘察、地质调查、城市物探、资源勘探、防灾减灾及地震安全性评价等方面。

微动探测技术主要包括单台微动探测和阵列微动探测。单台微动探测主要基于三分量拾震器记录的微动信号,提取 H/V 谱比曲线,进行地下地质结构探测,多用于防震减灾和场地评价中。阵列微动探测主要通过阵列采集得到原始数据,基于面波的频散特性提取面波相速度信息,进而推算地层 S 波速度或视 S 波速度结构,在此基础上,分析地下构造形态和岩土层物理性质。如推断地层几何特征,对地质异常体如采空区、溶洞、陷落柱及隐伏断裂等进行推断解释;获取潜在破碎面的深度和形态,为滑坡机制等地灾评价提供参考依据;查明储层发育特征,为地热及油气资源勘查提供依据等。

目前国内还没有专门针对微动探测技术的行业标准,仅在少数规范中包含部分相近内容。为促进微动探测技术发展和推广应用,特制定《微动探测技术规程》。

微动探测技术规程

1 范围

本文件规定了微动探测的技术设计、仪器设备、野外施工、数据处理与解释、报告编写与资料汇交等工作的技术要求。

本文件适用于工程勘察、地质调查、资源勘探、防灾减灾、城市物探等领域中采用微动探测技术的工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中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 50026 工程测量标准

GB/T 50011 建筑抗震设计规范

GB/T 50269 地基动力特性测试规范

DZ/T 0069 地球物理勘查图式图例及用色标准

NB/T 10701 地热资源微动探测技术规程

3 术语和定义、缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

微动 microtremor

一种由自然界和人类活动产生的振幅只有几微米到几十微米的微弱振动。

3.1.2

微动探测 microtremor survey

从微动信号中提取面波频散曲线或横纵谱比曲线等信息，通过数据处理与分析，推断地下构造形态和岩土层物理性质的地球物理勘探方法。

3.1.3

单台微动探测 single station microtremor survey

利用单台三分量拾震器接收微动信号，通过频谱分析等数据处理方法提取H/V谱比曲线用于地质分析的微动探测技术。

3.1.4

阵列微动探测 array microtremor survey

基于阵列设备采集微动信号，通过数据处理提取频散曲线，获得阵列下方介质速度特征，推断其地质结构的微动探测技术。

3.1.5

折射微动 refraction microtremor

采用与地震折射法类似的直线型阵列采集微动数据，基于谱分析技术($\tau-p$ 变换)求取瑞雷波频散曲线的一种阵列微动探测技术。

3.1.6

面波频散 surface wave dispersion

面波在非均匀介质(如层状介质)中传播的速度随频率变化而变化的现象。

3.1.7

频散曲线 dispersion curve

表示面波的频率(或波长、周期)与波速(相速度或群速度)间关系的曲线。

注：微动探测主要利用微动信号中的瑞雷波(Rayleigh wave)信号提取相速度频散曲线进行后续分析。本文件中未做特别说明的“频散曲线”皆为基阶瑞雷波相速度频散曲线。

3.1.8

拾震器 receiver

检波器

用于接收微动数据的仪器。

3.1.9

观测阵列 survey array

根据探测目的，结合野外条件，多个拾震器按照一定形状排列的采集方式。

3.1.10

相速度 phase velocity

波的相位在空间的传播速度。

注：本文件中未做特别说明的“相速度”皆为瑞雷波基阶相速度。在非均匀介质中，由于频散现象的存在，不同频率对应不同的相速度，且同一频率通常对应多阶相速度，常用的微动探测技术多利用不同频率对应的基阶相速度。

3.1.11

视 S 波速度 apparent S-velocity

由瑞雷波相速度换算得到的一种速度。

3.1.12

场地卓越周期 predominant period of site

随机振动过程中出现概率最多的周期。

3.1.13

横纵谱比法 H/V spectral ratio

利用同一测点微动信号水平分量与垂向分量的功率谱比值（即H/V），估算场地卓越周期，刻画地层结构等的微动数据处理方法。

3.1.14

密集台阵微动探测 dense seismic array

一次性布设较多数量拾震器，以整个阵列下方介质速度结构为目标输出的不规则阵列微动探测技术。

3.1.15

道间距 trace space

阵列采集中任意两台拾震器之间的距离。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

ESPAC: 扩展空间自相关 (Extended spatial autocorrelation)。

F-K: 频率-波数法 (Frequency-Wavenumber)。

H/V spectral ratio: 横纵谱比法 (The ratio of the horizontal Microtremor Fourier spectra to the vertical ones)。

ReMi : 折射微动 (Refraction Microtremor)。

SPAC: 空间自相关 (Spatial autocorrelation)。

4 总则

4.1 应用条件

4.1.1 目标体应具有可探测的规模，且与围岩之间应存在明显的波速差异。

4.1.2 采集阵列内应无较强振动干扰或干扰不影响目标体探测所需微动信息采集。

4.1.3 工作现场应具备足够空间，能布置探测装置并开展现场工作。

4.1.4 探测仪器具备检测出现场微动信号强度的灵敏度。

4.2 应用范围

- 4.2.1 工程勘察应用：场地评价、地基加固效果、地下障碍物、软弱地层、冻土层和砂砾石层等探测。
- 4.2.2 地质调查应用：覆盖层厚度及结构、基岩起伏形态、古河道、隐伏断裂等地质结构探测。
- 4.2.3 资源勘探应用：地下水、地热、煤炭、油气及其他矿产资源勘探。
- 4.2.4 防灾减灾应用：地震安全性评价、岩溶塌陷、煤田采空区、滑坡探测等。
- 4.2.5 城市物探应用：古代遗址、地下洞穴、隐伏异常体探测等。

5 技术设计

5.1 基本要求

按照采集方式，微动探测分为单台微动探测和阵列微动探测。按照工作模式，微动探测分为单点微动探测和剖面或面积性微动探测。剖面或面积性探测工作应进行技术设计，少量单点微动探测可简化技术设计，或与野外施工同时完成。

5.2 资料搜集与踏勘

5.2.1 应明确微动探测的目标任务，包括工作区域、工作内容、需要解决的地质问题、探测深度和精度要求等。

5.2.2 应搜集整理相关资料，分析已有工作程度和存在的问题。相关资料包括：

- a) 工作区及相邻范围已有地球物理、区域地质、水文地质、钻探等工作成果资料；
- b) 工作区主要岩土层纵波速度、横波速度、泊松比等物性资料；
- c) 能够涵盖工区范围的测量控制点坐标。

5.2.3 应现场踏勘工作区地形、地貌、植被、交通、居民点等条件，了解野外作业施工条件，核实已搜集资料的可利用程度。应调查现场振动源的类型、分布与时空变化等特征，评估对现场数据采集的可利用性及其影响。

5.3 方法有效性分析

5.3.1 在应用条件不明或工作区地质条件比较复杂时，应根据任务要求、已有资料、地质和地球物理条件综合选择代表性地段开展方法有效性试验。条件许可时，可在已知钻孔（井）旁进行试验。

5.3.2 试验内容应包括采集方式、采样频率、采集时长等，阵列微动探测还应选择阵列方式和道间距组合。

具体内容可参考以下规定：

- a) 采集方式应符合 5.4 和 5.5 的规定，最低采样率应符合奈奎斯特采样定律，即采样频率应大于有效频段最大频率的 2 倍。微动探测采集时长可根据探测深度及环境干扰等因素确定，背景干扰较小时，最少采集时长可按表 1 执行，背景干扰较大时，应根据试验结果确定采集时长。
- b) 阵列微动探测应设计多个道间距，开展现场试验，根据实测频散曲线分析结果，确定最佳道间距。

表1 微动探测采集时长参考表

探测深度 m	最少采集时长 min
小于100	20
100~500（含）	30
500~1500（含）	60
大于1500	120

5.3.3 地形起伏变化较大时，应评估地形对探测结果的影响，确定相应的采集方式。

5.3.4 在认定方法有效性后方可开展工作。

5.4 工作部署

5.4.1 单台微动探测。微动探测方法用于地基动力特性测试或场地评价时，宜选择单台微动探测方式，测点宜布置在天然地基土上，且宜布置在波速测试孔 5 m 以内。建筑场地的探测点不应少于 2 个。尚应符合 GB/T 50269 的有关规定。

5.4.2 单点阵列微动探测应布置在已知孔位及拟钻井预布设孔位附近。在地质情况不清楚的空白区域，测点数不应少于 3 个。

5.4.3 剖面或面积性阵列微动探测。根据地质任务、勘查对象和地形地貌等情况可按表 2 布置基本工作量，并应满足下列规定：

表2 不同比例尺基本工作量

工作比例尺	测线间距 km	沿测线点距 km	观测点 个/km ²
1:50 000	0.50~2.00	0.50~1.00	1~4
1:25 000	0.25~1.00	0.25~0.50	2~20
1:10 000	0.10~0.50	0.10~0.25	20~100
1:5000	0.05~0.25	0.05~0.10	40~400
注：此表不适合面积性单台微动探测或密集台阵探测。目标探测深度较浅的测点，可根据实际情况加密。			

- a) 应符合相应领域规范要求；
- b) 设计点、线距时，应考虑阵列最大道间距，点距不宜小于阵列最大道间距的 1/5；

- c) 面积性测量宜按规则测网布设，主测线宜垂直地质体走向，应能控制区内主要地质体，且覆盖测线不宜少于 2 条。施工环境不允许时，可适当调整测线。调整量不应超过点、线距的 20%，且线距最大调整量不应大于 1 km，点距最大调整量不应大于 500 m；
- d) 剖面测量宜垂直地质体走向布设，每个剖面微动探测点应不少于 5 个。测线尽可能与已有勘探线和钻孔位置重合；
- e) 点线号宜按自西向东、自南向北增大的顺序编号，现场应设立明显标志；
- f) 野外布置图应注明测点、测线、钻孔等信息，测线应标注端点和转折点；
- g) 测区边界附近发现重要异常时，应延长测线长度，确保异常形态能被完整探测。

