

中华人民共和国水利行业标准

SL 326-2005

替代 DL 5010-92

---

# 水利水电工程物探规程

Code for engineering geophysical exploration of water  
resources and hydropower

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

2005-08-15 发布

2005-11-01 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部

关于批准发布《水利水电工程物探规程》  
SL326—2005 的通知

水国科〔2005〕354号

部直属各单位，各省、自治区、直辖市水利（水务）厅（局），各计划单列市水利（水务）局，新疆生产建设兵团水利局：

经审查，批准《水利水电工程物探规程》为水利行业标准，并予发布。标准编号为 SL326-2005，在水利行业替代 DL5010-92。

本标准自 2005 年 11 月 1 日起实施。

标准文本由中国水利水电出版社出版发行。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

二〇〇五年八月十五日

## 前 言

根据水利部水利水电规划设计管理局 2001 年 3 月下发的水总局科[2001]1 号“关于下达 2001 年度水利水电勘测设计技术规程制定、修订项目计划及主编单位的通知”，以及《水利水电工程物探规程》（DL5010—92）近 10 年的执行情况和物探技术发展的现状，按照水利行业标准《水利技术标准编写规定》（SL1—2002）对其进行修订、完善和补充。

《水利水电工程物探规程》（SL326—2005）共 5 章 35 节和 3 个附录，主要技术内容有：

——确定了术语、符号和代号；

——物探方法和技术中明确了使用的方法种类，每种方法的应用条件和使用的仪器技术指标，确定了现场试验、观测工作、测网布置、参数测试、记录评价、数据处理和解释、报告和图件等的技术要求；

——确定了物探方法在 22 个领域中的综合应用，明确了每一应用领域所采取的方法和技术，并对资料解释和探测精度提出了具体要求；

本次修订对《水利水电工程物探规程》（DL5010—92）删除和增加的具体内容如下：

——删除的内容有：第 2 章物探任务、3.1 节中甚低频的内容、3.3 节的微重力勘探、第 3 章中有关方法技术解释性的条文、4.11 节桩基检测、附录 A 仪器设备的使用与维护、附录 B 有关操作方法的规定、附录 F 图式图例、附录 G 地震勘探爆炸工作安全条例、附录 H 放射性同位素与射线装置放射防护条例；

——增加的内容有：引用标准，术语、符号和代号，在物探方法与技术一章中，有一般规定、高密度电法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法、探地雷达法、瑞雷波法、层析成像、同位素示踪法等。在物探方法的综合应用一章中，有堤坝隐患探测、隧道施工超前预报、建基岩体质量检测、灌浆效果检测、混凝土质量检测、洞室混凝土衬砌质量检测、锚杆锚固质量检测、防渗墙质量检测、堆石（土）体密度和地基承载力检测、钢衬与混凝土接触状况检测、堆石坝面板质量检测等。

本标准所替代标准的历次版本为：

——《水文地质工程地质物探规程》（1982）

——《水利水电工程物探规程》DL5010—92

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持单位：水利部水利水电规划设计管理局

本规程解释单位：水利部水利水电规划设计管理局

本规程主编单位：长江水利委员会长江勘测规划设计研究院

本规程参编单位：黄河水利委员会黄河水利科学研究院

黄河勘测规划设计有限公司

水利部长江勘测技术研究所

中水东北勘测设计研究有限责任公司

中水北方勘测设计研究有限责任公司

中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院

中国水电顾问集团成都勘测设计研究院

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院

本规程出版、发行单位：中国水利水电出版社

本规程主要起草人：肖柏勋 蔡加兴 王波 沙椿

冷元宝 熊永红 魏岩峻 张智

余才盛 张建清 袁景花 郭玉松  
毋光荣 刘康和 王顺立 才致轩  
宋正宗 吴达元 钱世龙 张喜元

本规程审查会议技术负责人：李广诚

本规程体例格式审查人：窦以松

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

# 目 次

1 总 则 .....	7
2 术语、符号和代号 .....	8
2.1 术 语 .....	8
2.2 符号和代号 .....	9
3 物探方法与技术 .....	12
3.1 一般规定 .....	12
3.2 电法勘探 .....	13
3.3 探地雷达 .....	23
3.4 地震勘探 .....	25
3.5 弹性波测试 .....	32
3.6 层析成像 .....	35
3.7 水声勘探 .....	36
3.8 放射性测量 .....	38
3.9 综合测井 .....	40
4 物探方法的综合应用 .....	43
4.1 覆盖层探测 .....	43
4.2 隐伏构造破碎带探测 .....	43
4.3 喀斯特探测 .....	44
4.4 岩体风化带厚度与卸荷带深度探测 .....	45
4.5 软弱夹层探测 .....	46
4.6 滑坡体探测 .....	47
4.7 堤坝隐患探测 .....	47
4.8 隧洞施工超前预报 .....	48
4.9 地下水探测 .....	49
4.10 环境放射性检测 .....	50
4.11 建基岩体质量检测 .....	50
4.12 灌浆效果检测 .....	51
4.13 混凝土质量检测 .....	52
4.14 洞室混凝土衬砌质量检测 .....	53
4.15 洞室松弛圈检测 .....	53
4.16 锚杆锚固质量检测 .....	54
4.17 防渗墙质量检测 .....	55
4.18 堆石(土)体密度和地基承载力检测 .....	55
4.19 钢衬与混凝土接触状况检测 .....	56
4.20 堆石坝面板质量检测 .....	56
4.21 水文地质参数测试 .....	57
4.22 岩土物理和力学参数测试 .....	57
5 物探成果报告 .....	59

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

5.1 成果报告的编写 .....	59
5.2 成果的审查 .....	60
附录 A 物探应用一览表 .....	61
附录 B 物性参数表 .....	63
附录 C 基本公式及计算图表 .....	65
标准用词说明 .....	78

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

# 1 总 则

1.0.1 为规范水利水电工程物探技术要求，保证物探成果质量，充分发挥物探在水利水电工程勘察中的作用，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于水利水电工程勘测、设计、施工、运行各时期的工程地球物理勘探、检测和测试工作。

1.0.3 目前应用的物探方法主要有电法勘探、探地雷达、地震勘探、弹性波测试、层析成像、水声勘探、放射性测量和综合测井等方法。各种方法的应用见附录 A。在实际应用中应根据地球物理特征（常见介质的物性参数见附录 B）、各种方法的特点和现场工作条件，合理选用一种或几种适宜的方法。

1.0.4 水利水电工程物探工作宜接受任务、搜集资料、现场踏勘、编制工作技术大纲、试验工作、现场工作、资料检查和评价、资料分析处理、成果报告校审、提交成果等程序进行。

1.0.5 物探工作技术大纲宜根据物探任务书要求，在搜集和分析与工作相关的地形地质、地球物理、气象、水文、交通等资料基础上，结合实际踏勘情况编制。主要内容宜包括：任务目的、工作量及范围、测区地质概况及地球物理特征、方法与技术、人员与设备配置、工期与进度安排、预期成果等。

1.0.6 物探工作中使用的仪器设备和主要传感器件应在规定的检验期内经有关部门检验合格，且应达到本标准要求的技术指标。

1.0.7 在工作过程中，物探人员应及时收集有关资料，为物探工作布置和资料解释提供条件。

1.0.8 本标准的引用标准主要有下列标准：

《爆破安全规程》（GB 6722）

《环境地面 $\gamma$ 辐射剂量率测试规范》（GB/T 14583）

《环境空气中氡的标准测量方法》（GB/T 14582）

《地下建筑氡及其子体控制标准》（GB/T 16356）

《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871）

《水利水电工程地质勘察规范》（GB/T 50287）

《供水水文地质勘察规范》（GB/T 50027）

《核子水分密度仪现场测试规程》（SL 275）

《水利水电工程制图标准(勘测部分)》（SL 73.3）

《超声波回弹综合法检测混凝土强度技术规程》（JGJ/T 23）

《建筑基桩检测技术规范》（JGJ 106）

《声波法检测混凝土缺陷技术规程》（CECS 21）

1.0.9 水利水电工程物探工作，除应符合本标准外，还应符合国家现行有关标准的规定。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

## 2 术语、符号和代号

### 2.1 术语

#### 2.1.1 电测深法 electrical sounding

在同一测点上逐次扩大电极距使探测深度逐渐加深，观测测点处在垂直方向由浅到深的电阻率变化，并依据目的体与周边介质电阻率的差异，探测地下介质分布特征的一种电法勘探方法。

#### 2.1.2 电剖面法 electrical profiling

将某一装置极距保持不变，沿测线观测地下一定深度内大地电阻率沿水平方向变化，依据目的体与周边介质的电阻率差异，探测地下介质特征的一种电法勘探方法。

#### 2.1.3 高密度电法 resistivity imaging

电测深与电剖面方法的组合，其观测点密度高，可同时探测水平和垂直方向上电性变化的一种电法勘探方法。

#### 2.1.4 激发极化法 induced polarization

依据目的体与周边介质的激发极化效应差异，探测地下介质分布特征的一种电法勘探方法。

#### 2.1.5 自然电场法 self-potential method

通过观测地下介质的电化学作用、地下水中微粒子的过滤作用、岩体水中盐的扩散和吸附作用等产生的自然电场规律和特点，了解水文工程地质问题的一种电法勘探方法。

#### 2.1.6 充电法 mise-a-la-masse method

通过向被探测目的体供电，提高被探测目的体与周边介质的电位差并形成充电效应，探测目的体分布特征的一种电法勘探方法。

#### 2.1.7 可控源音频大地电磁测深法 controlled source audio frequency magnetotellurics (CSAMT)

根据不同频率电磁波具有不同穿透深度的特点，利用人工可控源产生音频电磁信号，探测地面电磁场的频率响应从而获得不同深度介质电阻率分布信息和目的体分布特征的一种电法勘探方法。

#### 2.1.8 瞬变电磁法 transient electromagnetic method (TEM)

利用不接地回线或接地电极向地下发送脉冲电磁波，测量由该脉冲电磁场感应的地下涡流而产生的二次电磁场，探测地下介质特征的一种电法勘探方法。

#### 2.1.9 探地雷达法 ground penetrating radar (GPR)

利用雷达发射天线向地下发射高频脉冲电磁波，由接收天线接收目的体的反射电磁波，探测目的体分布的一种勘探方法。

#### 2.1.10 浅层地震折射波法 shallow seismic refraction

利用地震波的折射原理，对浅层具有波速差异的地层或构造进行探测的一种地震勘探方法，简称浅层折射波法。

#### 2.1.11 浅层地震反射波法 shallow seismic reflection

利用地震波的反射原理，对浅层具有波阻抗差异的地层或构造进行探测的一种地震勘探方法，简称浅层反射波法。

#### 2.1.12 瑞雷波法 Rayleigh wave method

利用瑞雷波在层状介质中的几何频散特性进行分层的一种地震勘探方法，按激振方式分为稳态和瞬态。

#### 2.1.13 垂直反射法 vertical reflection method

利用弹性波的反射原理，采用极小等偏移距的观测方式对目的体进行探测，根据反射信息的相位、振幅、频率等变化特征进行分析和解释的一种弹性波勘探方法。

#### 2.1.14 弹性波测试 elasticity wave testing

利用弹性波运动学和动力学特征对岩土体或混凝土进行波速测试或缺陷探测的方法。

### 2.1.15 层析成像 computerized tomography (CT)

利用弹性波或电磁波的透射原理, 对被测区域进行断面扫描, 重建介质的波速或能量吸收图像的方法。

### 2.1.16 水声勘探 sonic echo exploration

利用声波反射原理专门探测水底地形地貌和进行水下地层分层的一种勘探方法, 又称水下浅地层剖面勘探。

### 2.1.17 放射性测量 radioactivity survey

利用介质的天然或人工放射性特征进行勘探的方法。

### 2.1.18 同位素示踪法 isotope tracer technique

采用人工放射性同位素( $^{131}\text{I}$ 、 $^{182}\text{I}$ 、 $^{85}\text{Br}$  等)标记天然流场或人工流场中的地下水流, 用示踪或稀释原理来测试地下水流向、流速的一种放射性测量方法。

### 2.1.19 综合测井 comprehensive logging

采用两种或两种以上的地球物理测井技术, 以测量钻孔中介质的物理特性的综合探测方法。

### 2.1.20 环境放射性检测 environmental radioactivity detection

利用放射性测量方法, 对工程和生活的环境、天然建材等进行的放射性强度检测。

## 2.2 符号和代号

### 2.2.1 统计学参数

$M$ ——总均方相对误差

$m$ ——均方相对误差

$K$ ——极差系数

$\Delta$ ——绝对误差

$\bar{\Delta}$ ——平均绝对误差

$\delta$ ——相对误差

$\bar{\delta}$ ——平均相对误差

### 2.2.2 电磁学参数

$I$ ——电流强度

$U$ ——电位

$\sigma$ ——电导率

$\mu$ ——磁导率

$\varepsilon$ ——介电常数

$\rho$ ——电阻率

$\alpha$ ——衰减系数

$\beta$ ——介质对电磁波能量的吸收系数

$D_s$ ——视衰减系数

$E_x$ 、 $E_y$ ——电场分量

$H_x$ 、 $H_y$ ——磁场分量

$\Delta U$ ——电位差

$\Delta U_g$ ——干扰电位差

$J_s$ ——视激发比

$\eta_s$ ——视极化率

$S_\tau$ ——纵向电导

$\rho_s$ ——视电阻率

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

$\Delta U_1$  ——一次场电位差

$\Delta U_2$  ——二次场电位差

$S_{0.5}$  ——半衰时

### 2.2.3 物理力学参数

$A$  ——振幅

$K$  ——反射系数、率定系数

$V$  ——波速

$\mu$  ——泊松比

$f$  ——波的频率

$\rho$  ——密度

$\lambda$  ——波长

$E_d$  ——动弹性模量

$E_s$  ——静弹性模量

$G_d$  ——动剪切模量

$f_c$  ——混凝土抗压强度

$V_p$  ——纵波速度

$V_s$  ——横波速度

$V_R$  ——瑞雷波速度

$V_b$  ——界面速度

$V_a$  ——平均速度

$V_f$  ——水平流速

$V_v$  ——垂直流速

$V_{ef}$  ——有效速度

$V_{pr}$  ——新鲜完整岩块的纵波速度

$V^{\parallel}$  ——平行岩体结构面方向的速度

$V^{\perp}$  ——垂直岩体结构面方向的速度

$K_0$  ——单位弹性抗力系数

### 2.2.4 几何学及距离、方位参数

$AB$  ——供电电极距

$MN$  ——测量电极距

$OC$  ——测量点  $O$  的无穷远供电电极距

$OA$  ——测量点  $O$  的正向供电电极距

$OB$  ——测量点  $O$  的负向供电电极距

$K$  ——电法装置系数

$L$  ——瞬变电磁线框边长

$R$  ——自然电位的等位圈最大伸长距离

$d$  ——距离、收发距、断层宽度

$H$  ——高程、埋深、孔深、厚度

$\delta$  ——电磁波集肤深度

$\alpha$  ——方位角

$x$  ——测点间距

$\Delta R$  ——自然电位的相邻等位圈位移的增量

$X_0$  ——偏移距，源间距

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

$S_R$  ——瞬变电磁的回线面积

#### 2.2.5 时间参数

$T$  ——周期

$t$  ——时间

$\omega$  ——角频率

$\tau_s$  ——视时间常数

$\Delta t$  —— $v$  时间间隔

#### 2.2.6 其它参数

$n$  ——孔隙度

$t$  ——温度

$\eta$  ——各向异性系数

$K_w$  ——风化系数

$K_v$  ——完整性系数

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

### 3 物探方法与技术

#### 3.1 一般规定

3.1.1 外业工作之前，应对测区地形、地质和地球物理条件及以前工作的技术成果作全面了解和分析。

3.1.2 仪器设备检查和使用应符合下列要求：

1 应按仪器设备的检验周期和技术指标对仪器进行定期检验，每次检验的结果应有记录。

2 现场工作前，应对仪器进行检查，在同一测区观测的多台同类仪器应在同一测点上采用相同观测装置和观测方式进行一致性对比。

3 外业工作时，若出现仪器设备不正常，应排除故障并经检查正常后才能继续工作。

4 外业工作结束后，应检查仪器。

3.1.3 测网和测线布置应符合下列要求：

1 测网布置应根据任务要求、探测方法、探测目的体的规模与埋深等因素综合确定，测网和工作比例尺的选择应能反映探测的目的体，并可在平面图上清楚地标识出其位置和形态。

2 测线方向宜垂直于地层或构造的走向、或主要探测目的体的走向，并宜布置在地形起伏较小和表层介质相对均匀的地段；测线宜与地质勘探线和其它物探方法的测线一致，并应避免干扰源。

3 当测区边界附近发现重要异常时，应把测线适当扩展到测区外追踪异常。

4 在地质结构复杂地区，测线应适当加密，并在主要测线之间布置辅助测线。

5 在山区布置测线时，宜沿等高线或顺山坡布置；若地形起伏不大，可沿坡度相近的山坡布置长测线；若地形起伏较大，尤其是在山脊或山谷两侧，应分段布置短测线。

3.1.4 试验工作应符合下列要求：

1 试验前，应根据测区任务要求、地质及物性条件拟定试验方案，试验成果可作为生产成果的一部分。

2 试验工作应遵循由已知到未知，由简单到复杂的原则。试验地段应具有代表性，宜选择在物探工作测线上，有钻孔时应通过钻孔。

3 应根据试验成果选择合适的仪器参数和技术参数。

3.1.5 观测、重复观测、检查观测工作应符合下列要求：

1 观测时，激发信号和接收信号应在背景相对安静和信号相对稳定时刻进行。

2 在测线的端点、曲线的突变点和畸变线段、仪器参数或观测条件改变的情况下，应进行重复观测。重复观测的平均相对误差应小于5%。

3 一个测区或测线的检查观测工作量应不少于该测区或测线总工作量的5%。

4 检查点宜在全测区范围内均匀分布，异常地段、可疑点、突变点应有检查点。

5 一个测区或测线的检查观测误差大于本标准要求时，应全部重测。

6 操作员应现场查看每个记录，若不符合要求，应查明原因并及时重测。

3.1.6 物探记录应符合下列要求：

1 物探记录包括：仪器检验、检查和维修记录，原始记录，重复检查记录，自检记录，测量记录，成果校审记录，用户反馈记录等。

2 原始记录包括：现场班报（包括工程名称、测区、测线或钻孔、测点号、工作单位和操作人员、校验人员、仪器名称、型号、仪器主要工作技术参数、观测系统等），观测数据或记录，文件号，数据的打印记录，仪器观测过程中的异常情况记录等。

3 物探记录不应涂改、擦去或撕页，计算机采集数据文件号不应有错，文件内容应齐全。

3.1.7 资料检查和评价应符合下列要求：

1 现场操作人员应对全部原始记录进行自检。

2 专业技术负责人应组织人员对原始记录进行检查和评价，抽查率应大于 30%。

3 原始资料应评定为合格与不合格两类，存在下列情况之一者为不合格。

- 1) 记录不全。
- 2) 原始记录有涂改、擦去、撕页现象。
- 3) 计算机采集数据文件名与内容不符或内容不全。
- 4) 未按要求做重复观测、检查观测。
- 5) 检查观测精度不符合要求。
- 6) 使用的仪器不合格。
- 7) 采用不符合要求的观测系统和装置。
- 8) 需要进行漏电检查的仪器没有进行漏电检查或检查不合格。
- 9) 无仪器检查记录，未作定期检查或检查不合格的仪器所得的全部记录。

3.1.8 资料解释应符合下列要求：

1 资料的解释与推断应充分结合物探工作范围内的地质、设计和施工资料，在反复对比分析中，总结和分析各种异常现象，得出较为准确的结论。

2 应遵循内外业同步进行、内业指导外业的原则，现场应及时对资料进行初步整理和解释。如果发现原始资料有可疑之处或论述解释结论不够充分时，应作必要的外业补充工作。

3 解释时应通过综合资料，充分考虑地质情况和探测结果的内在联系与可能存在的干扰因素。

4 解释成果应使用相关专业语言表达。

3.1.9 成果图件应符合下列要求：

1 本标准要求的图件应符合 SL73.3 的规定。

2 图件应包括工作布置图、成果图、成果解释图等。

3 成果图应包括单一物探方法或综合物探方法所得到的剖面或平面图件，图件可以是曲线图、等值线图或图像等。

4 成果解释图应是对实测物探资料进行的定性和定量解释的成果体现，应与物性资料相对应。

5 物探成果图与成果解释图宜绘制在一张图上，上部绘制物探成果图，下部绘制成果解释图。

## 3.2 电法勘探

3.2.1 电法勘探可选用电测深法、电剖面法、高密度电法、自然电场法、充电法、激发极化法、可控源音频大地电磁测深法、瞬变电磁法等。

3.2.2 应用条件应符合下列要求：

1 电法勘探各种方法的要求：

1) 被探测目的层相对于埋深和装置长度应具有一定规模并近水平延伸，被探测目的体相对于埋深和装置长度应有一定的规模。被探测目的层与相邻地层之间或目的体与围边介质之间应有电性差异，且电性界面与地质界面相关。

2) 地形起伏不大、接地良好。

3) 采用电极接地测量方式的方法，要求被探测目的层或目的体上方没有极高电阻屏蔽层，采用线框测量方式的方法要求被探测目的层或目的体上方没有极低电阻屏蔽层；

4) 各地层或地质体电性稳定，异常范围和幅值等特征可以被测量和追踪。

5) 测区内没有较强的工业游散电流、大地电流或电磁干扰。

6) 水上工作时，水流速度较缓。

2 电测深进行分层探测时，应符合下列要求：

1) 地下电性层层次不多，电性标志层稳定，被探测层与供电电极距相比应具有一定规模和厚度，并近水平延伸。

2) 下伏基岩或被探测目的层层面与地面交角应小于  $20^\circ$ 。

3) 测区内有一定数量的中间层电阻率资料。

3 电剖面法探测时, 探测的地质界面或构造线与地面的交角应大于  $30^\circ$ 。

4 自然电场法探测渗流场时, 应符合下列要求:

1) 渗流层有较大的压差, 地下水的矿化度低, 岩石为微孔隙结构, 能形成强自然电场。

2) 饱水渗流层埋藏不深, 上覆和下伏渗流岩层电阻率高。

5 充电法测试地下水流速流向时, 测区应有钻孔, 钻孔应深入地下水位以下一定深度, 金属套管应位于地下水位以上; 含水层埋深宜小于 50m, 地下水流速宜大于 1m/d, 周边介质电阻率应大于水的电阻率的 3 倍。充电法探测低阻地质体时被探测地质体的导电率应大于围岩导电率的 10 倍, 规模大小应与埋深相当, 埋深宜小于 25m。

6 激发极化法探测地下水时, 在固液相界面上应有明显的以离子交换形式存在的电化学反应和电荷效应, 在测区内没有或较少有强电化学效应的金属矿物、煤层、石墨、碳化岩层等。

7 可控源音频大地电磁测深测区现场应符合所选用的场源要求, 被探测目的层或目的体应位于探测盲区以下; 电磁噪声比较平静, 各种干扰较小。

8 瞬变电磁法适用于不具备布极条件的沙漠、戈壁、裸露岩石、冻土等测区, 测区内的测线和测点处应无荆棘、树林、陡坎等障碍物, 并便于布置线框, 外来电磁噪声干扰小。

**3.2.3 仪器与设备应符合下列要求:**

1 电测深法、电剖面法、自然电场法、充电法和激发极化法宜使用多功能直流电法仪, 仪器应具有直接测量、显示和存贮的功能, 还应具有能对自然电位、漂移及电极极化进行补偿的功能, 并能测量一次场电位、自然电位、供电电流、视电阻率、综合激电参数(视极化率、半衰时、衰减度)等多种参数, 主要技术指标应符合下列要求:

1) 测量电压分辨率为 0.01mV。

2) 测量电流分辨率为 0.01mA。

3) 最大补偿范围为  $\pm 1V$ 。

4) 输入阻抗不小于  $8M\Omega$ 。

5) 最大供电电压不小于 900V。

6) 最大供电电流不小于 3A。

2 可控源音频大地电磁测深仪器的要求:

1) 可控源的信号频率范围、信号稳定性、场强应符合探测条件的要求。

2) 接收仪器应具有以下功能: 电和磁接收通道应在两道以上、数字采集、程控增益、测深信号自动分析、曲线显示和评价、采样率和采样长度依据信号频率自动可调等。

3) 接收电极为不极化电极。

3 瞬变电磁法应选用具有多通道、采样率与采样长度可调、信号叠加功能的仪器, 主要技术指标应符合下列要求:

1) 发射电压为 12~400V。

2) 发射基频频率为 2.5~225Hz, 并在该范围内分档。

3) 带宽为  $10\sim 7.5\times 10^3\text{Hz}$ 。

4) 时窗范围为 0.05~160ms。

5) 通道灵敏度为  $0.5\mu\text{V}$ 。

6) 发射电流不小于 5A。

7) 测试道不小于 12 道。

8) 动态范围不小于 140dB。

9) 等效输入噪声不大于  $1\mu\text{V}$ 。

10) 对工频干扰抑制不小于 60dB。

**3.2.4 工作布置除应符合本标准 3.1.3 的规定外, 还应符合下列要求:**

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

1 电测深的测点、可控源音频大地电磁测深点、自然电场法剖面以外的基点、充电法的充电点、主要异常点、测线端点和转折点均应进行坐标测量。

2 电测深点距在相应精度的成果图上宜为 1~3cm，线距宜为点距的 1~3 倍。

3 电剖面法测网布置的要求：

1) 应垂直于地质构造带、岩性分界面走向平行布置多条测线，以追踪其走向。

2) 通过局部异常地段的测线应不少于 2 条，每条测线上反映同一目的体的异常点应不少于 3 个。

3) 可根据任务要求、探测目的体规模和埋深  $H$  确定线距和点距，点距宜为  $H/3\sim 1H$ ，线距宜为点距的 2~5 倍。

4) 如果观测结果以平面等值线图形式反映地质体各向异性时，测点距和线距宜一致。

4 高密度电法应根据装置形式、电极排列数量、探测深度、探测精度等确定点距和测线的重叠长度。

5 自然电场法应选择地势相对平坦、地表较湿润、电场稳定、远离地表径流的地段。测线可布置成网状，应在测网内设置基点(假定零电位点)，范围较大时，宜设置多个基点和分基点。

6 充电法探测地下水流速流向时，应以孔口为中心均匀布置 8 条或 12 条辐射状测线，测线的方向误差不大于  $\pm 5^\circ$ ；充电法探测低阻地质体时，应以低阻地质体为中心，测点间距宜小于探测目的体埋深的一半，测线间距宜为点距的 2~5 倍，并应有 3 条以上剖面通过低阻地质体。

7 激发极化法测线宜布置在其它物探方法确定的含水地层或构造部位。

8 可控源音频大地电磁测深法点距宜为 5~50m，线距宜为点距的 1~5 倍。

9 瞬变电磁法测网布置应考虑线框尺寸和布框要求，线距宜为线框边长  $L$  的 1~2 倍，点距可选择  $L$ 、 $L/2$  或  $L/4$ 。

3.2.5 漏电检查应符合下列要求：

1 仪器外壳与电极间绝缘电阻应不小于  $300M\Omega$ ，导线绝缘电阻应不小于  $2M\Omega/km$ 。

2 检查发现漏电后应停止观测，在消除漏电影响后，对可能影响的测点应重新观测。

3 在以下情况下应进行漏电检查：——开工和收工时的无穷远供电极；——正常情况下每隔 20 个测点；——转移新测站和工作结束时；——电测深点的最大供电极距；——测量数据的畸变点。

3.2.6 电测深法现场工作应符合下列要求：

1 试验工作包括选择装置形式、最佳电极距、最佳供电电流、供电时间、点距、跑极方向及测试岩土体电阻率值等。

2 装置选择的要求：

1) 可选择对称四极测深装置、双向三极测深装置，也可选择偶极测深、微分测深装置，还可选择由两种以上装置组合而成的其他装置。

2) 当探测地层具有多个电性层和测线两端均能具有相向跑极的开阔地形时，宜选择对称四极测深装置、双向三极测深装置；当探测区地层电性层数较少、电性差异较大，而测线两端不具备相向跑极的开阔地形时，宜选用三极测深装置。

3) 分层探测和局部不良地质体探测，可选用对称四极测深装置、三极测深装置；对于非水平的构造带、岩性分界探测，可选用双向三极测深装置、微分测深装置；测试岩土体电性参数，宜选用对称四极测深装置；探测浅层不均匀地质体，可选用偶极测深装置。

