

ICS 27.140

P 14

备案号: J421—2005

**DL**

**中华人民共和国电力行业标准**

**P**

**DL/T 5010 — 2005**

代替 DL 5010 — 1992

---

# 水电水利工程物探规程

**Code for engineering geophysical exploration of  
hydropower and water resources**

2005-02-14 发布

2005-06-01 实施

---

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

## 目 次

前言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	2
3 术语、符号.....	3
3.1 术语.....	3
3.2 符号.....	6
4 总则.....	10
5 物探方法与技术.....	12
5.1 一般规定.....	12
5.2 电法勘探.....	15
5.3 探地雷达法.....	33
5.4 地震勘探.....	37
5.5 弹性波测试.....	50
5.6 层析成像.....	56
5.7 水声勘探.....	60
5.8 放射性测量.....	62
5.9 综合测井.....	67
6 物探方法的综合应用.....	73
6.1 覆盖层探测.....	73
6.2 隐伏构造破碎带探测.....	75
6.3 软弱夹层探测.....	77
6.4 岩体风化、卸荷带探测.....	78
6.5 滑坡体探测.....	80
6.6 喀斯特探测.....	81
6.7 地下水探测.....	82

# DL/T 5010 — 2005

6.8	防渗线探测	84
6.9	岩体质量检测	85
6.10	隧洞施工掌子面超前预报	87
6.11	洞室松弛圈探测	88
6.12	灌浆效果检测	89
6.13	防渗墙质量检测	90
6.14	堆石(土)体密度及地基承载力测试	91
6.15	堆石坝面板质量检测	93
6.16	混凝土质量检测	94
6.17	洞室混凝土衬砌质量检测	96
6.18	钢衬与混凝土接触状况检测	96
6.19	锚杆质量检测	97
6.20	水下建筑物缺陷观察	98
6.21	环境放射性检测	99
6.22	岩土物理和力学参数测试	101
6.23	岩土电性参数测试	102
6.24	质点振动参数测试	103
6.25	其他工程参数测试	104
7	物探成果报告	106
7.1	成果报告编写	106
7.2	成果报告校审	108
附录 A (资料性附录)	物性参数表	109
附录 B (资料性附录)	物探应用一览表	112
附录 C (规范性附录)	物探基本公式及计算图表	116
	条文说明	139

## 前 言

本标准是根据原国家经贸委电力〔2001〕44号文《关于下达2001年度电力行业标准、修订计划项目的通知》的安排，对DL 5010—1992《水利水电工程物探规程》进行修订。

DL 5010—1992发布实施以来，在统一物探方法、提高成果质量方面起到了积极作用。随着科学技术的发展，一些新的物探技术和方法已应用于生产实践，同时，物探技术已不仅是水电水利工程地质勘察的一个重要手段，而且在工程质量无损检测中也已广泛应用，并发挥了重要作用。本次修订将这十几年新发展并经生产实践检验的物探新技术、新方法纳入本标准。

本标准与DL 5010—1992比较，补充和修订的主要内容如下：

- 增加了范围、规范性引用文件和术语符号；
- 物探方法与技术中增加了一般要求、高密度电法、可控源音频大地电磁测深法、瞬变电磁法、探地雷达法、瑞雷波勘探、层析成像、同位素示踪法等的内容；
- 物探方法综合应用增加了防渗线探测、岩体质量检测、隧洞施工掌子面超前预报、灌浆效果检测、防渗墙质量检测、堆石（土）体密度及地基承载力测试、堆石坝面板质量检测、混凝土质量检测、洞室混凝土衬砌质量检测、钢衬与混凝土接触状况检测、锚杆质量检测、水下建筑物缺陷观察、质点振动参数测试、其他工程参数测试等内容；
- 调整了物探方法的排列顺序；
- 删除原标准中的微重力勘探内容；
- 删除原标准中的甚低频和桩基检测内容；
- 删除原标准中的仪器设备的使用与维护、有关操作方法的規定、图式图例、地震勘探爆破工作安全条例、放射性同位素

与射线装置放射防护条例等附录内容。

本标准自颁发实施之日起代替 DL 5010—1992。

本标准的附录 A、附录 B 为资料性附录，附录 C 为规范性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由水电水利规划设计标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准主要起草单位：中国水电工程顾问集团公司贵阳勘测设计研究院。

本标准参加起草单位：长江水利委员会长江勘测规划设计研究院、中国水电工程顾问集团公司成都勘测设计研究院、中国水电工程顾问集团公司北京勘测设计研究院、中国水电工程顾问集团公司中南勘测设计研究院、中国水电工程顾问集团公司西北勘测设计研究院、中国水电工程顾问集团公司昆明勘测设计研究院、中国水电工程顾问集团公司华东勘测设计研究院。

本标准主要起草人：王波、袁景花、肖伯勋、沙椿、蔡加兴、柯玉军、常伟、楼加丁、喻振华、高才坤、尹学林、宋正宗、杨茂鑫、钱世龙、耿大来、钟诚昌、王宗兰、黄衍农。

# 1 范 围

本标准规定了水电水利工程的地球物理勘探、测试和检测的方法与技术、适用条件、物探方法综合应用、报告编写等的基本要求。

本标准适用于水电水利工程勘测设计、施工、运行等阶段的地球物理勘探、测试和检测工作。

## 2 规范性引用文件

下列标准中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用标准，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，但鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用标准，其最新版本适用于本标准。

- GB 6722 爆破安全规程
- GB/T 14582 环境空气中氡的标准测量方法
- GB/T 14583 环境地表 $\gamma$ 辐射计量率测试规范
- GB 16356 地下建筑氡及其子体控制标准
- GB 50027 供水水文地质勘察规范
- GB 50325 民用建筑工程室内环境污染控制规范
- DL/T 621 交流电气装置的接地
- DL/T 5091 水力发电接地设计技术导则
- DL/T 5135 水电水利工程爆破施工技术规范
- CECS 02 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程
- HJ/T 61 辐射环境监测技术规范
- SL 275 核子水分—密度仪现场测试规程

## 3 术 语、符 号

### 3.1 术 语

下列术语适用于本标准。

#### 3.1.1

##### **电测深法 electrical sounding**

在同一点上逐次扩大电极距使探测深度逐渐加深，观测测点处垂直方向由浅到深的电阻率变化，并依据地下目的层与相邻层的电阻率差异来探测地下介质分布的一种电法勘探方法。

#### 3.1.2

##### **电剖面法 electrical profiling**

保持装置的极距不变，沿测线观测大地电阻率沿水平方向变化，依据地下目的体与周边介质的电阻率差异，以探测地下某一深度范围内地质情况的一种电法勘探方法。

#### 3.1.3

##### **高密度电法 resistivity imaging**

原理上属于电阻率法的范畴，是电测深与电剖面的组合，其观测点密度高，获得信息量丰富，是可较详细探测水平和垂直方向上的电性变化的一种电法勘探方法。

#### 3.1.4

##### **激发极化法 induced polarization**

通过观测和分析大地激电效应，依据地下目的体与周边介质的人工激发极化效应的差异来探测地下介质分布情况的一种电法勘探方法。

#### 3.1.5

##### **自然电场法 self-potential method**



通过观测和分析地下良导体因电化学反应、地下水中微粒子的过滤和扩散而产生的自然电位，以了解水文地质问题的一种电法勘探方法。

### 3.1.6

#### **充电法 *mise-a-la-masse method***

通过人工向被探测目的体供电，提高被探测目的体与周边介质的电势，以探测目的体分布的一种电法勘探方法。

### 3.1.7

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

利用人工可控源产生电磁场，根据电磁场的趋肤效应，不同频率电磁波具有不同穿透深度，通过测试地表电磁场的频率响应而获得不同深度介质电阻率分布信息，以达到探测地质构造和目的体的一种电磁勘探方法。

### 3.1.8

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

时间域瞬变电磁测深的简称，采用不接地回线或接地电极向地下发送脉冲电磁波，同时测量地下良导体产生的瞬变感应涡流持续时间和强度，根据探测目的体的电性差异进行地质探测的一种电磁勘探方法。

### 3.1.9

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

利用电磁波的反射原理，使用探地雷达仪器向地下发射和接收具有一定频率的高频脉冲电磁波，通过识别和分析反射电磁波来探测与周边介质具有一定电性差异的目的体的一种电磁勘探方法。

### 3.1.10

#### **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。

### 3.1.11

#### 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。

### 3.1.12

#### 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岩性分层探测的一种地震勘探方法，按激振方式分稳态和瞬态。

### 3.1.13

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

利用弹性波的运动学和动力学原理对岩土体和混凝土体进行波速测试或缺陷探测的一种测试方法。

### 3.1.14

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

利用弹性波或电磁波的透射原理，对被测区域进行多方位断面扫描，重建波速或能量吸收图像的一种探测方法。

### 3.1.15

#### 水声勘探 **sonic echo exploration**

利用声波反射原理探测水底地形地貌、水下地层厚度和分布状态的一种勘探方法，又称水下浅地层剖面勘探。

### 3.1.16

#### 放射性测量 **radioactivity survey**

利用介质的天然或人工放射性特点进行勘探的一种方法。

### 3.1.17

#### 同位素示踪法 **isotopes 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含水层流速、流向的一种放射性测量方法。

3.1.18

**综合测井 comprehensive logging**

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

3.1.19

**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、材料等进行放射性强度检测。

3.2 符 号

下列符号适用于本标准。

3.2.1 统计学类参数：

$K$ ——极差系数；

$M$ ——总均方相对误差；

$m$ ——均方相对误差；

$\Delta$ ——绝对误差；

$\bar{\Delta}$ ——平均绝对误差；

$\delta$ ——相对误差，放射性统计涨落相对标准误差；

$\bar{\delta}$ ——平均相对误差；

$\sigma$ ——放射性统计涨落标准误差。

3.2.2 电磁学类参数：

$D_s$ ——激发极化视衰减系数；

$E_x$ 、 $E_y$ ——水平方向电场；

$f$ ——电磁波的频率；

$H_x$ 、 $H_y$ ——水平方向磁场；

$I$ ——电流强度；

$J_s$ ——视激发比；

$K$ ——电法装置系数；

$S_{0.5}$ ——激发极化半衰时；

$S_z$ ——纵向电导；  
 $U$ ——电位；  
 $v$ ——电磁波速度；  
 $\beta$ ——介质对电磁波能量的吸收系数；  
 $\Delta U$ ——电位差；  
 $\Delta U_1$ ——一次场电位差；  
 $\Delta U_2$ ——二次场电位差；  
 $\Delta U_g$ ——干扰电位差；  
 $\epsilon$ ——介电常数；  
 $\eta_s$ ——激发极化视极化率；  
 $\lambda$ ——电磁波波长；  
 $\mu$ ——磁导率；  
 $\rho$ ——电阻率；  
 $\rho_s$ ——直流电法视电阻率；  
 $\rho_T$ ——频率域电磁法（TM）视电阻率；  
 $\rho_t$ ——时间域电磁法（TEM）视电阻率；  
 $\sigma$ ——电导率；  
 $\omega$ ——角频率。

### 3.2.3 物理力学参数：

$A$ ——振幅；  
 $E_d$ ——动弹性模量；  
 $E_s$ ——静弹性模量；  
 $f$ ——波的频率；  
 $G_d$ ——动剪切模量；  
 $K$ ——反射系数、率定系数；  
 $K_0$ ——单位弹性抗力系数；  
 $K_w$ ——岩体风化波速比；  
 $K_v$ ——岩体完整性系数；  
 $v$ ——波速、质点振速；

$v_P$ ——纵波速度；  
 $v_R$ ——瑞雷波速度；  
 $v_s$ ——横波速度；  
 $\lambda$ ——波长；  
 $\mu$ ——泊松比；  
 $\varphi$ ——夹角、质点相位；  
 $\omega$ ——角频率。

3.2.4 几何学及距离、方位参数：

$AB$ ——供电电极间距；  
 $AB/2$ ——1/2 供电电极间距；  
 $d$ ——距离、收发距；  
 $H$ ——高程、孔深；  
 $h$ ——厚度、埋深；  
 $L$ ——瞬变电磁线框边长；  
 $MN$ ——测量电极间距；  
 $MN/2$ ——1/2 测量电极间距；  
 $OA$ ——相对于测量点  $O$  的正供电电极距；  
 $OB$ ——相对于测量点  $O$  的负供电电极距；  
 $OC$ ——相对于测量点  $O$  的无穷远供电电极距；  
 $R$ ——自然电位等位圈最大伸长距离；  
 $S_R$ ——瞬变电磁线框面积；  
 $x$ ——测点间距；  
 $\alpha$ ——方位角；  
 $\Delta R$ ——自然电位相邻等位圈位移增量。

3.2.5 时间参数：

$T$ ——时间、周期；  
 $t$ ——时间间隔；  
 $\tau_s$ ——瞬变电磁的视时间常数。

3.2.6 其他参数：

$n$ ——孔隙度；

$T$ ——温度；

$\eta$ ——各向异性系数；

$\rho$ ——密度。

## 4 总 则

4.0.1 物探是水电水利工程地质勘察的重要手段，也是工程质量无损检测的重要技术。为规范水电水利工程物探技术和方法，保证工程物探成果质量，制定本标准。

4.0.2 水电水利工程物探工作宜按下列程序进行：接受任务、搜集资料、现场踏勘、编制技术大纲、试验工作、现场工作、资料检查与评价、数据处理、资料解释和制图、成果报告编写与校审、成果提交与归档。

4.0.3 物探任务书主要内容宜包括：工程项目、目的与任务、工作量、方法技术、工期进度与成果。

4.0.4 应根据方法特点、地球物理特征（参见附录 A）和工作条件，选用一种或几种物探方法（参见附录 B）。可选用的物探方法包括：电法勘探、探地雷达法、地震勘探、弹性波测试、层析成像、水声勘探、放射性测量、综合测井等。

4.0.5 物探技术大纲宜根据物探任务书的要求，在搜集和分析与工作相关的地质、地球物理、地理、气象、水文、交通等资料的基础上，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、工期与进度、预期成果等。

4.0.6 物探工作使用的仪器设备和主要传感器件应按规定的检验期进行检验，且应达到本标准规定的技术指标。

4.0.7 物探现场工作应进行重复观测和检查观测，并按本标准规定的指标检查，检查合格后方能进行数据处理和资料解释。

4.0.8 进行物探数据处理、资料解释和制图的软件应经鉴定评审合格。

4.0.9 物探资料的解释与推断应充分结合探测范围内的地质、勘

探、施工资料，从已知到未知，先易后难，从点到面，点面结合，得出满足任务要求的成果。

4.0.10 水电水利工程物探工作除应符合本标准规定外，还应符合国家相关标准的规定。



## 5 物探方法与技术

### 5.1 一般规定

5.1.1 仪器设备的管理、检验和使用应符合下列规定：

1 仪器主机和主要传感器件应存放在干燥、清洁、阴凉、无强电磁辐射的库房内，应标识，出入库应检查。

2 仪器设备维修应提交送修报告，维修情况应有维修记录，维修后应检验。

3 仪器设备长途运输应使用专用仪器箱及采取相应的减震措施，仪器长距离人工搬运应使用专用背包。

4 工作前应对仪器设备进行检查，技术指标应符合本标准规定。在同一测区观测的多台同类仪器应进行一致性对比试验。

5 现场工作开工前、工作中和收工后，应检查仪器。

6 仪器工作不正常时，应排除故障并经检查正常后才能继续工作。并对上次仪器检查至故障发现期间的观测数据按本标准的规定重新观测。

5.1.2 物探工作之前，应全面了解和析测区的地形、地质和地球物理特征以及以前的技术成果，作为测试前的指导和参考。

5.1.3 试验工作应符合下列规定：

1 试验工作前，应根据测区地质条件和物探任务制定试验方案，试验结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，选择在物探工作测线上或通过已知钻孔，便于最大限度地了解工区的地球物理参数和特征。

3 试验结果宜给出本测区物探工作可选用的技术参数、仪器参数、物性参数等，同时应明确提出具备条件的物探方法和技术。

#### 5.1.4 测网和测线布置应符合下列规定：

1 测线网布置应根据任务要求、探测方法、被探测对象规模、埋深等因素综合确定。测网和工作比例尺应能观测被探测的目的体，并可在平面图上清楚反映探测对象的规模、走向。

2 测线方向宜垂直于地层、构造和主要探测对象的走向，应沿地形起伏较小和表层介质较为均匀的地段布置测线，测线应与地质勘探线和其他物探方法的测线一致，避开干扰源。

3 当测区边界附近发现重要异常时，应将测线适当延长至测区外，以追踪异常。

4 在地质构造复杂地区，应适当加密测线和测点。

5 测线端点、转折点、物探观测点、观测基点应进行测量。

#### 5.1.5 观测、重复观测、检查观测工作应符合下列规定：

1 信号激发和采集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规定时，应全部重测。

#### 5.1.6 物探记录应符合下列规定：

1 物探记录包括：仪器检验记录、仪器检查记录、仪器维修记录、原始记录、资料检查和评价记录、成果校审记录。

2 原始记录包括：仪器班报（工程名称，测区、测线、测点和钻孔编号，工作单位和操作人员姓名，仪器名称和型号，仪器主要工作技术参数，观测系统主要参数）、爆炸班报、观测数据或

记录、计算机媒体记录（包括记录文件编号、目录、文件名称或序号）、仪器观测过程中的异常情况记录、重复和检查观测记录等。

3 记录不应涂改、擦拭或撕页，对应的仪器打印记录、计算机媒体记录的数据文件号应正确，文件内容应齐全。

4 记录中的数据信号应目标信号清晰、背景相对单一、时窗位置适中。

5.1.7 资料检查和评价应符合下列规定：

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和不合格两类，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、擦拭、撕页现象，或计算机数据采集文件名错误，文件内容不符、不全。

3) 未按规定做重复观测、检查观测。

4) 检查观测精度不满足本标准要求。

5) 使用的仪器不符合本标准要求。

6) 采用不符合本标准要求的观测系统或装置。

7) 需进行漏电检查的仪器没有进行漏电检查或检查不符合本标准要求。

5.1.8 数据处理、资料解释和图件应符合下列规定：

1 物探资料解释推断应充分结合物探工作范围内的地质、设计和施工资料，分析和研究各种异常现象，得出客观准确的结论。

2 应遵循内外业同步进行、内业指导外业的原则，现场及时对资料进行初步整理和解释。如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 解释成果宜使用地质或相关专业语言及图例来表达。

4 物探图件应包括物探工作布置图、物探成果图、物探成果

地质解释图等。

5 物探成果图可以是单一或综合的剖面或平面图，图件可以是曲线图、点位图、等值线图或图像等。

6 物探成果地质解释图应是以物探成果为主要资料绘制的地质剖面图、平面图等。

## 5.2 电 法 勘 探

5.2.1 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。

5.2.2 应用条件应符合下列要求：

### 1 电法勘探应用条件：

- 1) 被探测目的层的分布相对于装置长度和埋深近水平无限，被探测目的体相对于装置长度和埋深有一定的规模。被探测目的层与相邻地层或目的体与周边介质有电性差异（参见附录 A）。电性界面与地质界面对应。
- 2) 地形起伏不大。采用电极接地测量方式时要求被探测目的层或目的体上方没有极高电阻屏蔽层；采用线框或天线测量方式时要求被探测目的层或目的体上方没有极低电阻屏蔽层。
- 3) 各地层及目的体电性稳定，异常范围和幅值等特征可以被测量和追踪。
- 4) 测区内没有较强的工业游散电流、大地电流或电磁干扰。
- 5) 水上工作时，水流速度较缓。

### 2 电测深分层探测要求：

- 1) 地下电性层次不多，被探测各层与供电极距相比水平无限，且具有一定厚度，电性标志层稳定。
- 2) 下伏基岩面或被探测目的层层面与地面交角应小于  $20^\circ$ 。

3) 有一定数量的中间层电阻率资料。

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

4 自然电场法探测渗流场要求:

1) 渗流速度较大, 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, 上覆和下伏渗流地层电阻率高。

5 充电法测试地下水流速流向要求测试区有钻孔, 且深入地下水位以下一定深度, 钻孔的金属套管应位于地下水位以上; 含水层埋藏深度小于 50m, 地下水流速大于 1m/d, 周边介质电阻率应大于水的电阻率 3 倍。充电法探测低阻目的体要求被探测目的体的导电率大于周边介质导电率的 10 倍, 规模大小应与埋深相当, 埋深不宜大于 25m。

6 激发极化法探测地下水要求在固液相界面上有明显的以离子交换形式存在的电化学反应和电动效应, 在测区内没有或较少具有强电化效应的金属矿物、煤层、石墨、碳化岩层等。

7 可控源音频大地电磁测深要求被探测目的层或目的体位于探测盲区以下, 无强电磁干扰。

8 瞬变电磁法适用于不具备布极条件的沙漠、戈壁、裸露岩体、冻土等条件下, 测线点经过处便于布置线框, 无荆棘、树林、陡坎。

5.2.3 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, 具有直接测量、显示、存储一次场电位、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)、电极参数等功能, 具有自然电位、漂移及电极极化补偿功能。主要技术指标符合:

1) 测量电压分辨率: 0.01mV。

2) 测量电流分辨率: 0.01mA。

3) 最大补偿范围:  $\pm 1V$ 。

4) 输入阻抗大于  $8M\Omega$ 。

2 可控源音频大地电磁测深仪器要求:

1) 可控源的发射机频率范围或发射频点能全部覆盖接收频段, 功率宜分档可调。

2) 接收仪器要求电通道不少于 2 个, 磁通道不少于 1 个, 电通道误差不大于接收机最小分辨电平, 能进行电磁信号的标量、矢量和张量测量。

3) 接收机具有数字采集、多次叠加、自动增益、陷波功能, 能显示分析视电阻率测深、相位等曲线, 采样率和采样长度可调。

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, 主要技术指标满足:

1) 发射电压:  $12V\sim 400V$ 。

2) 最大发射电流大于  $5A$ 。

3) 发射基频频率:  $2.5Hz\sim 225Hz$  范围内分档。

4) 测试道大于 12 道。

5) 带宽:  $10Hz\sim 7.5kHz$ 。

6) 时窗范围:  $0.05ms\sim 160ms$ 。

7) 通道灵敏度:  $0.5\mu V$ 。

8) 动态范围大于  $140dB$ 。

9) 对工频干扰抑制大于  $60dB$ 。

5.2.4 工作布置应符合下列要求:

1 点距宜为  $5m\sim 50m$ , 线距为点距的 1 倍~5 倍。

2 电剖面法测网布置要求:

1) 应布置多条垂直于地质推测的构造带、岩性分界面走向的平行测线, 以追踪其走向。

2) 通过局部异常地段的测线不少于 2 条, 且每条测线上反应同一异常体的异常点不少于 3 个。

3) 可根据任务要求、被探测对象规模和埋深  $H$  确定线距

和点距,测点距宜为  $H/3 \sim H$ , 线距宜为点距的 2 倍~5 倍。

4) 若观测结果以平面等值线图形式来表明目的体各向异性时,测点距和线距宜一致。

3 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长度。

4 自然电场法应选择地势相对平坦、地表介质湿润均匀、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,也可同时设置多个基点和分基点。

5 充电法探测地下水流速流向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  $\pm 5^\circ$ 。充电法探测低阻目的体应以低阻目的体为中心,布置覆盖面积大于低阻目的体平面面积的测线网,点距不宜大于探测对象埋深的一半,测线间距宜为点距的 2 倍~5 倍,应有 3 条以上测线通过低阻目的体。

6 激发极化法测线宜布置在其他物探方法确定的含水地层或构造部位。

7 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 倍~2 倍,点距可选择  $L$ 、 $L/2$  或  $L/4$ 。

5.2.5 现场工作前宜进行试验工作,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。

5.2.6 电测深法现场工作应符合下列要求:

1 装置选择要求:

1) 可选择对称四极、双向三极装置,也可选择偶极、微分装置,以及由以上装置中的两种装置组合而成的其他装置。

2) 当探测地层具有多个电性层、测线各点均能相向跑极

时，宜选择对称四极、双向三极装置；当探测区地层电性分层显著、电性层数较少或测线两端不能相向跑极时，宜选用三极装置。

- 3) 对称四极、三极装置主要用于分层探测，也可用于探测局部目的体；双向三极和微分装置主要用于非水平的构造带、岩性分界探测；测量岩土层电性参数可选用对称四极装置。
  - 4) 选择两种装置组合而成的其他测深装置，应事先在地质情况已知的试验场地进行试验，满足任务要求后，方能使用。
- 2 极距选择要求：
- 1)  $AB$ 、 $OA$  或  $OB$  在对数坐标系下宜均匀分布，相邻极距比值宜在 1.2~1.8 之间，浅层详查或电阻率参数测量宜按等差级数增加电极距。
  - 2) 最小  $AB$  应能测量出第一层的电阻率， $AB/2$  宜为 1.5m；最大供电极距（ $AB$ 、 $OA$ 、 $OB$  等）应使电测深曲线后支反映标志层的上升或下降曲线的“拐点”后不少于 3 个点。
  - 3) 三极或双向三极测深的  $OC$  应位于  $MN$  中垂线上，应使  $OC$  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 20 倍的  $OA$  或  $OB$ ，以保证  $C$  极对测量视电阻率的影响误差小于 2%。
  - 4)  $MN$  与  $AB$ 、 $OA$  或  $OB$  的比值应为  $1/3 \sim 1/30$ 。
- 3 现场布极要求：
- 1) 测量电极宜选用铜质电极，供电电极可选用铜、钢或铁质电极，水上或冰上使用铅电极。电极直径应不小于 12mm。电极在使用前应除锈、除氧化层。
  - 2) 电测深布极方向应使地形、地物对测量数据影响最小，遇有高压线，应使放线方向垂直于高压线。



- 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%；在垂直方向上的偏差应小于该极距的 5%。大于上述偏差时，应测量记录极距位置。
- 4) 测试前应检查确认电极和电缆接线正确、接地良好。
- 5) 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一定深度，并测量测点水深和坐标。

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

5 漏电检查要求：

- 1) 仪器外壳与电极间绝缘电阻大于  $300\text{M}\Omega$ ；电源的开路电压与额定值之差小于额定值的 5%，短路电流大于额定值的  $1/3$ ；电极连线绝缘电阻大于  $2\text{M}\Omega/\text{km}$ 。
- 2) 检查发现漏电后应停止测试，上次漏电检查正常至本次发现漏电之间的测试数据应作废。
- 3) 漏电检查包括：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后、电测深的最大供电极距、测量数据的畸变点。

6 观测、重复观测和检查观测应符合下列要求：

- 1) 手动测量供电时间不少于 1s，自动测量供电时间不少于 0.5s。自动测量时，对称四极装置宜采用“A→B、B→A、A→B”的供电测量方式。
- 2) 当测深点上某一极距出现数据不稳定、 $\Delta U$  小于 3mV 或  $I$  小于 3mA 时，应进行重复观测，重复观测次数不宜少于 3 次。
- 3) 应对被检查测深点的所有极距进行检查观测。
- 4) 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。

- 5) 一个点(同一测深点上某一极距)进行了重复观测时,应以观测和重复观测数据的平均值作为该点的观测值,按式(C.7)计算的个别极差系数  $K$  大于  $(n-1)^{1/2} \times 4\%$  ( $n$  为参与计算的视电阻率个数)的数据可舍去,舍去的数应少于该点观测、重复观测总数的  $1/3$ 。

#### 7 资料检查和评价应符合下列要求:

- 1) 应按式(C.3)计算单个测点的相对误差  $\delta$ ,按式(C.5)计算单个测深点的均方相对误差  $m$ ,按式(C.6)计算一条测深测线或一个测区的总均方相对误差  $M$ 。
- 2) 当单个电测深点的资料出现相邻 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  $1\%$ 、 $m > 3.5\%$  等情况之一者,该点资料应评为不合格。
- 3) 一条测线检查不合格的电测深点超过该测线检查点总数的  $30\%$  或该剖面的  $M > 3.5\%$ ,该测线资料不合格。一个测区的电测深的  $M > 3.5\%$ ,该测区的资料不合格。

#### 5.2.7 电剖面法现场工作应符合下列要求:

##### 1 装置选择要求:

- 1) 可选择双向三极(联合)、三极、对称四极、二极装置,也可选择偶极、微分装置,以及由以上装置中的两种装置组合而成的其他装置。
- 2) 双向三极(联合)、三极、二极、微分装置主要用于非水平的构造带、岩性分界、喀斯特探测;对称四极、偶极装置主要用于探测局部目的体。
- 3) 选择两种装置组合而成的其他装置进行探测时,应事

先在地质情况已知的试验场地进行试验。

2 极距选择要求:

- 1) 供电电极距宜为被探测对象埋深的 3 倍~5 倍。
- 2) 当表层电性不均匀影响严重时,  $MN$  宜为点距的 1 倍~2 倍, 且不大于  $AB/3$ 。
- 3) 双向三极、三极、二极装置的无穷远极应按 5.2.6 中 2 的要求。
- 4) 在一条测线上可采用两个极距不等的同一装置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 现场布极按 5.2.6 中 3 的要求, 漏电检查按 5.2.6 中 5 的要求。

4 重复观测和检查观测应符合下列要求:

- 1) 正常情况下宜每 10 个观测点进行一个点的重复观测。
- 2) 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。

5 资料检查和评价应符合下列要求:

- 1) 应按式 (C.3) 计算单个测点的相对误差  $\delta$ , 按式 (C.5) 计算一条测线的均方相对误差  $m$ , 按式 (C.6) 计算一个测区的总均方相对误差  $M$ 。
- 2) 单条测线的资料出现相邻 3 个测点的  $\delta > 2.5\%$ 、 $\delta > 3.5\%$  的测点数超过该条测线检查点总数的 30%、 $\delta > 7\%$  的测点数超过检查点总数的 5%、 $\delta > 10.5\%$  的测点数超过检查点总数的 1%、 $m > 3.5\%$  等情况之一者, 该测线资料不合格。
- 3) 一个测区的  $M > 3.5\%$ , 该测区的资料不合格。

5.2.8 高密度电法现场工作应符合下列要求:

1 装置选择要求:

- 1) 可选择对称四极、双向三极、三极、二极、偶极、微

分、中间梯度装置等。

- 2) 分层探测宜选择对称四极、三极装置，对称四极装置也适用于探测局部目的体；非水平构造带、岩性分界探测宜选择双向三极、微分、三极、二极装置；探测浅层目的体宜选择偶极装置。
- 2 极距选择要求：
  - 1) 基本电极距宜等于点距。
  - 2) 双向三极、三极、二极等装置的无穷远极应按 5.2.6 中 2 的要求。
  - 3) 设计观测的最底层对应的供电电极距应大于要求探测深度的 3 倍。
- 3 布极应按 5.2.6 中 3 和下列要求：
  - 1) 在测线端点处，应使探测范围处于选用装置的有效范围之内。
  - 2) 同一排列的电极应呈直线布置。
  - 3) 观测前应检查该排列全部电极的接地情况，确认电极的连接顺序正确。
- 4 漏电检查按 5.2.6 中 5 的要求。
- 5 重复观测和检查观测符合下列要求：
  - 1) 可选择两层或两列进行重复观测。
  - 2) 检查观测可采用相邻排列重合部分电极方式检查，异常观测点可采用散点检查。
- 6 资料检查和评价应符合下列要求：
  - 1) 应按式 (C.3) 计算单个测点的相对误差  $\delta$ ，用式 (C.5) 计算一个排列观测的均方相对误差  $m$ ，按式 (C.6) 计算一条剖面或一个测区的总均方相对误差  $M$ 。
  - 2) 单个排列的资料出现相邻 5 个测点的  $\delta > 2.5\%$ 、 $\delta > 3.5\%$  的测点数超过检查点总数的 30%、 $\delta > 7\%$  的测点数超过检查点总数的 5%、 $\delta > 10.5\%$  的测点数超过

检查点总数的 1%、 $m > 3.5\%$  等情况之一者，该排列资料不合格。

3) 一条测线或测区的  $M > 3.5\%$ ，该测线或测区的资料不合格。

#### 5.2.9 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，当游散电流干扰严重时，可采用梯度法。当测试地下水渗流方向时，宜增加电位梯度环形观测法。

2 应使用不极化电极。一个工作区在观测前和观测后应及时观测极差，在工作开始时的电极极差绝对值不超过 2mV，收工时不超过 5mV。

3 漏电检查按 5.2.6 中 5 的要求。

4 观测、重复观测和检查观测应符合下列要求：

1) 基点与基点间应进行联测。

2) 不能用极化补偿消除极差；观测值应注明电位的正负；当测线较长或游散电流影响较大时，应分段观测。

3) 每间隔 10 个测点应进行一个重复观测，分段观测的测线衔接处应重复 3 个测点。

5 资料检查和评价应符合下列要求：

1) 应按式 (C.1)、式 (C.2) 计算单个测点的绝对误差  $\Delta$  和平均绝对误差  $\bar{\Delta}$ 。

2) 单个测点检查观测绝对误差  $\Delta$  应小于 5mV，梯度检查观测绝对误差  $\Delta$  应小于 3mV。

#### 5.2.10 充电法现场工作应符合下列要求：

1 充电法采用直流充电、多功能直流电法仪观测。

2 可选用电位法、梯度法或直接追索等位线法测量。

3 测试地下水流速应采用直接追索等位线法。

4 探测低阻目的体可采用电位法或梯度法。

5 漏电检查除按 5.2.6 中 5 的要求外，还应要求 MN 线路的

电阻不大于  $10\text{k}\Omega$ ，电极连接线的绝缘电阻不小于  $5\text{M}\Omega$ 。

6 观测、重复观测、检查观测、资料检查和评价应符合下列要求：

- 1) 观测时应持续稳定供电，电流宜为  $0.5\text{A}\sim 1\text{A}$ 。
- 2) 一条测线或一个测区检查观测按式 (C.3)、式 (C.5) 计算相对误差  $\delta$  和均方相对误差  $m$ 。
- 3) 单个测点检查观测的相对误差  $\delta$  应小于  $5\%$ 。
- 4) 一条测线或测区检查观测的均方相对误差  $m$  应小于  $7\%$ 。
- 5) 有严重干扰的个别测点可不参与全区观测质量评价。

5.2.11 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、布极、漏电检查应按 5.2.6 和下列要求：

- 1) 对称四极的最大供电电极距  $AB/2$  不小于勘探深度的 1.5 倍。
- 2) 测量使用不极化电极。
- 3) 供电导线与测量导线应分开  $1\text{m}$  以上，该距离应随导线长度增加。

3 观测、重复观测和检查观测应按 5.2.6 和下列要求：

- 1) 每次测量，供电时间大于  $30\text{s}$ ，供电电流稳定，电流大小随供电电极距增大而增加，使  $\Delta U_1$  不小于  $0.3\text{mV}$ 。
- 2) 测量参数应包括视电阻率  $\rho_s$ 、视极化率  $\eta_s$ ，也可包括视激发比  $J_s$ 、视衰减值  $D_s$ 、半衰时  $S_{0.5}$ 。
- 3) 出现二次场电位差  $\Delta U_2$  小于  $1\text{mV}$ 、视激发比值  $J_s$  大于或接近视极化率值  $\eta_s$ 、视衰减值  $D_s$  大于或接近  $100\%$  三种情况之一时，应重复观测。

4 资料检查和评价应符合下列要求：

- 1) 一个测深点  $\eta_s$ 、 $J_s$ 、 $D_s$ 、 $S_{0.5}$  的均方相对误差  $m$  应依次不大于  $5\%$ 、 $7\%$ 、 $7\%$ 、 $7\%$ 。

2) 检查不合格的测深点超过检查点总数的 30% 时, 该测线或测区的资料不合格。

3) 剖面法质量检查和评价按 5.2.6 中 7 的要求。

5.2.12 可控源音频大地电磁测深现场工作应符合下列要求:

1 场源选择和布置要求:

1) 可根据探测要求、场地条件、仪器功能, 选择人工场、天然场或人工与天然场相结合的场源作为激励场。人工场可选择电偶极子场源或磁偶极子场源。

2) 收发距  $d$  (偶极子中心点与观测点距离) 和被探测目标最大埋深  $H_{\max}$  要求  $5H_{\max} \geq d \geq 3H_{\max}$ ; 电偶极子长度宜等于  $H_{\max}$ 。

3) 电偶极子应平行于测线, 方向误差小于  $5^\circ$ 。

4) 电偶极子供电电极点宜选择在土壤潮湿处, 使接地电阻小于  $30\Omega$ 。

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, 误差小于  $5^\circ$ 。

2 现场接收布板和漏电检查应按 5.2.6 和下列要求:

