

DB45

广西壮族自治区地方标准

DB 45/T 2148—2020

公路工程物探规范

Specification for highway engineering geophysical prospecting

2020 - 10 - 12 发布

2020 - 11 - 20 实施

广西壮族自治区市场监督管理局 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、符号和代号	1
3.1 术语	1
3.2 符号	4
3.3 代号	5
4 基本要求与规定	5
4.1 一般规定	5
4.2 工作程序与要求	6
5 工程物探应用	7
5.1 一般规定	7
5.2 路基工程	8
5.3 桥梁工程	9
5.4 隧道工程	9
5.5 岩溶探测	10
5.6 采空区探测	11
5.7 滑坡探测	11
5.8 超前地质预报	12
5.9 物性参数测试	14
6 直流电法	15
6.1 一般规定	15
6.2 电测深法	17
6.3 电剖面法	18
6.4 高密度电法	19
6.5 充电法	20
6.6 激发极化法	21
7 电磁法	23
7.1 一般规定	23
7.2 音频大地电磁法 (AMT)	24
7.3 可控源音频大地电磁法 (CSAMT)	25
7.4 瞬变电磁法 (TEM)	28
7.5 地质雷达 (GPR)	30

8 浅层地震法.....	32
8.1 一般规定.....	32
8.2 折射波法.....	34
8.3 反射波法.....	35
8.4 主动源面波法.....	37
8.5 微动勘探法.....	38
8.6 地脉动测试.....	38
9 井中物探法.....	39
9.1 一般规定.....	39
9.2 电测井.....	40
9.3 地震波速测井.....	41
9.4 声波测井.....	42
9.5 超声波成像测井.....	43
9.6 弹性波 CT.....	43
9.7 电磁波 CT.....	44
9.8 电阻率 CT.....	44
9.9 钻孔全景光学成像.....	44
9.10 管波探测法.....	44
9.11 井中雷达法.....	45
10 工程物探成果报告.....	45
10.1 一般规定.....	45
10.2 内容编制.....	45
附录 A (规范性) 几种主要物探方法的应用范围和适用条件一览表.....	47
附录 B (规范性) 公路工程物探方法选用一览表.....	49
附录 C (资料性) 常用物探方法适用探测对象、探测深度及相对分辨率对比表.....	50
附录 D (资料性) 可控源音频大地电磁法工作参数的计算.....	51

前 言

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

本文件由广西壮族自治区交通运输厅提出并宣贯。

本文件由广西交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：广西交通设计集团有限公司、广西新恒通高速公路有限公司、广西交通工程检测有限公司、中交第二公路勘察设计研究院有限公司、山东大学。

本文件主要起草人：李敦仁、毛承英、陈开群、陈银生、孙怀凤、米德才、蓝日彦、唐正辉、闫海涛、何廷全、黄泽斌、李祖能、罗伟斌、韦卫明、叶琼瑶、温庆珍、刘光彬、邓胜强、陈云生、杨洋、林炳臣、杨泓全、柳尚斌、刘耿仁、黄保胜。

公路工程物探规范

1 范围

本文件规定了公路工程物探的术语、符号和代号、基本要求与规定、工程物探应用、直流电法、电磁法、浅层地震法、井中物探法和工程物探成果报告。

本文件适用于广西公路工程建设中开展的各种工程物探。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 6722 爆破安全规程

GB 50026 工程测量规范

JTG C20 公路工程地质勘察规范

JTG/T C22 公路工程物探规程

JTG/T 2231-01 公路桥梁抗震设计规范

DB45/T 983 工程物探规范

3 术语、符号和代号

下列术语、符号和代号适用于本文件。

3.1 术语

3.1.1

地球物理勘探 geophysical prospecting

根据地质体内部的各种物性差异，借助仪器对其天然场或人工场的分布与变化情况进行观测，通过综合分析研究，对地质体的地质情况进行推断、解释的勘探方法，简称“物探”。

3.1.2

工程地球物理探测 engineering geophysical detecting

解决建设工程中有关工程地质、水文地质问题和进行环境评价的地球物理探测方法，简称工程物探。

3.1.3

综合物探 comprehensive geophysical exploration

把二种或二种以上的物探方法有效地组合起来进行探测，并对资料进行综合分析，达到共同完成或解决某一地质问题的目的。

3.1.4

声波探测 acoustic prospecting

在水上、地面、井中或孔间，通过探测声波在岩土体内的传播特征，来研究岩土体性质和完整性的物探方法。

3.1.5

直流电法 direct current prospecting

利用探测对象与相邻介质之间的电阻率特性差异,通过观测研究与探测对象有关的直流电场的分布特点和变化规律,探测目标体的地质特性或解决某些地质问题的方法。

3.1.6

电阻率测深法 resistivity sounding

采用几何测深观测方式,研究地下介质电阻率垂向变化的电阻率法。

3.1.7

电阻率剖面法 resistivity profiling

采用固定极距的电极排列,沿测线逐点供电和测量,研究地下介质电阻率横向变化的电阻率法。

3.1.8

高密度电阻率法 multielectrode resistivity method

通过电极阵列技术同时实现电测深和电剖面测量,获得二维或三维的电阻率分布,进而研究解决相关问题的电阻率法。

3.1.9

充电法 mise-a-la-masse method

向天然或人工露头的良导地质对象进行充电,使充电体变为一个等位体或似等位体,研究充电体及其周围电场分布特征,从而解决充电体的形状、大小和产状等地质问题的一种直流电法勘探方法。

3.1.10

激发极化法 induced polarization method

在人工电场作用下,观测与研究产生物理和电化学激发极化效应的一种物探方法。

3.1.11

音频大地电磁法 audio-frequency magnetotellurics method (AMT)

基于电磁感应原理,同时观测相互正交的音频范围(0.1 Hz~100 kHz)电场和磁场分量,计算视电阻率和阻抗相位,研究地下电阻率结构的一种被动源地球物理方法。

3.1.12

可控源音频大地电磁法 controlled source audio frequency magnetotellurics (CSAMT)

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

3.1.13

瞬变电磁法 transient electromagnetic method (TEM)

利用不接地回线或接地线源向地下发射一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场间歇期间利用线圈或接地电极观测地下介质中引起的二次感应涡流场,从而探测地下介质特征的一种勘探方法。

3.1.14

地质雷达 ground penetrating radar method (GPR)

借助发射天线定向发射的高频(10 MHz~1 000 MHz)短脉冲电磁波在地下传播,检测被地下地质体反射回来的信号或透射通过地质体的信号来探测地质目标的一种电磁波法。

3.1.15

浅层地震法 shallow seismic prospecting method

利用地震波在不同岩、土中传播的特征,以探测浅部地层分布和地质构造、测定岩土物理力学参数等的地球物理勘探方法。

3.1.16

地震折射波法 seismic refraction method

利用地震折射波进行地震勘探的方法。

3.1.17

地震反射波法 seismic reflection method

利用地震反射波进行地震勘探的方法。

3.1.18

地震映像法 seismic imaging method

采用相同的最佳偏移距沿测线方向逐点激发和接收来获取地震记录,分析一种或多种波的波形特征和同相轴形态,以探测地层分布和地质目标体的一种地震方法。

3.1.19

主动源面波法 active source surface wave exploration

利用人工震源激发产生的弹性波在介质中传播,通过分析所接收记录的瑞雷面波的频散特性,解决有关地质问题的方法。

3.1.20

微动勘探法 microtremor exploration

利用仪器设备观测天然微动信号,通过分析、处理和提取面波的频散信息,反演获得地下横波速度变化规律,进而探测地层结构的方法。

3.1.21

层析成像 computerized tomography

利用弹性波或电磁波的透射原理,对被测区域进行多方位扫描,重建弹性波或电磁波参数分布规律的图像,从而进行地质问题研究的方法技术。

3.1.22

电测井 electrical logging

基于观测和研究钻孔剖面上介质的电学性质为基础的一种测井方法。

3.1.23

地震波速度测井 seismic velocity logging

利用钻孔测试地震波在地层中的传播速度的一种测井方法。

3.1.24

钻孔全景光学成像 panoramic optical imaging of holes

利用带有锥形反射棱镜的摄像探头扫描钻孔孔壁,实时把采集到的数字信号转化成孔壁 360°全方位可视化图像,确定地层岩性、断层、软弱夹层、岩溶及裂隙发育情况,及分析确定岩层产状等的方法。

3.1.25

管波探测法 tube wave detection

通过在钻孔井液中激发产生管波,接收并记录其经过井液和孔侧岩土体传播的振动波形,探测孔旁一定范围内的岩溶、洞穴、软弱夹层及裂隙发育分布的方法。

3.1.26

正常场 normal field

又称背景场。相对平稳的物理场。

3.1.27

异常场 anomalous field

偏离正常场并超过一定数值的物理场。

3.1.28

同相轴 event

地震记录上各道振动相位相同的极值（俗称波峰或波谷）的连续。

3.1.29

卓越周期 predominant period

大地自由震动中最大振动强度所对应频率的倒数。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

f ——频率；

H ——层厚度；

h ——深度；

I ——供电电流强度值；

K ——装置系数；

L ——回线边长；

M ——测点（站）均方误差；

m ——数据均方误差；

T ——周期；

U ——点电位；

E_x ——电场强度 x 方向水平分量；

E_y ——电场强度 y 方向水平分量；

H_y ——磁场强度 y 方向分量；

H_z ——磁场强度垂直分量；

R_n ——最低信噪比；

r_f ——第一菲涅尔带半径；

ρ ——岩、土体的电阻率；

ρ_s ——视电阻率；

ρ_s^A ——联合剖面法AMN装置视电阻率；

ρ_s^B ——联合剖面法MNB装置视电阻率；

v ——真速度；

v_c ——面波相速度；

v_p ——纵波速度；

v_R ——面波速度；

v_s ——横波速度；

v^* ——视速度；

ε ——岩土的电介常数；

ε_r ——岩土的相对介电常数；

η ——异常幅度；

η_0 ——最小可分辨电平；

λ ——波长；

β ——波长-深度转换系数；

σ ——岩土的电导率；

ΔU ——测量电极间电位差。

3.3 代号

下列代号适用于本文件。

A——供电电极的正极；

B——供电电极的负极；

AB——供电极距；

C——无穷远极；

M——测量电极的一极；

N——测量电极的另一极；

MN——测量极距；

O——观测中心点或记录点；

OO'——偶极剖面的供电极距与测量极距中心的距离；

f -K——频率波数倾角滤波方法。

4 基本要求与规定

4.1 一般规定

4.1.1 使用工程物探应符合以下前提条件：

- 被探测对象与其周围介质间必须存在明显的物性差异；
- 被探测对象应具有一定的规模埋深比，且其产生的异常场应能从干扰背景场中分辨；
- 满足拟投入物探方法对地形与环境的要求。

4.1.2 采用的工程物探方法和技术参数应结合现场地形、地球物理条件和勘探的目的，在方法试验或工程经验的基础上确定，重大工点、控制工点、地质条件复杂的工点和存在多种干扰因素的工点宜开展综合物探。具备条件时，可采用三维物探方法技术。

4.1.3 工程物探仪器应满足性能稳定、构件牢固可靠、防潮、抗震、耐磨和绝缘性能良好的要求，并应定期进行检验和保养，探测前应进行检查调试合格。

4.1.4 工程物探的测量工作应符合下列规定：

- 测网的控制基点应与已知的测量基点联测，高程和点位的误差应符合 GB 50026 的有关规定；
- 工程物探测线的控制基点、起讫点、转折点、工可阶段测线上每相距 ≤ 100 m 的测点、初勘和详勘阶段测线上每相距 ≤ 50 m 的测点、地形突变点及非均匀分布的物探测点，应进行平面和高程测量；
- 水面物探测点的高程应根据水位变化进行校正。

4.1.5 工程物探的探测深度应根据构筑物的类型、规模以及水文地质和工程地质评价的需要确定。

4.1.6 工程物探质量检查工作应符合下列规定：

- a) 应根据具体探测方法，选择重复观测、系统检查等方法；
- b) 质量检查不符合要求的数据应重新采集，并扩大抽检比例；
- c) 在资料审核时应提交质量检查资料。

4.1.7 工程物探资料应在充分掌握测区各类地质资料的基础上进行整理、处理及解释。对于综合物探资料，各种方法的解释成果应相互补充、相互验证，并利用已有钻探资料进行修正，最终作出综合解释成果。

4.1.8 工程物探作业安全应符合 GB 6722、JTG/T C22 和 DB45/T 983 的有关规定。

4.2 工作程序与要求

4.2.1 工程物探工作宜按勘前资料收集与现场踏勘、方法有效性试验、勘察方案编写、工前准备、外业生产、内业资料的处理与解释、报告编写和成果报告提交的程序进行。

4.2.2 应根据工作任务要求，收集相关的工程地质和水文地质、地球物理、地球化学、钻探及测绘等资料。

4.2.3 宜实地踏勘测区地形、地貌、植被、交通、气象、居民点和作业安全等条件，调查测区电磁、震动等干扰情况，核对已收集的工程地质和水文地质、物化探及测绘等资料。

4.2.4 应综合考虑地质任务、测区地质构造、地形地貌、干扰特征等条件，选择合适的工程物探方法。必要时进行实地方法有效性试验。

4.2.5 应在包含公路设计线位、地形等值线、主要地物等的平面图中布设工程物探测线，并有相应的文字说明。工程物探布置宜由地质专业及工程物探专业技术人员共同完成。具体内容如下：

- a) 测线应根据任务要求、探测方法进行布置，测线密度和测线长度应保证足够的正常背景、异常的连续、完整和便于追踪；
- b) 公路工程宜平行路线方向布置纵测线，垂直公路走向布置横测线；探测断层、岩性分界、地下暗河等条带状目标体，测线宜垂直这些目标体布置；探测岩溶、采空区等走向多变体，宜布设两组相互正交的测线；
- c) 测线宜呈直线布置，且宜与地质勘探剖面相重合；探测范围内有已知点时，测线应通过或靠近已知点布设；
- d) 点测时，点距、数量应满足资料处理、解释推断的需要，控制异常的测点个数应 ≥ 3 ；
- e) 实际测线位置可根据现场地形、地质条件适当调整。

4.2.6 应以本规范及相关技术规范为依据，在充分分析测区已有的资料、现场踏勘的基础上，结合测区实际情况和工作任务有针对性地编写勘察方案，主要包括下列内容：

- a) 任务与目的；
- b) 测区概况，地质、地球物理特征；
- c) 执行标准；
- d) 工程物探方法技术及技术指标；
- e) 工作布置及预计工作量；
- f) 质量与进度要求；
- g) 野外工作技术要求；
- h) 质量、安全与环境措施；
- i) 设备与人员；
- j) 生产组织与管理；
- k) 提交成果内容及时间；
- l) 有关附图及附表。