4) 选择两种不同的测深装置形成的组合装置，应事先在地质情况已知的地段进行试验，试验符合任务要求后才能应用。

3 极距选择的要求：

1)  $AB$ 、 $OA$  或  $OB$  在双对数坐标系下应均匀分布，相邻极距比值宜在 1.2~1.8 之间，对于浅层详细探测或电阻率参数测试的极距宜按等差级数增加电极距。

2) 最小供电电极距  $AB$  应能测量出第一层的电阻率， $AB/2$  宜为 1.5 m；最大供电电极距  $AB$

在使电测深曲线后支反映标志层的上升或下降曲线的“拐点”后应不少于三个点。

- 3) 三极或双向三极测深的  $OC$  应位于  $MN$  中垂线上, 并应大于最大  $OA$  或  $OB$  的 5 倍; 当  $C$  极与装置方向一致时,  $OC$  应大于  $OA$  或  $OB$  的 20 倍, 且保持  $C$  极对测量视电阻率的影响误差小于 2%。
- 4)  $MN$  与  $AB$ 、 $OA$ 、 $OB$  的比值应为  $1/3 \sim 1/30$ 。

#### 4 现场布极的要求:

- 1) 测量电极应选用铜质电极, 供电电极可选用铜、钢或铁质电极, 水上或冰上宜选用铅电极。
- 2) 电测深布极方向应使地形对测量数据影响最小, 遇有高压线时应使布极方向垂直于高压线。
- 3) 电极接地位置在预定跑极方向上的偏差应小于该极距的 1%, 在垂直预定方向的偏差应小于该极距的 5%。
- 4) 河床上或水上电测深可选择水面布极或水底布极方式, 水面布极应使电极没入水中, 并对测点位置进行水深及坐标测量。

5 宜在测区范围内均匀布置控制性的十字形或环形电测深, 其数量不少于总电测深点数的 3%; 采用三极装置测深宜进行不少于 3% 的双向三极测深。

#### 6 观测、重复观测和检查观测应符合本标准 3.1.5 的规定外, 还应符合下列要求:

- 1) 手动测量供电时间应大于 1s, 自动测量供电时间应大于 0.5s。
- 2) 当测深点上某一极距出现  $\Delta U$  数据不稳定、 $\Delta U$  小于 3 mV 或  $I$  小于 3mA 时, 应进行重复观测, 且次数宜大于 3 次。
- 3) 重复观测和检查观测应改变供电电压或改善电极接地条件。
- 4) 一个点 (同一测深点上同一极距) 进行了观测、重复观测或检查观测时, 可按本规程附录 C.1 计算极差系数  $K$ ,  $K$  大于  $\sqrt{n-1} \times 4\%$  ( $n$  为参与计算的视电阻率值个数) 的数据可舍去, 取其余数据的平均值作为该点的最终观测数据, 舍去的数应少于该点观测总数的 1/3。

#### 7 资料检查和评价应符合本标准 3.1.7 的规定外, 还应符合下列要求:

- 1) 应按本标准附录 C.1 计算单个电测深点的相对误差  $\delta$  和均方相对误差  $m$ , 按本标准附录 C.1 计算一个电测深点、一条剖面或一个测区的电测深总均方相对误差  $M$ 。
- 2) 单个电测深点的资料相邻 3 个极距的  $\delta > 2.5\%$ 、 $\delta > 3.5\%$  的电测深极距数超过该点检查极距数的 30%、 $\delta > 7\%$  的电测深极距数超过该点检查极距数的 5%、 $\delta > 10.5\%$  的电测深极距数超过该点检查极距数的 1%、 $m > 3.5\%$  等 5 种情形之一者, 该测深点资料应评为不合格。
- 3) 一条剖面或一个测区的电测深资料出现不合格的电测深点超过检查点总数的 30%、被检查全部测深点 (含不合格的测深点) 的  $m > 3.5\%$ 、 $M > 3.5\%$  等 3 种情形之一者, 该剖面或测区的资料应评为不合格。

### 3.2.7 电剖面法现场工作应符合下列要求:

#### 1 装置选择的要求:

- 1) 可选择双向三极装置、三极装置、对称四极装置、二极装置, 也可选择偶极、微分装置, 还可选择由两种以上装置组合而成的其他装置。
- 2) 探测非水平的构造带、划分岩性界面、探测喀斯特可选用双向三极装置、三极装置、二极装置、微分装置, 探测局部不良地质体可选用对称四极装置、偶极装置, 探测浅层不均匀地质体可选用偶极装置。

#### 2 极距选择的要求:

- 1) 供电电极距宜为探测目的体埋深的 3~5 倍。
- 2) 当表层电性不均匀影响严重时,  $MN$  宜为点距的 1~2 倍, 不宜大于  $AB/3$ 。

- 3) 双向三极装置、三极装置、二极装置的无穷远极应符合本标准 3.2.6 中 3 的相关规定。
  - 4) 在一个剖面上可采用两个极距不等的同一装置形式进行不同深度的探测, 但两装置的极距比宜大于 1.5 倍, 测点宜重合。
- 3 重复观测和检查观测除应符合本标准 3.1.5 和 3.2.6 中 6 的相关规定外, 还应符合下列要求:
- 1) 采用多极距观测时, 应对被检查点的所有极距进行检查观测。
  - 2) 电剖面每 10 个观测点应进行一个重复点观测。
- 4 资料检查和评价除应符合本标准 3.1.7 的规定外, 单条测线的资料还应符合本标准 3.2.6 中 7 的规定。

### 3.2.8 高密度电法现场工作应符合下列要求:

#### 1 装置选择的要求:

- 1) 可选择对称四极装置、双向三极装置、三极装置、二极装置、偶极装置、微分装置、中间梯度装置等。
- 2) 分层探测宜选择对称四极装置、三极装置, 探测局部不良地质体宜选择对称四极装置, 探测非水平构造带、进行岩性分界探测宜选择双向三极装置、微分装置、三极装置、二极装置, 探测浅层不均匀地质体宜选择偶极装置。

#### 2 极距选择的要求:

- 1) 基本电极距、测量极距宜等于点距。
- 2) 双向三极装置、三极装置、二极装置的无穷远极应符合本标准 3.2.6 中 3 的相关规定。
- 3) 设计观测的最深层对应的供电电极距应大于要求探测深度的 3 倍。

#### 3 现场布极除应符合本标准 3.2.6 中 4 的规定外, 还应符合下列要求:

- 1) 在测线端点处, 应使探测范围处于选用装置和布极条件所确定的有效范围之内。
- 2) 同一排列的电极应呈直线布置。
- 3) 观测前应检查排列中全部电极的接地条件并确保电极的连接顺序正确。

#### 4 重复观测和检查观测除应符合本标准 3.1.5 的规定外, 还应符合下列要求:

- 1) 重复观测可在每个排列完成后选择两层或两列进行。
- 2) 检查观测可采用散点抽检方式。

5 资料检查和评价除应符合本标准 3.1.7 的规定外, 单个排列的资料还应符合本标准 3.2.6 中 6 的相关规定。

### 3.2.9 自然电场法现场工作应符合下列要求:

1 自然电场法宜采用电位观测法, 也可采用梯度法; 当测试地下水渗流方向时, 宜增加环形观测方式。

2 应使用不极化电极, 一个测区在观测前和观测后应及时观测极差; 电极极差的绝对值在工作开始时应小于 2mV, 收工时应小于 5mV。

#### 3 观测、重复观测和检查观测除应符合本标准 3.1.5 的规定外, 还应符合下列要求:

- 1) 基点之间应进行联测。
- 2) 观测时, 仪器的自电补偿功能应处于关闭状态, 观测值应注明电位的正负。
- 3) 当测线较长或游散电流影响较大时应分段观测, 分段观测的测线衔接处应重复 3 个以上测点。
- 4) 每间隔 10 个测点应进行一次重复观测。

#### 4 资料检查和评价除应符合本标准 3.1.7 的规定外, 还应符合下列要求:

- 1) 应按本标准附录 C.1 计算单个测点的绝对误差  $\Delta$  和一条测线或一个测区的观测平均绝对误差  $\bar{\Delta}$ 。
- 2) 单个测点检查观测绝对误差  $\Delta$  应小于 3mV。
- 3) 一个测区的电位观测平均绝对误差  $\bar{\Delta}$  应小于 5mV, 梯度观测平均绝对误差  $\bar{\Delta}$  应小于

3mV。

3.2.10 充电法现场工作应符合下列要求：

1 充电法可采用直流充电，选用多功能直流电法仪观测；当有干扰时，也可采用低频交流充电，选用具有选频功能的仪器观测。

2 应采用三极装置，测量电极应采用不极化电极，选用电位法或梯度法观测。

3 测试地下水流速、流向的要求：

1) 无穷远  $B$  极距孔口的距离应大于待测含水层深度的 15 倍，且接地良好；充电电极  $A$  应置于孔内水层中部，和纱布食盐袋串在一起；测量电极  $N$  离孔口的距离应大于充电电极  $A$  放入孔内深度的 1.5 倍，且应固定在经钻孔且与估计水流方向一致的上游某点上。

2) 应分别在各测线上移动电极  $M$ ，找出各测线上的等电位点。

3) 应在投盐前测量一次正常的等电位圈。

4) 投盐后应立即测一次等电位圈，修正  $N$  极位置，并重新测试等电位圈作为新的基准点；然后每隔一定时间（视含水层流速而定，宜为 20~30min）测量一次等电位圈，每一孔在投盐后测量的等电位圈数应大于 3 个。

5) 等电位圈测量时，应记录测量时间并测量各等电位点至孔口的距离。

6) 可采用两个不同距离的固定测量电极  $N_1$  和  $N_2$  进行测量。

4 探测低阻地质体形态的要求：

1) 无穷远极  $B$  离供电电极  $A$  的距离应大于低阻地质体埋深或延伸长度的 10 倍，供电电极  $A$  与低阻地质体应接触良好。

2) 采用电位观测时， $N$  极应位于  $B$  极的反方向，与供电电极  $A$  的距离应大于低阻地质体埋深或延伸长度的 10 倍；用梯度法观测时测量电极距宜为 5~10m。

5 漏电检查除应符合本标准 3.2.5 的规定外，还要求  $MN$  线路的电阻应小于 10k $\Omega$ ，电极连线的绝缘电阻应大于 5M $\Omega$ 。

6 观测、重复观测和检查观测除应符合本标准 3.1.5 的规定外，还应符合下列要求：

1) 观测时应保证持续稳定的供电电流，且宜为 0.5~1A。

2) 重复观测、检查观测应按本标准公式附录 C.1 计算相对误差  $\delta$  和均方相对误差  $m$ 。

3) 单个测点重复观测的  $\delta$  应小于 5%。

4) 一条测线检查观测的  $m$  应小于 7%。

5) 一个测区检查观测的  $m$  应小于 7%。

6) 有严重干扰的测点可不参与全区观测质量评价。

3.2.11 激发极化法现场工作应符合下列要求：

1 宜选择对称四极测深装置，当进行大面积激发极化剖面测量时，可选用联合剖面或中间梯度装置。

2 极距选择、现场布极除应符合本标准 3.2.6 中 3、4 的规定外，还应符合下列要求：

1) 对称四极装置的最大供电电极距  $AB$  应大于勘探深度的 3 倍。

2) 测量电极应使用不极化电极。

3) 供电导线与测量导线应分开 1m，该距离应随导线长度而增加。

3 观测、重复观测除应符合本标准 3.1.5 和 3.2.6 中 6 的规定外，还应符合下列要求：

1) 观测时供电时间宜大于 30s，且供电电流稳定，电流大小随供电电极距增大而增加，应使  $\Delta U_1$  大于 0.3mV。

2) 出现二次场电位差  $\Delta U_2$  小于 1mV、视激发比值  $J_s$  大于或接近视极化率值  $\eta_s$ 、视衰减  $D_s$  大于或接近 100%等 3 种情形之一时，应重复观测。

3) 重复观测数据的极差系数  $K$  应小于  $\sqrt{n-1} \times 7\%$  ( $n$  为观测次数)，否则应增加重复观测。

4 资料检查和评价除应符合本标准 3.1.7 规定外，还应符合下列要求：

- 1) 激发极化法单个测点或测深点的一个极距对应测点的均方相对误差  $m$  要求：视极化率应小于 5%、视激发比应小于 7%、视衰减系数应小于 7%、视半衰时应小于 7%。
- 2) 检查不合格的测深点超过 30%，该测线或测区的资料不合格。
- 3) 剖面法的测点或测深法的测深点的不合格数超过检查点总数的 30%时，该测线或测区的资料应评为不合格。

### 3.2.12 可控源音频大地电磁测深法现场工作应符合下列要求：

#### 1 场源选择和布置的要求：

- 1) 人工场源可选择电偶极子或磁偶极子，应根据探测目的体的埋深选择电偶极子场或磁偶极子场。
- 2) 收发距  $d$ （偶极子中心点距观测点距离）和探测目的体最大埋深  $H_{\max}$  的关系宜为  $5H_{\max} \geq d \geq 3H_{\max}$ ，电偶极子长度宜等于  $H_{\max}$ 。
- 3) 电偶极子布置应平行于测线，方向误差应小于  $5^\circ$ 。
- 4) 电偶极子供电电极点宜选择在土壤潮湿处，应采用多根电极连接并采用坑埋（深度 1~2m、面积 1~2m<sup>2</sup>）方式，且应连接多层金属板或金属网、锡箔。接地条件差时可浇盐水，接地电阻宜小于 30 $\Omega$ 。
- 5) 磁偶极子应选在地势平坦、相对干燥处，轴线方向应垂直大地，角度误差应小于  $5^\circ$ 。

#### 2 现场布极除应符合本标准 3.2.6 中 4 的规定外，还应符合下列要求：

- 1) 接收时可选择  $E_x$  与  $H_y$  或  $E_y$  与  $H_x$  二分量测量，也可选择  $E_x$ 、 $H_y$ 、 $E_y$ 、 $H_x$  四分量测量；电极布极方向应与设计测量电分量方向一致，磁棒方向与电极排列方向垂直，方向误差应小于  $5^\circ$ 。
- 2) 电通道应采用不极化电极，磁通道应采用相应频率的磁探头。
- 3) 电解类不极化电极应在土壤开挖坑半掩埋并浇水，当测点为高阻裸露岩石时，宜用泥土掩埋电极并浇水。

#### 3 观测、重复观测和检查观测除应符合本标准 3.1.5 的规定外，还应符合下列要求：

- 1) 电偶极子场源的观测应在电偶极子  $AB$  垂直平分线两侧  $30^\circ$  角的扇形范围内的远场区内进行。
- 2) 应选择在干扰背景小的时间段观测。
- 3) 观测时电极或磁棒连线不应悬空、晃动或成匝状，磁棒应水平放置于测点位置，接收机、操作员、磁性物体应远离磁探头。
- 4) 电磁场的发射和观测应从高频至低频，频率范围应与探测深度相符。
- 5) 每点或每站观测完毕，宜及时显示或打印视电阻率、相位曲线，每次观测的视电阻率曲线和相位曲线形态应一致。
- 6) 当视电阻率、相位曲线极值点在频率轴上出现位移或曲线类型发生变化时，应重复观测；同一测点的重复观测或检查观测的视电阻率、相位曲线形态和对应幅值宜一致。
- 7) 移动或更换场源，同一测线应有三个以上测点被覆盖，覆盖点可作为检查点。

#### 4 资料检查和评价除应符合本标准 3.1.7 的规定外，还应符合下列要求：

- 1) 同一测深点进行二分量观测时，视电阻率曲线上标准偏差小于 40%的点超过 75%和相位曲线上不超过  $45^\circ$  或  $135^\circ$  的点大于 75%，二种情形均满足时该点资料评为合格。
- 2) 同一测深点进行四分量观测时，视电阻率曲线上标准偏差小于 40%的点超过 70%和相位曲线上不超过  $45^\circ$  或  $135^\circ$  的点大于 70%，二种情形均满足时该点资料评为合格。
- 3) 不合格的测深点大于总检查测深点数的 30%，该测线或测区资料不合格。

### 3.2.13 瞬变电磁法现场工作应符合下列要求：

#### 1 装置和参数选取的要求：

- 1) 探测浅层介质宜选用重叠回线、中心回线装置，探测深度较深宜选用大定源回线装置，探

测陡倾断层宜选用偶极装置。

- 2) 重叠回线装置线框、中心回线和偶极装置的发射线框边长  $L$  宜为探测目的体最大埋深  $H_{\max}$  的 0.5~1.0 倍；大定源回线装置的发射线框边长宜根据探测深度在  $100\text{m}\times 200\text{m}\sim 300\text{m}\times 600\text{m}$  范围内选择；中心回线、大定源回线、偶极装置的接收线框边长，发射和接收线框的间距宜根据试验选定。
  - 2 线框布置除应符合本标准 3.2.6 中 4 的规定外，还应符合下列要求：
    - 1) 装置测量中心在测点处的位置误差应小于接收线框边长的 10%，线框角点的点位与设计线框角点的点位误差应小于 5%。
    - 2) 应避开铁路、地下金属管道、高压线、变压器、输电线等干扰物。
    - 3) 敷设线框时，剩余导线不宜过长并应呈“S”型铺于地面或远离测区。
  - 3 漏电检查除应符合本标准 3.2.5 的规定外，还要求每公里供电线的电阻应小于  $6\Omega$ ，导线应质软、耐磨、绝缘电阻应大于  $2\text{M}\Omega$ 。
  - 4 观测、重复观测和检查观测除应符合本标准 3.1.5 的规定外，还应符合下列要求：
    - 1) 应通过现场试验确定时间窗口，并采用多通道观测。
    - 2) 野外观测值只允许最后的 3~5 道的观测值在噪声电平以下，否则，应查明原因，并采用增加叠加次数等方法重复观测；当出现瞬间干扰时可暂停观测，待干扰排除后再观测。
    - 3) 当一个测点出现重复观测误差较大时应查明原因，若有干扰可移动点位避开干扰源重测，并作详细记录。
    - 4) 在异常附近应加密测点，若曲线衰减变缓时，应扩大时间范围重复观测。
    - 5) 每个测点观测完毕，应对数据和曲线进行检查，合格后方可搬站。
  - 5 资料检查和评价除应符合本标准 3.1.7 的规定外，还应符合下列要求：
    - 1) 单个测点的观测、重复观测和检查观测曲线的形态和幅值应一致，且各观测道的总均方相对误差  $M$  应小于 10%。
    - 2) 一条测线或测区检查的总均方相对误差  $M$  应小于 15%。
- 3.2.14 电测深法数据处理、资料解释和图件除应符合本标准 3.1.8 和 3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：
- 1 电测深资料应进行定性和定量解释。
  - 2 定性解释应符合以下要求：
    - 1) 定性解释应包括确定电性层数量、各电性层电阻率的关系、局部异常大致平面位置和性质等。
    - 2) 应分析各电测深曲线的类型，根据曲线类型确定地电断面的层数和电性结构。
    - 3) 应对比分析一条或多条剖面上电测深曲线类型的变化与地层结构、电性参数变化、地形变化的关系。
    - 4) 应根据视电阻率剖面中异常幅值、形态和分布情况确定异常的性质、位置，并分析相邻剖面上异常的相关性。
    - 5) 采用双向三极测深时应根据各个极距的视电阻率剖面曲线的交叉情况、异常幅值和范围确定异常性质、规模和产状。
    - 6) 划分地电剖面时应分析电性界面和地质界面不一致的可能性，并应分析横向电性的变化和地形变化对电测深曲线的影响。
  - 3 定量解释应在定性解释的基础上计算各电性层厚度、确定异常体位置、规模、埋深和产状等。
  - 4 应根据计算和测量的视电阻率剖面，双向三极测深电阻率剖面曲线的异常规模、深度、轴线倾斜角度、平面位置等对异常进行定量解释。
  - 5 定量解释应具备下列条件：
    - 1) 曲线完整、电性标志层在电极距上反映明显。

- 2) 电测深曲线电性分层明显、类型确定。
- 3) 电测深曲线经消差、圆滑、畸变校正后,不影响解释精度。
- 4) 具有定量解释所需的电参数。
- 5) 电性界面和地质界面基本对应。

6 定量解释宜采用量板法(包括计算机电子量板)、计算机反演法和电反射系数  $K$  剖面法。当曲线比较复杂时,可以使用各种简化的解释方法或经验方法。

7 可采用地形校正方法,减小地形起伏对电阻率剖面上视电阻率的影响。

8 图件可包括:视电阻率剖面或平面分布图、物探成果地质解释剖面或平面图(包括地层分层、风化分带、不良地质体分布、基岩顶板等高线等)。

**3.2.15** 电剖面法数据处理、资料解释和图件除应符合本标准 3.1.8 和 3.1.9 的规定外,还应符合下列要求:

1 电剖面法应以定性解释为主,当探测目的体形态简单时,可进行定量解释。

2 应分析曲线中异常的幅值、规模、形态等特点,并对异常进行定性解释。当异常单一时应确定异常曲线类型,并依据类型进行定性和定量解释。应对相邻剖面上的异常进行对比分析。

3 可采用地形校正方法消除因地形起伏产生的虚假异常。

4 图件应包括:视电阻率曲线剖面或平面分布图、剖面或平面物探成果地质解释图等,并应采用不同的线型或颜色绘制视电阻率曲线及在曲线横坐标的下方绘制地形剖面及推断的目的体位置大小及产状等。

**3.2.16** 高密度电法数据处理、资料解释和图件除应符合本标准 3.1.8 和 3.1.9 的规定外,还应符合下列要求:

1 应绘制整条测线的高密度电法的视电阻率剖面,也可经处理和反演后形成相应剖面的电阻率图像。

2 解释时可采取以下方法:

1) 应根据视电阻率剖面或图像中异常的分布、幅值、规模等进行解释。

2) 可选取几组符合电测深条件的数据进行分层反演和解释。

3) 应对比同一剖面多种装置的视电阻率剖面或图像进行解释。

4) 可结合视电阻率剖面或图像与已知地质界面、钻孔等资料进行对比分析和解释。

3 图件可包括:视电阻率断面或电阻率图像、物探成果地质解释剖面或平面图。

**3.2.17** 自然电场法数据处理、资料解释和图件除应符合本标准 3.1.8 和 3.1.9 的规定外,还应符合下列要求:

1 一个测区的所有测量电位应换算到同一个总基点,所有测量电位或梯度应进行极差校正。

2 可根据地质物性、环境条件分段确定背景值并剔除干扰异常。

3 应区分正常场与异常场,并正确识别有用异常与干扰异常,异常值应超过测量平均绝对误差  $\bar{\Delta}$  的 3 倍,且具有一定的规律性和分布范围。

4 应根据剖面或平面自然电位或梯度曲线上异常的分布、幅值等特点确定异常体的规模、埋深。

5 可利用“8”字形电位图推算地下水流向。

6 图件可包括:自然电位或梯度的剖面曲线图、剖面平面图、平面等值线图,自然电位或梯度物探成果解释剖面或平面图。

**3.2.18** 充电法数据处理、资料解释和图件除应符合本标准 3.1.8 和 3.1.9 的规定外,还应符合下列要求:

1 测试地下水流速流向应绘制各个时刻的充电等电位圈分布图。

2 探测低阻地质体宜绘制充电电位或电位梯度的剖面曲线图、平面分布图,充电电位或电位梯度的物探成果解释剖面或平面图,解释时应符合下列要求:

1) 应按本标准 3.2.17 中 3 的规定划分正常场与异常场,分析电位或梯度曲线的异常幅值、范

围、形态等特征，圈定低阻地质体的规模和埋深。

- 2) 应分析表层不均匀、地形、岩层产状、地表水径流、覆盖层厚度变化对异常造成的影响。
- 3) 可用电位剖面曲线的极大值或梯度剖面曲线的“零”值确定平面点位。

**3.2.19** 激发极化法数据处理、资料解释和图件除应符合本标准 3.1.8、3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：

1 剖面法资料应以定性解释为主，并根据剖面上的异常位置确定异常极化体的范围；测深法资料应根据电阻率和多个激电参数确定异常极化体的埋深和规模。

2 背景值、异常值的划分宜以已知地下水位以上或干孔旁观测数据  $\rho_s$ 、 $\eta_s$ 、 $J_s$ 、 $D_s$ 、 $S_{0.5}$  值为背景值，并应符合本标准 3.2.17 中 3 的规定。

3 应结合水文地质资料，分析激电异常的幅值、范围和形态等曲线特征与已知地下水的关系，做出对未知地段的极化体或地下水的富水情况、埋深、规模等的推断解释。

4 图件可包括： $\rho_s$ 、 $\eta_s$ 、 $J_s$ 、 $D_s$ 、 $S_{0.5}$  剖面图、平面图，相关的物探成果地质解释图，测深曲线类型图，含水层分布平面图和含水层埋深图等。

**3.2.20** 可控源音频大地电磁测深法数据处理、资料解释和图件除应符合本标准 3.1.8、3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：

1 预处理应符合下列要求：

- 1) 可对采集的数据做平滑插值和校正处理。
- 2) 应检查和剔除畸变点，不宜对数据做自动平滑，不随意删除频点，对曲线首尾支畸变严重的频点，应参考相邻测点予以校正。
- 3) 对于相对误差在 10% 以内的覆盖点，可以进行算术平均处理或不作处理；对于相对误差大于 10% 但曲线形态一致的覆盖点应作平移处理。
- 4) 静态位移校正应根据已知地质资料和原始剖面等值线图及地形起伏情况选择参数和最佳静态位移校正方法。

2 资料解释要求：

- 1) 定性解释和定量解释应相结合。
- 2) 定性解释可根据测深曲线类型、正演电阻率剖面上异常电阻率数值分布情况判断和确定地质电性模型、异常性质和分布情况。
- 3) 进行了四分量测量的剖面，应对比同一剖面上多个分量的测深曲线类型和电阻率剖面的异常情况。
- 4) 可将反演的电阻率剖面或典型测深曲线与钻孔揭示的地层和不良地质体进行对比，建立地质电性模型的对应关系。
- 5) 定量解释应采用二维解释，异常深度宜通过已知钻孔的目的层深度进行校正。

3 图件可包括：电阻率断面图、物探成果地质解释图。

**3.2.21** 瞬变电磁法数据处理、资料解释和图件除应符合本标准 3.1.8 和 3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：

- 1 可对数据进行滤波处理。
- 2 应通过处理软件计算和绘制视电阻率、视纵向电导断面图。
- 3 应根据瞬变电磁的响应时间特征和剖面曲线类型划分背景场及异常场，确定地质电性模型、划分异常。

4 可通过钻孔建立一个测区的视电阻率剖面与异常性质、埋深、范围的对应关系，据此对该测区其它剖面进行解释。

5 应绘制相应的地质成果解释剖面或平面图。

### 3.3 探地雷达

3.3.1 探地雷达可选用剖面法、宽角法、环形法、透射法、多天线法和孔中雷达等工作方式。

3.3.2 探地雷达的应用条件应符合下列要求：

1 探测目的体与周边介质之间应存在明显介电常数差异，电性稳定，电磁波反射信号明显。  
2 探测目的体与埋深相比应具有一定规模，埋深不宜过深；探测目的体在探测天线偶极子轴线方向上的厚度应大于所用电磁波在周边介质中有效波长的  $1/4$ ，在探测天线偶极子排列方向的长度应大于所用电磁波在周边介质中第一菲涅尔带直径的  $1/4$ ；当要区分两个相邻的水平探测目的体时，其最小水平距离应大于第一菲涅尔带直径。