1) 接收测量可选择  $E_x$ 、 $H_y$  或  $E_y$ 、 $H_x$  二分量测量, 也可选择  $E_x$ 、 $H_y$ 、 $E_y$ 、 $H_x$  四分量测量。电极布板方向应分别与所测电分量方向一致, 磁棒方向与电极排列方向垂直, 方向误差小于  $5^\circ$ 。

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中挖坑半掩埋并浇水, 当测点为高阻裸露岩体时, 宜用泥土掩埋电极并浇水。

3 观测、重复观测和检查观测应符合下列要求:

1) 电偶极子场源的观测应在电偶极子轴线垂直平分线两侧  $30^\circ$  角的扇形范围内。

2) 测量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、工作人员、磁性物体应适当远离磁探头。

- 3) 应从高频至低频发射和测量，频率范围应与探测深度相符。
- 4) 每点或每站测量完毕后，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和相位曲线形态应一致。
- 5) 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。同一测点的重复或检查观测的视电阻率、相位曲线形态和对应幅值宜一致。
- 6) 移动或更换场源，同一测线应有 3 个测点被覆盖，覆盖点可作为检查点。

#### 4 资料检查和评价应符合下列要求：

- 1) 同一测深点进行  $E_x$ 、 $H_y$  或  $E_y$ 、 $H_x$  测量时，同时满足下列条件应为合格：视电阻率曲线上标准偏差小于 40% 的点超过 75%，相位曲线上不超过  $45^\circ$  或  $135^\circ$  的点大于 75%。
- 2) 同一测深点进行  $E_x$ 、 $H_y$ 、 $E_y$ 、 $H_x$  测量时，全部视电阻率曲线、相位曲线、相干度曲线符合 1) 的要求，该点资料为合格。
- 3) 检查不合格的测深点数大于检查测深点总数的 30%，该测线或测区资料不合格。

#### 5.2.13 瞬变电磁法现场工作应符合下列要求：

##### 1 装置和参数选取应符合下列要求：

- 1) 重叠回线、中心回线装置适用于浅层探测；大定源回线装置适用于较深层的探测；偶极装置适用于探测陡倾断层等。
- 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  $L$  宜为探测目标最大埋深  $H_{\max}$  的 0.5 倍~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 线框布置和漏电检查应按 5.2.6 和下列要求:
  - 1) 装置测量中心在测点处的位置误差不大于接收线框边长的 10%。线框角点的点位与设计线框角点的点位误差宜小于 5%。
  - 2) 应避开铁路、金属管线、输变电线或装置。
  - 3) 敷设线框时, 剩余的导线不宜过长, 宜呈“S”型铺于地面上, 或远离观测区。
  - 4) 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  $2\text{M}\Omega$ 。
- 3 观测、重复观测和检查观测应按 5.2.6 中 6 和下列要求:
  - 1) 应通过现场试验确定时间窗口的范围并采用多测道进行观测。
  - 2) 最后位于噪声电平以下的道数不少于 3 道。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, 待干扰消失后再测。
  - 3) 当一个点出现重复观测误差较大时, 应查明原因, 必要时, 可移动点位避开干扰源重测, 并记录。
  - 4) 在异常附近应加密测点。若曲线衰变慢时, 应扩大时间范围重复观测。
  - 5) 每个测点观测完毕后, 应对数据和曲线进行检查, 合格后方可搬站。
- 4 资料检查和评价应符合下列要求:
  - 1) 单个测点的观测、重复观测或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  $M$  应不

超过 10%。

- 2) 一条测线或测网检查的总均方相对误差  $M$  应不超过 15%。

#### 5.2.14 电测深数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

- 1 电测深资料应进行定性和定量解释。
- 2 定性解释应包括确定电性层数量和各电性层电阻率相对关系、确定异常大致平面位置和性质等，并符合下列要求：
  - 1) 应分析确定各电测深曲线的曲线类型，根据曲线类型确定地电断面的层数和电性结构。
  - 2) 应分析对比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。
  - 3) 应根据视电阻率断面中异常幅值、形态和分布情况确定异常的性质、位置；宜分析相邻剖面上异常的相关性。
  - 4) 采用双向三极测深时，根据各个极距的视电阻率曲线的交叉情况、异常幅值和范围确定异常性质、规模和产状。
- 3 定量解释宜在定性解释的基础上进行，计算各电性层厚度，确定异常体位置、规模、埋深和产状等。
- 4 定量分层解释可选用计算机模拟正反演法、量板法或特征点法。
- 5 定量解释应具备下列要求：
  - 1) 曲线完整、电性标志层在足够的电极距上有反映。
  - 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，曲线畸变部位校正后，不能影响解释精度。
  - 4) 已获得所需分层的各层电阻率参数。
  - 5) 电性层和地层基本对应。
- 6 应根据计算和测量视电阻率断面或双向三极测深电阻率

剖面曲线的异常规模、深度、轴线斜角、平面位置对异常进行定量解释。

7 宜采用地形校正的方法校正因地形起伏而造成的对视电阻率的影响。

8 图件宜包括：视电阻率断面图或平面图、物探成果地质解释剖面或平面图（包括地层分层、风化分带、目的体分布、基岩顶板等高线等图）。

5.2.15 电剖面法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

1 电剖面法应以定性解释为主，当被探测目的体形态简单时，可进行定量解释。

2 可分析异常曲线的幅值、规模、形态特点，对异常进行定性解释。当异常单一时，分析确定异常曲线类型，进行定量解释。应对相邻剖面上的异常进行对比分析。

3 宜采用地形校正的方法校正因地形起伏产生的虚假异常。

4 图件宜包括：视电阻率剖面或平面图、物探成果地质解释剖面或平面图等。

5.2.16 高密度电法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

1 应绘制整条测线高密度电法的视电阻率断面，也可经处理和反演后生成相应断面的电阻率图像。

2 解释可依据视电阻率断面或电阻率图像，也可抽取少量几组符合电测深条件的数据进行分层反演。

3 视电阻率断面或电阻率图像解释可采用以下方法：

1) 根据视电阻率断面或图像中异常的分布、规模等情况进行解释。

2) 同一剖面多种装置的视电阻率断面或图像对比解释。

3) 视电阻率断面或图像与已知地质剖面、钻孔等进行对比解释。

4 图件宜包括：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。

5.2.17 自然电场法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

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

2 可根据地质、环境条件分段确定背景值，剔除干扰异常。

3 相邻三个或三个以上测点（含加密测点）的数据与背景值之差超过测量平均绝对误差的 3 倍，可确定为异常。

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 可利用环形等位图推测地下水流向。

6 图件应包括：自然电位或梯度的剖面曲线图、平面分布图，自然电位或梯度的物探成果地质解释剖面或平面图。

5.2.18 充电法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

1 测地下水流速流向应通过绘制各个时刻的充电等电位线分布图进行计算解释。

2 低阻目的体探测宜绘制充电电位或电位梯度的曲线剖面图、平面分布图，充电电位或电位梯度的剖面或平面物探成果地质解释图，解释应符合下列要求：

1) 按 5.2.17 的要求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，圈定导电异常体规模、埋深。

2) 应考虑表层不均匀、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定平面点位。

5.2.19 激发极化法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

1 激发极化法的解释推断应综合分析电阻率和多个激电参数。

2 背景值、异常值的划分和确定应按 5.2.17 中 2 和 3 的要求，宜以已知地下水位以上或干孔旁测得的  $\rho_s$ 、 $\eta_s$ 、 $J_s$ 、 $D_s$ 、 $S_{0.5}$  数据

为背景值。

3 应结合已有水文地质资料，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富水情况、埋藏深度、规模等的推断解释。

4 图件应包括： $\rho_s$ 、 $\eta_s$ 、 $J_s$ 、 $D_s$ 、 $S_{0.5}$ 剖面图和平面图，相关的物探成果地质解释图，测深曲线类型图。

5.2.20 可控源音频大地电磁测深数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

1 数据平滑插值和校正处理要求：

- 1) 不宜对数据做自动平滑，不随意删除频点，应检查畸变点，可视畸变幅度和在曲线上的位置选择剔除、校正、平滑插值等处理方法。
- 2) 可根据已知地质资料和原始断面等值线图及地形起伏情况，确定是否进行静态校正，选择静态校正的方法、校正范围和参数。
- 3) 应通过反演计算，得出电阻率断面图。

2 定性和定量解释要求：

- 1) 定性解释可根据测深曲线类型、二维反演电阻率断面上异常电阻率数值分布情况判断和确定地电模型、异常性质和分布情况。
- 2) 四分量测量应对比同一剖面上多个分量的测深曲线类型和二维反演电阻率断面的异常情况。
- 3) 可将反演的二维电阻率断面或典型测深曲线与钻孔揭示地层和目的体进行对比，建立地电模型对应关系。
- 4) 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 图件应包括：电阻率断面图、物探成果地质解释图。

5.2.21 瞬变电磁法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

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断面图,也可绘制视纵向电导断面图作为补充解释资料。

3 解释应根据瞬变电磁的响应时间特征和测深曲线类型特征确定地电模型、划分异常。

4 可通过钻孔建立一个测区的视电阻率剖面的异常性质、深度、范围的对应关系,据此对该测区其他剖面进行解释。

5 应绘制相应的物探成果地质解释图。

### 5.3 探地雷达法

5.3.1 探地雷达法可选择剖面法、宽角法、环形法、透射法、单孔法、多剖面法等。

5.3.2 应用条件应符合下列要求:

1 探测目的体与周边介质的介电常数存在明显差异,且电性相对稳定。

2 探测目的体埋藏不宜过深,并与埋深相比应具有一定规模。探测目的体垂直方向上的厚度应大于探测时所用电磁波在周边介质中有效波长的  $1/4$ ,水平方向上的长度应大于所用电磁波在周边介质中的第一菲涅尔带直径的  $1/4$ ;区分两个水平相邻的探测目的体,其探测目的体间的最小水平距离应大于第一菲涅尔带直径。

3 与所选用的天线尺寸和形状相比,测线经过的表面应相对平缓,无障碍,易于天线移动。

4 不宜探测极高电导屏蔽层(潮湿土层、密集钢筋网等)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射频源等较强的电磁干扰。

6 单孔或孔间探测时,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,间距不应大于雷达信号的有效穿透距离。

5.3.3 仪器和设备应符合下列要求:

- 1 信号增益控制具有指数增益功能。
- 2 模数转换大于 16bit。
- 3 具有 8 次以上信号叠加功能。
- 4 连续测量时, 扫描速率大于每秒 128 次。

5.3.4 工作开始前宜进行天线型号选择、测量方式选择、仪器参数选择等试验工作。

5.3.5 测点和观测方式应符合下列要求:

1 点测时, 点距不应大于尼奎斯特采样间隔, 宜为 0.2m~1.0m。同一异常的反映不宜少于 3 个连续测点。

2 连测时, 应先进行点测与连测对比试验, 选定连测效果与点测效果相近的天线移动速率为连测工作天线移动速率。

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

4 使用整体偶极天线时, 天线的取向宜使电场的极化方向与探测对象的长轴或走向平行。当探测对象的长轴方向不明时, 宜使用两组正交方向的天线分别进行测量。

5.3.6 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目的、探测对象埋深、分辨率、介质特性以及天线尺寸是否符合场地需要等因素综合考虑。

2 记录时窗应根据最大探测深度与上覆地层的电磁波平均速度按式 (C.18) 计算。

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, 天线静止时信号稳定。

4 宜选择所用天线中心频率的 6 倍~10 倍作为采样率。

5.3.7 天线选择应符合下列要求:

- 1 地质探测的天线频率宜选择 8MHz~300MHz。
- 2 进行洞室衬砌质量检测时，宜选择 400MHz~900MHz 的天线。
- 3 检测混凝土内配筋时，宜选用 900MHz~1500MHz 的天线。
- 4 进行井中探测时，应根据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测量方式，宜选用空气耦合天线。

#### 5.3.8 方法选择应符合下列要求：

- 1 一般的地质探测和施工检测可采用连续剖面法。当测线经过的表面凸凹不平、天线不便匀速移动或信号较弱时，应采用点测剖面法。
- 2 宽角法可用于测量介质的电磁波传播速度。
- 3 环形法和点测剖面法可用于隧洞掌子面及基桩底部等窄小工作面的探测。
- 4 单孔雷达可探测钻孔附近的目的体，也可采用孔内与地表透射方式确定钻孔附近浅埋藏的目的体位置。
- 5 跨孔（洞）雷达适用于较精确地探测两孔（洞）间的目的体。
- 6 多天线法适用于道路、隧洞衬砌质量检查。

#### 5.3.9 现场工作应符合下列要求：

- 1 现场测量时，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，并与工作天线保持相对固定的位置。
- 3 测试过程中，应保持工作天线与探测面基本平行，距离相对一致，避免忽高忽低。
- 4 采用连测时，天线的移动速率应均匀，与仪器的扫描率相匹配；点测时，应在天线静止时采样。



5 标注应与测线桩号一致,采用自动标注时,应避免标注信号线干扰天线工作信号。

6 采用测量轮标注时,宜每 10m 校对一次。

5.3.10 可采用透射法或宽角法测试地层电磁波速度;有条件时由已知深度的探测对象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。

5.3.11 资料检查和评价应符合下列要求:

1 检查和评价应对比同一位置的观测、重复观测和检查观测雷达图像。

2 检查观测图像与观测图像的异常形态和位置应基本一致。

5.3.12 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、空间滤波、点平均等处理方法。

2 选择处理方法与步骤应根据现场记录数据质量及解释需要进行:当反射信号弱、数据信噪比低时不宜进行反褶积、偏移处理;在进行  $f-k$  倾角滤波和偏移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,除去某一频段的干扰波。

4 可用  $f-k$  倾角滤波除去倾斜层状的干扰波,但应事先确定无同样倾角的有效层状反射波。

5 可用反褶积来压制多次反射波,用于反褶积的反射子波应是最小相位。

6 可采用时间偏移或深度偏移处理方法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，但应在其他方法处理完成后进行。

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

5.3.13 资料解释应符合下列要求：

1 应通过班报现场复核、筛选干扰异常。

2 应先在原始图像上通过反射波波形、能量强度、反射波初始相位等特征判断识别和筛选异常，确定异常体性质。

3 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 透射法的资料解释可根据透射图像有无能量阴影、有无二次波叠加等情况判断异常，也可采用阴影交汇、二次波形态以及发射和接收的相对位置进行定量解释。

5.3.14 成果图表应符合下列要求：

1 图件应包括雷达剖面图像、雷达剖面成果地质解释图。

2 布置在隧洞、陡壁、边墙等处的测线，应绘制测线布置图。

3 雷达剖面图像可只选择摘录有异常的部分；连测时可绘制色谱、灰度或波形图像；点测时可绘制波形图像。

4 可采用表格汇总说明异常情况。

## 5.4 地震勘探

5.4.1 地震勘探可选择浅层折射波法、浅层反射波法和瑞雷波法。

5.4.2 应用条件应符合下列要求：

1 适用于层状和似层状地层勘探。

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) 被追踪地层具有一定厚度，中间层厚度不宜小于其上

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) 被追踪地层界面起伏不大，折射波沿界面滑行时无穿透现象。

3 浅层反射波法应用条件：

- 1) 被追踪地层与其相邻层、被探测目的体与周边介质之间存在明显波阻抗差异。
- 2) 被追踪地层具有一定厚度，且大于有效波长的四分之一。
- 3) 地层界面较平缓，入射波能在界面上产生较规则的反射波，无漫反射现象。
- 4) 探测断层时，断层断距明显。

4 瑞雷波法应用条件：

- 1) 被追踪地层与相邻层之间、被探测目的体与周边介质之间存在明显的波速差异。
- 2) 被追踪地层为横向相对均匀层状介质，被探测目的体具有一定规模。
- 3) 地面应相对平整，地层界面起伏不大，并避开沟、坎等复杂地形的影响。

5.4.3 震源、仪器和设备应符合下列要求：

1 震源要求：

- 1) 地震勘探可选择爆炸震源、锤击震源和落重震源。
- 2) 震源应能激发满足方法要求的主频地震脉冲，能量可控、满足勘探深度要求。
- 3) 操作方便、安全可靠、重复性好。
- 4) 记时信号延迟时差应不大于  $0.5\text{ms}$ 。

2 地震仪技术要求：

- 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) 采样间隔可选，最小采样间隔不大于 0.05ms。
  - 3) 记录长度可选，每道样点不小于 1024 点。
  - 4) 模数转换精度不小于 12bit。
  - 5) 通频带：2Hz~2000Hz。
  - 6) 放大器内部噪声小于 1  $\mu$ V。
  - 7) 动态范围大于 96dB。
- 3 检波器技术要求：
- 1) 检波器各道之间固有频率相差小于 10%，灵敏度相差小于 10%，相位差小于 1ms。
  - 2) 绝缘电阻大于 10M $\Omega$ 。
  - 3) 井下和水下检波器应有良好的防水性能。

4 地震记录道一致性要求：各道之间相位差小于 1.5ms、各道之间振幅差小于 15%。

#### 5.4.4 试验工作应符合下列要求：

1 试验工作包括工作方法、观测系统、震源和仪器工作参数选择等内容。

2 了解测区的地球物理条件、有效波和干扰波分布情况，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。

3 了解测区有效波和干扰波分布宜使用展开排列观测方式。浅层折射波法展开排列长度宜为探测深度的 6 倍~10 倍，浅层反射波法宜为探测深度的 2 倍~3 倍，瑞雷波法宜为探测深度的 1 倍~2 倍。检波点距应不大于实际工作的检波点距。

4 生产中遇到局部地段记录质量明显下降时，应分析原因，并通过试验找出原因，选择新的仪器工作参数或改变工作方法。

#### 5.4.5 测线布置应符合下列要求：

1 测线宜按直线布置。当测线通过建筑物、道路、高压电线和其他障碍时，允许测线转折，但应采取相应的措施，以保证转

折测线的资料能独立解释。

2 当地形起伏时，折射波法的炮点宜布置在顶部或底部，并保证各段测线资料能独立解释。

3 河谷测线宜垂直河流或顺河流布置。当河谷较狭窄、折射波相遇段较短时，宜斜交河流布置测线。

4 浅层折射波法探测高倾角目的层，应合理选择测线方向，以满足视倾角与临界角之和小于  $90^\circ$  的必要条件。

5 测线布置应考虑旁侧影响。

#### 5.4.6 现场准备工作应符合下列要求：

##### 1 仪器设备检查要求：

1) 放大器一致性检查，采样间隔宜按仪器最小值设置。固定增益型仪器各道的增益设置相同。检查结果应符合 5.4.3 的相关要求。

2) 记录道一致性检查，放大器设置符合 1) 的要求，检波器安置条件一致，检波器安置范围与其距震源距离相比很小。检查结果应符合 5.4.3 的相关要求。

3) 应进行连接电缆及检波电缆通断、绝缘检查，绝缘电阻应大于  $200\text{k}\Omega$ 。

4) 爆炸机符合有关安全要求，爆炸线与记时线应有明显区别。

2 使用模拟地震仪，每天工作前应检查放大器工作档一致性，采样间隔和滤波档可按工作时的设置。点增益型仪器应将各道放大器增益设置为相等。相位和振幅一致性限差符合 5.4.3 的相关要求。

#### 5.4.7 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，保证对目的层有效波的连续对比追踪。

##### 2 浅层折射波法观测系统要求：

1) 采用单支时距曲线观测系统，要求观测面与被探测界

面平坦，地层结构简单，沿测线方向地层界面的视倾角应小于  $15^\circ$ ，并应保证被追踪地段内至少有 4 个检波点有效接收折射波。

- 2) 采用单重相遇时距曲线观测系统，应保证被追踪界面的相遇段至少有 4 个检波点有效接收折射波。
  - 3) 采用追逐时距曲线补充完整对比观测系统，应保证在两支时距曲线上被追踪段至少有 4 个检波点有效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，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。
  - 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，测线长度不宜大于爆炸点到测线的距离。
- 3 浅层反射波法观测系统要求：
- 1) 展开排列观测系统适用于了解测区内有效波和干扰波的分布情况和振幅特征，选择最佳窗口，提供最佳偏移距和检波点距。
  - 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，且在反射窗口内反射波较强的测区。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) 共深度点叠加观测系统宜采用有一定偏移距、单端激发、不少于 6 次覆盖观测系统，使接收排列在最佳反射窗口内。
- 4 瑞雷波法观测系统要求：
- 1) 稳态瑞雷波法观测系统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) 瞬态瑞雷波法观测系统可选用锤击、落重、爆炸震源，在多道等检波点距排列的单端或两端激发，可用 12 道或 24 道接收。
- 3) 通过试验选择适当的偏移距和检波点距，以满足最佳瑞雷波接收窗口和最佳探测深度的要求。排列长度应大于探测深度，检波距应小于异常体尺度。
- 4) 同一测线的排列方向宜与测线保持一致。

5.4.8 地震波激发和接收应通过试验确定，并符合下列要求：

- 1 爆炸震源安全必须按 GB 6722 的规定。
- 2 爆炸激发应符合下列要求：
  - 1) 爆炸记时线应绕炸药包捆绑。
  - 2) 坑中爆炸时，药包必须用土或细砂埋实，清除炮点处碎石块和木棍条等。多次使用同一炮坑时，每次埋药包前应清除松土。
  - 3) 水中爆炸的药包沉入深度宜为 1m。
  - 4) 井中爆炸时，宜有水或泥浆耦合。
  - 5) 爆炸点位置沿垂直测线方向移动距离不应超过检波点距的 1/5，深度应测量。
  - 6) 必须使用专用爆炸机、一套爆炸线和记时线。
- 3 锤击和落重震源要求：
  - 1) 浅层地震波折射和反射的震源激发点应选在较密实处，必要时应先除去震源激发点表面松散层或夯实。锤击板应与地面接触良好，不应因反跳造成二次触发。
  - 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。
  - 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或测线延长线上。木板上应加压足够的重物 and 安装抓钉，保持叩板与地面接触牢固。

4) 使用钉钯震源时, 钯齿应打入土层中, 保持钉钯与地面接触牢固。

4 浅层折射波法的检波点距宜为 2m~10m, 在探测风化带、断层和岩土参数测试时可适当减小; 浅层反射波法的检波点距宜为 2m~4m; 瑞雷波法的检波点距宜为 1m~5m。

5 应依据激发有效波频率响应范围和探测分辨率要求选择相应频率的检波器, 检波器选择要求:

- 1) 浅层折射波法宜选用固有频率为 10Hz~40Hz 的垂直检波器。
- 2) 浅层地震纵波反射法宜选用固有频率为 100Hz 的垂直检波器。
- 3) 浅层地震横波反射法宜选用固有频率为 40Hz~60Hz 的水平检波器。
- 4) 瑞雷波的检波器固有频率和频度应与探测深度相符, 宜选用固有频率为 1Hz~10Hz 的垂直检波器。

6 检波器布设要求:

- 1) 检波器的布设位置应准确、埋置条件一致。
- 2) 当受地形、地表条件的限制, 检波器不能安置在原计划的点位上时, 沿测线方向移动不得超过 1/10 检波点距 (不包括互换点), 沿垂直测线方向移动不超过检波点距的 1/5, 移动后的位置应记入班报。
- 3) 用水平检波器接收横波时, 检波器应水平安置, 灵敏轴应垂直测线方向, 且取向一致。
- 4) 水中 (或井中) 接收时, 应将水听器沉放水面 1m 以下。
- 5) 使用井中三分量检波器接收横波时, 检波器应贴壁牢固。

7 水域地震工作要求:

- 1) 浅层折射波法可选用漂浮电缆或水底布置检波器。水



底检波器应垂直嵌入铅饼内,铅饼重量不宜小于 5kg,检波器和电缆绝缘满足要求,宜采用爆炸震源。

- 2) 浅层反射波法宜采用漂浮电缆和电火花震源,沉放深度宜通过试验确定,漂浮电缆连同电火花震源应由拖船匀速拖动并及时测量定位。
- 3) 水流较急的横河测线宜采用激发和接收点互换的观测方式。
- 4) 应及时测量水边线高程、各检波点和震源点的水深。当水位变化超过 0.5m 时,应进行校正。

8 仪器工作参数应依据试验结果、干扰背景、激发和接收条件、地球物理条件及安全等因素综合确定,并要求:

- 1) 一个测区或测段宜选用同一滤波档,改变滤波档应有对比记录。
- 2) 依据探测深度、排列长度、炮检距确定记录长度,当采用高采样率与记录长度发生矛盾时,可使用延时。
- 3) 瞬态瑞雷波勘探时,仪器滤波档应设置为全通,采样间隔应小于瑞雷波最高频率的半个周期,时间测程应大于最远道瑞雷波的最长走时。

9 当激震信号较弱或信噪比较低时,可采用重复激振进行信号叠加。

5.4.9 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。

5.4.10 记录存在下列缺陷之一者为不合格:

- 1 不能可靠地追踪有效波记录。
- 2 互换道或连接道工作不正常,妨碍有效波的正确对比与连接,又不能从同一激发点的另外记录准确转移的记录。
- 3 同一记录上,使用道数的六分之一以上或两相邻道工作不正常的记录。
- 4 干扰背景强烈,妨碍有效波识别或准确读取旅行时的折射

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 同一排列的互换道或排列间同相位的时间差，经校正后，大于 3ms 的记录。

#### 5.4.11 波的对比应符合下列要求：

1 辨认和追踪有效波的同相轴和波的置换应进行波的对比。宜选择靠近有效波的起始相位进行单相位或多相位对比，在断裂发育区，宜采用多相位对比。

2 在相遇时距曲线观测系统中，进行互换道和连接道上波的对比，应根据有效波的旅行时的相等性及其动力学特点的相近性进行分析。

3 在追逐时距曲线观测系统中进行折射波对比时，应根据追逐时距曲线的平行性来判别同一层位或不同层位的折射波。

4 识别展开排列和共炮点地震记录的反射波同相轴，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平行双曲线，不同层位的反射波同相轴随炮检距增加而逐渐靠拢。

5 反映层位变化的瑞雷波同相轴随炮检距的增加彼此逐渐散开，同相轴之间时差递增，频率降低。

#### 5.4.12 旅行时读数应符合下列要求：

1 宜在原始记录上读取波的初至时间，当初至波读取有困难时，也可读取有效波的第一个极值时间，然后进行相位校正。

2 在波的干扰或置换位置，应在分析波的叠加情况后正确读取。

5.4.13 绘制时距曲线时，应对旅行时读数进行校正，校正内容包括：相位校正、爆炸深度校正、表层低速带校正及地形校正。

#### 5.4.14 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充分考虑近地表介质波速的

不均匀性和低速带厚度与下伏层厚度的相对变化对平均速度和有效速度的影响。

2 速度参数可采用地震测井、浅层反射波法和浅层折射波法测得。

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计算的有效速度进行评价和校正。

4 进行地震勘探时，宜在测线每一百米测段的两端进行有效速度测试。当发现相邻速度差超过 20% 时，应在该测段内增加速度测试工作，并绘制速度沿测线变化的曲线，按曲线上对应的速度值构制界面。

5 当表层低速带厚度的变化引起有效速度明显变化时，应先行低速带校正，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，以防引起界面深度的突变。

5.4.15 折射波法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

1 时距曲线的水平比例尺可选择 1 : 500、1 : 1000、1 : 2000，垂直比例尺可选择 1cm 代表 5ms、10ms、20ms。

2 综合时距曲线的互换时间差不应超过 5ms、追逐时距曲线宜平行。

3 当时距曲线中个别道出现旅行时突变，而对应地段的相遇或追逐时距曲线正常时，应对突变时间进行修正。

4 绘制综合时距曲线时，应将校正前后的时距曲线一并绘出。

5 应根据地球物理条件、方法特点和精度选择折射波解释计算方法：单支时距曲线观测可选择截距时间法、临界距离法、正演拟合算法；相遇时距曲线可选择  $t_0$  法、延迟时法、时间场法、共轭点法、正演拟合算法。方法选用要求：

1) 宜使用相遇时距曲线求取界面深度和界面速度。

2) 当地层近似水平且波速变化不大、地表和界面相对平

缓又无法获得相遇时距曲线时，宜采用单支时距曲线的截距时间法或临界距离法求界面深度。

- 3) 当界面起伏不大（无穿透现象）和沿测线界面速度无明显变化时，宜选用  $t_0$  法或延迟时法。
  - 4) 当地表有一定起伏、折射界面起伏较大（无穿透现象）、界面速度有明显变化时，宜采用时间场法。
  - 5) 当地表较平坦、折射界面起伏较大（无穿透现象）、界面速度有明显变化时，宜采用共轭点法。
- 6 折射波资料推断解释应符合下列要求：
- 1) 应以钻孔和物性资料为依据确定地震界面与地质界面的对应关系。
  - 2) 应以所获得的物性资料和地质资料为依据推断水平方向上的岩性变化。
  - 3) 应通过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。

7 应绘制综合时距曲线剖面图、浅层地震折射成果地质解释剖面或平面图。综合时距曲线剖面图应包括解释计算曲线和数据，成果地质解释图包括地质剖面图、覆盖层或其他目的层等厚度图、基岩顶板等高线图、测区断层或岩性界线分布图、界面速度分布图等。

5.4.16 反射波法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

- 1 应利用测区展开排列的探测资料、其他物探方法的探测资料、已知地质资料等确认被探测目的层的反射波。
- 2 可根据原始地震记录的信噪比情况通过对比试验选择滤波频率、滤波视速度、叠加速度、平均速度作相关预处理。
- 3 地震原始记录预处理应将不正常道数据充零，校正反极性道。
- 4 在地形起伏较大或低速带速度变化较大的测区，一次静校正应符合下列要求：

- 1) 宜根据地形地质情况作全测线或分段地形改正。
- 2) 在表层低速带沿测线方向变化较大时, 宜沿测线作浅层地震折射探测, 取得波速分布资料。
- 5 进行速度分析, 选取叠加速度, 应符合下列要求:
  - 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) 沿测线要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, 掌握速度横向变化规律。
  - 4) 对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 数字滤波应符合下列要求:
  - 1) 应在频谱分析的基础上选择滤波频率。
  - 2) 调整滤波宽度, 解决提高信噪比和分辨率的矛盾。
  - 3) 选用合适的镶边宽度, 避免吉布斯现象和减少滤波因子截断误差。
- 7 依据测区地质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 原始的等偏移资料和地震映像资料用作定量解释时, 应进行动校正处理。

10 应识别、对比、追踪反射时间剖面上的反射波组，并进行以下内容的地质解释：

- 1) 确定主要地质层位与反射层位关系。
- 2) 确定地层厚度变化与接触关系。
- 3) 划分断层或破碎带。

11 应分析反射时间剖面中波组分叉、合并、中断、尖灭等现象，得出与地层、岩性、构造的变化关系。

12 应分析等偏移或地震映像时间剖面中波的频率、相位、余振长短、波散射、振幅大小等变化情况与地下介质横向和纵向变化的关系。

13 可根据地球物理条件、方法特点和精度选择交点法、椭圆法、圆法、时间场法等构制浅层反射界面，并要求：

- 1) 当覆盖层介质较均匀、平均速度变化不大时，可选用交点法、椭圆法和圆法。椭圆法和交点法适用于水平和倾斜界面；圆法适用于界面视倾角小于  $10^\circ$ 。
- 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。

14 应绘制反射波原始时间剖面、经各种处理方法处理后的时间剖面、反演解释图、物探成果地质解释剖面或平面图。平面图系指面积性地震勘探时绘制的等深度图、断层构造线平面分布图。

5.4.17 瑞雷波法数据处理、资料解释和图件应符合下列要求：

- 1 稳态瑞雷波计算处理可选择时间差法或相位差法。
- 2 稳态瑞雷波速度的计算应选择位于激震点同一侧、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过程应包括时域提取、频域分析、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 宜选用互相关法，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。宜选用极值法或近似点法求取层速度，一次导数法或拐点法求取层厚度。

6 瑞雷波的深度转换宜选用半波长法、泊松比确定转换系数和根据测区地质资料对比解释。

7 瑞雷波的资料宜依据频散或波速曲线上的突变点等特征进行分层解释，剖面探测应依据剖面内波速分布情况进行解释。

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 当进行剖面探测时，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  $v_R$  断面图。

10 可利用瑞雷波速度按式 (C.54) 计算横波速度。

## 5.5 弹性波测试

5.5.1 弹性波测试可选择声波法和地震波法。声波法可选用单孔声波、穿透声波、表面声波、声波反射、脉冲回波等；地震波法可选用地震测井、穿透地震波速测试、连续地震波速测试等。

5.5.2 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 穿透声波在具有成对钻孔或其他二度空间面的岩土、混凝土体上进行，钻孔宜有井液耦合，穿透距离应以保证接收信号清

晰为前提。

3 表面声波、声波反射和连续地震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 脉冲回波应有明显的波阻抗面，在目的体内能产生多次回波信号。

5 地震测井宜在无金属套管的钻孔中进行。

6 穿透地震波速测试应具有成对钻孔、平洞或有临空面的岩体。用于探测时，被探测目的体应与周边介质有明显的波速差异，且具有一定规模。

### 5.5.3 仪器和设备应符合下列要求：

#### 1 声波仪器和设备要求：

- 1) 最小采样间隔不大于  $0.1\mu\text{s}$ 。
- 2) 单道采样长度不小于 512 样点可选。
- 3) 触发方式：宜有内、外、信号、稳态等方式。
- 4) 频响范围： $10\text{Hz}\sim 500\text{kHz}$ 。
- 5) 声时测量精度： $\pm 0.1\mu\text{s}$ 。
- 6) 发射电压： $100\text{V}\sim 1000\text{V}$ 。
- 7) 发射脉宽： $1\mu\text{s}\sim 500\mu\text{s}$  可选。

2 声波反射宜使用具有波形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、采样长度长、并具有频谱分析功能的仪器。

#### 4 电火花和超磁致震源仪器和设备要求：

- 1) 仪器设备的防护和使用必须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、满足接收要求。
- 3) 记时信号起跳尖锐、稳定，与接收仪器同步，误差小于读数误差的 2 倍。

5 地震波法的震源、仪器和设备应符合 5.4.3 中的相关要求。



5.5.4 现场准备工作应符合下列要求：

1 声波测试工作开始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宜在水池中按不同间距进行测量，绘制3个~4个测点曲线求取零值，平面探头宜用黄油耦合测零值。

3 地震测试应按5.4.6的相关要求对仪器设备进行检查。

5.5.5 工作布置应符合下列要求：

1 在基岩露头、探槽、竖井及洞室测试时，测段应根据任务要求布置在有代表性、表面平坦的地段。在地下洞室内测试弹性波速度的测点位置应布置在洞壁的另一高度。

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，以发现测试任务要求的最小目的体，并在成果图上清楚反映出探查对象的位置和形态为原则。

3 在平洞内利用声波进行岩体风化、卸荷分带时，风钻孔应布置在洞壁的另一高度，风钻孔应平行或共面，宜下斜 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。

4 进行洞室松弛圈声波测试时，应在洞室断面径向布置声波风钻孔，孔深应超过松弛厚度，以能够反映原岩应力变化为准。

5 进行穿透声波或穿透地震波速测试时，孔距应根据地质情况、分辨率、激发能量而定。

6 进行穿透声波和穿透地震波速测试的钻孔，应进行孔斜测量和孔距校正。

7 进行动弹性模量和静弹性模量对比试验的声波孔的数量、孔距和孔深应考虑静弹性模量试件面上不同方向的岩体波速。

5.5.6 现场测试应符合下列要求：

1 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、信号清晰。

3) 应先用直径和重量略大于测试探头的重物进行探孔，

斜度较大的钻孔和上斜孔应使用探棍，检查测试钻孔。

- 4) 宜从孔底向孔口测试，点距 0.2m，电缆深度标识准确，每十个点应校对一次。
  - 5) 当孔壁较破碎或钻孔较深时，宜加大发射源功率，或采用具有前置放大功能的接收探头。
- 2 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) 钻孔有套管时，应将套管以外的空隙用水、砂土等填实。
  - 3) 对具有两个相对临空面的混凝土体或岩体进行声波测试时，选用适当频率的平面声波探头测试，并用耦合剂耦合，发射和接收间距应测量准确。
- 3 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) 如距离较大或声波衰减较快，可加大发射探头功率，或采用具有前置放大功能的接收探头。
  - 4) 安置探头处应打磨平整，使用耦合剂耦合。
- 4 声波反射和脉冲回波要求：
- 1) 工作前应在已知地段进行试验，选择合适的偏移距、激发能量、仪器参数等。
  - 2) 应采用声波平面探头进行等偏移测试，声波接收探头应具有高灵敏度、中等阻尼等特性。
  - 3) 可选择超磁致、回弹锤等窄脉冲的外触发震源。回波法宜根据测试要求，选用不同频率的回弹球。
  - 4) 安置探头处应打磨平整，用耦合剂耦合。
- 5 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，并按岩性、风化程