4.2.7 公路工程物探勘察方案可融合在地质勘察大纲之中，必要时单独编制物探勘察方案；当地质条件与勘察要求发生变化时，应相应调整勘察方案内容。

4.2.8 野外观测、重复观测、质量检查工作应符合下列规定：

- a) 野外作业时，应避免或排除干扰源、选择在信号相对稳定时段进行观测；
- b) 操作员应现场查看每个记录的工作参数和实测数据，若不符合要求，应查明原因并重测；
- c) 重复观测点应均匀分布，且不少于总观测点数的5%；
- d) 检查观测与原始观测应在不同的时间进行；
- e) 检查点应均衡分布、随机选取，异常地段、可疑点、突变点应重点检查；
- f) 质量检查资料与最终资料一起提交审核。

4.2.9 工程物探原始记录应完整、详实、标记清楚，签署齐全，不得涂改、重抄、撕页。原始记录资料宜包括下列内容：

- a) 物探布置平面图；
- b) 物探仪器的校验、标定及一致性测量记录；
- c) 方法有效性试验记录；
- d) 测区的基点坐标和高程、物探点测量记录；
- e) 物探班报记录和质量检查记录。

4.2.10 工程物探班报记录应与物探原始数据记录、仪器录入信息一致，且宜包含测线或旁边对物探解释有意义的地形、地质信息、干扰情况等内容。

4.2.11 工程物探内外业应密切配合，并与地调、钻探资料相结合，及时取得物探参数和成果。发现物探异常不完整时，现场应调整或增加物探测线。

4.2.12 工程物探数据处理和解释应符合下列规定：

- a) 数据处理和解释不得使用未经检查或评价为不合格的数据；
- b) 资料解释应在分析区域地质、现场调查、钻探及已有物探资料基础上，从已知到未知、从简单到复杂，总结和分析各种异常现象，得出各项地质结论；
- c) 对明显物探异常解释存在较大不确定性时，在排除数据质量问题后，应到现场采用多种方法调查分析、复核，必要时布置钻探进行验证；
- d) 推断解释应注意物探的多解性，应跟踪、回访施工结果，注重物探资料的再解释。

5 工程物探应用

5.1 一般规定

5.1.1 隧道工程、岩溶路基、采空区路基、桥梁工程、公路滑坡、运营公路地质病害及其他公路工程需查明特殊地质条件时，可采用工程物探进行勘察，并应符合下列规定：

- a) 物探工作开展前应充分收集和研究工点已有的地质资料，对公路扩建工程尚应充分收集前期物探、地质勘察及施工地质资料等；
- b) 综合分析工点的地形地貌、地质条件、物性特征并结合工程类型和勘察阶段合理选择物探方法；
- c) 物探成果应与钻探、地质调查相结合形成地质资料，作为设计基础资料；
- d) 物探工作深度应满足相应勘察阶段工程地质勘探的任务要求。

5.1.2 工可阶段工程物探应用应符合下列规定：

- a) 物探主要用于了解路线走廊带内地质构造和大型不良地质体的性质、规模、特征、分布范围等，及其对路线方案的影响程度；
- b) 物探工作宜在研究区域地质资料、遥感影像资料和大面积地质调绘的基础上进行；

- c) 宜选用电磁法、浅层地震法、直流电法等物探方法；
- d) 物探成果应能定性解释研究对象的分布范围及规模。

5.1.3 初勘阶段工程物探应用应符合下列规定：

- a) 物探主要用于探测线路主要比选方案的区域性地质构造和大型不良地质体；探测岩溶路基、采空区路基、桥梁、隧道等重要构筑物的地质情况；探测专项地质研究中的疑难地质问题；
- b) 物探工作应在分析工可资料及路线和构筑物的地质调绘资料的基础上进行；
- c) 沿线路中线或垂直探测对象走向布置主测线，必要时布置横测线，测线数量、长度及间距应能有效控制探测对象的分布及规模；
- d) 宜选用电磁法、浅层地震法、直流电法、地质雷达、波速测试、井中物探法等物探方法，必要时进行综合物探；
- e) 物探成果应能反映路线及构筑物的地层岩性、地质构造和地质异常体的分布及规模。

5.1.4 详勘阶段工程物探应用应符合下列规定：

- a) 物探主要用于进一步查明拟建公路的工程地质、水文地质条件，进行岩土体物理参数测试；
- b) 应充分搜集和研究勘察区内已有的各种地质资料后进行；
- c) 测线布置应满足工程地质评价和工程设计的需要，对工程稳定性有重要影响的地段应加密探测并布置钻探查证；
- d) 宜选用电磁法、浅层地震法、直流电法、地质雷达、层析成像、波速测试、井中物探法等物探方法；
- e) 物探成果应能反映地质异常体的位置和空间展布特征，并作为工点工程地质评价和工程设计的基础资料。

5.1.5 施工阶段工程物探应用应符合下列规定：

- a) 主要针对详细勘察阶段未能解决的工程地质问题，在施工过程中暴露出来的影响设计、施工方案的专门性工程地质问题进行物探勘察，及隧道超前探测等；
- b) 物探工作应在综合分析勘察、设计、工程施工等资料的基础上进行；
- c) 充分了解场地条件及干扰情况，必要时进行方法有效性试验，宜选用浅层地震法、直流电法、地质雷达、层析成像、声波测试、钻孔全景光学成像、管波探测法等物探方法；
- d) 物探测线、测点应根据探测目的，结合现场施测环境及地质条件等合理布置；
- e) 物探解释结果应采用相关的工程及验证资料修正。

5.1.6 运营阶段工程物探应用应符合下列规定：

- a) 物探主要用于探测公路运营期间发生路基滑移、沉陷、开裂等地质灾害路段的不良地质分布情况，检测地基注浆加固效果等，为地质灾害治理提供地质依据；
- b) 宜在不中断交通状态下开展探测工作；
- c) 应通过现场调查，初步判断地质灾害发生的主要诱因，并充分考虑电磁干扰、振动干扰及硬化路面等因素，在此基础上宜选用地质雷达、地震反射波法、微动勘探法、高密度电法、瞬变电磁法或层析成像（CT）等综合物探进行探测；
- d) 物探异常位置宜布置钻探查证；
- e) 选用地基注浆加固治理方式时，宜在注浆前后开展同种同参数的工程物探方法来对比分析和定性评价注浆效果。

5.2 路基工程

5.2.1 工程物探主要用于探测路基工程的覆盖层厚度及分布、岩性分界、土洞、岩溶和采空区的空间位置及分布规模、断层构造破碎程度等。

5.2.2 高陡边坡和深路堑的岩溶、采空区勘探可在路基开挖至路基基底后进行。

5.2.3 工程物探测线应结合路基的类型合理布置，并符合下列规定：

- 一般路基沿路线方向宜布置 1 条以上纵测线，地质条件复杂时应布置垂直路线走向的横测线；
- 探测地下暗河、断层破碎带、岩性接触带或岩溶发育带等条带状不良地质时，测线宜垂直地质体布置；
- 地表岩溶或采空区等不良地质密集发育地段应加密测线、测点；
- 测线长度应超出路基工程的长度及宽度，并对影响路基稳定性的物探异常能追踪完整。

5.2.4 探测深度应符合 JTG C20 的有关规定。

5.2.5 常用的工程物探方法包括高密度电法、地震反射波法、主动源面波法、微动勘探法、瞬变电磁法、地质雷达等；基岩裸露或接地不良时，宜采用瞬变电磁法或地质雷达。

5.2.6 开展工程物探的路基工程，对于物探异常段或点，宜布置钻孔或探槽，用于物探解释的修正。

5.3 桥梁工程

5.3.1 工程物探主要用于探测桥梁工程的岩性分界、基岩面起伏和埋深、地层划分、断层位置及产状、土洞、岩溶或采空区的发育及分布特征、桥梁岸坡卸荷裂隙等。

5.3.2 工程物探测线布置应符合下列规定：

- 初勘阶段应沿路线方向布置不少于 1 条测线，遇有基岩面起伏或持力层性状变化较大时，布置平行路线的辅助测线或横测线；
- 详勘阶段应沿桥梁轴线布置测线；存在岩溶、土洞等不良地质问题时应通过桥梁墩台位置分别布置纵测线和横测线。

5.3.3 剪切波速测试内容及要求应按 JTG/T 2231-01 的有关规定执行。

5.3.4 初勘阶段应以地面物探为主，常用物探方法包括高密度电法、地震反射波法、主动源面波法、微动勘探法、瞬变电磁法、音频大地电磁法、地质雷达等；详勘阶段和施工阶段，除地面物探外，岩溶强发育区，还应在桥台、桥墩和基础部位开展层析成像、测井等井中物探工作。

5.3.5 桩基础的持力层性状探测宜采用地质雷达、弹性波反射法、管波探测等方法；桩周岩溶探测宜采用井中雷达及管波探测法等；桩底沉渣厚度探测宜采用波速测试和钻孔全景光学成像法等。

5.4 隧道工程

5.4.1 具备施测条件的情况下，高速公路、一级公路及二级公路隧道工程均应开展工程物探工作。

5.4.2 工程物探主要用于解决下列地质问题：

- 探测隧道剖面的各地层岩性、埋深与厚度；
- 探测隧道轴线段有无断层、破碎带、软弱夹层等通过；
- 探测基岩风化程度，结合地震勘探进行波速分层，并计算围岩完整性系数；
- 划分洞口地层结构，判断洞口稳定性；
- 探测隧道洞身岩土体的富水性，为分析隧道工程地质、水文条件提供资料；
- 查明岩溶、采空区、滑坡等不良地质现象。

5.4.3 工程物探测线布置应符合下列规定：

- 连拱隧道沿隧道中线布置 1 条物探纵测线，分离式隧道沿左右线分别布置 1 条物探测线，隧道进出洞口各布置 1~2 条横测线，必要时可在洞身段布置横测线。地质条件复杂的隧道应适当增加纵、横测线；
- 探测地下暗河、断层破碎带、岩性接触带或岩溶发育带等条带状不良地质时，宜增加不少于 2 条垂直这些地质体的测线，测线长度应根据探测深度及采用的物探方法确定；
- 物探工作完成后隧道位置相对原线位发生较大变化时，宜重新布置物探测线；
- 隧道贯通布线困难时可分段布置，但重要岩层界限、断层及地质异常位置应有物探测线控制。

5.4.4 隧道勘察应选用两种以上的物探方法进行综合探测，并应符合下列规定：

- a) 宜采用地震折射波法来对隧道进行波速分层、探测地质构造，必要时采用面波法和反射波法；
- b) 宜采用直流电法（高密度电法、电阻率剖面法、电测深法、充电法等）或电磁法（可控源音频大地电磁法、音频大地电磁法、瞬变电磁法等）进行隧道地层划分、隐伏地质构造、岩溶、采空区等探测，前者主要用于浅埋隧道，后者主要用于深埋隧道；
- c) 高阻层覆盖（如基岩出露）区，或湖面、湿地等地表低阻层覆盖区，可采用瞬变电磁法；
- d) 隧道穿越含有放射性物质的岩体时宜进行放射性测量，并应符合 DB45/T 983 的有关规定；
- e) 放射性气体测量法可用于对隐伏断层破碎带进行辅助性探测并作出定性解释，并应符合 DB45/T 983 的有关规定；
- f) 隧道钻孔应进行声波测井，取芯困难的钻孔宜进行电视或超声波成像测井；
- g) 对于在隧道洞身存在较大溶洞时，可采用层析成像（CT）详细查明溶洞、洞穴等；
- h) 隧道开挖后底板岩溶探测可采用高密度电法、地震反射波法、地质雷达、层析成像（CT）等物探方法；
- i) 高密度电法及电磁法用于隧道勘察应进行地形校正，如有掌握较清楚的地质构造信息，则宜在正演的基础上进行反演解释；
- j) 可控源音频大地电磁法和音频大地电磁法用于隧道勘察时，在隧道洞口或埋深小的洞身段，静态效应可用来定性调查浅部不均匀地质体的分布；
- k) 需要开展井中物探的钻孔，终孔孔径宜 ≥ 75 mm。

5.4.5 探测深度宜至隧道洞底以下不小于 20 m；具备条件时，孔内测试宜进行整孔测试。

5.4.6 因不具备施测条件而未能在勘察阶段开展工程物探的隧道工程，应在施工阶段加强隧道超前地质预报与超前水平钻探工作，在岩溶强发育路段应开展隧道底板岩溶探测。

5.5 岩溶探测

5.5.1 工程物探主要用于查明碳酸盐岩层与非碳酸盐岩层的界线，探测岩溶的形态、规模、埋深、走向及平面分布，探测岩溶地下水富集区和排泄通道，探测岩溶土洞分布等。

5.5.2 工程物探测线布置应符合下列规定：

- a) 物探测线按公路中线或垂直岩溶发育带走向布置，不宜少于 2 条测线，测线间距为 5 m~30 m，岩溶强烈发育、物探异常地段布置横测线；
- b) 探测范围应超出工程边界及工程受岩溶塌陷的影响范围；
- c) 探测与地下水活动有关的岩溶发育带还应布置相关的追踪测线；
- d) 对下列地段，应进行重点勘察，并加密或延长探测线，具体如下：
 - 1) 对于地面塌陷或地表水消失地段；
 - 2) 地下水强烈活动地段；
 - 3) 碳酸盐岩层与非碳酸盐岩层接触地段；
 - 4) 物探异常或公路构筑物基础下有溶洞、暗河分布的地段；
 - 5) 当出现物探异常延伸到物探剖面外时，应延长物探测线，直至追踪完毕物探异常体为止。
- e) 岩溶峰林地貌区，陡峻山峰上不具备地面物探施测条件时，宜在相对平缓的溶蚀洼地、沟谷、山脚布置物探测线，且应根据场地条件及探测任务选择合适的物探方法。

5.5.3 选用工程物探方法应符合下列规定：

- a) 桥梁、路基和浅埋隧道工程的岩溶探测可选用高密度电法、电测深法、电阻率剖面法、地震反射波法、主动源面波法、微动勘探法及微重力测量等；接地条件差时可选用瞬变电磁法；覆盖层薄、埋深浅的岩溶探测可选用地质雷达；
- b) 埋深较大隧道的岩溶探测可选用音频大地电磁法、可控源音频大地电磁法、瞬变电磁法等；

- c) 水域的岩溶勘探宜采用高密度电法、三极直流电测深法、瞬变电磁法；
- d) 溶洞个体对公路构筑物稳定性有重要影响的地段，宜采用层析成像(CT)详细探测洞穴的位置、规模、延伸、充填情况；
- e) 探测溶洞是充水还是填充疏松沉积物时，可在异常点上观测综合激电参数，配合其它方法进行综合解释；
- f) 探测地下暗河位置、测定地下水流速和流向等，可选用自然电场法、充电法等；
- g) 渗漏及管涌探测宜采用伪随机流场法、充电法、自然电场法等；
- h) 孔壁岩溶宜采用综合测井、波速测试、钻孔全景光学成像、钻孔管波探测等方法；
- i) 桩基岩溶探测按 5.3.5 执行；
- j) 当岩溶分布及成因复杂时宜进行综合物探；
- k) 埋深小于 10 m 的岩溶土洞宜选用地质雷达、地震横波反射法、地震映象法；埋深大于 10 m 的岩溶土洞宜选用地震横波反射法、地震映象法等；无充填岩溶土洞可选用高密度电法作为辅助方法。