3 测线上天线经过的表面应相对平缓，无障碍，且天线易于移动。

4 不能探测极高电导屏蔽层下的目的体或目的层。

5 测区内不应有大范围的金属构件或无线电发射频源等较强的电磁波干扰。

6 单孔或跨孔探测时，钻孔应无金属套管。

7 跨孔(洞)探测时，目的体应位于两孔(洞)间；两孔(洞)宜共面，间距应不大于雷达信号的有效穿透距离。

3.3.3 仪器性能应符合下列要求：

1 信号增益控制应具有指数增益功能。

2 A/D 转换位数不小于 16bit。

3 点测时有多次叠加功能，且叠加次数不小于 8 次。

4 连续测量时扫描速率每秒不小于 128 线。

3.3.4 测网布置应符合本标准 3.1.3 的规定，进行点测时，点距宜为 0.2~1.0m，在异常区域应有 3 个以上的测点表现异常。

3.3.5 仪器参数设置应符合下列要求：

1 雷达主机天线工作频率的选取应根据探测任务要求、探测目的体埋深、分辨率、介质特性以及天线尺寸是否符合场地条件等因素综合确定。

2 记录时窗的选择应根据最大探测深度与上覆地层的平均电磁波波速按本标准附录 C.3 确定。

3 仪器的信号增益应保持信号幅值不超出信号监视窗口的  $3/4$ ，天线静止时信号应稳定。

4 宜选择所用天线的中心频率的 6~10 倍作为采样率。

3.3.6 天线选择应符合下列要求：

1 在地面探测时宜选择频率为 8~300MHz 的天线，当多个频率的天线均能符合探测深度的要求时，应选择频率相对较高的天线。

2 洞室衬砌质量检测时宜选用与探测精度要求相对应的高频天线，频率范围宜为 400~900MHz。

3 检测混凝土内钢筋时宜选用 900~1500MHz 的天线。

4 孔中探测应根据探测任务要求选用自发自收的单孔天线或一发一收的跨孔天线，天线频率应根据探测范围、探测精度要求选用。

5 采用移动较快的车载观测方式，宜选用空气耦合天线。

3.3.7 现场工作应符合下列要求：

1 现场观测时应清除或避开测线附近的金属物。

2 支撑天线的器材应选用绝缘材料，天线操作人员不应佩带含有金属成分的物件，应与工作天线保持相对固定的距离。

3 观测过程中，应保持工作天线的平面与探测面基本平行，距离相对一致。

4 点测时，点距应小于尼奎斯特采样间隔，当探测目的体形态、产状变化不大时，点距可适当放宽，并应在天线相对静止时采集数据。

5 连续测量时，应先进行点测与连续测量对比试验，并选定连续测量效果与点测效果相近的天

线移动速率。天线的移动速率应均匀，并与仪器的扫描率相匹配。

6 使用分体天线进行点测时，应通过调整天线距使来自目的体的反射信号最强。可选取 2 倍临界角为接收天线与发射天线相对探测目的体的张角，也可选取探测对象最大深度的 1/5 作为天线间距。

7 使用偶极天线时，天线的取向宜使电场的极化方向与探测目的体的长轴或走向平行。当探测目的体的长轴方向不明确时，宜使用两组正交方向的天线分别进行观测。

8 记录标注应与测线桩号一致。采用自动标注时，应避免标注信号线的干扰；采用测量轮标注时，应每 10m 校对一次。

3.3.8 可采用穿透法、宽角法测试地层电磁波速度，有条件时由已知深度的探测目的体标定或用管状目的体几何扫描法推算，也可使用经验数据或利用相关的地层参数由公式计算。

3.3.9 资料检查和评价除应符合本标准 3.1.7 的规定外，还应符合下列要求：

1 提供检查和评价的雷达资料应经过初步编辑，编辑内容可包括测线号、里程桩号、剖面深度等。

2 检查观测的图像与原始观测图像的异常形态与位置基本一致时资料为合格。

3.3.10 数据处理应符合下列要求：

1 可根据需要选取删除无用道、水平比例归一化、增益调整、地形校正、频率滤波、 $f-k$  倾角滤波、反褶积、偏移归位、空间滤波、点平均等处理方法。

2 选择处理方法和处理步骤应根据外业记录数据质量及解释要求进行。当反射信号弱、数据信噪比低时不宜进行反褶积、偏移归位处理，在进行  $f-k$  倾角滤波和偏移归位处理前应删除无用道，并进行水平比例归一化和地形校正。

3 在数据处理各阶段均可选择频率滤波，消除某一频段的干扰波。

4 可用  $f-k$  倾角滤波消除倾斜层的干扰波，但应事先确保无同样倾角的有效层状的反射波。

5 可用反褶积压制多次反射波，用于反褶积的反射子波应是最小相位子波。

6 可采用时间偏移或深度偏移将倾斜层反射波界面归位，将绕射波收敛，在进行深度偏移处理时应选择可靠的介质波速。

7 可选用空间滤波的有效道叠加和道间差两种方法，使异常具有更好的连续性或独立性，提高数据图像的可解释性。改变反射信号的振幅特征应在其它方法处理完成后进行。

8 可用平滑数据的点平均法消除信号中的高频干扰，参与计算的点数宜为奇数，最大值宜小于采样率与低通频率之比。

3.3.11 资料解释除应符合本标准 3.1.8 的规定外，还应符合下列要求：

1 应通过班报和现场复核、筛选干扰异常。

2 应先在原始图像上通过反射波波形及能量强度等特征判断、识别和筛选异常。

3 可通过数据处理对强反射波和强吸收波同相轴进行追踪，或利用异常的宽度及反射旅行时等参数，计算异常体的平面延伸范围和埋深。

4 透射法可根据透射图像有无能量阴影、有无二次波叠加等特征判断异常，也可采用阴影交汇、二次波形态及发射和接收的相对位置进行定量解释。

3.3.12 成果图表除应符合本标准 3.1.9 规定外，还应符合下列要求：

1 图件应包括雷达剖面图像、雷达地质成果解释剖面图。

2 布置在隧洞、陡壁、边墙等处的剖面，应绘制测线分布的断面图。

3 雷达剖面图像可只选择摘录有异常的部分，连续测量时可绘制灰度或色谱图像，点测时可绘制波形图像，雷达图像应标注测线号、桩号、深度时间标注。

4 地质成果解释剖面图应绘制分层界线、异常中心、范围、延伸方向等。

5 可采用表格汇总说明异常情况。

## 3.4 地震勘探

3.4.1 地震勘探可选用浅层折射波法、浅层反射波法和瑞雷波法。

3.4.2 地震勘探应用条件应符合下列要求：

1 浅层折射波法、浅层反射波法和瑞雷波法均适用于层状介质和似层状介质的勘探。

2 浅层折射波法应用条件：

- 1) 被追踪地层的波速应大于各上覆层的波速，且各层之间存在明显的波速差异。
- 2) 被追踪地层应具有一定的厚度，中间层厚度宜大于其上覆层厚度。
- 3) 沿测线被追踪地层的视倾角与折射波临界角之和应小于  $90^\circ$ 。
- 4) 被追踪地层界面应起伏不大，折射波沿界面滑行时无穿透现象。
- 5) 被探测目的体与周边介质之间应存在明显的波速差异，并具有一定的规模。

3 浅层反射波法应用条件：

- 1) 被追踪地层与其相邻层之间应存在明显的波阻抗差异。
- 2) 被追踪地层应具有一定的厚度，且应大于有效波波长的  $1/4$ 。
- 3) 地层界面较平坦，入射波能在界面上产生较规则的反射波。
- 4) 被探测的断层应有明显的断距。

4 瑞雷波法应用条件：

- 1) 被追踪地层与其相邻层之间、被探测目的体与周边介质之间应存在明显的波速差异。
- 2) 被追踪地层应为横向相对均匀的层状介质，被追踪的不良地质体应具有一定规模。
- 3) 地面应相对平坦，地层界面起伏不大，并避开沟、坎等复杂地形的影响。

3.4.3 震源和仪器设备应符合下列要求：

1 震源要求：

- 1) 地震勘探可使用爆炸震源、锤击震源和落重震源等。
- 2) 震源应能激发所选工作方法需要的主频地震脉冲，能量可控并符合探测深度要求。
- 3) 爆炸机性能应安全可靠，并具备计时回路触发功能。
- 4) 锤击震源和落重震源应操作方便、重复性好。
- 5) 计时信号延迟时差不大于  $0.5\text{ms}$ 。

2 地震仪要求：

- 1) 宜选用 12 道或 24 道浅层数字地震仪，具有信号增强、延时、内外触发、前置放大、滤波、数字采集等功能。
- 2) 采样率可选、最小采样间隔不大于  $0.05\text{ms}$ 。
- 3) 记录长度不小于 1024 样点/道，且可选。
- 4) A/D 转换精度不小于 12 bit。
- 5) 动态范围不小于 96dB。
- 6) 通频带为  $2\sim 2000\text{Hz}$ 。
- 7) 放大器内部噪声不大于  $1\mu\text{V}$ 。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

3 检波器要求：

- 1) 各道检波器之间固有频率相差应小于 10%，灵敏度相差应小于 10%，相位差应小于  $1\text{ms}$ 。
- 2) 绝缘电阻不小于  $10\text{M}\Omega$ 。
- 3) 井下和水下使用的检波器，应有良好的防水性能。

4 地震记录道一致性要求：

- 1) 各道之间的相位差应小于  $1.5\text{ms}$ 。
- 2) 各道之间的振幅差应小于 15%。

3.4.4 仪器设备的准备工作应符合下列要求：

1 外业工作前，应对仪器设备进行检查，并提交记录。

- 2 测试道一致性时,检波器安置条件应一致。全部检波器安置范围与其距震源距离相比应很小。
- 3 联结电缆及检波电缆应进行绝缘检查,绝缘电阻应大于 200k $\Omega$ 。
- 3.4.5 测线布置除应符合本标准 3.1.3 的规定外,还应符合下列要求:
  - 1 测线布置应考虑旁侧影响和穿透现象。
  - 2 测线宜按直线布置,当测线通过建筑物、道路、高压电线和其它障碍时测线可转折,但应采取相应措施,保证转折测线的资料能独立解释。
  - 3 山谷地形可按坡度相近的山坡分段布置测线。炮点宜在地形起伏的顶部和底部,并保证各段测线资料能独立解释。
  - 4 河谷测线宜垂直河流或顺河流布置,当河谷狭窄和折射波相遇段较短时,可斜交河流布置测线。
- 3.4.6 试验工作除应符合本标准 3.1.4 的规定外,还应符合下列要求:
  - 1 应了解测区的地球物理条件、有效波和干扰波的分布情况,试验压制干扰波的措施,选择激发接收方式、仪器工作参数及观测系统等。
  - 2 了解测区有效波和干扰波的分布可采用展开排列观测方式。对于展开排列长度,折射波法宜为探测深度的 6~10 倍,反射波法宜为探测深度的 2~3 倍,瑞雷波法宜为探测深度的 1~2 倍。检波点距宜小于实际工作的检波点距。
  - 3 观测中遇到局部地段记录质量变差时应分析原因,并通过试验选择新的仪器工作参数或改变工作方法,改善记录的质量。
- 3.4.7 观测系统应符合下列要求:
  - 1 观测系统应依据试验结果确定,在符合探测任务要求并保证有效波连续对比追踪的前提下,应采用简便的观测系统。
  - 2 浅层折射波法要求:
    - 1) 采用单支时距曲线观测系统时,被追踪界面应平坦,沿测线方向岩层界面的视倾角应小于 15°,并保证追踪段内至少有 4 个检波点能有效接收折射波。
    - 2) 采用相遇时距曲线观测系统时,应保证追踪界面的相遇段至少有 4 个检波点能有效接收折射波。
    - 3) 采用追逐时距曲线观测系统时,应保证被追踪段至少有 4 个正常检波点能重复接收同一界面的折射波。
    - 4) 采用多重时距曲线观测系统时,应保证各层折射波的连续对比追踪,并在综合时距曲线上均有能独立解释的相遇段,达到折射分层的目的。
    - 5) 布置非纵测线观测系统时,应考虑界面速度变化的影响。非纵测线应通过纵测线或钻孔、基岩露头,测线长度宜小于爆炸点到测线的距离。
  - 3 浅层反射波法要求:
    - 1) 可采用单边或双边展开排列观测系统了解测区内有效波和干扰波的分布特征,并选择反射最佳窗口,确定偏移距和检波点距。
    - 2) 等偏移距观测系统适用于地球物理条件较简单,反射层位较稳定,且在最佳窗口内反射波较强的测区,观测中应根据展开排列试验资料,将偏移距选在反射波窗口的中部。
    - 3) 多次覆盖观测系统适用于地球物理条件比较复杂的测区,观测中应采用具有一定偏移距的单端激发、覆盖次数不少于六次的观测系统,并使接收排列在反射最佳窗口内。
  - 4 瑞雷波法要求:
    - 1) 稳态瑞雷波法应采用变频可控震源单端或两端激发,调整两个检波器间距和偏移距进行接收,取得不同频率的多种组合瑞雷波记录。
    - 2) 瞬态瑞雷波法宜采用锤击、落重、爆炸震源,在排列的单端或两端激发,可用 12 道或 24 道为一排列进行接收,偏移距宜不小于检波点距。

- 3) 应通过试验选择合适的偏移距和检波点距, 满足最佳瑞雷波接收窗口和探测深度的要求; 排列长度应大于探测深度, 检波间距应小于异常体规模。
  - 4) 同一测线的观测排列方向宜一致。
- 3.4.8 地震波的激发与接收应符合下列要求:
- 1 爆破作业安全应符合 GB 6722 的要求。
  - 2 爆炸震源要求:
    - 1) 应采用绕在药包外面的记时回路记时。
    - 2) 坑中爆炸时, 药包应用土或砂埋实; 多次使用同一炮坑时, 每次埋置药包前应清除松土。
    - 3) 水中爆炸时, 应有防水措施, 药包沉放深度宜为 1m 左右。
    - 4) 井中爆炸时, 宜有水或泥浆耦合。
    - 5) 爆炸点的位置和深度应准确, 必要时可允许爆炸点沿垂直测线方向移动, 但移动距离不应大于检波点距的 1/5。
    - 6) 地面爆炸时, 应清除炮点处碎石和杂草。
    - 7) 同一爆炸站严禁使用两套或多套爆炸线和记时线。
    - 8) 应使用专用爆炸机。
  - 3 锤击和落重震源要求:
    - 1) 浅层折射波法和浅层反射波法的激发点应选在较密实的土层上, 必要时应清除激发点的浮土或预先夯实。
    - 2) 瑞雷波的激发点应保持地面的原始状态, 不宜夯实或铲除浮土, 以利于激发低频瑞雷波; 锤击板应与地面接触良好, 不应反跳造成二次触发。
    - 3) 使用叩板震源时, 木板的长轴应垂直测线, 且长轴的中点应在测线上或测线延长线上; 木板上应加压足够的重物或安装抓钉, 保持叩板与地面接触牢固。
    - 4) 使用钉钯震源时, 应将固定钯齿打入土层中, 必要时可加打活动钯齿, 以使钉钯与地面接触牢固。
  - 4 浅层折射波法、浅层反射波法和瞬态瑞雷波法通常使用 12 道或 24 道地震仪进行数据采集, 稳态瑞雷波法可使用二道仪器接收。
  - 5 检波器间距应根据选用方法、探测任务要求、地球物理条件确定。在同一测线上, 宜采用同一检波点距和排列长度。
    - 1) 浅层折射波法的检波点距宜为 5~10m, 在探测风化带、断层和进行岩土参数测试时可适当减小。
    - 2) 浅层反射波法的检波点距宜为 2~4m。
    - 3) 瑞雷波法的检波点距宜为 1~4m。
  - 6 检波器固有频率可根据有效波的频率响应和提高分辨率的技术要求加以选择。
    - 1) 浅层折射波法宜选用固有频率为 10~40Hz 垂直检波器。
    - 2) 浅层纵波反射波法宜选用固有频率为 100Hz 垂直检波器。
    - 3) 浅层横波反射波法宜选用固有频率为 40~60Hz 水平检波器。
    - 4) 瑞雷波法的检波器固有频率和频宽应与探测深度要求相符, 探测覆盖层时宜选用固有频率为 1~10Hz 垂直检波器。
  - 7 检波器布置要求:
    - 1) 应位置准确, 埋置条件一致, 并与地面接触牢固, 防止漏电和背景干扰。
    - 2) 当受地形、地面条件限制, 检波器不能安置在原设计点位时, 可沿测线移动 (不包括互换点), 如有困难时可沿垂直测线方向移动, 其偏移距离应小于 1/5 检波点间距, 并记入班报。
    - 3) 使用水平检波器接收横波时, 应保证检波器水平安置, 灵敏轴应垂直测线方向, 且取向

一致。

4) 在水域使用水听器接收时, 应将水听器沉放于水面以下, 深度宜大于 1m。

5) 使用井中三分量检波器接收横波时, 观测前应检查检波器贴壁是否牢固。

8 仪器工作参数要求:

1) 应根据测区干扰背景、激发和接收条件、地球物理条件及安全等因素选择。

2) 在一个测区或测段工作时, 应使用同一种滤波档, 因特殊需要改变滤波档时, 应有对比记录。

3) 应依据有效波的时域和频域特征选择记录长度和采样率, 当采用高采样率接收时, 可配合使用延时。

4) 瞬态瑞雷波观测时应设置全通, 采样间隔应小于瑞雷波最高频率的半个周期, 时间测程应包括最远道瑞雷波的最长旅行时。

5) 当信噪比较低时, 可采用重复激振进行信号叠加。

3.4.9 水域地震勘探应符合下列要求:

1 进行水域浅层折射波法观测时, 宜采用固定排列, 使用爆炸震源和漂浮电缆。当水流湍急、干扰背景强烈时, 可采用将激发点和接收点互换的观测方式。

2 进行水域浅层反射波法观测时, 宜采用移动排列, 使用船拖电火花震源和漂浮电缆, 沿测线同步移动, 拖船航速应稳定并保持电缆沉放深度一致。

3 当布置横河方向纵测线并采用相遇观测系统时, 应考虑河床宽度是否具备探测任务所需要的相遇段。当布置横河方向非纵测线时, 应符合本标准 3.4.7 相关规定。

4 水域作业期间, 应及时测量水边线高程和沿测线的水深。当水位变化超过 0.5m 时, 应进行校正。

3.4.10 应在钻孔、平洞、露头以及具有代表性的地段内进行一定数量的速度参数测试, 测试方法可采用地震测井、地震穿透波速测试、在基岩露头和洞壁上进行的弹性波测试。

3.4.11 地震勘探原始记录应符合下列要求:

1 原始记录应包括仪器检查记录、试验记录、生产记录、班报等。

2 记录地震数据的磁盘、光盘等应标识清楚并与班报一致。

3 浅层折射波法和展开排列应附完整的波形记录, 其它方法可根据需要附典型测段的波形记录。

4 存在 3.1.7 中第 3 款或下列缺陷之一者为不合格记录:

1) 不能可靠追踪有效波记录。

2) 互换道或连接道不正常, 影响有效波的正确对比与连接, 又不能从同一激发点的其它记录准确转移的记录。

3) 同一张记录中使用道数的 1/6 以上或两相邻道工作不正常的记录。

4) 干扰背景强烈, 影响有效波识别或准确读取旅行时的折射波记录、透射波记录、瑞雷波记录和单次覆盖的反射波记录。

5) 干扰背景强烈, 经滤波、水平叠加等处理后, 仍不能识别主要目的层的反射波记录。

6) 记录编号或主要内容与班报不符, 又无法改正的记录。

3.4.12 波的对比应符合下列要求:

1 波的对比主要是辨认和追踪有效波的同相轴和波的置换, 应选择靠近有效波的起始相位处并采用单相位或多相位对比, 在裂隙发育区宜采用多相位对比。

2 对不同层位有效波应根据波形的相似性、视周期的相近性、振动的连续性和同相性、振幅随远离爆炸点衰减的规律性等特征进行对比分析。

3 有效波的置换应根据两组波同相轴相交时波形的叠加特征、波形或振幅的突然变化、视周期或视速度的突然变化等加以确定。

4 在相遇时距曲线观测系统中互换道和连接道波的对比,应根据有效波旅行时的相等性及其动力学特点的相近性进行分析,同排列互换道或排列间连接道的时间差,经爆炸深度校正后应小于 3ms。

5 在相遇与追逐多重时距曲线观测系统中进行折射波对比,应根据追逐时距曲线的平行性来辨别同一层位或不同层位的折射波,经校正拼接后综合时距曲线互换时间差应小于 5ms。

6 在展开排列和共炮点地震记录上进行反射波同相轴识别,应采用单相位或多相位对比。同一层位的反射波与其续至相位或多次反射同相轴呈双曲线应彼此平行,不同层位的反射波同相轴随炮检距增加应彼此逐渐靠拢。

7 进行瑞雷波对比时,应根据瑞雷波的频散特征,在时间域和频率域综合对比分析。反映层位变化的瑞雷波同相轴随炮检距的增加应彼此逐渐散开,同相轴之间时差递增,且频率降低。

#### 3.4.13 旅行时读数应符合下列要求:

1 应使用原始记录读取波的初至时间。直接读取初至有困难时,可读取有效波第一个极值时间,但应进行相位校正。

2 在波的干扰或置换位置,应在分析波的叠加特征后正确读取。

3.4.14 旅行时读数应按本标准附录 C.4 进行校正,校正内容宜包括相位校正、爆炸深度校正、表层低速带校正及地形校正。

#### 3.4.15 平均速度和有效速度的取值应符合下列要求:

1 确定平均速度或有效速度应考虑近地面介质不均匀性、低速带与下伏层厚度的相对变化的影响。

2 速度参数可通过地震测井、浅层反射波法、浅层折射波法及瑞雷波法探测资料求得。

3 测区有钻孔时应利用地震测井曲线计算平均速度,并对平方坐标法和交点法求取的有效速度进行评价和修正。

4 地震勘探时宜在测线每 100m 测段的两端进行有效速度测试。当发现相邻速度差大于 20%时,应在该测段内增加速度测试工作,并绘制速度沿测线的变化曲线,按曲线上对应的速度值构制界面。

5 当地层低速带厚度变化引起有效速度明显变化时,应先进行低速带校正,然后以低速带的下伏地层的有效速度构制界面。

6 在同一测线上,没有充分资料证明有效速度突变时,不应分段采用有效速度构制界面,避免引起界面深度的突变。

3.4.16 浅层折射波法数据处理、资料解释、图件除应符合本标准 3.1.8、3.1.9 的规定外,还应符合下列要求:

1 绘制时距曲线的比例尺应根据实际观测精度加以选择,人工绘制时水平比例尺可采用 1:1000 或 1:2000,垂直比例尺可采用 1cm 代表 10ms 或 20ms。

2 时距曲线绘制后,可根据互换时间的相等性、追逐时距曲线的平行性、炮点两侧截距时间相等性的原则进行检查。出现非正常现象时,应检查地震记录相关道的读数并进行修改。

3 时距曲线中个别道出现旅行时突变时,应对照相应地段的相遇或追逐时距曲线旅行时进行检查,查明原因并进行必要的修正。

4 绘制综合时距曲线时,应将经过爆炸深度校正和相位校正的观测时距曲线一并绘出。

5 应由相遇时距曲线解释求取界面速度和深度。只有在近似水平层状介质、地面和界面起伏较小、速度横向无明显变化时,方可采用单支时距曲线截距时间法或临界距离法求取界面深度。

6 构制浅层折射界面的方法应根据地球物理条件、解释方法的特点和精度要求选择。单支时距曲线解释有截距时间法和临界距离法、正演拟合计算法;相遇时距曲线解释有  $t_0$  法、延迟时法、时间场法、共轭点法、正演拟合计算法。方法选用要求:

1) 当界面起伏不大、无穿透现象、沿测线界面速度无明显变化时,可采用  $t_0$  法或延迟时法。

2) 当地面有一定起伏、折射界面起伏较大、无穿透现象、界面速度有明显变化时,可采用

时间场法。

- 3) 当地面较平坦、折射界面起伏较大、无穿透现象、界面速度有明显变化时,可采用共轭点法。
  - 4) 对于多层不均匀或具有特殊结构的地层,可采用多种方法构制界面或折射分层综合求解。
  - 7 应依据任务要求,在分析测区内有关地质、钻探及其它物探资料的基础上做出地质解释。
    - 1) 应依据钻孔或物性资料确定地震界面与地质界面的对应关系。
    - 2) 应依据物性和地质资料推断水平方向岩性变化。
    - 3) 应分析原始记录上有无伴随振幅衰减、波形变化等现象确定低速带与断层破碎带的对应关系。
  - 8 浅层折射波法成果图件的要求:
    - 1) 成果图件宜包括综合时距曲线图、成果地质解释剖面图或平面图。
    - 2) 综合时距曲线的上部除绘制综合时距曲线和观测时距曲线外,还应绘制完整的解释辅助线;此外,在炮点上方应标注截距时、表层波速和有效速度,在下部地震地质剖面图上绘制地质界面、断层构造,并标注界面速度。
    - 2) 成果地质解释剖面图上,应注明比例尺、高程、剖面桩号和方向、剖面端点和转折点的坐标、测线交点、界面上下介质的波速值和地质岩性符号,并将通过测线的勘探点位置标注在图上。比例尺应符合地震勘探测量精度的要求。
    - 4) 成果地质解释平面图可包括覆盖层等厚度图、基岩面等高线图、其它目的层等厚度图和界面速度分布图等,在平面图上应标注地质界线与解释的构造线、测线及序号、钻孔位置及孔号、坑槽位置及编号和主要地形地物标志等。
- 3.4.17 浅层反射波法数据处理、资料解释、图件除应符合本标准 3.1.8、3.1.9 的规定外,还应符合下列要求:**
- 1 应利用展开排列资料与测区已知地质及其它物探资料进行正反演相关分析,确认目的层的反射波波组。
  - 2 应根据原始记录的信噪比和探测任务要求,拟订处理流程,选择滤波频率、滤波视速度、叠加速度、平均速度等处理参数。
  - 3 原始记录预处理应将不正常道数据充零,校正反极性道。
  - 4 在地形起伏较大、表层低速带速度或厚度变化较大的测区,一次静校正应符合下列要求:
    - 1) 测线地形起伏较大且地形单元明显不同时,应依据地形单元分段选取地形改正基准线。
    - 2) 表层低速带沿测线方向变化较大时,应沿测线补充必要的小折射进行观测。
  - 5 进行速度分析,选取叠加速度的要求:
    - 1) 可使用速度谱或速度扫描求取叠加速度,当地球物理条件较复杂时,宜用两种方法互为校核。
    - 2) 速度扫描时应选取地形比较平坦,信噪比高的地震记录,并采用较小的速度增量。
    - 3) 沿测线应有足够的测段进行速度分析,并绘制速度展开图,结合速度测井资料,分析速度横向变化规律。
    - 4) 水平叠加效果欠佳的地段,应对该段叠加速度作必要的修改。
  - 6 数字滤波的要求:
    - 1) 应在频谱分析的基础上选择滤波频率。
    - 2) 应调整滤波宽度,解决提高信噪比和分辨率的矛盾。
    - 3) 应选用合适的镶边宽度,避免吉布斯现象并减少滤波因子截断引起的误差。
    - 4) 在构造发育地区,不宜进行叠前二维滤波,避免横向混波对断层等地震波动力学特征的影响。
  - 7 依据测区地球物理条件和地震记录特点,可选用下列处理方法:

- 1) 有效反射波组之间振幅强弱悬殊的记录, 叠前应进行道内动平衡处理。
  - 2) 有效反射波组之间相互干扰的记录, 宜采用反褶积处理。
  - 3) 对垂向速度倒转的测段, 宜进行相应的动校正处理。
  - 4) 当界面倾角较大时, 可进行偏移叠加或叠加偏移。
- 8 在断层发育区和断层破碎带附近不宜进行剖面修饰性处理。
- 9 原始的等偏移资料或地震映像资料进行定量解释时, 应作动校正处理。
- 10 浅层反射波资料解释基础图件的要求:
- 1) 图上应注明测区名称、测线号、偏移距、检波点距。
  - 2) 水平叠加时间剖面图还应注明叠加次数、处理流程、叠加速度等。
  - 3) 等偏移时间剖面图或地震映像图应注明是否经过动校正处理及标注动校正速度值。
  - 4) 时间剖面典型地段应附相应的展开排列记录。
- 11 应依据基础图件, 采用地质和其它物探资料进行对比分析, 确定地质层位和地震波组关系, 选取与探测目的层位对应的波组进行对比、追踪, 获得目的反射层的特征。反射层位应标注编号。
- 12 各种时间剖面解释应包括确定主要地质层位与反射层位的关系, 确定地层厚度变化及接触关系和划分断层或破碎带。
- 13 应分析时间剖面图中波组分叉、合并、中断、尖灭等现象, 得出与地层、岩性、构造的变化关系。
- 14 对第四系松散地层中的沉积构造及其它地质现象的确定和解释, 应有地质或其它物探资料对比和佐证。
- 15 应分析等偏移时间剖面或地震映像图中波形的振幅、频率、相位、余振、波散等动力学特征与地下介质横向和纵向变化的关系。
- 16 构制浅层反射界面的方法有交点法、椭圆法、圆法、时间场法等, 应根据地球物理条件、解释方法的特点及精度要求选择。
- 1) 当覆盖层介质较均匀、平均速度变化不大时, 可采用交点法、椭圆法和圆法构制反射界面; 交点法和椭圆法适用于水平和倾斜界面, 圆法适用于视倾角小于  $10^{\circ}$  的界面。
  - 2) 当覆盖层介质不均匀、平均速度变化较大时, 可采用时间场法求解。
- 17 成果图件可包括成果地质解释剖面图或平面图, 地质解释平面图中应制作等深度图或等  $T_0$  图, 并圈定断层构造线的平面分布。
- 3.4.18 瑞雷波法数据处理、资料解释、图件除应符合本标准 3.1.8、3.1.9 的规定外, 还应符合下列要求:
- 1 可选用时间差法或相位差法计算稳态瑞雷波某一频率的自探测表面以下  $\lambda/2$  深度范围内地层的  $V_R$ 。
  - 2 稳态瑞雷波速度计算应选择位于激发点同一侧和相位差在  $2\pi/3 \sim 2\pi$  间的两个检波点上的记录, 从高频至低频, 逐个读取两个记录中瑞雷波的时间差或相位差计算  $V_R$ , 以两个检波点连线的中心为测试点绘制该点频散曲线。
  - 3 瞬态瑞雷波数据处理流程应包括时间距离、频率波数、距离频率、深度速度四个阶段, 逐步进行数据整理、提取、叠加和反演, 并以图像和数据表格显示中间和最终处理结果。
  - 4 瞬态瑞雷波数据处理时, 应先分析记录中的瑞雷波的频散特性和分布范围, 选定频谱分析时窗, 进行振幅谱和相位谱分析, 将时窗内各地震道不同频率的瑞雷波分离出来, 选用合理的处理方法得出瑞雷波的频散曲线。
  - 5 应选用互相关法, 也可选用相位差法、频率波数域法和空间自相关法计算瞬态瑞雷波速度。可选用极值法或近似点法、一次导数法或拐点法求取层厚度。可按本规程附录 C.4 计算横波速度。
  - 6 瑞雷波的资料应依据频散曲线的“拐点”特征解释地下弹性介质分界面, 对于剖面探测也可利用剖面图中瑞雷波速度异常区的大小、分布情况进行解释。