度、地质构造和岩体完整程度布置测线。

- 2) 排列长度应根据岩体的完整程度和仪器的读数精度确定, 以保证排列内相邻道的纵波传播时间差大于仪器可读数精度的 5 倍以上。
  - 3) 宜采用单支或相遇时距曲线系统。
  - 4) 在基岩露头测试岩体横波速度时, 宜采用叩板等具有定向激发的震源方式, 在平洞宜使用洞壁支撑器, 采用正反向激发, 要求横波获得率不低于纵波的 60%。
- 6 地震测井和穿透地震波速测试要求:
- 1) 激发和接收应按 5.4.8 的要求。
  - 2) 可采用地面孔口激发、孔中接收方式测试纵横波。
  - 3) 孔旁地面激发点到孔口距离可通过试验确定, 宜为 2m~4m。孔内点距应根据地层波速确定, 覆盖层中宜为 1m~2m, 基岩中宜为 2m~3m。
  - 4) 穿透地震波测试宜根据岩层倾向, 采用同步方式。同一直线上的三个孔的穿透地震波测试宜在边孔发射, 另两孔接收。探头之间的距离宜根据孔距、孔斜等资料校正。
  - 5) 使用井中剪切锤震源宜自下而上移动、深度准确、贴壁牢固。
  - 6) 采用三分量检波器测试横波时, 检波器应贴壁牢固。
  - 7) 孔间穿透地震波测试宜选用电火花震源, 且有水或泥浆耦合。当孔距较大时也可选用爆炸震源。
  - 8) 洞间或临空面间进行穿透地震波测试时, 可视距离或地质条件选择电火花、爆炸或锤击震源。

#### 5.5.7 观测和检查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, 初至点或反射波明显易读。测振幅时, 应保持测试条件不变, 读取同一相位振幅值, 并注明所读相位。

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 对波形曲线剧变或跳变剧烈的测点或测段，应采用叠加方式或加大发射能量进行重复测试。

#### 5.5.8 资料检查与评价应符合下列要求：

- 1 单张记录符合 5.4.10 为不合格。
- 2 进行波速测试时，单个（或对）钻孔检查或测线检查的旅行时均方相对误差应小于 5%。

#### 5.5.9 数据处理和资料解释应符合下列要求：

- 1 在进行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 利用波速计算岩体完整性系数时，一个工区内，对于同类岩性，应使用新鲜完整岩块的同一波速。岩体完整性系数按式 (C.72) 进行计算，并按表 5.5.9 的要求进行评价。

表 5.5.9 岩体完整程度分类表

完整程度	完整	较完整	完整性差	较破碎	破碎
完整性系数 ( $K_v$ )	$K_v > 0.75$	$0.75 \geq K_v > 0.55$	$0.55 \geq K_v > 0.35$	$0.35 \geq K_v > 0.15$	$K_v \leq 0.15$

3 在取得纵横波速度和密度值的情况下，按式 (C.66)、式 (C.67) 计算动弹性模量。

4 声波反射法应按 5.4.16 的要求。

5 脉冲回波应进行频谱分析，确定目的层或缺陷的回波频率，并依据试验测试的波速参数计算目的层厚度或缺陷埋深。

6 应依据现场试验确定岩体质量、风化分带的波速、完整性系数数值范围。

7 可依据任务要求对测试的波速值进行统计分析。

#### 5.5.10 图件应符合下列要求：

1 单孔声波、穿透声波、地震测井、穿透地震波、连续地震波速测试应绘制与孔（洞）深或测线方向符合的波速曲线、风化波速比或完整性系数分类曲线，并对岩体质量、风化、分层情况进行解释和评价。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。

2 当多条表面声波或连续地震波速测线组成测网时，应绘制波速、风化波速比或完整性系数平面分布图。

3 声波反射应绘制时间剖面、处理后的时间剖面、物探成果地质解释剖面或平面图。

4 回波法应绘制时间剖面、频率剖面、物探成果地质解释剖面或平面图。

## 5.6 层析成像

5.6.1 层析成像（CT）可选择声波速度层析成像（简称声波 CT）、地震波速度层析成像（简称地震波 CT）、电磁波吸收系数层析成像或电磁波速度层析成像（简称电磁波 CT）等。

5.6.2 应用条件应符合下列要求：

1 被探测目的体与周边介质存在电性或波速差异，具有电性差异的应选用电磁波 CT，具有波速差异的宜选择声波 CT 或地震波 CT；同时存在电性和波速差异的可根据条件选择其中一种；当条件复杂时，可同时采用两种 CT 方法。

2 成像区域周边至少两侧应具备钻孔、探洞及临空面等探测条件，被探测目的体宜相对位于扫描断面的中部，其规模大小与扫描范围具有可比性，异常体轮廓可由成像单元组合构成。

5.6.3 仪器设备应符合下列要求：

1 声波 CT 应选用声波仪，宜选用电火花震源，仪器设备应符合 5.5.3 的要求。

2 地震波 CT 应选用地震仪，仪器设备应符合 5.4.3 的要求。

3 电磁波吸收系数 CT 应选用钻孔电磁波透视仪，仪器设备

应具有频率可选功能；接收机噪声电平 $\leq 0.2\mu\text{V}$ ，测量范围 20dB~140dB，动态范围为 100dB，测量误差不超过 $\pm 3\text{dB}$ 。

4 电磁波速度 CT 应选用探地雷达仪，孔内探头应使用井中雷达探头；仪器设备应符合 5.3.3 的要求。

5.6.4 剖面及测点布置应符合下列要求：

1 CT 剖面宜垂直于地层或地质构造的走向；扫描断面的钻孔、探洞等应相对规则且共面。

2 孔、洞间距应根据任务要求、物性条件、仪器设备性能和方法特点合理布置。声波 CT 不宜大于 30m，电磁波 CT 不宜大于 60m，地震波 CT 可根据激发方式和能量大小适当选择；成像的孔、洞深度宜大于其孔、洞间距。地质条件较为复杂、探测精度要求较高的部位，孔距或洞距应相应减小。

3 点距应根据探测精度和方法特点确定：声波 CT 和电磁波 CT 测试点距宜小于 1m，地震波 CT 宜小于 3m。

5.6.5 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，当孔间的地面或洞间边坡条件适宜时，宜采用三边观测系统；在梁柱或多面临空体的情况下，可采用多边观测系统。

2 对探洞、钻孔及自然临空面所构成的区域进行 CT 时，宜采用扇形扫描方式，射线分布均匀，交叉角度不宜过小，扇形扫描的最大角度以不产生明显断面外绕射为原则。

3 当发射点间距大于接收点间距时，应采用两孔互换观测系统，并保持一定数量的发射接收点互换。

4 在同一剖面上进行多组孔间或洞间 CT 观测时，宜保持观测系统一致。

5.6.6 现场工作应符合下列要求：

1 声波 CT 和地震波 CT 应符合 5.5.6 和下列要求：

- 1) 声波 CT 或地震波 CT 的钻孔应进行测斜和声波测井；地震波 CT 的探洞应进行地震波或声波速度测试。

- 2) 钻孔声波 CT 或地震波 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, 应下塑料或金属套管。
- 3) 孔间地震波 CT 采用爆炸震源, 激发孔宜下金属套管护壁, 或在激发点以上吊置一段金属套管, 边在管脚放炮, 边提升套管。
- 4) 当接收距离较远或信号衰减较快时, 宜选择高能量激发装置和具有前置放大功能的接收探头或高灵敏度检波器接收。
- 5) 地震波 CT 采用爆炸震源激发、多道接收方式观测时, 同一震源点的相邻接收排列应有一道重复。

2 电磁波 CT 应符合下列要求:

- 1) 应通过现场试验选择仪器的工作频率和对应天线。
- 2) 电磁波吸收系数 CT 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, 宜使用相同的频段。
- 3) 确定初始场强、背景吸收值或背景波速应在地层或地质条件相对简单的孔段进行三孔法或双孔法试验。
- 4) 仪器下井前应作校零、时钟同步工作; 电磁波透视仪的发射机与电缆间宜使用长度为 2 倍所选波长的绝缘绳相连。接收机与电缆间应有电缆滤波器相连。天线下端应悬挂重锤
- 5) 电磁波 CT 的钻孔宜进行综合测井。
- 6) 电磁波 CT 宜先进行同步观测, 然后进行定点观测, 当发现异常后, 应适当加密观测。
- 7) 孔间或洞间电磁波 CT 应避开金属管件等的影响; 当仪器距孔口或洞口较近时, 应用金属板将洞口、孔口(口径较大的)进行封闭, 以避免电磁波经空气绕射。

5.6.7 检查观测、资料检查和评价应符合下列要求:

- 1 收发互换的观测点可作为检查工作量。

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

#### 5.6.8 数据处理和资料解释应符合下列要求：

1 进行波速成像观测应读取各条射线透射波的首波旅行时，当存在激发延时 $t_0$ 时，应进行校正；电磁波吸收系数 CT 数据应进行初始场强 $E_0$ 校正、近地表侧面波校正、剔除坏值等。

2 依据测量、测斜资料及成像数学模型计算每条射线的激发和接收点坐标。

3 计算出每条射线的平均波速或平均吸收系数，并分别显示出各个同步和定点的平均波速或平均吸收系数曲线，以确定参加反演参数的变幅范围。

4 根据地质地球物理条件、观测系统、成像精度、分辨率和任务要求选择和建立数学物理模型。网格单元尺寸不应小于测点间距，单元总数不宜大于射线条数；模型的初始值和约束极值可由已知地质条件、经验值、现场试验计算等方法得出。

5 射线追踪可选择线性方程、打靶法、最小旅行时或平方慢度等方法。

6 反演方法宜选择奇异值分解（SVD）、联合迭代（SIRT）、共扼梯度（CG）、阻尼最小二乘（LSQR）等方法，以及由这些方法改进而成的其他方法。

7 可将钻孔或探洞的声波、地震波速度、电磁波测井、雷达测井资料作为边界条件，加入相应的反演计算中，以克服边界误差。

8 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。

9 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。

10 多频观测的电磁波吸收系数 CT 可选择相对衰减成像，选择的频率应频散明显、数据没有盲区。



11 对于二边观测的 CT 数据，可选择具有压缩恢复处理功能的反演软件，以减小图像在垂直观测方向上的伪差。

12 弯线反演的最终射线分布图可作为成果之一，根据射线疏密情况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。

13 根据 CT 图像中波速、吸收系数的分布规律，结合被探测区域的地层岩性、结构构造、风化卸荷及岩体质量等进行地质推断解释。

#### 5.6.9 图件应符合下列要求：

- 1 图件宜包括射线分布图、CT 图像、CT 成果地质解释图。
- 2 CT 图像可采用等值线、灰度、色谱等图示方法，图像可等差分级，为了突出异常，也可变差分级。
- 3 同一条剖面的多组 CT 断面可拼接成一幅剖面成果图。

## 5.7 水 声 勘 探

5.7.1 水声勘探可用于水电水利工程的水库、河道、湖泊和浅海深水区的的海底地形探测，以及坝址、桥基、港口工程水下地层剖面的探测。

#### 5.7.2 应用条件应满足下列要求：

- 1 被探测地层与相邻层之间具有可产生水声反射的波阻抗差异。
- 2 进行水下覆盖层分层时，被探测地层不多于 3 层，且有一定厚度、介质均匀、波速稳定。
- 3 水下没有卵砾石或卵砾石呈零星分布的松散地层。
- 4 水流不宜太急、波浪不宜太大，水深宜大于 2m。

#### 5.7.3 仪器和设备应符合下列要求：

##### 1 探测深度及分辨率：

水深小于 50m，疏松沉积层 0m~25m，分辨率 0.3m~0.5m。

水深大于 50m，疏松沉积层 25m~50m，分辨率 0.5m~1.0m。

## 2 激振次数:

浅层: 0m~25m, 360 次/m。

深层: 25m~50m, 180 次/m。

3 接收放大器增益:  $>150\text{dB}$ 。

4 接收探头灵敏度:  $>10\mu\text{V}/\mu\text{bar}$ 。

### 5.7.4 测线布置应符合下列要求:

1 河道及水库的水声勘探线应垂直水下地形的走向, 宜布置横河测线, 线距宜为 50m。当水下地形较平坦时, 测线可顺河流方向布置。

2 探测河床水下覆盖层厚度、基岩河谷形态时, 宜与地质勘探线或其他物探方法的测线重合。

### 5.7.5 现场工作应符合下列要求:

1 水声勘探剖面宜选用 GPS 实时动态测量, 在河道水库工作时可采用其他测量方式。

2 使用模拟信号仪器, 水声记录标记宜与 GPS 采样数据同时进行, 定位点距宜小于 50m。使用数字信号仪器, 可采用 GPS 连续定位。

3 剖面测量误差应在所用的地形图上坐标不超过 2mm, 高程不超过 0.5m, 两岸剖面桩之间的距离误差应小于 1%。

4 使用分体式发射和接收探头时, 探头应分别安置于船体两侧, 间距宜为 6m~8m; 使用整体式拖鱼探头时, 应适当远离船体一定距离且水平放置。

5 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 左右。

6 测船应保持定向、恒速行驶。

7 应根据不同地层, 调整频率和接收灵敏度, 以提高地层分辨率。

8 工作期间, 水位涨落变化较大 ( $>0.3\text{m}$ ) 时, 应每隔一定时间间隔测量一次水面高程, 绘制水面高程随时间变化曲线。

5.7.6 记录存在下列缺陷之一者为不合格:

- 1 背景干扰严重、记录浓度不均、无法分辨目的层。
- 2 班报的编号、剖面号与实测记录不符。
- 3 没有注明日期、起止位置、记录范围、时间标记。
- 4 对应剖面位置或高程测量不准。

5.7.7 数据处理、资料解释和图件应符合下列要求:

- 1 当水深小于 15m、使用分体探头时,应校正深度偏移误差;当水底存在疏松层时,应进行速度校正。
- 2 宜绘制水声时间剖面图、水声时间剖面成果地质解释图、水下地形图、水下淤泥层(或覆盖层)等厚度图、基岩等高线图。

## 5.8 放射性测量

5.8.1 放射性测量可选择自然伽玛测量(简称 $\gamma$ 测量)、 $\alpha$ 测量、伽玛-伽玛测量(简称 $\gamma$ - $\gamma$ 测量)、同位素示踪法等。

5.8.2 应用条件应符合下列要求:

1  $\gamma$ 测量和 $\alpha$ 测量要求:

- 1) 适用于各种环境、地形、地貌,被探测地质构造或现象易于促使天然放射性物质释放与运移,在附近形成放射性异常。
- 2)  $\gamma$ 测量可用于测量地下相关放射性核素释放的 $\gamma$ 射线,适宜在岩体露头上测量,在地表浮土上测量时,探测深度较浅。
- 3)  $\alpha$ 测量可用于测量地下或空气中相关放射性核素释放的 $\alpha$ 射线,适宜在覆盖土上测量,也可在空气中测量。
- 4) 探测区宜为岩浆岩或放射性背景值较高的地区,表层均匀、无大范围人工填土,被探测目的体埋藏较浅,无上覆潜水层等屏蔽层。
- 5)  $\alpha$ 测量不宜在阴雨天进行。

2  $\gamma$ - $\gamma$ 测量适宜测量近表层或钻孔附近岩土体原位密度和

湿度。

3 同位素示踪法应在单个或多个钻孔中(间)测试地下水流速流向及其他水文地质参数。

5.8.3 仪器和设备应满足下列要求:

1  $\gamma$ 测量仪要求:

- 1) 用于能谱测量的 $\gamma$ 辐射仪有4个通道,每道谱段可调,并有稳谱装置,连续8h工作读数相对误差小于1%。
- 2) 用于 $\gamma$ 总量测量的辐射仪有积分甄别器,能测量数十到数百千电子伏特低能量 $\gamma$ 射线。
- 3) 辐射仪阈值可调,灵敏度高,在自然底数不大于0.72pC/(kg·s)时,灵敏阈不大于0.143pC/(kg·s)。
- 4) 辐射仪在0.0pC/(kg·s)~3.6pC/(kg·s)范围内为线性。
- 5) 测量时间和次数可选。

2 静电 $\alpha$ 卡测量仪要求:

- 1) 宜选用大闪烁体制做的闪烁探测器,探测射线的效率( $^{241}\text{Am}$ )不应小于60%。
- 2) 在温度极限条件与正常条件下的读数误差小于15%。
- 3) 一周内不做调整,重复读数误差不超过15%。

3 氡浓度测量仪要求:

- 1) 本底计数每分钟小于5个计数。
- 2) 仪器测量已知样品,连续测量7h相对误差不超过15%。
- 3) 工作环境温度为 $-10^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ ,工作环境湿度 $<85\%$ 。

4  $\gamma$ - $\gamma$ 测量仪器要求:

- 1) 灵敏阈应达到0.0001%eu含量,测量范围 $>0.01\%$ eu。
- 2) 在仪器测量范围内的任何一个固定 $\gamma$ 射线照射量率的位置上,连续工作8h测值的相对误差 $<5\%$ 。

- 3) 仪器标定后, 对一已知含量模型测得含量的相对误差  $<5\%$ 。
- 4) 多台仪器在相同测量条件下, 其中任意两台仪器测得含量的相对误差  $<5\%$ 。
- 5) 在设计测程范围内, 仪器实际值的非线性误差  $<5\%$ 。

5 同位素示踪仪器要求垂向流速测试误差小于  $2\%$  ( $v_v > 0.1\text{m/d}$ ); 水平流速测试误差小于  $3\%$  ( $v_f > 0.05\text{m/d}$ )。

#### 5.8.4 测线布置应符合下列要求:

##### 1 $\gamma$ 测量和 $\alpha$ 测量要求:

- 1) 测网密度可通过试验确定, 在已知的地段上开展不同精度的测量, 把获得的资料与已知的地质情况比较, 确定最佳测网密度。
- 2) 测线间距在工作比例尺平面图上宜为  $2\text{cm} \sim 4\text{cm}$ , 测点间距在工作比例尺平面图上宜为  $0.5\text{cm} \sim 2\text{cm}$ 。实测点距宜为  $10\text{m} \sim 100\text{m}$ 。

2 环境土壤中氡浓度测量应根据地质构造、断层带布置测线, 测线宜垂直构造走向, 测线间距  $10\text{m} \sim 20\text{m}$ , 测点间距  $5\text{m} \sim 10\text{m}$ ;

3 环境空气氡浓度测量宜根据建筑物的特点, 选择具有代表性的地点布设测量或监测点, 测点间距  $20\text{m} \sim 50\text{m}$ 。

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

#### 5.8.5 仪器标定和放射源应符合下列要求:

1 仪器工作前后应使用工作标准放射源标定, 内容包括: 确定阈压值、最短观测时间、最小观测次数。

2  $\gamma$ - $\gamma$ 测量应使用  $^{137}\text{Cs}$  或  $^{60}\text{Co}$ , 活度宜为  $10^7\text{Bq} \sim 10^8\text{Bq}$ ; 同位素示踪宜使用半衰期短、污染小的  $^{131}\text{I}$  放射性同位素。

#### 5.8.6 现场工作应符合下列要求:

##### 1 $\gamma$ 测量要求:

- 1) 当要取得更多信息、解决多种地质问题时,宜选用能谱测量仪作能谱测量;作 $\gamma$ 总量测量应选用 $\gamma$ 积分测量仪。
  - 2)  $\gamma$ 总量测量的点距较小时,应进行定点测量;点距较大时,可采用边步行边测量的连续测量方式。
  - 3) 普查测量时,仪器探头宜离地 0.5m 左右;环境 $\gamma$ 测量时,探头离地面高度 1m;详查时,宜挖浅坑,进行坑中测量。
  - 4) 能谱测量宜作多通道和总道测量,观测时间应保证观测精度要求。
- 2  $\alpha$ 测量要求:
- 1) 测量土壤中氡浓度可选用 $\alpha$ 卡测量、岩土取样  $^{210}\text{Po}$  测量。
  - 2) 氡浓度测量可采用唧气筒或取气器从土壤或空气中采集气体,土壤中取气深度宜在 0.5m~1m 范围,空气环境检测取气器宜离地面 1.5m 左右。
  - 3)  $^{210}\text{Po}$  测量取样深度宜在 40cm~50cm,取样重量不少于 100g,室内测前保存时间不大于 1 周。
  - 4)  $\alpha$ 卡应埋置于土壤坑内,埋深宜为 40cm~50cm,埋卡时间应大于 4h,埋卡与取卡时间顺序一致,取卡后应立即测量。
  - 5) 土壤中氡浓度可选用 HFS-6x 射线快速测量仪。
- 3  $\gamma$ - $\gamma$ 测量要求:
- 1) 应根据测量条件选择散射法或吸收法。
  - 2) 当测量表面不易或不能造孔、测量深度在 10m~15m 时,可采用散射法,除散射窗和接收窗外,应用铅屏防护,收发距宜为 20cm~30cm。
  - 3) 当测量表面可造孔时,宜采用双孔或单孔吸收法,孔深宜小于 50cm,双孔吸收法孔距宜为 20cm~30cm,

放射源必须置于孔内。

4) 利用钻孔测试地层密度应采用综合测井的 $\gamma$ - $\gamma$ 测井。

4 同位素示踪要求:

1) 放射性同位素示踪测试水文地质参数时,宜选用 $^{131}\text{I}$ 作投放源,每次投放量应小于 $1 \times 10^8 \text{Bq}$ 。

2) 测量渗透流速和流向宜采用单孔稀释法,测量钻孔中垂直流速一般采用单孔示踪法。测量地层有效孔隙度宜采用多孔示踪法。

3) 测量覆盖层、岩溶和构造裂隙发育孔段的地下水流向、渗透速度时,钻孔应下花管护壁。

4) 渗漏通道的连通试验应事先估计投放点至测量点之间的渗漏量、饱和层体积、孔隙度等水文地质参数,估算放射源投放量。多孔连通试验每次 $^{131}\text{I}$ 最大投放量小于 $100.0 \times 10^9 \text{Bq}$ 。

5 环境地表 $\gamma$ 辐射测量按 GB/T 14583 的规定,环境空气中氡浓度测量按 GB/T 14582 的规定,民用建筑工程室内环境放射性检测按 GB 50325 的规定。

5.8.7 资料检查和评价应符合下列要求:

1 脉冲记数仪器涨落误差的标准误差 $\sigma$ 按式(C.58)计算,且应小于30%;相对标准误差 $\delta$ 按式(C.59)计算,且应小于10%。

2 率计式辐射仪涨落误差的标准误差 $\sigma$ 按式(C.60)计算,且应小于20%;相对标准误差 $\delta$ 按式(C.61)计算,且应小于10%。

5.8.8 数据处理、解释与图件应符合下列要求:

1  $\gamma$ 总量测量的数据应整理绘制成剖面图、平面图或等值线图,可将高于测区背景值2倍的值作为异常,异常解释应注意人工土、土层厚度、气候、地形、放射性沉降物的影响。

2  $\gamma$ 能谱测量的各道数据及它们的比值数据应整理绘制成剖面图、平面图或等值线图,可将高于测区背景值而小于涨落误差的数值作为异常,应注意分析非铀矿产生的微弱异常。

3  $\alpha$  氡浓度测量应现场绘制剖面曲线， $^{210}\text{Po}$  和  $\alpha$  卡应测量出试样或  $\alpha$  卡的氡浓度并绘制剖面或平面曲线。

4 高于背景值 3 倍以上的数值为异常，如因覆盖层或水体覆盖、构造影响，数值未达背景值 3 倍以上，但高于底数 1.5 倍以上者，可确定为异常。

5 应注意灰岩地区的  $\alpha$  或  $\gamma$  射线强度常低于背景值。

6  $\gamma$ - $\gamma$  测量应计算测点或钻孔地层的密度或湿度，数据可根据情况列表或绘制曲线。

7 同位素示踪测量应计算所测孔段的地下水的水平流速和垂直流速、渗流方向、地层渗漏系数，绘制地下水流速流向图。

8 检测数据应列表或绘制曲线，将数据换算至国际标准单位，依据相关标准进行分析和评价。

## 5.9 综合测井

5.9.1 综合测井可选择电测井、声波测井、地震测井、自然  $\gamma$  测井、 $\gamma$ - $\gamma$  测井、温度测井、电磁波测井、雷达测井、井中流体测量、磁化率测井、超声成像测井、钻孔电视观察、井径测量、井斜测量等。

5.9.2 应用条件应满足下列要求：

1 电测井应在无套管、有井液的孔段测试，被探测目的层与上下层之间存在电性差异，且具有一定层厚。

2 声波测井应在无金属套管、有井液的孔段测试，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速度差异，且应具有一定层厚。

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应用。

5 超声成像测井宜在无套管、有井液的钻孔中应用。



6 井中流体测量应在无套管或有滤管、有井液的钻孔中应用。

7 电磁波或雷达测井、磁化率测井应在无金属套管的钻孔中应用，被探测目的体具有一定规模，与周边介质存在电磁差异。

### 5.9.3 仪器和设备应符合下列要求：

- 1 综合测井仪器传动装置的误差不大于 2%。
- 2 绝缘要求：
  - 1) 地面仪器线路之间及对地、绞车集电环对地、供电电源对地的绝缘应大于  $10\text{M}\Omega$ 。
  - 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  $2\text{M}\Omega$ 。
- 3 仪器精度要求：
  - 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  $0.5^{\circ}\text{C}$ ，热惯性小于 3s。
  - 5) 井斜测量在钻孔顶角大于  $5^{\circ}$  时，顶角测量误差小于  $0.5^{\circ}$ ，方位角测量误差小于  $5^{\circ}$ 。
  - 6) 地震波测井和声波测井的仪器设备应符合 5.4.3 和 5.5.3 的要求。
- 4 记录精度要求：
  - 1) 模拟综合测井仪器记录的曲线线迹宽度不超过 0.5mm，仪器本机噪声引起记录曲线的抖动宽度不超过 1mm。
  - 2) 数字综合测井仪器记录的采样间隔每 0.05m 不少于一个点。

### 5.9.4 现场测试准备工作应符合下列要求：

- 1 电缆长度标记要求：
  - 1) 新电缆使用前，宜在井中让电缆携带相当于井中仪器

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) 深度标记宜每隔10m做一个,对需要用1:50深度比例尺进行详测时,应每隔5m做一个,长度误差不得大于5%。

3) 每年或每测10口井应检查一次。

2 每个孔测井前,宜首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,应追加大比例尺的辅助记录。

4 应根据地质—物性资料或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,尽量选用大比例尺。

5 原始数据或曲线应准确地标记深度,并符合下列要求:

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;对没有零线的测井记录,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时,电缆的升降速度应保持恒定,升降速度的限度见表5.9.4。

7 井温、井液电阻率测井及钻孔电视观察宜在电缆下放时进行测试,其他测井方法宜在电缆提升时进行测试。

5.9.5 现场工作应符合下列要求:

1 电测井的电极距选择应根据任务要求和不同测区的地质—电性条件,经试验后确定。电流测井应尽量减少线路电阻及地面电极的接地电阻,并确保恒压供电,记录电流曲线时要检查确定增量方向。自然电位测井应采用不极化电极。使用金属重锤时,

测量电极应距重锤 2m 以上。

表 5.9.4 记录测井曲线电缆升降速度限度表

测井方法	升降速度 m/min		
	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、磁化率	5	3	2
钻孔电视观察、超声成像	以图像清晰为宜		

2 声波测井按 5.5 的要求。

3 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 $\gamma$ 干扰，在主要目的层段宜大于自然 $\gamma$ 平均幅值的 20 倍。

4 超声成像测井深度比例尺应依据岩层倾角的大小、被探测目的体规模（孔洞、裂隙、断层、软弱夹层）和观测精度确定。

5 钻孔电视观察的图像应对主要地质异常进行追踪观察，图像清晰可辨。

6 井中流体测量时，井壁宜冲洗干净。

7 井温测井应自井液面向下测试，进行多种方法测井时，井温测井应放在最先，防止井液搅动。

8 井径测量前后宜在井场校验仪器，至少应有 3 个不同直径的校验记录，误差不超过 5mm。

9 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。井斜测量的点距不宜大于 5m。井斜变化较大（顶角差大于  $2^\circ$ ；方位角差大于  $20^\circ$ ）时，应加密测点。

10 电磁波或雷达测井应根据地质条件和探测对象大小选择一个或多个频率进行测试。

#### 5.9.6 检查工作应符合下列要求：

1 井斜测量检查工作量应不小于 20%，其他测井方法检查工作量不小于 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 检查测量的曲线形态应与原测试曲线基本一致。

#### 5.9.7 记录存在下列缺陷之一者为不合格。

1 在目的层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、测速、深度比例、横向比例、检查观测工作量不符合本标准要求。

4 综合测井数据或曲线检查未满足 5.9.6 的要求。

#### 5.9.8 数据处理与解释应符合下列要求：

1 综合测井资料宜进行编辑、处理、解释几个步骤。模拟记录可进行数字化。

2 综合测井资料应根据各种测井曲线的分层特征，对不同参数曲线进行综合对比分析，并结合地质、钻探等有关资料，按物性和地质名称分层，确定地层或目的体的深度和厚度。

3 同一测区，地质条件相同时，应统一解释原则，对综合测井曲线中的异常都应作分析解释。

4 测试地层真电阻率宜采用横向测井（横向电测深）。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、井液电阻率及周边介质电阻率等的影响确定；在进行了侧向测井时，可根据侧向测井曲线并校正后求得。

5 对声波测井资料和  $\gamma$ - $\gamma$  测井资料的解释推断，应先宏观，把全孔划分为若干个声速或密度不同的大层，求得这些层的平均波速和平均密度值。在此基础上再分别研究各个异常，做出地质推断，划分出薄层。对厚度不足 30cm 的岩土层，只能根据测井

曲线估出波速或密度的大致范围。

6 钻孔电视观察或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 $5^\circ$ 的斜孔中计算这些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铅垂面上的投影图。

#### 5.9.9 综合测井图件应符合下列要求：

1 绘制综合测井解释成果图时，应对本标准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不大于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和声速、放射性、井液电阻率、温度、井径测井曲线，宜绘制在一张综合测井成果图上。超声成像宜贴在该图的钻孔测井柱状剖面栏旁。其他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测井曲线解释图上。

4 对地质剖面上有多个钻孔，或钻孔比较密集的测区，应在完成单个钻孔各自的测井解释图基础上，绘制整个剖面的物性—地质断面图。图中可选用少量具有代表性、对被探测地质目标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、对摄录的典型地质现象作出描述，宜计算断层、裂隙、软弱夹层的产状、厚度。

## 6 物探方法的综合应用

### 6.1 覆盖层探测

6.1.1 探测覆盖层各层厚度、基岩顶板起伏形态、天然建筑材料的储量、测试各层物性参数宜选择地震勘探、电法勘探、探地雷达、水声勘探、综合测井等。

6.1.2 方法选择和技术应符合下列要求：

1 宜在钻孔、竖井、基岩露头选用综合测井、孔旁电测深、弹性波测试等方法，测试基岩和覆盖层的物性参数，建立地层与物性参数的对应关系。

2 一个测区应根据物性条件和任务要求选用一种地面物探方法进行全面探测，宜同时在主要测线和地质条件较复杂的地段采用多种地面物探方法作综合探测。

3 覆盖层与下伏基岩符合 5.4.2 中 2 的条件，宜使用浅层折射波法。

4 覆盖层与下伏基岩符合 5.4.2 中 3 的条件，宜使用浅层反射波法。在反射波法的测区，宜布置一定量的其他物探方法和钻探，获取反射波法解释所需的参数。

5 覆盖层与下伏基岩符合 5.4.2 中 4 的条件，且要求详细分层、探测深度较浅时，可采用瑞雷波法，宜同时布置一定量的其他物探方法或钻探作对比分析。

6 覆盖层与下伏基岩存在电性差异，宜使用探地雷达法、高密度电法、瞬变电磁法、电测深法、可控源音频大地电磁测深法。

7 在水库、湖泊、浅海、港口、码头和水面较宽、水较深、水流较缓、沉积物粒径较小的河道探测水下地形、淤泥和砂层厚度时，宜采用水声勘探或地震映像。

6.1.3 资料解释应符合下列要求:

1 应分析计算整理物性测试资料,计算出基岩和覆盖层的电阻率、波速等参数,得出覆盖层与基岩的物性参数在垂直方向上的变化规律和物性层与地质层的对应关系。对不同地段进行的试验,应对比分析测区基岩和覆盖层的物性参数在水平方向的变化情况。

2 浅层地震折射资料应进行折射分层解释,计算各层厚度和层速度。浅层反射波法和探地雷达法资料解释宜根据基岩和层间反射波同相轴进行分层解释,用反射时间和层速度计算反射目的层厚度。

3 电测深、高密度电法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深资料解释应依据覆盖层与下伏基岩间的电性差异,对比孔旁电性剖面,进行电性分层和层厚度计算。

4 综合测井应依据覆盖层与下伏基岩在波速、电阻率、密度上的差异,对实测资料进行分层解释,计算层厚度、基岩埋深、各层物性参数。

5 采用综合方法探测的地段,应进行综合分析解释,得出各层位在不同方法下的物性分层依据。

6 当物性参数在水平方向变化时,宜分段解释和计算。

7 在窄河谷、深厚覆盖层的探测工作中,应注意旁侧基岩对靠近岸边的电测深和地震测线的旁侧影响。

8 应说明覆盖层厚度是否包括了基岩强风化带。

9 图件除应符合 5.1.8 的规定外,还包括覆盖层等厚度图、基岩面等高线图。当有条件进行覆盖层分层时,可绘制地层等厚度图和层面等高线图。

6.1.4 探测精度应符合下列要求:

1 地表探测条件有利并有少量钻孔可利用时,电法勘探和地震勘探探测覆盖层厚度的相对误差应小于 15%;条件较复杂时,应小于 20%。

2 水声勘探在水深小于 50m 时, 探测基岩埋藏深度的相对误差应小于 10%。

## 6.2 隐伏构造破碎带探测

6.2.1 探测隐伏构造破碎带的位置、规模及延伸情况, 测试构造破碎带物性参数宜选择电法勘探、地震勘探、探地雷达、层析成像、放射性测量和综合测井等。

6.2.2 方法选择和技术应符合下列要求:

1 当构造破碎带位于低阻覆盖层下、埋藏不深、呈现低阻异常时, 可选用联合剖面法、电测深法或高密度电法, 点距宜小于构造破碎带宽度的 1/2。

2 当构造破碎带位于高阻砂砾石层或崩塌堆积体下时, 可根据埋深情况选择瞬变电磁法、探地雷达、可控源音频大地电磁测深, 点距宜小于构造破碎带宽度的 1/2。

3 当构造破碎带中富集地下水时, 可采用激发极化法和电测深法综合探测。

4 探测构造破碎带深部的情况可选用可控源音频大地电磁测深法。

5 当构造破碎带已被钻孔揭露时, 可选用充电法、综合测井、弹性波测试等方法, 探测构造破碎带的走向、测试破碎带在钻孔上的宽度和物性参数。对于被施工揭露的构造破碎带, 可采用弹性波法测试其物性参数。

6 构造破碎带的位置、延伸情况可采用 CT 探测。

7 当构造破碎带有地下水活动且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。

8 探测宽度大于 3m 的隐伏构造破碎带, 可采用浅层折射波法的纵测线连续对比观测系统, 也可同时利用波的动力学特征探测宽度较小的断层破碎带, 但应使用相同的增益和扫描尺寸, 点距宜为 2m 左右。



9 探测上下盘具有一定垂直断距的构造破碎带,宜采用浅层反射波法,观测系统应选用水平多次叠加或等偏移,点距宜为2m~5m。

10 当构造破碎带具有较好的透气性和渗水性、能向地表释放放射性气体时,可采用放射性测量。

### 6.2.3 资料解释应符合下列要求:

1 联合剖面法的资料解释应根据曲线的低阻正交点异常轴走向推断构造破碎带的走向和平面位置,由低阻正交点两侧曲线的不对称性和大极距曲线正交点的偏移方向,判断构造破碎带的倾向。

2 高密度电法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法、电磁波 CT 的资料解释应根据 $\rho_s$ 断面图中低阻或高吸收异常的形态、范围,判断构造破碎带的位置、规模和延伸情况。

3 激发极化法资料解释应根据 $J_s$ 、 $\eta_s$ 、 $D_s$ 的差异判断构造破碎带是否含水;应将碳质岩层和金属矿体等产生的干扰异常与含水异常区分开。

4 浅层折射波法应解释计算隐伏构造破碎带的埋深、宽度。当 $\theta(x)$ 曲线出现局部错断、界面速度下降30%,且伴随有波的振幅减小、视周期增大和波形畸形等特征时,可解释为构造破碎带,对应的测线段长度为破碎带视宽度。