5.4.4 开展专项探测时，工作部署还应符合下列原则：

- a) 岩溶、土洞、采空区、地下病害、地下构筑物等探测，测线宜采用网状布置，测点间距应小于探测对象的尺寸；
- b) 地基加固效果检测应在加固前后分别进行探测，测线宜覆盖加固点及其周边区域。

5.5 采集阵列设计

5.5.1 阵列微动探测应根据地质任务、地形地貌、工作区地质构造特征、噪声特征、现场方法试验等，设计合适的采集阵列和参数。采集阵列可采用线性阵列、圆形阵列、“十”字阵列、菱形阵列、L 型阵列和不规则密集阵列等，阵列方式可参照本文件附录 A 设计。

5.5.2 单台微动探测拾震器应布设在设计测点位置。阵列微动探测有中心点的阵列，测点为中心点；无中心点的阵列，测点为阵列的几何中心点。密集台阵微动探测每台拾震器对应一个测点。

注：有中心点的阵列指阵列中心有放置拾震器，如圆形阵列、十字阵列等。对于非对称阵列，中心点可以不是阵列的几何中心，如 L 形阵列，中心点为 L 形拐点；“T”形阵列，中心点为 T 字交点。

5.5.3 阵列微动探测采集阵列宜避开断裂带等地层速度剧烈变化地带，避免跨构造单元布设。

5.5.4 场地存在固定干扰源时，阵列宜避让。若干扰源可作为有效震源时，宜采用线性阵列，阵列延长线宜通过干扰源。

5.5.5 微动探测宜采用圆形阵列，场地允许的情况下，推荐使用嵌套三点圆形阵列。当障碍物较多时，可采用线性阵列、L 形阵列、不规则密集阵列等，拾震器数量不宜少于 10 个。

5.5.6 圆形阵列需 $n+1$ 台拾震器同时观测 ($n \geq 3$)，将一台拾震器布设在中心点，另外 n 台拾震器均匀布设在各采集半径的圆周上。观测半径不宜少于 3 个。在拾震器数量较少的情况下，也可依次进行各半径的数据观测。

5.5.7 最大道间距与探测深度呈倍数关系，浅层探测中，探测深度可为最大道间距的 3 倍~5 倍，随着探测深度增加，倍数减小。可根据最大探测深度和垂向分辨率确定最大和最小道间距。

5.5.8 嵌套三点圆形阵列最大观测半径 r 宜大于等于勘探深度的 $1/3 \sim 1/5$ 。探测深度小于等于 500 m 时，最大观测半径不应小于探测深度的 $1/5$ ；探测深度大于 500 m 时，最大观测半径不应小于探测深度的 $1/3$ 。其它阵列可参考以上参数， r 则为拾震器有效组合中的最大道间距。

5.6 工作精度

5.6.1 工作精度应根据地质勘查任务、勘查阶段、勘查类型、地质条件复杂程度及干扰因素进行设计。应符合相应领域规范规定的精度。

5.6.2 工作精度可采用重复观测的方式评价，即同一地点不同时间重新布设仪器重复观测，单台微动探测和阵列微动探测分别按公式（1）和公式（2）计算两次成果曲线均方相对误差，观测数据和检查数据计算参数应一致。重复观测点应均匀分布在工区，不少于总测点的5%。总测点数少于10时，重复观测点为1个~2个。

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_i - X'_i|}{\frac{X_i + X'_i}{2}} \times 100\% \right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

M ——均方相对误差；

n ——参与统计的频点数；

X_i ——观测点H/V谱比曲线第*i*个频点对应的值；

X'_i ——检查点H/V谱比曲线第*i*个频点对应的值。

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|V_{Ri} - V'_{Ri}|}{\frac{V_{Ri} + V'_{Ri}}{2}} \times 100\% \right)^2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

M ——均方相对误差；

n ——参与统计的频点数；

V_{Ri} ——观测点频散曲线第*i*个频点对应的相速度，米每秒（m/s）；

V'_{Ri} ——检查点频散曲线第*i*个频点对应的相速度，米每秒（m/s）。

5.6.3 工作精度也可通过钻探验证等其他工作手段综合评价。

5.6.4 微动探测工作精度分Ⅰ级和Ⅱ级两个级别。

a) 单台微动探测工作精度分级为：

Ⅰ级：H/V谱比曲线重复性好，有效频段满足勘探要求，地形条件简单、无强烈震动干扰的地区，均方相对误差不宜大于5%，地形起伏较大或（和）有强烈震动干扰的地区，均方相对误差不宜大于10%。

Ⅱ级：H/V谱比曲线重复性较好，有效频段满足勘探要求，地形条件简单、无强烈震动干扰的地区，均方相对误差不宜大于10%，地形起伏较大或（和）有强烈震动干扰的地区，均方相对误差不宜大于15%。

b) 阵列微动探测工作精度分级为：

I 级：频散曲线重复性好，有效频段满足勘探要求，低频段频点密度高，地形条件简单、无强烈震动干扰的地区，均方相对误差不宜大于5%，地形起伏较大或（和）有强烈震动干扰的地区，均方相对误差不宜大于10%。

II 级：频散曲线重复性较好，有效频段满足勘探要求，低频段频点密度较高，地形条件简单、无强烈震动干扰的地区，均方相对误差不宜大于10%，地形起伏较大或（和）有强烈震动干扰的地区，均方相对误差不宜大于15%。

5.7 设计书编写

5.7.1 设计书应根据项目任务书和任务书下达部门的要求，在现场踏勘、基础上编写。文字应叙述准确、完整、真实，图表清晰。

5.7.2 设计书应根据以往工作程度和存在的问题，结合目标任务，在分析已有资料，现场踏勘的基础上编制。内容包括：微动探测的目标任务、工作内容、工作量、测点测线部署、采集方案与质量控制、数据处理和资料解释、预期成果、组织保障措施和经费预算等。应按照附录 B 给出的提纲编制。

5.8 设计审批与变更

5.8.1 设计书经审查与批准后方可实施。

5.8.2 在设计执行过程中，如有变动应及时提请变更，经批准后方可实施。

6 仪器设备

6.1 仪器选择

6.1.1 单台微动探测宜采用三分量拾震器，通频带应根据探测深度和场地确定，宜覆盖 0.2 Hz~25 Hz，信噪比应大于 80 dB，低频特性应稳定可靠。放大器应采用带低通滤波功能的多通道放大器，其各通道幅值一致性偏差不应大于 3%，各通道相位一致性时间偏差不应大于 0.1 ms，等效输入噪声应低于 1 μ V，电压增益应大于 80 dB。

6.1.2 阵列微动探测仪器设备，可采用多通道微动探测系统或一体化拾震器。

a) 多通道微动探测仪器的技术指标应符合下列规定：

- 1) 放大器的通道数不少于 4 通道；
- 2) 通道间幅值偏差不大于 5%，相位差不大于 0.1 ms；
- 3) 通道间串音抑制不小于 100 dB；
- 4) 动态范围不小于 120 dB，A/D 转换位数不小于 24 位，采样间隔不宜大于 20 ms；
- 5) 系统噪声不大于 1 μ V；
- 6) 采样率应满足探测精度要求，采集时间长度可控。

b) 拾震器应符合下列规定：

- 1) 采用速度型传感器时，电压输出灵敏度不宜小于 2 V/(cm/s)；
- 2) 同一阵列内拾震器之间的固有频率差不宜大于 0.1 Hz，灵敏度和阻尼系数差不宜大于 5%；幅值差不宜大于 5%，相位差不宜大于 0.1 ms；
- 3) 有效频带范围内，频谱曲线应变化平缓。勘探深度小于 100 m 时，最低有效频率宜低于 5 Hz；勘探深度 100 m~500 m 时，最低有效频率宜低于 2 Hz；勘探深度 500 m~1000 m 时，

最低有效频率宜低于 1 Hz；勘探深度为 1000 m~2000 m 时，最低有效频率宜低于 0.5 Hz；勘探深度大于 2000 m 时，最低有效频率宜低于 0.2 Hz。

- c) 一体化拾震器除满足本文件第 6.1.2 a)、6.1.2 b) 的相关规定外，还应满足以下要求：
 - 1) 应具有实时时间校正和多台传感器同步、连续记录功能。时间校正精度应 ≤ 1 ms，时间精度 24 小时误差应在 ± 2.5 ms 以内。
 - 2) 数据存储容量不宜低于 8 GB，持续工作时长不宜少于 24 小时；
 - 3) 具有防震、防潮等性能。

6.1.3 所选用的仪器设备应能满足探测精度要求。

6.2 仪器使用和维护

6.2.1 操作人员应按照仪器说明书使用仪器。每次工作结束后，擦洗干净，易松动部件应检查紧固。

6.2.2 正式施工前，应对所使用仪器的性能进行检查，各项指标应符合规定要求。两台及两台以上仪器在同一工区工作前，应进行仪器一致性检验，检验方式及结果需满足 7.1 相关规定。

6.2.3 仪器设备应妥善保管，要求如下：

- a) 仪器的使用者应对仪器使用期间的安全负责，无关人员不能随意动用仪器；应做好仪器使用、搬运和保管中的防水、防暴晒、防震、防尘处理，不应将仪器放置在潮湿、不清洁和不安全的地方，仪器长距离运输时，需妥善包装，仪器与各零部件之间应添加足够的缓冲材料；
- b) 仪器设备所属的零配件、备件和工具要妥善保管，不得随意弃置或挪作他用。