7 瑞雷波的深度转换可选用半波长法,并按泊松比进行系数校正,也可参照测区地质资料进行对比解释。

8 频散曲线应以瑞雷波的频率为纵轴、瑞雷波速度为横轴绘制波速频率曲线,也可绘制深度频率曲线。稳态法可用短折线绘制,瞬态法应以点状曲线绘制,也可在同一图中同时用短折线绘制。

9 当进行剖面测试时,应将波速频率或深度频率曲线按任务要求的比例绘制在同一剖面上,也可根据最后反演计算的层速度和层深度绘制  $V_R$  剖面等值线图、色谱图和灰度图。

### 3.5 弹性波测试

3.5.1 弹性波测试可选用声波法和地震波法,声波法包括单孔声波、穿透声波、表面声波、声波反射、脉冲回波法,地震波法包括地震测井、穿透地震波速测试、连续地震波速测试。

3.5.2 应用条件应符合下列要求:

- 1 单孔声波应在无金属套管、宜有井液耦合的钻孔中测试。
- 2 穿透声波在孔间观测时宜有井液耦合;孔距大小应确保接收信号清晰。
- 3 表面声波、声波反射和地震连续波速测试应在混凝土、基岩露头、探槽、竖井及洞室比较平整的表面进行。
- 4 脉冲回波宜在目的体与周边介质有明显的波阻抗面,并在目的体内能产生多次回波信号的表面进行。
- 5 地震测井宜在无金属套管的钻孔中进行。
- 6 穿透地震波速测试宜在钻孔、平洞或临空面间进行;用于探测时,被探测目的体与周边介质间应有明显的波速差异且具有一定规模。

3.5.3 仪器设备应符合下列要求:

- 1 声波仪的要求:
  - 1) 最小采样间隔为  $0.1 \mu s$ 。
  - 2) 采样长度不小于 512 样点/道,并可选。
  - 3) 触发方式宜有内、外、信号、稳态等方式。
  - 4) 频带宽为  $10 \sim 500 \text{kHz}$ 。
  - 5) 声时测量精度为  $\pm 0.1 \mu s$ 。
  - 6) 发射电压为  $100 \sim 1000 \text{V}$ 。
  - 7) 发射脉宽为  $1 \sim 500 \mu s$ ,并可选。
- 2 声波反射宜使用具有波列显示功能的浮点放大仪器,震源能量可控、一致性好,接收探头频率特性好、阻尼适中。
- 3 脉冲回波应使用频带宽、采样率高、采样长度大、具有频谱分析功能的仪器。
- 4 使用电火花和超磁致伸缩震源的要求:
  - 1) 仪器设备的防护和使用应符合高压电器的要求。
  - 2) 震源应能激发高频声波脉冲、能量可控。
  - 3) 记时信号起跳尖锐、稳定,与接收仪器同步,延时误差应小于读数误差的 2 倍。
- 5 地震波法的仪器设备应符合本标准 3.4.3 的规定。

3.5.4 外业准备工作应符合下列要求:

- 1 声波测试前应对声波仪器设备进行检查,内容包括触发灵敏度、探头性能、电缆标记等。
- 2 柱状发射和接收探头在水池中应按不同间距进行测量,绘制 3~4 个测点曲线求取零值,平面探头宜用耦合剂耦合直接测零值。
- 3 地震波测试应符合本标准 3.4.4 的相关规定。

3.5.5 工作布置除应符合本标准 3.1.3 的规定外,还应符合下列要求:

- 1 在基岩露头、探槽、竖井及洞室中测试,测段应根据探测任务要求布置在有代表性和表面平

坦的地段，在岩浆岩和厚层岩体中地下洞室内测试的连续剖面应布置在洞壁的另一高度，在层状岩体测试中可沿岩层的同一层次布置测线。点距应依据地球物理条件和仪器计时精度及分辨率的要求而确定，声波法宜为 0.2~0.5m，地震波法宜为 1~2m。

2 进行表面声波、声波反射、脉冲回波测试时，应选择合适的测网和工作比例尺，确保能发现测试任务要求的最小异常，并在成果图上能清楚反映出探测目的体的位置和形态为原则。

3 进行穿透声波或穿透地震波速测试时，孔距应根据地球物理条件、仪器分辨率、激发能量来确定，并应进行孔斜测量和孔距校正。

4 进行动弹模量和静弹模量对比试验时，应在测试静弹模试件面上不同方向布置钻孔，并应合理布置孔数、孔距和孔深，测试不同方向的岩体声波速度。

### 3.5.6 现场测试应符合下列要求：

#### 1 孔中测试要求：

- 1) 应先用直径和重量略大于测试探头的重物对测试孔进行探孔，斜度较大的钻孔和上斜孔宜使用探棍。
- 2) 电缆深度标识应准确明显。
- 3) 钻孔有套管时，宜将套管以外的空隙用水、砂土等填实。

#### 2 单孔声波测试要求：

- 1) 宜使用一发双收声波探头。
- 2) 在干孔中进行声波测试时应使用干孔声波探头，并保持探头与孔壁接触良好、接收信号清晰。
- 3) 宜从孔底向孔口测试，点距 0.2m，每测试 10 个点应校正一次深度。
- 4) 孔壁较破碎或钻孔较深时，宜采用大功率发射探头或采用具有前置放大功能的接收探头。

#### 3 穿透声波测试要求：

- 1) 可采用水平同步、斜同步等观测方式；
- 2) 具有两个相对临空面的混凝土体或岩体，应选用适当频率的平面声波探头测试，并用耦合剂耦合，发射和接收间距离应测量准确。

#### 4 表面声波测试要求：

- 1) 应选用平面声波探头。
- 2) 可采用单支或相遇时距曲线观测系统测试声波速度。
- 3) 当距离较大或声波衰减较快时，可采用大功率发射探头或采用具有前置放大功能的接收探头。
- 4) 安置探头处应平整，并使用耦合剂耦合。

#### 5 声波反射和脉冲回波测试要求：

- 1) 应在已知地段进行试验，选择合适的偏移距、激发能量和仪器参数等。
- 2) 应采用平面声波探头进行等偏移测试，声波接收探头应具有高灵敏度、中等阻尼的性能。
- 3) 声波反射可选用超磁致伸缩、回弹锤等窄脉冲的外触发震源，脉冲回波宜根据测试要求选用不同频率的回弹球。
- 4) 安置探头表面应平整，宜用耦合剂耦合。

#### 6 连续地震波速测试要求：

- 1) 宜选择岩体表面起伏不大的地段，并按地质结构、岩性、风化程度、岩体完整程度布置测段。
- 2) 排列长度应根据岩体的完整程度和仪器的读数精度要求确定，并保证在排列内相邻道的纵波传播时间应大于仪器可读数精度的五倍。
- 3) 宜采用单支或相遇时距曲线观测系统。
- 4) 测试岩体横波速度时，在基岩露头宜采用叩板震源，在平洞宜使用洞壁支撑器，并采用

正、反向激发，且要求横波获得率不低于纵波资料的 60%。

7 地震测井和穿透地震波速测试要求：

- 1) 激发和接收应符合本标准 3.4.8 的相关规定。
- 2) 地震测井可采用地面孔口激发、孔中接收观测方式。
- 3) 地震测井地面激发点到孔口距离可通过试验确定，宜为 2~4m。
- 4) 测点点距应根据地层波速确定，覆盖层中宜为 1~2m，基岩中宜为 2~3m。
- 5) 孔间穿透地震波速测试宜沿岩层倾向采用同步观测方式，进行同一直线上的 3 个孔的观测时宜采用一孔发射、另两孔接收的一发双收方式，各激发点与接收点之间的距离宜根据钻孔测斜资料校正。
- 6) 使用井中剪切锤震源宜自下而上移动、深度应准确、贴壁应牢固。
- 7) 采用三分量检波器测试横波时检波器应贴壁。
- 8) 孔间穿透地震波速测试宜选用电火花震源，且应有水或泥浆耦合，当孔距较大时也可选用爆炸震源。
- 9) 洞间或临空面间穿透地震波速测试可视距离或地球物理条件选择爆炸震源或锤击震源。

3.5.7 观测、重复观测应符合下列要求：

- 1 读数时应选择合适的衰减档或增益，使振幅适当，并使初至点或反射波清晰易读。测振幅时应保持测试条件不变，并读取同一相位振幅值，且注明所读相位。
- 2 采用间歇式发射或锤击时应分析波形的初至或反射波、波形形态，选择初至及反射清晰、波形稳定的信号。
- 3 对波形曲线剧变或测点跳变的测段，应采用叠加方式或加大发射能量进行重复测试，并用三次重复测试的平均值作为测试结果。

3.5.8 资料处理与解释除应符合本标准 3.1.8 的规定外，还应符合下列要求：

- 1 测试成果分析与解释前，应作零点校正、孔斜校正、高差校正、偏移校正等。
- 2 利用速度计算岩体完整性系数时，一个测区内，对于同类岩性应使用新鲜完整岩块的同一波速，岩体完整性系数按本标准附录 C 公式 C.6.3 计算，并按表 3.5.8 要求进行评价。

表 3.5.8 岩体完整性系数分类表

完整程度	完整	较完整	完整性差	较破碎	破碎
岩体完整性系数	$K_i > 0.75$	$0.75 \geq K_i > 0.55$	$0.55 \geq K_i > 0.35$	$0.35 \geq K_i > 0.15$	$K_i \leq 0.15$

- 3 在取得纵波、横波速度和密度值的情况下，可计算动弹模量，可通过动静对比建立相关关系。
- 4 脉冲回波应进行频谱分析，对比分析各个峰值，找出目的层或缺陷的回波频率，并依据测试的速度参数计算出目的层厚度或缺陷埋深。
- 5 穿透声波宜进行波列分析。

3.5.9 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：

- 1 洞室弹性波测试应绘制测试综合成果图，该成果宜包括波速曲线、动弹模量曲线和完整性系数曲线。
- 2 进行工程质量检测的单孔声波、穿透声波、地震测井均应绘制波速曲线，同时绘制统计分析曲线。当多个孔（洞）在同一剖面或断面时，波速曲线宜绘制在同一剖面或断面上。
- 3 当多条表面声波或连续地震波速测试的测线组成测网时应绘制波速平面分布图。
- 4 声波反射应绘制等偏移距时间剖面、物探成果地质解释剖面或平面图。
- 5 脉冲回波应绘制时间剖面和频率剖面。

### 3.6 层析成像

3.6.1 层析成像(CT)可选用弹性波速度层析成像和电磁波吸收系数层析成像(简称电磁波CT),弹性波速度层析成像包括声波速度层析成像(简称声波CT)和地震波速度层析成像(简称地震波CT)。

3.6.2 应用条件应符合下列要求:

1 被探测目的体与周边介质之间存在电性或弹性波速度差异,具有电性差异的应选用电磁波CT,具有弹性波速度差异的应选择声波CT或地震波CT;同时存在电性和弹性波速度差异的可根据条件选择其中一种,当条件复杂时可选用多种CT方法。

2 成像区域周边至少两侧应具备钻孔、平洞及临空面等探测条件,被探测目的体宜相对于扫描剖面中间,其规模大小与成像单元具有可比性。

3 声波频率高适于相对较小范围剖面扫描,地震波频率低适于较大范围剖面扫描。

3.6.3 仪器设备应符合下列要求:

1 声波CT的仪器设备应符合本标准3.5.3的相关规定。

2 地震波CT的仪器设备应符合本标准3.4.3的相关规定。

3 电磁波CT的仪器设备应频率可选,噪声电平小于 $0.2\mu\text{V}$ ,测量范围为 $20\sim 140\text{dB}$ ,动态范围为 $100\text{dB}$ ,测量误差小于 $\pm 3\text{dB}$ 。

3.6.4 测点布置应符合下列要求:

1 CT剖面宜垂直于地层或探测目的体的走向,扫描剖面的钻孔和平洞应共面且相对规则。

2 孔(洞)间距应根据探测任务要求、物性条件、仪器设备性能和探测方法的特点合理布置,声波CT宜小于 $30\text{m}$ ,电磁波CT宜小于 $40\text{m}$ ,地震波CT可根据激发方式和能量大小适当选择。成像的孔(洞)深度应大于其孔(洞)间距,地球物理条件较复杂、探测精度要求较高的部位,孔距或洞距应相对减小。

3 点距应根据探测精度和探测方法要求选择:声波CT不宜大于 $1\text{m}$ ,电磁波CT宜为 $1\text{m}$ ,地震波CT不宜大于 $3\text{m}$ 。

3.6.5 观测系统应符合下列要求:

1 孔(洞)间CT可采用两边观测系统,当孔间地面或洞间边坡条件适宜时可采用三边观测系统,在梁柱或周边临空体情况下可采用多边观测系统。

2 在平洞、钻孔及自然临空面所构成的地震波CT剖面内,应充分利用被探测区域周边的激发与接收条件,采用一发多收的扇形观测系统,保持射线分布均匀,交叉角度不宜过小。

3 声波CT和电磁波CT观测宜以定点扇形扫描方式为主,水平同步和斜同步观测为辅。定点扫描观测的最大角度以不产生明显剖面外绕射为原则。

4 当发射点间距大于接收点间距时,宜采用两孔互换的观测方式,并保持一定数量的发射点与接收点互换。

5 在同一剖面上进行多个孔间或洞间CT观测时,宜保持观测系统一致。

3.6.6 现场工作应符合下列要求:

1 在钻孔中进行CT观测时应充分了解钻孔情况,采取预防措施,减少孔内事故发生。

2 声波CT和地震波CT除应符合本规程3.5.6的规定外,还应符合下列要求:

1) 声波CT或地震波CT的钻孔应进行声波测井和井斜测量,地震波CT的平洞应进行地震波或声波速度测试。

2) 在钻孔中进行地震波CT或声波CT宜选择孔壁相对完整的孔作为接收孔,当孔壁条件较差时宜下塑料套管。

3) 当采用爆炸震源进行孔间地震波CT时,激发孔应下金属套管护壁,自下而上边提升套

管边在管脚下放炮，防止孔壁坍塌。

4) 当激发与接收距离较远时，应选用高能量激发装置或具有前置放大功能的接收探头或高灵敏度检波器接收。

3 电磁波 CT 的要求：

1) 应通过现场试验选择仪器的工作频率和对应天线。

2) 可选择单频或多频观测方式，当同一剖面进行多组电磁波 CT 时，应使用相同的频率，并在地球物理条件相对简单的孔段进行三孔法同步观测，以确定初始场强和背景值。

3) 电磁波仪的发射机与电缆间宜用长度为二倍所选波长的绝缘绳相连，接收机与电缆间应用电缆滤波器相连，天线应悬挂重锤。

4) 在孔（洞）间进行电磁波 CT 时，应避免钢管、铁轨等金属物件影响，并用金属板将孔（洞）口屏蔽，以防止电磁波绕射。

3.6.7 对异常突变点应重复观测，在异常区内的测点应进行检查观测，收发互换观测资料可作为检查工作量。

3.6.8 旅行时或场强的单点重复观测相对误差  $\delta$  应小于 3.5%，检查观测的均方相对误差  $m$  应小于 5%。

3.6.9 资料处理和解释除应符合本标准 3.1.8 的规定外，还应符合下列要求：

1 应根据测量资料建立坐标系，将每条射线的激发点与接收点转换为成像剖面的二维坐标，并与相应的旅行时或场强资料形成数据文件。

2 应计算出每条射线的平均速度或平均吸收系数，并分别显示出各个同步和定点相应的参数曲线，初步判定异常位置和反演参数的变化范围。

3 应根据地球物理条件、观测系统、成像精度、分辨率和探测任务要求建立数学物理模型，确定单元和节点的形态和大小。单元网格尺寸应大于测点间距，单元总数宜小于射线条数。

4 射线追踪宜由直线向弯线过渡，可选择线性方程、打靶法、最小旅行时或平方慢度等方法。

5 反演算法可选择奇异值分解（SVD）、联合迭代（SIRT）、共扼梯度（CG）、阻尼最小二乘法（LSQR）和以上方法改进的其它方法。

6 反演迭代次数应根据射线路径和图像形态的稳定程度确定，也可根据相邻两次迭代的图像数据方差确定。

7 可将钻孔或平洞原位测试的相关资料作为边界条件加入相应的反演计算中，克服边界效应所产生的伪差。

8 对于相互连接的 CT 剖面，应采用相同的反演方法、模型和参数。

9 弯线反演的最终射线分布图可作为成果之一，根据射线疏密程度确定高速区或低速区、高吸收区或低吸收区的位置和规模，并按 CT 图像参数的变化梯度确定异常范围、延伸方向。

10 应根据 CT 图像速度或吸收系数的分布规律，结合被测区域的地层岩性、地质结构等进行地质推断解释。

3.6.10 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：

1 图件宜包括 CT 图像、射线分布图、CT 解释成果图，如有其它相关测试资料时，应绘制相应的成果图。

2 CT 图像可以采用等值线、灰度、色谱等图示方法，图像可按等差分级，为了突出异常，也可采用变差分级。

3 同一剖面的多组 CT 剖面可拼接成一幅成果剖面图。

### 3.7 水声勘探

3.7.1 探测水利水电工程的水库、河道、湖泊和浅海深水区的水下地形，以及探测坝址、桥基、港口工程水下地层剖面可选用水声勘探。

3.7.2 应用条件应符合下列要求:

- 1 被探测地层与其相邻层之间具有波阻抗差异。
- 2 进行水下覆盖层分层时,被探测地层应具有一定厚度,且介质均匀和波速稳定。
- 3 被探测目的层以上无卵砾石或卵砾石呈零星分布。

3.7.3 仪器设备应符合下列要求:

- 1 探测深度及分辨率:
  - 1) 水深小于 50m 时,疏松沉积层 0~25m,分辨率为 0.3~0.5m。
  - 2) 水深大于 50m 时,疏松沉积层 25~50m,分辨率为 0.5~1.0m。
- 2 振荡次数:
  - 1) 浅层在 0~25m 为 360 次/min。
  - 2) 深层在 0~50m 为 180 次/min。
- 3 接收放大器增益应不小于 150dB。
- 4 接收探头灵敏度应不小于  $10 \mu V/\mu \text{bar}$ 。

3.7.4 测线布置应符合下列要求:

- 1 河道及水库的测线应垂直于水下地形的走向,并宜采用横河剖面布置,线距宜为 50m。
- 2 当水下地形较平坦时,测线可按顺流方向布置。

3.7.5 定位测量应符合下列要求:

- 1 观测剖面线宜采用 GPS 定位测量,在河道或水库工作时也可选用其它定位测量方法。
- 2 GPS 测量方法应为实时动态测量。
- 3 对于模拟信号仪器,水声记录标记与 GPS 采样数据应同时进行,定位点间隔可根据探测精度确定,并宜小于 50m。对于数字信号仪器,可采用 GPS 连续定位。
- 4 剖面测量时测量结果的误差,在所用的地形图上坐标应小于 2mm,高程应小于 0.5m,两岸剖面桩间的距离相对误差应小于 1%。

3.7.6 现场工作应符合下列要求:

- 1 现场作业宜采用载重量为 10~20t 且噪声小的平底机船,为保证机船作业时顺利行驶,应根据船的吃水深度确定最小工作水深,水的深度宜大于 2m。
- 2 发射探头和接收探头应分别安装在船的两侧船舷上,发射探头在船舷后面的一侧,接收探头在船舷前面的另一侧,两者之间的距离应为 6~8m,探头入水深度视波浪大小而定,水面平静时入水深度宜为 0.5m。
- 3 对于发射和接收装置一体化的拖鱼型探头,探头应安装水平,不宜离船太近,防止撞击船体并避免对水下信号产生影响。
- 4 测船航行时宜保持每条剖面定向和恒速行驶,仪器操作员应按要求时间作标记。
- 5 观测过程中应根据不同地层情况,通过试验选用合适频率参数,提高地层分辨率。应根据深度变化调整接收灵敏度和变换频率。
- 6 河道及水库的水声勘探每天开始工作时,应测量一次水面高程。水位涨落变化较大时(高差大于 0.3m),应保持每隔一定时间间隔测量一次水面高程,并绘出工作期内的水面高程随时间变化曲线。

3.7.7 资料处理和解释应符合下列要求:

- 1 当水深小于 15m 且使用分体探头时,应进行路径校正,消除发射探头与接收探头偏移造成的深度误差。
- 2 应校准水下探测层的速度,并准确计算水下各探测层厚度。

3.7.8 成果图件应包括水下地形图、水声地质剖面图、水下淤泥层或覆盖层等厚度图、基岩等高线图。

## 3.8 放射性测量

3.8.1 放射性测量可选用自然伽玛测量（简称伽玛测量或 $\gamma$ 测量）、 $\alpha$ 射线测量、环境氡浓度测量和同位素示踪法等。

3.8.2 应用条件应符合下列要求：

1  $\gamma$ 测量不受地形限制，但在测量中应保持测量几何条件一致，宜在下列地质条件下使用：

- 1) 被探测目的体和周边地层有明显的放射性差异。
- 2) 构造破碎带和地下储水构造埋藏较浅。
- 3) 第四纪覆盖层无潜水层等“屏蔽”层。
- 4) 岩浆岩地区。

2  $\alpha$ 射线测量可在覆盖层中取土样或埋设静电 $\alpha$ 卡进行现场测量，不宜在阴雨季节中进行，其他条件与 $\gamma$ 测量相同。

3 空气中氡浓度测量样品采集应符合 GB/T 14582 的规定。

4 同位素示踪法宜使用半衰期短污染小的  $^{131}\text{I}$  放射性同位素，可用于单个钻孔中或多个钻孔中（间）测试水文地质参数。

3.8.3 仪器设备应符合下列要求：

1 勘探 $\gamma$ 测量仪器的要求：

- 1) 用测低能谱的 $\gamma$ 谱仪的谱段可调，并有稳谱装置，连续 8h 工作读数相对误差应小于 1%。
- 2) 辐射仪做积分测量时，应能测量数十到数百千电子伏特低能量 $\gamma$ 射线。
- 3) 辐射仪灵敏度高，在自然底数不大于  $0.72\text{PC}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ （即  $10\mu\text{R/h}$ ）时，灵敏阈不大于  $0.143\text{PC}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ （即  $2\mu\text{R/h}$ ）。
- 4) 辐射仪在  $0\sim 3.6\text{PC}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ （即  $0\sim 50\mu\text{R/h}$ ）范围内呈线性。

2 环境 $\gamma$ 测量仪器的要求：

1) 量程范围

低量程为  $1\times 10^{-8}\sim 1\times 10^{-5}\text{Gy/h}$ ；

高量程为  $1\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-2}\text{Gy/h}$ 。

2) 相对固有误差小于 15%；

3) 能量响应为  $50\times 10^5\sim 3\times 10^6\text{eV}$  相对响应之差小于 30%（相对  $^{137}\text{Cs}$  参考 $\gamma$ 辐射源）。

4) 角响应为  $0^\circ\sim 180^\circ$   $\bar{R}/R$  不小于 0.8（相对  $^{137}\text{Cs}$  参考 $\gamma$ 辐射源、 $\bar{R}$ ：角响应平均值、 $R$ ：刻度方向上的响应值）。

3  $\alpha$ 射线测量仪的要求：

1) 应用大闪烁体制做闪烁探测器，探测射线的效率  $A_m^{241}$  应大于 60%。

2) 在极限条件下读数与正常读数相对误差应小于 15%。

3) 一周内不做调整，重复读数相对误差应小于 15%。

4 环境氡浓度测量仪器应符合 GB/T 14582 的规定。

5 同位素示踪仪器的要求：

1) 当  $V_v$  大于  $0.1\text{m/d}$  时，垂向流速测试相对误差应小于 2%。

2) 当  $V_f$  大于  $0.05\text{m/d}$  时，水平流速测试相对误差应小于 3%。

3.8.4 测线布置除应符合本标准 4.1.3 的规定外，还应符合下列要求：

1  $\gamma$ 测量和 $\alpha$ 射线测量的要求：

1) 测网密度可通过试验确定，在已知的地段上进行不同精度的测量，将获得的资料与已知的地质资料比较，确定最佳的测网密度。

2) 测线间距在工作比例尺平面图上应为  $2\sim 4\text{cm}$ ，并有不少于三条测线通过主要探测目的体。测点间距在工作比例尺平面图上应为  $0.5\sim 2\text{cm}$ ，实际点距宜为  $5\text{m}\sim 10\text{m}$ 。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

2 环境土壤中氡浓度测量应根据地质构造、断层带位置布置测线，测线宜垂直于构造走向，测线间距宜为 10~20m，测点间距宜为 5~10m。

3 环境空气氡浓度测量应根据建筑物的特点，选择具有代表性的地点布置测线，测点间距宜为 20~50m。

4 同位素示踪法在不同的水文地质单元上布置或选择一个或多个钻孔，钻孔位置和深度应符合 GB/T 50027 的规定。

### 3.8.5 现场测试应符合下列要求：

#### 1 $\gamma$ 测量要求：

- 1) 应利用测区内或附近地质构造、井泉等已知条件校核测网密度，试验测量方法及最佳谱段范围，了解正常场大小及异常场幅度。
- 2) 每天工作前和结束后，应在固定场地检查仪器的正常底数和用工作源检查仪器灵敏度。
- 3) 同一条测线应由同一个人用同一台仪器一次测完。
- 4) 检查工作应重点选择异常点和可疑测点，并兼顾各条测线。
- 5) 测线上应避免建筑物等人为影响，并保持各测点的测试条件一致。
- 6) 环境 $\gamma$ 测量时，探头离地面高度宜为 1m。

#### 2 $\alpha$ 射线测量要求：

- 1)  $\alpha$ 射线测量与 $\gamma$ 测量的要求基本相同，但在测量点要求取样。
- 2) 可选择挖取土样或埋设静电 $\alpha$ 卡。
- 3) 静电 $\alpha$ 卡取样时，测点应选在覆盖层中，埋卡的小坑要求坑底平坦、无粘土、碎石等杂物； $\alpha$ 卡的埋卡时间应根据辐射场强度确定，并应大于 4h；取卡测量的时间间隔和埋卡时间间隔应一致。

3 同时进行 $\gamma$ 测量和 $\alpha$ 射线测量时，应保持 $\gamma$ 射线测量和坑内取土样品 $\alpha$ 射线测试深度一致。

#### 4 环境氡浓度测量要求：

- 1) 室内放射性气体测量应符合 GB/T 14582 的规定。
- 2) 室内氡及其子体样品采集，探头应离地面 1.5m。
- 3) 地下洞室、厂房空气氡浓度测量宜采用定期与不定期相结合的检测方法，并按 GB/T 16356 的规定确定监测频率和选定监测点。

#### 5 同位素示踪法的要求：

- 1) 每次仪器下井前应作地面本底和装源后底数记录。
- 2) 测试水文参数时，应选择合适的放射性同位素；测试地下水流速流向宜选用  $^{131}\text{I}$ ，每次投放量应低于  $1 \times 10^8 \text{Bq}$ 。
- 3) 测试渗透速度和流向应采用单孔稀释法，测试钻孔中的垂直流速应采用单孔示踪法，测试地层孔隙度宜选用多孔示踪法。
- 4) 测试地下水流速和流向应在水文地质观测孔中进行，观测孔的布置应符合 GB/T 50027 的规定，第四纪覆盖层、喀斯特、构造裂隙发育孔段应下花管护壁。
- 5) 渗流通道的连通试验应事先估计投放点至检测点之间的渗漏量、饱和层体积、孔隙度等基本参数，多孔连通试验每次需要投放大量的放射性同位素并应选用  $^{131}\text{I}$ ，且应一次投完，每次投放最大剂量应小于  $100 \times 10^9 \text{Bq}$ 。
- 6) 同位素投放后应每隔 5~10min 记录一组 5~10 个读数，每点应测量 5~10 组读数。
- 7) 进行多点同位素测量时，宜先深后浅；钻孔具有多个含水层时，应采用钻孔分隔器分层测试。