5.5.4 需对单条测线岩溶异常进行钻探验证时，宜先在异常中心垂直该测线方向增加横跨异常的物探短测线进行探测，以此综合分析确定钻孔具体位置。

5.5.5 公路工程施工揭示有影响工程稳定性的溶洞而无相应的勘察资料时，宜补充物探勘察。

5.5.6 工程物探资料解释应结合地质分析法，在对地质调查、钻探资料分析测区岩性、地质构造、地下水活动等岩溶发育条件和规律的基础上，作出合理的物探推断解释。

5.6 采空区探测

5.6.1 工程物探主要用于探测采空区的分布范围、埋藏深度、规模。

5.6.2 工程物探测线布置应符合下列规定：

- a) 物探布置应在收集开采历史资料，现场地质调绘、当地居民走访调查基础上进行；
- b) 物探工作剖面宜与控制地层的走向或采空巷道垂直，必要时布置网格测网，测线间距满足工程设计要求，测点距应小于采空巷道宽度的 1/2；
- c) 重点布置在公路路基范围，采空区隐患严重地段加密测线，测网范围应大于采空区对公路工程的影响范围。

5.6.3 工程物探方法选择宜根据地形、埋深、规模、场地条件及现场方法试验综合确定，应符合下列规定：

- a) 探测埋藏浅的小型采空区。当采空区与围岩有明显电性差异时，可选用高密度电法；当采空区与围岩有明显的波阻抗差异时，可选用地震反射波法、主动源面波法和微动勘探法；当采空区与围岩有明显介电常数差异时，可选用地质雷达；
- b) 探测埋藏深的规模较大的采空区。当采空区与围岩有明显电性差异时，可选用瞬变电磁法、音频大地电磁法，充水时还可选用激发极化法；采空区与围岩有明显的波阻抗差异时，可选用地震反射波法；还可以选用微重力测量、微动勘探法等；
- c) 探测埋藏深而规模小的采空区或巷道，宜采用层析成像(CT)、井中雷达等方法；
- d) 地表接地条件差或存在高阻或低阻覆盖层时，宜采用瞬变电磁法；
- e) 宜采用综合物探进行探测。

5.6.4 公路工程施工揭示路基范围内有采空区而无相应的勘察资料时，宜补充物探勘察。

5.7 滑坡探测

5.7.1 工程物探主要用于解决下列地质问题：

- a) 探测滑坡体的空间分布界线；

- b) 探测滑坡区的含水层位分布状况;
- c) 探测结构面和滑动面的数目、深度及形态变化;
- d) 探测滑坡体的地层结构及隐伏地质体。

5.7.2 工程物探测线布置应符合下列规定:

- a) 物探主测线沿滑坡轴向布置, 平行和垂直主测线分别布置辅助测线, 测线数量和长度应根据滑坡的规模确定;
- b) 物探测线应与地质勘探线一致。

5.7.3 工程物探方法应根据地形、地质条件选择:

- a) 当滑坡体与滑床电性差异特征明显时, 宜选用电法勘察, 包括电测深法、电剖面法、高密度电法、充电法、甚低频法、自然电场法等; 当接地条件差时, 宜选用瞬变电磁法;
- b) 当滑坡岩土体波阻抗差异特征明显时, 宜选用地震折射波法、地震反射波法、主动源面波法和微动勘探法;
- c) 当滑坡岩土体热交换特性明显时, 宜选用测温法;
- d) 当具备放射性差异特征时, 宜选用静电 α 卡法及其它放射性方法;
- e) 有钻孔时, 探测滑带特性和确定滑坡体的物性参数宜选用综合测井;
- f) 当滑坡规模大、成灾地质条件复杂时, 宜选用综合物探方法。

5.8 超前地质预报

5.8.1 超前地质预报主要用于探测隧道掌子面前方断层构造及破碎带、岩溶、节理裂隙发育带、侵入接触带、软弱带等不良地质体的位置、规模及地下水发育情况等。

5.8.2 超前地质预报探测应用条件除应符合 4.1.1 的规定外, 同时应符合下列规定:

- a) 地质雷达: 被探测对象应与周围介质存在明显介电常数差异, 电磁波反射信号主要特征明显; 不能探测极高导电屏蔽层下的对象;
- b) 弹性波反射法: 被探测对象应与周围介质存在较明显的波阻抗差异, 断层或岩性界面的倾角应 $\geq 35^\circ$, 构造走向与隧道轴线的夹角应 $\geq 45^\circ$ 。

5.8.3 工程物探方法选择应符合下列规定:

- a) 中长距离探测宜采用弹性波反射法, 弹性波反射法探测距离宜按 100m 控制, 不宜超过 150m;
- b) 短距离探测宜采用地质雷达, 地质雷达探测距离宜 ≤ 30 m;
- c) 当有水平超前钻探或超深炮孔时, 宜采用井中雷达或管波探测法;
- d) 有针对性和有效地探测隧道施工可能遇到的地质灾害问题;
- e) 适应隧道工程复杂的施工环境;
- f) 在地质条件复杂的隧道段应采用综合物探。

5.8.4 工作布置应符合下列规定:

- a) 地质雷达工作布置应符合下列规定:
 - 1) 测网密度和天线移动速度应反映出探测对象, 测线宜沿掌子面采用“井”字或一横三竖形式布设, 洞口段宜根据掌子面实际情况或在上方地表合理布置测线进行探测;
 - 2) 宜采用连续测量的方式, 不能连续测量的地段采用点测方式测量; 连续测量时天线应匀速移动, 并与仪器的扫描率相匹配; 点测时应在天线静止状态采样, 点距应 ≤ 0.1 m;
 - 3) 支撑或包裹天线的器材应选用绝缘材料, 天线操作人员应与工作天线保持相对固定的位置;
 - 4) 测线上的掌子面应平整, 无障碍, 且天线易于移动; 测试过程中, 应保持工作天线的平面与探测面基本平行, 距离相对一致;
 - 5) 现场记录应注明探测时掌子面的大致情况以及不良地质体的位置与规模等。

b) 弹性波反射法工作布置应符合下列规定:

- 1) 根据隧道施工情况及探测目的,合理确定检波器和炮点在隧道左或右边墙的位置,检波器与炮点应在同一平面和高度上;场地条件限制时应依据地震波的传播理论灵活设计观测系统;
- 2) 钻孔:应按设计的要求(位置、深度、孔径、倾角等)钻孔,一般情况下,钻孔位置不应偏离设定位置;特殊情况下,以设定的位置为圆心,可在半径0.2m的范围内移位;孔身应平直顺畅,能确保耦合剂、套管或炸药放置到位;在不稳定的岩层中钻炮孔时,可采用外径与孔径相匹配的薄壁塑料管或PVC管插入钻孔,防止坍孔;
- 3) 套管安装:用环氧树脂、锚固剂或加特殊成分的不收缩水泥砂浆作为耦合剂,安装接收器套管;用电子倾角测量仪测量接收器孔的几何参数,并作好记录;
- 4) 炸药装填:装填炸药前,应测定炮孔的倾角和深度,并作好记录;炸药量的大小应通过试验或根据经验确定;用装药杆将炸药卷装入炮孔的最底部;在激发前,炮孔应用水或其他介质充填,封住炮口,确保激发能量绝大部分在地层中传播;
- 5) 仪器安装与测试:用清洁杆清洗套管内部,将接收单元插入套管,应确保接收器的方向正确,采集信号前应对接收器和记录单元的噪音进行测试;
- 6) 噪音检查:数据采集前,应对仪器本身及环境的噪音进行检测;仪器工作正常,噪音振幅峰值 <-78 dB时,方可引爆雷管炸药接收记录;
- 7) 数据记录:在放炮过程中应采用炮序号递增或递减的方式进行,确保炮点号正确。

5.8.5 数据采集应符合下列规定:

a) 地质雷达数据采集应符合下列规定:

- 1) 采用主频 ≤ 100 MHz屏蔽天线,通过试验选择雷达天线的工作频率、确定介电常数;当探测对象情况复杂时,应选择多个频率的天线;当多个频率的天线均能符合探测深度要求时,应选择频率相对较高的天线;
- 2) 应选择合适的时间窗口和采样间隔,并根据数据采集中的干扰变化和效果调整采集参数;
- 3) 数据波形记录应清晰,能够识别有效反射电磁波信号;
- 4) 异常区应重复观测,重复性较差时要求多次观测,并查明原因;
- 5) 探测区内不应有较强的电磁波干扰;现场测试时应清除或避开测线附近的金属物等电磁干扰物;当不能清除或避开时应在记录中注明,并标出位置;
- 6) 连续预报时前后两次重叠长度应在5m以上。

b) 弹性波反射法数据采集应符合下列规定:

- 1) 采用单道激发多道接收或多道激发单道接收的观测方式;
- 2) 所有记录无溢出,初至清晰,各道初至无明显延迟;
- 3) 记录缺失道 $\leq 20\%$,且不连续;
- 4) 数据采集时应尽可能减少隧道内其他震源振动产生的地震波、声波的干扰,并应采取压制干扰波的措施,波形记录无明显高频振荡出现;
- 5) 连续预报时前后两次重叠长度应在10m以上。

5.8.6 资料解释应符合下列规定:

a) 地质雷达资料解释应符合下列规定:

- 1) 参与解释的雷达剖面信号特征应清晰;
- 2) 解释前宜做编辑、滤波、增益等处理。信号较复杂时,还宜进行道分析、FK滤波、正常时差校正、褶积、速度分析、消除背景干扰等处理;
- 3) 根据反射波形、振幅强度及初始相位等信号特征确定地质异常体的性质,对反射层位追踪并圈定异常的形态;

- 4) 在地质雷达剖面图上标出反射层位或地质异常体的反射波组;
- 5) 根据反射时间, 计算异常体的位置及与掌子面的距离;
- 6) 必要时应考虑制作地质雷达正演和反演模型, 分析不同背景、介电常数分布对地质雷达图像的响应。
- b) 弹性波反射法资料解释应符合下列规定:
 - 1) 采用仪器配套的处理软件进行分析;
 - 2) 质量不合格的资料不得用于成果分析;
 - 3) 准确输入野外采集参数, 包括隧道、接收器和炮点的几何参数等;
 - 4) 剔除不合格的地震道, 只有合格的地震道才能参与处理;
 - 5) 应根据预报长度选择合适的用于处理的时间长度; 带通滤波参数合理, 避免波形发生畸变; 提取的反射波, 应确保波至能量足够; 速度分析时, 建立与预报距离相适应的模型; 反射层提取时, 根据地质情况和分辨率选择提取的反射层数目; 当处理出来的物探异常与已知实际地质资料不一致时, 应对处理模型、反射层数据等参数进行重新调整, 并查找原因; 当没有已知实际地质资料参考时, 应选用主要物探异常稳定可靠的结果进行下一步地质解释;
 - 6) 通过反射波组同相轴的层位及连续特征, 判断掌子面前方地层、岩性、构造界面分布和不良地质体的位置;
 - 7) 通过上行波与下行波的速度差异确定反射界面与掌子面之间的距离, 并计算反射界面与隧道轴线之间的夹角。
- c) 地质成果解释应结合隧道地质勘察设计资料、洞内外地质调查情况、掌子面开挖后方揭露情况、物探成果资料、探测体的物性特征和几何特征及现场干扰情况进行综合分析, 推断隧道开挖工作面前方围岩的工程地质与水文地质条件, 如软弱夹层、断层破碎带、节理密集带等地质体的性质、规模和位置等。结合岩体物理力学参数、围岩软硬、含水情况、构造影响程度、节理裂隙发育情况等资料对围岩级别进行初步评估;
- d) 对工程施工有重要影响的物探异常应采用超前钻探等其他勘探手段进行综合勘探, 并对物探解释结果进行校正。

5.9 物性参数测试

5.9.1 测试内容主要包括岩土电阻率、纵波速度、横波速度等测试, 以及通过纵、横波速度和密度值间接求取泊松比、岩体完整性系数、各向异性系数、风化系数等。

5.9.2 物性参数测试可选用直流电法、浅层地震法、声波法、井中物探等方法。

5.9.3 物性参数的测试条件、测试方法和测试数量应满足参数用途的要求。

5.9.4 岩土电阻率测试应符合下列要求:

- a) 测试岩土电阻率可选用电测深法和电阻率测井, 并应采取点面结合方式进行;
- b) 测试基岩的电阻率可在露头或平洞内采用电测深法, 宜采用极距小于 0.5 m 的对称四极装置;
- c) 采用电阻率测井时, 井中测试段应充满井液;
- d) 在地面数据采集宜在连续三日晴天后进行;
- e) 测点应覆盖测试场地, 分布均匀。

5.9.5 岩样波速测试应符合下列规定:

- a) 主要测定岩样和混凝土构件的波速, 用于评价岩体的完整性、衬砌厚度、混凝土强度等;
- b) 岩样波速测试宜采用声波法;
- c) 岩样应重复测量, 允许相对误差为 $\pm 5\%$ 。

5.9.6 岩土体波速测试应符合下列规定:

- a) 在地面测试覆盖层及基岩的波速可选用折射波法、反射波法或面波法；
- b) 在平洞、竖井及地下洞室中测试岩体波速可选用声波法或地震波法；
- c) 在钻孔中可选用声波测井或地震波测井；
- d) 测试两孔间岩土体纵波、横波速度可采用透射波法。

5.9.7 使用纵波速度评价岩体风化程度和完整性按 JTG C20 的有关规定执行。

5.9.8 宜通过钻孔波速测试获得场地各地层的剪切波速，并按 JTG C20 的有关规定计算场地等效剪切波速度和划分场地类别。

5.9.9 不具备钻孔波速测试条件时，可利用面波法的频散曲线求取各地层的剪切波速度和等效剪切波速度。

6 直流电法

6.1 一般规定

6.1.1 直流电法应用应符合下列规定：

- a) 探测目标体与周围地质体之间存在较明显的电性差异；
- b) 探测目标体产生的电性差异能从干扰背景中分辨出来；
- c) 遇到下列情况，一般不宜开展直流电法工作：
 - 1) 接地条件极差；
 - 2) 地形切割十分剧烈、河网发育以及通行困难的地区；
 - 3) 地电断面中存在强烈电性屏蔽层的地区；
 - 4) 无法避免或无法消除工业游散电流等人文干扰，不能保证观测质量的地区。
- d) 禁止在易产生危险的输送燃气、航油及其他易燃、易爆的管道上采用直流电法探测。

6.1.2 根据测区地球物理条件和任务要求，直流电法可选用电测深法、电剖面法、高密度电法、自然电场法、充电法等。

6.1.3 直流电法仪器应能对自然电位、漂移及电极极化进行补偿，应有过压、过流及 AB 开路保护能力以及直流高压反接保护能力等。主要技术指标应符合表 1 规定。

表 1 直流电法仪性能指标要求表

电位测量 分辨率 (mV)	电位测量精度 (%)		电流测量分 辨率 (mA)	电流测量 精度 (%)	仪器输入阻 抗 (MΩ)	最大补偿范 围 (V)	最大供电 电压 (V)	最大供电电 流 (A)	对 50 Hz 工频 干扰抑制
	≤3 mV 时	>3 mV 时							
≤0.1	±1	±0.5	≤0.1	±0.5	≥25	≥±1.5	≥500	≥3	>40 dB