6.2.4 仪器设备应定期维护，要求如下：

- a) 主要仪器设备应建立技术档案，包括说明书、使用情况、检修记录及标定记录等；
- b) 仪器设备需每三个月通电检查一次，每个工区开工前和收工后，对仪器进行检查，确保仪器工作正常；
- c) 仪器设备发生故障时应及时修理，检修后应重新进行性能校验。

7 野外施工

7.1 一致性试验

7.1.1 阵列微动探测或多台拾震器同时工作的单台微动探测，应进行仪器一致性试验。一致性检查不合格应分析原因，予以检修或更换，应使用一致性检查合格的仪器进行数据采集。

7.1.2 项目施工前，将全部拾震器放置在同一稳定、平坦场地上，同步记录 10 min~30 min，深层探查或环境干扰大时采集时间加长。计算各拾震器的功率谱、相干系数和相位差等，可采用均方相对误差进行评价，有效频率范围内，一致性不应小于 95%。

7.1.3 参数可调的仪器，一致性检查时的仪器参数应与野外施工时的参数相同。

7.1.4 每日施工前，应对施工的仪器进行检验，仪器检验应按说明书进行，应无坏道等仪器本身导致的异常。

7.2 数据采集

7.2.1 应根据设计进行测网或测点布设，当测点遇水域、高架桥、陡崖等特殊地形地貌的场地时，可适当调整采集阵列，避开障碍，并记录实际点位坐标。

7.2.2 测点宜采用全站仪、GNSS 或 RTK 进行测量定位，测量工作应符合 GB 50026 的规定。单台微动探测和密集台阵微动探测定位精度可按 GB 50026 执行，阵列微动探测测点测量精度可适当放宽。阵列测量测点平面误差在相应工作比例尺成果图上应不大于 2 mm，高程误差在探测目标埋深超过 100 m 时应小于埋深的 5%，埋深不足 100 m 时误差应小于 5m。

7.2.3 数据采集前，应确保各拾震器与地面耦合良好，拾震器处于水平状态。仪器进入正常工作状态后，阵列内和拾震器周围应避免人为振动干扰。

7.2.4 应使用 3H 及以上硬度的铅笔，填写野外数据采集记录表，字迹应工整、清晰、不涂改。记录内容应包括阵列类型、拾震器编号及位置、采集开始和结束时间等信息，应记录观测点（拾震器埋置点）附近典型的地形地貌，尤其是可能引起噪声的干扰源等。单台微动探测野外数据采集记录使用表 C.1；最大半径小于 50 m 的阵列微动探测野外数据采集记录使用表 C.2；最大半径大于 50 m 的阵列微动探测野外数据采集记录使用表 C.3。

7.2.5 数据采集后应及时将当天采集数据及实际阵列位置信息传入计算机，检查确认采集数据是否有效，并存盘备份。存储时宜按工程名称或工程代号设置存储文件夹。不合格数据应记录并重新测量。

7.2.6 单台微动探测进行场地评价时，距离观测点 100 m 内应无人为振动干扰。应根据所需频率范围设置低通滤波频率和采样频率，每次记录时间不应少于 15 min，记录次数不应少于 3 次。

7.2.7 阵列微动探测应满足以下要求：

- a) 最大道间距小于 50 m 时，阵列内拾震器位置可采用测量绳、测量尺定位。大于 50 m 时需使用高精度定位仪测量，定位平面中误差不大于阵列最小道间距的 10%；
- b) 采用圆形阵列时，同一阵列内拾震器平面位置移动距离不宜超过所在半径的 5%，若仍无法避开障碍，可将测点（即整个阵列）整体移动。

7.2.8 采集参数设置应与设计方案一致。

7.2.9 多通道微动探测系统除满足 7.2.7 条外，还应符合以下要求：

- a) 电缆连接应与阵列内拾震器设计编号一致；
- b) 拾震器与电缆连接良好，防止漏电、短路和接触不良等；
- c) 仪器应设置在不滤波状态，各道增益设置应一致。

7.2.10 数据采集中能实时显示频散曲线迭加过程的采集系统，应待频散曲线特征基本稳定后，再继续采集 3 min~10 min 后停止。

7.2.11 干扰严重地区应延长采集时间或夜间作业，可根据现场方法试验确定合理的观测时长。

7.3 安全措施

7.3.1 应严格执行国家有关安全法规和标准的要求。坚持“安全第一、预防为主、综合治理”的方针。

7.3.2 应随时观察天气情况，及时进行通讯联络，靠近山区施工，应注意观察地形地貌和警示标志，远离山洪、泥石流、滑坡等地质灾害易发区。

7.4 原始资料质量检查与评价

7.4.1 每天测量完成后，操作人员应通过回放等方式，第一时间检查原始记录有无不正常道等明显异常。并将原始记录进行初步整理，交由室内组（或专人）进行检查和初步验收，并做出评价。发现问题应即时通知操作人员，分析原因，提出改进建议或重新采集。

7.4.2 单台微动探测原始记录质量分为合格和不合格两种。

- a) 合格记录需同时满足以下要求：
 - 1) 仪器检查记录合格；
 - 2) 野外记录表格正确、齐全、整洁；
 - 3) 原始记录信号整体平稳，无明显零值漂移；
 - 4) 能提取稳定的 H/V 谱比曲线，有效频段满足勘探要求。
- b) 不满足以上任一要求，评价为不合格记录。

7.4.3 阵列微动探测原始记录质量评价分为优良、合格和不合格三个等级。

- a) 同时满足以下条件为优良记录：
 - 1) 仪器检查记录合格；
 - 2) 观测系统和采集阵列正确，符合设计要求；
 - 3) 野外记录表格正确、齐全、整洁，电子记录应与野外记录表格一致；
 - 4) 原始记录信号整体平稳，阵列内各拾震器记录无明显的方位性干扰，或明显的方位性干扰记录时长不大于采集时长 5%；
 - 5) 无不正常道记录；
 - 6) 有效频段满足勘探需要。
- b) 有下列缺陷之一者为不合格记录：
 - 1) 无仪器检查记录或仪器检查记录不合格的记录；
 - 2) 观测系统不正确或仪器处于不正常状态所获得的记录；
 - 3) 野外记录表格信息不正确或不齐全，导致不能利用的记录；
 - 4) 同一阵列内存在强烈的方位性干扰噪声，导致数据无法使用；
 - 5) 采用 SPAC 法时，中心点拾震器记录不正常；
 - 6) 有效频段不能满足勘探需要。
- c) 不够优良条件，又不属于不合格的记录为合格记录。

注：方位性干扰指同一阵列内所有拾震器中，只有某个方位的记录异常，如记录幅值突然增大数倍以上；不正常道指原始记录存在由仪器本身导致的异常，如记录幅值为零等。

7.4.4 优良记录不应低于 70%。对于总测点数大于 50 个的剖面或面积性测量，不合格率应小于 3%。对于单点微动探测或总测点数小于 50 个的剖面或面积性测量，不合格测点应重新采集。

7.5 野外资料验收

7.5.1 验收的野外原始资料包括：

- a) 按照附录 C 填写的微动探测野外数据采集记录表；
- b) 按照附录 D 填写的微动探测原始记录评级表；
- a) 仪器一致性试验原始记录及试验结果；
- b) 测量点采集数据原始记录波形（电子文档）。

7.5.2 验收的基础资料包括：

- a) 实际材料图；
- b) 野外工作手图；
- c) 野外工作小结；
- d) 其他相关资料。

7.5.3 项目承担单位先组织内部验收，形成内部验收意见，合格后向项目主管单位提交验收申请，主管单位组织专家对野外资料进行验收，并形成最终验收意见。

7.5.4 野外资料验收合格后，方可结束野外工作。

8 数据处理与解释

8.1 数据处理

8.1.1 单台微动探测

8.1.1.1 测试数据处理宜采用功率谱分析法。每个样本数据不应少于 1024 个点，采样频率宜取 50Hz～100Hz，并应进行加窗函数处理，频域平均次数不宜少于 30 次。

8.1.1.2 卓越频率应采用频谱图中最大峰值所对应的频率。当频谱图中出现多峰且各峰值相差不大时，宜在谱分析的同时，进行相关或互谱分析，并经综合评价后确定场地卓越频率。

8.1.1.3 按照公式（3）计算 H/V 谱比。

$$\frac{H}{V} = \sqrt{\frac{S_{NS}(f) + S_{ES}(f)}{S_V(f)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$S_{NS}(f)$ 、 $S_{ES}(f)$ ——分别为频率 f 对应的一对互相正交的水平分量傅里叶功率谱；

$S_V(f)$ ——垂直分量傅里叶功率谱。

8.1.1.4 按照公式（4）计算松散覆盖层厚度。

$$h = \frac{v_s}{4f_r} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

h ——松散覆盖层厚度，单位米（m）；

v_s ——横波速度，单位米每秒（m/s）；

f_r ——卓越频率，单位赫兹（Hz）。

8.1.1.5 在缺乏横波速度资料的区域，可按照经验公式（5）计算覆盖层厚度。

$$h = af_r^b \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

h ——松散覆盖层厚度，单位米（m）；

f_r ——卓越频率，单位赫兹（Hz）；

a 、 b ——经验参数，可根据钻孔资料拟合得到。

8.1.2 阵列微动探测

8.1.2.1 处理软件应具有 SPAC 法或 ESPAC 法或 F-K 法处理功能。采用线性阵列采集微动信号时，处理软件应具有折射微动处理功能，如 $\tau-p$ 分析或多道分析，且应具有校正方位噪音源的功能。密集台阵微动探测时，处理软件应具有校正方位噪音、互相关分析、层析成像等功能。