5 浅层反射波法和探地雷达的资料解释应根据反射波形图中反射同相轴错断、反射波振幅减小、出现波的置换等特征,解释构造破碎带,并根据反射同相轴时间、错断时差和层速度计算埋深、断距。

6 当隐伏构造破碎带的上覆层厚度较薄时,自然电场、激电参数和放射性强度的异常幅值大于正常场的1.5倍,且成条带状分布时,可推断为断层破碎带。

7 综合测井和弹性波测试资料应根据构造破碎带的波速、电阻率、密度、放射性与周边介质的差异进行分析解释,计算物性

参数。

8 应综合分析多条测线上的异常和地质资料,确定隐伏构造破碎带的延伸情况。

9 图件除应符合 5.1.8 的规定外,还应包括测区范围内隐伏构造破碎带的平面分布图。

#### 6.2.4 探测精度应满足下列要求:

测区内具备有利地形及物性条件时,当覆盖层厚度小于 10m 时,应能查明不小于 2m 宽度的构造破碎带;当覆盖层厚度在 10m~20m 时,应能查明不小于 3m 宽度的构造破碎带;当覆盖层厚度大于 20m 时,应能查明宽度大于 1/5 覆盖层厚度的构造破碎带。用 CT 方法探测构造破碎带,应能查明宽度大于 1/5 孔距的构造破碎带。

### 6.3 软弱夹层探测

6.3.1 探测软弱夹层的位置和厚度、测试软弱夹层的物性参数可选择综合测井、弹性波测试等。

#### 6.3.2 方法选择和技术应符合下列要求:

1 在钻孔中探测软弱夹层,应根据条件和要求,选用两种以上测井方法。当软弱夹层的厚度不足 20cm 时,电缆的升降速度应使软弱夹层异常明显。

2 当探测孔段有套管时,应选择自然 $\gamma$ 测井、 $\gamma$ - $\gamma$ 测井。

3 当探测孔段为干孔或孔液较清且无套管时,宜增加钻孔电视观察;当探测孔段孔液不透明且无套管时,宜增加超声成像。

4 使用植物胶钻进时,不宜采用电测井。

5 平洞、竖井中的软弱夹层探测应选用声波法。

#### 6.3.3 资料解释应符合下列要求:

1 综合测井资料解释应根据软弱夹层与周边介质之间波速、电阻率、密度、渗透性、自然 $\gamma$ 强度的差异,对比同一位置上的多种测井曲线进行分析解释。可通过钻孔电视观察了解软弱夹层

的产状、厚度。

2 可利用声波纵波速度、横波速度、密度计算软弱夹层的动力学参数。

3 应对比分析相距较近的多个钻孔或平洞中的软弱夹层的位置、厚度，整体评价测区内软弱夹层的发育和分布情况。

4 图件除应符合 5.1.8 的规定外，还应包括钻孔综合测井成果图、平洞或竖井声波测试曲线、录像带、有关软弱夹层位置、厚度及物性参数统计表等。

#### 6.3.4 探测精度应满足下列要求：

1 当钻孔直径小于 100mm、孔壁较完整，且夹层倾角小于  $30^\circ$  时，对软弱夹层厚度的探测精度要求如下：

- 1) 钻孔电视观察不应遗漏厚度大于 1mm 的软弱夹层，当软弱夹层厚度在 20mm 之内时，测试厚度误差应小于 3mm。
- 2) 微电极系测井、超声成像测井不应遗漏厚度大于 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 根据钻孔电视观察或超声成像测试软弱夹层的倾角误差应小于  $5^\circ$ ，倾向误差应小于  $10^\circ$ 。

### 6.4 岩体风化、卸荷带探测

6.4.1 探测岩体风化带厚度、岩体卸荷带深度，评价岩体风化程度，进行岩体风化分带宜选择电法勘探、地震勘探、探地雷达法、层析成像、弹性波测试、综合测井等。

6.4.2 方法选择和技术应符合下列要求：

1 当基岩表面无覆盖层或覆盖层较薄时，可选用探地雷达法、浅层折射波法。

2 当基岩表面具有一定厚度的覆盖层、风化界面起伏不大、

各风化带物性差异明显时，可选用浅层折射波法、电测深法、高密度电法。

3 当覆盖层和风化带较厚时，宜选择浅层反射波法或浅层折射波法。

4 探测岩体风化带的电测深测线较稀时，宜进行一定数量的十字测深或环形测深。

5 详细探测岩体局部不规则风化情况，宜采用层析成像。

6 当具有钻孔、竖井时，宜采用综合测井或弹性波测试。

7 探测岩体卸荷带，宜在平洞和竖井内采用弹性波法。声波测试的钻孔或连续地震波速测试位置宜在洞壁同一高度，测试孔应保持平行或共面，且深入洞壁 2m。

#### 6.4.3 资料解释应符合下列要求：

1 应分析钻孔、竖井的综合测井或弹性波测试资料，根据风化带波速、电阻率、密度等由地表向下呈现由低到高渐变或突变的规律，进行风化分带，确定各风化带及界面的物性参数值。

2 使用浅层折射波法进行风化分带，应计算各层厚度和波速。使用浅层反射波法和探地雷达进行风化分带，应估算风化带厚度。使用层析成像、电测深法、高密度电法进行风化分带，应圈定局部风化的范围。

3 分析风化带的变化规律时，应充分考虑岩性、断层破碎带、卸荷裂隙带等因素的影响。

4 岩体风化带按 5 级分类法，划分风化带的风化波速比  $K_w$  的标准按表 6.4.3 的要求。

表 6.4.3 岩体风化分带表

风化带	新鲜	微风化	中等(弱)风化	强风化	全风化
风化波速比	$K_w = 1.0$	$1.0 > K_w \geq 0.8$	$0.8 > K_w \geq 0.6$	$0.6 > K_w \geq 0.4$	$K_w < 0.4$

5 图件除应符合 5.1.8 的规定外，还宜包括岩体风化带等高

线图或等厚度图、平洞岩体风化、卸荷带划分成果图等。

6.4.4 当有钻孔、平洞、探坑的物探资料可以利用时，地表下岩体风化带的厚度探测误差应小于 20%；当无钻孔资料可利用或测区地形、地质物性条件较差时，深度误差应小于 30%。

## 6.5 滑坡体探测

6.5.1 探测滑坡体分布范围、厚度、分层情况、滑床起伏形态、滑坡体内部含水层或富水带、测试滑坡体物性参数宜选择地震勘探、电法勘探、综合测井等。

6.5.2 方法选择和技术应符合下列要求：

1 测线应主要沿滑动方向呈扇形布置，也可布置少量垂直滑动方向的横测线。

2 在滑坡体的钻孔中宜进行综合测井。

3 当滑坡体以黏土、粉土、砂土和碎石土为主要成分，可选择浅层折射波法、浅层反射波法、瑞雷波法。

4 当滑坡体组成物粒径较大且结构松散时，可选择可控源音频大地电磁测深、电测深、高密度电法、浅层折射波法、瑞雷波法。

5 探测滑坡体地下水可选用激发极化法、电测深、高密度电法或可控源音频大地电磁测深法。

6.5.3 资料解释应符合下列要求：

1 综合测井资料应进行分层解释，计算各层参数。

2 浅层折射波法的资料应进行分层解释，计算出滑坡体波速和滑床波速、滑坡体厚度，确定滑动面。浅层反射波法资料应进行反射分层解释，依据其他地震或声波资料计算层厚度。瑞雷波法资料应进行波速分层解释。

3 电测深、高密度电法和可控源音频大地电磁测深法资料应依据电测井资料进行电性分层，计算出各电性层的厚度，确定滑动面。电测深法、高密度电法、激发极化法资料还应解释出滑坡

体内含水层和富水带的情况。

4 探测顺层滑坡体的综合测井资料宜解释出软弱滑动带的位置、厚度，计算滑动带的物性参数。

5 图件除应符合 5.1.8 的规定外，还包括滑坡体等厚度图、滑动面等高线图。

6.5.4 滑坡体厚度或深度探测相对误差应小于 15%；条件复杂时，应小于 20%。

## 6.6 喀斯特探测

6.6.1 探测喀斯特洞穴、溶沟和溶槽等现象的分布、埋深、规模、延伸情况、洞穴充填情况宜选择电法勘探、探地雷达、地震勘探、层析成像、综合测井、地温法等。

6.6.2 方法选择和技术应符合下列要求：

1 当基岩裸露时，可选用探地雷达、瞬变电磁法、浅层反射波法。

2 当覆盖层较薄时，可选用电剖面法、瞬变电磁法、高密度电法、浅层折射波法、浅层反射波法、瑞雷波法。

3 当地表覆盖层较厚时，可选用可控源音频大地电磁测深法。

4 探测隧洞及钻孔周围较近的喀斯特可采用探地雷达。

5 详细探测喀斯特的位置、规模、延伸、充填情况可采用 CT 探测。

6 探测孔壁地层溶蚀情况、暗河或泉水在钻孔中的位置、喀斯特地下水位等可采用综合测井。

7 探测泉水和暗河在地表以下的出口位置可选用地温法或红外热成像。

6.6.3 资料解释应符合下列要求：

1 电剖面、瞬变电磁、电磁波 CT、可控源音频大地电磁测深等资料宜根据未充填型喀斯特洞穴呈现高电阻、低吸收的异常

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，得出喀斯特的分布、规模和埋深。

2 浅层地震折射波、弹性波 CT 和弹性波穿透资料宜根据喀斯特洞穴的低波速、透射波能量较弱的特点进行解释，得出喀斯特的分布、规模和埋深。

3 浅层地震反射、雷达探测的资料宜根据喀斯特洞穴的双曲线反射特征，解释喀斯特的分布、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情况。

5 宜根据喀斯特在温度、电性、波速、密度及电视图像上的特点解释测井资料。

6 地温探测和红外热成像资料宜根据水温变化幅度、范围进行解释。

7 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。

8 图件除应符合 5.1.8 的规定外，还包括喀斯特平面分布图。

6.6.4 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不低于 90%；当覆盖层较薄、洞穴规模大于埋深的 1/10 时，地表探测的有效率不低于 70%。

## 6.7 地下水探测

6.7.1 宜选择电法勘探、地震勘探、放射性测量、综合测井等探测地下水，探测内容包括：

- 1 划分含水层和隔水层，查明埋藏情况。
- 2 探测地下水位、流速流向、渗透速度。
- 3 划分咸淡水界线，圈定地下水污染范围或监测地下水污染。

6.7.2 方法选择和技术应符合下列要求：

1 当有钻孔时，可采用自然电场法、充电法、同位素示踪法、综合测井等。

2 探测覆盖层中的含水层应以探测砂砾石层为目的层,可选用电法勘探或地震勘探,探测目的层中的富水情况可采用电测深法和激发极化法。

3 探测基岩中的含水层(带)可选用电法勘探、地震勘探、放射性测量。探测含水层(带)内的富水情况宜选用激发极化法和电测深法。

4 探测潜水面、隔水层,可选用电测深法、地震勘探、激发极化法、可控源音频大地电磁测深法等。

5 探测地下水流速流向、渗透速度可选用自然电场法、充电法、同位素示踪等。

6 探测第四系地下水的咸水与淡水分布、圈定和监测地下水污染可选用电阻率法、激发极化法。划分多层地下含水层中咸水与淡水的界线,可采用综合测井。

### 6.7.3 资料解释应符合下列要求:

1 应结合水文地质测绘、钻探等资料,绘出探测区内典型含水层的地质物性剖面或典型曲线图。

2 自然电场法、充电法、同位素示踪资料应解释计算含水层和隔水层的深度、厚度、地下水位、流速流向、渗透速度。

3 探测含水目的层的电法勘探、地震勘探应解释计算含水目的层的平面位置、范围、埋深,电测深和激发极化法应解释地下潜水面的位置、富水情况,并提出钻孔孔位和孔深建议。

4 进行防渗勘探,应依据含水层和隔水层的物性差异解释含水层和隔水层的空间分布、层厚、连续性、潜水面深度,计算透水层和隔水层的相关水文地质参数。

5 探测咸淡水分界线和监测地下水污染时,应计算孔隙水的电阻率,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 图件除应符合 5.1.8 的规定外,还包括测试的各项参数图表。



6.7.4 条件有利时，地面探测含水目的层厚度和深度、潜水面深度的相对误差应小于 20%。

## 6.8 防渗线探测

6.8.1 宜选择层析成像、高密度电法、瞬变电磁法、探地雷达、可控源音频大地电磁测深法、综合测井、同位素示踪探测防渗线上的洞穴、断层破碎带、裂隙透水带等渗漏隐患和透水地层、相对隔水地层的分布情况，测试防渗线（区）分布地层的水文地质参数。

6.8.2 方法选择和技术应符合下列要求：

- 1 可利用防渗线上的勘探排孔、灌浆先导孔进行层析成像。
- 2 当有多层平行的灌浆廊道时，可在相邻灌浆廊道间进行层析成像。

- 3 当没有灌浆廊道或勘探排孔时，可按下列要求进行地面探测：

- 1) 基岩裸露时，宜选择探地雷达、瞬变电磁法探测。
- 2) 覆盖层较薄时，宜选用高密度电法、瞬变电磁法探测。
- 3) 覆盖层较厚时，宜选用可控源音频大地电磁测深法探测。

- 4 测试防渗线上地层的水文地质参数可选择综合测井和同位素示踪。

6.8.3 资料解释应符合下列要求：

- 1 应解释防渗线上渗漏隐患的性质、位置、规模，得出渗漏地层和相对隔水地层的分布情况。

- 2 应依据洞穴、断层破碎带、裂隙透水带等渗漏隐患和透水地层的电阻率、波速、吸收系数的特点进行解释，计算地层的水文地质参数。

- 3 可根据渗漏隐患、渗漏地层和相对隔水地层的分布情况给出防渗深度及防渗范围的建议。

4 图件应符合 5.1.8 的规定。

6.8.4 探测洞穴精度应满足 6.6.4 的要求，探测隐患规模和埋深应符合 6.7.4 的要求。

## 6.9 岩体质量检测

6.9.1 进行岩体质量分级、探测建基岩体松弛圈厚度和目的体的空间分布、确定可利用岩体高程、评价和复核已开挖的建基岩体质量等宜选择弹性波测试、地震波折射法、层析成像、探地雷达、钻孔变形模量等。

6.9.2 方法选用和技术应符合下列要求：

1 岩体质量检测宜选用单孔声波和穿透声波法。

- 1) 应根据工程部位、地质情况、施工进度将需检测的坝基等基础面划分成多个检测单元。
- 2) 检测孔应按单元分组布置，每一单元宜根据岩性和构造情况布置多组钻孔，钻孔宜深入设计基础面高程 5m 以下。
- 3) 爆破松弛层厚度检测宜在同一孔位的爆破前后进行。
- 4) 宜选择能代表各类岩体的钻孔和孔段，进行声波速度与钻孔变形模量原位对比试验。

2 当基础开挖到位、全面清基后，建基面检测可选用连续地震波速测试、浅层折射波法和探地雷达法等。

- 1) 宜在建基面上的每个施工单元布置测网，测线间距宜为 5m~10m，点距 1m~2m。
- 2) 当建基面无松弛层或松弛层较薄时，宜采用连续地震波进行检测。
- 3) 当建基面松弛层较厚时，宜采用浅层折射波法。
- 4) 探测建基面以下一定范围内的喀斯特、不良构造带在建基面附近的分布情况和规模宜采用探地雷达法。

3 在局部地质构造发育较复杂的区段可采用层析成像。

6.9.3 资料解释应符合下列要求:

1 宜由设计、监理和检测方依据设计要求、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 检测资料宜包括松弛层厚度、建基面附近岩体质量分级、不良岩体分布情况、建基岩面高程等。

3 应分析比较单孔和穿透声波速度曲线的形态和变化特征,确定岩体质量在垂直和水平方向的变化情况;同时宜分析岩体质量的变化与地层岩性、结构构造、风化卸荷等因素的关系。

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

5 按施工单元、深度和水平范围对波速值进行统计分析,计算岩体完整性系数,得出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。

6 连续地震波速测试应计算相应的地震波速度,也可计算建基岩体的相关动力学参数。应给出声波和地震波速度的对应关系。

7 浅层地震折射波资料可进行分层解释,确定松弛层厚度,计算松弛层和非松弛层波速、完整性系数。

8 CT 成像资料应得出地质构造在 CT 断面内的形态和延伸规模,也可依据波速分布情况确定岩体质量分布。

9 雷达资料应得出建基面以下一定范围内喀斯特、不良地质构造等的分布情况。

10 图件应符合 5.1.8 的规定和下列要求:

1) 波速等统计分析图表。

2) 声波和地震波速度相关关系曲线图。

3) 检测或查明的岩体质量、不良地质构造等的分布图。

6.9.4 建基岩体松弛层厚度、目的体空间位置的相对误差应小于 10%,波速的相对误差应小于 5%。

## 6.10 隧洞施工掌子面超前预报

6.10.1 探测隧洞掌子面前方断层破碎带、喀斯特洞穴、地下水富集区等宜选择浅层反射波法、探地雷达法等。

6.10.2 方法选用和技术应符合下列要求：

1 当预报范围较大、掌子面不可利用、被探测体为具有一定规模反射面时，宜采用浅层反射波法。

1) 可根据地质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，接收或震源点间距宜为 2m~5m，收发点应沿隧洞轴线方向布设在掌子面后方的侧壁或底面上，一发多收的震源点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 2m~5m，一侧激发另一侧逆序接收。

2) 检波器应满足所使用的仪器系统的技术要求，采用钻孔安置。震源应采用孔内爆破方式。

3) 地震仪主要参数应满足预报要求。检波器宜采用三分量检波器，灵敏度、频率范围应满足预报要求。

2 当预报范围较近、掌子面可利用时，宜选用探地雷达法。

1) 应以掌子面为中心，在掌子面上布置多条剖面。

2) 探地雷达应根据条件和探测范围选择天线。

3 对于较复杂的隧洞洞段，宜综合采用浅层反射波法和探地雷达法。

6.10.3 资料解释应符合下列要求：

1 隧洞超前预报应收集分析勘测设计阶段隧洞沿线的岩性分布、地质构造、水文地质等资料，以及隧洞施工地质资料。

2 纵排列法观测系统的资料应采用负视速度法解释，准确识

别隧洞掌子面前方异常体的反射波，依据反射路径与入射路径相反，入射波的时距曲线具有正速度，而反射波的时距曲线具有负视速度的特征，确定异常体的界面位置，也可根据反射波的相位和振幅特性，确定异常体的性质。

3 浅层反射波法的横排列法观测系统资料和探地雷达资料应根据反射波界面形态和特征，确定异常体的性质和前方位置。

4 应绘制预报成果图，并符合 5.1.8 的规定。

6.10.4 在条件有利的情况下，预报准确度应不低于 80%。

### 6.11 洞室松弛圈探测

6.11.1 了解洞室周边介质应力状态、探测洞壁岩体的松弛厚度、测试松弛岩体及未松弛岩体的力学参数可选择单孔声波法、穿透声波法、层析成像、浅层折射波法、瑞雷波法等。

6.11.2 方法选用和技术应符合下列要求：

1 应根据洞室地质条件和功能，选择一个或多个具有代表性的洞段作横断面或纵剖面测试。

2 可采用单孔声波和穿透声波法。

1) 横断面测试的钻孔宜布置在同一断面且沿洞径方向，每断面宜布置 6 孔~8 孔，在洞顶、起拱处(或顶角)、腰墙处宜有钻孔，孔深应根据洞室大小确定，一般为 3m~15m。

2) 大跨度、高边墙的洞室可沿岩锚梁底座等重要受力部位的底座布置纵剖面或横断面声波孔，顶拱和腰部钻孔应加密。

3) 穿透声波的孔距宜为 2m~3m，较深的钻孔应测斜。

3 当洞室较大时，可沿洞室边墙、底板采用浅层折射波法或瑞雷波法。

4 地下洞室群间的岩墙可采用地震层析成像。

6.11.3 资料解释应符合下列要求：

1 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断面内呈现规律性的分布特点,划分松弛圈和应力突变界线。

2 浅层折射波法和瑞雷波法资料应进行分层解释,确定松弛层厚度,计算松弛层和非松弛岩体波速。

3 地震层析成像资料应解释岩墙内松弛层的分布情况。

4 成果图件应符合 5.1.8 的规定,断面或剖面成果图应包括波速曲线形态、松弛分层界线、应力突变界线。

6.11.4 划分松弛层厚度的相对误差应不大于 15%。

## 6.12 灌浆效果检测

6.12.1 检测灌浆前后岩土体力学参数、完整程度和灌浆对防渗能力的改善情况宜选择弹性波测试、层析成像、钻孔变形模量、钻孔电视观察、同位素示踪等。

6.12.2 方法选用和技术应符合下列要求:

1 灌浆效果检测应从试验阶段开始,试验阶段宜采用多种检测方法。

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

3 固结灌浆效果检测应选用单孔声波、穿透声波、弹性波 CT,也可采用钻孔变形模量、钻孔电视观察。

4 检测孔或剖面布置应符合下列要求:

1) 灌浆试验区的全部钻孔宜按施工工序进行单孔声波检测,宜同时选择多个钻孔进行跨试验区中心的穿透声波或 CT 检测。

2) 灌浆施工检测抽样孔数量应不少于灌浆孔总数的 5%。

3) 一个单元内至少有一组检测孔,在断层、岩体破碎、裂隙发育、强喀斯特等条件复杂的部位应有检测孔。

4) 钻孔偏斜过大、灌浆过程不正常、末序孔注入量大、

经分析资料认为可能对灌浆质量有影响的部位应有检查孔。

5 进行灌浆前后对比检测的穿透声波、CT 宜保持孔位不变，CT 的观测系统和处理技术应相同。

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

### 6.12.3 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，选用灌前灌后对比分析法、灌后达标分析法或现象描述法等评价灌浆效果。

1) 对比分析法应对比同一位置灌前和灌后的检测数据，计算提高率或提高量，对比分析应注意混凝土盖重的影响。

2) 达标分析法应将灌浆单元内灌后的检测数据与施工设计要求的达标值进行比较，并统计分析。

3) 层析成像应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。钻孔电视录像观察应描述灌浆后构造破碎带、岩体张开裂隙、喀斯特的灌浆充填情况。

4) 同位素示踪资料应计算出地下水渗透速度、流向。

2 宜建立波速与变形模量的相关关系。

3 图件应符合 5.1.8 的规定，包括检测成果图、统计分析图。

6.12.4 波速的相对误差应不大于 5%。

## 6.13 防渗墙质量检测

6.13.1 检测防渗墙深度、缺陷、均匀性及渗透性宜选择层析成像、弹性波测试、探地雷达法、浅层反射波法、同位素示踪法、高密度电法、可控源音频大地电磁测深法等。

6.13.2 方法选用和技术应符合下列要求：

1 测线或剖面应沿墙中轴线布设，测点间距应根据检测方

法、防渗墙类型、设计要求综合考虑。

2 当检测墙体深度较浅时,可选用探地雷达、浅层反射波法、高密度电法;当检测墙体深度较深时,可采用可控源音频大地电磁测深法;当详细检测局部墙体缺陷时,可采用层析成像;测试墙体物理力学参数可采用弹性波测试。

3 检测防渗墙渗漏性宜采用同位素示踪法,钻孔宜布在物探异常或有压力差的部位,测试段应选在地下水位以下,土层中的钻孔应采用花管护壁。

### 6.13.3 资料解释应符合下列要求:

1 物探资料应根据探测剖面内防渗墙的物性参数分布情况确定墙体深度、均匀情况。出现下列几种情况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、低速、高吸收系数。
- 3) 浅层反射波法和探地雷达剖面局部呈现出早于墙底的反射信号或反射图像不连续。

2 同位素示踪应计算出墙体渗透速度和方向。

3 应绘制防渗墙缺陷分布图、墙体深度剖面图、测试参数图表。

## 6.14 堆石(土)体密度及地基承载力测试

6.14.1 检测堆石(土)体密度宜选择附加质量法、瑞雷波法、 $\gamma$ - $\gamma$ 法等,也可采用附加质量法测试地基承载力。

6.14.2 方法选用和技术应符合下列要求:

1 当堆石(土)体分层碾压施工、粒径较大、堆石(土)体成分相对均一时,宜选用附加质量法或瑞雷波法。

2 一个工区测试前,应分别对不同类型的堆石料进行密度坑



测试与附加质量或瑞雷波密度测试率定试验。试验时应同一点先进行附加质量或瑞雷波密度测试，后进行坑测试，同一类型的测区试验不少于 5 组。

3 附加质量法的仪器设备应满足下列要求：

- 1) 激振器可选用 50kg 铁块，自由落锤激振。
- 2) 宜选用速度型检波器，其灵敏度优于 250mV/cm/s，频带宽度 10Hz~120Hz。
- 3) 仪器频带 2Hz~2kHz、采样间隔 0.05ms~2ms、增益不低于 60dB、采样点数不少于 1024 个。
- 4) 承压板宜选用圆形或方形，厚度与边长或直径的比不小于 0.02 的钢板，承压板边长或直径不宜大于被检测层的厚度，且不宜小于堆石体最大粒径。
- 5) 附加质量块宜采用标准计量的铸铁块。

4 附加质量法的测试应符合下列要求：

- 1) 堆石（土）体密度的检测中，当被检测层的厚度大于介质最大粒径的 4 倍时，应将承压板中心对准被检测点中心；当被检测层的层厚度小于介质最大粒径的 4 倍时，应以测点为中心，检测 2 次~4 次。承压板下应铺 20mm~30mm 粗砂找平。
- 2) 应将拾振器用粘合剂粘设在承压板中心，激发点应设在承压板外侧 0.2m 左右。
- 3) 附加质量不少于 4 级，等差质量，质量级差的大小应以保证各级的自振频率的变化值大于 1Hz。
- 4) 波速测试应在测点处布置成十字交叉，偏移距与道间距相等，检波点数宜采用多道，测线长度为承压板边长或直径的 1 倍~2 倍。

5 瑞雷波法应使用适当频率的检波器及震源，能有效检测出碾压层内部及层间的波速，每一个测点的测量次数不少于 3 次，且 3 次测量的波速误差不大于 5%。

6 当堆积体碾压层较薄时,可采用 $\gamma$ - $\gamma$ 散射法测试;当堆积体碾压层较厚时,可在表面打孔,采用 $\gamma$ - $\gamma$ 直接透射法,也可采用 $\gamma$ - $\gamma$ 测井。

6.14.3 资料解释应符合下列要求:

1 附加质量法资料处理应按照下列步骤进行:计算率定系数、求取每一级附加质量对应的共振频率、绘制拟合  $D-\Delta m$  曲线、计算参振质量、计算波长、计算密度或承载力。测点密度计算可选用直接求解法、 $k-\rho$ 相关法、衰减系数法。

2 瑞雷波资料应计算瑞雷波速度,再利用试验标定的系数计算密度。

3  $\gamma$ - $\gamma$ 法应计算出堆积碾压层的密度和湿度。

4 应将测试的密度值按位置绘制点位图、曲线或列表。

6.14.4 密度值测试相对误差应不大于5%。

## 6.15 堆石坝面板质量检测

6.15.1 检测面板脱空、面板内部缺陷、面板强度宜选择声波法、探地雷达、红外热成像、超声回弹综合法等。

6.15.2 方法选用和技术应符合下列要求:

1 面板检测宜布置测线网,线距宜为1m~5m,点距宜为0.2m~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 普查面板脱空情况可采用红外热成像。探测面板脱空和内部缺陷情况可采用声波反射法。当面板内没有钢筋或配筋较少时,也可采用探地雷达法。探测面板表面裂缝宜选用表面声波法或穿透声波法。

3 检测面板混凝土强度可选用超声回弹综合法或声波法。

4 宜布置一定数量的钻孔,验证物探异常点。

5 声波法检测面板缺陷可按 CECS 21 的规定,超声回弹综合法检测面板强度可按 CECS 02 的规定,回弹法检测面板抗压强

度可按 JGJ/T 23 的规定。

6.15.3 资料解释应符合下列要求：

- 1 应结合面板的设计和施工资料，综合分析物探异常，进行定性和定量解释。
- 2 红外热成像的温度异常应有其他方法的详查资料。
- 3 应区分雷达图像中面板内部钢筋、缺陷、脱空等异常。
- 4 声波反射法应综合分析反射信号的相位、频率、振幅和衰减等特征，确定脱空与缺陷位置。
- 5 应绘制面板缺陷分布图、强度分布图。

6.15.4 面板脱空位置和内部缺陷位置的检测相对误差应小于 20%；检测面板抗压强度的波速相对误差应小于 5%。

## 6.16 混凝土质量检测

6.16.1 检测混凝土强度、缺陷和配筋宜选择声波法、超声回弹综合法、回弹法、声波 CT、钻孔电视观察、探地雷达等。

6.16.2 方法选用和技术应符合下列要求：

- 1 可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) 具有对应临空面的混凝土宜选用穿透声波法、声波 CT 法、超声波回弹法。
  - 3) 大体积混凝土宜采用表面声波法，当条件允许时，也可选用单孔声波法、穿透声波、声波 CT 法或超声回弹综合法。
- 2 混凝土缺陷检测宜包括空洞、裂缝、不密实区等。
  - 1) 检测混凝土裂缝可采用表面声波法，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。
  - 2) 探测混凝土内部缺陷可选用声波 CT 法、声波反射法或探地雷达法。

3 超声回弹综合法检测混凝土强度可按 CECS 02 的规定, 声波法检测混凝土缺陷可按 CECS 21 的规定, 回弹法检测混凝土抗压强度可按 JGJ/T 23 的规定。

4 混凝土内配筋检测宜采用探地雷达法。

6.16.3 资料解释应符合下列要求:

1 混凝土强度检测:

- 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) 可以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:

- 1) 表面声波法应对比分析计算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、主频等的变化情况确定计算裂缝深度。
- 2) 穿透声波和声波 CT 资料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, 解释缺陷的性质、位置和规模。应注意区分探地雷达的混凝土内部配筋异常和缺陷异常。

3 混凝土内钢筋检测:

- 1) 应从雷达图像中解释计算出钢筋的位置、埋深。
- 2) 采用雷达进行配筋结构检测时, 宜进行三维处理。

4 成果图件宜包括强度分布图、缺陷分布图、裂缝分布图等。

6.16.4 检测精度应符合下列要求:

- 1 混凝土强度检测的波速测试相对误差应小于 5%。
- 2 裂缝、缺陷的深度和范围检测的相对误差应小于 10%。
- 3 检测混凝土配筋位置的误差应小于 2cm。

## 6.17 洞室混凝土衬砌质量检测

6.17.1 检测衬砌厚度、脱空情况、衬砌缺陷、衬砌强度宜选择声波法、超声回弹综合法、声波 CT、探地雷达等。

6.17.2 方法选用和技术应符合下列要求：

1 当洞室衬砌配筋较少时，宜采用探地雷达检测衬砌厚度、脱空、内部缺陷等情况。

2 当洞室衬砌配筋较密时，可选用声波反射法、回波法或瑞雷波法检测衬砌厚度、脱空、内部缺陷等情况。重要的异常部位宜选用孔间声波 CT 或穿透声波法。

3 检测衬砌强度按 6.16 的要求。

4 测线宜布置在顶拱、起拱处和两侧腰，异常段应加密检测。

5 可布置一定数量的钻孔，验证物探异常和衬砌厚度。

6.17.3 资料解释应符合下列要求：

1 探地雷达法和声波反射法资料依据波的反射特征，进行分层和异常识别。

2 回波法资料依据回波频率或共振频率计算分析衬砌厚度和内部缺陷情况。

3 图件应包括缺陷分布图、衬砌强度分布图、衬砌厚度剖面图。

6.17.4 检测衬砌缺陷范围和衬砌厚度的相对误差应小于 15%，衬砌强度检测的波速相对误差应小于 5%。

## 6.18 钢衬与混凝土接触状况检测

6.18.1 检测钢衬与混凝土接触状况宜选择回波法和 $\gamma$ - $\gamma$ 散射法。

6.18.2 检测方法与应符合下列要求：

1 回波法接收传感器频宽宜为 10Hz~2MHz，速度型传感器灵敏度宜大于 250mV/cm/s。

2 回波法检测前,应进行脱空厚度率定试验,建立回波频率与脱空厚度的相关关系和率定系数。

3 测点处的钢衬表面应除锈、光滑,传感器与钢衬耦合良好,宜采用高频激振,保持激振能量稳定。

4 每个测点应测试三次,三次波形和频谱应基本相同。

5 测线宜布置在钢管的顶、腰及底部,底部测线应布置 3 条~5 条,测点间距宜为 0.2m~0.5m。

6  $\gamma$ - $\gamma$  散射法检测按 SL275 的要求。

### 6.18.3 资料解释应符合下列要求:

1 回波法应对比实测和试验的波形及回波主频值,确定是否脱空,依据回波频率值和率定系数计算脱空厚度。

2  $\gamma$ - $\gamma$  散射法应通过计算钢衬与回填层综合密度和含水率分析判断脱空情况。

3 应绘制脱空范围、脱空厚度图表。

6.18.4 检测钢衬与混凝土脱空情况的有效率不低于 95%,检测脱空厚度相对误差应小于 25%。

## 6.19 锚杆质量检测

6.19.1 检测锚杆长度和砂浆密实度宜采用声波反射法。

6.19.2 检测技术应符合下列要求:

1 检测抽样率不宜少于锚杆总数的 10%,且不少于 10 根。若检测不合格的数量超过抽检总数的 20%,应对余下的全部锚杆进行检测。

2 工程的重要部位、地质条件较差部位、锚杆施工较困难的部位应加密检测。

3 宜在地质条件相同、施工工艺相近的工区制作一定数量的试验锚杆,进行试验检测。

4 现场检测应符合下列要求:

1) 现场检测可选择端发端收、侧发侧收或端发侧收,锚

杆外露长度宜为 0.3m，杆头宜平整、无浮浆。有挂网或喷射混凝土层时，宜将其与检测的锚杆分开。

2) 每一锚杆应重复测试 3 次，3 次信号应基本一致。

5 仪器设备应符合下列要求：

1) 接收仪器宜具有浮点放大功能，增益大于 60dB，频带宽 10Hz~5000Hz，采样间隔 0.5 $\mu$ s~1000 $\mu$ s。

2) 振源频带宽、短余振、可控。

3) 接收传感器频带宽度为 10Hz~10kHz，速度型传感器灵敏度大于 250mV/cm/s，加速度传感器灵敏度大于 1000pC/g，短余振。

6.19.3 资料解释应符合下列要求：

1 检测资料应依据波的反射信号、频率、振幅等进行处理和分析，计算出锚杆长度、砂浆密实度及缺陷位置。

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 宜对比分析实测锚杆和试验锚杆的波形信号、频率特征，判断锚杆的锚固质量。

4 应根据工程设计要求确定评价标准，凡锚杆长度或砂浆密实度不满足要求的均属不合格。

5 检测成果宜包括锚杆长度和砂浆密实度的评价分析图表，及典型波形曲线。

6.19.4 锚杆长度小于 10m 时，检测长度相对误差应小于 5%；锚杆长度大于 10m 时，检测长度相对误差应小于 10%。存在单个缺陷时，检测砂浆密实度误差应小于 10%；存在多个缺陷时，应小于 20%。

## 6.20 水下建筑物缺陷观察

6.20.1 观察水下闸门、大坝面板、大坝、消力池、护坡等水工建筑物的表面破损情况宜采用水下电视观察。

### 6.20.2 方法选用和技术应符合下列要求：

1 水下电视观察可选用专用水下摄像设备，仪器应满足下列要求：

- 1) 应为彩色摄像机。
- 2) 仪器电源宜为低压直流。
- 3) 水下仪器防水大于 20MPa。
- 4) 摄像探头可作水平至直立的多角度观察。
- 5) 所配置的水下照明光源强度满足  $0.25\text{m}^2$  范围的摄像要求。