3.8.6 资料的检查与评价除应符合本标准 3.1.7 的规定外，还应符合放射性测量统计涨落误差的要求：

- 1 应按本规程附录 C.5 计算放射性统计涨落误差。

- 2 脉冲记数仪器涨落误差的标准误差 $\sigma$ 应小于 30%，相对标准误差 $\delta$ 应小于 10%。
  - 3 率计式辐射仪涨落误差的标准误差 $\sigma$ 应小于 20%，相对标准误差 $\delta$ 应小于 10%。
- 3.8.7 数据处理与资料解释应符合下列要求：
- 1 应对已有的地质资料、物探成果、地形、地貌、气候条件进行综合分析，了解异常的分布规律和特征，分辨异常性质并排除假异常。
  - 2  $\alpha$ 射线或 $\gamma$ 射线强度高于背景 3 倍以上的可确定为异常点。如果覆盖层较厚、有水体屏蔽或受构造等影响，其强度虽未达到背景值 3 倍以上，但仍高于背景值 1.5 倍以上，仍可确定为异常。
  - 3 钻孔中或井间进行同位素示踪测量时，应按本规程附录 C.5 计算各测点的渗透系数。
  - 4 环境 $\gamma$ 辐射以有效剂量当量为评价标准，测试的 $\gamma$ 辐射照射量率应换算为年有效剂量当量，并按 GB/T 14583 中公式估算。
  - 5 环境氡及其子体浓度以平衡当量氡浓度或氡浓度为评价标准。
- 3.8.8 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：
- 1  $\gamma$ 测量、 $\alpha$ 射线测量、环境氡浓度测量的图件可包括剖面图和平面图。
  - 2 同位素示踪法图件可包括水资源调查取样点位置图、渗流速度沿高程分布图、地下水流速矢量平面分布图。

### 3.9 综合测井

3.9.1 综合测井可采用的方法有电测井、声波测井、地震测井、放射性测井、温度测井、电磁波或雷达测井、井中流体测量、磁化率测井、孔壁超声成像、钻孔电视观察、井径测量、井斜测量等。

3.9.2 应用条件应符合下列要求：

- 1 电测井应在无金属套管、有井液的孔段测试。被探测目的层相对上下层应存在电性差异，目的层应具有一定厚度。
- 2 声波测井、地震波测井宜在无金属套管、有井液的孔段测试。被探测目的层相对上下层应存在弹性波波速差异，目的层应具有一定厚度。
- 3 放射性测井无论有无套管及井液均可应用。自然 $\gamma$ 测井用于分层时，各层应有自然放射性差异； $\gamma$ — $\gamma$ 测井用于分层时，各层应有密度差异。
- 4 钻孔电视观察应在无套管的干孔或清水钻孔中进行。
- 5 超声成像测井宜在无套管、有井液的钻孔中进行。
- 6 井中流体测量应在无套管或有滤管、有井液的钻孔中进行。
- 7 电磁波或雷达、磁化率测井应在无金属套管的钻孔中进行，被探测目的体应具有一定规模，并与周边介质存在电磁差异。

3.9.3 仪器设备应符合下列要求：

- 1 测井仪器深度传动装置的相对误差应小于 2%。
- 2 仪器绝缘性的要求：
  - 1) 地面仪器线路之间、仪器对地、绞车集电环对地、供电电源对地的绝缘应大于 10M $\Omega$ 。
  - 2) 电缆芯对地、电极之间、井下仪器线路与外壳之间的绝缘应大于 2M $\Omega$ 。
- 3 测井仪器精度的要求：
  - 1) 电位差测量误差小于 3%。
  - 2) 电阻率测量误差小于 4%。
  - 3) 井径测量误差小于 5mm。
  - 4) 井温测量误差小于 0.5 $^{\circ}$ C，热惯性小于 3s。
  - 5) 井斜测量在钻孔顶角大于 5 $^{\circ}$  时，顶角测量误差应小于 0.5 $^{\circ}$ ，方位角测量误差应小于 5 $^{\circ}$ 。
  - 6) 地震测井和声波测井的仪器设备应分别符合本标准 3.4.3 和 3.5.3 的规定。
- 4 测井仪器记录精度的要求：

- 1) 模拟测井仪器记录的曲线线迹宽度应小于 0.5 mm，仪器本机噪声引起记录曲线的抖动宽度应小于 1mm。
- 2) 数字测井仪器记录的采样间隔不大于 0.05m。

### 3.9.4 测试技术应符合下列要求：

- 1 测井电缆长度标记的要求：
  - 1) 新电缆使用前，宜在井中让电缆悬挂相当于井中仪器重量的重物上下升降 5 次，且待电缆伸长稳定后做固定的深度记号。
  - 2) 深度标记宜为 10m，对需要用 1:50 深度比例尺进行详细探测时深度标记宜为 5m，长度误差应小于 2%。
  - 3) 每年或每测 10 口井应检查一次。
- 2 每孔测井前，宜先用与下井仪器的直径和长度相当的重锤进行探孔。
- 3 测井数据或曲线的深度比例尺宜与钻孔柱状图的比例尺一致，同一测区宜采用同一深度比例尺。对需要详测的孔段，应追加加大比例尺的辅助记录。
- 4 应根据地质资料、试验测井数据或曲线来确定横向比例尺，在保证大部分曲线记录不超值的情况下选用大比例尺。
- 5 原始测井数据或曲线应准确标记和记录深度：
  - 1) 需要分次分段测井时，主要数据或曲线衔接处应至少重复测量一个深度标记。
  - 2) 对有零线的测井记录，应在数据或曲线的首末两处记录零线位置；对无零线的测井记录，应在曲线的首末两处标出横坐标的参考基线。
- 6 各种连续测井方法在记录测井曲线时，电缆的升降速度应保持恒定并应不超过表 3.9.4 中的限速要求。

表 3.9.4 测井电缆升降速度限度表 单位：m/min

测井方法	深度比例		
	1:200	1:100	1:50
电测井（不含微电极系）	20	10	5
微电极系、井径	10	6	3
声波、放射性、温度、电磁波	5	3	2
钻孔电视观察、超声成像	以观察清晰为宜		

7 井温、井液电阻率测井及钻孔电视观察宜在电缆下放时作正式测量记录，其它测井方法均宜在提升电缆时做正式测量记录。

### 3.9.5 现场测井工作应符合下列要求：

- 1 电测井的电极距选择应根据探测任务要求和不同测区的地球物理条件，经试验后确定；电流测井应减小线路电阻及地面电极的接地电阻，并确保恒压供电，记录电流曲线时应检查并确定增量方向；自然电位测井应采用不极化电极；使用金属重锤时，测量电极应距离重锤 2m 以上。
- 2 自然 $\gamma$ 测井前应采用检测源检查仪器，在泥质岩层井段上应记录统计起伏，记录时间应大于曲线所选用的时间常数的 10 倍； $\gamma$ - $\gamma$ 测井时，有密度刻度器的应在井场标定，无密度刻度器标定时，宜做视密度测量，选用的源强应能压制自然 $\gamma$ 的干扰，在主要目的层井段宜大于自然 $\gamma$ 平均幅值的 20 倍。
- 3 孔壁超声成像深度比例尺应依据岩层倾角的大小，孔洞、裂隙、断层的规模，软弱夹层的厚度以及观测精度确定。
- 4 钻孔电视观察应对主要地质异常进行追踪观察，图像应清晰可辨。
- 5 井中流体测量时，井壁宜冲洗干净。
- 6 多种方法测井时，井温测井应放在最先。
- 7 井径测量前后宜在井场校验仪器，应有 3 个以上不同直径的校验记录，误差应小于 5mm。

8 井斜仪下井前应在井场用罗盘仪或倾斜仪作简单的顶角测量检验及挂零（顶角为  $0^\circ$  时）测试。井斜测量的点距宜小于 5m，井斜变化较大时（顶角差大于  $2^\circ$ 、方位角差大于  $20^\circ$ ）应加密测点。

9 电磁波或雷达测井应根据地球物理条件和探测目的体规模选择一个或多个频率进行测试。

### 3.9.6 检查观测应符合下列要求：

1 井斜测量检查工作量应大于 20%，其它测井方法检查工作量应大于 10%。当某种测井数据或曲线上发现特殊异常时，应在相应井段进行检查观测。

2 检查观测的曲线应与原始测试曲线基本一致。

### 3.9.7 资料检查和评价应符合下列要求：

1 资料评价分为合格和不合格两类。

2 存在下列情况之一者为不合格：

1) 在目的层井段连续漏掉两个以上深度记号。

2) 曲线有 5% 以上的断记、漏记或畸变。

3) 曲线首尾记录、升降速度、深度比例、横向比例、检查观测工作量不符合本规程要求。

### 3.9.8 资料处理和解释应符合下列要求：

1 测井资料宜经过编辑、处理、解释几个步骤，模拟记录可进行数值化处理。

2 应根据各种测井曲线的分层特征，对不同参数曲线进行对比分析，结合地质、钻探等资料，按物性和地质名称分层，确定地层或地质体的深度和厚度。

3 同一测区的地质条件相同时，应统一解释原则，对测井曲线中的异常都应分析解释。

4 地层的真电阻率宜采用横向测井（横向电测深）测试，在不具备横向测井条件时，对较厚的地层可根据电阻率曲线，并考虑井径、井液电阻率及围岩电阻率等的参数确定。进行了侧向测井时，可根据侧向测井曲线并校正后求取。

5 声波测井和  $\gamma$ - $\gamma$  测井的资料解释和推断，应先从宏观上把全孔划分为若干个声速或密度不同的厚层，求取这些层的平均波速和平均密度值。然后再分析各个异常，做出地质推断并划分出薄层。对厚度不足 30cm 的地层，应根据测井曲线计算出波速或密度的大致范围。

6 钻孔电视观察或孔壁超声成像应对钻孔的地质现象做出描述，并计算出裂隙、断层、软弱夹层等的倾角、倾向及其厚度。在顶角大于  $5^\circ$  的斜孔中计算产状时还应利用井径、井斜测量资料进行斜度校正。

7 对斜孔的井斜测量应绘制钻孔在水平面和垂直面上的投影图。

### 3.9.9 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：

1 绘制综合测井解释成果图时，应对本规程允许的深度误差在相邻深度标记内平差，每个平差点一次平差应小于 1mm。

2 同一张图中所有曲线的深度坐标应一致。

3 同一钻孔中进行的电测井、声波测井、放射性测井、温度测井、井径测井曲线，宜绘制在一张综合测井成果图上。孔壁超声成像宜贴在该图的钻孔测井柱状剖面旁。其它测井方法所得资料可单独成图或列表，但其成果均应以文字形式反映到综合测井曲线解释图上。

4 地质剖面上有多个钻孔，或钻孔比较稠密的测区，应在完成单个钻孔的测井解释图基础上，绘制整个剖面的地质解释剖面图，图中可选用少量具有代表性、对目的层反映清楚和便于对比的测井曲线。

5 钻孔电视观察应提交编辑后的图像和典型地质现象的图片。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

## 4 物探方法的综合应用

### 4.1 覆盖层探测

4.1.1 探测覆盖层各层厚度及基岩顶板起伏形态，测试覆盖层各层物性参数，探测古河道或基岩河谷形态，进行天然建筑材料分层和评价，可选用电法勘探、地震勘探、水声勘探、探地雷达、弹性波测试、综合测井。

4.1.2 探测方法技术应符合下列要求：

- 1 测网和测线布置应符合本标准 3.1.3 的规定。
- 2 当覆盖层与基岩之间存在符合本标准 3.2.2 中 1、2、7 的条件时，可使用电测深法或可控源音频大地电磁测深法。
- 3 当覆盖层和下伏基岩之间存在符合本标准 3.3.2 的条件时，可使用探地雷达法。
- 4 当覆盖层和下伏基岩之间存在符合本标准 3.4.2 中 1、2 的条件时，可使用浅层折射波法。
- 5 当覆盖层和下伏基岩之间存在符合本标准 3.4.2 中 1、3 的条件时，可使用浅层反射波法，并配合其它物探方法或钻探进行对比分析。
- 6 当对覆盖层分层要求较薄且探测深度较浅时、并符合本标准 3.4.2 中 4 的条件时可使用瑞雷波法，宜同时配合其它物探方法或钻探作对比分析。
- 7 在水库、湖泊、浅海、港口、码头等水面较宽、水深较深、水流较缓和沉积物粒径较小的河道，可使用水声勘探或地震映像。
- 8 在主要测线和地质条件较复杂的地段应选用综合物探方法。
- 9 测试覆盖层各层物性参数并进行分层可采用综合测井或弹性波测试技术。

4.1.3 资料处理和解释应符合下列要求：

- 1 应依据覆盖层与下伏基岩之间存在的速度、电阻率、密度的差异进行分析和解释。
- 2 应利用钻孔、露头物性资料和孔旁电测深、地震剖面资料分析物性层与地质层的关系，当物性层与地质层不一致时，应使用物性层厚度确定物性参数，并在成果报告中加以说明。
- 3 应分析物性参数在水平方向的变化，并正确利用物性参数进行定量解释。
- 4 应说明覆盖层解释厚度是否包含基岩强风化带。
- 5 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应有覆盖层等厚度图、基岩等高线图。当有条件进行覆盖层分层时，可以绘制某层等厚度图和层面等高线图。

4.1.4 探测精度应符合下列要求：

- 1 在测区内物探条件有利，又有少量钻孔可利用的情况下，探测厚度大于 10m 的覆盖层，深度相对误差应小于 15%；地质条件较差的测区，深度相对误差应小于 20%。
- 2 水声勘探在水深小于 50m 时，探测基岩埋深的相对误差应小于 10%。

### 4.2 隐伏构造破碎带探测

4.2.1 探测隐伏构造破碎带的位置、规模、延伸情况，测试构造破碎带的物性参数，可选用电法勘探、探地雷达、地震勘探、层析成像、放射性测量和综合测井等。

4.2.2 探测方法技术应符合下列要求：

- 1 测网布置除应符合本标准 3.1.3 的规定外，点距宜小于构造破碎带宽度的 1/2。
- 2 当隐伏构造破碎带为低阻异常时，可采用瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法、电剖面法、电测深法和高密度电法等。
- 3 当构造破碎带富集地下水时，可采用激发极化法和电测深法综合探测。当存在地下水活动，并产生过滤电场而形成明显的自电异常时，可采用自然电场法。
- 4 当构造破碎带被钻孔揭露且为良导体时，测试构造破碎带的走向可采用充电法。
- 5 当覆盖层较薄（埋深小于 10m）和电阻率较高时，探测隐伏构造破碎带可使用探地雷达。

6 探测有一定宽度的构造破碎带可采用浅层折射波法,该方法的振幅对比宜使用相同的增益和扫描尺寸,点距宜为 5m。当利用波的动力学特征为主探测宽度较小的断层破碎带的位置时,点距宜为 2m。

7 探测具有垂直断距、上下盘有一定高差的断层可采用浅层反射波法,并宜采用水平多次叠加或等偏移剖面的观测系统,点距宜为 2~4m。

8 当断层破碎带具有较好的透气性和渗水性,有放射性气体沿断裂带上升至地面时,可采用放射性测量。

9 有钻孔时,测试构造破碎带的物性参数及在钻孔轴线上的分布范围可采用综合测井。探测构造破碎带的位置、规模和延伸情况可采用孔间 CT。

#### 4.2.3 资料处理和解释应符合下列要求:

1 应依据构造破碎带在物性上所表现的异常特征,进行综合分析和解释。

2 宜使用综合物探方法的资料,并结合测区的地质结构特征,确定断层破碎带的空间分布。

3 联合剖面法可根据低阻正交点异常推断断层破碎带的位置和走向。

4 瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法、高密度电法可根据  $\rho_s$  断面图推断断层破碎带位置、规模、延伸情况、倾向和大致倾角值。

5 激发极化法应排除碳质岩层及金属矿体等干扰因素。

6 探地雷达资料可根据反射波组出现的异常特征推断断层破碎带位置。

7 浅层折射波法可把  $\theta(x)$  曲线斜率变陡或出现错断、界面速度下降 30% 以上的地段视为低速带,当低速带原始记录伴随有波的振幅减小,视周期增大和波形畸形等特征时,可推断为构造破碎带。依据低速带宽度可大致推算破碎带宽度。小断层破碎带的低速带特征往往不明显,应通过小检波距的探测资料,分析波形变化、振幅衰减和波的置换现象,确定破碎带的位置和宽度。

8 浅层反射波法应对比分析共深度点叠加时间剖面图或共偏移距剖面图,根据基岩中的标准层同相轴的错断现象、反射波振幅衰减、波的置换等特征推断断层的位置。并根据同相轴错断时差,推断断层的大致断距。

9 当覆盖层厚度较薄时(埋深小于 10m)可根据自然电场、激发极化参数和放射性强度在地面产生的物性异常大于正常场 1.5 倍,且在平面上呈条带状分布的特征来推断断层破碎带的位置。

10 图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外,还应包括测区隐伏构造破碎带的平面分布图。

#### 4.2.4 探测精度应符合下列要求:

1 测区内具备有利地形和物探条件时,覆盖层厚度小于 10m 应能查明不小于 2m 宽度的断层破碎带;覆盖层厚度大于 10m 时应能查明宽度为覆盖层厚度 1/4 的断层破碎带;断层破碎带的倾角小于  $45^\circ$ ,应能判断其倾向和大致倾角值。

2 用 CT 方法探测断层破碎带应能查明宽度大于 1/10 孔距的断层破碎带。

### 4.3 喀斯特探测

4.3.1 探测喀斯特的分布、埋深、规模、延伸方向、充填情况和喀斯特地下水,可选用电法勘探、探地雷达、地震勘探、层析成像和综合测井等。

#### 4.3.2 探测方法技术应符合下列要求:

1 当基岩裸露时,探测喀斯特的分布、规模、延伸方向、充填情况可选用探地雷达、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法。

2 当覆盖层较薄时,探测溶沟、溶槽、土洞等可选用电剖面法、高密度电法、浅层折射波法;探测浅埋藏的喀斯特洞穴和构造可选用高密度电法、瞬变电磁法、地震反射波法和瑞雷波法。

3 当覆盖层较厚时,探测喀斯特的分布、规模、延伸方向可选用可控源音频大地电磁测深法。

4 探测隧洞四周的喀斯特分布可选用探地雷达。

5 探测孔间深埋藏喀斯特洞穴及充填情况可选用层析成像。

6 探测孔壁喀斯特地层溶蚀情况、地下喀斯特暗河或泉水的出水点位置、喀斯特地下水位和观察钻孔揭示规模小的喀斯特洞穴可选用综合测井。

7 对于探测场地狭窄的建筑物地基宜选用探地雷达、高密度电法和地震映像。

#### 4.3.3 资料解释应符合下列要求：

1 电剖面法、瞬变电磁法、电磁波CT、可控源音频大地电磁测深法等资料宜根据未充填型喀斯特洞穴呈现高电阻、高吸收的异常特征和充填型喀斯特洞穴呈现低电阻、高吸收的异常特征进行解释。

2 浅层折射波法、弹性波CT资料宜根据喀斯特洞穴的低波速、穿透能量较弱的特点进行解释。

3 浅层反射波法资料宜根据喀斯特洞穴顶部产生的强反射特征、探地雷达资料宜根据喀斯特洞穴的双曲线反射特征，确定喀斯特的分布、规模和顶板埋深。

4 宜对比电磁波和弹性波资料的异常差异，解释喀斯特洞穴充填情况，也可根据激电参数异常判断充填物性质。

5 测井资料宜根据喀斯特在温度、电性、波速、密度及电视图像上的特点进行解释。

6 喀斯特洞穴的连通、延伸方向和范围应通过测区内各个剖面间异常的位置并结合水文地质资料进行推断解释。

7 图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应包括喀斯特的平面分布图。

#### 4.3.4 探测精度应符合下列要求：

1 当洞穴规模大于孔距的 1/10 时，孔间层析成像探测的有效率应大于 80%。

2 当洞穴规模大于埋深的 1/10 时，覆盖层较薄时地面物探探测喀斯特洞穴的有效率应大于 70%。

### 4.4 岩体风化带厚度与卸荷带深度探测

4.4.1 探测岩体风化带厚度，进行风化分带和风化程度评价，探测边坡卸荷带深度及影响范围，可选用电法勘探、探地雷达、地震勘探、层析成像、弹性波测试和综合测井等。

#### 4.4.2 探测方法技术应符合下列要求：

1 测网布置除应符合本标准 3.1.3 的规定外，探测岩体风化带厚度的测线布置应与探测隐伏构造破碎带相同；探测卸荷带深度的测线应以垂直边坡布置为主，并适当布置几条与边坡相平行的辅助测线；在卸荷带的宽度变化较大的地段应适当加密测线和测点，并确保测线长度达到未卸荷岩体部位。

2 当基岩表面无覆盖层或覆盖层较薄时，可选用探地雷达。

3 当基岩表面具有一定厚度的覆盖层、风化界面起伏不大、各风化层物性差异明显时，可选用浅层折射波法、电测深法和高密度电法。

4 当覆盖层和风化层较厚时，可选择浅层反射波法或浅层折射波法。

5 详细探测局部风化不规则岩体情况，可采用层析成像。

6 当具有钻孔、竖井时，宜采用综合测井或弹性波测试。

7 在平洞和竖井中进行岩体风化带厚度与卸荷带深度探测可采用单孔声波、穿透声波、连续地震波速测试。测试孔应布置在洞壁的另一高度且应平行或共面，宜下斜  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。

#### 4.4.3 资料处理和解释应符合下列要求：

1 应依据岩体风化与卸荷带的波速、电阻率、密度的差异进行分析和解释。

2 应确定物性曲线异常点的明显突变与岩性、断层破碎带、风化与卸荷界面位置的关系，了解风化和卸荷带的变化规律。

3 进行岩体风化带厚度与卸荷带深度划分时应查明地层岩性界面、断层破碎带、卸荷带的分布关系。

4 当风化带成层状分布时，可求取似层状风化的各层厚度。当测区有一定数量的探坑、钻孔时，

应对比分析探坑和钻孔的测试资料，确定各风化层界面。

5 当风化带的速度在垂直方向上呈渐变关系时，应找出速度随深度的变化规律。

6 依据风化岩体与新鲜岩体纵波速度之比进行岩体风化带的划分应符合 GB/T 50287 的规定。

7 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应有岩体风化带等高线图或等厚度图、卸荷影响范围图，并注明卸荷及未卸荷岩体速度。

4.4.4 探测精度应符合下列要求：

1 当有少量的钻孔、平洞、探坑的弹性波资料可以利用时，地面下岩体风化带分层的深度和厚度相对误差应小于 20%。

2 当无钻孔资料可利用或测区的地形、地质物性条件较差时，深度相对误差应小于 30%。

## 4.5 软弱夹层探测

4.5.1 探测软弱夹层的位置、厚度，测试软弱夹层的物性参数，可选用综合测井、弹性波测试等。

4.5.2 探测方法技术应符合下列要求：

1 在钻孔中探测软弱夹层的厚度不足 20cm 时，深度比例尺应选用大比例尺。

2 在砂砾石覆盖层钻孔中探测软弱夹层的要求：

- 1) 在泥浆护壁的钻孔中，宜采用自然 $\gamma$ 测井、侧向或视电阻率测井、自然电位测井等方法；当砂砾石层地下水渗流速度较大时，宜采用井液电阻率测井中的扩散法；当夹层与砂砾石层在密度和声波速度上有明显差异时，可采用 $\gamma$ - $\gamma$ 测井、声波测井和孔壁超声成像等。
- 2) 使用 SM 植物胶钻进时，不宜采用电测井。
- 3) 钻孔中有套管时应采用自然 $\gamma$ 测井和 $\gamma$ - $\gamma$ 测井。

3 在基岩钻孔中探测软弱夹层的要求：

- 1) 孔壁超声成像、自然 $\gamma$ 测井、自然电位测井应根据测区的地球物理条件和软弱夹层与围岩之间物性的差异，通过试验加以选用。
- 2) 探测的孔段无套管、有井液时，可选用侧向或视电阻率测井、井径测量、声波测井、 $\gamma$ - $\gamma$ 测井等。
- 3) 当井液较清澈时，可采用钻孔电视观察。
- 4) 当探测孔段为无套管的干孔时，宜选用 $\gamma$ - $\gamma$ 测井、井径测井和钻孔电视观察，也可辅以自然 $\gamma$ 测井。
- 5) 当探测孔段有套管时宜选用自然 $\gamma$ 测井或 $\gamma$ - $\gamma$ 测井。

4 在平洞中进行软弱夹层物性参数测试时可选择声波法。

4.5.3 资料解释应符合下列要求：

1 应依据软弱夹层在物性上表现为低波速、低电阻率、低密度、易塑变、自然 $\gamma$ 强度高的特征进行分析和解释。

2 应进行多种测井资料对比分析，当测区所测钻孔较多时，应对比分析各孔中软弱夹层的深度和厚度变化情况。

3 可利用声波纵波和横波速度、密度计算软弱夹层的动力学参数。

4 可通过钻孔电视观察软弱夹层的深度、厚度和产状。

5 成果图件应包括钻孔综合测井成果图、软弱夹层深度、厚度及物性参数统计表。

4.5.4 探测精度应符合下列要求：

1 当钻孔直径小于 100mm、孔壁较完整，且夹层倾角小于 30° 时，探测精度要求：

- 1) 钻孔电视探测软弱夹层不应遗漏厚度大于 1mm 的夹层，当夹层厚度在 20mm 之内时，测试夹层厚度的绝对误差应小于 3mm。
- 2) 微电极系测井、超声成像测井探测软弱夹层不应遗漏厚度大于 5cm 的夹层。
- 3) 自然 $\gamma$ 测井、自然电位测井、视电阻率测井、声波测井和 $\gamma$ - $\gamma$ 测井不应遗漏厚度大于 10cm 的

软弱夹层。

- 2 软弱夹层探测成果中的深度相对误差应小于 5%。
- 3 根据钻孔电视观察或孔壁超声成像探测软弱夹层的倾角绝对误差应小于 5°，倾向绝对误差应小于 10°。

#### 4.6 滑坡体探测

4.6.1 探测滑坡体的分布范围、厚度和滑床起伏形态，进行滑坡体分层，探测滑坡体内部饱水带、含水层的分布和埋深，确定滑带特性，测试滑坡体的物性参数，可选用地震勘探、电法勘探和综合测井等。

4.6.2 探测方法技术应符合下列要求：

1 宜采用网格状或扇形状测网，测线方向宜沿主滑带方向，顺山坡或平行等高线布置，测线宜延伸至滑坡体外。

2 当滑坡体的主要成分为粘土、粉土、砂土和碎石土时，可选择浅层折射波法、浅层反射波法和瑞雷波法等。

3 当滑坡体为粒径较大块石的崩塌堆积体且结构松散时，可选择可控源音频大地电磁测深法、电测深法、高密度电法和浅层折射波法等。

4 探测滑坡体地下水和含水层可选用激发极化法、电测深法、高密度电法和可控源音频大地电磁测深等。

5 有钻孔时，探测滑带特性和确定滑坡体的物性参数可采用综合测井。

4.6.3 资料解释应符合下列要求：

1 应依据滑坡体的波速、密度、电阻率和自然 $\gamma$ 强度的差异进行分析和解释。

2 电法勘探资料因滑坡体内水平方向的电阻率变化引起电测深曲线畸变时，宜结合其它探测方法综合分析。

3 浅层折射波法可计算滑坡体厚度，当滑坡体内存在速度分层界面时，应利用多重相遇时距曲线分层求解。

4 浅层反射波法应结合浅层折射波法和测井资料确定滑动面及滑坡体内界面的同相轴。

5 滑坡体边界可根据覆盖层厚度、波速、视电阻率变化情况，并结合地形特征确定。

6 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应包括滑坡体等厚度图和滑床顶板等高线图。

4.6.4 探测滑坡体厚度或深度相对误差应小于 15%；条件复杂时，其相对误差应小于 20%。

#### 4.7 堤坝隐患探测

4.7.1 探测堤防及土石坝中的洞穴、裂缝、松软层（含松软堤段）、沙层（含砂质堤段）和渗漏通道等隐患的规模、位置与埋深，可选用电法勘探、探地雷达、弹性波测试和同位素示踪等。