6.1.4 直流电法的数据采集应符合下列规定：

- a) 同一工点同时使用多台仪器时，应进行仪器一致性测量，一致性测量的均方相对误差不应大于 ±3%，不同供电单元间的距离不应小于最大供电电极距的 5 倍；
- b) 施测前应进行供电和测量导线绝缘性检查，供电线对地绝缘电阻应 >2 MΩ/km，测量线对地绝缘电阻应 >5 MΩ/km；
- c) 供电电极的接地电阻应 <5 KΩ，电极接地电阻过大时应采取浇水、加深电极或增加电极数量等措施；
- d) 测量电极应使用同一类电极，其接地电阻应小于仪器输入阻抗的 1%，电位差 ≥0.3 mV；

- e) 供电电流宜 $>100\text{mA}$ ，在不改变接地条件和工作电压时两次电流测量值的相对误差应 $<1.0\%$ ；
- f) 当出现负电阻率时，应查明原因、改变观测参数或工作方法；
- g) 读数困难、极化不稳定、存在明显干扰现象的测点及异常点、畸变点、测线接头点应进行重复观测；
- h) 开展人工场源的电磁法，不应在同一时间同一场地开展直流电法。

6.1.5 漏电检查应符合下列规定：

- a) 在以下情况下应进行漏电检查：
 - 1) 开工和收工时的无穷远供电极；
 - 2) 电剖面法正常情况下每隔 20 个测点，潮湿地区和有疑问的异常区每隔 10 个测点；
 - 3) 电测深 $AB/2$ （或 $A0$ ） $\leq 500\text{m}$ 应检查导线的起始和最后一个极距； $AB/2$ （或 $A0$ ） $> 500\text{m}$ 应检查所有极距；
 - 4) 转移新测站和工作结束时；
 - 5) 观测数据的畸变点。
- b) 仪器外壳与各接线柱间绝缘电阻应 $\geq 50\text{M}\Omega/500\text{V}$ ，长导线绝缘电阻每公里应 $\geq 5\text{M}\Omega/500\text{V}$ ；
- c) 当现场发现漏电时，应查明原因并消除后，按序返回重新观测，直至连续 3 个点的观测值与原观测值之差在 5% 以内为止。

6.1.6 直流电法数据采集中的重复观测应符合下列规定：

- a) 当野外观测出现 ΔU 数据不稳定、 $\Delta U < 3\text{mV}$ 或 $I < 10\text{mA}$ 时，应进行重复观测；
- b) 取算术平均值作为最终的基本观测值；
- c) 自然电场法重复观测的允许绝对误差为 2mV ，其他方法重复观测的允许平均相对误差为 $\pm 4\%$ ；
- d) 参与平均值计算的数据个数，不得少于该点总观测次数的 $2/3$ ；
- e) 重复观测应改变供电电流，且改变量应 $>20\%$ ；
- f) 重复观测的最大值与最小值之差相对于二者的算术平均值应满足式（1）的计算：

$$\frac{m_{\max} - m_{\min}}{\frac{1}{2}(m_{\max} + m_{\min})} \times 100\% \leq \sqrt{n} \times 4\% \quad (1)$$

式中：

$m_{\max}$ ——直流电法重复观测最大值；

$m_{\min}$ ——直流电法重复观测最小值；

n ——重复观测次数。

- g) 重复观测误差超过允许范围时，应进行多次重复观测并检查极距、漏电、接地、仪器及接线等，还应查询接地位置及其附近情况。

6.1.7 直流电法的观测质量检查应符合下列规定：

- a) 观测质量检查应以一个电测深点或一段电剖面为单元，并应隔日重新布极进行观测；
- b) 质量检查点应随机抽取、分布均衡，异常点或有疑问点应重点检查；检查量不应少于 5%；
- c) 质量检查后可按式（2）计算均方相对误差 M ， M 应不超过 $\pm 5\%$ 。

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n m_i^2} \quad (2)$$

$$m_i = 2 \frac{|\rho_{st} - \rho'_{st}|}{\rho_{st} + \rho'_{st}} \times 100\%$$

式中：

M ——总均方相对误差；
 n ——检查观测点总个数；
 m_i ——第 i 个检查点的相对误差；
 ρ_{si} ——第 i 个检查点的原始观测值；
 ρ'_{si} ——第 i 个检查点的检查观测值。

6.1.8 直流电法的资料处理应符合下列规定：

- 地形起伏较大时，应考虑地形影响，并作地形校正；
- 同一工点的剖面图应采用相同的比例尺，并绘制平面剖面图。充电法在平面剖面图上还应标出充电点的平面位置；
- 绘制电性参数断面图应设置色标，同一工点的色标应一致；

6.1.9 直流电法的资料解释应符合下列规定：

- 应研究不同介质的电性特征及变化规律；
- 应研究异常所处位置及附近的地形、地质条件、干扰情况，区分有意义异常和干扰异常；
- 应对比正演曲线和试验结果，研究异常的特征，确定异常体的性质及其平面位置、埋深和形态等；
- 对数据进行反演解释时，应结合原始数据或曲线进行推断解释；
- 对于土洞、溶洞、采空区等个体目标在单测线引起的异常，解释时应充分考虑旁侧效应引起的目标体位置偏差。

6.2 电测深法

6.2.1 电测深法主要用于划分地层，探测隐伏构造、裂隙发育区、滑坡体、岩溶、采空区和地下水源等。

6.2.2 电测深法的工作布置应符合下列规定：

- 用于划分地层时，测点间距应小于探测目标体埋深的一半；
- 剖面性工作测点密度应保证最小的目标体的异常至少在三个相邻测深点上有清晰的反映；
- 测站应远离变压器、高压线等大型电力设施，使探测目标体产生的异常场能从干扰背景场中分辨出来；
- 电性分布不均匀的测区应布置适当的十字电测深或多方向的三极电测深查明地层电性的各向异性情况；
- 装置方向应根据测区的地形、地质、地电条件确定，在同一电性单元内宜保持一致；
- 有钻孔时，应布置测线经过钻孔。

6.2.3 电测深法常用装置有对称四极、单侧三极、三极联合、轴向偶极、赤道偶极、微分、五极纵轴及环形装置。应根据勘察任务、场地条件、目标体形态特征、纵横向分辨力要求和干扰情况等因素合理选择，应符合下列要求：

- 探测缓倾斜层状目标体时，宜选用对称四极或赤道偶极装置；
- 在探测局部目标体（二维、三维目标体）时，宜在单侧三极、三极联合、轴向偶极等装置中选用；若异常体的产状未知或多变，宜采用三极联合装置；
- 对于非水平的构造带、岩性分界探测，可选用双向三极测深装置、微分测深装置；
- 探测浅层不均匀地质体，可选用偶极测深装置；
- 探测均匀介质中的非层状异常体，可用五极纵轴装置；
- 测试岩土体电性参数，宜选用对称四极测深装置；
- 探测岩层各向异性及裂隙发育的主导方向，宜选用环形装置。

6.2.4 电测深法极距的选择应符合下列规定：

- AB/2 的增距比一般应不大于 1.8 倍，其对数间隔宜均匀分布；最小 AB/2 应能反映曲线的首支渐近线；最大 AB/2 宜大于目标体底板埋深的三倍以上，当以“无穷大”电阻率值的电性层为底部电性标志层时，45° 上升的曲线尾支渐近线上应有 3 个点分布；
- 三极测深中的无穷远极宜位于 MN 的中垂线上，无穷远极到测点的距离应大于最大供电电极距 AO 的 5 倍以上；
- 非等比装置的 MN 距与 AB 的比值应为 1/3~1/30，当观测的电位差 $< 0.3\text{mV}$ 时，应更换 MN；更换时，应在测深曲线接头处重复两个观测极距；在探测深度不大的密极距测深时，MN 距宜固定。

6.2.5 电测深的数据采集应符合下列规定：

- 供电电流应 $> 15\text{mA}$ ，当观测电位差 $< 3\text{mV}$ 时，应改变电流强度重新测量；
- 曲线出现不正常脱节时，应改变 MN、变更装置方向或测点位置重新测量；
- 电测深法应现场即时计算视电阻率值，并绘制电测深曲线图。

6.2.6 电测深法的质量检查点应为测深点，检查量不应少于总工作量的 5%。

6.2.7 电测深法资料解释应研究单个电测深点的曲线类型、斜率、首尾支渐近线、极值点、拐点、局部畸变点等；一条剖面有多个测深点时，应绘制视电阻率等值线断面图，并对断面作出定性、定量解释，绘制相应比例尺的推断地质断面图。

6.2.8 电测深法的图件宜包括：

- 电测深曲线图或电测深曲线类型图；
- 视电阻率断面图；
- 等 AB/2 视电阻率平面图；
- 综合解释平面图、剖面图。

6.3 电剖面法

6.3.1 电剖面法主要用于探测岩溶、断层及倾向、裂隙发育区、岩性分界线、土洞或采空区等。

6.3.2 电剖面法的测线布置应符合下列规定：

- 应布置多条大致垂直探测目标体可能走向的物探测线；
- 不少于 3 条测线通过目标异常，反映单个异常的测点不少于 3 个；
- 影响工程稳定性的目标异常应追踪完整。

6.3.3 电剖面法的装置应符合下列规定：

- 探测非水平的构造带、岩性界面及局部不良地质体，宜选用对称四极装置、三极装置等；
- 盲区面积性探测、探测陡立薄板状高阻体宜选择中间梯度装置；
- 探测直立岩层分界面、陡立薄板状低阻体宜选择联合剖面装置；
- 地表电性不均匀的浅层探测可选用偶极装置。

6.3.4 电剖面法电极距的选择应符合下列规定：

- 对称四极剖面法的供电电极距宜为探测对象顶部埋深的 4~6 倍，测量极距应不小于探测对象的顶部埋深且宜不大于供电电极距的 1/3；
- 联合剖面法的 AO 宜大于探测对象顶部埋深的 3 倍，测量极距应小于供电电极距的 1/3；
- 中间梯度剖面法的测量区间应位于供电电极距中部 AB/3 范围内；当采用多线观测时，旁测线距主测线的距离应不大于 AB/6，移动 AB 时应有两个以上的测点重叠；
- 复合电剖面装置 AB 和 A' B' 的比值应根据探测目的及场地地电条件，由现场试验确定；
- “无穷远极 C”距离测线的垂直距离应满足 $CO \geq 5 AO$ (或 BO)。

6.3.5 电剖面法重复观测和检查观测应符合下列规定：

- a) 电剖面每 10 个观测点应进行一个点重复观测,在两个排列的连接处重复观测不少于 2 个测点;
 - b) 采用复合装置观测时,应对被检查点的所有极距进行检查观测;
 - c) 电剖面法的观测数据允许视电阻率均方相对误差为 $\pm 5\%$ 。
- 6.3.6 电剖面法的资料解释应符合下列规定:
- a) 可采用对比类推法和经验公式法;
 - b) 推断目标体走向应保证至少在三条相邻剖面上有相似的曲线特征;
 - c) 可采用地形校正方法消除或压制因地形起伏产生的虚假异常;
 - d) 根据曲线的特征判断异常的性质,圈定异常体平面位置,估算其埋深;
 - e) 有条件时,选择典型剖面曲线进行正、反演,并作出定量解释。
- 6.3.7 电剖面法的图件宜包括:
- a) 视电阻率剖面曲线图、平面图;
 - b) 综合解释平面图、剖面图。
- ## 6.4 高密度电法
- 6.4.1 高密度电法主要用于观测和研究地下介质水平和垂直方向上的电性变化,查明或解决被探测目的层或目的体与地下空间分布有关的各类地质问题。
- 6.4.2 高密度电法的测线布置应符合下列规定:
- a) 探测断层破碎带和岩性分界应大致垂直走向布置;
 - b) 测线长度应能保证测区边界异常完整和探测深度满足要求,测线端点应超出测区两端各 1/3 装置长度;
 - c) 测点点距应根据目的体的大小和埋深确定,电极极距宜等于点距;
 - d) 最小电极距应为探测深度的 1/10~1/15;
 - e) 单一排列宜呈直线布置,遇到障碍物时电极位置可适当偏移,沿跑极方向偏离宜不大于该极距的 1/10,沿垂直跑极方向偏离宜不大于该极距的 1/5,并应做好记录。
- 6.4.3 高密度电法的观测装置应符合下列规定:
- a) 电测深法和电剖面法的观测装置原则上均可用于高密度电法,应根据任务要求和场地条件合理选择;
 - b) 装置长度宜大于探测对象埋深的 5 倍,且应能观测到深部的有效信号;
 - c) 滚动测量时,每次移动的距离应保证探测深度范围内数据连续。
- 6.4.4 高密度电法的数据采集应符合下列规定:
- a) 确保电极接地良好,观测数据稳定可靠;遇强电干扰时,应加大供电电流提高信噪比;
 - b) 使用同一种极化较小的电极;
 - c) 宜采用正负交替的供电方式供电;
 - d) 复杂条件和恶劣环境下,应采用抗干扰和分辨能力不同的两种以上装置观测,但不得采用相互换算的数据作为观测数据;
 - e) 观测坏点数不应超过总点数的 1%,意外中断恢复观测时,重复观测点数不应少于 2 个;
 - f) 现场应记录排列位置,并应注明可能影响资料解释的特殊环境因素。
- 6.4.5 高密度电法的数据质量和误差的计算应符合 6.1.7 的规定,视电阻率允许均方相对误差为 $\pm 5\%$ 。
- 6.4.6 高密度电法的数据处理应符合下列规定:
- a) 应进行数据预处理,对离差过大的数据突变点、畸变点,可结合相邻测点数据值进行修正或删除,必要时还应进行数据平滑、滤波处理;
 - b) 反演计算应选择合理的参数,地形起伏较大时宜选用具有地形校正功能的软件进行反演;

- c) 绘制电阻率断面图应设置色标,同一场地的色标应一致;
- d) 对已知典型地质剖面观测段宜进行正演计算,获得其余测段的解释依据资料。

6.4.7 高密度电法的资料解释应符合下列规定:

- a) 宜结合实测视电阻率断面图、反演电阻率断面图、电阻率曲线等进行综合解释;
- b) 应结合地质调查、钻探等资料,深入研究地电结构与地质结构的关系,合理确定目标体的深度、规模、形态等;
- c) 应结合其他相关资料,识别判定电阻率断面图的假异常;
- d) 采用多种装置观测时,应进行对比分析,综合解释;
- e) 可利用微分和偶极两种测量装置的测量结果计算 T 比值参数,或利用联合三极测量结果计算 F 比值参数、 λ 比值参数绘制等值线图,突出地质异常;
- f) 宜结合钻探或其他探测成果修正深度转换系数或解释深度。