2 应选择水流平稳、水质较清时观察。

3 宜采用船上监控图像、操作水下探头的方式进行观察。水下探头应用连接杆连接，注明摄像头方向。

4 观察闸门、护坡等具有结构构造线的水下建筑物时，宜沿构造线、边墙、易受损部位详细观察；观察水平分布的消力池、堆石坝面板时，应布置测网，沿测线观察。

5 当水深较深或水流较急时，应使用较大的船。

6 当水底较暗时，可选在阳光能照到的时间进行观察，或在水面采用大功率探照灯向观察位置照射。

7 水上工作应符合水上作业的相关规定。

6.20.3 电视图像的解释应根据影像异常的几何形状、色泽差异、影纹粗细等特征确定缺陷的性质、位置和规模。成果宜包括电视录像编辑资料、缺陷位置分布图等。

6.20.4 在清水中应能观测到宽度为 10mm 的裂缝。

## 6.21 环境放射性检测

6.21.1 检测环境 $\gamma$ 辐射强度、环境表层土壤氡浓度、环境空气氡及其子体浓度等宜选择 $\gamma$ 测量、氡浓度测量。

6.21.2 方法选择和技术应符合下列要求：

- 1  $\gamma$ 测量可选用地面 $\gamma$ 测量、 $\gamma$ 编录和岩芯 $\gamma$ 测量三种基本



方法。

- 1) 使用 $\gamma$ 辐射仪测量前, 应标定 $\gamma$ 辐射仪。
- 2) 地下洞室 $\gamma$ 测量, 测线可布置在两侧壁和顶部, 也可布置在一侧壁和顶部。探井测量可沿相邻的两壁布置测线。
- 3) 测量岩芯 $\gamma$ 强度时, 应按岩性分段测量。

2 测量环境土壤氡浓度宜符合下列要求:

- 1) 在各测点上分别用浅孔和深孔取气器, 抽气测量氡气浓度, 确定氡气来源。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 环境空气氡及其子体浓度测量应符合下列要求:

- 1) 地面空气和地下洞室的氡气测量是监测岩体、土壤和断层破碎带中的氡气扩散到空气中的程度, 可以在需要部位定点定时测量。
- 2) 测试异常部位应作重复观测, 并记录空气流通情况。
- 3) 对空气流通不畅的地下洞室, 应做通风前后对比测试。
- 4) 岩体、土壤放射性化学分析应在 $\gamma$ 测量和氡气测量的各异常部位取岩土样品送实验室作 U、Ra、Tn、K 等放射性元素的含量分析。
- 5) 空气、水和土壤的样品采集测量应符合 HJ/T61。

6.21.3 资料分析应符合下列要求:

1 环境放射性检测, 应根据区域地质水文地质情况说明一般辐射水平、异常和出露范围以及与岩性、地层、地质构造、地下水活动的关系。

2 地面 $\gamma$ 测量宜结合区内露头、构造破碎带、自然 $\gamma$ 测井资料、各种岩样的放射性元素含量和 $\gamma$ 量数据进行分析。

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、在此环境年停留时间，计算外照射对人体的影响，用年有效剂量当量表示。

4 环境空气中的氡及其子体平衡当量浓度测量按 GB/T 14582 的规定。地下洞室、厂房氡及其子体平衡当量浓度控制标准按 GB 16356 的规定。当氡浓度超标或严重超标时，按 GB/T 14582 的规定计算和评价。

5 环境放射性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。摒弃阈值观念，强调避免不必要的照射。

6 根据测区 $\gamma$ 射线、氡气测试成果和其他物探资料，结合地层、岩性、构造破碎带，地下水活动特征，岩样和水样的放射性含量资料查明异常原因，并对测区环境辐射危害进行综合评价，为防护措施提供科学依据。

7 环境放射性检测综合成果图应标明地质构造、岩性、检测方法、异常点位置、强度、分析结果等。有必要时可绘制剖面或钻孔剖面图。

6.21.4 放射性测量精度宜按式 (C.58) ~ 式 (C.61) 计算标准误差和相对标准误差，衡量其统计涨落误差。

## 6.22 岩土物理和力学参数测试

6.22.1 岩土动力参数测试应包括弹性波纵波速度  $v_p$  和横波速度  $v_s$ ，按式 (C.65) 计算泊松比  $\mu$ ，按式 (C.66) 或式 (C.67) 计算动弹性模量  $E_d$ ，按式 (C.68) 计算动剪切模量  $G_d$ ，按式 (C.69) 计算单位弹性抗力系数  $K_0$ ，按式 (C.70) 计算各向异性系数  $\eta$ ，按式 (C.71) 计算风化波速比  $K_w$ ，按式 (C.72) 计算完整性系数  $K_v$  等。

6.22.2 可用弹性波纵波速度划分岩体风化带、评价岩体完整性、计算相关的动力学参数；可用弹性波横波速度判别砂土液化，参与计算岩土抗剪强度和 Related 动力学参数；其他动力学参数可用于

评价地层的力学强度和结构特性。

### 6.22.3 参数测试与计算应符合下列要求：

1 弹性波纵波速度和横波速度测试可选用单孔声波、穿透声波、连续地震波测试、地震测井、穿透地震波、浅层折射波法、瑞雷波法等。

2 可以利用测得的弹性波纵波和横波速度、介质密度按式 (C.65) 计算泊松比  $\mu$ ，按式 (C.66) 或式 (C.67) 计算动弹性模量  $E_d$ ，按式 (C.68) 计算动剪切模量  $G_d$ ，利用动弹性模量  $E_d$  按式 (C.69) 计算单位弹性抗力系数  $K_0$ 。

3 对具有片理、层理或似层状结构的岩体，可利用平行于岩体结构面方向的弹性波纵波速度  $v_p^{\parallel}$  与垂直于岩层结构面方向的纵波速度  $v_p^{\perp}$  按式 (C.70) 计算出岩体的各向异性系数  $\eta$ 。

4 可以利用岩体弹性波纵波速度  $v_p$  和新鲜完整岩块纵波速度  $v_{pr}$  按式 (C.71) 和式 (C.72) 计算岩体风化波速比  $K_w$  和完整性系数  $K_v$ 。

## 6.23 岩土电性参数测试

6.23.1 岩土电性参数测试应包括岩土电阻率、自然地网或人工地网工频接地电阻、大地电导率及电力设施接触电位、跨步电位等。

### 6.23.2 参数测试和计算应符合下列要求：

1 在地表测试地层电阻率参数可选用对称四极或电测深法等。

2 在有钻孔可利用的情况下，可采用电测深法和电阻率测井两种方法，采取点面结合方式测试岩土电阻率。

3 在钻孔中测试岩土电阻率，钻孔应无套管、有孔液，可采用电测井的侧向测井及横向测井方法。

4 测试基岩的电阻率可在露头或平洞内采用小极距的对称

四极装置。

5 测试接地网工频接地电阻可采用三极法和四极法,测量电流不宜小于 10A。具体要求按 DL/T 5091、DL/T 621 和本标准 5.2 的规定。

6.23.3 通过岩土电阻率、自然地网或人工地网工频接地电阻的测试,可为电站、厂房、电力设备等的接地设计和验收提供电阻率、接地电阻、大地电导率及接触电位、跨步电位等电性参数。

## 6.24 质点振动参数测试

6.24.1 质点振动参数测试内容应包括质点振动的速度、位移、加速度值。

6.24.2 应对施工影响区的原建筑物、设施、高边坡、新浇混凝土体等进行爆破振动的质点参数试验或监测。

6.24.3 参数测试和计算应符合 GB 6722、DL/T 5135 及下列要求:

1 根据现场地质条件、建筑物分布和设计要求布置测点。每个测点宜为三个方向或三分量拾振器,拾取三个分量的振动。

2 仪器系统应经标定,记录仪器应有足够的记录长度,拾振器宜为速度、加速度或位移型。

3 采用最小二乘法进行回归计算,可按式 (C.73) 计算出三个方向上的系数  $k$  和  $\alpha$ , 获得振速  $v$ 、距离  $D$  和药量  $Q$  的相关关系。当考虑高差效应时,可按照式 (C.74) 分别计算出三个方向上的系数  $k$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ , 获得振速  $v$ 、平距  $R$ 、高差  $H$  和药量  $Q$  的相关关系。

4 通过试验提出安全振速公式中  $k$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  的取值,为爆破设计提供依据。

5 根据试验获得的参数或经验关系和允许振动速度值,对监测对象(场地、建筑物、衬砌混凝土等)进行质点振动速度的监测。

## 6.25 其他工程参数测试

6.25.1 其他工程参数应包括密度、干密度、孔隙度、地下水流向、流速和渗透速度；在条件有利时配合水文地质试验，可测试含水层涌水量、渗透系数。

6.25.2 参数测试和计算应符合下列要求：

1 测试密度、湿度参数采用 $\gamma$ - $\gamma$ 测量。

2 孔隙度 $\phi$ 可通过三种方法测试计算：

1) 利用声波测井的地层声波速度 $v$ 、岩体中水的声波速度 $v_{pw}$ 、岩体骨架的声波速度 $v_{pm}$ 按式(C.75)计算孔隙度 $n$ 。

2) 利用视电阻率测井的地层电阻率 $\rho_1$ 、孔隙中水的电阻率 $\rho_w$ 及经验系数按式(C.77)计算。

3) 利用 $\gamma$ - $\gamma$ 测井的岩体骨架密度 $\rho_{ma}$ 、地层密度 $\rho_b$ 、孔隙中水的密度 $\rho_w$ 按式(C.78)计算孔隙度 $n$ 。

3 测试水文地质参数可使用充电法、自然电场法、井液电阻率测井、流量测井、同位素示踪法，有关技术要求按本标准第5.1~5.9的相关要求。

1) 在测区内比较平缓的区域布置若干测点，以测点中心作自然电场的环形观测，测量不同方位的过滤电场，电位差最大的正电位方向是该测点地下水的流向。

2) 有多个钻孔时，可采用投盐测自然电场或同位素示踪法测试地下水流速流向。

3) 在钻孔或水井内，可采用充电法测试地下水流速流向。充电法观测到的等位圈移动速度最大方向为地下水的流向。当测量等位圈的固定电极布置在地下水上游方向时，地下水的流速按式(C.79)计算。在斜坡上采用充电法时，应按式(C.80)进行地形校正。

4) 地下水渗透速度测试，可在钻孔中采用井液电阻率法

中的扩散法或同位素流速仪测量。当钻孔穿过了具有不同压力的几个含水层时，可用井中流量计或扩散法测试含水层之间的补给关系。

- 5) 涌水量和渗透系数的测试，应在钻孔进行抽水或压水试验（或进行注入法、提捞法）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。

## 7 物探成果报告

### 7.1 成果报告编写

7.1.1 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（专题）物探成果报告。采用多种物探方法完成一个工区的一项或几项工作任务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。

7.1.2 单项（专题）和综合物探成果报告的编写应符合下列要求：

1 内容应包括：概况、地质及地球物理特征、工作方法与技术、成果分析、结论与建议。

1) 概况应包括：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) 地质及地球物理特征应包括：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) 工作方法与技术应包括：方法原理简述、测线布置、现场工作技术、仪器性能及仪器参数选择、资料精度评价、数据处理方法与技术。

4) 成果分析应包括：物探成果分析与地质解释、成果解释精度。

5) 结论与建议应包括：物探成果结论、本次物探工作尚未解决的问题和需要补充的其他物探工作及验证工作的建议、可行的设计及施工处理建议。

2 单项和综合检测成果报告的主要内容和形式与物探成果报告相近，还应叙述抽样方式、工程设计及施工简况、评价标准、

工程合格情况评价等。

### 7.1.3 阶段性综合物探成果报告应符合下列要求：

1 宜以该阶段单项物探成果报告或以前各阶段的综合物探成果报告为基础编写。

2 内容宜包括：概况、地质与地球物理特征、物探综合成果、结论与评价、问题与建议。

- 1) 概况宜包括：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、以往进行过的地质勘测工作。
- 2) 地质与地球物理特征包括：与物探工作有关的地形地貌地层构造及水文地质情况、物探地质条件、物性特征表。
- 3) 物探综合成果宜包括：探测目的层（体）的地质物探特点、探测内容、探测方法技术、各物探方法对各探测目的层（体）的综合分析。
- 4) 结论与评价宜包括：阐明应用物探方法所解决的工程地质问题的结论与效果、成果质量与精度评价。
- 5) 问题与建议宜包括：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。

3 综合检测物探成果报告的主要内容和形式与综合物探勘测成果报告相近，还应叙述总体抽样方式、工程设计及施工简况、评价标准、工程合格情况评价等。

7.1.4 物探成果报告插图宜包括：方法原理图、典型曲线图、对比分析图等；插表宜包括：工作量表、物性参数表、仪器参数表、成果解释表、精度表等。

7.1.5 物探成果报告的附图、附表应符合本标准第 5 章的规定。



## 7.2 成果报告校审

7.2.1 物探成果报告应经校核和审查。

7.2.2 物探中间成果经校核后可在现场交付使用。

7.2.3 呈送校核和审查的成果应包括下列资料：

- 1 报告、附图、附表。
- 2 中间性解释和推算资料。
- 3 任务书、技术大纲、经检查评价合格的原始资料、相关物探记录等。
- 4 有关地质、施工或设计资料。

**附录 A**  
**(资料性附录)**  
**物性参数表**

表 A.1 常见介质电阻率

类别	名称	电阻率 $\rho$ $\Omega \cdot m$
松散层	黏土	$1 \times 10^0 \sim 2 \times 10^2$
	含水黏土	$2 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10$
	亚黏土	$1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^2$
	砾石加黏土	$2.2 \times 10^2 \sim 7 \times 10^3$
	亚黏土含砾石	$8 \times 10^1 \sim 2.4 \times 10^2$
	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	$6 \times 10^1 \sim 1 \times 10^3$
	砂岩	$1 \times 10^1 \sim 1 \times 10^3$
	泥岩	$1 \times 10^1 \sim 1 \times 10^2$
	砾岩	$1 \times 10^1 \sim 1 \times 10^4$
	石灰岩	$6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$
	泥灰岩	$1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^2$
	白云岩	$5 \times 10^1 \sim 6 \times 10^3$
	破碎含水白云岩	$1.7 \times 10^2 \sim 6 \times 10^2$
	硬石膏	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$
岩盐	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$	
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	$1 \times 10^1 \sim 1 \times 10^2$
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	$1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$

表 A.1 (续)

类别	名称	电阻率 $\rho$ $\Omega \cdot m$
其他	地下水	$<10^2$
	河水	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^2$
	冰	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8$
	岩溶水	$1.5 \times 10^0 \sim 3 \times 10^0$
	海水	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^0$

表 A.2 常见岩土介质的密度和波速

类别	名称	密度 $\rho$ $g/cm^3$	纵波速度 $v_p$ $km/s$	横波速度 $v_s$ $km/s$
松散层	黏土	1.60~2.04	1.2~2.5	—
	湿砂	—	0.6~0.8	—
	砂质黏土	—	0.3~0.9	—
	干砂、砾石	—	0.2~0.8	—
	饱水砂、砾石	—	1.5~2.8	—
沉积岩	砾岩	1.60~4.20	1.6~4.2	0.9~2.2
	泥质灰岩	2.45~2.65	2.0~4.4	1.2~2.4
	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	2.4~4.2	0.9~2.4
	致密白云岩	2.80~3.00	2.5~5.0	1.5~3.0
石膏	2.41~2.58	3.5~4.5	1.8~2.3	
变质岩	片麻岩	2.65~2.79	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	2.65~2.75	3.0~6.6	2.8~3.2
	片岩	2.68~2.92	5.8~6.1	3.5~3.8
	板岩	2.31~2.75	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	2.30~2.80	4.5~6.5	2.3~3.8
	闪长岩	2.52~2.70	5.7~6.4	2.8~3.8
	玄武岩	2.53~3.10	4.5~8.0	3.0~4.5
	安山岩	2.30~2.75	4.1~5.6	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	3.4~3.5

表 A.2 (续)

类别	名称	密度 $\rho$ g/cm <sup>3</sup>	纵波速度 $v_p$ km/s	横波速度 $v_s$ km/s
岩浆岩	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
其他	水	1.0	1.4~1.6	—
	冰	0.8~0.9	3.1~3.6	—
	混凝土	2.40~2.50	2.0~4.5	1.2~2.7

**附录 B**  
(资料性附录)  
**物探应用一览表**

表 B.1 工程物探探测应用一览表

应用项目		覆盖层探测	隐伏构造破碎带探测	软弱夹层探测	岩体风化、卸荷带探测	滑坡体探测	喀斯特探测	地下水探测	防渗线探测	隧洞施工掌子面超前预报	洞室松弛圈探测	水下覆盖层厚度探测
物探方法												
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	△			○	○	△		○			

表 B.1 (续)

物探方法		应用项目										
		覆盖层探测	隐伏构造破碎带探测	软弱夹层探测	岩体风化、卸荷带探测	滑坡体探测	喀斯特探测	地下水探测	防渗线探测	隧洞施工掌子面超前预报	洞室松弛圈探测	水下覆盖层厚度探测
弹性波测试	声波法	○	△	○	○	△			○		○	
	地震法	○	△		○	△			○		△	
CT	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		△						△			
	γ-γ测量											
	α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	△	○	○	○	○	△		△		○	
	井径测量		△	○	△	○	○		△			
	井中流体测量					○	△		△			
	磁化率测井		△			△	△		△			
	钻孔电视观察		○	○	○	○	○	△	△		△	
	超声成像测井		○	○	○				△			
井温测量						△	○	△				

注：○—主要方法；△—配合方法。

表 B.2 工程物探检测应用一览表

应用项目 物探方法		岩体 质量检 测	灌浆 效果 检测	堆石(土) 体密度检 测	堆石坝 面板质 量检测	混凝土 质量检 测	洞室混凝 土衬砌质 量检测	防渗墙 质量检 测	钢衬与混 凝土接触 状况检测	锚杆 质量 检测	水下建 筑物缺 陷观察	环境放 射性检 测	岩土 参数 测试
电法勘探	高密度电法							△					
	激发极化法												
	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	△	△					△					○
CT	地震波 CT	△	△			△		△					
	声波 CT	△	△			○		△					
	电磁波 CT							△					

表 B.2 (续)

应用项目		岩体 质量检 测	灌浆 效果 检测	堆石(土) 体密度检 测	堆石坝 面板质 量检测	混凝土 质量检 测	洞室混凝 土衬砌质 量检测	防渗墙 质量检 测	钢衬与混 凝土接触 状况检测	锚杆 质量 检测	水下建 筑物缺 陷观察	环境放 射性检 测	岩土 参数 测试
放射性 测量	γ测量											△	
	γ-γ测量											○	
	α测量											○	
	同位素示踪		△					△				○	
综合测井	电测井							△					○
	声波测井	○	○			○		△					○
	放射性测井			△								△	○
	钻孔电视观 察		○			○	△	○			○		
	超声成像测 井					○				○			
附加 质量法	附加质量法			○									

注：○—主要方法；△—配合方法。



**附 录 C**  
(规范性附录)  
物探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  $\Delta$ :

$$\Delta = |d_{ai} - d'_{ai}| \quad (\text{C.1})$$

C.1.2 平均绝对误差  $\bar{\Delta}$ :

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Delta| \quad (\text{C.2})$$

C.1.3 相对误差  $\delta$ :

$$\delta = \frac{|d_{ai} - d'_{ai}|}{d_{ai}} \times 100\% \quad (\text{C.3})$$

C.1.4 平均相对误差  $\bar{\delta}$ :

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N \delta_i \right) \times 100\% \quad (\text{C.4})$$

C.1.5 均方相对误差  $m$ :

$$m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i^2} \times 100\% \quad (\text{C.5})$$

C.1.6 总均方相对误差  $M$ :

$$M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i^2} \times 100\% \quad (\text{C.6})$$

C.1.7 极差系数  $K$ :

$$K = 2 \frac{d_{ai}^{\max} - d_{ai}^{\min}}{d_{ai}^{\max} + d_{ai}^{\min}} \quad (\text{C.7})$$

式 (C.1) ~ 式 (C.7) 中:

$N$  —— 检查点、测深点、测线数量;

$d_{ai}$  —— 基本观测值, 当进行了重复观测时, 是指有效数据的算术平均值;

$d_{ai}'$  —— 系统检查观测值, 当进行了重复观测时, 是指有效数据的算术平均值;

$d_{ai}^{\max}$  —— 参与计算的数据中的最大值;

$d_{ai}^{\min}$  —— 参与计算的数据中的最小值。

## C.2 电阻率法的装置系数 $K$ 计算公式

C.2.1 对称四极装置:

$$K = \pi \frac{AM \times AN}{MN} \quad (\text{C.8})$$

C.2.2 三极装置:

$$K = 2\pi \frac{AM \times AN}{MN} \quad (\text{C.9})$$

C.2.3 二极装置:

$$K = 2\pi \times AM \quad (\text{C.10})$$

C.2.4 轴向偶极装置:

$$K = 2\pi \frac{AM \times AN \times BM \times BN}{MN(AM \times AN - BM \times BN)} \quad (\text{C.11})$$

C.2.5 赤道偶极装置:

$$K = \pi \frac{AM \times AN}{AN - AM} \quad (\text{C.12})$$

C.2.6 中间梯度装置:

$$K = 2\pi \frac{AM \times AN \times BM \times BN}{MN(AM \times AN + BM \times BN)} \quad (\text{C.13})$$

C.2.7 电测井梯度装置反电位装置 ( $B$  在地面单极供电):

$$K = 4\pi \frac{AM \times AN}{MN} \quad (\text{C.14})$$

C.2.8 电测井梯度装置反电位装置 ( $N$  在地面双极供电):

$$K = 4\pi \frac{AM \times BM}{AB} \quad (\text{C.15})$$

式 (C.8) ~ 式 (C.15) 中:

$AM$ 、 $AN$ 、 $MN$ 、 $BM$ 、 $BN$ 、 $AB$ ——均为电极距长度, m。

### C.3 电磁波计算公式

C.3.1 电磁测深集肤深度  $h$  (m) 公式:

$$h = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (\text{C.16})$$

式中:

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

$\mu$  ——磁导率,  $\text{H/m}$ ;

$\omega$  ——角频率,  $\text{rad/s}$ ;

$f$  ——电磁波频率,  $\text{Hz}$ 。

C.3.2 电磁波第一菲涅尔带宽度  $d_f$  (m) 计算公式:

$$d_f = \sqrt{\frac{vh}{2f}} \times 10^9 \quad (\text{C.17})$$

式中:

$v$  ——电磁波平均速度,  $\text{m/ns}$ ;

$h$  ——异常体埋藏深度,  $\text{m}$ ;

$f$  ——电磁波频率,  $\text{Hz}$ 。

C.3.3 雷达记录时窗  $T$  (ns) 计算公式:

$$T = K \frac{2H}{v} \quad (\text{C.18})$$

式中:

$K$  ——折算系数, 1.3~1.5;

$H$  ——雷达最大探测深度, m;

$v$  ——上覆地层电磁波平均速度, m/ns。

C.3.4 均匀介质中电磁波偶极子远场场强  $E$  (V) 公式:

$$E = \frac{E_0 e^{-\beta r}}{r \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\varphi\right)} = \frac{E_0 e^{-\beta r}}{r \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{\sqrt{r^2 - d^2}}{r}\right)} \quad (\text{C.19})$$

式中:

$E_0$  ——初始场强, V;

$\beta$  ——吸收系数, 奈培/m;

$r$  ——收发距, m;

$d$  ——水平距, m;

$\varphi$  —— $r$  与偶极子夹角, rad。

C.3.5 电磁波在介质中传播的波长  $\lambda_e$  (m) 换算公式:

$$\lambda_e = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon} \quad (\text{C.20})$$

式中:

$\lambda_0$  ——电磁波在空气中的波长, m;

$\varepsilon$  ——介质的介电常数。

## C.4 地震勘探计算公式

### C.4.1 观测系统计算公式

#### C.4.1.1 检波点间距 $\Delta x$ (m) 计算公式:

$$\Delta x \leq \frac{vT}{2 \sin(i + \varphi)} \quad (\text{C.21})$$

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, ( $^\circ$ );

$\varphi$ ——折射界面相对地面的倾角，( $^{\circ}$ ) (下倾方向为正值，反之为负值)。

下倾当检波点取等间距时，应以下倾方向的 $\Delta x$ 值为标准。

C.4.1.2 观测系统所隔排列数  $G$  (取整数):

$$G = \frac{X_c}{(n-1)\Delta x} \quad (\text{C.22})$$

式中:

$X_c$ ——临界距离，即非追踪段长度，m;

$n$ ——排列检波点数;

$\Delta x$ ——检波点距，m。

C.4.2 校正计算公式

C.4.2.1 直达波时距曲线经爆炸深度校正时间  $t_n$  (ms) 计算公式:

$$t_n = \sqrt{\Delta t_{pn}^2 - \Delta t_s^2} \quad (\text{C.23})$$

式中:

$\Delta t_{pn}$ ——从爆炸点  $o$  到各接收点直达波计数时间，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;

其他参数如图 C.1 所示。

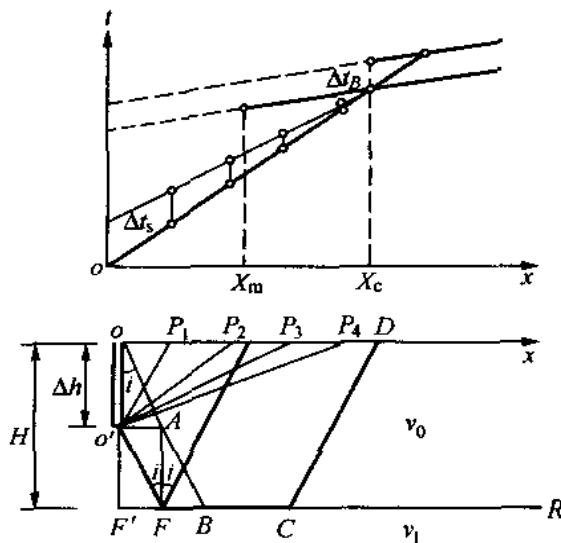


图 C.1 爆炸深度校正示意图

C.4.2.2 折射波时距曲线爆炸深度校正时间 $\Delta t_B$  (ms) 计算公式:

$$\Delta t_B = \frac{\Delta h \cos i}{v_0} \times 10^3 \quad (\text{C.24})$$

式中:

$\Delta h$ ——爆炸点深度, m;

$v_0$ ——爆炸点以上介质波速, m/s;

其他参数见图 C.1。

C.4.2.3 转换法低速带时间 $\Delta t_D$  (ms) 校正公式:

$$\Delta t_D = \left( \frac{\cos i}{v_0} - \frac{\cos i}{v_1} \right) (\Delta h_Z + \Delta h_B) \times 10^3 \quad (\text{C.25})$$

式中:

$i$ ——低速带与下伏相邻地层折射波临界角, ( $^\circ$ );

$v_0$ ——低速带波速, m/s;

$v_1$ ——低速带下伏相邻地层波速, m/s;

$\Delta h_Z$ ——检波点处低速带厚度, m;

$\Delta h_B$ ——爆炸点处低速带厚度, m。

C.4.2.4 剥层法低速带时间 $\Delta t_D$  (ms) 校正公式:

$$\Delta t_D = \frac{\cos i}{v_0} (\Delta h_Z + \Delta h_B) \times 10^3 \quad (\text{C.26})$$

式中:

$i$ 、 $v_0$ 、 $\Delta h_Z$ 、 $\Delta h_B$ ——与式 (C.25) 相同。

C.4.2.5 地形校正 $\Delta t_C$  (ms) 公式:

$$\Delta t_C = \frac{\cos i}{v_0} (\Delta h_Z + \Delta h_B) \times 10^3 \quad (\text{C.27})$$

式中:

$i$ ——表层介质与下伏相邻地层折射波临界角, ( $^\circ$ );

$v_0$ ——表层介质波速, m/s;

$\Delta h_Z$ ——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。

### C.4.3 波速计算公式

#### C.4.3.1 平均速度计算公式 $\bar{v}$ (m/s):

$$\bar{v} = \frac{h_1 + h_2 + \cdots + h_n}{\frac{h_1}{v_1} + \frac{h_2}{v_2} + \cdots + \frac{h_n}{v_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \times 10^3 \quad (\text{C.28})$$

式中:

$h_i$ ——各地层厚度, m;

$v_i$ ——各地层平均波速, m/s;

$t_i$ ——弹性波垂直穿透各地层的旅行时, ms。

#### C.4.3.2 由折射时距曲线用交点法求有效波速 $v_{cn}$ (m/s) 公式:

$$v_{cn} = \frac{X_{cn}}{t_{cn}} \times 10^3 \quad (\text{C.29})$$

式中:

$X_{cn}$ ——第  $n$  层折射波的临界距离, m;

$t_{cn}$ ——第  $n$  层临界点相应的时间, ms。

#### C.4.3.3 由反射时距曲线平方坐标法求有效速度公式:

C.4.3.3.1 由单边反射时距曲线按  $t^2-x^2$  坐标法求有效速度  $v_{ef}$  (m/s), 适用于界面倾角小于  $15^\circ$  的情况。

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{\Delta X}{\Delta T}} \times 10^3 \quad (\text{C.30})$$

式中:

$X=x^2$ ;

$T=t^2$ ;

其他参数如图 C.2 所示。

C.4.3.3.2 由双边反射时距曲线按  $t^2-x^2$  坐标法求有效速度  $v_{ef}$  (m/s)，适用于倾斜界面的情况。

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{\Delta X}{\Delta T}} \times 10^3 \quad (\text{C.31})$$

式中：

$$X = x^2;$$

$$T = t^2 = (t_1^2 + t_2^2) / 2;$$

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

其他参数如图 C.2 所示。

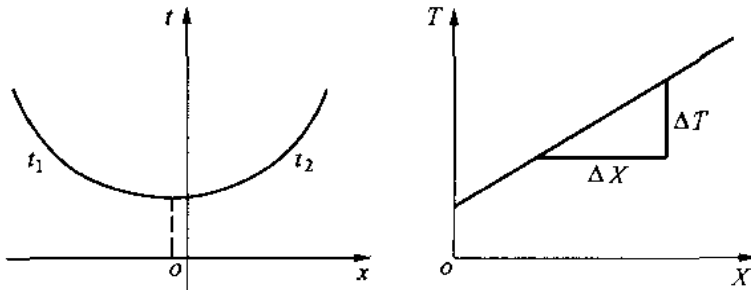


图 C.2 平方坐标法求反射波有效速度

C.4.3.3.3 反射波相遇时距曲线按  $u-x$  坐标法求有效速度  $v_{ef}$  (m/s)，适用于界面倾角小于  $7^\circ$  情况。

$$v_{ef} = \sqrt{2L \frac{\Delta x}{\Delta u}} \times 10^3 \quad (\text{C.32})$$

式中：

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

$L$ ——震源至反射波最远端检波点的距离，m；

其他参数如图 C.3 所示。



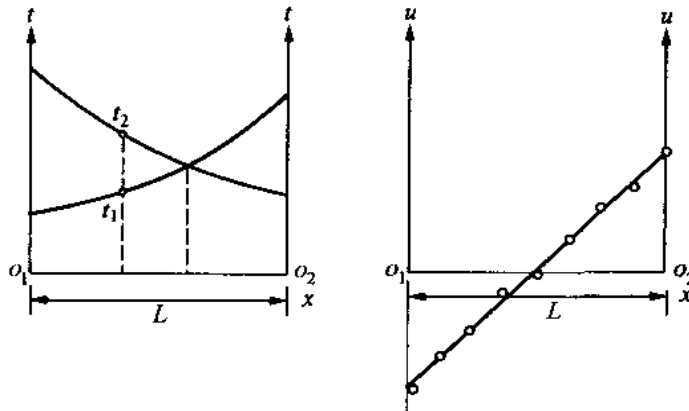


图 C.3 差异时距曲线法求反射波有效速度

#### C.4.4 地震界面计算公式

##### C.4.4.1 单支时距曲线截距时间法计算各层层厚度 $h_i$ (m):

$$h_1 = \frac{t_{01}}{2} \frac{v_1 v_2}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \times 10^{-3}$$

$$h_2 = \left[ \frac{t_{02}}{2} \frac{v_2 v_3}{\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} - h_1 \frac{v_2 \sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_1 \sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \right] \times 10^{-3}$$

$$h_3 = \left[ \frac{t_{03}}{2} \frac{v_3 v_4}{\sqrt{v_4^2 - v_3^2}} - h_1 \frac{v_3 \sqrt{v_4^2 - v_1^2}}{v_1 \sqrt{v_4^2 - v_3^2}} - h_2 \frac{v_3 \sqrt{v_4^2 - v_2^2}}{v_2 \sqrt{v_4^2 - v_3^2}} \right] \times 10^{-3}$$

...

$$h_n = \left[ \frac{t_{0n}}{2} \frac{v_n v_{n+1}}{\sqrt{v_{n+1}^2 - v_n^2}} - \sum_{k=1}^{n-1} h_k \frac{v_n \sqrt{v_{n+1}^2 - v_k^2}}{v_k \sqrt{v_{n+1}^2 - v_n^2}} \right] \times 10^{-3} \quad (\text{C.33})$$

式中:

- $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $\dots$ 、 $v_n$  —— 各层介质波速, m/s;  
 $t_{01}$ 、 $t_{02}$ 、 $t_{03}$ 、 $\dots$ 、 $t_{0n}$  —— 各层折射波截距时间, ms;  
 其他参数如图 C.4 所示。

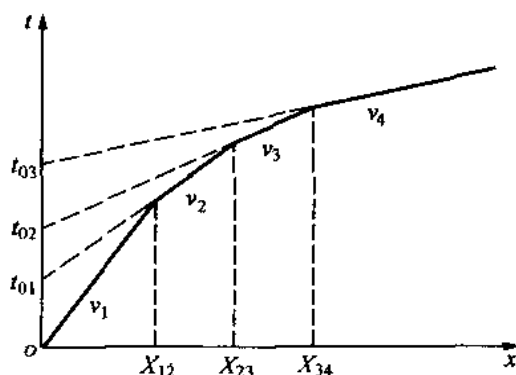


图 C.4 截距时间法和临界距离法求解折射界面

#### C.4.4.2 单支时距曲线的临界距离法计算各层层厚度 $h_i$ (m):

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \frac{X_{12}}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}} \\
 h_2 &= \frac{X_{23}}{2} \sqrt{\frac{v_3 - v_2}{v_3 + v_2}} - h_1 \frac{v_2 \sqrt{v_3^2 - v_1^2} - v_3 \sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 \sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \\
 h_3 &= \frac{X_{34}}{2} \sqrt{\frac{v_4 - v_3}{v_4 + v_3}} - h_1 \frac{v_3 \sqrt{v_4^2 - v_1^2} - v_4 \sqrt{v_3^2 - v_1^2}}{v_1 \sqrt{v_4^2 - v_3^2}} \\
 &\quad - h_2 \frac{v_3 \sqrt{v_4^2 - v_2^2} - v_4 \sqrt{v_3^2 - v_2^2}}{v_2 \sqrt{v_4^2 - v_3^2}} \\
 &\quad \dots \\
 h_n &= \frac{X_{n(n+1)}}{2} \sqrt{\frac{v_{n+1} - v_n}{v_{n+1} + v_n}} - \sum_{k=1}^{n-1} h_k \frac{v_n \sqrt{v_{n+1}^2 - v_k^2} - v_{n+1} \sqrt{v_n^2 - v_k^2}}{v_k \sqrt{v_{n+1}^2 - v_n^2}}
 \end{aligned} \tag{C.34}$$

式中:

$v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $\dots$ 、 $v_n$ 、 $v_{n+1}$  ——各层介质波速, m/s;

$X_{12}$ 、 $X_{23}$ 、 $X_{34}$ 、 $\dots$ 、 $X_{n(n+1)}$  ——各层折射波临界距离, m。

#### C.4.4.3 $t_0$ 法求解相遇时距曲线折射界面深度 $h$ (m):

$$t_0(x) = t_A(x) - [T_{AB} - t_B(x)] \quad (\text{C.35})$$

$$\theta(x) = t_A(x) + [T_{AB} - t_B(x)] \quad (\text{C.36})$$

$$v_2 = \frac{2\Delta x}{\Delta\theta(x)} \times 10^3 \quad (\text{C.37})$$

$$h(x) = \frac{v_1 t_0(x)}{2 \cos i} \times 10^{-3} \quad (\text{C.38})$$

式 (C.35) ~ 式 (C.38) 中:

$t_A(x)$  ——  $A$  点激发时距曲线观测时间, ms;

$t_B(x)$  ——  $B$  点激发时距曲线观测时间, ms;

$T_{AB}$  —— 相遇时距曲线互换时间, ms;

$v_1$  —— 折射界面上覆介质平均或有效速度, m/s;

$v_2$  —— 折射界面滑行速度, m/s;

$i$  —— 折射波临界角, ( $^\circ$ );

$h(x)$  —— 折射界面深度, m。

#### C.4.4.4 延迟时法求解相遇时距曲线折射界面深度 $h$ (m):

$$D(x) = \frac{t_A(x) + t_B(x)}{2} - \frac{T_{AB}}{2} \quad (\text{C.39})$$

$$T'(x) = t_A(x) - D(x) \quad (\text{C.40})$$

$$v_2 = \frac{\Delta x}{\Delta T'(x)} \times 10^3 \quad (\text{C.41})$$

$$h(x) = \frac{v_1 D(x)}{\cos i} \times 10^{-3} \quad (\text{C.42})$$

式 (C.39) ~ 式 (C.42) 中:

$t_B(x)$ 、 $t_A(x)$ 、 $T_{AB}$ 、 $v_1$ 、 $v_2$ 、 $i$ 、 $h(x)$  —— 与式 (C.35) ~ 式 (C.38) 相同。

#### C.4.4.5 共轭点法求解相遇时距曲线折射界面:

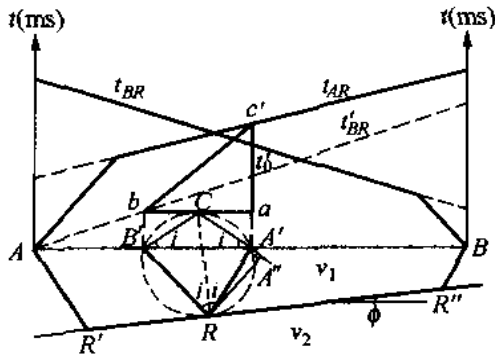


图 C.5 共轭点法求解折射界面示意图

共轭点法解释步骤如下 (如图 C.5 所示):

- 1) 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。

#### C.4.4.6 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覆地层的平均或有效速度  $v_1$  作两支相遇折射波的时间场, 其中满足关系式  $t_A + t_B = T$  的点的连线, 即为所追踪的界面。界面速度  $v_2$  (m/s)

计算公式:

$$v_2 = \frac{\Delta\zeta}{\Delta t} \times 10^{-3} \quad (\text{C.43})$$

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。

C.4.4.7 综合时距曲线分层法求解折射界面深度  $h_i$  (m):

$$h_1 = \frac{v_1 t_{01}}{2 \cos i_{12}} \times 10^{-3}$$

$$h_2 = \left[ \frac{v_2 t_{02}}{2 \cos i_{23}} - h_1 \frac{\cos i_{13}}{\sin i_{12} \cdot \cos i_{23}} \right] \times 10^{-3}$$

$$h_3 = \left[ \frac{v_3 t_{03}}{2 \cos i_{34}} - h_1 \frac{\cos i_{14}}{\sin i_{13} \cos i_{34}} - h_2 \frac{\cos i_{24}}{\sin i_{23} \cos i_{34}} \right] \times 10^{-3}$$

...

$$h_n = \left[ \frac{v_n t_{0n}}{2 \cos i_{n(n+1)}} - \sum_{k=1}^{n-1} h_k \frac{\cos i_{k(n+1)}}{\sin i_{kn} \cdot \cos i_{n(n+1)}} \right] \times 10^{-3} \quad (\text{C.44})$$

式中:

$i_{kn} = \arcsin (v_k/v_n)$ , ( $^\circ$ );

$v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$  ——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。

C.4.4.8 展开排列求解反射界面  $H$  (m):

$$H = \frac{\sqrt{(vt \times 10^{-3})^2 - X^2}}{2} \quad (\text{C.45})$$

式中:

$v$  ——反射界面上覆地层的平均波速或有效波速, m/s;

$t$  ——反射波旅行时, ms;

$X$  ——炮检距, m;

$H$  ——激发点与接收点连线中点的反射界面深度, m。

#### C.4.4.9 共偏移剖面求解反射界面公式:

##### C.4.4.9.1 圆法求解反射界面深度 $H$ (m):

$$H = \frac{\sqrt{(vt \times 10^{-3})^2 - L^2}}{2} \quad (\text{C.46})$$

式中:

$L$  ——偏移距, m;

$v$ 、 $t$ 、 $H$  ——与式 (C.45) 相同。

##### C.4.4.9.2 椭圆法求解公式:

反射界面由椭圆方程决定的下半椭圆轨迹的参数方程为:

$$\begin{aligned} \frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} &= 1 \\ x' &= x - \frac{L}{2} = x - C \\ y' &= y = b \sqrt{1 - \left(\frac{x-C}{a}\right)^2} \end{aligned} \quad (\text{C.47})$$

式中:

$$a = \frac{1}{2} vt \times 10^{-3};$$

$$b = h = \frac{\sqrt{(v \times 10^{-3} t)^2 - L^2}}{2};$$

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

其他参数如图 C.6 所示。

可设  $x$  从  $0 \sim L$  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。

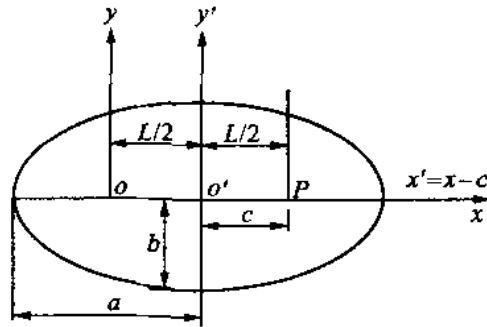


图 C.6 椭圆法求解反射界面示意图

#### C.4.4.10 共深度点叠加时间剖面求解反射界面深度 $H$ (m):

$$H = \frac{vt}{2} \times 10^{-3} \quad (\text{C.48})$$

式中:

$v$  —— 反射界面上覆地层平均波速或叠加波速, m/s;

$t$  —— 校正后的反射波旅行时, ms;

以共深度点为圆心、 $H$  为半径划弧, 包络线即为反射界面。

#### C.4.5 瑞雷波计算公式:

##### C.4.5.1 落重震动主频 $f_0$ (Hz) 计算公式:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4G_d r_0}{m(1-\mu)}} \quad (\text{C.49})$$

式中:

$G_d$  —— 剪切模量, Pa;

$r_0$  —— 底面积,  $\text{m}^2$ ;

$m$  —— 质量, kg;

$\mu$  —— 泊松比。

##### C.4.5.2 瑞雷波稳态法频点步长 $\Delta f$ (Hz) 估算公式:

$$\Delta f = \frac{2f^2}{v_R} \times \Delta H \quad (\text{C.50})$$

式中:

$f$ ——测试频率, Hz;

$v_R$ ——瑞雷波速度, m/s;

$\Delta H$ ——深度增加值, m。

C.4.5.3 时间差法计算瑞雷波速度  $v_R$  (m/s) 公式:

$$v_R = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (\text{C.51})$$

式中:

$\Delta x$ ——检测间距, m;

$\Delta t$ ——时间差, s。

C.4.5.4 相位差法计算瑞雷波速度  $v_R$  (m/s) 公式:

$$v_R = \frac{2\pi f \Delta x}{\Delta \phi} \quad (\text{C.52})$$

式中:

$\Delta x$ ——检测间距, m;

$\Delta \phi$ ——相位差, rad。

C.4.5.5 互相关法计算相关度  $r(k)$  公式:

$$r(k) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} e(l)g(l+k) \quad (\text{C.53})$$

式中:

$e(l)$ 、 $g(l)$ ——具有一定相似性的相关函数;

$k=0, 1, \dots, N-1$ 。

C.4.5.6 瑞雷波速度  $v_R$  与横波速度  $v_S$  关系经验公式:

$$v_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \times v_S \quad (\text{C.54})$$

C.4.5.7 瑞雷波层速度计算公式:

C.4.5.7.1 当地层的平均波速随速度增加而增大时,  $n-1$  至  $n$  层的  $v_{Rn}$  (m/s) 计算公式:



$$v_{Rn} = \frac{H_n \bar{v}_{Rn} - H_{n-1} \bar{v}_{Rn-1}}{H_n - H_{n-1}} \quad (\text{C.55})$$

C.4.5.7.2 当地层平均波速随深度增加而减小时,  $n-1$  至  $n$  层的  $v_{Rn}$  (m/s) 计算公式:

$$v_{Rn} = \frac{H_n - H_{n-1}}{H_n / \bar{v}_{Rn} - H_{n-1} / \bar{v}_{Rn-1}} \quad (\text{C.56})$$

C.4.5.7.3 当不考虑地层平均波速随深度变化趋势时,  $n-1$  至  $n$  层的  $v_{Rn}$  (m/s) 计算公式:

$$v_{Rn} = \frac{\bar{v}_{Rn}^2 H_n - \bar{v}_{Rn-1}^2 H_{n-1}}{H_n - H_{n-1}} \quad (\text{C.57})$$

式 (C.54) ~ 式 (C.57) 中:

$v_s$  —— 横波速度, m/s;

$v_R$  —— 瑞雷波速度, m/s;

$\mu$  —— 泊松比;

$H_n$  —— 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;

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

## C.5 放射性计算公式

### C.5.1 放射性统计涨落误差公式

#### C.5.1.1 脉冲记数仪器标准误差 $\sigma$ 计算公式:

$$\sigma = \pm \sqrt{N} \quad (\text{C.58})$$

#### C.5.1.2 脉冲记数仪器相对标准误差 $\delta$ 计算公式:

$$\delta = \pm \frac{\sigma}{N} = \pm \frac{1}{\sqrt{N}} = \pm \frac{1}{\sqrt{Nt}} \quad (\text{C.59})$$

C.5.1.3 率计式辐射仪标准误差 $\sigma$ 计算公式:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\bar{n}}{2Rc}} \quad (\text{C.60})$$

C.5.1.4 率计式辐射仪相对标准误差 $\delta$ 计算公式:

$$\delta = \pm \frac{1}{\sqrt{2\bar{n}Rc}} \quad (\text{C.61})$$

式 (C.58) ~ 式 (C.61) 中:

$\bar{N}$  —— 平均读数;

$N$  —— 脉冲个数;

$t$  —— 读数时间, s;

$Rc = \tau$  —— 积分线路的时间常数;

$\bar{n}$  —— 脉冲计数率即单位时间内的脉冲数。

C.5.2 同位素示踪测井计算渗透系数  $K$  (m/d) 公式:

$$K = \frac{v_f}{I} \quad (\text{C.62})$$

$$v_f = \frac{\pi(r^2 - r_0^2)}{2art} \ln \frac{N_0 - N_b}{N_t - N_b}$$

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;

$r_0$  —— 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;

$a$  —— 流场畸变校正系数。

## C.6 岩体力学参数计算公式

C.6.1 附加质量法求密度 $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 经验公式:

$$\rho = \frac{m_0}{A \frac{v_P}{2Nf_0}} \quad (\text{C.63})$$

式中:

$A$ ——载板面积,  $\text{m}^2$ ;

$N$ ——衰减系数 (通过坑测法与附加质量法测试对比确定);

$m_0 = D_0/K' = KD_0 = (\Delta m/\Delta D) D_0$ ——参振质量,  $\text{kg}$ ;

$f_0$ —— $\Delta m=0$  时的介质自振频率,  $\text{Hz}$ ;

$v_P$ ——测点波速,  $\text{m/s}$ ;

$D$ —— $1/\omega^2$ ;

$m_0$  按图 C.7 进行解析求解,  $m_0$  等于“ $D-\Delta m$ ”曲线在  $\Delta m$  坐标轴上截距的绝对值 (见图 C.7)。

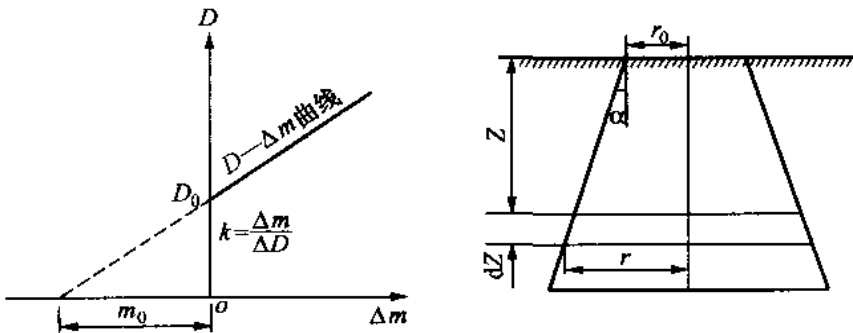


图 C.7 图解法求参振质量  $m_0$

C.6.2 脉冲回波法计算反射界面深度  $H$  ( $\text{m}$ ) 公式:

$$H = \frac{v_P}{2f_0} \quad (\text{C.64})$$

式中:

$v_P$ ——混凝土声波纵波速度,  $\text{m/s}$ ;

$f_0$  ——回波频率, Hz。

### C.6.3 相关物理力学参数计算公式

#### C.6.3.1 泊松比 $\mu$ 计算公式:

$$\mu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (\text{C.65})$$

#### C.6.3.2 动弹性模量 $E_d$ (Pa) 计算公式:

$$E_d = v_p^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad (\text{C.66})$$

$$E_d = 2v_s^2 \rho (1 + \mu) \quad (\text{C.67})$$

#### C.6.3.3 动剪切模量 $G_d$ (Pa) 计算公式:

$$G_d = v_s^2 \rho \quad (\text{C.68})$$

#### C.6.3.4 单位弹性抗力系数 $K_0$ 计算公式:

$$K_0 = \frac{E_d}{100(1 + \mu)} \alpha \quad (\text{C.69})$$

#### C.6.3.5 各向异性系数 $\eta$ 计算公式:

$$\eta = \frac{v_p'}{v_p^{\perp}} \quad (\text{C.70})$$

#### C.6.3.6 风化波速比 $K_w$ 计算公式:

$$K_w = v_p / v_{Pr} \quad (\text{C.71})$$

#### C.6.3.7 完整性系数 $K_v$ 计算公式:

$$K_v = (v_p / v_{Pr})^2 \quad (\text{C.72})$$

式 (C.65) ~ 式 (C.72) 中:

$v_p$  ——岩体纵波速度, m/s;

$v_s$  ——岩体横波速度, m/s;

$\rho$  ——岩体密度, g/cm<sup>3</sup>;

$\alpha$  ——折减系数;

$v_p^{\parallel}$  ——平行岩体结构面方向的纵波速度, m/s;

$v_p^{\perp}$  ——垂直岩体结构面方向的纵波速度, m/s;

$v_{Pr}$  ——新鲜完整岩块的纵波速度, m/s。

C.6.4 爆破振动效应的振速  $v$  (m/s) 与距离  $D$  (m) 和药量  $Q$  (kg) 的相对关系公式:

$$v = k(Q^{1/3} / D)^{\alpha} \quad (\text{C.73})$$

$$v = k \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{\alpha} \times \left( \frac{Q^{1/3}}{H} \right)^{\beta} \quad (\text{C.74})$$

式 (C.73) ~ 式 (C.74) 中:

$R$  ——测点与爆炸点间的距离, m;

$D$  ——测点与爆炸点间的水平距离, m;

$H$  ——测点与爆炸点间的高差, m;

$k$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  ——系数, 通过系列药量试验建立系列方程, 并经最小二乘法求得。

C.6.5 声波测井求孔隙度  $n$  计算公式:

$$n = \frac{(1/v - 1/v_{Pm})}{(1/v_{Pw} - 1/v_{Pm})} \quad (\text{C.75})$$

$$n = \frac{t - t_{Pm}}{t_w - t_{Pm}} \quad (\text{C.76})$$

式 (C.75) ~ 式 (C.76) 中:

$v_{Pw}$  ——岩体中水的声波速度, m/s;

$v_{Pm}$  ——岩体骨架的声波速度, m/s;

$v$  ——地层的声波速度, m/s;

$t$  ——声波在岩体中传播 1m 的时间, ms;

$t_{Pm}$  ——声波在岩体骨架中传播 1m 的时间, ms;

$t_w$  ——声波在水中传播 1m 的时间, ms。

C.6.6 利用视电阻率测井求孔隙度  $n$  计算公式:

$$n = m \sqrt{\frac{\alpha \rho_w}{\rho_t}} \quad (\text{C.77})$$

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  $\alpha=0.62/m=2.15$  或  $\alpha=0.81/m=2.00$ ; 石灰岩,  $\alpha=1.00/m=2.00 \sim 2.50$ ; 裂隙发育的石灰岩,  $\alpha=1.00/m=1.12 \sim 1.30$ )。

C.6.7 利用 $\gamma$ - $\gamma$ 测井求孔隙度  $n$  计算公式:

$$n = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_w} \quad (\text{C.78})$$

式中:

$\rho_{ma}$  ——岩体骨架密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$\rho_b$  ——地层密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

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

C.6.8 用充电法的等位圈位移量及时间计算地下水流速公式:

$$v = \frac{\Delta R_i}{\Delta t_i} \quad (\text{C.79})$$

$$v_j = \frac{v}{\cos \varphi} \quad (\text{C.80})$$

式 (C.79) ~ 式 (C.80) 中:

$v$  ——地下水流速,  $\text{m}/\text{h}$ ;

$v_j$  ——经地形校正后的地下水流速,  $\text{m}/\text{h}$ ;

$\Delta R_i$  ——电位等位圈的位移量,  $\text{m}$ ;

$\Delta t_i$  ——两次等位圈观测的时间间隔,  $\text{h}$ ;

$\varphi$  ——地形坡度, ( $^\circ$ )。

# 水电水利工程物探规程

## 条文说明

## 目 录

4	总则	142
5	物探方法与技术	143
5.1	一般规定	143
5.2	电法勘探	144
5.3	探地雷达法	153
5.4	地震勘探	155
5.5	弹性波测试	160
5.6	层析成像	162
5.7	水声勘探	164
5.8	放射性测量	166
5.9	综合测井	168
6	物探方法的综合应用	173
6.1	覆盖层探测	173
6.2	隐伏构造破碎带探测	174
6.3	软弱夹层探测	175
6.4	岩体风化、卸荷带探测	176
6.5	滑坡体探测	177
6.6	喀斯特探测	178
6.7	地下水探测	179
6.8	防渗线探测	180
6.10	隧洞施工掌子面超前预报	181
6.11	洞室松弛圈探测	181
6.12	灌浆效果检测	183
6.13	防渗墙质量检测	184
6.14	堆石(土)体密度及地基承载力测试	185



6.15	堆石坝面板质量检测 .....	185
6.16	混凝土质量检测 .....	186
6.18	钢衬与混凝土接触状况检测 .....	187
6.19	锚杆质量检测 .....	188
6.20	水下建筑物缺陷观察 .....	188
6.21	环境放射性检测 .....	189
6.22	岩土物理和力学参数测试 .....	191
6.23	岩土电性参数测试 .....	192
6.24	质点振动参数测试 .....	192
6.25	其他工程参数测试 .....	193

## 4 总 则

4.0.1 依据近年来水电水利工程物探应用范围的扩大和方法技术的增多，原规程已不能满足和适应。

4.0.2 工程物探工作程序与 DL 5010—1992 基本相同，依据近年来的情况，将物探资料内业整理分成资料检查与评价、数据处理、资料解释与制图，增加成果报告编写与校审，搜集资料、现场踏勘、试验的形式和方法的具体执行情况应依据本标准第 5 章各方法的相关规定。

4.0.3 物探任务书由物探负责人根据合同、勘测或检测大纲编写下达，特殊情况下，电话记录、会议记录和会议纪要也可作为任务书，但事后应整理成任务书。

4.0.4 该条是从整体上对选用物探方法进行规定，具体执行时应根据本标准第 5 章的规定。与 DL 5010—1992 相比，增加了近年较常用和成熟的新方法，删除了少量不常用的方法。

4.0.5 编写技术大纲是勘察设计的基本要求。

4.0.6 依据国家技术监督局对计量仪器的管理规定，同时考虑到物探仪器在野外测量受到的影响因素较大，应进行现场检验。检验可由国家技术监督局或其授权的检验机构和人员进行。

4.0.7 重复观测和检查观测是消除仪器野外工作时测量数据或信号易受到环境条件、人为因素、仪器性能稳定性等的影响而作的规定。

4.0.8 绘图和处理软件是指特为物探某一方法或技术而编制的软件，不含通用办公软件，鉴定评审可由行业或工作单位组织相关专业人员评审。

4.0.9 依据物探的多解性而规定。

4.0.10 水电水利工程勘探成果图件按电力行业规定，与安全有关的应严格执行相应的国家或行业标准。

## 5 物探方法与技术

### 5.1 一般规定

5.1.1 物探仪器设备以电子仪器为主，根据物探工作的特点，重点对保管、运输、检验、检查等重要环节作出相应规定。

5.1.2 该规定主要是为选择物探方法而作的准备工作，也对选择方法技术和进行资料解释起到一定的指导作用。

5.1.3 由于物探方法观测系统参数、仪器工作参数都具有一定的范围，这些参数与探测效果和分辨率密切相关，工作前进行试验就是选择方法、技术参数，具体试验应依据方法、任务特点按本标准第5章各物探方法的具体要求进行。试验方案可以在技术大纲中制定。

#### 5.1.4

1 老规程对物探测线网的规定来源于地矿调查的相关规定和要求，而水电水利工程的勘探和检测要求较地矿精确得多，所以本标准对测网布置作了更灵活、更具有目的性的规定。

2 测线垂直于主要探测对象的走向是为了取得最明显的异常反映；测线与勘探线和其他物探方法测线重合是为了取得解释所需的参数、提高资料解释精度。

3、4 为保证异常的完整性、避免因单一异常点造成假异常判断，规定测点距和线距在出现异常时，应加密测点和延长测线。

#### 5.1.5

1 背景包括人工或天然的电磁场、电流场、声波和震动波、放射性等，信号指来源于激励场或源的信号，要求背景安静和信号稳定均是为了保证较高的信噪比和观测精度。

2 在这几种情况下最容易出现假异常数据。

3 5%检查量是在异常较少情况下，异常越多，检查观测量应越多。

4 异常点、突变点、可疑点应重点检查，但一般测点也应有相当数量的检查点。

5.1.6 物探记录是工程物探重要资料，存在于整体工作过程之中，是联系现场测试、数据处理、资料解释的重要纽带。本条规定了记录的范围、名称、主要内容、形式等。其中最核心的是现场班报记录，因仪器智能化程度越来越高，对电子和媒体记录作了规定。

5.1.7 物探原始资料质量合格是物探成果合格的必要条件。

5.1.8 物探具有多解性，解决的办法主要有排除法、综合物探法。排除法要收集地质资料，成本相对较低；在没有可利用的地质资料时，只能选用综合物探法。

物探图件总体包括工作布置图、物探成果图、物探成果地质解释图。物探成果图是指利用物探测试或经计算处理的数据、波形、图像、曲线绘制的剖面图、平面图等；成果解释图是指以物探成果为主绘制的地质平面或剖面图。有时这两个图是合在一起的，上部绘物探成果图，下部绘成果地质解释图，综合测井、声波测井、平洞连续地震波等图宜在钻孔柱状图或平洞地质展示图基础上绘制物探成果。

## 5.2 电 法 勘 探

### 5.2.1

与 DL 5010—1992 相比，增加了高密度电法、可控源音频大地电磁测深和瞬变电磁。各方法应用情况如下：

电测深法可用于分层探测、局部电性异常体探测、岩土电性参数测试等。分层探测包括：覆盖层和地层岩性分层、风化分带等；电性异常体包括：构造破碎带、喀斯特、洞穴等。

电剖面法可用于探测具有一定走向的电性异常体，具体包括：

构造破碎带、岩性分界线、喀斯特、洞穴等。

高密度电法具有电测深和电剖面的双重特点，探测密度高、信息量大、工作效率高。

自然电场主要依据地下电化学和流场作用产生自然电场，所以工程中主要用于探测地下水流速流向，也可用于金属管道、桥梁、输电线路铁塔等的腐蚀情况，自然电场法还可用于探测地下水流向和防渗线探测。

充电法可用于测试地下水流速流向，也可用于探测低阻目的体的分布情况。低阻目的体包括：黏土或水充填的喀斯特洞穴、含水断层破碎带等。

激发极化法应与电阻率法配合使用，用于地下水探测。探测地下水主要通过探测含水的古河道、古洪积扇、喀斯特、构造破碎带，确定含水层埋藏深度，评价含水层的富水程度。

可控源音频大地电磁测深法和瞬变电磁法的应用范围与高密度电法相同。可控源音频大地电磁测深仪器因场源不同，探测深度和近地表盲区存在较大差异，特点是探测深度较深，当地表覆盖层电阻率较低时，也可用于探测浅部。瞬变电磁的主要特点是不用电极。探测的具体对象包括：隐伏断层破碎带、覆盖层、地下古河道、喀斯特、洞穴等，可用于防渗线探测、地下水和地热源探测等，也可进行分层探测。

### 5.2.2

电法勘探各方法均建立在一定的物理前提下，依据各种方法的物理特性、装置特点规定其适用条件或不适用条件。

### 5.2.3

电法勘探仪器较多，鉴于当前仪器呈现的自动化、智能化、多功能等特点，本标准主要对常用的直流电法、可控源音频大地电磁测深、瞬变电磁三类仪器的主要功能和指标作了规定。

### 5.2.4

物探测线网布置的核心内容是测线方向、测点距、线距，

目的是采用合理的工作量和测网密度，有效地探测出任务要求的地质异常。规定测线垂直构造是保证异常明显，规定线距和点距是保持探测精度，也考虑异常在图纸上的表示精度。对于电法勘探而言，相对平缓的地形与水平地形相近的物理意义基本一致。

### 5.2.5

试验工作一般涉及供电电流、供电时间、相应地层露头电阻率测量等，装置形式、电极距、点距和跑极方向多在踏勘和大纲中已确定。

### 5.2.6

1 四极装置和三极装置使用最多，偶极装置使用很少。近年来有些单位使用二分量装置，其实质就是在某一种电法装置下进行二分量测量。

2、3 电测深法的供电电极距分布依据平行电性层中电流场最大能流分布与电极距关系，同时考虑到量板法解释精度，当局部存在电性异常时，电流场分布规律也相应改变，应加密供电电极距。测量极距以保证测量精度为准。极距误差以不小于测量误差为准。

4 采用十字测深及环形测深是了解探测区电性的各向异性分布情况，以及对电测深曲线的影响。

5 漏电会完全改变测量数据，造成数据严重错误。

6 采用一个半周期的供电测量是美国等西方国家仪器普遍采用的规则，提高测量精度。重复观测是确认当前数据的一种方式，一般应改变供电电压或改善电极接地条件。

7 各极允许误差的数据是依据误差理论，误差正态分布统计表明：大于一倍误差出现的机率是 32%，大于 2 倍误差出现的机率是 4.6%，大于 3 倍误差出现的机率是 0.3%。实际上，当前很多仪器都有对各种测量数据误差计算、评价的功能，也给出了一些参考指标，本标准规定误差是由测点至测线再到测网，采用三级控制。

## 5.2.7

电剖面的供电极距应考虑异常幅值与背景值之比，异常幅值与电性异常体的埋深、产状和几何形态有关，探测深度一般系指电性异常体顶界面距探测表面的深度  $h_1$ ，在此相应深度的异常强度不低于 10%~15%，与该深度相对应的供电极距采用  $2h_1/AB$ （对称法）、 $h_1/AO$  ( $h_1/OB$ )（三极法）及  $h_1/OO'$ （偶极法）较合理。当电性层电性差异明显时 ( $\mu_2 \geq 10$ )，最大深度与供电极距的关系见表 1。

表 1 最大深度与供电极距关系表

基本地电体的类别	$2h_1/AB$	$h_1/OO'$ , $h_1/AO$
两种各向同性介质接触面	0.6	0.55
大厚度的非导电层	0.55	0.50
中厚度的非导电层	0.45	0.40
小厚度的非导电层（垂直向）	0.25~0.30	0.20
小厚度倾斜非导电层	0.30~0.40	0.25~0.35
水平非导电圆柱体 ( $D > MN$ )	0.20	0.15
非导电球体 ( $D > MN$ )	0.15	0.10
小厚度导电体	0.60	0.60

## 5.2.8

本条规定与电测深法相似。高密度电法数理模型仍依据电阻率勘探理论，其主要特点是观测点密度高、信息丰富。高密度电法的电极较多、测量时间长，装置正确选择、电极接地良好和连接正确是测量的基础。采用高密度装置进行检查观测不符合试验数据的检查测量要求，所以规定可进行 1 至 2 层的重复观测，检查观测可采用散点观测。

## 5.2.9

自然电场可随时间、天气、季节变化，且幅度较大，稳定性较差，所以测量精度使用绝对误差和平均绝对误差评价较合理。

### 5.2.10

充电法与自然电位法观测方式相似，与自然电位法相比，充电法的电位或梯度值较稳定、但各测点观测的差值较小，电位梯度观测法分辨率相对较强，且数值有正有负，异常分辨较困难，一般用来定性圈定电性低阻体形态，所以重复观测和检查观测的误差较 DL 5010—1992 降低。

充电法测地下水流速流向操作要求：

- 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 置于孔内水层的中部，和纱布食盐袋串在一起。测量 N 极离孔口的距离应大于充电电极 A 放入深度的 1.5 倍，电极 N 至钻孔孔口的方向应与估计水流方向一致。
- 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位圈，以修正 N 极位置，并重新测试等位圈作为新的基准点。以后每隔一定时间（视含水层流速而定，一般为 20min~30min）测量一次等位圈。每一井孔在投盐后测量的等位圈应不少于 3 个。
- 5) 等位圈测量时，应记录测量时间、测量各等位点至孔口的距离。
- 6) 可采用两个不同距离的固定测量电极  $N_1$  和  $N_2$  测量。

充电法探测低阻体要求：

- 1) 无穷远极 B 离供电电极 A 的距离应大于低阻目的体埋深或延伸长度的 10 倍。供电电极 A 应与低阻目的体接触良好。
- 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 的距离应大于低阻目的体埋深或延伸长度的 10 倍；用梯度法观测时，测量电极距为 5m~10m。



### 5.2.11

激发极化一般用于探测地下水潜水面，埋藏较深。为保证产生明显的二次电场，供电电流较电阻率法大得多、供电时间也较电阻率法长。由于当前用于激发极化的仪器均是多功能电法仪，一次测量可同时取得视电阻率、视极化率、视激发比、视衰减值、半衰时等数据，一个激发极化点的重复观测、检查观测和评价是对 4 个激发极化参数同时进行。

### 5.2.12

1 可控源的场源一般由仪器决定，有的仪器也可选用多种场，当前水电水利系统使用的仪器主要有 3 类：GDP 系列、WAVE 系列和 EH-4，前两种为多功能电法仪，主要采用电偶极子发射，后者为功能单一的磁偶极子可控源与天然源相结合的电磁测深仪器。

电偶极子场适用于探测数百或数千米深度范围，磁偶极子场适用于探测 1000m 深度范围，天然场一般用于补充人工场的低频段。可控源测量可进行多种测量方式，一般采用电场二分量或四分量，同时进行相应磁分量测量，其他测量方式不宜在水电水利工程中采用。根据电磁集肤效应原理，近场存在场源干扰，浅表部存在一定盲区，远场激励场信号较弱，而电偶极子场轴线平行地面，还存在方向盲区，所以对观测范围进行规定。

3、4 当前使用的仪器都具有完善的功能，数据曲线检查和评价都可在现场进行，几条曲线的质量相关。

### 5.2.13

瞬变电磁的线框装置还有几种，但不适用于水电水利工程勘探，其中使用最多的是重叠回线装置。异常分辨率除与回线边长  $L$  有关外，还与被探测的地质条件有关，增大回线边长可以增大发射磁矩、提高接收线圈的灵敏度、激励异常幅值，同时也增加了包括地下旁侧目的体干扰、外部电场干扰，干扰信号增大的速

度有时甚至超过有用信号，因此，工作中应通过试验工作，综合考虑各种因素，合理选择回线长度。理论条件下，回线边长  $L$  与良导球体埋深  $h$  的比值  $L/h=0.9\sim 1.5$  时，所得到的响应值大于  $0.8U_{\max}$ ，因此，推荐选择回线边长约等于探测目的体的极限深度，对于其他形状的良好导电目的体也是适用的。模拟实验的结果表明，即使是取  $L/h=0.5$ ，对于线性规模与回线边长相近的良好导体也能够有把握地被探测出来，规定  $L=0.5H_{\max}\sim 1H_{\max}$ 。

球体异常的明显程度决定于球体与周边介质导电率的比值和球体的规模。球体综合参数较大或周边介质电导率较低时，也可在中、晚期显示出以球体异常起支配作用的响应，从而造成时间窗口范围延续加宽。时间窗口范围的选择取决于测区内诸多复杂的因素，因此，规定“时间窗口”应通过试验工作确定。

观测时间范围和叠加次数是相互矛盾的，采用较长的时间范围，可以记录更多的信息，但由于仪器均存在噪声电平，过长的记录会影响晚期道的质量；多次叠加是瞬变电磁仪采用“累加平均”取数技术提高信噪比的一种方法，减少叠加次数可以提高观测速度但降低了信噪比。因此，在通过试验工作确定“时间窗口”的同时，还应确定叠加次数的范围。如果选定了时间范围，但在实际观测中遇到衰减很慢的异常，则应即时延长时间范围重复观测。在低阻区工作时，时间范围可扩大 2 倍~5 倍。

工区的噪声电平影响仪器的最小可分辨电平，为了保证晚期观测值的观测精度，必须在每个测点上或相间几个测点上实测干扰电平，以检查仪器晚期信号的可靠性。

由于瞬变电磁易受干扰、测量时间较快，重复观测工作量相对于电法的其他方法大很多，一般重复观测量都在 100% 以上。当前的瞬变电磁观测仪一般都能在测后自动显示当前点测深曲线和数据，质量评价内容主要是曲线形态和一致性。

#### 5.2.14

电测深解释一般根据工作内容和要求进行，分层探测应进行

分层解释，局部异常探测进行异常识别和解释。分层解释涉及深度和层厚的定量参数，一般应先确定各层的电性参数，当前一般采用单点人机交互式正反演，使用量板法的越来越少。局部异常解释一般用于断层破碎带、洞穴等探测，多采用视电阻率断面内异常识别，根据供电极距估计异常深度。较少采用双向三极测深工作中，该装置异常较复杂。除物探成果地质解释图外，物探剖面成果图与解释工作呈交互形式。

#### 5.2.15

各种装置下单一形态的异常体均对应一种曲线类型，曲线类型的形态、特征点与异常体形态、产状、规模间存在对应关系。异常体埋深多依据供电极距估算。电剖面法的解释与物探剖面成果制图工作呈交互形式。

#### 5.2.16

高密度电法的剖面图有两种：一是视电阻率断面，二是经反演处理得到的二维电阻率图像。当异常幅值明显、埋藏较浅时，也可从视电阻率断面图中进行解释；视电阻率断面图很难反映幅值较弱、埋藏深的异常，应经层析成像反演处理，才能进行解释。高密度电阻率层析成像处理软件较多，当前仪器厂家均能提供并能即时下载。

#### 5.2.17

自然电场探测低阻体时，可以从测量的剖面曲线形态和特征点推断解释低阻体位置、产状和极化情况，这些均依据试验室模型试验。面积性测量可根据等值线异常分布情况进行解释。测地下水流速流向时，电位梯度环形法的观测值可以绘制成极形图，产生极形图是因为电位差在水流方向较大，而在水平方向为零，故极形图呈“8”字形。

#### 5.2.18

DL 5010—1992 中 3.1.4.32 规定的在钻孔中利用充电法监测滑坡体一款使用较少，在此删除。充电法探测低阻体的解释与自

然电场法相近。钻孔中充电测量地下水流速流向是利用地下水流动造成电解晕顺水移动扩散，可在地表观测电位变化。

充电法探测地下水流速流向资料处理操作要求：

- 1) 可用不同比例尺绘制等位线图起始等位圈  $R$  (充电点  $A$  在地面的投影  $O'$  至起始等位圈的距离) 和等位圈增量  $\Delta R$ ，以清楚反映出等位圈变化特征为宜。
- 2) 井孔中心到等位圈移动距离最大的连线方向定流向，并以相邻等位圈位移增量  $\Delta R_i$  与相对应的时间间隔  $\Delta t$  之比为流速。
- 3) 测出各相邻等位圈的变化速度，编制等位圈变化速度与时间关系曲线图，取速度曲线趋近于某一稳定值  $v$  作为含水层孔隙地下水流速。
- 4) 由向量合成的最大伸长方向确定流向，在流向方向上以伸长距离  $R$  与所对应的  $2\Delta t$  之比为流速。
- 5) 方位角与位移  $\Delta R$  关系曲线图：以射线方位角  $\alpha$  为横坐标，盐化后射线上等位圈增量  $\Delta R$  为纵坐标，绘制  $\Delta R = f(\alpha)$  曲线图。 $\Delta R$  最大值所对应的方位角  $\alpha$  为流向； $\Delta R$  与对应时间间隔  $\Delta t$  之比为流速。

### 5.2.19

水电水利工程中，激发极化法主要用于探测地下水，而实际上，引起激发极化最强烈的是一些特殊矿体，因此，激发极化法一般与电阻率法一同测试，解释时相互补充。激发极化法找水解释除注意矿体影响外，不同地区背景值和有水异常幅值存在差异、曲线形态特点不同。