4.7.2 探测方法技术应符合下列要求：

1 探测前应调查并记录堤坝外观情况、在历次洪水期的出险情况等。

2 探测时宜先普查，然后根据普查资料确定若干典型堤段进行详查。详查堤段长度宜大于普查堤段总长的 20%，并应涵盖各种类型的隐患，还应包括不能判断其性质的异常和一定比例的无异常堤段。

3 当堤顶宽度小于 4m 时可只沿迎水面堤肩布置一条测线，当堤顶宽度大于 4m 时宜沿迎水面和背水面堤肩各布置一条测线。需进一步探测隐患状态时，可在堤坡上、堤脚处增加测线，或增加部分垂直于堤身轴线的测线。

4 在比较干燥的堤防探测洞穴、裂缝和松软层宜选用高密度电法、电剖面法、瞬变电磁法和探地雷达法等。

5 探测护坡脱空区可用探地雷达或弹性波测试。

- 6 探测堤坝基底隐患宜采用可控源音频大地电磁测深法。
  - 7 测试堤坝的渗流参数宜采用同位素示踪法。
  - 8 探测浸润线以下的渗漏通道宜选用自然电场法和同位素示踪法等。
- 4.7.3 资料解释应符合下列要求：
- 1 应结合堤坝的历史沿革、加固情况、汛期险情等资料分析探测资料，确定解释原则。
  - 2 可依据电阻率背景值划分土质不良堤段。
  - 3 宜对洞穴、裂缝、松软层、高含沙层、渗漏等隐患性质作出判断。
  - 4 应给出隐患的桩号和埋深等反映其空间位置的参数。
  - 5 可对比分析同一剖面、同一探测方法，在枯水季节和雨季浸润下异常位置、幅值的变化，确定渗漏通道的位置和性质。
  - 6 可根据自然电场的电位与水流的关系来分析确定渗漏通道的位置及流向。
  - 7 应根据隐患的分布情况、电阻率背景值、雷达图像特征等，结合堤坝隐患性质，将所探测堤坝分为质量较好段、质量相对较好段和隐患发育段。
  - 8 提交的主要成果图件中应标注各类隐患的性质和空间分布位置。
- 4.7.4 探测精度应符合下列要求：
- 1 隐患性质判断的准确率应大于 70%。
  - 2 探测隐患平面位置绝对误差应小于 2m。
  - 3 探测隐患的埋深相对误差应小于 20%，且应小于 2m。

## 4.8 隧洞施工超前预报

- 4.8.1 超前预报隧洞施工掌子面前方有无断层破碎带、溶洞、地下水富集区等不良地质体，可选用地震负视速度法、弹性波垂直反射法和探地雷达等。
- 4.8.2 探测方法技术应符合下列要求：
- 1 当预报范围较大、掌子面不可利用、被探测目的体为具有一定规模的反射面时可采用地震负视速度法。
    - 1) 可根据地球物理条件选择纵排列法观测系统或横排列法观测系统。纵排列法观测系统可选用一发多收或一收多发，接收点或震源点间距为 2~5m，并应沿隧道轴线方向布设在掌子面后方的侧壁或底面上，一发多收的震源或一收多发的接收点应是距离掌子面的最远点。横排列法观测系统应分别在掌子面后方洞段的两侧壁等间距对称布置多个检波点和震源点，接收或震源点间距宜为 2~5m，一侧激发另一侧逆序接收。
    - 2) 检波器应符合所用的仪器技术要求，并采用造孔安置，震源应采用孔内爆破方式。
  - 2 当预报范围较近、掌子面可利用时，可选用探地雷达。
    - 1) 应以掌子面为中心，在掌子面上布置多条剖面，点测时点距应小于 0.5m。
    - 2) 探地雷达应根据条件和探测范围选择天线。
  - 3 当预报范围较远、掌子面可利用时可选用弹性波垂直反射法。
  - 4 对于较复杂的隧道洞段宜采用综合方法预报。
- 4.8.3 资料解释应符合下列要求：
- 1 应依据断层破碎带、充水或充泥溶洞以及地下水富集区等不良地质体在物性上常表现为低波速、低电阻率等特征，及不良地质体与围岩的物性有明显差异进行分析和解释。
  - 2 地震负视速度法应依据入射波的时距曲线具有正速度、反射波的时距曲线就具有负视速度的特征，将正、负视速度的时距曲线顺势外延，其交点位置为预报的界面位置。
  - 3 弹性波垂直反射法应依据时间剖面上反射波形的特征推断和预报是否存在不良地质体，并根据反射时间和掌子面围岩的速度参数确定不良地质体的位置。
  - 4 探地雷达应依据观测雷达图像的异常形态、波形特征及电磁波衰减等特征进行判断和预报，

确定不良地质体的性质和位置。

5 当隧道内地质情况复杂时, 不仅应仔细分析物探观测成果资料, 而且还应详细了解地面地质情况, 并结合当前和以往开挖的地质情况及物性参数等综合分析。

4.8.4 在地球物理条件有利、施工干扰小的情况下, 采用综合物探方法进行隧道施工掌子面超前预报准确率应大于 80%。

## 4.9 地下水探测

4.9.1 在第四系地层中划分含水层和隔水层并测试其深度和厚度, 探测基岩裂隙带、喀斯特发育带、断层破碎带等富水情况, 进行地热水调查, 测试地下水的水位, 划分咸淡水界线, 圈定或监测地下水污染等, 可选用电法勘探、放射性测量、综合测井和地震勘探等。

4.9.2 探测方法技术应符合下列要求:

1 应与水文地质测绘和钻探、试验工作紧密配合。

2 进行面积性地下水探测宜按网格状布置测网, 对于水文地质情况已掌握的地区, 可仅对重点地段和可疑地段布置物探测线。

3 当有钻孔时, 应采用综合测井。

4 探测覆盖层或下伏基岩中的地下水应先以含水层(带)为目的层进行详细探测, 了解含水层(带)的富水情况。

1) 探测第四纪地层中的含水层应以探测含水的砂砾石层为目的层, 目的层探测可选用地震勘探和电法勘探; 探测目的层中的富水情况可选用电测深法、激发极化法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法等。

2) 探测基岩中含水层(带)应以探测地层中的裂隙带、喀斯特发育带、断层破碎带等为目的层, 目的层探测可选用地震勘探和电法勘探。探测目的层中的含水情况可选用电测深法、激发极化法、自然电场法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法和放射性测量等。

5 探测地下水位可选用激发极化法、电测深法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法。

6 探测地下水流速、流向和渗流速度宜选用自然电场法、充电法, 在钻孔中宜选用同位素示踪法。

7 探测埋藏较深的地下水或地热水可选用瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法。

8 探测第四纪系地下水的咸水与淡水在水平面上的分布情况, 圈定和监测地下水污染状况可采用电测深法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法。多层地下含水层中咸水、淡水界线的划分应采用综合测井。

4.9.3 资料解释应符合下列要求:

1 应结合水文地质测绘和钻探资料, 建立多个典型水文地质条件下的典型物探异常曲线, 根据已知资料进行定性分析。

2 探测含水目的层的电法勘探、地震勘探资料解释应计算出含水目的层的平面位置、范围和埋深。

3 钻孔中的自然电场法、充电法、综合测井、同位素示踪等资料解释应确定含水层和隔水层的深度、厚度、地下水位、流速、流向或渗流速度。

4 地热水资源调查除应分析地层结构和地质构造外, 还应结合含水层电阻率受温度增加而减小的特性进行分析。

5 探测咸淡水分界线和监测地下水污染的资料应计算出孔隙水的电阻率值, 并根据地下水电阻率的变化情况划分咸淡水分界线、圈定地下水污染范围。

6 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外, 还应在平面图上标出解释推断的富水地带、渗漏带和地下水流向, 有咸水的地区还应标出咸、淡水的分界线, 在城市或矿区应标出地下水污染范围。

4.9.4 当测区的地球物理条件有利时, 地面方法探测含水目的层厚度和深度、潜水面深度的绝对误

差应小于 20%。

#### 4.10 环境放射性检测

4.10.1 坝址和主要建筑物环境 $\gamma$ 辐射强度测量，基础及地下建筑物开挖部位、采石场、建筑材料 $\gamma$ 辐射强度测量，坝址和主要建筑物区内表层土壤氡浓度测量，地下建筑物环境空气氡及其子体浓度测量等，可选用 $\gamma$ 测量、土壤氡浓度测量、空气氡浓度测量。

4.10.2 检测方法技术应符合下列要求：

1  $\gamma$ 测量可采用地面 $\gamma$ 测量、 $\gamma$ 编录和岩芯 $\gamma$ 测量三种方法。

- 1) 在使用常规 $\gamma$ 辐射仪作环境检测时，应对 $\gamma$ 辐射仪进行标定。
- 2) 地面 $\gamma$ 测量应在踏勘基础上选定测区和布置测线，测线间距宜为 20~50m，测点间距宜为 10~20m，异常段应加密测线和测点。
- 3) 对 $\gamma$ 测量查出的基岩异常地段和地下洞室应进行 $\gamma$ 编录，圈定异常范围和走向；地下洞室的 $\gamma$ 编录，宜取二壁一项或一壁一项，浅井编录宜为相邻的两壁。
- 4) 岩芯 $\gamma$ 测量应对岩芯进行连续检测，并按岩性分段记录 $\gamma$ 强度。

2 土壤氡浓度测量要求：

- 1) 在各测点上分别用浅孔和深孔取气器测量氡浓度，在测量中应保证各测点抽气次数及测量条件一致。
- 2) 在湿度过大的地方，不宜做抽气测量。

3 空气氡及其子体浓度测量要求：

- 1) 可在需要部位定点定时测量，监测岩石、土壤和构造带中的氡扩散到空气中的程度，测点间距宜为 20~50m，异常段应加密。
- 2) 测量异常部位应重复观测，并记录空气流通情况。
- 3) 对空气流通不畅的地下洞室，可作通风前后对比测量。

4.10.3 资料解释应符合下列要求：

- 1 应根据测区地质构造说明辐射水平、辐射分区的分布情况及其与岩性和地质构造的关系。
- 2 地面 $\gamma$ 测量宜结合测区内露头、构造破碎带、自然 $\gamma$ 测井和各种岩样的 $\gamma$ 测量进行分析。
- 3 根据空气 $\gamma$ 照射量率换算为 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率，再根据 $\gamma$ 射线外照射的有效剂量当量与空气吸收剂量率的比值以及在此环境年停留时间，计算出年有效剂量当量。
- 4 环境 $\gamma$ 辐射防护应以正当化、最优化和个人剂量限值的综合防护为原则，摒弃阈值的观念，避免不必要的照射，辐射防护标准应依据 GB 18871 执行。
- 5 环境空气中的氡及其子体平衡当量浓度应参照 GB/T 14852 中的有关公式计算。
- 6 氡及其子体平衡当量浓度控制标准应参照 GB 16356 执行。
- 7 综合成果图件应标明地质构造、岩性、检测方法、异常点位置、强度、分析结果等，必要时可绘制剖面图或钻孔柱状图。

4.10.4 放射性测量精度应依据本标准附录 C.5 计算相对标准差，以衡量其统计涨落误差。

#### 4.11 建基岩体质量检测

4.11.1 进行建基岩体质量分级，探测建基岩体松弛层厚度和不良地质体的空间分布，确定可利用岩体的高程，评价和复核已开挖的建基岩体质量等可选用单孔声波、穿透声波、连续地震波速测试、浅层折射波、层析成像、探地雷达等。

4.11.2 检测方法技术应符合下列要求：

1 建基面检测孔中的建基岩体检测可采用单孔声波和穿透声波法。

- 1) 检测前应根据工程部位、地质情况、施工进度将需检测的坝基划分成多个检测单元。
- 2) 检测孔应按单元分组布置，每一单元宜根据岩层和构造情况布置多组钻孔，每组钻孔不

少于两个，穿透孔距宜为 2~5m，钻孔宜深入设计高程 5m 以下。

3) 爆破松弛层厚度检测宜在同一孔位进行爆前和爆后测试。

2 当开挖到位、全面清基后，建基面检测可采用连续地震波速测试、浅层折射法和探地雷达。

1) 宜在建基面上的每个施工单元布置测线，测线间距宜为 5~10m，点距 1~3m。

2) 当建基面无松弛层或松弛层较薄时，应沿测线进行连续地震波速测试并采用时距观测系统；震源可采用锤击、扣板，正、反向敲击，同时取得纵波和横波速度资料。

3) 当建基面松弛层较厚时，应采用浅层折射波法进行折射分层。

4) 建基面以下一定范围内存在喀斯特洞穴时，应采用探地雷达。

3 在建基岩体局部地质构造较复杂的区段可采用层析成像。

4 宜选择岩体质量具有代表性的钻孔或孔段，进行声波速度与孔内变形模量原位对比试验，结合现场载荷试验资料建立声波速度与变形模量相关关系，确定岩体质量的波速控制标准。

4.11.3 资料解释应符合下列要求：

1 应由设计、监理和检测单位依据设计要求、建基岩体的地质情况共同制订可利用岩体的波速判别标准。

2 检测资料宜清晰给出松弛层厚度、建基面高程、建基面附近岩体质量分级、不良岩体分布情况等。

3 应对比分析单孔和跨孔声波速度曲线的形态和变化特征、完整性系数，确定岩体质量在垂直和水平方向的变化情况。同时，应分析岩体质量的变化与地层岩性、地质结构、风化卸荷等因素的关系。

4 应通过对比同一位置爆破前后声波速度曲线的变化情况或根据爆后声波速度曲线浅部孔段速度的变化梯度，确定施工爆破松弛层厚度。

5 连续地震波速测试应计算相应的地震波速，也可计算建基岩体的动力学参数。有单孔声波资料时应给出声波速度和地震波速度的对应关系。

6 浅层折射波资料应进行分层解释确定松弛层厚度，并计算松弛层和完整岩体的地震波速度和完整性系数。

7 层析成像图像资料应给出地质构造在层析成像剖面内的形态和延伸规模，也可依据波速分布确定岩体质量分布。

8 探地雷达资料应给出建基面以下一定范围内喀斯特、不良构造带的分布情况和规模。

9 应按施工单元、深度和水平范围对速度值进行统计分析，计算建基岩体波速达标率，确定建基面高程。应明确指出建基面以下局部未达标的岩体的空间分布位置。

10 成果图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应符合下列要求：

1) 应具有按单元和深度范围等对波速值进行统计分析的统计图表。

2) 进行原位静动对比试验、声波速度与地震波速度对比试验的，应绘制相关关系曲线图。

3) 有关喀斯特、不良构造带的分布图。

4.11.4 建基岩体松弛层厚度、不良地质体空间位置及可利用岩体高程的检测精度应符合设计和施工的要求。

## 4.12 灌浆效果检测

4.12.1 检测灌浆前后岩土体力学性能、完整程度和防渗能力可选用弹性波测试、层析成像、钻孔变形模量、钻孔电视和同位素示踪法等。

4.12.2 检测方法技术应符合下列要求：

1 灌浆效果检测应从试验阶段开始，试验阶段的检测方法应相对较全。

2 检测剖面或检测孔的布置要求：

1) 灌浆试验区的全部钻孔和穿过试验区中心的穿透孔应进行检测，灌浆施工检测抽样数量

应不少于灌浆孔总数的 5%。

- 2) 在灌浆施工阶段进行检查时, 灌前检测孔应大于总检测孔的 1/3。
- 3) 一个单元内至少有一组检查孔, 检查剖面或检查孔应均匀分布, 并兼顾重点和异常部位。
- 4) 钻孔偏斜过大、灌浆过程不正常等情况经分析认为可能对灌浆质量有影响的部位, 及末序孔注入量大的孔段附近, 均应布置检测孔。

3 帷幕灌浆效果检测宜选用层析成像、钻孔电视、单孔声波和穿透声波, 也可选用同位素示踪等。

4 固结灌浆效果检测应选用单孔声波和穿透声波、层析成像, 也可选用钻孔变形模量、钻孔电视观察等。

5 进行灌浆前后对比检测应采用穿透声波、层析成像等方法, 并宜保持孔位不变、观测系统和处理技术相同。

6 弹性波测试宜在灌浆 14d 后进行, 钻孔变形模量宜在灌浆 28d 后进行。

#### 4.12.3 资料解释应符合下列要求:

1 检测资料分析应视具体工程情况, 选用灌前和灌后对比分析、灌后达标分析或现象描述等评价灌浆效果。

- 1) 对比分析应将在同一位置灌前和灌后的检测数据对比, 计算提高率或提高量;
- 2) 达标分析应将灌浆单元内灌后的检测数据与要求的达标值进行比较, 并统计分析;
- 3) 层析成像可描述灌浆前后低强区的变化情况、统计分析成像单元的波速变化情况。

2 钻孔电视观察应描述灌后岩体中张开裂隙、构造破碎带和喀斯特的充填情况。

3 同位素示踪资料可计算出地下水渗流速度和流向。

4 成果图件包括检测成果图、统计分析图、低强区或渗漏区分布图。

#### 4.12.4 固结灌浆检测在薄弱部位的准确率应大于 90%。

### 4.13 混凝土质量检测

4.13.1 检测混凝土强度、缺陷和混凝土内钢筋分布情况可选用声波法、超声回弹综合法、声波 CT、钻孔电视和探地雷达等。

#### 4.13.2 检测方法技术应符合下列要求:

1 宜通过测试混凝土声波速度和回弹值确定混凝土强度。

- 1) 用声波法检测混凝土抗压强度, 宜建立声波速度与混凝土抗压强度的相关关系。
- 2) 检测具有成对临空面的混凝土体宜选用穿透声波、声波 CT、超声回弹综合法。
- 3) 大体积混凝土检测宜采用表面声波, 当条件允许时, 也可选用单孔声波、穿透声波、声波 CT 或超声回弹综合法。
- 4) 采用超声回弹综合法检测混凝土强度应符合 JGJ/T 23 的规定。

2 混凝土缺陷检测宜包括空洞、裂缝延伸深度、密实区等。

- 1) 检测混凝土裂缝延伸深度宜采用表面声波法, 也可采用穿透声波法; 当混凝土中无钢筋时, 也可采用探地雷达; 有钻孔时可采用钻孔电视观察。
- 2) 探测混凝土内部缺陷宜采用声波 CT、声波反射法、探地雷达法。
- 3) 采用声波法检测混凝土缺陷应符合 CECS 21 的规定。

3 检测混凝土内钢筋分布宜采用探地雷达法。

#### 4.13.3 资料解释应符合下列要求:

1 混凝土强度检测要求:

- 1) 应采用非线性拟合法确定混凝土强度与声波速度相关关系。
- 2) 可用水泥砂浆波速与混凝土强度关系推算骨料相同但配合比不同的混凝土强度。

2 混凝土缺陷检测要求:

- 1) 表面声波应对比分析跨缝与不跨缝测试的波速、振幅和主频等资料计算裂缝深度；穿透声波法应根据波速、首波振幅、主频等的变化特征确定裂缝深度。
  - 2) 穿透声波和声波 CT 应综合分析速度分布、首波振幅和主频的变化情况，判断内部缺陷的性质、位置和规模。
  - 3) 声波反射和探地雷达应通过分析反射波的频率、相位和连续性确定缺陷的性质、位置和规模，探地雷达应注意区分混凝土内部钢筋分布和缺陷异常。
- 3 混凝土内钢筋检测要求：
- 1) 应从雷达图像中确定钢筋的位置和埋深。
  - 2) 采用雷达进行配筋结构检测时，可进行三维处理。
- 4 成果图件包括强度分布图、缺陷分布图、裂缝分布图等。
- 4.13.4 检测精度应符合下列要求：
- 1 裂缝、缺陷的深度和范围检测的相对误差应小于 10%。
  - 2 探地雷达检测混凝土内单层钢筋位置的绝对误差应小于 2cm。

#### 4.14 洞室混凝土衬砌质量检测

- 4.14.1 检测混凝土与围岩接触面的脱空情况，检测混凝土衬砌厚度、强度和缺陷等可选用探地雷达法、声波法、声波 CT 和超声回弹综合法等。
- 4.14.2 检测方法技术应符合下列要求：
- 1 测线应主要布置在顶拱、起拱处和两侧腰，线距宜为 1~5m，点距宜为 0.1~0.2m。
  - 2 当洞室衬砌为无钢筋或较稀疏的单层钢筋混凝土时，检测衬砌厚度、脱空、内部缺陷等情况可选用探地雷达。
  - 3 当洞室衬砌为较密的单层或多层的钢筋混凝土时，检测衬砌厚度、脱空、内部缺陷等可选用声波反射法、脉冲回波法，重要的异常部位宜选用孔间声波 CT 和穿透声波法复测。
  - 4 检测衬砌混凝土强度可选用声波法和超声回弹综合法，超声回弹综合法检测混凝土强度应符合 JGJ/T 23 的规定，声波法检测混凝土强度应符合本标准 4.13 的有关规定。
  - 5 检测过程中，发现异常，应重复检查或加密测点。
- 4.14.3 资料解释应符合下列要求：
- 1 检测资料应结合设计、施工及试验资料进行解释。
  - 2 探地雷达应分析反射波的能量、频率以确定质量缺陷及脱空状况，并应分析反射波同相轴和利用速度参数确定衬砌厚度。
  - 3 声波反射应分析波形的相位、频率、振幅变化和能量衰减情况，确定衬砌厚度、内部缺陷和脱空状况。
  - 4 脉冲回波应进行频谱分析，依据回波频率和共振频率计算衬砌厚度和分析内部缺陷情况。
  - 5 成果图件应包括衬砌混凝土强度，衬砌混凝土厚度、缺陷的异常形态和范围的分布。
- 4.14.4 检测精度应符合下列要求：
- 1 当条件有利时，检测洞室混凝土缺陷(规模深度比为 1/10 时)的准确率应大于 85%。
  - 2 确定混凝土厚度的相对误差应小于 10%。

#### 4.15 洞室松弛圈检测

- 4.15.1 了解洞室围岩应力状况，查明洞壁岩体的松弛厚度，测试松动岩体及未松动岩体的力学参数等可选用声波法，也可辅以浅层折射波、瑞雷波和地震 CT 等。
- 4.15.2 检测方法技术应符合下列要求：
- 1 应根据洞室地球物理条件和探测任务要求，选择一个或多个具有代表性的洞段作横剖面或纵剖面测试，不同岩性应至少布置一个剖面。

2 可采用单孔声波和穿透声波测试:

- 1) 横剖面测试的钻孔宜布置在同一剖面且沿洞径方向,每剖面宜布置 6~8 孔,分布在洞顶、起拱处(或顶角)、腰墙,应根据洞室大小确定孔深,孔深宜为 3~15m,以能够反映原岩应力为准。
- 2) 大跨度、高边墙的洞室可沿岩锚吊车梁底座等重要受力部位的底座布置纵剖面或横剖面的声波测试钻孔,顶拱和腰部钻孔应加密。
- 3) 穿透声波的孔距宜为 2~3m,较深的钻孔应测斜。

2 当洞室较大,可沿洞室边墙、底板采用浅层折射波法和瑞雷波法测试。

3 地下洞室群间的岩墙可采用地震波 CT。

4.15.3 资料解释应符合下列要求:

1 单孔声波和穿透声波资料应依据洞室围岩由洞室内表面沿洞径至围岩深处,因施工松弛、应力重新分布而造成岩体声波速度在洞室二维剖面内呈现规律性分布的特点,划分松弛圈和应力分布界线。

2 应依据洞室围岩波速与围岩深度曲线的关系划分应力下降区、应力上升区和原岩应力区。

3 成果图件主要有成果剖面图,还应有钻孔声波速度曲线图、瑞雷波频散曲线图等图件。

4.15.4 测试松弛层厚度和应力突变位置的相对误差应小于 15%。

#### 4.16 锚杆锚固质量检测

4.16.1 检测锚杆长度和砂浆饱和度可选用声波反射。

4.16.2 检测方法技术应符合下列要求:

1 根据工程实际情况,宜在地质条件相同、施工工艺相近的测区制作一定量的试验锚杆进行试验检测,对比分析检测波形与各类缺陷的关系。

2 检测抽样率应大于锚杆总数的 10%。且每批应多于 10 根;当检测不合格的数量超过抽测总数的 30%时,应加倍抽测。加倍抽测后,若不合格的数量仍超过抽检总数的 30%,应全数检测。

3 抽检应选在工程的重要部位(如地下厂房顶拱、岩锚梁),地质条件较差部位(如断层破碎带、裂隙密集带、围岩松动体)和锚杆施工较困难的部位。

4 激发震源宜选用宽频带、短余振、重复性好的可控震源,接收传感器宜为体积细小的加速度型、灵敏度应大于 100mV/g,频带宜为 10~2000Hz。

5 可选择端发端收、侧发侧收或端发侧收等检测方式。

6 现场检测的锚杆外露长度宜为 0.3m,杆头宜平整并凿去浮浆。有挂网或喷射混凝土层时,应将检测的锚杆与其分开,并应凿除焊接点。

7 每一锚杆应重复测试 3 次,3 次信号应基本一致。

4.16.3 资料解释应符合下列要求:

1 检测记录的波形应清晰。

2 应对比分析端发端收或侧发侧收的波形,避免将地层结构的反射信号与锚杆底端或不密实砂浆段的反射信号相混淆。

3 砂浆饱和度宜结合波形特征和频率特征进行判定。

4 锚杆自振频率应通过对同类型的锚杆相比较作出判别,频率越低、注浆越饱和、握裹力较大、锚固效果好。

5 锚杆锚固质量可根据工程地质条件、工程设计要求制定评价标准,凡锚杆长度和砂浆饱和度不符合设计要求的均属不合格,合格锚杆可再根据砂浆饱和度程度进一步评定质量等级。

6 成果图件应包括锚杆检测抽样位置分布图、锚杆检测成果图表。其中,成果图表主要应包含检测原始波形、有关锚杆长度和砂浆饱和度的评价分析结论。

4.16.4 检测精度应符合下列要求:

1 当锚杆长度小于 10m 时,检测长度相对误差应小于 5%;当锚杆长度大于 10m 时,检测长度相对误差应小于 10%。

2 当存在单个砂浆缺陷时,检测砂浆饱和度精度应大于 90%;当存在多个砂浆缺陷时,检测砂浆饱和度精度应大于 80%。

#### 4.17 防渗墙质量检测

4.17.1 检测防渗墙的深度、缺陷和均匀性可选用高密度电法、可控源音频大地电磁测深、弹性波垂直反射、弹性波 CT、同位素示踪、探地雷达和钻孔电视观察等。

4.17.2 检测方法技术应符合下列要求:

1 地面物探测线应沿墙中轴线布置,测点密度应根据防渗墙类型、墙体宽度和设计要求综合考虑。

2 当检测墙体深度较浅时,宜选用高密度电法、弹性波垂直反射。当检测墙体深度较深时,宜选用可控源音频大地电磁测深。检测浸润面以上的墙体宜选用探地雷达。

3 有钻孔时,进一步检测墙体缺陷宜选用弹性波 CT、钻孔电视、同位素示踪,钻孔应布置在地面物探方法发现异常的部位。

4.17.3 资料解释应符合下列要求:

1 应根据探测剖面内防渗墙的物性参数分布特征确定墙体深度、均匀情况,出现下列几种情形之一应解释为墙体缺陷,并依据异常位置和范围确定缺陷位置和规模。

1) 地下水位面以上的物性剖面局部呈现高阻、低声速、低吸收系数。

2) 地下水位面以下的物性剖面局部呈现低阻、低声速、高吸收系数。

3) 反射类物探剖面中局部呈现早于墙底的反射信号或反射图像不连续。

2 成果图件应包括物性剖面图和综合成果解释图。

4.17.4 当有钻孔可利用时,检测防渗墙深度相对误差应小于 20%。

#### 4.18 堆石(土)体密度和地基承载力检测

4.18.1 检测堆石(土)体的密度可选用附加质量法、瑞雷波法、核子密度法,也可采用附加质量法测试地基承载力。

4.18.2 检测方法技术应符合下列要求:

1 一个测区测试前应分别对不同类型的堆石料进行密度坑测试、附加质量测试或瑞雷波测试等密度率定试验,试验应在同一点上,先进行附加质量法测试或瑞雷波测试、后进行密度坑测试,同一类型的测区试验应多于五组。