8.1.2.2 瑞雷波相速度频散曲线提取参见附录 E，包括以下内容：

- a) 有中心点规则阵列采集的数据宜使用 SPAC 法；
- b) 无中心点阵列采集的数据可使用 ESPAC 法。半径划分不宜少于 3 个，尽量使拾震器均匀分布在各半径内；
- c) 采集过程中方位性震源明显或混入较大能量体波时，且拾震器数量不少于 10 个，宜使用 F-K 法。频率波数谱的峰值能量应具有较好收敛性；
- d) 折射微动宜采用多道分析法，密集台阵微动探测宜采用互相关分析，且应校正方位噪音。

8.1.2.3 频散曲线提取应在有效频段内进行。相关函数低频端第一个极大值对应的频率为该道间距的低截频率。

8.1.2.4 视 S 波速度计算：

- a) 面积性测量、剖面测量或者测点较密集可连成剖面的情况下，频散曲线可直接计算视 S 波速度 V_x ，内插形成视 S 波速度平面或剖面图，直接进行地质构造推断解释。
- b) 视 S 波速度 V_x 计算见公式（6）：

$$V_{x, i} = \left(\frac{t_i \cdot V_{R, i}^4 - t_{i-1} \cdot V_{R, i-1}^4}{t_i - t_{i-1}} \right)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

V_R ——相速度，单位米每秒（m/s）；

t_i ——周期，单位s； $i=1, 2, 3, \dots, n$ ，为统计频点， n 为整数。

c) 勘探深度估算公式如下：

$$H = \frac{\alpha V_R}{2f} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

H ——勘探深度，单位米（m）；

V_R ——瑞雷波相速度，单位米每秒（m/s）；

f ——频率，单位赫兹（Hz）；

α ——校正系数，有条件的工作区应与已知钻孔资料对比，做深度校正，提高深度解释的精度

8.1.2.5 面波相速度反演：

- a) 频散曲线可经反演获得阵列下方介质的横波速度结构，从垂向上解释推断地层结构。也可对反演获得的 S 波速度数据进行内插，形成 S 波速度剖面或平面图，从剖面或平面上进行地质解释。
- b) 反演计算宜由浅及深、逐层调试，使正、反演结果逐渐收敛。
- c) 应利用测点附近的钻孔资料或位于同一个构造单元的钻孔资料提供初始模型信息，主要参数包括地层厚度、纵波速度、密度和初始 S 波速度。若缺少钻孔资料，可基于区域地质资料或邻近微动探测点反演成果建立初始模型。地质资料空白区，可用细分法将目的反演深度等分为多个地层，浅部采用较小间隔，深部采用较大间隔。也可参考频散曲线拐点、斜率和频散点疏密特征进行地层初步划分，建立初始模型。
- d) 对于成层性较好的沉积地层，可基于遗传算法反演地层 S 波速度。

8.1.2.6 单台阵列微动应按附录 F 提供成果图册，剖面或面积性阵列微动探测应提供面波速度等值线断面图或平面图。

8.2 资料解释

8.2.1 遵循从已知推断未知的原则，由浅及深、点面结合、综合分析，必要时对重点异常进行现场踏勘。

8.2.2 根据工作区及其邻近区域已知地质、地球物理及钻探等资料，以地质理论为指导，建立的地质-地球物理模型，依据频散曲线特征、H/V 谱比曲线特征、相速度 V_R 、视 S 波速度 V_x 以及剪切波速度 V_s 等信息，进行物性分析和地质推断。可参考附录 G。

8.2.3 H/V 谱比曲线峰值频率对应地层卓越频率，峰值幅值则与场地放大因子有关。通过 8.1.2.4 转换后的深度对应强波阻抗界面，如松散覆盖层与基岩的分界面。H/V 谱比曲线形态可指示地层结构和溶洞等地质灾害体。

8.2.4 频散曲线的拐点、斜率、频散点疏密等特征常对应地层速度变化，根据相速度 V_R 、视 S 波速度 V_x 及剪切波 V_s 速度值的变化特征，可解释地层结构、断裂构造、滑坡、地下空洞等地质异常体。

8.2.5 编制地质-地球物理综合解释成果图，同时对解释成果质量进行评估，说明可能存在的问题与不足。

9 报告编写与资料提交

9.1 报告编写

9.1.1 编写要求

报告的原始和基础性资料，应在外业数据和资料验收合格后使用。报告编写应内容全面，重点突出，论述及推断有理有据，文字简练，逻辑严密，图件清晰，结论客观明确。图件应符合 DZ/T 0069 的要求。

9.1.2 编写内容

应包括前言、地质及地球物理特征、工作方法及质量评述、资料推断解释及结论和建议。具体内容按照附录H给出的提纲编写。

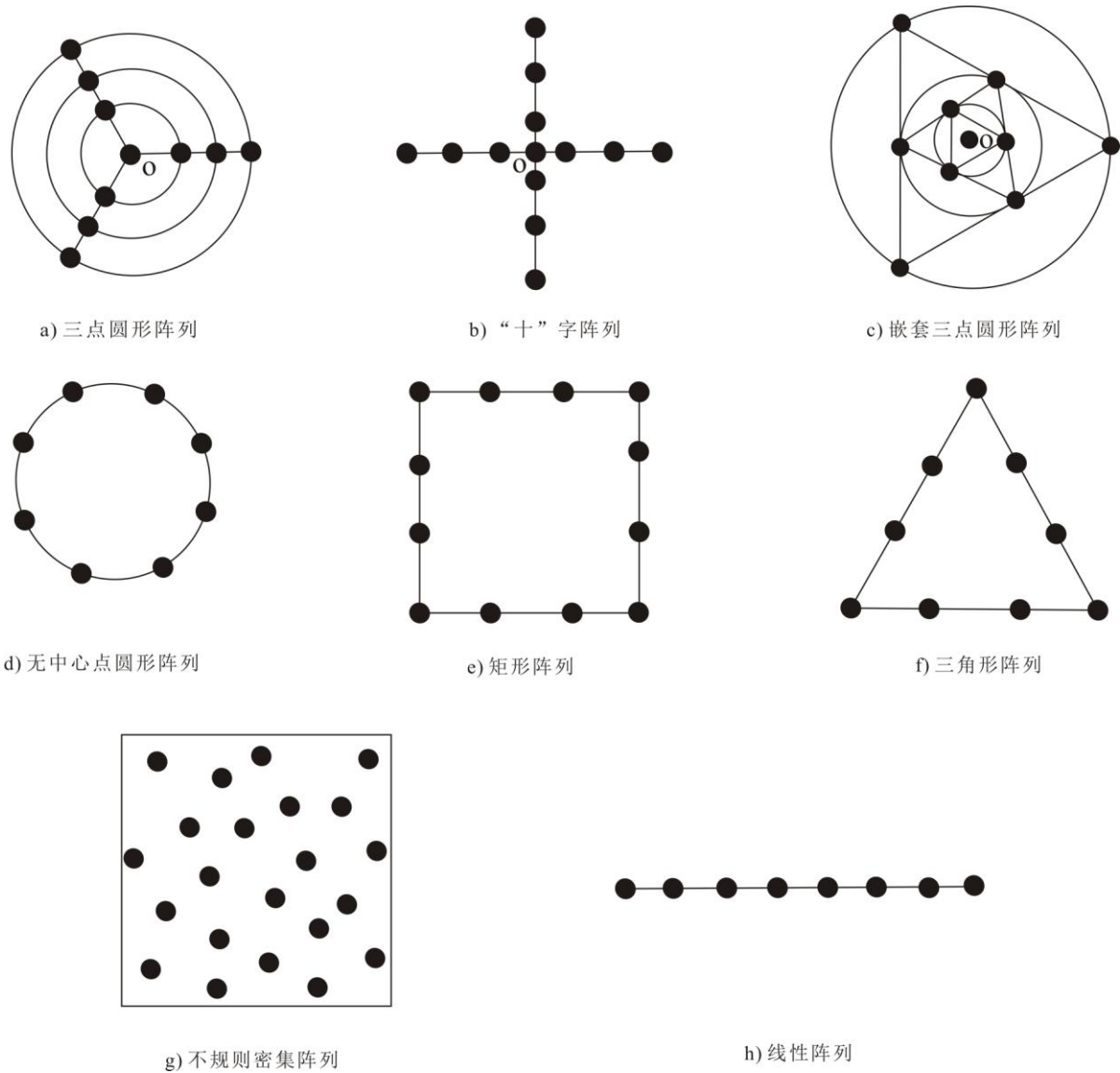
9.2 资料提交

成果报告评审后，根据专家组的评审意见完成成果报告的修改。通过评审后，将成果报告和项目相关资料提交有关部门存档。提交的资料应包括合同或任务书、立项报告、工作设计、过程控制文件、原始资料、成果报告及附图附表、评审意见等。

附 录 A
(资料性)
阵列微动探测数据采集示例

高质量的原始数据采集是微动探测技术的基础，在固有的硬件条件和采集环境下，决定原始数据采集质量的主要因素为阵列布设方式。试验表明，阵列最大道间距越大，越有利于低频微动信号采集，不同道间距组合可得到不同频段的微动信号，进而对不同深度的地质结构进行解释推断。

图 A.1 给出了几种观测阵列示意图，a) 为三点圆形采集阵列；b) 为十字阵列；c) 嵌套三点圆形阵列；d) 为无中心点圆形阵列；e) 为矩形阵列；f) 为三角形阵列；g) 为不规则密集阵列；h) 线性阵列。其中 a)、b)、c) 有中心点，可采用传统 SPAC 法；d)、e)、f)、g) 无中心点，宜采用扩展空间自相关即 (ESPAC) 法或 F-K 法。