### 5.2.20

当前水电水利系统使用的可控源仪器都从美国进口，都附带了较完善的处理和解释软件，测深曲线只在现场检查数据质量时使用，数据平滑插值和校正只对测深曲线进行，应用时应作处理前后的成果对比。反演软件直接作二维反演处理并得到二维视电

阻率断面，当进行张量测量时，可反演出对应的二维视电阻率剖面。当前水电水利系统使用的 GDP、WAVE、EH-4 三类仪器的二维反演软件计算的视电阻率接近地层的真电阻率或与地层真电阻存在类比关系。

在此指出：电阻率法测量的视电阻率值、可控源二维反演的视电阻率值、瞬变电磁法二维反演的视电阻率值存在差异，具体情况参考相应的专著。

### 5.2.21

当需要消除单条测深曲线上的干扰电平时，可进行滤波处理，滤波可选择三点自相关滤波或数字滤波。

瞬变电磁的测量和解释基本与可控源大地电磁测深情况相似。但瞬变电磁二维反演的视电阻率存在随时间增大而发生畸变的可能，通常采用视电阻率测深曲线特征点及渐近线推断目的层参数，也可利用视时间常数、视纵向电导作补充解释。

## 5.3 探地雷达法

### 5.3.1

探地雷达根据当前和以后几年可能的技术发展，可分为脉冲和相控，相控又分为线控和阵控。当前主要为脉冲雷达，脉冲雷达的工作方法主要依据天线的形式和观测方法而定。本标准主要依据脉冲雷达的天线布置和工作方式而作的规定。

多剖面法是由多通道探地雷达设置和连接的多个天线组成的。

探地雷达在水电水利领域主要用于勘探和工程质量检查，在其他领域还有广泛应用，如考古等，具体应用包括：

剖面法较适宜于探测浅埋藏的喀斯特、洞穴、构造破碎带、层间构造带、岩性分界面，也可用于浅部分层和土层内部浅埋藏洞穴、孤石、人工管线、疏松层等的探测。可检测道路路基或面层质量；检测地下洞室混凝土衬砌厚度、脱空、密实度；检测隐藏的锚杆数量；检测混凝土内部缺陷、配筋、预埋件等。

透射法和孔中雷达可探测孔（洞）四周或孔（洞）间的喀斯特、构造破碎带、层间构造带等。

宽角法主要用于测试介质电磁波速。

多天线法用于路面或隧洞衬砌质量检查。

### 5.3.2

探地雷达的应用条件主要考虑以下因素：目的层或目的体与周边介质电性差异程度、埋藏深度、规模大小，测深的地质条件、环境条件。

2 要求探测对象的垂直厚度大于电磁波在相应地层中有效波长的  $1/4$ ，是因为当探测对象的厚度较小时，两相邻界面产生的反射波时差过小、相互干扰而难于识别异常。

5 雷达天线一般并非完全屏蔽，在天线连结一侧会接收干扰电磁波信号而产生假异常。

### 5.3.3

所规定的技术指标都是脉冲雷达，脉冲雷达提高探测质量一般采用多次叠加功能，同时必须保证一定的模数转换精度和扫描速度，才能保证叠加信号的可靠性。

### 5.3.5

采用点测时，天线中心频率为  $f$  (MHz)，周边介质的相对介电常数为  $\epsilon$ ，尼奎斯特采样点距  $n_x$  (m)  $= 75 / f \sqrt{\epsilon}$ ；采用连测时，天线的最大移动速度  $v_{\max}$  宜满足：

$$v_{\max} < (\text{扫描率}/20) \times (\text{天线宽度} + \text{探测对象规模})$$

### 5.3.6

2 由于探测地层电阻率变化范围较大，为保证深度不超出时窗，应适当估计最大埋深和低电阻率的情况。正常情况下，最大时窗设置宜使目的层位于时窗的  $2/3$  位置，便于波的对比和避免出现深度或物性变化。

4 采样率由尼奎斯特采样定律控制，按照该定律对采样率进行选择的要求，至少应达到天线中心频率的 6 倍。当天线中心频

率为  $f$  (MHz), 采样间隔  $\Delta t$  (ns) 可由  $\Delta t = 1000/6f$  估算。

### 5.3.7

深度和分辨率互为矛盾, 天线选择应综合考虑探测深度与分辨率的关系: 为保证探测深度, 埋深较深、被探测目的体规模较大、上覆介质电导率较高, 宜选择频率较低的天线; 为保证分辨率, 埋深较浅、被探测目的体规模较小、上覆介质电导率较低, 宜选择频率较高的天线。

### 5.3.10

经验参数适用于风化程度一致的同类岩性。

### 5.3.11

探地雷达采集的是图像, 检查时只能作图像对比, 对比内容为波形同相轴、异常范围、形态和位置的相似程度。

### 5.3.12

水电水利系统内一般使用的是从美国、加拿大、瑞典等进口的仪器, 本标准规定的处理方法基本都是随仪器一起的软件具有的功能。所有处理结果应与原始资料进行对比。

### 5.3.13

雷达资料解释与浅层地震反射资料解释相似, 但应注意强吸收体形成的异常。

### 5.3.14

探地雷达工作效率高、工作量大、特别适用于隧洞等工程检测, 图件可只对异常典型图像分析解释。

## 5.4 地 震 勘 探

### 5.4.1

本次修订仍将浅层反射波和折射波列为地震勘探的主要方法, 由于瑞雷波法的技术发展已趋成熟, 并在近年来得到应用, 将其列入本标准。地震勘探各方法具体应用包括:

浅层折射波法常用于探测覆盖层厚度和基岩面起伏形态, 探测

隐伏构造破碎带以及测试岩土纵波速度，也可用于覆盖层分层和风化带、滑坡体厚度探测。不宜探测高速屏蔽层下部的地层结构。

浅层反射波法可进行地层分层、探测隐伏构造、滑坡体、风化带等。不受地层速度逆转限制，可探测高速层下部地层结构，划分沉积地层层次和探测有明显断距的断层。一般情况下，宜选用工作效率高、探测深度较大的纵波反射法，当进行浅部松散含水地层分层探测时，宜选用具有较强分层能力的横波反射法。

瑞雷波法可进行浅部覆盖层分层，也可进行地基分层和力学参数测试，饱和砂土液化判定，地基加固效果评价等。

#### 5.4.2

2 浅层折射波法被追踪地层要具有一定厚度，中间层厚度不宜小于上覆层厚度，这是因为对于三层介质的地质断面，虽然满足  $v_1 < v_2 < v_3$  的波速条件，但当中间层较薄（如  $h_2 \ll h_1$ ）时，折射波时距曲线上往往只出现  $v_3$  层的斜率，而  $v_2$  层的折射波不能在初至区显示出来，出现所谓中间层“隐蔽”现象，即漏掉了中间“薄层”。被漏掉中间层的最大厚度（称为最大隐蔽层厚度）与上覆层厚度以及上下层波速比有关，一般当  $h_2 \leq h_1$  时有可能成为“隐蔽层”。当被追踪地层视倾角与临界角之和大于或等于  $90^\circ$  时，在地面均不能接收到折射波，因此，当用浅层折射波法探测高倾角目的层时应合理选择测线方向。

3 浅层反射波法被追踪地层应具有一定厚度，其厚度应大于其有效波长的四分之一，即  $h > \lambda/4$ 。这是因为  $h$  较小时，两相邻界面产生的反射波时差过小会发生严重的干涉现象而难于识别。模型试验表明，垂直方向上反射波法的最高分辨率可达到  $h = \lambda/8$ ，实际工作中仅能达到  $h = \lambda/4$ ，因此，提高反射波法的垂直分辨率的首要办法是提高震源频率。

#### 5.4.4

由于地震勘探的观测系统、仪器参数、震源能量与一个工区的地质条件存在很大关系，也影响勘探精度，所以，当一个工区



的地质—地球物理条件不明时，应先进行试验工作。

#### 5.4.5

为保证转折的测线能够独立解释：

- 1) 浅层折射波法当转折角度超过  $15^\circ$ ，地面条件允许时，应在转折点上以及转折测线的外延长线上补充相应的激发点。
- 2) 浅层反射波法进行单次覆盖观测测线转折角超过  $15^\circ$ ，地面条件允许时，应在转折测线的外延长线上补充一个偏移距长度的剖面测量；进行多次覆盖工作时，最大转折角不应超过  $8^\circ$ 。若因测线转折影响叠加效果，应采用弯线叠加方法或当地面条件允许时，可在转折测线的外延长线上补充一个偏移距长度的叠加剖面。

#### 5.4.7

2 采用单支时距曲线观测系统时，沿测线方向的岩层界面与地面的夹角应小于  $15^\circ$  的规定，是针对求界面深度的精度而言的；若用于求基岩界面速度，则岩层界面与地面夹角应小于  $5^\circ$ ，才能保证所求界面速度的精度。

采用单重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 个检波点有效接收折射波的规定，是为了保证观测成果的可靠性和追踪界面的连续性。若检波点过少则可追踪段过短，连续研究界面的程度也差，尤其对界面速度的测试精度影响更大。

采用追逐时距曲线观测系统时，应保证追踪地段内至少有 4 个检波点有效接收折射波的规定，是为了确保时距曲线平行性辨别的可靠性，当被追踪段的检波点数过少时，将降低波性质辨别的可靠性。

4 瑞雷波探测深度应限制在一个波长以内，偏移距和检波点距较小时有利于探测浅部信息，反之，为了获得深部信息，则应增大偏移距和检波点距。

#### 5.4.8

7 水域地震勘探工作的测点高程是以当时的水边线高程计

算的，需及时测量，否则不能及时计算基岩顶板高程。

8 对仪器滤波档进行规定，是为了提高有效波对比的可靠性。记录波形、振幅和视周期是地表激发、接收条件（包括仪器工作因素）以及深部地层岩性和构造的综合反映。其中滤波档对记录道的波形、振幅和视周期也有一定影响，只有仪器工作因素（包括滤波档）相同时，各记录道的波形、振幅和视周期的变化才是岩性和构造变化的客观反映。所以各记录道之间应具有相同的滤波档是波对比的前提之一。但当生产中遇到局部地段的记录质量变差，根本无法进行波的对比时，显然此时改善记录质量是第一位的，滤波档改变的负面影响是第二位的，所以应做补充试验，选定仪器新的工作因素或改变工作方法，以求改善记录质量。

#### 5.4.9

测试速度参数时，测段长度需根据岩体的完整程度和仪器的读数精度确定。应保证在测段内的纵波传播时间为仪器可读数精度的 5 倍以上，测段长度不宜小于 10m。宜采用单支或相遇时距曲线观测系统，检波点距应不小于 2m。仪器工作因素宜使用高采样率、小记录长度（如采样间隔为 0.025ms，记录长度为 25ms）。采用 100Hz 高频检波器接收。

采用相遇时距曲线观测系统时，根据  $\theta(x)$  曲线的斜率确定岩体波速，可消除岩面起伏和各道检波器安置条件不同造成的误差，与单支时距曲线相比有较高的解释精度。

#### 5.4.13

相位校正：浅层折射波法旅行时应尽量读初值，当初值不明显时，应尽量读第一相位极值并进行相位校正，相位校正时间为极值与初值之间的时差即  $T/4$ ，校正值为负数。

反射波法宜采取相位读数。正相位起跳时，通常读第二相位正极值，相位校正值为  $5T/4$ ；负相位起跳时，通常读第一相位正极值，相位校正值为  $3T/4$ 。宽角接收时，反射波会产生相位移（变

化范围  $T/4 \sim T/2$ ), 相位校正时应考虑相位移。

#### 5.4.15

5 只有在近似水平层状介质、地表与界面起伏较小、且速度横向无明显变化时, 各层折射波时距曲线才近似为直线状, 才能依据折射时距曲线的延长线求得较可靠的截距时间。单支时距曲线用截距时间法和临界距离法求折射界面深度时, 允许界面倾角不大于  $15^\circ$ ; 但依据折射波时距曲线的斜率求界面速度时, 界面倾角应小于  $5^\circ$  才能保证必要的精度。

$t_0$ 法计算界面深度的公式  $h = v_1 t_0 / 2 \cos i$ , 是建立在接收三角形  $ABC$  为等腰三角形的基础上的 (见图 1)。界面起伏过大 (在  $BC$  两点之间不能视为平面) 或界面速度变化剧烈造成  $B$ 、 $C$  点出射角不相等, 使计算精度降低。

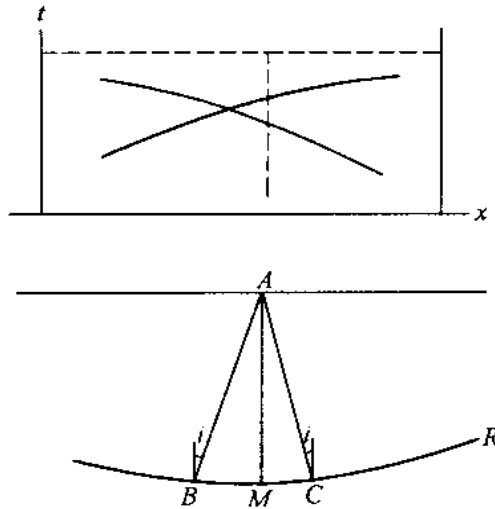


图 1 地质界面深度计算示意图

依据  $\theta(x)$  曲线求基岩界面速度时, 要求界面倾角  $\varphi$  不大于  $15^\circ$ 。界面速度计算公式为:

$$v_j = \frac{2\Delta x}{\Delta \theta} \cos \varphi \quad (1)$$

式中:

$\Delta x / \Delta \theta$ —— $\theta(x)$  曲线斜率的倒数。

通常界面倾角值是未知的, 实际上常使用  $v_j \approx 2\Delta x / \Delta \theta$  求界面速度, 当  $\varphi$  大于  $15^\circ$  时误差将增大。

$t_0$  法最适宜于解释 2 层结构, 也可用于解释 3 层和 4 层结构, 一般是将所要求的折射界面以上的多层介质视为速度等于有效速度的均匀介质, 然后按照 2 层结构的解释方法进行。 $t_0$  法构制界面的精度, 主要取决于所选用的有效速度的准确性以及低速带校正的准确性。如由于低速带厚度变化引起有效速度变化时, 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。

延迟时法的应用条件与  $t_0$  法相同, 但要求对各折射界面的相遇时距曲线分层求解, 可减弱低速带厚度变化的影响, 在有效速度变化大的测区比  $t_0$  法有较高的解释精度和分层能力。

因为时间场法的折射界面位置是根据两相遇滑行波的旅行时之和等于互换时间这一基本理论确定的, 受界面起伏和界面速度变化的影响较小。时间场法是一种比较精确的解释方法, 适宜于 2 层结构界面。

共轭点法的应用条件与时间场法大致相同, 区别是时间场法允许地表有一定起伏, 而共轭点法要求地表较平坦。

## 5.5 弹性波测试

### 5.5.1

弹性波测试方法, 有声波类和地震波类两种, 虽然两种方法都是以弹性波在岩体内的传播特征为理论依据, 但由于各有特点, 可以相互补充, 但不能彼此取代。单孔声波和声波测井是有区别的, 单孔声波主要是声速度动力学参数测试, 每个测点都有独立的测试波形, 声波测井包括声速测井、声幅测井、全波列测井, 其结果是测井曲线, 每个测点无独立的波形。方法具体应用包括:

单孔声波和穿透声波可用于测试岩体或混凝土纵、横波速度和相关力学参数，探测不良地质构造、岩体风化卸荷带、洞室松弛圈，检测建基岩体质量及灌浆效果等。

表面声波可用于大体积混凝土、基岩露头、探槽、竖井及洞室的声波测试，评价混凝土强度和岩体质量。

声波反射可用于检测隧洞混凝土衬砌质量及回填密实度、检测大体积混凝土及其他弹性体浅部缺陷。

脉冲回波可用于地下洞室明衬钢管与混凝土接触灌浆质量检测，也可用于混凝土内部严重缺陷检测。

地震测井可用于地层波速测试，确定裂隙和破碎带位置。

穿透地震波速测试可用于测试岩土纵、横波速度，圈定大的构造破碎、风化、喀斯特等波速异常带，也可检测建基岩体质量和灌浆效果。

连续地震波速测试可用于洞室岩体、基岩露头、探槽、竖井等纵横波速度测试，也可测试建基岩体质量、划分风化卸荷带。

各方法的区别和特点如下：

单孔声波、穿透声波、表面声波与相应地震波相比，应用范围大致相似，均可用于划分风化卸荷带，检测灌浆效果，检测建基岩体质量。区别在于：

地震波频率低，适用于较大规模低速异常带的划分，对细微点难有反应，因此不适合进行混凝土缺陷、松弛圈和软弱夹层判定。

地震波测试点距大，波速具有明显的平均效应，因此主要用于不同岩性地层波速的测试。

### 5.5.2

当套管的声波速度比孔壁岩体波速高时，进行单孔声波时测到的是套管的折射波；但在两孔间对穿时，高速套管相对孔间岩土层来说，影响极小。

声波反射与脉冲回波均以存在波阻抗差异为前提进行浅部缺

陷检测，相对来说，脉冲回波要求两个回波反射面为波阻抗突变面，且差异较大。

### 5.5.3

根据近年来国内生产和使用的地震、声波仪器的主要技术性能而规定，其中主要增加了对数字声波仪的功能和参数的规定。声波反射和脉冲回波的仪器和接收探头与进行声速测试的仪器具有较大差异，使用时必须按规定选择。

### 5.5.6

1 在有孔液的单孔中进行的一发双收或多收测试类似于浅层折射波法的观测系统，可以有效地解决探头扶正、孔壁低速层等造成的测试误差问题。

4 声波反射应以有效接收和识别反射波为目的，脉冲回波是以有效激发和接收由内部缺陷产生的回波信息为目的。

## 5.6 层析成像

### 5.6.1

鉴于层析成像在水电水利系统中的广泛应用和取得的效果，本次修订特将其作为一节。本标准规定的层析成像仅限于射线类层析成像。方法的具体应用包括：

声波 CT 适用于岩土体或混凝土体的声波速度成像，可进行目的体探测、岩体或混凝土体质量检测、灌浆效果检测等。

地震波 CT 适用于岩土体地震波速度成像，可进行岩体质量分级，圈定构造破碎带、裂隙密集带、喀斯特等波速异常体，检测坝基开挖质量检测及固结灌浆效果等。

电磁波 CT 适用于岩土体电磁波吸收系数或速度成像，圈定构造破碎带、风化带、喀斯特等具有一定电性差异的目的体。

### 5.6.2

超声波具有频率高、波长短的特点，能分辨规模较小的异常体，传播距离较短，主要用于混凝土构件（梁、柱、基桩等）、坝

基开挖、灌浆质量检测等。地震波的频率较低，波长长、穿透距离远，能分辨规模较大的异常体。采用超磁致或电火花作震源、声波仪和声波探头接收的 CT，穿透距离和分辨率介于上述两者之间，定义为声波或地震波，本标准将其列入声波范畴。

电磁波吸收系数 CT 是利用岩体对电磁波的能量吸收系数进行成像，频率范围在 0.5MHz~32MHz，频率越高，分辨率越高，但穿透距离越近。近年来随着探地雷达的发展，可用井中雷达天线作孔间电磁波速度 CT，频率在 100MHz 左右。

### 5.6.3

CT 仪器是能够进行孔间或洞间对穿的物探仪器，只要满足能量有效穿过、多次覆盖扫描、扫描精度一致即可。

### 5.6.4

1 CT 剖面宜垂直于地层和构造走向，是为了避免射线在断面外绕射而导致降低对低速、高吸收系数异常的分辨率。

2 声波 CT 包含了超声波仪器和声波仪与外触发振源组成的探测系统，所以孔距限定较宽。

### 5.6.5

在实际工作中，观测系统严格满足 CT 理论要求的很少，一般是在两孔间作 CT，所以两边观测系统的情况最多，条件允许的情况下宜作三边观测，但要注意绕射和各向异性问题。

### 5.6.6

1 部分规定是从减少或避免孔内安全事故的角度考虑的。

2 电磁波吸收系数 CT 随着频率的增高，介质的吸收系数变大，透射距离因之变小，在孔距大或周边介质的吸收系数较高时，宜选用较低的工作频率。探测目的体规模较小时，宜选用较高的工作频率。选择的原则是在有效穿透的前题下确保最高分辨率，同时避免产生绕射现象。

### 5.6.7

与弹性波测试相比，CT 的观测数据量较大，且数据的关联程

度较高，畸变数据对成像结果影响较大，所以，要求对扫描数据进行检查和评价，也可事先确定与数据检查相关的观测系统，保持在观测过程对互换观测数据进行检查。

### 5.6.8

当前 CT 软件较多，大多数由各使用单位编制，本标准规定的各款是依据事件而定，即选择了处理方法就应按本标准规定的要求进行。

## 5.7 水 声 勘 探

### 5.7.1

水声勘探利用波的反射原理，发射探头向水底发射声脉冲，接收探头接收来自水底和地层分界面的反射波，随着测船的航行，可获得直观而连续的地层剖面记录。

### 5.7.2

1 在水库与河道探测淤积层时，由于淤积物主要为淤泥、黏土类物质，对水声勘探比较有利，不产生二次波，探测深度也较深，分辨率也高，可分辨出 1m 的地层。

探测水下覆盖层厚度，如不进行覆盖层分层时，要求覆盖层的反射系数愈小愈好，亦即透射系数越大越好，对于目的层（基岩面），则要求反射系数越大越好，这样可取得准确的覆盖层厚度成果。

3 如水底存在砂层和零星分布的卵砾石时，由于反射系数较大，可能产生二次、三次波，探测深度也将受到影响。如卵砾石粒径大于 2cm 或存在卵砾石层时，将产生散射现象，不易得到下部地层的记录。

4 由于水声勘探的仪器设备是安装在轮机船上工作的，对水深的要求可以随不同船型吃水深度而不同，同时发射探头和接收探头入水又得要有一定深度。船的载重量主要考虑与船的稳定性有关，同时要考虑船的长度能满足发射与接收探头两者之间的安置距离。



#### 5.7.4

水声勘探属高精度水上浅地层剖面探测，如探测横河剖面，可事先在河道或水库两岸对称敷设剖面桩，并测试坐标、高程及两桩之间的水平距离。

在坝址区的水声勘探剖面应尽可能与主要勘探线或坝轴线的地质勘探剖面重合，这样可以利用钻孔资料研究水声勘探剖面与地质勘探剖面的关系。

横河剖面沿两岸剖面桩布置，其中剖面线距的规定和辅以纵剖面是便于作有关成果平面图。

#### 5.7.5

1 当前一般采用 GPS 定位测量，当在狭谷地区，GPS 不能使用时，多以全站仪测量定位。

4 发射探头及接收器的安装位置的选定，应根据机船性能（吨位、船长、船宽、发动机等）及船型的不同情况而考虑。最好的安装位置是在航行中产生气泡和机器噪声（振动）最小，以及航行时的摆动等影响最小的地方。

噪声水平较高会限制放大器的放大性能，降低探测深度。发射与接收探头在船舷侧固定得不牢固时，由于震动将会发生更大的噪声。

发射机与接收机尽可能靠近记录仪安放，并使操作员处在沿测线具有良好的通视位置，便于操纵和控制仪器，作时间标记和观察作业情况。给仪器供电的发电机一般安置在船的尾部。要求操作室通风良好，是因为仪器记录时，记录纸表面的碳粉，通过热敏打火将挥发出一种有害气体，影响人体健康。

7 在勘测过程中调整接收灵敏度、选用和变换组合频率开关，是提高浅地层剖面分辨率的关键。

变换组合频率开关，可以选择所需要的接收频率。频率变换开关一般有低阻和高阻两种：低阻可通过比截止频率高的频率信号而阻止低频信号；高阻则相反。两者结合构成带通滤波器。由

于不同地层所使用的频率不同，应变换到接收频率能在记录纸上很好的表现地层的状态，并使地层记录浓度均匀。总之，勘测时所选用频率愈高，分辨率愈高，勘测深度则相应地减小。因此，强调分辨率时，采用高频率是合适的，如要观测到较深部地层时，则采用低频率是合适的。

### 5.7.7

1 水深小于 15m 需作路径校正，是因为发射探头与接收探头工作时形成的入射与反射角会造成误差，据统计小于 10m（当  $v=1500\text{m/s}$  时）误差为 0.5m，当大于 15m 时，误差为 0.2m~0.3m。

速度校正：一般情况下水下松散地层的波速在 1500m/s 左右（水下淤泥层一般小于 1000m/s，水下砂砾石的波速大于 1500m/s，但不能穿透），所以在缺少速度资料的情况下可用专用尺读取深度或厚度，一般不做速度校正。

## 5.8 放射性测量

### 5.8.1

放射性测量方法中增加了放射性气体测量和同位素示踪法。本标准规定的 $\gamma$ 测量包括 $\gamma$ 总量测量和能谱测量， $\alpha$ 测量包括氡浓度测量、 $^{210}\text{Po}$  测量、 $\alpha$ 卡测量。各方法具体应用包括：

$\gamma$ 测量和 $\alpha$ 测量可用于了解断裂破碎构造带、地下储水构造带、喀斯特的分布，也可用于研究岩体塌陷或滑坡等现象，环境放射性检测和监测等。

$\gamma$ - $\gamma$ 测量用于测量岩土体、人工地基、混凝土体的原位密度、湿度。

同位素示踪法用于测试地下水流速流向和渗透系数，了解地下水流场的形态及变化规律。

### 5.8.2

$\gamma$ 测量的是 U、Th、K 三种放射性物质释放的 $\gamma$ 射线粒子。 $\alpha$ 测量的是氡及其子体释放的 $\alpha$ 粒子，测量条件是氡气容易积累。

$\gamma$ 粒子衰减快，多在基岩裸露处测量； $\alpha$ 粒子容易富集在浮土中，也可富集在不流通的空气或水域中；同位素不能用于测量流速较快的管道水流。

#### 5.8.4

不同地区的测网密度可以不同，布置测网前应尽可能收集现有地质资料，测网可根据地质情况（如地质情况复杂、基岩埋深、构造破碎带的宽窄等）布置成网状、环状或十字形等。

坝址厂房区的地面氡浓度测量点布置应与地面物探剖面一致，测点距 10m~20m。地下洞室中氡浓度测量应沿洞室径向布置剖面，点距 10m，在洞室进口、转弯处、支洞口、洞底等部位都应布置测点，氡气浓度异常区，可加密测点。

#### 5.8.6

1 地面 $\gamma$ 测量通过罗盘定向、测绳量距、徒步听测、定点读数，测量中保持探头的测量几何位置一致。当沟内读数高、坡坎上读数低时，可将仪器提起在空中测量，以避免地形干扰。读数时应收集资料，记录地形、岩性、构造、水文地质、覆盖层等情况，便于室内综合分析。

4 应根据已有测井资料和任务要求选择测量点位，确定同位素投放量。每次仪器下井前应作地面本底和装源后底数记录。各点投放同位素后要做搅拌，使探测器周围同位素浓度趋于均匀。进行多点位同位素测量时，宜先深后浅，钻孔内具有多个含水层时，应采用钻孔分隔器分层测试。同位素测量完毕，应在现场清洗投放器及探测器。

#### 5.8.8

放射性测量资料解释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研究，了解异常的分布规律和特征，分辨异常性质，排除假异常干扰。

表示氡浓度的常用方式有三种：即氡浓度、平衡当量浓度和 $\alpha$ 潜能浓度，方式不同，使用的单位也不完全相同，因此，在使

用时应结合新的标准加以应用。

## 5.9 综合测井

### 5.9.1

本条规定的测井方法为水电水利工程勘测常用测井方法，除此之外，还有中子—伽玛测井、钻孔摄影等，极少使用，故暂未编入本标准。原规程中列出的声速测井，由于该方法不全面，不包括声幅测井，本次修订采用声波测井。原规程中列出的钻孔电磁波透视是一种包括单孔测井和孔间穿透的地下物探方法。本次修订把单孔测井编入本节，孔间 CT 编入 5.6 节。方法具体应用包括：

电测井主要用于划分地层、区分岩性，确定软弱夹层、裂隙和破碎带位置及厚度，确定含水层的位置、厚度，划分咸淡水界面，也可用于测试岩层电阻率。

声波测井主要用于划分地层、区分岩性，确定裂隙和破碎带位置及厚度，也可利用测试的声波速度与其他参数一起计算地层岩石的力学指标和孔隙度。

地震测井主要用于划分地层、区分岩性，确定破碎带的位置及厚度，也可进行地层波速测试。

自然 $\gamma$ 和 $\gamma$ - $\gamma$ 测井、磁化率测井均可用于划分地层、区分岩性，确定软弱夹层与裂隙和破碎带， $\gamma$ - $\gamma$ 测井还可以测试岩层密度、视密度和孔隙度。

钻孔电视观察主要用于划分地层、区分岩性，确定岩层节理、裂隙、破碎带和软弱夹层的位置和产状，观察钻孔揭露的喀斯特洞穴的情况；也可用于检查灌浆质量，混凝土浇筑质量，观察井下物体等。

超声成像测井主要用于确定钻孔中岩层、裂隙、破碎带、软弱夹层的位置及大致产状。也可用于检查灌浆质量和混凝土浇筑质量，粗测钻孔直径。

温度测井可用于测试含水层位置及地下水运动状态，还可测试灌浆和水泥固井时水泥回返高度。

井中流体测量可用于确定含水层位置及其厚度，测试地下水在钻孔中的运动状态和涌水量；在条件有利时，可估算地下水渗透速度。

电磁波测井或雷达测井可用于划分地层和破碎带，也可用于探查近孔壁的隐藏目的体。

井径测量可用于测试钻孔的井径变化，确定软弱夹层和破碎带位置。井斜测量可用于测试钻孔的倾斜方位和顶角。

每种方法的应用各有侧重，为取得更好的地质效果，应有针对性地选择几种测井方法进行综合测井。

### 5.9.2

电测井是利用岩层、目的体之间的电性差异、电化学的渗透过滤和扩散吸附特性进行地质单元划分的。各种电测井因观测装置不同各有特长。

声波测井是利用岩层声速、声幅的不同进行波速测试和地质单元划分的。井液作为耦合剂，在探头和井壁岩体间起传递声波的作用，若没有井液，声波测井将无法进行；当钻孔中有金属套管时，会产生高速屏蔽效应而失去了探测功效。井液与金属套管这两个因素，也同样限制了电测井的应用范围。

自然 $\gamma$ 测井是利用岩层放射 $\gamma$ 射线的强度不同进行地质单元划分的； $\gamma$ - $\gamma$ 测井则是利用岩层对人工 $\gamma$ 射线的散射作用进行地质单元划分的。由于 $\gamma$ 射线的穿透能力很强，可以穿过金属套管。井液与套管对其不起限制作用。

超声成像是利用井壁地层或目的体反射特性的差异，获得钻孔孔壁的展视照片。地层对超声波的反射特性是由波阻抗决定的，在照片上得到黑白程度不同的反映。

井中流体测量是利用钻孔流量计或人工投放溶质（盐或放射性同位素），测试钻孔中的流体运动速度（井轴方向或水平方向）

来寻找含水层，确定钻孔中含水层之间的补给关系，测量含水层渗透速度的一套测井方法，可作为在钻孔中进行水文地质参数测试的辅助方法。

电磁波测井是利用岩层、目的体之间对电磁波吸收的不同进行地质单元划分的。当钻孔中有金属套管时，对电磁波产生屏蔽效应而失去了探测功效。

### 5.9.3

1 根据允许深度误差决定的。深度误差由传动装置误差、电缆的丈量误差和测井资料的解释误差等几部分之和组成。为保证测井成果深度误差不大于 5%，要求传动装置误差不大于 2%。

2、3 根据目前使用的测井仪器的主要技术性能而作的规定。

4 曲线线迹过宽会增加测井成果的深度和厚度误差，过窄在技术上又难以达到。故规定不大于 0.5mm，这主要是针对深度比例尺为 1/200 的记录而言，对大比例尺的记录可适当放宽。

### 5.9.4

1 测井电缆长度的丈量误差是造成测井误差的主要因素之一，故本款作了严格规定。

2 下井仪器设备卡孔是测井工作中很容易发生、也是很难处理的事故，因此规定在测井工作开始时应先进行试探。

5 原始曲线上准确标记了深度记号的那个点的深度，可作为深度校正的基础。对具有深度显示的测井仪，同样需要进行深度记号的标记，但可根据显示深度的准确程度适当加大深度记号的间距。

6 本款是对最高速度的限制，实际工作中应根据测井曲线幅度变化的剧烈程度采用较低的速度进行记录。若使用表中所列以外的深度比例，则速度限制值可按线性内插或外延求得。

7 规定宜在提升电缆时做正式测量记录，是因为下放电缆时，井液的浮力和井壁的摩擦阻碍使得井下电缆不能保证拉直，造成测井曲线深度误差甚至出现错误。为了节省时间，通常在下

放电缆时进行测试，以了解横向比例的选用是否适当，并可对提升时测井正式记录进行异常幅度的检验。但在进行温度和井液电阻率测井时，电缆下放会扰动井液，如提升电缆时再作正式记录，会使异常幅度变小，界面不清楚，甚至无法发现异常。故这两种方法应在没有扰动过的情况下，即下放电缆时进行正式记录，此时应特别注意防止井下探头受阻而造成测井资料的错误。

### 5.9.5

1 进行电流测井时减小线路及地面电极接地电阻，是为了使供电回路的总电阻主要由供电电极（即井下探测电极）的接地电阻来决定，可使电流测井曲线对地层电阻率的变化反应灵敏。电流曲线的增量方向反映了地层电阻率的降低，反之则表示电阻率增高。因此必须在测井时检查确定电流曲线的增量方向，以防止资料解释中的差错。

自然电位测井采用不极化电极时极化电位才会稳定，这对水文工程地质测井中一般自然电位异常幅度不大的情况是十分必要的，否则会得不到可靠的自然电位曲线。测量电极要离开金属重锤 2m 以上是为了减少重锤腐蚀电流的干扰。当腐蚀电流干扰很严重时，自然电位曲线会与底部梯度视电阻率测井曲线的形状相似。

3 自然 $\gamma$ 测井前应使用检测源检查仪器工作是否正常，如有必要还应先用标准源或刻度器标定记录的横向比例。 $\gamma$ - $\gamma$ 测井时，在采用密度刻度器标定曲线的横向比例后，才能记录到密度值，否则只能记录 $\gamma$ - $\gamma$ 曲线。

4 超声成像的深度比例要根据钻孔的具体情况选定，可与别的测井方法选用的比例不同。宜选用较大的深度比例，以使井壁图像清晰，提高分辨率和成果的精度。

6 井中流体测量多是在钻孔完工后进行的，如孔隙被堵塞，会造成测量结果与实际之间相差悬殊。

### 5.9.6

由于钻孔保护较困难，应在井场对测井资料进行检查，对不

合格的资料应重测。执行系统检查测量的人员应重新连接和调整仪器，以便发现可能存在的问题。

钻孔电视和超声成像测井规定不作系统检查测量，是因为这两种方法得到的是直观的图像，其质量的优劣明显。当发现图像不清晰时应重做，在任何情况下都应设法改善到最佳状态。这两种工作中容易造成差错的是观测深度，应加强检查与复核。



## 6 物探方法的综合应用

### 6.1 覆盖层探测

#### 6.1.1

覆盖层探测的内容和任务比较多，一般是指在有利条件下物探可以完成的工作。在条件不利时，有的任务不能完成，应根据地球物理条件或通过试验工作，具体分析和说明不能进行物探工作的原因。

#### 6.1.2

1 本款规定的是获取物性参数的途径和方法。

2 当没有钻孔，且地质条件复杂时，单一物探方法容易出现多解性，造成物性界面与地质界面间的深度差异，在此情况下，应布置一定量的综合物探。

3~7 在地面探测覆盖层，可采用地震勘探和电法勘探。当覆盖层较浅（几米）、电阻率较高时，也可采用雷达。综合测井一般用于探测覆盖层与基岩的分层情况，也可用于物性参数的获取。

河床覆盖层探测受河谷地形限制，覆盖层越厚，电测深法所需极距和浅层折射法的盲区也越大，横河方向的距离不能满足要求时可采用顺河方向跑极和布置排列，测线不能离两岸基岩太近，避免旁侧影响。