2 当堆石(土)体分层碾压施工、粒径较大(0.2m 以上)、堆石(土)体成分相对均一时,可选用附加质量法和瑞雷波法。

3 当堆积体粒径较小或堆积物为土体时,可采用核子密度法测试。

4 附加质量法应选择频带宽、灵敏度高、阻尼适中的检测仪器。

5 附加质量法测试应选择适宜的观测系统,测试时附加质量  $m_i$  应多于四级,每级自振频率  $f_i$  的变化宜大于 1Hz。

6 瑞雷波法应建立瑞雷波速度与密度的相关系数,宜使用频率适中的检波器及震源,并保证能有效反映出顶层内部碾压质量。检测时采用的激发条件应一致,在一个测点宜进行 3 次以上观测,且所测记录得出的  $V_R$  误差应小于 5%。

7 核子密度法检测应符合 SL275 的规定。

4.18.3 资料解释应符合下列要求:

1 附加质量法要求:

1) 应依据采集的时域信号求取每一级附加质量  $\Delta m$  所对应的共振频率  $f$  和对应的  $D$ ,并作  $D \sim$

$\Delta m$  曲线和计算介质的刚度  $K$  及参振质量  $m_0$ 。

- 2) 应绘制时距曲线, 计算纵波和横波速度, 再根据  $\lambda_p = v_p / f_0$  ( $f_0$  为  $\Delta m=0$  时的共振频率) 计算波长  $\lambda_p$ 。
  - 3) 应根据已建立的刚度  $k$  计算地基承载力。
  - 4) 测点密度计算可使用直接求解法、 $k \sim \rho$  相关法和衰减系数法。
- 2 瑞雷波法应先计算瑞雷波层速度, 再根据试验标定系数计算密度。
  - 3 核子密度法应计算堆积碾压层的干密度。
  - 4 成果图件应将测试的密度值或地基承载力按位置绘制成点位图、曲线或列表。
4. 18. 4 检测精度要求在检测堆石(土)体相对均匀条件下密度测试的相对误差应小于 5%。

#### 4. 19 钢衬与混凝土接触状况检测

4. 19. 1 检测钢衬与混凝土脱空情况可选用脉冲回波法和核子密度法。
4. 19. 2 检测方法技术应符合下列要求:
- 1 测线应布置在钢管的顶、腰及底部, 顶部测线宜布置 3~5 条, 测点间距宜为 0.2~0.5m。
  - 2 测点处的钢衬表面应光滑, 传感器与钢衬应耦合良好, 宜采用高频激振, 并保持激振能量稳定。
  - 3 应选择频带宽、灵敏度高、频谱分析功能强的检测仪器。
  - 4 每一测点应测试 3 次, 波形应基本相同。
  - 5 核子密度法检测应符合 SL275 的规定。
4. 19. 3 资料解释应符合下列要求:
- 1 脉冲回波法应对比分析实测波形、回波主频值, 确定是否脱空, 并根据回波频率值确定脱空位置。
  - 2 核子密度法应依据测试的综合密度值、含水率、钢板密度、混凝土密度计算和判定脱空情况和范围。
  - 3 应绘制脱空范围图和脱空位置列表。
4. 19. 4 检测钢衬与混凝土的脱空有效性应大于 95%。

#### 4. 20 堆石坝面板质量检测

4. 20. 1 检测面板脱空、面板内部缺陷、面板强度可选用声波法、红外热成像、超声回弹综合法和探地雷达等。
4. 20. 2 检测方法技术应符合下列要求:
- 1 宜布置网格状测线, 线距宜为 1~5m, 点距宜为 0.2~0.5m。在检测过程中, 当发现有脱空或缺陷时, 应加密测线和测点。
  - 2 宜布置一定数量的钻孔来验证检测的异常点, 可在验证孔中进行声波测试, 验证其它检测方法的强度值。
  - 3 当面板内没有钢筋或只有单层的稀疏钢筋时, 检测面板的脱空和内部缺陷可选择探地雷达。
  - 4 当面板为较密的单层或多层钢筋混凝土时检测面板脱空和内部缺陷可选择声波反射或脉冲回波。检测面板表面裂缝延伸情况可采用表面声波或穿透声波。
  - 5 检测面板内部缺陷也可采用声波法, 并应符合 CECS 21 的规定。
  - 6 检测面板强度可选用超声回弹综合法, 并应符合 JGJ/T 23 的规定。
4. 20. 3 资料处理和解释应符合下列要求:
- 1 应结合面板的设计、施工资料综合分析, 对探测的异常进行定性和定量解释。
  - 2 当面板中敷设有钢筋时, 在雷达图像中应区别混凝土内部缺陷、钢筋和脱空等异常。

- 3 声波反射法应综合分析和识别反射信号的相位、频率、振幅和衰减等特征，确定脱空与缺陷位置。
  - 4 红外热成像的温度异常应结合其它方法的探测资料进行分析。
  - 5 应绘制面板缺陷分布图和强度分布图。
- 4.20.4 确定面板脱空位置和内部缺陷位置的准确率应大于 80%。

#### 4.21 水文地质参数测试

4.21.1 测试地下水流速、流向和渗流速度，配合水文地质试验测试含水层涌水量、渗透系数等可选用充电法、自然电场法、综合测井。

4.21.2 测试方法技术应符合下列要求：

- 1 在地面测试地下水流向时宜采用自然电场法，测试时应在测区内比较平缓的区域布置若干测点，以测点为中心作自然电场的环形观测，测量不同方位的过滤电场。

- 2 在单个钻孔和水井内测试地下水流速、流向可采用充电法，当有多个钻孔时可用同位素示踪法。

- 3 在钻孔中测试地下水流速、流向、渗流速度可采用井液电阻率测井，并用在井中投放盐的自然扩散法或同位素示踪法测量。当钻孔穿过了具有不同压力的几个含水层时测试含水层之间的水力联系和涌水量可用井中流量计或扩散法。

- 4 测试涌水量和渗透系数应在钻孔进行抽水或压水试验时，利用井中流量计或井液电阻率法测量孔内不同深度点的轴向流量，从而计算出各含水层的涌水量(或渗漏段的透水率)和渗透系数。

- 5 井液电阻率测井时宜在电缆下放时作正式测量记录。井中流体测量时，井壁应冲洗干净。

4.21.3 资料解释应符合下列要求：

- 1 可依据自然电场法环型观测资料的电位差最大电位方向，推测为该测点的地下水的流向。

- 2 可依据充电法观测资料的等位圈移动速度的最大方向推测地下水的流向，当测量等位圈的固定电极布置在地下水上游方向时，可按本标准附录 C.6 计算地下水的流速。

- 3 应依据井中流量计或井液电阻率法测得的轴向流量资料计算含水层涌水量和渗透系数。

- 4 图件除应符合本标准 3.1.9 的规定外，还应包括标有地下水流速、流向的平面图，综合测井曲线解释成果图及测定地下水流速、流向、涌水量和渗流速度和渗透系数的计算成果表。

4.21.4 测试精度应符合下列要求：

- 1 测试地下水流方向的绝对误差应小于  $10^\circ$ 。

- 2 测试地下水流速的相对误差应小于 20%。

- 3 测试涌水量的相对误差应小于 20%。

#### 4.22 岩土物理和力学参数测试

4.22.1 测试岩土电阻率、密度、孔隙度、纵波速度、横波速度，以及通过纵、横波速度和密度值间接求取的泊松比、动弹性模量、动剪切模量、单位弹性抗力系数、岩体完整性系数、各向异性系数、风化系数等可选用电测深法、声波法、地震波法和综合测井。

4.22.2 测试方法技术应符合下列要求：

- 1 电阻率测试的要求：

- 1) 测试岩土电阻率可选用电测深法和电阻率测井，并应采取点面结合方式进行。

- 2) 测试基岩的电阻率可在露头或平洞内采用电测深法，并应采用小极距的对称四极装置。

- 3) 在钻孔中测试岩土电阻率可选用侧向测井或横向测井。

- 2 密度测试可采用密度测井。

- 3 孔隙度测试可采用声波测井、密度测井和电阻率测井，并可用 3 种方法计算孔隙度。

1) 依据声波测井的地层声波速度  $V$ 、地层水的声波速度  $V_{pw}$ 、岩石骨架的声波速度  $V_{pm}$ ，利用本标准附录 C.6 计算。

2) 依据密度测井的岩石骨架密度  $\rho_{ma}$ 、地层体密度  $\rho_b$ 、孔隙中水的密度  $\rho_w$ ，利用本标准附录 C.5 计算。

3) 依据电阻率测井的地层电阻率  $\rho_t$ 、孔隙中水电阻率  $\rho_w$  及经验系数  $m$ 、 $a$ ，利用本标准附录 C.6 计算。

4 纵波、横波速度测试可根据测试条件选用不同的测试方法：

1) 在地面测试覆盖层及基岩的波速可采用地震波法。

2) 在平洞、竖井及地下洞室中测试岩体波速可采用声波法或地震波法。

3) 在钻孔中可选用声波测井或地震波测井。

4) 测试两孔间岩土体纵波、横波速度可采用地震穿透波速测试。

4.22.3 测试参数的计算与资料解释应符合下列要求：

1 岩体纵波速度、风化系数和完整性系数，可作为划分岩体风化带和评价岩体完整性的标准之一，评定要求应符合 GB/T 50287 的规定。

2 可依据已知的纵波、横波速度和密度等参数，按本标准附录 C.6 计算泊松比  $\mu$ 、动弹性模量  $E_d$ 、动剪切模量  $G_d$ ，利用动弹性模量  $E_d$  和折减系数  $\alpha$  计算单位抗力系数  $K_0$ 。

3 对于具有片理、层理或似层状结构的岩体，可利用平行岩体结构面的纵波速度  $V_p^{\parallel}$  与垂直于岩层结构面的纵波速度  $V_p^{\perp}$  按本标准附录 C.6 计算岩层的最大各向异性系数  $\eta$ 。

4 计算岩体完整性系数  $K_v$  时应正确选取岩块（石）的标准纵波速度  $V_{pr}$ ，岩块的纵波速度可选取本测区新鲜完整的岩样（或岩芯）用声波仪测试。一个测区只有一种岩体时应采用一个  $V_{pr}$  值，取一组岩样测试值的平均值作为  $V_{pr}$  值。如果测区有两种以上岩性时可以采用不同的  $V_{pr}$  值，应按不同岩性，分别选取各自的  $V_{pr}$  值。

5 可根据岩体纵波速度  $V_p$  和新鲜岩块纵波速度  $V_{pr}$ ，按本标准附录 C.6 计算岩体风化系数  $K_w$  和完整性系数  $K_v$ 。

4.22.4 测试精度应符合下列要求：

1 密度测井成果与室内试验成果的绝对误差，覆盖层应小于  $0.10\text{g/cm}^3$ ，基岩应小于  $0.15\text{g/cm}^3$ 。

2 孔隙度参数测试，使用声速测井、密度测井、电阻率测井等求得的孔隙度与室内试验成果的相对误差应小于 10%。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

## 5 物探成果报告

### 5.1 成果报告的编写

5.1.1 采用单项物探方法完成一个工区的一项或几项工作任务应编写单项物探(或专题)成果报告,采用多项物探方法完成一个工区的一项或几项工作任务从事综合物探应编写综合物探成果报告。完成一个工程或工区的一个设计阶段的物探工作后,应编写阶段性综合物探成果报告。

5.1.2 单项(或专题)和综合物探成果报告应符合下列要求:

1 内容宜包括概况,地形、地质简况及地球物理特征,工作方法与技术,资料解释与成果分析,结论与评价,问题与建议。

- 1) 概况:工程概况,物探任务,工作时间,以往工作情况,工作量完成情况等。
- 2) 地形、地质简况及地球物理特征:与物探工作有关的地形地貌和地质情况,物探地质条件(有利条件和不利因素)和物性特征。
- 3) 工作方法与技术:方法原理简述、测线布置,现场工作方法与技术,仪器设备及工作参数。
- 4) 资料解释与成果分析:原始资料的评价、资料处理与解释方法、成果分析及其地质解释。
- 5) 结论与评价应包括:任务解决的程度,物探成果结论,成果解释精度,成果检验情况。
- 6) 问题与建议:可以是本次物探工作尚存的问题以及需要补充开展的其它物探工作和验证工作的建议,也可以是本次探明的问题、及可行的设计和施工处理建议。

2 综合物探成果报告要突出综合物探方法在解决地质问题方面的应用及各种方法所获得资料的综合分析。

5.1.3 单项和综合检测物探成果报告的内容和形式与物探勘探成果报告相近,但应叙述抽样方式、工程设计及施工简况、工程合格情况评价、评价标准等。

5.1.4 阶段性综合物探成果报告应符合下列要求:

1 宜以该阶段的物探成果报告或以前个阶段的物探成果报告为基础编写。

2 内容应包括概况,地形、地质简况、地球物理特征,物探方法综合探测成果,结论与评价,问题与建议。

- 1) 概况:工程概况,地理位置,物探任务,工作起止时间,物探工作布置,综合利用各种物探技术的探测情况及完成的工作量(可列表示出)。
- 2) 地形、地质简况及地球物理特征:与物探工作有关的地形地貌、地层构造及水文地质情况,地球物理特征。
- 3) 物探方法综合成果包括:探测目的层(体)的地质—物探特点、探测内容、探测方法技术、各物探方法的综合分析和地质解释。
- 4) 结论与评价:阐明应用综合物探方法所解决的工程地质问题的结论与效果,并作出成果质量与精度评价。
- 5) 问题与建议可以是本次物探工作尚存的问题以及需要补充和需要开展的其他物探工作和验证工作的建议;也可以是本次探明的问题,以及可行的设计及施工处理建议。

5.1.5 物探成果报告的插图可包括方法原理图、典型曲线图、对比分析图等;插表可包括工作量表、物性参数表、仪器技术因素、成果解释列表、测试数据列表、精度表等。

5.1.6 物探成果报告的附图和附表应符合本标准第4章各方法的要求。

## 5.2 成果的审查

5.2.1 物探成果应经校核和审查后才能向用户提交。

5.2.2 呈送校核和审查的成果应包括：

- 1 报告、附图和附表。
- 2 中间性解释和推算资料（如速度参数、各种校正资料及解释资料等）。
- 3 班报、仪器检验记录、任务书。
- 4 地质、设计、监理或施工部门有关该工程项目的技术要求的文件。

5.2.3 提交审查的成果报告，应是内容完整、图表齐全，内容的形式符合本规程的相应规定。如有下列情况，成果资料不予审查：

- 1 未按要求绘制的图件。
- 2 未经有关人员校核签字的图件和图表。
- 3 资料和图表混乱，未经认真整理装订。

5.2.4 成果报告有下列情况之一者，审查不予通过。

- 1 综合分析不够充分，对主要问题没有提出明确的结论和建议者。
- 2 概念不清，推理错误，结论不正确者。
- 3 文字报告章节不清，文理不顺，前后矛盾，图件中有严重错误者。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

附录 A 物探应用一览表

表 A-1 工程物探探测应用一览表 (一)

物探方法		应用项目									
		覆盖层探测	隐伏构造破碎带探测	喀斯特探测	岩体风化带厚度和卸荷带深度探测	软弱夹层探测	滑坡体探测	堤坝隐患探测	隧洞施工超前预报	地下水探测	水下覆盖层厚度
电法勘探	电测深法	○	△	○	○		○	○		○	△
	电剖面法	△	○	○	○		△	○			
	高密度电法	○	○	○	○		○	○		△	
	自然电场法		△					○		○	
	充电法									○	
	激发极化法	△	△	△			○	○		○	
	可控源音频大地电磁测深法	○	○	○			○	○		○	
	瞬变电磁法	○	○	○			○	○		○	
探地雷达	探地雷达	△	△	○	○			△	○	△	
地震勘探	浅层折射波法	○	○	△	○		○			△	○
	浅层反射波法	○	○	○	△		○		○	△	○
	瑞雷波法	△		△			○				
弹性波测试	声波法	○			○	○		△			
	地震法	○			○			△			
层析成像	地震波 CT	○	○	○	○						
	声波 CT	○	△	○	○						
	电磁波 CT	△	△	○	△						
水声勘探	水声勘探	○									○
放射性测量	γ 测量		○							△	
	α 射线测量		△							△	
	同位素示踪							○		○	
综合测井	电测井	○	○	○	○	○	△	△		○	
	电磁波或雷达测井	△	○	○	△		△	△		△	
	声波测井	○	○	△	○	○	○				
	放射性测井	△	○			○		○		○	
	井径测井		△	○	△	○	○				
	井中流体测量			△			○	△			
	磁化率测井		△	△			△				
	钻孔电视		○	○	○	○	△	△		○	
	超声成像测井		○		○	○	○			○	
井温测量			△						△		

注：○—主要方法；△—辅助方法。

表 A-2 工程物探检测应用一览表 (二)

物探方法		应用项目												
		环境放射性检测	建基岩体质量检测	灌浆效果检测	混凝土质量检测	洞室混凝土衬砌质量检测	洞室松弛圈检测	锚杆锚固质量检测	防渗墙质量检测	堆石(土)体密度和地基承载力检测	钢衬与混凝土接触状况检测	堆石坝面板质量检测	水文地质参数测试	岩土物理和力学参数测试
电法勘探	电测深法													○
	高密度电法								○					
	自然电场法											○		
	充电法											○		
	可控源音频大地电磁测深法								○					
探地雷达	探地雷达		○		○	○			△			○		
地震勘探	浅层折射波法		○						△					○
	浅层反射波法								○					○
	瑞雷波法							△	△		○			
弹性波测试	声波法		○	○	○	○	○	○	△		○	○		○
	地震法		○	○			△		△					○
层析成像	地震波 CT		△	△	△				○					
	声波 CT		○	○	○	○			△					
	电磁波 CT		△											
放射性测量	γ 射线测量	○												
	α 射线测量	○												
	氡浓度测量	○												
	同位素示踪	△		△					○			○		
综合测井	电测井											○		○
	声波测井		○	○	○		○		△			○		○
	放射性测井(核子密度)	△							△		○	○	△	○
	钻孔电视			○	○	△	△		○					
	超声成像			○	○									
附加质量法	附加质量法									○				

注：○——主要方法；△——配合方法。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

## 附录 B 物性参数表

表 B-1 常见介质电阻率

类别	名称	电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )
松散层	黏土	$1 \sim 2 \times 10^2$
	含水黏土	$2 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10$
	亚黏土	$1 \times 10 \sim 1 \times 10^2$
	砾石加黏土	$2.2 \times 10^2 \sim 7 \times 10^3$
	卵石	$3 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$
	含水卵石	$1 \times 10^2 \sim 8 \times 10^2$
沉积岩	泥质页岩	$6 \times 10 \sim 1 \times 10^3$
	砂岩	$1 \times 10 \sim 1 \times 10^3$
	泥岩	$1 \times 10 \sim 1 \times 10^2$
	砾岩	$1 \times 10 \sim 1 \times 10^4$
	石灰岩	$6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$
	泥灰岩	$1 \times 10 \sim 1 \times 10^2$
	白云岩	$5 \times 10 \sim 6 \times 10^3$
	破碎含水白云岩	$1.7 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$
	硬石膏	$1 \times 10^4 \sim 6 \times 10^6$
岩盐	$1 \times 10^4 \sim 6 \times 10^6$	
变质岩	片麻岩	$6 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$
	大理岩	$1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$
	石英岩	$2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$
	片岩	$2 \times 10^2 \sim 5 \times 10^4$
	板岩	$1 \times 10 \sim 1 \times 10^2$
岩浆岩	花岗岩	$6 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$
	正长岩	$1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$
	闪长岩	$1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$
	辉绿岩	$1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$
	辉长岩	$1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$
	玄武岩	$5 \times 10 \sim 1 \times 10^5$
其它	地下水	$< 1 \times 10^2$
	河水	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^2$
	冰	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8$
	岩溶水	$1.5 \times 10 \sim 3 \times 10$
	海水	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10$

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

表 B-2 常见介质的密度及速度

类 别	名 称	密度 $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	纵波速度 $V_p$ ( $\text{km}/\text{s}$ )	横波速度 $V_s$ ( $\text{km}/\text{s}$ )
松散层	黏土	1.60~2.04	1.2~2.5	0.7~1.4
	湿砂	—	0.6~0.8	—
	砂质黏土	—	0.3~0.9	0.2~0.5
	干砂、砾石	—	0.2~0.8	0.1~0.5
	饱水砂砾石	—	1.5~2.5	—
沉积岩	砾岩	1.90~2.90	1.5~4.2	0.9~2.5
	泥质灰岩	2.25~2.65	2.0~4.0	1.2~2.3
	硅质石灰岩	2.80~2.90	4.4~4.8	2.6~3.0
	致密石灰岩	2.60~2.77	2.5~6.1	1.4~3.5
	页岩	2.30~2.70	1.3~4.0	0.8~2.3
	砂岩	2.42~2.77	1.5~5.5	0.9~3.2
	致密白云岩	2.80~3.00	2.5~6.0	1.5~3.6
	石膏	2.41~2.58	2.1~4.5	1.3~2.8
变质岩	片麻岩	2.50~3.30	6.0~6.7	3.5~4.0
	大理岩	2.68~2.72	5.8~7.3	3.5~4.7
	石英岩	2.56~2.90	3.0~5.6	2.8~3.2
	片岩	2.68~3.00	5.8~6.4	3.5~3.8
	板岩	2.55~2.66	3.6~4.5	2.1~2.8
	千枚岩	2.71~2.86	2.8~5.2	1.8~3.2
岩浆岩	花岗岩	2.30~2.96	4.5~6.5	2.4~3.8
	闪长岩	2.52~2.70	5.7~6.4	2.8~3.8
	玄武岩	2.53~3.30	4.5~7.5	3.0~4.5
	安山岩	2.30~3.10	4.2~5.6	2.5~3.3
	辉长岩	2.55~2.98	5.3~6.5	3.2~4.0
	辉绿岩	2.53~2.97	5.2~5.8	3.1~3.5
	橄榄岩	2.90~3.40	6.5~8.0	4.0~4.8
	凝灰岩	1.60~1.95	2.6~4.3	1.6~2.6
其 它	水	1.00	1.4~1.6	—
	冰	0.80~0.90	3.1~3.6	—
	混凝土	2.40~2.70	2.0~4.5	1.2~2.7

## 附录 C 基本公式及计算图表

### C.1 数据误差计算公式

C.1.1 绝对误差  $\Delta$  用式 (C.1.1) 计算:

$$\Delta = |d_{aj} - d'_{aj}| \quad (\text{C.1.1})$$

式中  $d_{aj}$ ——观测值, 重复观测时指有效数据的算术平均值;

$d'_{aj}$ ——系统检查观测值, 重复观测时是指有效数据的算术平均值。

C.1.2 平均绝对误差  $\bar{\Delta}$  用式 (C.1.2) 计算:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta| \quad (\text{C.1.2})$$

式中  $N$ ——检查点、测深点、测线个数。

C.1.3 相对误差  $\delta$  用式 (C.1.3) 计算:

$$\delta = \frac{|d_{aj} - d'_{aj}|}{(d_{aj} + d'_{aj})/2} \times 100\% \quad (\text{C.1.3})$$

C.1.4 平均相对误差  $\bar{\delta}$  用式 (C.1.4) 计算:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N \delta_i \right) \times 100\% \quad (\text{C.1.4})$$

C.1.5 均方相对误差  $m$  用式 (C.1.5) 计算:

$$m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i^2} \times 100\% \quad (\text{C.1.5})$$

C.1.6 总均方相对误差  $M$  用式 (C.1.6) 计算:

$$M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i^2} \times 100\% \quad (\text{C.1.6})$$

C.1.7 极差系数  $K$  用式 (C.1.7) 计算:

$$K = 2 \frac{d_{aj}^{\max} - d_{aj}^{\min}}{d_{aj}^{\max} + d_{aj}^{\min}} \quad (\text{C.1.7})$$

式中  $d_{aj}^{\max}$ ——参与计算数据中的最大值;

$d_{aj}^{\min}$ ——参与计算的数据中的最小值。

### C.2 电法勘探装置系数 $K$ 计算公式

C.2.1 对称四极装置用式 (C.2.1) 计算:

$$K = \pi \frac{AM \times AN}{MN} \quad (\text{C.2.1})$$

式中  $AM$ 、 $AN$ 、 $MN$ ——电极距长度, m。

C.2.2 三极装置用式 (C.2.2) 计算:

$$K = 2\pi \frac{AM \times AN}{MN} \quad (\text{C.2.2})$$

C.2.3 二极装置用式 (C.2.3) 计算:

$$K = 2\pi \times AM \quad (\text{C.2.3})$$

C.2.4 轴向偶极装置用式 (C.2.4) 计算:

$$K = 2\pi \frac{AM \times AN \times BM \times BN}{MN(AM \times AN - BM \times BN)} \quad (\text{C.2.4})$$

式中  $BM$ 、 $BN$  ——中极距长度, m。

C.2.5 赤道偶极装置用式 (C.2.5) 计算:

$$K = \pi \frac{AM \times AN}{AN - AM} \quad (\text{C.2.5})$$

C.2.6 中间梯度装置用式 (C.2.6) 计算:

$$K = 2\pi \frac{AM \times AN \times BM \times BN}{MN(AM \times AN + BM \times BN)} \quad (\text{C.2.6})$$

C.2.7 电测井梯度装置反电位装置

1) 单极供电(B 在地面)用式 (C.2.7-1) 计算:

$$K = 4\pi \frac{AM \times AN}{MN} \quad (\text{C.2.7-1})$$

2) 双极供电(N 在地面)用式 (C.2.7-2) 计算:

$$K = 4\pi \frac{AM \times BM}{AB} \quad (\text{C.2.7-2})$$

式中  $AB$  ——电极距长度, m。

### C.3 电磁波计算公式

C.3.1 在准静态条件下, 电磁测深集肤深度  $h$  用式 (C.3.1) 计算:

$$h = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (\text{C.3.1})$$

式中  $\rho$  ——电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$f$  ——电磁波频率, Hz。

C.3.2 电磁波第一菲涅尔带宽度  $d_f$  用式 (C.3.2) 计算:

$$d_f = \sqrt{\frac{vh}{2f}} \quad (\text{C.3.2})$$

式中  $v$  ——电磁波平均波速, m/(ns);

$h$  ——目的体埋深, m;

$f$  ——电磁波频率, Hz。

C.3.3 雷达记录时窗  $T$  用式 (C.3.3) 计算:

$$T = K \frac{2H}{V} \quad (\text{C.3.3})$$

式中  $K$  ——折算系数, 1.3~1.5;

$H$  ——雷达最大探测深度, m;

$V$  ——上覆地层的电磁波平均波速, m/(ns)。

C.3.4 电磁波偶极子远场场强  $E$  用式 (C.3.4) 计算:

$$E = \frac{E_0 e^{-\beta r}}{r \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)} = \frac{E_0 e^{-\beta r}}{r \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\sqrt{r^2 - d^2}}{r}\right)} \quad (\text{C.3.4})$$

式中  $E_0$  ——初始场强, V;

$\beta$  ——吸收系数, dB/m;

$r$  ——收发距, m;

$d$  ——水平距, m;

$\theta$ ——测线与偶极子夹角, rad。

C. 3. 5 电磁波在地层中传播的波长  $\lambda_e$  用式 (C. 3. 5) 计算:

$$\lambda_e = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon} \quad (\text{C. 3. 5})$$

式中  $\lambda_0$  ——电磁波在空气中的波长, m;

$\varepsilon$  ——地层的介电常数。

#### C. 4 地震勘探计算公式

##### C. 4. 1 观测系统

1 检波点间距  $\Delta x$  用式 (C. 4. 1-1) 计算:

$$\Delta x \leq \frac{VT}{2 \sin(i + \phi)} \quad (\text{C. 4. 1-1})$$

式中  $V$ ——有效波速度, m/s;

$T$ ——有效波视周期, s;

$i$ ——沿测线方向折射波临界角, ( $^\circ$ );

$\phi$ ——折射界面相对地面的倾角 (下倾方向为正值, 反之为负值), ( $^\circ$ ), 当检波点取等间距时, 应以下倾方向的  $\Delta x$  值为标准。

2 观测系统所隔排列数  $G$  (该值取整数) 用式 (C. 4. 1-2) 计算:

$$G = \frac{X_c}{(n-1)\Delta x} \quad (\text{C. 4. 1-2})$$

式中  $X_c$ ——临界距离, 即非追踪段长度, m;

$n$ ——排列检波点数。

##### C. 4. 2 校正计算

1 直达波时距曲线经爆炸深度校正示意图见图 C. 4. 2, 校正时间  $t_n$  用式 (C. 4. 2-1) 计算:

$$t_n = \sqrt{\Delta t_{pn}^2 - \Delta t_s^2} \quad (\text{C. 4. 2-1})$$

式中  $\Delta t_{pn}$ ——从爆炸点  $O'$  到各接收点直达波旅行时间, ms;