图A.1 微动探测常见观测阵列示意图

根据不同的信号来源、采集环境、勘探目的及后续处理手段，可通过现场试验选择相应的采集阵列。a) 为传统的 3 点圆形阵列。b) 东西和南北向拾震器间隔相等的情况下可理解为 4 点圆形阵列，更适合沿城市道路施工。c) 实质上是对 a) 的一种扩展，使得信号采集效率成倍提高。折射微动采用线性阵列 h)，可基于多道分析提取频散曲线。密集台阵微动探测则是阵列微动探测的一种特殊形式，布阵形式类似 g) 不规则密集阵列，但拾震器数量大，常同时布设近百台甚至上千台拾震器。常规的阵列微动探测将阵列的中心或几何中心作为测点，计算结果代表测点下方地层信息。密集台阵则是直接通过相应的数据处理和反演技术获取整个阵列下方地层速度结构。

附 录 B
(规范性)
微动探测技术设计提纲

B.1 项目概况

简述项目来源、目标任务、实物工作量等。工作区自然地理、经济地理概况等。

B.2 工作区概况

工作区地质、地球物理特征，以往工作程度及评述等。分析方法的有效性，论证开展微动探测技术的地球物理前提。

B.3 工作部署

包含执行的技术标准、现场踏勘情况及工作部署等内容。阐述要解决的具体地质问题，分析微动探测技术的合理性和有效性；分析技术试验数据和野外工作方法的选择，包括测网（点）布设、仪器性能及适用要求、数据采集参数及精度设计等；编制进度计划，如时间分配及主要时间节点。

B.4 数据处理与解释

阐述数据处理和解释的方法及要求，成果资料的质量保证措施等。

B.5 预期成果

阐明期望达到的成果内容，如需要提交的原始资料和成果资料等。

B.6 控制措施

包含组织管理和质量保证，阐述人员安排，质量、环境、职业健康和安全目标控制措施等。

B.7 经费预算

阐述预算编制依据、采用的费用标准和测算依据、预算的合理性和可靠性分析等。

B.8 附图及附表

最大半径小于50 m的阵列微动探测野外数据采集记录表见表C. 2。

表 C. 2 阵列微动探测野外数据采集记录表

工 区：

工作日期：

观 测 者：

检 查 者：

线号/点号		中心点高程		
中心点坐标	X（或经度）		Y（或纬度）	
观测方式和半径				
野外布设示意图				

第 页

表 C.2 阵列内各拾震器详细信息记录表（续）

开始记录时间_____结束记录时间_____仪器型号_____采样间隔_____

阵列 编号	观测半径 m	仪器 编号	高程	场地条件、天气及背景噪声等采集环境描述

最大半径大于50 m的阵列微动探测野外数据采集记录表见表C. 3。

表 C. 3 阵列微动探测野外数据采集记录表

工 区：

工作日期：

观 测 者：

检 查 者：

线号/点号		中心点高程		
中心点坐标	X（或经度）		Y（或纬度）	
观测方式和半径				
野外布设示意图				

表 C.3 阵列内各拾震器详细信息记录表（续）

开始记录时间_____结束记录时间_____仪器型号_____采样间隔_____

阵列 编号	观测 半径 m	仪器 编号	Y （或纬度）	X （或经度）	高程	场地条件、天气及背景噪声等采集 环境描述

附 录 D

(规范性)

微动探测技术原始记录评价表

微动探测原始记录评价表见表D.1。

表D.1 微动探测原始记录评价表

工区：		测线号：		测点号：		评价者：		检查者：	
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"/>		1~4中任意一项为“否”，或者5~7中任意一项为“是”，则原始记录不合格，无以上情况，则原始记录为合格。			
2	观测系统和采集阵列是否正确（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	频带范围是否能满足勘探需要。	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
5	同一阵列内是否有较多不正常道记录，导致数据无法使用。	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
6	同一阵列内是否有数据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"/>						
7	采用 SPAC 法时，中心点拾震器记录是否不正常。	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
8	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"/>		1~4项全为“是”，5~7项全为“否”，且8~11项全为“是”，则原始记录为优良。			
9	同一阵列内各道记录是否无明显方位性干扰，或明显方位性干扰记录时长不大于采集时长的 5%。	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
10	是否无不正常道记录。	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
11	野外记录是否规范整洁。	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						

附 录 E
(资料性)
微动探测技术方法原理

E.1 阵列微动探测频散曲线提取

E.1.1 基于SPAC法提取频散曲线

假设沿不同方向以不同频率传播的波在统计意义上是独立的，将空间相关定义如下：

$$\phi(r, \lambda) = \overline{\mu(x, y, t) \cdot \mu(x + r \cos \theta, y + r \sin \theta, t)} \quad \text{..... (E.1)}$$

$\mu(x, y, t)$ 为圆心处波场信号， $\mu(x + r \cos \theta, y + r \sin \theta, t)$ 为半径为 r 的圆周上的波场信号。上划线表示时间平均，对空间相关做方位平均，得到：

$$\overline{\phi(r)} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \phi(r, \theta) d\theta \quad \text{..... (E.2)}$$

可以用 $\phi(r)$ 的 Hankel 变形来表示波动时间域的功率谱 $\Phi(\omega)$ ：

$$\Phi(\omega) = \frac{\pi \omega}{c(\omega) u(\omega)} \int_0^\infty \phi(r) J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) r dr \quad \text{..... (E.3)}$$

反之亦然：

$$\phi(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \Phi(\omega) J_0\left(\frac{\omega r}{c(\omega)}\right) d\omega \quad \text{..... (E.4)}$$

其中 ω 为角频率， J_0 为第一类零阶贝塞尔函数。(4) 式表明，相速度 $c(\omega)$ 可以通过测量功率谱 $\Phi(\omega)$ 和空间自相关的方位平均 $\phi(r)$ 来获得，而不需要知道波的传播方向。

FJ Ch ávez-Garc á 等 (2005) 认为对于长时间的观测可等效于台站间的方位平均，对于长时间的微动记录，可用下式计算自相关系数：

$$\rho_{ij}(f) = \frac{u_i(f) u_j^*(f)}{\sqrt{u_i(f) u_i^*(f) u_j(f) u_j^*(f)}} = J_0\left(\frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)}\right) \quad \text{..... (E.5)}$$

式中： $\rho_{ij}(f)$ 是自相关系数，是频率 f 的函数； $u_i(f)$ 与 $u_j(f)$ 表示台站 i 与台站 j 的频率域微动数据，*表示共轭； ω_0 为角频率； r 为台站 i 与台站 j 之间的距离； $c(\omega_0)$ 为 Rayleigh 面波相速度。当满足长时间观测时，自相关系数谱的虚部为零，实部近似为第一类零阶贝塞尔函数，即：

$$\rho_{ij}(f) \approx \left[\frac{u_i(f) u_j^*(f)}{\sqrt{u_i(f) u_i^*(f) u_j(f) u_j^*(f)}} \right] \approx J_0\left(\frac{2\pi f r}{c(f)}\right) \quad \text{..... (E.6)}$$

已知第一类零阶贝塞尔函数 $\rho_{ij}(f) = J_0(x) = J_0\left(\frac{2\pi fr}{c(f)}\right)$ ，则由 $x = \frac{2\pi fr}{c(f)}$ 通过分析拟合贝塞尔曲线

的零值点和极值点，得到对应的台间距 x 和频率 f 值，进而计算得到每个台站对的瑞雷波相速度频散曲线 $c(f)$ ，从而获得相速度的频散曲线。由于频散曲线求取的过程中存在不确定性，对偏离拟合曲线较远的数据需剔除。然后在相速度频散曲线的约束下，可以通过反演，获得 S 波速度结构。

E.1.2 基于 F-K 法提取频散曲线

假定微动对时间 t 和空间坐标 x, y 是稳定的，求微动的 F-K 功率谱密度函数可先求相关函数，再将其做傅里叶变换。设微动为 $n(x, y, t)$ ，自相关函数为 $R(\xi, \eta, \tau)$ ，F-K 功率谱密度函数为 $P(k_x, k_y, \omega)$ ，则有：

$$R(\xi, \eta, \tau) = E[X(x, y, t)X(x + \xi, y + \eta, t + \tau)] \quad \dots\dots\dots (E.7)$$

$$P(k_x, k_y, \omega) = \iint \int_{-\infty}^{+\infty} R(\xi, \eta, \tau) \exp\{i(\omega\tau - k_x\xi - k_y\eta)\} d\tau d\xi d\eta \quad \dots\dots\dots (E.8)$$

求取 F-K 功率谱的方法有多种，最常见的有定向法（BFM: Beam Forming Method）和最大似然法（MLM: Maximum）。定向法最简单，它将多点台阵得到的地震波当作一台地震仪测得的资料来研究。将各点的数据适当集中起来，求出其中功率最强的波的传播速度和方向。最大似然法由 Capon 于 1969 年提出，比定向法分辨率高，又称高精度频率-波数法。

为便于理解，假设长度为 N 的数据 d_{ij} ，其平均值为 S_i ，微动的协方差矩阵 ρ 服从高斯分布，此时， $M * N$ 个变量 d_{ij} 的概率密度函数为：

$$f = \frac{|\Phi|^{1/2}}{(2\pi)^{MN/2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^M \sum_{k,l=1}^N \Phi_{i,j}^{k,l} (d_{k,i} - s_k)(d_{l,j} - s_l)\right] \quad \dots\dots\dots (E.9)$$

式中， i, j 为测点编号， k, l 与时间对应， $\Phi_{i,j}^{k,l}$ 是协方差矩阵的逆矩阵--矩阵 Φ 的元素，而协方差矩阵元素为 $p_{ij}^{kl} = E[(d_{k,i} - s_k)(d_{l,j} - s_l)]$ 。考虑最简单的测点只有一个情况，即 $M = 1$ ，此时：

$$f = \frac{|\Phi|^{1/2}}{(2\pi)^{N/2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^M \Phi^{kl} (d_k - s_k)(d_l - s_l)\right] \quad \dots\dots\dots (E.10)$$