6.4.8 高密度电法的图件宜包括:

- a) 视电阻率断面图;
- b) 电测深曲线类型图(选用测深装置且必要时);
- c) 反演地电断面图;
- d) 综合解释平面图、剖面图。

6.5 充电法

6.5.1 充电法主要用于探测低阻体的平面展布及埋藏深度,测试地下水流向流速,测定滑坡体的滑动方向和滑动速度。

6.5.2 应用充电法应满足下列条件:

- a) 被探测的目的体必须有良好的天然或人工露头,且为低电阻体;
- b) 测试地下水流向流速,周边介质电阻率宜大于水的电阻率 10 倍以上,地下水位埋深宜 $< 50\text{ m}$;
- c) 被探测的其它目标体比围岩的电阻率宜小 100 倍以上,规模大小应与其埋深相当,且埋深宜 $< 25\text{ m}$;
- d) 应具备良好的接地条件,且极化稳定;
- e) 测区内应无明显的工业电干扰。

6.5.3 充电法的观测方式选择应符合下列规定:

- a) 测试地下水流向流速、圈定低阻体平面位置宜采用电位法;
- b) 追踪地下金属管线和带状分布的低阻体宜同时采用电位法和梯度法;
- c) 地质条件复杂时宜选用多种观测方式。

6.5.4 充电法的电极布置应符合下列规定:

- a) 充电点应与被追踪的低阻体相连通,并保持良好接触;
- b) 无限远 B 极至测区的最短距离应大于测区对角线长度的 6 倍;
- c) 电位测量时,固定 N 极应设在无限远 B 极的反方向;
- d) 梯度测量时, MN 宜等于测点点距。

6.5.5 充电法的数据采集应符合下列规定:

- a) 在观测电位差的前后应观测供电电流的强度,电流变化不得大于 2%;
- b) 充电电极宜为正极,且应保持测区内供电电极的极性不变;
- c) 采用不同观测方式应单独进行,不得采用换算值;
- d) 测量过程中 M 极和 N 极的顺序不得颠倒;
- e) 每隔 10 个测点应进行一次重复观测,并且在梯度的零值点和电位的极大点,应进行重复观测和漏电检查。

6.5.6 测定地下水流向流速应符合下列规定：

- 应以井口为中心，以放射状布置 8 条或 12 条测线，各方位夹角应相等；
- 充电电极 A 应布置在含水层中部，无穷远极 B 距井口的距离应大于含水层埋深的 20 倍；
- 测量电极 N 应固定在预计水流方向上游且至井口的距离不应小于待测含水层的埋深，M 极沿放射状测线逐点移动；
- 测点点距不得大于含水层埋深的 1/2；
- 井水盐化前应观测获得正常场等位线，并应保持盐化程度恒定。

6.5.7 质量评价的最大均方相对误差 m 不得超过 $\pm 5\%$ ，并按式（3）、（4）计算：

$$m = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta = \frac{2(V_i - V'_i)}{V_i + V'_i} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- V_i ——第 i 点经电流归一化后原始观测值；
 V'_i ——第 i 点经电流归一化后检查观测值；
 n ——检查点总数。

6.5.8 资料处理与解释应符合下列规定：

- 所有观测数据均应用电流强度进行归一化计算；
- 岩性单一、探测对象形态规整时可选择典型剖面进行正演；
- 探测低阻体宜绘制电位和梯度的剖面平面分布图，应正确区分正常场和异常场，并根据异常的分布、幅值、强度及曲线上的特征点等来推断其形态和埋深；
- 测试地下水流速流向应绘制各个时刻的等位线分布图，并根据等位线移动速度最大方向来确定和计算地下水流向、流速；
- 探测渗漏时，可根据观测值异常推断可疑渗漏范围。

6.5.9 充电法的图件宜包括：

- 充电电位、电位梯度剖面平面曲线图，电位梯度的异常轴线平面图；
- 充电电位、电位梯度及环形观测的平面等值线图；
- 典型剖面上的综合剖面图；
- 综合解释平面图、剖面图。

6.6 激发极化法

6.6.1 激发极化法主要用于探测与周围介质存在激发极化效应差异的地下断层、裂隙、岩溶等的位置及埋深。

6.6.2 激发极化法应用条件应符合下列规定：

- 能有效观测到探测对象产生的激发极化差异信号；
- 在地形起伏剧烈、覆盖层较厚及游散电流强干扰区不宜开展激化极化法工作。

6.6.3 激发极化法可根据需要选择激发极化剖面法和激发极化测深法。电测深法和电剖面法的观测装置均适用于激发极化法。

6.6.4 激发极化法的仪器技术指标除应符合 6.1.3 的规定外，同时应符合下列规定：

- 极化率测量分辨率应达到 0.1%；

- b) 供电、延时与积分的时间宽度可调，且允许相对误差为 1%；
- c) 供电时间精度应 $\geq 1.0\%$ ；
- d) 极化率叠加次数至少 2 次以上，且可调；
- e) 解决与地下水有关的地质问题时应能测出二次电位衰变曲线。

6.6.5 工作布置与数据采集应符合下列规定：

- a) 激发极化法可按电测深法、电剖面法或充电法进行布置；
- b) 测量电极应使用不极化电极；
- c) 应通过试验了解测区的激电特征，确定供电周期、断电延时、采样宽度、叠加次数等；
- d) 供电导线线架未放完的导线应按“之”字型撒开在地上；
- e) 应采用供大电流激发，且供电电流变化应 $\leq 5.0\%$ ，二次场电位差应 $> 0.4 \text{ mV}$ ；
- f) 探测地下水宜观测二次电位随时间的衰减曲线；
- g) 观测出现干扰数据、突变数据时，应进行多次重复观测，取常见值做为最终观测结果。

6.6.6 质量评价应分别计算视电阻率和视极化率的观测误差：

- a) 视极化率的均方相对误差按式（5）计算，视极化率允许均方相对误差 M 为 $\pm 5\%$ ；

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\eta_{si} - \eta_{si}'}{\bar{\eta}_{si}} \right)^2} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

η_{si} ——第*i*点原始观测数据；

η_{si}' ——第*i*点检查观测数据；

$\bar{\eta}_{si}$ —— η_{si} 与 η_{si}' 的平均值；

n ——检查的总测点数。

- b) 在低极化率（ $\leq 3\%$ ）数据段，使用均方相对误差达不到设计要求时，可改用均方误差来评价，总均方误差按式（6）计算，视极化率允许总均方误差 M 为 ± 0.2 ；

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\eta_{si} - \eta_{si}')^2}{2n}} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

η_{si} ——第*i*点原始观测数据；

η_{si}' ——第*i*点检查观测数据；

n ——检查的总测点数。

- c) 视电阻率的均方相对误差按式（7）计算，视电阻率允许均方相对误差 M 为 $\pm 5\%$ 。

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_{si} - \rho_{si}'}{\bar{\rho}_{si}} \right)^2} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

ρ_{xi} ——第*i*点原始观测数据;

ρ'_{xi} ——第*i*点检查观测数据;

$\bar{\rho}_{xi}$ —— ρ_{xi} 与 ρ'_{xi} 的平均值。

6.6.7 资料处理与解释应符合下列规定:

- 资料解释时应以电性异常为基础, 结合其他有关资料做出综合解释;
- 解决与地下水有关的地质问题时, 可依据视极化率、视电阻率、半衰时、衰减度等多个参数的探测结果, 综合解释。

6.6.8 激发极化法的图件宜包括:

- ρ_s 、 η_s 、 S_t 、 Z 等各种参数曲线图、剖面平面图;
- ρ_s 、 η_s 等值线平面图;
- 综合解释平面图、剖面图。

7 电磁法

7.1 一般规定

7.1.1 电磁法应根据测区工作条件和探测要求, 选用天然场源音频大地电磁法 (AMT)、可控源音频大地电磁法 (CSAMT)、瞬变电磁法 (TEM) 和地质雷达 (GPR) 等。

7.1.2 电磁法勘探应用条件除应符合 4.1.1 的规定外, 同时应符合下列规定:

- 地形条件应满足发射和接收装置的布设要求;
- 被探测目标体上方没有极低电阻屏蔽层;
- 测区内电磁噪声比较小, 各种人文干扰不严重, 不影响探测对象异常的分辨。

7.1.3 电磁法作业前应对仪器进行检查, 在同一测区观测的多台同类仪器应在同一测点上采用相同观测装置和观测方式进行一致性对比。地质雷达一致性测量的波形应一致, 其他仪器的一致性测量误差不应超过要求观测精度的 1/2, 一致性测量误差即均方相对误差 ε 不应超过 $\pm 5.0\%$, ε 应按式 (8) 计算。

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2 / 2n} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

u_i ——某台仪器某次观测值与该点各观测值平均数的相对误差 ($i=1, 2, \dots, n$);

n ——参与校验的全部仪器在校验点上观测次数之和。

7.1.4 电磁法工作布置除应符合 4.2.5 的规定外, 同时应符合下列规定:

- 测线宜避开村庄、工厂、矿山、通信基站、电气化铁路、变电站、广播电台、高压线、地下金属管线等干扰源, 无法避开时以最短距离垂直通过;
- 电磁测深曲线失去连续性时应加密测点。

7.1.5 电磁法资料解释除应符合 4.2.12 的规定外, 同时应符合下列规定:

- a) 宜采用两种以上的方法进行定量解释,并选用典型断面作正演计算,条件具备时物性参数应通过测井确定;
- b) 资料解释前应识别测区内的干扰异常,确定其影响范围及程度,并采用相应技术处理措施予以压制或消除;
- c) 解释结果应说明探测对象的形态、产状、延伸等要素,对于已知资料不足,暂时不能得出具体结论的异常,应说明原因;
- d) 解释应充分利用各种电磁勘探方法的成果,有钻孔的工点,应充分利用钻探资料对解释结果进行全面的修正;
- e) 定量解释要尽可能利用测区内施测的物性参数、已有的地质勘探资料控制地下地质情况,以及其他物探资料作为约束条件和先验控制信息,并利用定性解释的分析结论或认识建立反演初始模型,以减少反演的多解性;
- f) 在地形和地质条件简单的区域,天然场源音频大地电磁法(AMT)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)一般先进行一维反演,之后综合曲线特征确定是否进行高阶反演;
- g) 主要图件应包括标注有测网位置、检查点位置、物性测定点位、干扰源位置和比例尺等物探工作平面图和典型物性成果图、综合解释剖面图、综合解释平面图等。

7.2 音频大地电磁法(AMT)

7.2.1 音频大地电磁法(AMT)主要用于探测复杂地形条件下断层构造、岩溶、采空区及不同岩性接触带等。

7.2.2 音频大地电磁法的应用条件除应符合 4.1.1 和 7.1.2 的规定外,同时应避免接地电阻过大且难以改善的地区。

7.2.3 音频大地电磁法的仪器设备及其附件除应符合 4.1.3 和 7.1.3 的规定外,其主要技术指标同时应符合下列规定:

- a) 接收机工作频率范围: 1 Hz~100 kHz;
- b) 交流音频电压测量范围: 0 mV~2 000 mV;
- c) 输入端短路噪声水平应 $<1 \mu\text{V}$;
- d) 极化补偿不低于 2 V;
- e) 输入阻抗应 $>10 \text{ M}\Omega$;
- f) 电压灵敏度应达到 $1 \mu\text{V}$,测量精度应优于 $\pm 5.0\%$;
- g) 陷波器对工频 50 Hz 抑制能力 $>40 \text{ dB}$;
- h) 磁探头: 频带宽度 1 kHz~100 kHz。

7.2.4 音频大地电磁法的工作布置除应符合 4.2.5 的规定外,所选测点应远离电磁干扰源,宜符合下列规定:

- a) 距大型工厂、矿山、电气化铁路、变电站等 1 000 m 以上;
- b) 距广播电台、雷达站、高压线、居民区等 500 m 以上;
- c) 距繁忙公路、居民点等 200 m 以上。

7.2.5 音频大地电磁法的数据采集应符合下列规定:

- a) 测量电极应使用紫铜电极或不极化电极,电极电位差不超过 2 mV,接地电阻应 $\leq 5 \text{ k}\Omega$;
- b) 在保证足够电位差读数的前提下,电极距宜小于 50 m;
- c) 同一测线应使用同一电极排列方式;
- d) 依据试验或者设计书规定的电极距布置,应按施测水平距布极;
- e) 水平磁棒与垂直磁棒应置于地面 30 cm 以下,并保持水平或垂直;

- f) 电极、磁棒连线及仪器或前置放大器的电缆均不能悬空,不能平行放置,每隔 3m~5m 需用土或石块压实,防止晃动,避免因风吹使导线晃动产生电磁干扰。
- 7.2.6 音频大地电磁法的检查与质量评价除应符合 4.1.6 的规定外,同时应符合下列规定:
- 同一测点的重复观测或检查观测的视电阻率、相位曲线形态应相似或一致,对应幅值应接近;
 - 数据观测精度用均方相对误差评价,卡尼亚电阻率允许均方相对误差为 $\pm 15\%$,阻抗相位允许均方相对误差为 $\pm 20\%$;
 - 不合格的测点不应大于总检查测点数的 20%。
- 7.2.7 音频大地电磁法资料解释除应符合 4.2.12 和 7.1.5 的规定外,同时应符合下列规定:
- 根据初步建立的地质-地球物理模型,对全测区 AMT 测深曲线类型进行分析、对比,总结相同类型曲线分布特征,了解构造分区的地电规律;
 - 利用张量阻抗分解方法得出的阻抗特征,对测区成果作出相应的定性解释;
 - 可以利用异常变化大小计算异常幅度,对照观测值的正负异常做出定性解释。异常幅度 η 应按式 (9) 计算:

$$\eta = \frac{\Delta V_s^{\max} - \Delta V_s^{\min}}{\frac{1}{2}(\Delta V_s^{\max} + \Delta V_s^{\min})} \times 100\% \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$\Delta V_s^{\max}$ 、 $\Delta V_s^{\min}$ ——分别为保留电位差的最大值与最小值。

- 定量解释地形起伏较大和横向电阻率变化较大的地电条件下的成果资料,一般进行带地形的二维或三维反演。利用反演结果绘制电阻率-深度断面图或电阻率立体图等成果图件,描述地下电性空间分布。
- 7.2.8 音频大地电磁法的成果图件宜包括:
- 电阻率测深曲线类型图;
 - 卡尼亚电阻率和阻抗相位拟断面图;
 - 对面积性工作,可根据需要增加不同深度电阻率平面图或电阻率立体图;
 - 解释成果图。

7.3 可控源音频大地电磁法 (CSAMT)