$\Delta t_s$ ——从爆炸点  $O'$  到地面炮点  $O$  的爆炸深度校正时间, ms。

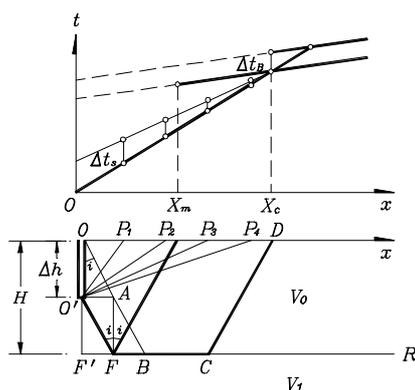


图 C. 4. 2 爆炸深度校正示意图

2 折射波时距曲线爆炸深度校正示意图见图 C. 4. 2, 校正时间  $\Delta t_B$  用式 (C. 4. 2-2) 计算:

$$\Delta t_B = \frac{\Delta h \cos i}{V_0} \quad (\text{C. 4. 2-2})$$

式中  $\Delta h$ ——爆炸点深度, m;  
 $V_0$ ——爆炸点以上介质波速, m/s。

3 转换法低速带时间校正  $\Delta t_D$  用式 (C. 4. 2-3) 计算:

$$\Delta t_D = \left( \frac{\cos i}{V_0} - \frac{\cos i}{V_1} \right) (\Delta h_Z + \Delta h_B) \quad (\text{C. 4. 2-3})$$

式中  $\Delta t_D$ ——将低速带换成下伏相邻地层的校正时间, ms;  
 $V_0$ ——低速带波速, m/s;  
 $V_1$ ——低速带下伏相邻地层波速, m/s;

4 延迟时法低速带校正时间  $\Delta t_D$  用式 (C. 4. 2-4) 计算:

$$\Delta t_D = \frac{\cos i}{V_0} (\Delta h_Z + \Delta h_B) \quad (\text{C. 4. 2-4})$$

式中  $\Delta h_Z$ ——检波点处低速带厚度, m;  
 $\Delta h_B$ ——爆炸点处低速带厚度, m;  
 $i$ ——低速带与下伏相邻地层折射波临界角, rad。

5 地形校正  $\Delta t_C$  用式 (C. 4. 2-5) 计算:

$$\Delta t_C = \frac{\cos i}{V_0} (\Delta h_Z + \Delta h_B) \quad (\text{C. 4. 2-5})$$

式中  $\Delta h_Z$ ——检波点至校正线的垂向距离, m;  
 $\Delta h_B$ ——爆炸点至校正线的垂向距离, m;  
 $V_0$ ——表层介质波速, m/s;  
 $i$ ——表层介质与下伏相邻地层折射波临界角, rad。

### C. 4. 3 波速计算

1 平均速度用式 (C. 4. 3-1) 计算:

$$\bar{V} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{\frac{h_1}{V_1} + \frac{h_2}{V_2} + \dots + \frac{h_n}{V_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (\text{C. 4. 3-1})$$

式中  $h_i$ ——各地层厚度, m;  
 $t_i$ ——弹性波垂直穿透各地层的旅行时, ms。

2 由折射时距曲线用交点法求有效速度用式 (C. 4. 3-2) 计算:

$$V_{en} = \frac{X_{cn}}{t_{cn}} \quad (\text{C. 4. 3-2})$$

式中  $V_{en}$ ——第  $n$  层折射界面以上的地层有效速度, m/s;  
 $X_{cn}$ ——第  $n$  层折射波的临界距离, m;  
 $t_{cn}$ ——第  $n$  层临界点相应的旅行时, ms。

3 由反射时距曲线平方坐标法求有效速度用式 (C. 4. 3-3) 计算:

1) 由单边反射时距曲线按  $t^2-x^2$  坐标法求有效速度, 适用于界面倾角小于  $15^\circ$  的情况 (见图 C4. 3-1)。

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{\Delta X}{\Delta T}} \quad (C. 4. 3-3)$$

$$X = x^2$$

$$T = t^2$$

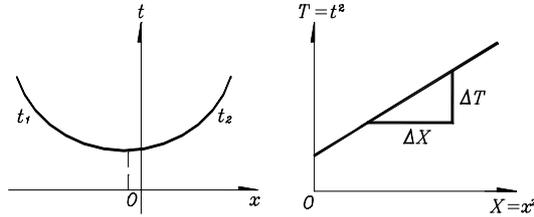


图 C. 4. 3-1 平方坐标法求反射波有效速度

2) 由双边反射时距曲线按  $t^2-x^2$  坐标法求有效速度, 适用于倾斜界面的情况。

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{\Delta X}{\Delta T}} \quad (C. 4. 3-4)$$

$$X = x^2$$

$$T = t^2 = \frac{t_1^2 + t_2^2}{2}$$

式中  $t_1$ 、 $t_2$ ——分别为激发点两侧炮检距相等的检波点反射波时间, ms。

3) 反射波相遇时距曲线按  $u-x$  坐标法求有效速度, 适用于界面倾角小于  $7^\circ$  情况 (见图 C. 4. 3-2)。

$$V_{ef} = \sqrt{2L \frac{\Delta x}{\Delta u}} \quad (C. 4. 3-5)$$

$$u = t_1^2 - t_2^2$$

式中  $L$ ——震源至反射波最远端检波点的距离, m。

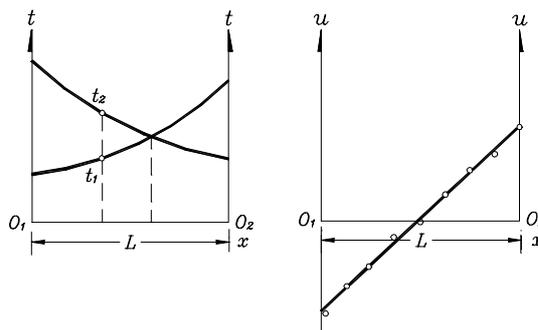


图 C. 4. 3-2 差异时距曲线法求反射波有效速度

#### C. 4. 4 地震界面计算:

1 单支时距曲线截距时间法计算各折射层厚度用式 (C. 4. 4-1) 计算:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{t_{01}}{2} \frac{V_1 V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \\ \dots \\ h_n &= \frac{t_{0n}}{2} \frac{V_n V_{n+1}}{\sqrt{V_{n+1}^2 - V_n^2}} - \sum_{k=1}^{n-1} h_k \frac{V_n \sqrt{V_{n+1}^2 - V_k^2}}{V_k \sqrt{V_{n+1}^2 - V_n^2}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{C. 4. 4-1})$$

式中  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ ——各层介质波速, m/s;  
 $t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots, t_{0n}$ ——为各层折射波截距时间, ms, 见图 C.4.4—1。

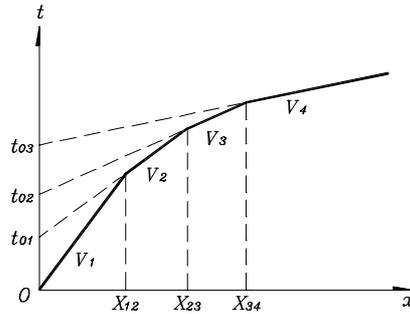


图 C. 4. 4-1 截距时间法和临界距离法求解折射界面

2 单支时距曲线的临界距离法计算各折射层厚度用式 (C. 4. 4-2) 计算:

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{X_{12}}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \\ \dots \\ h_n &= \frac{X_{n(n+1)}}{2} \sqrt{\frac{V_{n+1} - V_n}{V_{n+1} + V_n}} - \sum_{k=1}^{n-1} h_k \frac{V_n \sqrt{V_{n+1}^2 - V_k^2} - V_{n+1} \sqrt{V_n^2 - V_k^2}}{V_k \sqrt{V_{n+1}^2 - V_n^2}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{C. 4. 4-2})$$

式中  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_{n+1}$ ——为各层介质波速, m/s;  
 $X_{12}, X_{23}, X_{34}, \dots, X_{n(n+1)}$ ——为各层折射波临界距离, m。  
参数见图 C.4.4—1。

3  $t_0$ 法求解相遇时距曲线折射界面深度用式 (C. 4. 4-6) 计算:

$$t_0(x) = t_A(x) - [T_{AB} - t_B(x)] \quad (\text{C. 4. 4-3})$$

$$\theta(x) = t_A(x) + [T_{AB} - t_B(x)] \quad (\text{C. 4. 4-4})$$

$$V_2 = \frac{2\Delta x}{\Delta\theta(x)} \cos\phi \approx \frac{2\Delta x}{\Delta\theta(x)} \quad (\phi \text{ 小于 } 15^\circ \text{ 时}) \quad (\text{C. 4. 4-5})$$

$$h(x) = \frac{V_1 t_0(x)}{2 \cos i} \quad (\text{C. 4. 4-6})$$

式中  $t_A(x)$ ——激发点 A 正向时距曲线观测时间, ms;  
 $t_B(x)$ ——激发点 B 正向时距曲线观测时间, ms;  
 $T_{AB}$ ——相遇时距曲线互换时间, ms;  
 $V_1$ ——折射界面上伏介质平均波速或有效速度, m/s;  
 $V_2$ ——折射界面滑行波速, m/s;  
 $h(x)$ ——折射界面深度, m。

4 延迟时法求解相遇时距曲线折射界面深度用式 (C. 4. 4-10) :

$$D(x) = \frac{t_A(x) + t_B(x)}{2} - \frac{T_{AB}}{2} \quad (\text{C. 4. 4-7})$$

$$T'(x) = t_A(x) - D(x) \quad (C.4.4-8)$$

$$V_2 = \frac{\Delta x}{\Delta T'(x)} \quad (C.4.4-9)$$

$$h(x) = \frac{V_1 D(x)}{\cos i} \quad (C.4.4-10)$$

5 共轭点法求解相遇时距曲线折射界面。参数见图 C.4.4-2，共轭点法解释步骤如下：

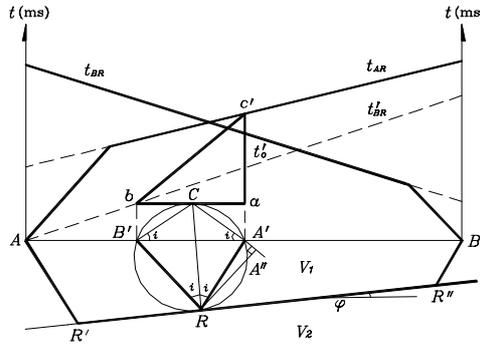


图 C.4.4-2 共轭点法求解折射界面示意图

- 1) 在相遇时距曲线上作  $t_{BR}$  镜像时距曲线  $t'_{BR}$ ，使时距曲线  $t'_{BR} = T_{AB} - t_{BR}$ ；
- 2) 利用交点法求有效速度  $V_1$ ，作  $(t_{AR} + t'_{BR})/2$  曲线，即时距曲线  $t_{AR}$  与镜像时距曲线  $t'_{BR}$  中点连线斜率的倒数为界面速度  $V_2$ ；
- 3) 在  $t'_{BR}$  曲线上取一点  $b$ ，并以斜率为  $\frac{1}{V_1 \sin i}$  作一条射线与  $t_{AR}$  曲线相交于  $c'$  点，则  $b$  和  $c'$  点的横坐标即为一对共轭点  $B'$  和  $A'$ ，设  $A'B' = d$  及  $t_{AR}(c') - t'_{BR}(b) = t'_0$ ；
- 4) 分别通过  $A'$  和  $B'$ ，作与横坐标成  $i$  角的射线，交于  $C$  点；
- 5) 以  $C$  为圆心， $CR = \frac{V_1 t'_0}{2 \cos i}$  为半径画弧，与折射界面相切；
- 6) 在镜像曲线  $t'_{BR}$  上每隔适当距离重复上述作法，即可连续绘制界面。

6 时间场法求解相遇时距曲线折射界面。折射界面  $R$  上任意点对应于两支相遇折射波等时面的时间之和等于互换时间  $T$ 。以实际观测的时间值及上伏地层的平均或有效速度  $V_1$  作两支相遇折射波的时间场，其中符合关系式  $t_A + t_B = T$  的点的连线，即为所追踪的界面。界面速度用式 (C.4.4-11) 计算：

$$V_2 = \frac{\Delta \zeta}{\Delta t} \quad (C.4.4-11)$$

式中  $\Delta \zeta$  ——两个等时面之间的界面距离，m；

$\Delta t$  ——两个等时面之间的时间差，ms。

7 综合时距曲线分层法求解折射界面深度用式 (C.4.4-12) 计算：

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{V_1 t_{01}}{2 \cos i_{12}} \\ \dots \\ h_n &= \frac{V_n t_{0n}}{2 \cos i_{n(n+1)}} - \sum_{k=1}^{n-1} h_k \frac{\cos i_{k(n+1)}}{\sin i_{kn} \cdot \cos i_{n(n+1)}} \end{aligned} \right\} \quad (C.4.4-12)$$

式中  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  ——各层介质波速，m/s；

$t_{01}, t_{02}, t_{03}, \dots, t_{0n}$  ——各层折射波  $t_0$  时间，ms。

8 展开排列求解反射界面深度用式 (C.4.4-13) 计算:

$$H = \frac{\sqrt{(vt)^2 - X^2}}{2} \quad (\text{C. 4. 4-13})$$

式中  $v$ ——平均波度或有效速度, m/s;

$t$ ——反射波旅行时, ms;

$X$ ——炮检距, m

9 共偏移剖面求解反射界面深度:

1) 圆法用式 (C. 4. 4-14) 计算:

$$H = \frac{\sqrt{(vt)^2 - L^2}}{2} \quad (\text{C. 4. 4-14})$$

式中  $L$ ——偏移距, m。

2) 椭圆法。反射界面由椭圆方程决定的下半椭圆轨迹的参数方程用式 (C.4.4-15) 计算。可设  $X$  从  $O \sim L$  的步长为检波点间距  $\Delta x$ , 计算下半椭圆轨迹, 并以包络线构制反射界面, 参数见图 C.4.4-3。

$$\frac{X'^2}{a^2} + \frac{Y'^2}{b^2} = 1 \quad (\text{C. 4. 4-15})$$

$$X' = X - \frac{L}{2} = X - C$$

$$Y' = Y = b \sqrt{1 - \left(\frac{X - C}{a}\right)^2}$$

$$a = \frac{1}{2}vt$$

$$b = h = \frac{\sqrt{(vt)^2 - L^2}}{2}$$

$$c = \frac{L}{2}$$

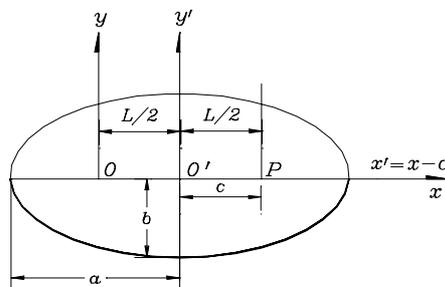


图 C. 4. 4-3 椭圆法求解反射界面示意图

10 共深度点叠加时间剖面求解反射界面深度用式 (C. 4. 4-16) 计算:

$$H = \frac{vt}{2} \quad (\text{C. 4. 4-16})$$

式中  $v$ ——平均速度或叠加速度, m/s;

$t$ ——校正后的反射波旅行时, ms。

以共中心点为圆心、 $H$  为半径划弧, 包络线即为反射界面。

C. 4. 5 瑞雷波计算:

1 落重震动主频  $f_0$  用式 (C. 4. 5-1) 计算:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4G_d r_0}{M(1-\mu)}} \quad (\text{C. 4. 5-1})$$

式中  $G_d$ ——剪切模量, Pa;  
 $r_0$ ——底面积,  $m^2$ ;  
 $M$ ——重量, N;  
 $\mu$ ——泊松比。

2 稳态法频点步长 $\Delta f$ 用式 (C.4.5-2) 估算:

$$\Delta f = (2f^2 / V_R) \times \Delta H \quad (C.4.5-2)$$

式中  $f$ ——测试频率, Hz;  
 $V_R$ ——瑞雷波速, m/s;  
 $\Delta H$ ——深度增加值, m。

3 时间差法计算瑞雷波速度  $V_R$ 用式 (C.4.5-3) 计算:

$$V_R = \Delta x / \Delta t \quad (C.4.5-3)$$

式中  $\Delta x$ ——检测间距, m;  
 $\Delta t$ ——时间差, s。

4 相位差法计算瑞雷波速度  $V_R$ 用式 (C.4.5-4) 计算:

$$V_R = 2\pi f \Delta x / \Delta \phi \quad (C.4.5-4)$$

式中  $\Delta x$ ——检测间距, m;  
 $\Delta \phi$ ——相位差, rad。

5 互相关法计算相关度  $r(k)$  用式 (C.4.5-5) 计算:

$$r(k) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} e(l)g(l+k) \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (C.4.5-5)$$

式中  $e(l)$ 、 $g(l)$ ——具有一定相似性的相关函数。

6 横波速度  $V_s$ 与瑞雷波速度  $V_R$ 经验公式用式 (C.4.5-6) 计算:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \times V_s \quad (C.4.5-6)$$

式中  $V_s$ ——横波速度, m/s。

7 瑞雷波层速度:

1) 当地层的平均速度随深度增加而增大时,  $n-1$  至  $n$  层的  $V_{Rn}$ 用式 (C.4.5-7) 计算:

$$V_{Rn} = \frac{H_n \bar{V}_{Rn} - H_{n-1} \bar{V}_{Rn-1}}{H_n - H_{n-1}} \quad (C.4.5-7)$$

式中  $V_{Rn}$ —— $H_n \sim H_{n-1}$  深度层间的瑞雷波速度, m/s;

$H_n$ ——第  $n$  点深度, m;

$H_{n-1}$ ——第  $n-1$  点深度, m;

$\bar{V}_{Rn}$ ——第  $n$  点深度以上的平均瑞雷波速度, m/s;

$\bar{V}_{Rn-1}$ ——第  $n-1$  点深度以上的平均瑞雷波速度, m/s。

2) 当地层平均速度随深度增加而减小时,  $n-1$  至  $n$  层的  $V_{Rn}$ 用式 (C.4.5-8) 计算:

$$V_{Rn} = \frac{H_n - H_{n-1}}{H_n / \bar{V}_{Rn} - H_{n-1} / \bar{V}_{Rn-1}} \quad (C.4.5-8)$$

3) 当不考虑地层平均速度随深度变化趋势时,  $n-1$  至  $n$  层的  $V_{Rn}$ 用式 (C.4.5-9) 计算:

$$V_{Rn} = \frac{\bar{V}_{Rn}^2 H_n - \bar{V}_{Rn-1}^2 H_{n-1}}{H_n - H_{n-1}} \quad (C.4.5-9)$$

## C.5 放射性测量公式

### C.5.1 放射性统计涨落误差

1 脉冲记数仪器标准误差  $\sigma$ 用式 (C.5.1-1) 计算:

$$\sigma = \pm\sqrt{\bar{N}} \quad (\text{C. 5. 1-1})$$

式中  $\bar{N}$ ——平均读数。

2 脉冲记数仪器相对标准误差  $\delta$  用式 (C. 5. 1-2) 计算:

$$\delta = \pm\frac{\sigma}{\bar{N}} = \pm\frac{1}{\sqrt{\bar{N}}} = \pm\frac{1}{\sqrt{N \cdot t}} \quad (\text{C. 5. 1-2})$$

式中  $N$ ——脉冲个数;

$t$ ——读数时间, s。

3 率计式辐射仪标准误差  $\sigma$  用式 (C. 5. 1-3) 计算:

$$\sigma = \pm\sqrt{\frac{\bar{n}}{2RC}} \quad (\text{C. 5. 1-3})$$

式中  $RC$ ——积分线路的时间常数,  $RC=\tau$ ;

$\bar{n}$ ——脉冲计数率即单位时间内的脉冲数。

4 率计式辐射仪器相对标准误差  $\delta$  用式 (C. 5. 1-4) 计算:

$$\delta = \pm\frac{1}{\sqrt{2\bar{n}RC}} \quad (\text{C. 5. 1-4})$$

C. 5. 2 同位素示踪测井计算渗透系数  $K$  用式 (C. 5. 2) 计算:

$$K = \frac{V_f}{I}$$

$$V_f = \frac{\pi(\gamma^2 - \gamma_o^2)}{2art} \ln \frac{N_0 - N_b}{N_t - N_b} \quad (\text{C. 5. 2})$$

式中  $I$ ——测试孔附近的地下水水力坡度;

$r$ ——测试孔滤水管内半径, m;

$\gamma_0$ ——探头半径, m;

$t$ ——示踪剂浓度从  $N_0$  变化到  $N_t$  所需的时间, d;

$N_0$ ——同位素在孔中的初始计数率;

$N_t$ ——同位素  $t$  时刻的计数率;

$N_b$ ——放射性本底计数率;

$\alpha$ ——流场畸变校正系数。

C. 5. 3 利用密度测井求孔隙度用式 (C. 5. 3) 计算:

$$n = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_w} \quad (\text{C. 5. 3})$$

式中  $\rho_{ma}$ ——岩石骨架密度,  $\text{g/cm}^3$ ;

$\rho_b$ ——地层体密度,  $\text{g/cm}^3$ ;

$\rho_w$ ——孔隙中水的密度,  $\text{g/cm}^3$ 。

## C. 6 岩体力学参数计算公式

C. 6. 1 附加质量法求密度  $\rho$  用式 (C. 6. 1) 计算:

$$\rho = \frac{m_0}{A \frac{V_P}{2\beta f_0}} \quad (\text{C. 6. 1})$$

$$m_0 = \frac{1}{K'} = KD_0$$

$$k = \frac{\Delta m}{\Delta D}$$

$$D = \frac{1}{(2\pi f)^2}$$

式中  $\rho$ ——堆石密度,  $\text{g/cm}^3$ ;

$A$ ——承压板面积,  $\text{m}^2$ ;

$V_p$ ——测点波速,  $\text{m/s}$ ;

$\beta$ ——衰减系数(通过坑测与附加质量对比试验);

$m_0$ ——参振质量,  $\text{kg}$ ;

$f_0$ —— $\Delta m$  为 0 时截止的自振频率,  $\text{Hz}$ ;

$k$ ——刚度;

$\Delta m$ ——附加质量分级重量,  $\text{kg}$ 。  $m_0$  按解析求解:  $m_0$  等于  $(D - \Delta m)$  曲线在  $\Delta m$  坐标轴上截距的绝对值 (见图 C.6.1)

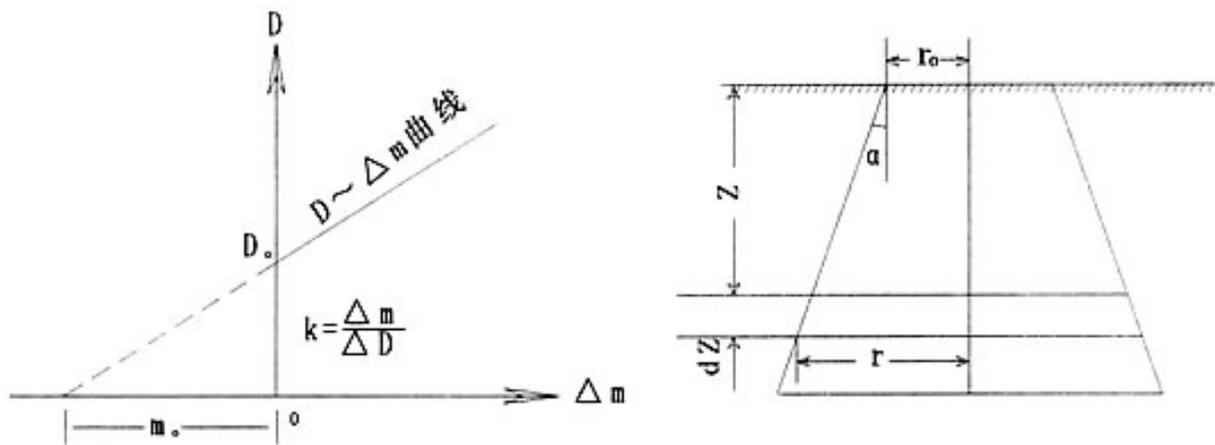


图 C.6.1-1 图解法求参振质量  $m_0$

C. 6. 2 脉冲回波计算反射界面深度  $H$  用式 (C. 6. 2) 计算:

$$H = \frac{V_p}{2f_0} \quad (\text{C. 6. 2})$$

式中  $V_p$ ——声波纵波速度,  $\text{m/s}$ ;

$f_0$ ——回波频率,  $\text{Hz}$ 。

C. 6. 3 相关力学参数:

1 泊松比  $\mu$  用式 (C. 6. 3-1) 计算:

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (\text{C. 6. 3-1})$$

式中  $V_p$ ——岩体纵波速度,  $\text{m/s}$ ;

$V_s$ ——岩体横波速度,  $\text{m/s}$ 。

2 动弹性模量  $E_d$  用式 (C. 6. 3-2)、(C. 6. 3-3) 计算:

$$E_d = V_p^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (\text{C. 6. 3-2})$$

$$E_d = 2V_s^2 \rho(1 + \mu) \quad (\text{C. 6. 3-3})$$

式中  $\rho$ —岩体密度,  $\text{g/cm}^3$ 。

3 动剪切模量  $G_d$ 用式 (C. 6. 3-4) 计算:

$$G_d = V_s^2 \rho \quad (\text{C. 6. 3-4})$$

4 单位弹性抗力系数  $K_0$ 用式 (C. 6. 3-5) 计算:

$$K_0 = \frac{E_d}{100(1 + \mu)} \alpha \quad (\text{C. 6. 3-5})$$

式中  $\alpha$ —折减系数。

5 各向异性系数  $\eta$ 用式 (C. 6. 3-6) 计算:

$$\eta = \frac{V_p''}{V_p^\perp} \quad (\text{C. 6. 3-6})$$

式中  $V_p''$ ——平行岩体结构面方向的纵波速度,  $\text{m/s}$ ;

$V_p^\perp$ ——垂直岩体结构面方向的纵波速度,  $\text{m/s}$ ;

6 风化系数  $K_w$ 用式 (C. 6. 3-7) 计算:

$$K_w = V_p / V_{pr} \quad (\text{C. 6. 3-7})$$

式中  $V_{pr}$ ——新鲜完整岩块的纵波速度,  $\text{m/s}$ 。

7 完整性系数  $K_v$ 用式 (C. 6. 3-8) 计算:

$$K_v = (V_p / V_{pr})^2 \quad (\text{C. 6. 3-8})$$

C. 6. 4 声波测井求孔隙度  $n$ 用式 (C. 6. 4-1)、式 (C. 6. 4-2) 计算:

$$n = \frac{(1/V - 1/V_{pm})}{(1/V_{pw} - 1/V_{pm})} \quad (\text{C. 6. 4-1})$$

$$n = \frac{t - t_{pm}}{t_w - t_{pm}} \quad (\text{C. 6. 4-2})$$

式中  $V_{pw}$ ——岩体中水的声波速度,  $\text{m/s}$ ;

$V_{pm}$ ——岩石骨架的声波速度,  $\text{m/s}$ ;

$V$ ——地层的声波速度,  $\text{m/s}$ ;

$t$ ——声波在岩体中传播  $1\text{m}$  的时间,  $\text{ms}$ ;

$t_{pm}$ ——声波在岩石骨架中传播  $1\text{m}$  的时间,  $\text{ms}$ ;

$t_w$ ——声体在水中传播  $1\text{m}$  的时间,  $\text{ms}$ 。

C. 6. 5 利用电阻率测井求孔隙度用式 (C. 6. 5) 计算:

$$n = \sqrt[m]{\alpha \rho_w / \rho_t} \quad (\text{C. 6. 5})$$

式中  $\rho_t$ ——地层电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$\rho_w$ ——孔隙中水的电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;

$m, \alpha$ ——经验系数 (孔隙度较高的松散砂层, 可取  $a=0.62/m=2.15$  或  $a=0.81/m=2.00$ ; 石灰岩,  $a=1.00/m=2.00 \sim 2.50$ ; 裂隙发育的石灰岩,  $a=1.00/m=1.12 \sim 1.30$ )。

C. 6. 6 利用充电法等位圈位移量及时间计算地下水流速用式 (C. 6. 6-1)、式 (C. 6. 6-2) 计算:

$$v = \Delta R_i / \Delta t_i \quad (\text{C. 6. 6-1})$$

$$v_j = v / \cos \beta \quad (\text{C. 6. 6-2})$$

式中  $v$ ——地下水流速, m/h;  
 $v_j$ ——经地形校正后的地下水流速, m/h;  
 $\Delta R_i$ ——地下水流向上等位圈的位移量, m;  
 $\Delta t_i$ ——两次等位圈观测的时间间隔, h;  
 $\beta$ ——地形坡度, A。

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>

## 标准用词说明

执行本标准时，标准用词应遵守下表规定。

**标准用词说明**

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允许
不必	不需要、不要求	

中国水利科技网版权所有  
<http://www.cws.net.cn>