Capon 于 1969 年使用功率谱最大似然推定值实际是当信号波形做振幅为 1 的正弦型振动时（ $f_k = \exp[i\omega(k-l)\Delta t]$ ）推定信号的方差，则功率谱推定值为：

$$(f^T \Phi f^*)^{-1} = \left(\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \Phi^{kl} \exp[i\omega(k-l)\Delta t] \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (E.11)$$

式中， f 为复数，几号*表示共轭复数。将上式推广到二维空间，即：

$$p'(k_x, k_y, \omega) = \left(\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \phi_{ij}(\omega) \exp[ik_x(x_i - x_j) + ik_y(y_i - y_j)] \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (E.12)$$

式中 $\phi_{ij}(\omega)$ 为矩阵 $\Phi(\omega)$ 的元素， (x_i, y_i) 为测点 i 的位置坐标，而 $\Phi(\omega)$ 是协方差矩阵 $\rho_{\tau,ij}$ 做傅里叶变换产生的矩阵的逆矩阵，即 $\rho_{\tau,ij} = E[X_{t,i} \cdot X_{t+\tau,j}]$ ， $X_{t,i}$ 是测点 i 处的微动。

由于微动中面波能量占主导，在功率谱上对应最大值（ $k_0 = k_{x_0} + k_{y_0}$ ），此时相速度为：

$$c_0 = \frac{\omega_0}{|k_0|} = \frac{2\pi f_0}{|k_0|} = \frac{2\pi}{T_0 \sqrt{k_{x_0}^2 + k_{y_0}^2}} \quad \dots\dots\dots (E.13)$$

E.1.3 折射微动

折射微动 (ReMi) 采用 $p-f$ 变换法提取面波的频散曲线, 也称 $p-f$ 速度谱分析法。首先通过 $\tau-p$ 变换将 $x-t$ 域波场变换到 $\tau-p$ 域, 将球面波分解成平面波, 再将 $\tau-p$ 域振幅进行傅里叶变换, 最后在 $p-f$ 域拾取频散曲线。

$\tau-p$ 变换是在每一个测点对距离 x 做线性积分:

$$S(p, \tau) = \int_x \varphi(x, t) dx \quad \dots\dots\dots (E.14)$$

式中, φ 为观测到的波场, S 为变换后的波场, $t = \tau + 2px$, τ 为截止时间, $p = dt/dx$ 为 x 方向上的慢度, 即速度的倒数, 可以理解为折射波同相轴斜率。 $t = idt$, $x = jdx$ (i, j 为整数), 通常 dt 为 0.001 s ~ 0.01 s, dx 为 20m。

式 (14) 离散形式为:

$$S(p, \tau) = \sum_{j=0}^{nx-1} \varphi(x, t) \quad \dots\dots\dots (E.15)$$

式中, $p = p_0 + ldp$ ($l = 0, 1, 2, \dots$), p 从 $p_0 = -p_{\max}$ 开始计算, 参数 p_{\max} 设定为最大慢度, 最后反演得到最小速度。对 $S(p, \tau)$ 在特征时间 τ 内做傅里叶变换, 即有:

$$F_s(p, f) = \int_{\tau} S(p, \tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad \dots\dots\dots (E.16)$$

对上式离散化有:

$$F_s(p, f) = \sum_{k=0}^{n-1} S(p, \tau) e^{-i2\pi mdf} kdt \quad \dots\dots\dots (E.17)$$

式中, $f = mdf$, $\tau = kdt$ 。该一维傅里叶变换与慢度无关, 如果想得到好的频率域解, 需要有比一般地震折射更多的采样数据。例如, 当采样间隔为 0.01 s 时, 采样点数至少 4000。定义能量谱 S 为振幅的平方:

$$S_s(p, f) = F_s^*(p, f) \cdot F_s(p, f) \quad \dots\dots\dots (E.18)$$

对采集数据沿正反方向的傅里叶变换进行叠加, 为了将来自拾震器正反两个方向的地震波能量进行叠加, 需要考虑 p 的符号。将所有拾震器接收到的能量进行叠加, 获得总能量。Louie 等对能量谱进行了标准化处理, 计算能量谱比率:

$$R(|p|, f) = S(|p|, f) np / [\sum_{l=0}^{np-1} S(|p| = ldp, f)] \quad \dots\dots\dots (E.19)$$

由于使用简单线型阵列, 当信号源与采集阵列不在一条直线上时, $p-f$ 图中峰值对应的视速度会大于真实相速度, 因此, 不能仅选取单个频率上最大谱率处的相速度作为频散曲线点, 需找到谱率峰值处最小速度做出一条包络线。通常在 $p-f$ 能量谱比率图中, 每一个频率处拾取三个点: 谱率即将开始从较低值上升时的相对较小相速度点、谱率上升速度最快时的相速度点和谱率峰值处的最大相速度, 画出频散曲线。这一做法同时也避免了高阶面波对基阶面波带来的影响。当信号源与采集阵列位于同一条直线上时, 基阶面波的频散曲线为 $p-f$ 谱上的能量峰值。

E.2 单台微动探测

单台微动探测基于三分量台站记录的微动信号进行地下地质结构探测，其主要是指H/V谱比法（又称Nakamura法、HVSR）。H/V谱比法计算水平分量和垂直分量的功率谱，然后做二者之比，即得到H/V谱比曲线，该方法由于简单易行、信息丰富而被广泛采用，现已发展为最常见的方法之一。

H/V谱比法在地震小区划研究方面获得了广泛应用。地震小区划的目的是为城镇、厂矿企业、经济技术开发区等土地利用规划的制定提供基础资料，为城市和工程震害的预测和预防、救灾措施的制定提供基础资料，为地震小区划范围内的一般建设工程的抗震设计、加固提供设计地震动参数。除了对地质构造、地震活动性的研究外，更要重视对场地条件的研究，特别是局部场地条件对地震放大作用的影响。从谱比曲线可以识别出峰值频率，峰值频率和场地卓越频率有着良好的对应关系，对于同一场地峰值频率一般保持稳定，并且峰值频率和沉积层厚度存在指数关系；同时，谱比曲线的振幅对沉积场地放大系数具有参考作用。此外，由于H/V谱比曲线类似于面波频散曲线，也是地下结构的反映，但是谱比曲线并不能直接反映地层的速度信息，需要反演之后才能得到地层的速度结构。近年来，也有学者利用H/V谱比法探测用于空洞、岩溶等地质灾害调查中。谱比法和阵列方法相结合，可以有效提高地下结构探测的精度和深度。

对于多层各向同性的半无限弹性介质模型，可基于 Harkrider 于 1964 年提出的介质响应函数推导面波理论 H/V 谱比。假设角频率为 ω 的水平（ $L_H(\omega)$ ）和垂直（ $L_V(\omega)$ ）点源均匀分布在距离原点（即观测点）一个波长以外的区域。由于体波较面波能量衰减更快，在距离震源一个波长范围外，波场主要能量为面波（瑞雷波和勒夫波）。因为点源服从随机分布，整个过程服从平稳随机过程，因此依据统计独立性原则，所有点源在垂直和水平方向上相应的功率谱函数如下：

$$P_{VR}^V(\omega) = \sum_{m=0}^m \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\lambda R_m}^{\infty} P_{VR_{mi}}^V(\omega) r_i dr_i = \gamma L_V^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{A_{Rm}}{k_{Rm}} \right)^2 \quad \text{..... (E.20)}$$

$$P_{HR}^V(\omega) = \sum_{m=0}^m \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\lambda R_m}^{\infty} P_{HR_{mi}}^V(\omega) r_i dr_i = \gamma L_V^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{A_{Rm}}{k_{Rm}} \right)^2 \left(\frac{\mu}{w} \right)_m^2 \quad \text{..... (E.21)}$$

$$P_{VR}^H(\omega) = \sum_{m=0}^m \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\lambda R_m}^{\infty} P_{VR_{mi}}^H(\omega) r_i dr_i = \gamma L_H^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{A_{Rm}}{k_{Rm}} \right)^2 \left(\frac{\mu}{w} \right)_m^2 \quad \text{..... (E.22)}$$

$$P_{HR}^H(\omega) = \sum_{m=0}^m \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\lambda R_m}^{\infty} P_{HR_{mi}}^H(\omega) r_i dr_i = \gamma L_H^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{A_{Rm}}{k_{Rm}} \right)^2 \left(\frac{\mu}{w} \right)_m^4 \quad \text{..... (E.23)}$$

$$P_{HL}^H(\omega) = \sum_{m=0}^m \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\lambda L_m}^{\infty} P_{HL_{mi}}^H(\omega) r_i dr_i = \gamma L_H^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{A_{Lm}}{k_{Lm}} \right)^2 \quad \text{..... (E.24)}$$

式中， $P_{VR_{mi}}^V(\omega)$ 和 $P_{HR_{mi}}^V(\omega)$ 分别为第 i 个垂直点源产生的 m 阶瑞雷波在角频率 ω 处的垂直和水平分量谱， $P_{VR_{mi}}^H(\omega)$ 和 $P_{HR_{mi}}^H(\omega)$ 分别为第 i 个水平点源产生的 m 阶瑞雷波在角频率 ω 处的垂直和水平分量谱， $P_{HL_{mi}}^H(\omega)$ 为第 i 个水平点源产生的 m 阶勒夫波在角频率 ω 处的垂直和水平分量谱， θ 为点源分布方位角， r_i 为原点到第 i 个电源的距离， $\gamma = (2/h) \exp(-4\pi h)$ ， h 为土层的散射阻尼比， $\frac{\mu}{w}$ 为瑞雷波在自由表面的横纵比， A 为介质响应函数， k 为波数。