- 7.3.1 可控源音频大地电磁法 (CSAMT) 主要用于立体地质填图,探测地下三维电性结构,研究基底起伏和地质构造形态、产状及断裂展布,判定岩性层分布及厚度,探测其它有电性差异的目的体等。
- 7.3.2 可控源音频大地电磁法的应用条件除应符合 4.1.1 和 7.1.2 的规定外,同时应符合下列规定:
- 测区内应无工业电磁噪声干扰及人文干扰,或有干扰但能够通过处理消除或削弱;
 - 测区内的地形地貌条件应适合场源布设与野外实时观测。
- 7.3.3 可控源音频大地电磁法使用的供电设备和测量仪器之间应同步,仪器的各观测道应具有良好的 consistency,其主要技术指标应满足下列要求:
- 发射机频率可连续变化,频率变化范围应满足 0.1 Hz~10 kHz;
 - 接收机应带有选频特性,频率测量范围应满足 0.1 Hz~10 kHz;
 - 通道与屏蔽层的绝缘电阻应 $>10\text{ M}\Omega$;
 - 输入端灵敏度应达到 0.1 V;
 - 输入阻抗应 $>10\text{ M}\Omega$;

- f) A、B 供电导线应选用导电性良好的铜导线、铜板、铜丝网、铝箔或采用铁或钢制的金属棒作电极，其内阻应 $<8\ \Omega/\text{km}$ 、绝缘电阻应 $>2\ \text{M}\Omega/500\ \text{V}/\text{km}$ ；
- g) 接收电极 M、N 宜采用化学性能稳定、极差变化小的铜、高碳钢或不极化电极，MN 导线的绝缘电阻应 $>5\ \text{M}\Omega/500\ \text{V}/\text{km}$ 。

7.3.4 可控源音频大地电磁法根据探测目的体的埋深宜选择电偶极或磁偶极人工场源，根据供电电极、接收电极和测线布设方向相对于地质构造走向的关系，可选择 TM (Transverse Magnetic) 和 TE (Transverse Electric) 两种测量模式：

- a) TM 模式：供电电极、接收电极和测线方向垂直于地质构造走向布设，横向分辨率能力较强，观测的电场受静态位移和地形影响较严重；
- b) TE 模式：供电电极、接收电极和测线方向平行于地质构造走向布设，垂向分辨率能力较强，与 TM 模式相比，观测的电场受静态位移和地形影响较小。

7.3.5 可控源音频大地电磁法的工作布置除应符合 4.2.5 和 7.1.4 的规定外，同时应符合下列规定：

- a) 供电电极 A、B 点位的地理位置要尽可能满足远区观测条件，单场源电偶极子布置宜平行于测线，方向误差应 $<3^\circ$ ；
- b) 测点宜布置在工作电磁场的“远区”，且应保证收发距不小于目的体埋深的 4 倍；
- c) 场源及测线位置应相对固定；
- d) 场源与测线、测点应避开明显干扰源。

7.3.6 可控源音频大地电磁法的现场布极应符合下列规定：

- a) 供电装置的布设：
 - 1) 供电偶极子 A、B 宜选择在土壤潮湿处坑埋，并接多层金属板、网、锡箔，或环形布置和并接多根电极；磁偶极应放置在地势平坦、干燥处；
 - 2) A、B 极应避开高压线、地下洞穴、暗埋管道、溪流水域、平行的断裂构造等干扰；
 - 3) A、B 极应避开已知金属矿、煤矿、湖泊、溶洞和局部高阻隆起等可能引起场源效应的已知地质体；
 - 4) 供电点及导线均应悬挂“高压危险”警示标识，其它安全事项应符合 DB45/T 983 的相关规定；
 - 5) A、B 极布设完毕后应检查供电导线是否有漏电情况，A、B 极是否正确连接，接地情况是否良好，各连接点是否牢固。
- b) 接收装置的布设：
 - 1) 接地导线应贴地布设，避免因风吹使导线晃动产生电磁干扰；
 - 2) 电通道宜采用不极化电极，磁通道应采用相应频率的磁传感器；
 - 3) 接收偶极子 MN 应沿测线方向布设；两极相对高差与极距之比应 $<10\%$ ；
 - 4) MN 电极接地电阻一般应低于 $2\ \text{k}\Omega$ ，如遇基岩裸露地区，可适当放宽，但应 $\leq 10\ \text{k}\Omega$ ，电解类不极化电极应挖坑半掩埋并浇水，当测点为高阻坚硬介质时，宜用泥土掩埋电极并浇水；
 - 5) MN 电极不得埋设在流水、污水或废石堆上，极坑内不得留有砾石和杂物，当遇到人文设施（如人工导体、金属栏杆、管道、供电线路、无线电塔、铁路、钻井、道路等）时，MN 应适当平移；
 - 6) 磁传感器应垂直于发射电极 AB 或接收电极 MN 方向布设，并采用森林罗盘仪定向，方位误差应 $<2^\circ$ ；
 - 7) 磁传感器到接收机的距离应 $>7\ \text{m}$ ，其布设应远离高压输电线、远离有车辆行驶的道路等干扰源，观测期间所有人员和车辆应远离磁传感器并停止所有通讯设备；

- 8) M、N 极布设完毕后应检查供电导线是否有漏电情况，M、N 极是否正确连接，接地情况是否良好，各连接点是否牢固；
 - 9) M、N 极布设完毕后，还应检查接收电极间直流电电位差的稳定性。
- 7.3.7 可控源音频大地电磁法的数据采集应符合下列规定：
- a) 电偶极场源的观测宜在电偶极子 AB 垂直平分线两侧 30° 角扇形范围的远场区内进行；
 - b) 测量电极方向应与磁探头方向正交，误差控制在 2° 以内；
 - c) 观测应选择在干扰最小的时间段进行；
 - d) 观测时电极或磁传感器连线不应悬空、晃动或成匝状，接收机、操作员、磁性物体应远离磁传感器并停止使用所有通讯设备；
 - e) 电磁场的发射和观测应从高频至低频，频率范围应与探测深度相对应；
 - f) 每点或每站观测完毕，应显示或打印视电阻率、相位曲线；
 - g) 视电阻率、相位随频率变化曲线光滑连续、无突变，有效频点数应大于 90%，连续无效频点不应大于 3 个；
 - h) 当视电阻率、相位曲线极值点频率曲线上出现位移或曲线类型发生变化时，应重复观测；
 - i) 移动或更换场源时，同一测线上应至少有三个测点被覆盖。
- 7.3.8 可控源音频大地电磁法的质量检查和评价除应符合 7.2.6 条第 1 款及第 3 款规定外，卡尼亚电阻率允许均方相对误差为 $\pm 10\%$ ，阻抗相位允许均方相对误差为 $\pm 15\%$ 。
- 7.3.9 可控源音频大地电磁法的现场工作应形成下列资料：
- a) 原始资料应包括原始数据，操作员工作记录，测点班报，视电阻率原始记录曲线，电位测量记录以及仪器检测、维护及标定记录；
 - b) 预处理数据及相应的成果图件应有视电阻率和相位的曲线图、剖面图等。
- 7.3.10 可控源音频大地电磁法的资料处理应符合下列规定：
- a) 不应随意删除观测数据中的可疑点，应参考相邻频点对视电阻率、相位曲线首尾支畸变严重的频点进行校正，对测点中偏离太大或明显畸变的曲线应进行平滑插值处理；
 - b) 平面波场的近场校正可采用全区视电阻率校正法，也可采用仪器提供的校正软件进行，校正后的曲线应当平滑连续，当有超过 45° 陡峭上升现象时，应通过比较试验选择校正方法进行校正；
 - c) 静态位移校正应首先根据已知资料和原始断面等值线图及地形起伏情况，判断可能静态位移现象及其严重性，再选择最佳静态位移校正方法，对数据进行静态位移校正；
 - d) 在地形影响严重的地区，应采用合适的方法做地形校正，可选取带起伏地形反演的二维、三维软件进行反演直接消除地形影响；
 - e) 为判别多重资料处理的而真实可靠性，还应检查处理过程的正确与否，并将处理结果与原始资料进行比较，还应对多重处理引进的误差进行评估。正确可靠的处理结果应是确保原始数据中的固有真实信息或趋势不但不会丢失，相反会得到保留和突出。
- 7.3.11 可控源音频大地电磁法资料的定性解释除应符合 7.1.5 的规定外，同时应符合下列规定：
- a) 应研究测区曲线类型，特别应对井旁测深曲线进行正反演模拟，确定电性层对应的地质层和测区的地电模型；
 - b) 应研究测区视电阻率和相位断面，了解剖面电性异常特征，并进行剖面综合研究与对比分析，判断异常的起因；
 - c) 应研究测区总纵向电导异常，判断异常的性质。
- 7.3.12 可控源音频大地电磁法资料的定量解释除应符合 7.1.5 的规定外，同时应符合下列规定：
- a) 首先应根据定性解释结果，综合其他地质、地球物理资料，确定每条测线的初始地电模型；

- b) 初始地电模型确定后, 应选取带地形的二维或三维反演解释方法, 求取异常源的几何参数和物性参数, 确定电性异常体的性质和地质起因, 定量推断电性异常体的埋深、规模、形态及产状; 定量解释应充分利用已知的钻探等资料。

7.3.13 可控源音频大地电磁法的成果图件应符合 7.2.8 的规定。

7.4 瞬变电磁法(TEM)

7.4.1 瞬变电磁法主要用于探测低阻体的分布位置及埋深。可根据场地条件选用回线源瞬变电磁法和接地电偶极源瞬变电磁法。

7.4.2 瞬变电磁法应用条件应符合 4.1.1 和 7.1.2 的规定。

7.4.3 瞬变电磁法仪器设备及其附件除应符合 4.1.3 和 7.1.3 的规定外, 其主要技术指标同时应满足下列要求:

- 通道灵敏度应达到 $0.5 \mu\text{V}$;
- 等效输入噪声应 $<1 \mu\text{V}$;
- 动态范围应 $\geq 140 \text{ dB}$;
- 对 50 Hz 工频干扰抑制能力应 $\geq 60 \text{ dB}$;
- 发射波形稳定, 关断斜坡线性良好, 能给出关断时间;
- 发射与接收的同步性能良好, 收发距离近时宜使用电缆同步, 也可以使用 GPS 或石英钟同步;
- 发射脉冲宽度、采样延时可选;
- 接收线框或探头频率特性好, 并与接收机匹配。

7.4.4 回线源瞬变电磁法工作布置应符合下列规定:

- 瞬变电磁法发射站及接收站的布设应符合下列规定:
 - 线框及发送站应避开铁路、地下金属管道、高压线、变压器、输电线等布置, 敷设线框时, 剩余导线不宜过长并应呈“之”字型铺于地面并应远离测区, 发射线框与接收线框的间距宜通过实地试验合理选择;
 - 回线发射线框边长可根据最大发射电流强度、探测深度 H 按式 (10)、(11) 进行选择:

$$H = 0.55 \left(\frac{L^2 I \rho_1}{\eta} \right)^{1/5} \dots\dots\dots (10)$$

$$\eta = R_m N \dots\dots\dots (11)$$

式中:

H ——中心回线装置估算极限探测深度;

ρ_1 ——上覆地层电阻率;

η ——最小可分辨电平;

R_m ——最低限度的倍噪比;

N ——噪声电平。

- 发射站应布设在线框导线附近, 且便于接收站联络;
 - 接收站应避开强干扰源及金属物分布区段;
 - 敷设线框导线应立标示, 长度误差 $<5\%$, 方向误差 $<1^\circ$;
 - 供电导线绝缘电阻应 $\geq 2 \text{ M}\Omega/\text{km}$ 。
- 装置形式的选择应符合下列规定:
 - 瞬变电磁法宜选择重叠回线、中心回线、大定源回线、偶极等装置形式;
 - 浅层探测宜选用重叠回线或中心回线装置;

- 3) 深层探测宜选用大定源回线装置;
- 4) 探测陡倾角断层宜选用偶极装置;
- 5) 狭小空间的井下或巷道周围地质构造、岩溶、含水层探测宜采用收发一体化的多砸重叠小回线装置。
- c) 工作布置应符合下列规定:
 - 1) 中心回线装置、重叠回线装置, 线距一般为回线边长的 L 或 $2L$, 点距为 L 或 $L/2$ 、 $L/4$;
 - 2) 大定源回线装置, 点距一般为 $10\text{ m}\sim 20\text{ m}$;
 - 3) 偶极装置, 偶极距一般为点距的 $2\sim 4$ 倍, 点距一般为 $20\text{ m}\sim 40\text{ m}$;
 - 4) 精测剖面应垂直于异常走向且通过异常中心布设, 且宜与测线重合, 剖面长度应超出所研究的异常范围, 点距和观测精度应保证异常细节有清晰完整的反映。
- 7.4.5 接地源瞬变电磁法工作布置应符合下列规定:
 - a) 发射源应布置在构造简单、电性较为均匀的地方, 宜使研究对象处于观测区域的中心部位;
 - b) 在研究二维目标体时, 发射源宜布设在与走向正交的方向上, 并与构造轴相对称, 在近似为三维目标体上方进行观测时, 发射源的两极应安置在目标相对称的位置上;
 - c) 测区不能由一个发射源所覆盖时, 同一测线在变换发射源时至少应进行两个点的重复观测;
 - d) 接地线源的 AB 应视探测深度和观测的信号强度确定;
 - e) 测点布置应根据探测目标体规模和深度合理确定并设置收发距;
 - f) 单场源电偶极子布置宜平行于测线, 方向误差应 $<3^\circ$;
 - g) 发射源与测线、测点应避开明显干扰源;
 - h) 发射源与观测点之间不应有江、河流等。
- 7.4.6 瞬变电磁法的数据采集应符合下列规定:
 - a) 应通过试验确定观测时窗范围;
 - b) 数据观测时应采用多次叠加, 现场观测值应在噪声电平以上, 信噪比应大于 3 倍以上;
 - c) 应在全区均匀布置干扰水平观测点, 并根据观测结果对全区按强、中、弱三级分区; 可根据测点上的干扰水平选择叠加次数;
 - d) 采用电偶极场源时, 宜在电偶极子 AB 垂直平分线两侧 30° 角扇形范围的远场区内进行数据采集, 并应选择干扰最小的时间段进行;
 - e) 观测时电极或磁传感器连线不应悬空、晃动或成匝状, 接收机、操作员、磁性物体应远离磁传感器并停止使用所有通讯设备;
 - f) 采集站接通电源前应检查电池电压, 不能低于额定工作的最低标准, 采集站的电源线应采用漏电阻 $>10\text{ M}\Omega$ 的绝缘线;
 - g) 重要异常点应重复观测, 重复观测的相对误差限差为 10% ;
 - h) 当曲线出现畸变时, 应查明原因后重复观测, 必要时加密测点, 并作详细记录;
 - i) 每个测点观测完毕, 应对数据或曲线进行检查, 合格后方可搬站。
- 7.4.7 瞬变电磁法的质量检查与评价应符合下列规定:
 - a) 检查观测曲线测道是否完整, 对出现异常和畸变现象的测点是否进行了必要的重复观测和加密测点;
 - b) 数据观测精度用均方相对误差评价, 视电阻率允许均方相对误差为 $\pm 10\%$ 。
- 7.4.8 瞬变电磁法的资料处理与解释应符合 4.2.12 和 7.1.5 的规定外, 同时应符合下列规定:
 - a) 所有观测电位值均经电流强度归一化计算;
 - b) 可对数据进行滤波处理和发送电流切断时间影响的改正处理;
 - c) 进行相应的叠前处理、叠加处理、叠后处理;
 - d) 应通过处理软件计算和绘制视电阻率、视纵向电导断面图, 也可计算视时间常数等其他参数;