探测水下覆盖层时，应获取测点处的水面高程及水位深度。

#### 6.1.3

1 物探解释的深度、厚度是测点至探测界面的法线深度和厚度，应将其换算成铅直深度和厚度。

7 旁侧影响不仅在窄河谷地形条件下会产生，当覆盖层下探测界面存在局部深槽时，也会出现旁侧影响。

#### 6.1.4

本条所要求的精度代表的是整个工区或整条剖面的精度，而非某一个点。

### 6.2 隐伏构造破碎带探测

#### 6.2.1

隐伏构造破碎带是指位于覆盖层下的断层、软弱破碎岩层，当断层出露时，也会要求探测断层在地面以下的产状等情况。

#### 6.2.2

本条所规定的物探方法为水电水利工程中常用方法，在电阻率法各种剖面中，联合剖面法最适合于探测陡倾的良导电目的体或断层破碎带。由于探测对象的形态及空间分布，电性差异与装置之间存在比较复杂的关系，因此判断其空间状态时，应采用综合物探方法。

#### 6.2.3

3 判断构造破碎带是否含水依据  $J_s=0.3\% \sim 3.0\%$ 、 $\eta_s=1\% \sim 5\%$ 、 $D_s=30\% \sim 80\%$  的标准。

4 浅层折射波法探测覆盖层，覆盖层厚度大于 10m 时，应进行破碎带宽度偏移校正，破碎带的宽度等于低速带宽度减去偏移校正值。偏移校正值  $L=2htani$ ，其中， $h$  为覆盖层厚度， $i$  为折射波临界角。

#### 6.2.4

当覆盖层厚度小于 10m 时，应能查明宽度不小于 2m 的断层破碎带的要求是以电剖面法为主考虑的。当覆盖层厚度大于 10m 时，应能查明宽度大于其厚度 1/4 的断层破碎带的要求是以浅层折射波法为主考虑的。当构造破碎带的视倾角小于  $45^\circ$  时应能判断其倾向和大致的倾角的要求，对无明显垂直断距的断层破碎带是以电法勘探资料考虑的；对有明显垂直断距的断层破碎带是以浅层反射波法资料考虑的，其他物探方法只能根据异常带的特征，

推断其位置和走向。

## 6.3 软弱夹层探测

### 6.3.1

要求物探探测的软弱夹层往往厚度很小，有时小至厘米甚至毫米级，而其埋藏深度可能是几十上百米，因此，地面物探方法目前还无法识别，仅能依靠综合测井在钻孔中测试软弱夹层的位置和厚度。

### 6.3.2

探测软弱夹层的测井方法很多，其有效性取决于地层的物性条件、地下水位以及钻孔套管情况等，应根据具体情况进行选择。

1 厚度为 20cm 的薄层，在深度比例为 1/50 的测井曲线上反映的异常宽度一般只有几毫米（不同的测井方法反映的异常宽度有差别），因此，应尽量使用仪器中最大的深度比例，以提高探测精度。同时，测井时过快的提升速度或电缆上下窜动会抹掉反映薄夹层的异常，从而遗漏掉夹层或产生厚度误差。

4 SM 植物胶电阻率较低，可能对小极距视电阻率测井和微电极系测井会产生影响。除自然 $\gamma$ 和 $\gamma$ - $\gamma$ 测井可不受套管、干孔限制外，其余测井方法均受此限制而无法应用，而单一测井方法的探测效果是有限的。因此，为了在覆盖层中探查软弱夹层，应尽量要求采用泥浆或 SM 植物胶钻探。

### 6.3.4

1 目前使用的小口径钻孔电视，监视器为 14in 或 9in，井壁实物显现到监视器屏幕上的图像是被放大了 3 倍~10 倍。因此，只要图像清晰，在电视屏幕上不遗漏宽度大于 3mm~10mm 的异常比较容易。同理，当夹层厚度小于 20mm 时，其上下界面可在监视屏幕上同时显现，量出来图像层厚度并除以放大倍数即为其真层厚，故测试层厚的误差可以控制在 3mm 以内。

微电极系和孔壁超声成像探测薄夹层，深度比例至少应为

1/50, 而且必须用很慢的提升速度进行记录, 在这样的测井曲线中, 5cm 厚夹层, 将会有 1mm 左右宽的异常。因此, 只要夹层与周边介质电阻率或波阻抗差异明显, 在测井曲线和超声图像上可以得到反映。如果井壁光滑, 周边介质又比较均匀, 则 3cm 厚的夹层也可以不被遗漏。至于根据测井曲线确定夹层厚度的误差应是确定夹层上下两个界面可能产生的误差之和, 考虑到测井记录迹线的宽度和制图误差等多种因素, 测试层厚的误差一般不会超过  $\pm 10\text{cm}$ 。但对厚度不足 10cm 的夹层则只能认为它的正误差小于 10cm, 而其负误差应小于解释厚度。

自然 $\gamma$ 、 $\gamma$ - $\gamma$ 、自然电位、视电阻率和声波测井等方法都属于体积测量, 测得的参量都是某个体积范围内地层某种物理性质的平均反映, 所以, 它们对薄层分辨能力较差。根据常用的电极系极距和声波测井、 $\gamma$ - $\gamma$ 测井探头的源距为 20cm 考虑, 软弱夹层厚度小于 20cm 时, 测井曲线的异常是不明显的, 大于 20cm 时应该得到反映。在这种任务面前, 也应尽量采用 1/50 的比例尺记录, 则对应 20cm 厚的夹层处测井曲线上可出现 4mm 左右宽的异常带。测试夹层厚度的误差, 是考虑到在确定夹层上下界面时各有可能出现 1/2 极(源)距的误差, 因此层厚误差一般不会超过  $\pm 20\text{cm}$ 。

测井深度误差主要来源于仪器深度装置误差、电缆伸缩、深度标记误差。

## 6.4 岩体风化、卸荷带探测

### 6.4.1

多数情况下基岩风化带存在多个波速界面或电性界面, 具备进行地球物理勘探的前提。只有在少数情况下, 风化带在波速或电性上呈渐变关系, 不宜进行物探工作。

### 6.4.2

3 当覆盖层较厚(如大于 20m~30m), 而风化带较薄时(如全、强风化带厚度为 10m 左右), 折射波法和电测深法的效果往

往欠佳，而反射波法可取得较好的效果。

### 6.4.3

1 岩体风化和卸荷带物性特征为：波速较低、对电磁波吸收强，张裂隙中含泥或含水时电阻率较低。

3 岩体风化厚度和风化程度受岩性和断层破碎带、卸荷裂隙带等因素的影响。探测岩体风化带厚度时，要同时查明岩性和断层破碎带、卸荷裂隙带的分布。

4 岩体风化分带采用5级分类法及国际统一术语命名，即全风化带、强风化带、中等（弱）风化带、微风化带和新鲜岩体。

## 6.5 滑坡体探测

### 6.5.1

根据滑坡体组成物的不同，一般将滑坡分为土层滑坡和基岩滑坡两大类。其中土层滑坡包括黏性土滑坡、黄土滑坡和坡积土滑坡；基岩滑坡包括破碎岩体滑坡和（完整）基岩滑坡。不同种类的滑坡具有不同的地球物理条件，应根据条件合理选用探测方法。

### 6.5.2

探测滑坡体的主要物探方法为浅层折射波法、浅层反射波法、电法和综合测井。多数情况下，浅层折射波法的地质效果较好，电法探测地下水位和含水层效果较好。

物探方法的选择应以地质效果较好为前提。

应用浅层反射波法时，应作好展开排列，根据展开排列确定最佳窗口和反射层位，并与浅层折射层位相对应。

### 6.5.3

资料分析时，应注意物性层可能与地质层不一致。浅层地震和电法同时进行，应注意区别两者的物性差异层。

### 6.5.4

通常以基岩面或断层面（或风化界面）为滑动面的滑坡，当地形起伏较小时，一般可取得较好的精度；而以土层界面为滑动

面的土层滑坡和以软弱夹层为滑动面的基岩滑坡，物性差异较小，探测精度一般较低。

## 6.6 喀斯特探测

### 6.6.1

为了与国际术语保持一致，本标准将原规程中的“岩溶”更改为国际通用术语“喀斯特”。

实际工作中，使用物探方法探测喀斯特，在确定其位置、埋深、规模的基础上，还要求探测喀斯特地下水的情况，故本次修订纳入了喀斯特地下水充填状况探测的内容。

### 6.6.2

探测喀斯特的地面物探方法适用于工程前期勘测阶段。地表地形条件及环境条件满足地表物探方法的要求，当地球物理条件较理想时，可选择效果较好的单一方法，当地球物理条件不理想时，可选择多种物探进行综合探测。

当基岩裸露时，接地电阻过大，传导电流很难传入高阻灰岩地层，但该条件比较适宜位移电流的电磁方法。

探地雷达适宜于直接利用基岩表面探测溶洞，可探测规模较小的洞穴；浅层地震反射适宜于探测规模较大的喀斯特洞穴，但应进行多种偏移距试验。

钻探是勘探的常用方法，应充分利用钻孔，采用综合测井、钻孔同位素示踪、流速测试、地下噪声监测、孔内电视观察等井下物探方法，以提高喀斯特探测的精度。

### 6.6.3

无充填的喀斯特洞穴与周边介质相比呈现高阻、低吸收的异常特征，但要求洞穴空腔必须具有一定规模，否则会导致因电磁波散射而呈现高吸收的反常现象。

## 6.7 地下水探测

### 6.7.2

含水层的地球物理特征可分为两类：一是第四纪地层中的含水层，主要是孔隙率大、透水性强的砂卵（砾）石层、砂层，与透水性弱的粘土层相比，一般具有电阻率高、电化学反应性强、自然放射性强度小、具有波阻抗界面等物性特点；二是基岩中有砂岩地层、裂隙带、岩溶发育带、断层破碎带等含水层（带），基岩含水层（带）与周边介质相比，通常具有电阻率低、电化学反应性强、电磁波衰减快（吸收系数高）并可形成高频电磁波反射，弹性波速度低、自然放射性较强等异常特征。

在第四系地层中探测含水层，一般应按覆盖层探测的方法和技术进行；在基岩中调查水资源时，应按断层破碎带的探测方法和技术进行；在喀斯特地区使用喀斯特调查的方法技术；对于具有地下水赋存条件的地层是否含水，则主要应用激发极化法探测。

在第四系地层中地下水的坡降是很小的，而地面物探方法测试地下水位的深度误差会远大于它。基岩中的地下水虽然有时会出现较大的坡降，但这种不连续的地下水面往往构成不了一个明显的物性界面，使物探很难探测。所以地下水分水岭和补给关系必须根据水文地质、物探、勘探等多种资料进行综合分析予以确定。

当含水层或隔水层的厚度与其埋藏深度相比较薄时，地面物探方法有时不能见效，而要依靠或配合钻孔综合测井来解决。

### 6.7.3

通常含水层和隔水层之间在电阻率、地震波速度、波阻抗上具有比较明显的差异，当含水层的厚度与其埋藏深度相比较大时，电测深法和地震勘探可按常规方法解释，但不能单纯依靠电测深法和地震勘探探测的地下水位资料来调查地下水分水岭和补给关系。

喀斯特地区找水主要应用电阻率法寻找低电阻异常和裂隙发

育主导方向。由于灰岩裂隙喀斯特发育程度受地层岩性、地质构造和侵蚀基准面的控制，探测地下水位和判别含水或含泥以及富水性和分布是相当复杂的，必须综合物探、地质、钻探和试验资料进行综合解释。

自然电场法渗流场测试地下水流向，可按低电位向高电位来确定，该原则同样适用于喀斯特上升泉和下降泉的判别。自然电场的环形观测，即测量不同方位的过滤电场，则电位差最大的正电位方向为该测点地下水的流向。面积性布置的环形观测从平面上可以区分有水流（即有长轴方向）和无水流（电位差很小或圆形图），将具有长轴方向的环形观测点勾画出来，即可判别岩体裂隙发育方向与范围和水流方向。应特别注意识别地表水顺地形坡度向下渗透产生过滤电场的干扰，此种干扰电场总是在山坡的高处出现低电位，而坡脚处出现高电位，即正好与地形相反。

当测区内含水层的地质结构没有明显变化，而在不同测点的电测深曲线上反映出含水层电阻率发生大的变化，通常是含水地层电阻率降低，说明测区内地下水的矿化度有变化，是由咸水或污水引起的。根据电测深类型分布图、电剖面图或等视电阻率平面图即可圈定咸、淡水的分布和羽枝状的地下水污染形态。多层地下含水层中咸水、淡水界线的划分应依靠钻孔进行电阻率、自然电位和井液电阻率测井。

#### 6.7.4

应用地面物探方法进行地下水水位的探测精度，相当于电测深法和地震勘探探测地层厚度及埋藏深度的精度，而在钻孔中用测井方法测试的精度则相应为测井测试地层界面的精度。

## 6.8 防渗线探测

### 6.8.1

物探探测的防渗线主要指设计阶段拟定、施工形成前的防渗帷幕线。



### 6.8.2

防渗线探测在勘测设计阶段一般在地表进行，主要采用地面物探方法，也可在少量勘探孔中作一些勘探。在电站施工和运行阶段，帷幕一般都是沿灌浆廊道在地下呈立体帷幕分布，有大量的钻孔可利用，宜采用 CT 探测。

## 6.10 隧洞施工掌子面超前预报

### 6.10.1

利用物探方法进行隧洞施工掌子面超前预报，存在一些不良因素：掌子面场地窄小、凹凸不平，施工干扰大，隧洞内地质情况揭露较少，会给预报带来一定的误差。

### 6.10.2

1 在 TBM 掘进条件下进行超前预报，受工作条件影响，无法在掌子面上直接进行探测，目前可采用浅层反射波法中的地震负视速度法探测。

2 由于隧洞掌子面超前预报要求探测深度较大，故探地雷达天线中心频率宜选用小于 100MHz 的天线。为了增强有用信号，减少随机干扰，探地雷达点测时宜采用多次叠加技术。

3 本款浅层反射波法是指在掌子面上激发地震波，并同时在掌子面上接收反射波。

## 6.11 洞室松弛圈探测

### 6.11.1

地下洞室开挖后，破坏了岩体原有的平衡条件，岩体内的应力重新分布。一般情况下，在洞壁周边的岩体将出现应力释放的松弛圈（如图 2 所示），这取决于岩体所处的地质构造情况，岩体的物理力学特征等，以及地下洞室在岩体中的部位、形状、洞径大小和施工方法。

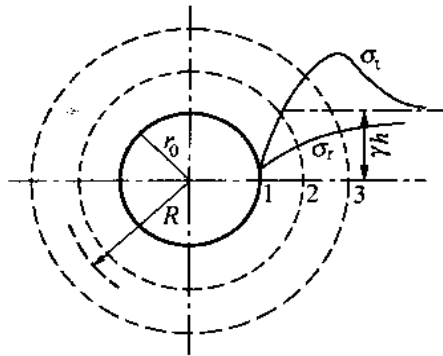
声波法、层析成像、浅层折射波法探测松弛圈是依据施工开

挖、爆破造成近洞壁应力释放、岩体结构松散，从而造成波速降低，根据测试周边介质波速分布确定松弛圈的厚度。

### 6.11.2

1 洞室松弛圈探测剖面的布置，应根据施工方法、进度，洞室地质构造情况布置剖面 and 测试钻孔。

2 对于大跨度、高边墙的地下厂房应布置 2 条~3 条横断面，上、下游壁纵剖面，岩锚吊车梁围岩剖面，在横断面的顶孔、角孔、岩锚吊车梁孔之间应加密，每 10m 高边墙岩壁应有 2 对~3 对孔，测试孔距视现场情况而定，孔深不宜太浅，应达到围岩的原始应力带。洞室松弛圈探测常采用水耦合探头，在洞室顶拱部位及岩体存在裂隙漏水严重时，可采用干孔探头，干孔所测波速要小于湿孔波速，且岩体波速愈高，二者相差愈小。



$r_0$ —洞室半径； $R$ —洞室中心至松弛圈的距离； $\gamma$ —岩石容重； $h$ —洞室埋深；

$\sigma_\theta$ —环向主应力； $\sigma_r$ —径向主应力；1—应力下降带；2—应力上升带；3—原始应力带

图 2 洞室开挖后岩体的应力状态

### 6.11.3

1 洞室腰部围岩波速与围岩深度的曲线应依据如图 3 所示的四种类型进行解释：

图 3 (a) 所示类型曲线可划分出应力上升带和不受开挖影响的原始应力带。洞壁附近波速减低，反映了表层岩体松弛，随着深度增加，出现了波速增高，这是洞室周边的应力集中区，波速

的增高表明该区岩体完整，应力集中明显。图 3 (b) 所示类型曲线代表洞径较小且四周岩体完整坚硬时，洞壁只有弹性形变，出现应力集中现象，无松弛区。图 3 (c) 所示类型曲线代表洞壁松弛不明显，各测点波速基本一致，波速较高，但总的波速接近于完整岩体波速。图 3 (d) 所示类型曲线代表洞壁松弛，应力集中现象不明显，这种现象常出现在洞壁岩体较为破碎的洞室。

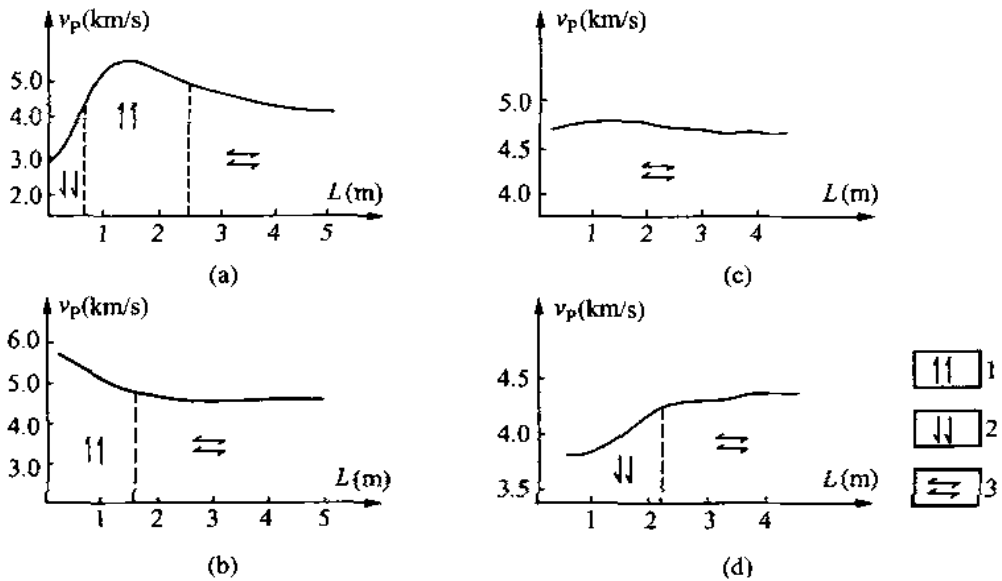


图 3 洞室松弛圈测试波速与钻孔深度变化关系曲线

## 6.12 灌浆效果检测

### 6.12.2

2、3 在灌浆效果物探检测中，各种检测方法的侧重点不同，钻孔静弹模用于直接测试岩石的静弹模量，同时也可用于率定声波速度与静弹模量的对应关系；声波速度的高低反映了岩体密实程度，因此可根据灌浆后波速的改善程度了解灌浆效果；钻孔电视可直接观察浆液的填充情况；在需要时，同位素示踪也可在帷幕线两侧作渗透试验。

4 进行灌浆效果检测的物探方法应满足本标准第 5 章相应的技术规定，同时，为保持与 DL/T 5148 一致，在抽样、检测布置等方面还应满足其相关规定。

### 6.12.3

1 灌浆效果物探检测资料分析根据监理、设计要求，可选择指定的一种或几种。

- 1) 直接对比分析主要用于灌浆试验或抽样检测率较低的情况下。统计对比分析是先统计，再对比几个主要的统计参数：如平均值、分布区间、中心值。
- 2) 达标分析法主要用于检测量大、灌浆前后不易同孔位对比检测的情况，该方法主要进行灌后检查。
- 3) 声波 CT 评价灌浆效果，应注意其波速与单孔声波和穿透声波速度的差异。描述灌浆前后低强度、渗漏不密实区的变化情况。

## 6.13 防渗墙质量检测

### 6.13.1

防渗墙一般建筑在堤防或围堰的中心，由人工或机械成槽方式建成，也有采用钻孔搅拌建成的。

### 6.13.2

1、2 选择检测方法应根据墙体材料、深度、施工方式、环境条件等情况确定。并注意以下情况：

- 1) 防渗墙的施工方式、墙体材料特性、设计、地质水文资料对检测方法选择、参数设置、资料解释产生直接影响。
- 2) 防渗墙异常存在多解性，综合物探是解决多解性的重要手段。
- 3) 地面物探检测精度和深度间存在矛盾，应根据实际情况综合考虑。

- 4) 因防渗墙多建筑在土、砂及碎石筑成的堤防或围堰上，造成物探的电磁波、电流及弹性波被强烈吸收。
- 5) 如需详细检测墙体缺陷，宜采用层析成像，由于检测孔距较小，深度也较浅，故只适宜声波 CT。

3 防渗墙的渗漏方式一般以渗透形式出现，同位素示踪法适宜于测试渗透流速、流向。

### 6.13.3

由于防渗墙厚度较薄，成分复杂，异常幅值较低，对防渗墙检测的物探资料进行分析时应与防渗墙设计、施工资料及现场试验防渗墙体和周边介质的物理性质（电阻率、导磁率、波速）相结合。

## 6.14 堆石（土）体密度及地基承载力测试

### 6.14.1

常规坑测试验测试粒径较大的堆石（土）体密度，操作较困难，且干扰因素多，精度也较差。相形之下，使用附加质量法和瑞雷波法则体现其快速而高效的特点。

水库大坝、机场跑道、公路路基等人工堆石（土）体一般进行分层填料、分层碾压，施工连续性较强，需要使用快速准确的测试技术。

### 6.14.2

3、4 附加质量法在本标准第 5 章中没有作技术规定，在此针对基本技术进行规定。

6 核子密度法有多种， $\gamma$ - $\gamma$ 法在综合测井中已作了规定，散射法和透射法引用相关规定。

## 6.15 堆石坝面板质量检测

### 6.15.1

面板检测含库岸面板。

### 6.15.2

堆石坝面板质量检测时，一般选用一种快速有效的方法先进行普查，当发现异常后，再用综合物探方法进行详查，并圈定异常范围，解释脱空和缺陷的位置与大小。

由于堆石坝面板是重要的永久性挡水建筑物，对电站本身以及下游的安全至关重要，故面板质量检测工作应视运行情况不定期的进行，且抽样率一般不得少于 20%，当检测证实有脱空现象时，应扩大抽样率，直至 100%。

R-C 曲线多呈指数曲线形状，强度较低时，声速变化较灵敏，强度较高时，声速变化不明显，因此，用超声法检测高标号混凝土时，绝对误差较大，故超声法测强宜用于 C30 标号以下的混凝土。

### 6.15.3

1 结合面板设计与施工的有关资料进行分析，是为了提高物探资料分析和解释的准确性。

3、4 面板脱空的主要原因是面板变形与堆石体变形不协调。面板混凝土内部存在的缺陷类型较多，如蜂窝麻面、空洞、架空、疏松区等，其异常形态基本相同，但对于混凝土内部的钢筋，只有探地雷达所反应的异常较为明显。

## 6.16 混凝土质量检测

### 6.16.1

超声回弹综合法是引用规程 JGJ/T 23 的一种检测混凝土强度的方法，其使用应符合该规程的要求。表面声波法是引用规程 CECS 21 中的一种检测混凝土缺陷的方法，其使用应符合该规程的要求。

### 6.16.2

1 按国标规定，试验室测试混凝土强度，应是以标准方法制作和养护的、边长为 150mm 的、龄期在 28 天的立方体试件，在

该条件下测得的抗压强度值才为该试件的标准强度。就一批混凝土而言，其强度标准值是一个统计概念的特征值，它是一批用标准方法测试的标准强度总体分布中的一个值。强度低于该值的百分率不超过 5%。无损检测中，在建立某一物理量（如回弹值、声波速度值等）与混凝土强度值相关关系时，所指的强度值是标准强度。根据相关关系计算的无损检测结果应是混凝土标准强度的推算值。

混凝土波速与强度相关关系因原材料的品种规格和含量、配合比、工艺条件的不同而不同，因此，应使用常用的原材料品种规格，对不同的技术条件和强度范围进行试验，大量的试验数据经适当的数学拟合和效果分析，建立声波速度与混凝土抗压强度的相关关系，取参量的相关性好、统计误差小的曲线作为基准相关曲线，其对应的相关公式作为声波法检测混凝土强度之用。

声波法检测混凝土强度的主要影响因素包括：横向尺寸效应、温度和湿度的影响、混凝土内钢筋的影响、粗骨料品种和粒径及含量的影响、水灰比及水泥用量的影响、混凝土龄期和养护方法的影响，其中，水灰比和粗骨料品种、粒径、含量的影响最大。故测强曲线的适用范围受到较大限制。为了消除影响，可采用水泥砂浆声速换算法和修正系数法，水泥砂浆声速换算法是把混凝土声波速度换算成砂浆声波速度，再由较均质的砂浆声波速度与混凝土强度建立相关关系，以便消除骨料的影响，扩大相关关系的适用范围，并提高测强精度。

## 6.18 钢衬与混凝土接触状况检测

钢衬与混凝土的脱空厚度，需要结合钢衬厚度、测试频率和波的衰减程度并结合现场试验综合分析得出。

## 6.19 锚杆质量检测

### 6.19.1

使用拉拔试验和开挖检查检测锚杆锚固质量存在较多弊端，如不利于整体检查锚杆的锚固质量、均为有损检测方法等。声波反射法检测锚杆锚固质量是利用声波的杆件传播和反射原理，使用的声波频率较高，因此具有较高的分辨率。

锚杆锚固材料不一定是砂浆，但本标准主要针对砂浆锚固锚杆质量检测进行规定，对于其他锚固材料，应在进行必要的、一定数量的试验后使用。

在水电工程建设中，常采用 10m 以上长锚杆，因此还要求了解钢筋连接方式及损伤情况。

### 6.19.2

由于各施工队伍的技术和管理水平存在差异，因此按施工单元抽检具有较好的代表性，一般来说，由熟悉工程情况的业主、设计、监理、检测、施工各方共同确定抽检部位是必要的。

## 6.20 水下建筑物缺陷观察

### 6.20.1

水下建筑物缺陷包括水下混凝土建筑物浇筑质量缺陷和土工建筑物投入运行后所产生的新的缺陷。具体包括：水下闸门、大坝水下面板、消力池、护坡等的破损、裂隙等情况。

### 6.20.2

1 水下建筑物观察不同于水下打捞，使用仪器为摄像头与控制器相分离。强调低压供电是为了保障仪器和人员安全。

2 枯水期水质较清，水深较浅，便于进行摄像观察。

3 注明摄像头方向是便于通过连接杆确定构造走向。

4 进行面积观察时应布置测网，测网一般垂直河流，下水库一般采取横拉钢丝绳。



5 水较深时，连接杆较多；水流较急时，连接杆和探头受水冲力较大。这两种情况都需要船体稳定。

### 6.20.3

水下建筑物缺陷观察资料判读解释时应收集施工和运行过程中的相关资料进行综合分析，防止遗漏有意义的缺陷，以消除隐患。

## 6.21 环境放射性检测

### 6.21.1

在水电水利工程勘察中，环境放射性检测主要应用于坝址和主要建筑物。环境 $\gamma$ 本底辐射主要是 $\gamma$ 射线照射，尤其在花岗岩地区应检测并取样检验；土壤、空气中都有少量氡气及其子体等放射性元素，会被摄入人体，也会通过生物循环，经食物链进入人体，也应加以检测，以确保环境条件符合卫生标准。

### 6.21.2

$\gamma$ 测量仪器轻便，测量方法简单，是常用的环境检测方法。环境放射性检测可先对区域地质构造作初步检测，然后进行 $\gamma$ 测量。 $\gamma$ 测量测线应垂直或斜交岩层或主要构造线走向，均匀地分布全测区。

### 6.21.3

#### 3 环境 $\gamma$ 照射量率计算：

- 1) 照射量与吸收剂量的关系。吸收剂量是电离辐射与物质相互作用时，表示单位质量的物质吸收电离辐射能量大小的物理量；在相同剂量条件下，由于射线性质和照射条件不同，各种射线对肌体的危害程度也不同，则用“剂量当量 ( $H$ )”来统一衡量各种射线的危害性，剂量当量与吸收剂量有如下的关系：

$$H = D \times Q \times N \quad (2)$$

式中:

$D$ ——吸收剂量;

$Q$ ——品质因素,  $x$ 、 $\gamma$ 射线的  $Q=1$ ;

$N$ ——修正因子, 外照射条件下,  $N=1$ 。

在带电粒子平衡条件下(带电粒子平衡: 每一个带电粒子离开围绕该点的体积元时, 就有一个同类、同能量的带电粒子进入该体积元补充), 照射量为  $2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$  的  $\gamma$  (或  $x$ ) 射线传递给  $1 \text{kg}$  干燥空气中次级电子的总能量为  $8.73 \times 10^{-3} \text{J}$ , 因此在同样条件下, 照射量与吸收剂量 ( $D_0$ ) 的关系为:

$$D_0 = 8.73 \times 10^{-3} x \quad (3)$$

式中:

$D_0$ ——空气中同一点处的吸收剂量 (Gy);

$x$ ——空气中同一点处  $\gamma$  (或  $x$ ) 射线的照射量。

- 2) 许多学者对空气吸收剂量率与人体受到的外照射剂量当量之间的定量关系作了深入的研究, 发现  $\gamma$  射线外照射的剂量当量率与室外空气的吸收剂量率之比为 0.82, 与室内空气吸收剂量率的比值为 0.69, 联合国辐射委员会综合众多研究后提出外照射的有效剂量当量与空气吸收剂量的最佳比值为 0.7Sv/Gy, 即:

$$H = D_0 \times 0.7 \text{Sv/Gy} \quad (4)$$

在放射性测量工作中, 可以用  $\gamma$  射线仪或  $\gamma$  能谱仪直接测试  $\gamma$  辐射场空气的照射量率, 再计算出吸收剂量  $D_0$ , 有条件时, 可以用  $\gamma$  剂量仪直接测试  $D_0$ , 再根据上式计算出剂量当量值。

4 环境放射性辐射控制标准: 按照 GB 18871 规定, 从事非辐射工作的公众成员, 年有效剂量当量不超过  $1 \text{mSv}$ 。如果按终

生剂量平均的年有效剂量当量不超过 1mSv，则在某些年份里允许以每年 5mSv 作为剂量限值。

## 6.22 岩土物理和力学参数测试

### 6.22.1

本节提出参数是物探方法能够测试和计算的有关岩土动力学参数。

在工程勘测中的波速测试，主要是纵波和横波。弹性波速度是一个反映岩体弹性强度的物理量，可作为岩体分类的依据之一。由于岩石成因、矿物成分、地质年代的不同，致使岩体的岩性千差万别，即使是岩性相同的岩石，也可能显示出完全不同的力学性质，详见附录 A。

岩石的泊松比一般为 0.25，松散土体的泊松比可高达 0.35~0.45。

弹性模量可作为物质阻抗应力的量度，岩石对拉伸（或挤压）应力的阻力愈大，弹性模量值也愈大。

在物探方法中剪切模量主要采用地震法或声波法，测试岩石的横波速度而求得。因液体不发生剪切应变，不产生横波，所以液体介质中的剪切模量等于零。

单位弹性抗力系数是指圆形压力隧洞围岩单位弹性抗力系数。岩体的单位弹性抗力系数除了与岩石的性质有关以外，还与隧洞规模大小有关，隧洞的半径愈大，岩体的单位弹性抗力系数愈小。工程设计一般采用隧洞半径等于 1m 时的岩体弹性抗力系数，即单位弹性抗力系数。

### 6.22.2

本条所列纵横波速度参数测试方法是目前水电水利工程中采用的主要方法。在进行波速参数测试时，应针对不同地质物探条件和不同情况分别选用不同的方法。

当利用声波仪判读横波存在困难或影响准确性时，横波的获

取可采用增强型地震仪测试。声波内同步法可用于断层带、岩芯或岩块（样）的测试。

地面地震勘探进行波速参数测试，其目的主要为地震勘探解释提供依据。对覆盖层波速的测试主要采用浅层折射波时距曲线交点法，如果要取得覆盖层分层速度，可采用浅层反射波法或地震测井。对于基岩波速的测试，可采用浅层折射波法中的  $t_0$  法及差数时距曲线法、时间场法。在波速变化比较大的地区应增加波速测试的工作量，以掌握波速变化范围与地层的关系。

### 6.23 岩土电性参数测试

由于影响岩土电阻率变化的因素很多，各种岩土电阻率的变化范围很大。尽管如此，它们之间的电阻率还是有差别的，各类岩土电阻率变化范围，详见附录 A 物性参数表。

重要的造岩矿物，如石英、云母、长石等硅酸岩类矿物的电阻率高达  $10^6 \Omega \cdot m$  以上。岩石的孔隙、裂隙发育程度、含水性以及水的矿化度也对岩体电阻率的变化起主导作用，如花岗岩，干燥时电阻率高达  $10^{10} \Omega \cdot m$ ，当含水量由 0 增至 0.19% 时，电阻率降至  $1.8 \times 10^6 \Omega \cdot m$ ，第四系松散沉积物中，干砂砾石电阻率高达几百至几千  $\Omega \cdot m$ ，饱水的砂砾石电阻率则显著下降。

岩体由于风化作用，其微观结构产生变化，随着风化程度的增加，岩体的结构变得愈疏松，因而引起电阻率的降低。

### 6.24 质点振动参数测试

岩土体质点振动参数是表征弹性波质点振动动力学特征的参数。直接测试的质点振动速度、位移、加速度值三个参数相互间存在一定关系，由其中之一可推算出另两个。一般可以测试质点速度，积分得出位移、微分得出加速度。

## 6.25 其他工程参数测试

### 6.25.1

岩体的密度取决于组成物成分、结构及孔隙率，其变化范围一般从  $1.4\text{g/cm}^3 \sim 3.7\text{g/cm}^3$ 。在岩浆岩中，超基性岩的密度最大由  $2.7\text{g/cm}^3 \sim 3.7\text{g/cm}^3$ ，由基性向酸性过渡，密度逐渐减小，如花岗岩为  $2.5\text{g/cm}^3 \sim 2.75\text{g/cm}^3$ ；变质岩的密度变化范围较大，随变质程度不同，密度也不同；沉积岩的密度除了决定于组成物质的密度外，还受到压实和胶结程度的影响，对于同一种沉积岩来说，其变化可在  $1.0\text{g/cm}^3 \sim 1.2\text{g/cm}^3$ ，变化最显著的是砂质岩系（砂石、页岩类）变化范围从  $1.6\text{g/cm}^3 \sim 3.0\text{g/cm}^3$ ，水化学沉积岩，其密度最稳定，岩盐为  $1.95\text{g/cm}^3 \sim 2.20\text{g/cm}^3$ ，石膏  $2.3\text{g/cm}^3 \sim 2.5\text{g/cm}^3$ 。

干密度参数多用于换算其他指标。对于同一种岩（土）体，干密度越大，说明岩（土）体中孔隙越少，岩（土）体越密实。

岩（土）体孔隙度是指岩（土）体中孔隙体积与岩（土）体的总体积之比值，可以直接反映出岩（土）体中孔隙体积的变化。岩浆岩从  $0.1\% \sim 3.5\%$ ，变质岩从  $0.3\% \sim 15\%$ ，沉积岩从  $0.5\% \sim 20\%$ ，松散土体一般在  $30\% \sim 50\%$ 。

应用物探方法独立完成水文地质参数测试比较困难，本节列出的仅是目前物探作用的几个方面，而不是水文地质参数测试的全部内容。

### 6.25.2

2 测试孔隙度的物探方法有三种，各种方法均有优缺点，应根据条件选用。

3 自然电场法测试地下水流向，是利用地下水运动过程中产生的过滤吸附电场。地下水的流向应是过滤吸附电场最大的方向。在这项工作中应特别注意识别地表水顺地形坡度向下渗透产生过滤电场的干扰，此种干扰电场总是在山坡的高处出现低电位，而坡脚处出现高电位，即正好与地形相反。

用同位素流速仪可在单个钻孔中测试地下水流向和渗透速度；用同位素示踪法则要在有比较集中的几个钻孔的地方才能进行，从地下水的上游位钻孔投放同位素溶液，在下游位钻孔观察同位素溶液的出现时间，以确定地下水的流速与流向。孔间距的选择应考虑所用同位素的半衰期和地下水流速的大小，半衰期越短，流速愈小，则孔间距应越小，否则有可能无法观测到同位素到达下游钻孔的准确时间。

同一含水层的渗透速度即使在同一横剖面上也往往是差别很大的，而且自然状态下的渗透速度也很难求得。因此，只能依靠物探本身的重复观测或检查测量来评价工作质量。因此，物探方法测得的渗透速度与真正的地下水渗透速度比较，其误差有时可能会超过 30%。

---