则面波纵、横向功率谱可以表示为：

$$P_{VS}(\omega) = P_{VR}(\omega) = P_{VR}^V(\omega) + P_{VR}^H(\omega) = \gamma L_V^2 \sum_{m=0}^M \left(\frac{A_{Rm}}{k_{Rm}} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{\alpha^2}{2} \right) \left(\frac{\mu}{w} \right)_m^2 \right] \quad \text{..... (E.25)}$$

$$\begin{aligned}
P_{HS}(\omega) &= P_{HR}(\omega) + P_{HL}(\omega) = P_{HR}^V(\omega) + P_{HR}^H(\omega) + P_{HL}^H(\omega) \\
&= \gamma L_V^2 \sum_{m=0}^M \left\{ \left(\frac{A_{Rm}}{k_{Rm}} \right)^2 \left(\frac{\mu}{w} \right)_m^2 \left[1 + \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{\mu}{w} \right)_m^2 \right] + \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{A_{Lm}}{k_{Lm}} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (E.26)
\end{aligned}$$

式中, $\alpha = L_H / L_V$, 是源振动特性的反映, 在某一范围内是常数。则瑞雷波 H/V 谱比、瑞雷波与勒夫波谱比以及面波 H/V 谱比可表示为:

$$\left(\frac{H}{V} \right)_R(\omega) = \sqrt{\frac{P_{HR}(\omega)}{P_{VR}(\omega)}} \dots\dots\dots (E.27)$$

$$\left(\frac{R}{L} \right)_R(\omega) = \sqrt{\frac{P_{HR}(\omega)}{P_{HL}(\omega)}} \dots\dots\dots (E.28)$$

$$\left(\frac{H}{V} \right)_S(\omega) = \sqrt{\frac{P_{HS}(\omega)}{P_{VS}(\omega)}} = \sqrt{\frac{P_{HS}(\omega) + P_{HL}(\omega)}{P_{VS}(\omega)}} \dots\dots\dots (E.29)$$

由式 (25) 和 (26) 可知, 确定面波 H/V 谱比需要确定微动载源的横纵比 α , 但 α 不容易测得, 可先通过 $\frac{R}{L}$ 计算, 据研究表明, 在 0.1~5s 时, $\frac{R}{L}=0.7$, 故可以设定 $\frac{R}{L}=0.7$ 求解 α 。

微动面波信息以瑞雷波和勒夫波为主, 而 H/V 谱比是对微动横纵向功率谱的直观显示, 蕴含了瑞雷波和勒夫波对地层的响应和其在微动中的比重, 以及它们对 H/V 谱的贡献和影响。

Arai 等将微动 H/V 谱比定义为:

$$(H/V)_m(\omega) = \sqrt{\frac{P_{NS}(\omega) + P_{EW}(\omega)}{P_{UD}(\omega)}} \dots\dots\dots (E.30)$$

式中, $P_{UD}(\omega)$ 为微动垂直分量的傅里叶功率谱, $P_{NS}(\omega)$ 和 $P_{EW}(\omega)$ 为微动两个相互正交的水平分量的傅里叶功率谱。角频率为 ω 的 X 方向振动的傅里叶功率谱为:

$$P_X(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |S_{Xl}(\omega)|^2 \dots\dots\dots (E.31)$$

式中, L 为不相重叠的数据段的总数, S_{Xl} 为 X 方向振动的第 l 个数据段的快速傅里叶变换。

E.3 微动数据反演

E.3.1 微动反演现状

利用台阵观测得到的微动信号提取出频散曲线后, 选取合适的反演方法以得到地下结构信息。最初的反演主要是利用半波长法、拐点法和近似计算法, 这些方法解释的结果误差大。由于瑞雷波频散曲线和地下介质的横波速度结构是高度非线性的关系, 直接采用局部线性化方法, 如最小二乘法、Levenberg-Marquardt 法和 OCCAM 算法, 会陷入局部极值而不能找到最优解, 因此引入非线性全局优化算法, 这类方法对初始模型的依赖性不强, 具有较强的全局寻优和非线性反演映射能力。

E.3.2 基于遗传算法反演相速度

遗传算法通过模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程来搜索最优解, 是随机反演方法中速度较快、全局搜索能力较强的非线性优化方法之一, 可以较好的解决多极值反演对初始模型的过度依赖。

频散特性与介质的参数相关,在给定某一介质参数后,频散曲线是通过求解面波的频散方程后得到的。频散方程是表征不同频率下相速度与 P 波波速、S 波波速、密度及厚度之间的关系,可用下列非线性特征方程 F 表示:

$$F(f_j, c_j, V_s, V_p, \rho, h) = 0 (j = 1, 2, \dots, m) \quad \text{..... (E.39)}$$

其中, f_j 是频率, c_j 是频率 f_j 对应的相速度; $V_s = (V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sm})^T$ 为 S 波波速向量, V_{sj} 为第 j 层的 S 波波速; $V_p = (V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pm})^T$ 为 P 波波速向量, V_{pj} 为第 j 层的 P 波波速; ρ 为密度向量; h 为厚度向量。求解该频散方程的过程即为求解频散曲线的过程,是一个正演过程。

由于面波频散特性与介质层厚、密度、纵、横波速度有关,其反演计算实质上是多极值问题求解。但是面波频散对 S 波速度最为敏感,其次是地层厚度,故只需反演得到的 S 波速度和地层厚度。初始模型建立时,可以利用观测到的相速度计算得到的最大波长的一半作为反演的最大深度。在此深度范围内,若无钻孔等已知地质资料指导初始模型建立,则以区域地质理论为指导,结合频散曲线特征,用等间隔细分,得到反演层数和厚度,划分原则为:浅部细分,深部粗分;参照统计物理参数,给定初始地层 S 波速度和密度。基于遗传算法反演主要过程为:将初始模型中给定的地层 S 波速度和厚度等物性参数编码成二进制字符串,按照顺层关系串联起来,形成“染色体”,然后进行繁殖、交换和变异来选择优秀个体。通常定义目标函数为:

$$O(m) = \sqrt{\frac{\sum_i^N (V_c^i - V_o^i)^2}{N}} \quad \text{..... (E.40)}$$

其中 V_c^i 为第 i 个频点上根据给定模型参数计算得到的速度值, V_o^i 则为同一频点上实际观测到的速度值, N 为频点个数, m 为个体数,也就是模型参数。

通过个体目标函数值计算生存概率,在种群个体总数保持不变的原则下,随机生成下一代个体。也可以通过交换和变异修改二进制数码串的字节,从而得到新的反演模型。通过适当的设置种群大小、遗传代数、交换概率、变异概率等参数,来保证搜索的完备性,实现全局搜索。

E.3.3 联合反演

除了利用基阶频散曲线反演横波速度结构外,还可以综合利用高阶频散曲线或者 H/V 谱比曲线进行联合反演,以提高反演精度。

将频散曲线与 H/V 谱比曲线进行联合反演,可以有效减少反演的多解性,将基岩面以上地层进行更加详细的区分,以识别第四系土层、风化层、砂岩层等,为城市建设提供详细浅地表信息。瑞雷波的勘探深度受限于波长长度,考虑 H/V 谱比曲线的反演可以大大增加反演深度。另外,在城市勘探中,对于沿道路进行施工的情况,除了土层基岩外,还要考虑道路上的沥青和路基,由于沥青和路基都属于加固层,相比于下伏土层属于高速层。在这种情况下,瑞雷波频散曲线高频段会出现上翘或起伏,这对频散曲线的反演是不利的,谱比曲线此时会在较宽频带内出现幅值小于 1 的情况。因此,可以参考谱比曲线的形状对频散曲线的反演进行改进。

附 录 F
(规范性)
单点阵列微动探测技术成果图册

单点阵列微动探测成果图册，应包括实测与拟合频散曲线对比图、反演横波速度结构图、推断地层结构图（见图F.1）、反演得到的S波速度结构统计表（见表F.1）及综合解释推断成果图件。对于剖面微动探测，除提供以上单点反演成果图件外，还需提供视S波速度剖面图及地质解释成果图，面积性测量需提供各测线视S波速度剖面图及相应剖面、平面解释成果等图件。

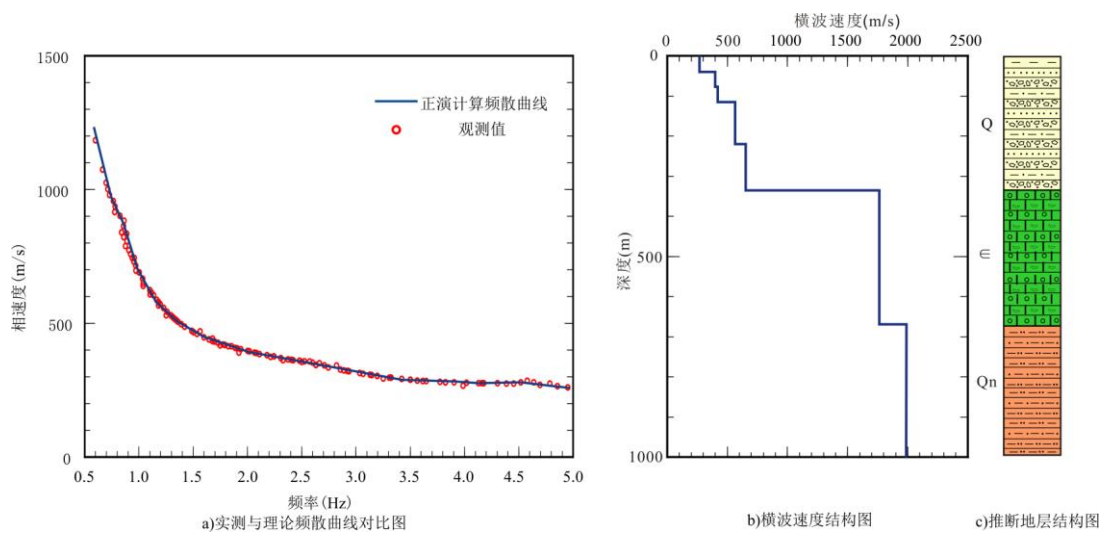


图 F.1 单点微动探测成果示意图

表F.1 微动反演得到的S波速结构统计表

层号	厚度 m	深度 m	速度 m/s	地层解释

附 录 G
(资料性)
微动探测技术资料解释推断

G.1 场地特征和土地性质评价

根据GB/T50011反演剪切波速度可进行场地土地性质评价，详见表G.1。

表 G.1 土的类型划分和剪切波速范围

土的类型	岩石名称和形状	土层剪切波速范围 m/s
岩石	坚硬、较硬且完整的岩石	$V_s > 800$
坚硬土或软质岩石	破碎和较破碎的岩石或软和较软的岩石，密实的碎石土	$800 \geq V_s > 500$
中硬土	中等、稍密的碎石土，密实、中密的砾、粗、中砂， $f_{ak} > 150$ 的黏性土和粉土，坚硬黄土	$500 \geq V_s > 250$
中软土	稍密的砾、粗、中砂，除松散外的细、粉砂， $f_{ak} \leq 150$ 的黏性土和粉土， $f_{ak} > 130$ 的填土，可塑新黄土	$250 \geq V_s > 150$
软弱土	淤泥和淤泥质土，松散的砂，新近沉积的黏性土和粉土， $f_{ak} \leq 130$ 的填土，流塑黄土	$V_s \leq 150$