- e) 应根据瞬变电磁的响应时间特征和剖面曲线类型划分背景场及异常场, 划分异常;
- f) 根据异常特点、形态和分布情况确定异常的性质和位置, 确定地电模型;
- g) 应对瞬变电磁法的成果资料进行定性解释和对异常进行半定量、定量解释;
- h) 建立电性层与地质层的对应关系, 将电性剖面图、平面图解释为地质剖面图、平面图;
- i) 进行三维勘探时, 应进行三维地质结构研究。

7.4.9 瞬变电磁法的图件宜包括:

- a) 典型的时间曲线图;
- b) 视电阻率(或视纵向电导)剖面曲线图;
- c) 视电阻率(或视纵向电导)拟断面图;
- d) 对面积性工作, 宜根据需要绘制视电阻率等深度平面图;
- e) 反演的测深曲线及模型图、电阻率拟断面图。

7.5 地质雷达(GPR)

7.5.1 地质雷达(GPR)主要用于基岩深度、水位深度、软土层厚度与深度、断裂构造等探测, 路面塌陷、岩溶塌陷、土洞、滑坡面等地质灾害调查, 地下水污染带监测, 地基加固效果评价, 路面、洞室衬砌质量检测, 堤坝隐患、地下泄漏、地下管线及其它埋设物探测等。

7.5.2 地质雷达的应用条件除应符合 4.1.1 和 7.1.2 的规定外, 同时应符合下列规定:

- a) 探测目标体与周边介质之间应存在明显介电常数差异, 电性稳定, 电磁波反射信号明显;
- b) 目标体在探测深度或距离范围内, 其尺寸应满足探测分辨率的要求;
- c) 测线上天线经过的表面应相对平缓, 无障碍, 且天线易于移动;
- d) 测区内不应存在大范围金属构件、无线电发射频率源等较强的电磁波干扰, 或通过处理可以消除其干扰;
- e) 不应存在极低阻屏蔽层;
- f) 单孔或跨孔检测时钻孔中不得有金属套管;
- g) 跨孔(洞)探测时, 目的体应位于两孔(洞)间, 两孔(洞)宜共面, 间距应不大于雷达信号的有效穿透距离;
- h) 在干扰较强的工点应使用屏蔽天线, 以提高地质雷达观测质量。

7.5.3 地质雷达的仪器设备及其附件除应符合 4.1.3 和 7.1.3 的规定外, 其主要性能和技术指标同时应满足下列要求:

- a) 系统增益应 ≥ 150 dB;
- b) 系统应具有可选的信号叠加、时窗、实时滤波、增益点测或连续测量、位置标记等功能;
- c) 应有多种主频的天线可供选择;
- d) 计时误差应 ≤ 1.0 ns;
- e) 最小采样间隔应达到 0.5 ns, A/D 转换不应低于 16 Bit;
- f) 实时监测与显示应具有多种可供选择的方式。

7.5.4 地质雷达的工作布置除应符合 4.2.5 和 7.1.4 的规定外, 同时应符合下列规定:

- a) 测网密度、天线间距和天线移动速度应能反映探测对象的异常; 点测时, 点距选择应保证目的体异常至少有 3 个点;
- b) 测线宜穿过钻孔或与其他方法测线重合布设;
- c) 洞室衬砌质量检测时的测线应沿洞室走向在拱顶、拱腰和边墙位置布设, 特殊观测段可适当加密布设。

7.5.5 地质雷达的观测方式可选用宽角法、剖面法、环形法、多天线法、透射法和井中雷达法等, 具体如下:

- a) 求取地下分层介质的电磁波速度时宜选用宽角法;
- b) 常规观测时宜选用剖面法;
- c) 搜索走向未知目的体时宜选用环形法;
- d) 探测不同埋深目的体或对特定目的体做专项研究时可选用多天线法;
- e) 具备钻孔或洞室条件时宜选用透射法和井中雷达法。

7.5.6 仪器参数选取应符合下列规定:

- a) 雷达主机天线的选取应根据探测任务要求、探测目的体埋深、分辨率、介质特性以及天线尺寸是否符合场地条件等因素综合确定;
- b) 天线中心频率的选定应在满足探测深度的前提下,使用较高分辨率的天线,并考虑天线尺寸是否符合场地要求;
- c) 根据选择的天线频率计算出探测深度,若探测深度小于目的体深度,则需降低频率以获取适宜的探测深度;
- d) 一般地面探测时宜选择频率为 8MHz~500MHz 的天线;路面质量检测时宜选用频率为 900MHz~3 GHz 的天线;洞室衬砌质量检测时宜选用频率为 400 MHz~900 MHz 的天线;
- e) 孔中探测应根据探测任务要求选用自发自收的单孔天线或一发一收的跨孔天线;
- f) 用移动较快的车载观测时,应采用空气耦合天线;
- g) 有条件时宜选择屏蔽天线;
- h) 天线间距的选择应符合下列规定:
 - 1) 使用分体天线进行点测时,应通过调整天线距离使来自目的体的反射信号最强,可选取二倍临界角为接收天线与发射天线相对探测目的体的张角,也可选取探测对象最大深度的 1/5 作为天线间距;
 - 2) 使用偶极天线时,天线的取向宜使电场的极化方向与探测目的体的长轴或走向平行,当探测目的体的长轴方向不明确时,宜使用两组正交方向的天线分别进行观测;
- i) 记录时窗的选取可由式(12)估算:

$$W = 1.3 \times \frac{2h_{\max}}{v} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

W ——时窗 (ns);

v ——雷达波波速 (m/ns);

$h_{\max}$ ——最大探测深度 (m),一般取目的体深度的 1.5 倍。

7.5.7 地质雷达的探测分辨率与探测距离或深度的估算应符合下列规定:

- a) 宜取波长的 1/4 作为垂向分辨率,取第一菲涅尔带半径 γ_f 作为横向分辨率,第一菲涅尔带半径 γ_f 应按式(13)计算:

$$\gamma_f = \sqrt{\lambda h/2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

λ ——雷达波波长;

h ——目的体埋深。

- b) 在条件具备时,可用地质雷达方程估算探测距离或深度;
- c) 可利用获得的介质电磁波速度和目的体双程走时换算目的体深度。

7.5.8 地质雷达的数据采集应符合下列规定:

- a) 应通过试验选择天线的工作频率,确定介电参数、电磁波在地层中的传播速度等;当探测条件复杂时,应选择两种或两种以上不同频率的天线;

- b) 现场观测时应清除或避开测线附近的金属物；
- c) 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，并应与工作天线保持相对固定的位置；
- d) 应选择合适的时间窗口和采样间隔，并在数据采集过程中根据干扰情况及图像效果调整工作参数；
- e) 连续测量时的天线移动速度应均匀，并应与仪器的扫描率相匹配；
- f) 遇有干扰影响或处在异常点位置时应在记录中予以标注，重点异常区应重复观测，重复性较差时，应查明原因。

7.5.9 地质雷达的质量检查和评价应符合下列规定：

- a) 提供检查和评价的雷达资料应经过初步编辑，编辑内容可包括测线号、里程桩号、剖面深度等；
- b) 检查观测的图像应与原始观测图像具有良好的重复性，波形已知且没有明显的位移；
- c) 检查发现雷达图像有疑义或记录视窗未满足要求时，应调整参数后重新观测。

7.5.10 地质雷达的数据处理应符合下列规定：

- a) 可根据需要选取删除无用道、水平比例归一化、增益调整、地形校正、频率滤波、 $f-k$ 倾角滤波、反褶积、偏移归位、空间滤波、滑动平均等处理方法；
- b) 选择处理方法和处理步骤应根据外业记录数据质量及解释要求进行，当反射信号弱、数据信噪比低时不宜进行反褶积、偏移归位处理，在进行倾角滤波和偏移归位处理前应删除无用道，并进行水平比例归一化和地形校正；
- c) 在数据处理各阶段均可选择频率滤波，消除某一频段的干扰波；
- d) 用 $f-k$ 倾角滤波消除倾斜层干扰波的前提应是确定无相同倾角的有效层状的反射波；
- e) 可用反褶积来压制多次反射波，用于反褶积的反射子波宜是最小相位子波；
- f) 可采用时间偏移或深度偏移方法将倾斜层反射波界面归位，使绕射波收敛，在进行深度偏移处理时应选择可靠的介质电磁波速度；
- g) 可选用空间滤波的有效道叠加和道间差两种方法，使异常具有更好的连续性或独立性，提高数据图像的可解释性；改变反射信号的振幅特征应在其他方法处理完成后进行；
- h) 可用平滑数据的点平均法消除信号中的高频干扰，参与计算的点数宜为奇数，最大值宜小于采样率与低通频率之比。

7.5.11 地质雷达的资料解释及成果图件应符合下列规定：

- a) 参与解释的雷达图像应清晰；
- b) 通过反射波形、能量强度、初始相位等特征确定异常体性质；
- c) 通过对异常体同相轴的追踪或利用异常的宽度及反射时间，计算异常体的平面范围和深度；
- d) 应根据地质情况、电性特征、被探测体的性质和规模进行综合分析；必要时，应考虑影响解释结果的各种因素，制作雷达探测的正演和反演模型；
- e) 透射法可根据透射图像有无能量阴影，或有无二次波叠加特征判断异常，也可采用阴影交汇、二次波形态及发射和接收相对位置进行定量解释；
- f) 经过解释的成果资料应包括雷达测线布置图、雷达剖面图像、雷达地质成果解释剖面图，雷达剖面图像上应标出目标反射波的位置或反射波组；
- g) 洞室、陡壁、边墙等处的雷达探测，还应绘制测线分布断面图。

8 浅层地震法

8.1 一般规定

- 8.1.1 浅层地震勘探与测试应根据测区地球物理条件和任务要求确定合理的方法，浅层地震法可选用折射波法、反射波法、主动源面波法、微动勘探法和地脉动测试等。
- 8.1.2 采用人工震源的浅层地震勘探应用条件应符合下列规定：
- 地形起伏不大，地层呈层状或似层状；
 - 地表介质具有良好的激发、接收条件；
 - 环境噪音小，人工震源能量足够大，排列远端的检波器能够接收到有效地震波信号。
- 8.1.3 采用天然源的浅层地震勘探应用条件应符合下列规定：
- 地形起伏不大，场地具有一定展布空间，能满足观测台阵的布设；
 - 周边环境具有可持续的微动信号；
 - 工区环境能满足至少 10 min 的观测时间。
- 8.1.4 采用人工震源的浅层地震勘探试验工作应符合下列规定：
- 外业工作前，应对仪器设备进行检查，并提交记录；
 - 测试道一致性时，检波器安置条件应一致，全部检波器安置范围与其距震源距离相比应很小，可以认为各检波器是同点接收；
 - 连接电缆及检波电缆应进行绝缘检查，绝缘电阻应 $>200\text{ k}\Omega$ ；
 - 了解测区的地球物理条件、有效波和干扰波的分布情况，试验压制干扰波的措施，选择激发接收方式、仪器工作参数及观测系统等；
 - 了解测区有效波和干扰波的分布可采用展开排列观测方式，对于展开排列长度，折射波法宜为探测深度的 6~10 倍，反射波法宜为探测深度的 2~3 倍，面波法宜为探测深度的 1~2 倍，检波点距宜小于实际工作的检波点距；
 - 观测中遇到局部地段记录质量变差时应分析原因，并通过试验选择新的仪器工作参数或改变工作方法，改善记录的质量。
- 8.1.5 浅层地震勘探与测试的仪器设备主要技术指标应符合下列规定：
- 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；
 - 面波勘探宜选用 12 道及以上地震仪；折射波勘探宜选用 24 道及以上地震仪；反射波勘探宜选用 48 道及以上带覆盖开关的地震仪；
 - 地震仪采样率可选、最小采样间隔应不大于 0.05 ms；
 - 模/数转换精度不小于 24 位；
 - 动态范围应 $>96\text{ dB}$ 。
- 8.1.6 采用人工震源的浅层地震勘探与测试使用的检波器应符合下列规定：
- 检波器固有频率可根据有效波的频率响应和提高分辨率的技术要求加以选择；
 - 各道检波器之间固有频率相差应 $<10\%$ ，灵敏度相差应 $<10\%$ ，相位差应 $<1\text{ ms}$ ；
 - 绝缘电阻 $\geq 10\text{ M}\Omega$ ；
 - 井下和水下使用的检波器，应有良好的防水性能。
- 8.1.7 浅层地震勘探震源的选择应符合下列规定：
- 震源可选用爆炸震源、电火花震源、锤击震源、落重震源等，所激发的地震脉冲主频应能满足工作方法需要，能量可控并符合探测深度要求；
 - 使用爆炸震源时，爆破作业安全除应符合本规范作业规定外，还应符合 GB 6722 的规定；
 - 地面爆炸时，应清除炮点附近碎石；
 - 使用锤击和落重震源时，锤击板应与地面接触良好，不应反跳造成二次触发；
 - 电火花震源的触发器应性能稳定、重复性好。爆炸震源应采用绕在药包外面的记时回路记时。
- 8.1.8 浅层地震勘探的检波器安置应符合下列规定：
- 埋设位置应准确，埋设条件应一致，并与地面接触牢固，防止漏电和背景干扰；

- b) 当受地形、地面条件限制,检波器不能安置在原设计点位时,可沿测线移动(不包括互换点),如有困难时可沿垂直测线方向移动,其偏移距离应小于 1/5 检波点间距,并记入班报;
- c) 使用水平检波器接收横波时,应保证检波器水平安置,灵敏轴应垂直测线方向,且取向一致;
- d) 在水域使用水听器接收时,应将水听器沉放于水面以下,深度宜 $>1\text{ m}$ 。

8.1.9 地震勘探现场工作布置应符合下列规定:

- a) 测线布置应考虑旁侧影响和穿透现象;
- b) 测线宜按直线布置,当测线通过建筑物、道路、高压电线和其它障碍时测线可转折,但应采取相应措施,保证转折测线的资料能独立解释;
- c) 山谷地形可按坡度相近的山坡分段布置测线;炮点宜在地形起伏的顶部和底部,并保证各段测线资料能独立解释;
- d) 河谷测线宜垂直河流或顺河流布置,当河谷狭窄和折射波相遇段较短时,可斜交河流布置测线。

8.1.10 水域浅层地震勘探应符合下列规定:

- a) 进行水域折射波法观测时,宜采用固定排列,宜使用爆炸震源和漂浮电缆;当水流湍急、干扰背景强烈时,可采用将激发点和接收点互换的观测方式;
- b) 进行水域反射波法观测时,宜采用移动排列,宜使用船拖电火花震源、机械冲击震源和漂浮电缆,沿测线同步移动,拖船航速应稳定并保持电缆沉放深度一致;
- c) 当布置横河方向纵测线并采用相遇观测系统时,应考虑河床宽度是否具备探测任务所需要的相遇段;
- d) 水域作业期间,应测量水边线高程和沿测线的水深;当水位变化超过 0.5 m 时,应进行校正。