G.2 基岩面深度与起伏形态探测解释

- G.2.1 频散点由密集变为稀疏，频散曲线斜率明显增大，可结合区域地层波速变化特征，综合解释基岩面。
- G.2.2 可依据频散曲线反演横波速度结构的突然变化推算基岩顶界面埋深和风化带。
- G.2.3 可利用已知钻孔资料总结覆盖层与面波速度或视S波速度的关系，绘制相应的速度等值线，利用速度线推断基岩顶界面的起伏形态。
- G.2.4 可根据H/V谱比曲线峰值频率估算基岩顶界面的埋深。

G.3 地质构造带探测解释

G.3.1 可依据速度图中的速度变化异常推断地质构造带，依据速度变化的幅度和延伸中断情况推断地质构造带的发育位置及规模。

G.3.2 可依据速度的梯度变化段推断地质构造位置，依据梯度变化段的陡缓解释地质构造界面产状的陡缓。

G.4 边坡、滑坡探测解释

G.4.1 可依据平行滑坡走向的测线速度图中低速异常带的速度和分布，推断滑动带的性质、连续性和坡度。

G.4.2 可依据速度图中低速异常带的深度，估算滑坡体厚度，推断滑坡性质。

注：低速异常带深度小于覆盖层厚度属于覆盖层中的滑坡，低速异常带深度与覆盖层厚度接近属于岩土界面滑坡。

G.4.3 可依据垂直滑坡走向的测线速度图中低速异常带，推断滑坡体的横向边界。

G.5 地下空洞、岩溶、采空区等探测解释

G.5.1 可依据速度等值线图中圆形、扁圆形和条带状等低速异常及形态变化，推断探测目标体的空间延伸、发育规模和空间位置等。

G.5.2 可依据频散曲线的连续性和中断性特征，推断测点下目标体顶界面埋深。

G.5.3 可结合H/V谱比曲线的特征峰值及峰值类型、局部速度异常区，推断目标体顶界面。

G.6 地基加固效果探测解释

G.6.1 可依据频散曲线的形态及速度变化确定加固深度。

G.6.2 可依据速度图中等值线的变化，分析加固深度、均匀性和连续性。

G.6.3 应结合已知钻孔和原位测试资料、静载荷试验资料，总结面波速度与地层有关岩土参数的关系，评价地基加固质量。

G.7 地热、固体矿产等资源探测解释

G.7.1 宜以热储层或赋矿层岩性、埋深、厚度和控热、控矿断裂构造位置为探测目标，地热资源微动探测参考NB/T 10701相关条款。

G.7.2 单点微动探测可依据频散曲线的斜率、拐点和疏密变化，结合速度结构图推断地层垂向分层，划分不同速度的岩性界面。

G.7.3 剖面或面积性微动探测可依据速度图，推断解释区内基岩起伏形态和埋深，评价储层埋深和厚度等。

G.7.4 应根据钻探资料总结主要地层界面与速度的关系。可以某一速度等值线确定地层界面，横向速度异常带可依据G.3解释，并结合区域水文地质、工程地质条件综合分析，推断控水断裂和控矿断裂等。

附 录 H
(规范性)
微动探测技术成果报告提纲

H.1 前言

说明项目来源、工作任务及目的等。阐述工作区范围和自然地理条件等。对以往工作程度进行评述，说明存在的问题。列举工作完成情况及主要成果。

H.2 地质及地球物理特征

包括大地构造、地层、构造、岩浆岩等地质体特征，地球物理场特征及波速特征。

H.3 工作及质量评述

论述野外工作方法，包括勘探目的，采集方式和参数，工作难点和对策，完成的工作量及精度等。说明数据处理方法及参数，包括原始资料整理、数据处理方法、相速度反演等。进行质量评述，阐述质检方法、数量及结果，分析微动探测技术的有效性。

H.4 资料解释推断

描述成果资料的异常特征，分析引起异常的地质原因或现象，讨论解释推断结果的可靠性和精确程度，绘制成果图件。

H.5 结论和建议

论述取得的结论和成果，说明存在的问题，对下阶段需要开展的工作提出建议。

H.6 图件

H.6.1 实际材料图，图面要素应包括地理底图、测点位置、检查点位置、图名、图例、责任表等。

H.6.2 仪器一致性测试结果图。

H.6.3 微动数据处理解释成果图，单台测量应包括微动功率谱图和H/V曲线图；单点阵列测量应包括频散曲线图、反演得到的S波速度结构图、反演得到的S波速度统计表格、不少于总测点数30%的初始反演模型等；剖面或面积性阵列测量还应包括S波速度或视S波速度的断面图和平面等值线图；对于线性阵列微动探测，还应提交工区典型区域噪音源分布图以及不少于总测点数60%的频散能量图。

H.6.4 地质推断成果图，包括推断地层柱状图、推断地质剖面图等。

H.6.5 其他成果图件。

参 考 文 献

- [1] CJJ/T 7-2017 城市工程地球物理探测标准
- [2] DZ/T 0153-2014 物化探工程测量规范
- [3] JGJ/T 143 多道瞬态面波勘察技术规程
- [4] SY/T 6441-2000 地震勘探数据处理成果验收规程
- [5] T/CSPSTC 75-2021微动探测技术规程
- [6] 李巧灵, 雷晓东, 李晨,等. 2019. 微动测深法探测厚覆盖层结构——以北京城市副中心为例[J]. 地球物理学进展, 34(4):1635-1643.
- [7] 李巧灵, 张辉, 雷晓东,等. 2022. 综合利用多道瞬态面波和微动探测分析斜坡内部结构例[J]. 物探与化探, 46(01):258-267.
- [8] 李巧灵, 雷晓东, 朱琳,等. 2022. 基于微动探测地下空间异常响应特征研究[J]. 工程勘察, 50(01): 70-78.
- [9] 冉伟彦, 王振东. 1994. 长波微动法及其新进展[J]. 物探与化探, 18(1):28-34.
- [10] 石耀霖, 金文. 1995. 面波频散反演地球内部构造的遗传算法[J]. 地球物理学报, (2):189-198.
- [11] 张辉, 刘志伟, 贺日政,等. 2020. 利用深反射地震数据构建的多阶面波频散曲线反演近地表横波速度结构 ——以跨班公湖—怒江缝合带深反射地震资料为例[J]. 地球物理学报, 63(12):4412-4430.
- [12] 王振东. 2006. 面波勘探技术要点与最新进展[J]. 物探与化探, 30(1):10-16.
- [13] 何正勤, 丁志峰, 贾辉,等.2007. 用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J]. 地球物理学报, 50(2):492-498.
- [14] 田宝卿, 丁志峰. 2021. 微动探测方法研究进展与展望[J]. 地球物理学进展, 36(3):1306-1316.
- [15] 秦彤威, 王少瞳, 冯宣政,等. 2021. 微动H/V谱比方法[J]. 地球与行星物理评论, 52(6):587-622.
- [16] 赵东, 王光杰. 1995. 用遗传算法进行瑞利波反演[J]. 物探与化探, 19(3):178-185.
- [17] 赵东. 2010. 被动源面波勘探方法与应用[J]. 物探与化探, 34(6):759-764.
- [18] 张文辉, 金维浚, 张衡. 2013. 用H/V谱比法与折射微动法确定表土层参数[J]. 地震, 33(4):173-181.
- [19] Aki K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors[J]. Bull.earthquake Res.inst.tokyo Univ, 35:415-456.
- [20] Arai H, Tokimatsu K. 2004. S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(1):53-63.
- [21] Bettig B, Bard P Y, Scherbaum F, et al. 2001. Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): Application to the Grenoble area[J]. Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata, 42(3):281-304.
- [22] Capon J . 1969. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 57(8):1408-1418.
- [23] FJ Ch ávez-Garc á, M Rodr íguez, Stephenson W R. 2005.An Alternative Approach to the SPAC Analysis of Microtremors: Exploiting Stationarity of Noise[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(1):277-293.
- [24] Okada H. 2006. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method[J]. Exploration Geophysics, 37(9):73-85.
- [25] Tokeshi J C, Karkee M B, Sugimura Y. 2006. Reliability of rayleigh wave dispersion curve obtained from f – k, spectral analysis of microtremor array measurement[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 26(2):163-174.
- [26] Louie J N . 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 91(2):347-364.
- [27] Xia J , Miller R D , Park C B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves[J]. Geophysics, 64(3):691-700.