8.1.11 浅层地震勘探的原始记录应符合下列规定:

- a) 记录地震数据的存储介质等应标识清楚并与班报一致;
- b) 原始数据不得修改,头文件信息完整;
- c) 干扰幅度不影响初至时间的读取和波形的对比;
- d) 直达波、折射波初至明显,反射波、面波同相轴清晰;
- e) 不工作道应 $<20\%$,且不连续出现。

8.1.12 浅层地震法平均速度和有效速度的取值应符合下列规定:

- a) 确定平均速度或有效速度应考虑近地面介质不均匀性、低速带与下伏层厚度的相对变化的影响;
- b) 速度参数可通过地震波测井、反射波法、折射波法及面波法探测资料求得;
- c) 同一测线纵向、横向的速度不均匀时,应分段提取平均速度。

8.2 折射波法

8.2.1 折射波法主要用于确定探测断层构造和岩性界线的平面位置,探测覆盖层、风化层和不良地质体的厚度与连续特征,测定岩体的纵波波速等。

8.2.2 折射波法的应用条件除应符合 8.1.2 的规定外,同时应符合下列规定:

- a) 各层之间应存在明显的波速差异;
- b) 被追踪地层波速应大于各上覆层的波速;
- c) 沿测线被追踪地层的视倾角与折射波临界角之和应 $<90^\circ$;
- d) 被追踪地层界面应起伏不大,折射波沿界面滑行时无穿透现象。

8.2.3 折射波法现场工作除应符合 8.1.9 的规定外,同时应符合下列规定:

- a) 折射波法的道间距宜为 $5\text{ m} \sim 10\text{ m}$,两个连续排列之间至少有一个检波点重叠;
- b) 折射波法宜选用固有频率为 $10\text{ Hz} \sim 40\text{ Hz}$ 的中低频垂直检波器;
- c) 折射波法宜采用追逐相遇观测系统,追逐炮的炮检距应保证目的层连续追踪;

- d) 采用相遇观测系统时, 应保证追踪界面的相遇段至少有 4 个检波点能有效接收折射波;
 - e) 采用追逐观测系统时, 应保证被追踪段至少有 4 个正常检波点能重复接收同一界面的折射波;
 - f) 水域折射波法可采用炮检互换的追逐相遇观测系统, 炮间距宜 $< 10\text{ m}$ 。
- 8.2.4 折射波法外业资料的检查、验收及评价应符合下列要求:
- a) 野外班报记录完整, 原始数据文件名称与班报记录一致;
 - b) 坏道不得连续, 且不得是边道;
 - c) 记录清晰, 干扰幅度小, 折射波初至明显;
 - d) 追逐时距曲线与相遇时距曲线的折射波部分应平行, 且追逐时距曲线无盲区;
 - e) 相遇时距曲线互换时差不应大于 5 ms 。
- 8.2.5 折射波法数据处理、资料解释应符合下列规定:
- a) 应使用原始记录读取波的初至时间; 直接读取初至时间有困难时, 可读取有效波第一个极值时间, 但应进行相位校正;
 - b) 绘制时距曲线的水平比例尺可采用 $1:1\,000$ 或 $1:2\,000$, 垂直比例尺可采用 1 cm 代表 10 ms 或 20 ms ;
 - c) 时距曲线绘制后, 可根据互换时间的相等性、追逐时距曲线的平行性、炮点两侧截距时间相等性的原则进行检查; 出现非正常现象时, 应检查地震记录相关道的读数并进行修改;
 - d) 时距曲线中个别道出现旅行时突变时, 应对照相应地段的相遇或追逐时距曲线旅行时进行检查, 查明原因并进行必要的修正;
 - e) 构制浅层折射界面的方法应根据地球物理条件、解释方法的特点和精度要求选择。当界面起伏不大、无穿透现象、沿测线界面速度无明显变化时, 可采用 t_0 法或延迟时法; 当地面有一定起伏、折射界面起伏较大、无穿透现象、界面速度有明显变化时, 可采用时间场法; 对于多层不均匀或具有特殊结构的地层, 可采用折射波层析成像法;
 - f) 应依据任务要求, 在分析测区内有关地质、钻探及其它物探资料的基础上做出地质解释。确定折射界面与地质界面的对应关系, 推断水平方向岩性变化, 确定低速带与断层破碎带的对应关系。
- 8.2.6 折射波法成果图件应符合下列规定:
- a) 成果图件应包括测线布置平面图、时距曲线图、成果地质解释断面图;
 - b) 时距曲线图除绘制综合时距曲线和观测时距曲线外, 宜绘制完整的解释辅助线, 并标注截距时、表层波速和有效速度;
 - c) 成果地质解释断面图上, 应注明比例尺、高程、里程桩号和方向、界面上下介质的波速值、地质岩性、推测断层或破碎带位置等。
- ### 8.3 反射波法
- 8.3.1 反射波法主要用于划分地层界线和风化带、测定基岩埋深、查找断层构造、探测不良地质体的厚度和范围等。
- 8.3.2 反射波法的应用条件除应符合 8.1.2 的规定外, 同时应符合下列规定:
- a) 被追踪地层与其相邻层之间应存在明显的波阻抗差异, 反射界面视倾角宜 $< 30^\circ$;
 - b) 被追踪地层的厚度应大于有效地震波长的 $1/4$;
 - c) 地层界面相对稳定、平坦, 有一定的延续长度, 入射波能在界面上产生较规则的反射波。
- 8.3.3 反射波法现场工作除应符合 8.1.9 的规定外, 同时应符合下列规定:
- a) 同一排列宜布置在地形起伏不大、地表介质均一、有利于接收反射波的地段, 应与钻孔、基岩露头或其他勘探点发生联系;
 - b) 测线布置应为直线, 方向允许偏差为 $\pm 5^\circ$; 测线为折线时, 完整的观测系统应为直线;

- c) 反射波法的检波点距宜为 2 m~5 m;
 - d) 纵波反射波法宜选用固有频率为 100Hz 垂直检波器;
 - e) 可采用单边或双边展开排列观测系统,了解测区内有效波和干扰波的分布特征,并选择反射“最佳接收窗口”,确定偏移距和检波点距;
 - f) 等偏移距观测系统(地震映像法)适用于地球物理条件较简单,反射层位较稳定,且在最佳窗口内反射波较强的测区,观测中应根据展开排列试验资料,将偏移距选在反射波窗口的中部;
 - g) 多次覆盖观测系统适用于地球物理条件比较复杂的测区,观测中应采用具有一定偏移距的单端激发、覆盖次数不少于 6 次的观测系统,并使接收排列在反射最佳窗口内。
- 8.3.4 反射波法的工作参数选择与数据采集应符合下列规定:
- a) 通过试验,合理设置仪器工作参数,确定最佳时窗、检波距、采样率、记录长度、滤波器及延迟时间;
 - b) 覆盖次数根据任务要求和工作条件确定;
 - c) 宜采用高频检波器和有利于产生高频波的震源,必要时进行多次垂直迭加;
 - d) 采用炸药等强声波震源时,宜采用井中激发方式;
 - e) 连续剖面观测应保证时间剖面上的反射波同相轴能可靠地对比追踪;
 - f) 反射界面倾斜时宜采用下倾激发上倾接收的观测系统;
 - g) 采集的数据应进行显示或简单处理,确认合格后以其最佳状态进行存贮。
- 8.3.5 水上反射波法的数据采集应符合下列规定:
- a) 根据任务要求结合水域情况布置测线,宜采用卫星导航;
 - b) 采用经过一致性检查的完好漂浮电缆作为接收系统,保持电缆的沉放深度一致,沉放深度宜为 1 m~3 m;
 - c) 采用航行观测方式,航速宜小于 4 节;
 - d) 宜采用单边激发多次覆盖观测系统,偏移距应通过试验确定;
 - e) 道间距为 2 m~5 m,激发时间间隔为 2 s~4 s;
 - f) 观测过程中应随时监视目的层的探测效果并调整有关施测参数。
- 8.3.6 单点反射波法的数据采集应符合下列规定:
- a) 采用小偏移距、单点激发、多道接收的数据观测系统;有一个以上检波器的偏移距为探测深度的 1/4~1/2;
 - b) 选用有利于产生高频波的宽带震源,采用小能量多次垂直迭加的激发方式;
 - c) 检波器采用自然频率为中、高频的速度或加速度检波器;
 - d) 重点异常地段的数据采集应加密测点或正、反向激发。
- 8.3.7 反射波法的质量检查记录与原观测记录的同相轴应有较好的重复性和波形相似性。
- 8.3.8 反射波法数据处理、资料解释应符合下列规定:
- a) 地震反射记录的目的层反射波组明显、信噪比高、同相轴清晰、能够追踪和相位连续对比;
 - b) 根据原始记录的信噪比和探测任务要求,拟订处理流程,选择滤波频率、滤波视速度、叠加速度、平均速度等处理参数;
 - c) 结合地质资料分析、对比和追踪波组的相似性、波振幅的衰减程度、振动的同相性和连续性等特征,判释和确定反射波组对应地层的层位及地层的连续和横向变化特征;
 - d) 水上测线应按实测轨迹绘制,定量解释应考虑水底松散沉积物的不利影响;
 - e) 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;
 - f) 原始的地震映像资料进行定量解释时,应作动校正处理。
- 8.3.9 反射波法成果图件应符合下列规定:
- a) 成果图上应注明测区名称、测线号、偏移距、检波点距;

- b) 提供观测系统图和速度参数表;
- c) 提供地震时间剖面图和深度剖面图;
- d) 水平叠加时间剖面图还应注明叠加次数、处理流程、叠加速度等;
- e) 时间剖面典型地段应附相应的展开排列记录;
- f) 地震映像图应注明是否经过动校正处理及标注动校正速度值;
- g) 解释成果图件中应标注岩性分界、断层构造线和其他异常体的位置。

8.4 主动源面波法

8.4.1 主动源面波法主要用于探测覆盖层厚度,划分松散地层沉积层序及基岩风化带,探测浅部地层中的岩溶洞穴等不均匀体,评价地基加固处理效果,条件适宜时可用于求取地层的横波速度等。

8.4.2 主动源面波法的应用条件除应符合 8.1.2 的规定外,同时应符合下列规定:

- a) 被追踪地层应为横向相对均匀的层状或似层状介质;
- b) 地面应相对平坦,无临空面。地层界面起伏不大,并避开沟、坎等复杂地形的影响;
- c) 测点间距应根据任务要求和场地条件确定,一条测线不应少于 3 个测点;
- d) 偏移距应根据探测深度的要求试验确定;
- e) 观测参数应通过试验确定,地质情况变化时应调整;
- f) 重要异常及畸变曲线应重复观测,两次观测结果差别较大时应多次观测,并选择面波能量强、干扰小、重复性好的曲线作为有效观测结果。

8.4.3 主动源稳态面波法的数据采集应符合下列规定:

- a) 激振器与地面接触良好,检波器稳妥牢靠;
- b) 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面波记录;
- c) 宜选用固有频率 2 Hz 的低频检波器,检波距 1 m~5 m,允许误差为 $\pm 1\%$;
- d) 应通过试验选择合适的偏移距和检波点距,满足最佳面波接收窗口和探测深度的要求;
- e) 排列长度应大于 1.5 倍探测深度,检波间距应小于异常体规模。

8.4.4 主动源瞬态面波法的数据采集应符合下列规定:

- a) 采用重锤震源时,应根据需要选用不同材质的垫板,宜采用多次垂直迭加方式;
- b) 选用合适的低频检波器;
- c) 试验选择合适的道间距,防止因采用较大道间距而造成的空间假频现象,检波道数不宜小于 12 道;
- d) 偏移距宜接近要求的探测深度,不小于检波点距;
- e) 采样时间间隔不大于预期面波最高频率的半周期,以避免采样中的假频影响;
- f) 记录时间长度应考虑包括最远道的预期低频面波最大波长;
- g) 单斜地层宜在地层下倾方向激振。

8.4.5 主动源面波法的质量检查除符合 4.1.6 要求外,还应符合下列规定:

- a) 曲线的形态和频散特征无明显改变;
- b) “之”字形拐点和曲率变化的位置无明显位移。

8.4.6 主动源面波法数据处理、资料解释应符合下列规定:

- a) 资料处理前应对记录中信噪比低的道进行插值,并对初至以前的噪声进行切除等预处理;
- b) 准确区分面波和体波,求取正确的频散曲线;
- c) 点测方式以测点为单位处理,多次覆盖观测方式以测线为单位综合处理;
- d) 稳态面波法资料的处理和解释应剔除畸变点、干扰点后,将全部数据按频率顺序排列,再进行相应的处理;

- e) 结合钻探资料对频散曲线的“之”字形拐点和曲率变化处作出正确的地质解释,求得对应的面波速度,并绘制速度深度曲线;
- f) 反演计算面波速度和层厚,绘制波速度等值线图;
- g) 采用主动源面波法计算横波速度时,应结合工点已知资料求得面波速度与横波速度的对应关系后进行相应处理。

8.4.7 主动源面波法成果图件宜包括典型记录、频散曲线或波速—深度曲线、解释剖面或平面图。

8.5 微动勘探法

8.5.1 微动勘探法,主要用于划分地层结构,探测基岩起伏、断裂带、岩溶、“孤石”和采空区规模,进行工程建设场地类别评价。

8.5.2 微动法的应用应满足下列条件:

- a) 观测阵列形状与间距应根据场地形态试验确定;
- b) 观测时间应根据探测深度和有效信号强度确定,单次观测时间不宜少于 15 min。

8.5.3 微动勘探法的数据采集应符合下列规定:

- a) 地震仪具有较长的连续采集功能;
- b) 检波器与地面接触良好且固定牢靠;
- c) 低频检波器自然频率不应大于 4 Hz;
- d) 正式工作前,应进行台阵各套数据采集系统的一致性检查,台阵中各套仪器应具有相应相位一致性和振幅一致性;
- e) 应根据探测的目标体选择合适的观测台阵;
- f) 应根据探测的深度要求决定观测时间;
- g) 单次观测结束时应确认所有数据采集器正常同步采集数据,若不同步,该测点数据应重新采集;
- h) 避免人员在排列内部或附近随意走动,并宜避开排列附近的强震源。

8.5.4 微动探测数据质量评价应符合下列规定:

- a) 微动处理系统所需测点信息与外业原始班报记录一致;
- b) 数据质量评价应考虑微动数据在所需频率范围内的信噪比,信噪比宜大于 10 倍。

8.5.5 当天然面波的高频能量不足、缺失浅部地层的频散信息时,可在同一场地,采集少量主动源面波记录,联合利用高主频的主动源面波和低主频的天然源面波以确定更宽频率范围内的频散曲线。

8.5.6 微动勘探法数据处理、资料解释应符合下列规定:

- a) 从一个观测台阵的所有数据中,以同一时间点截取相同长度的数据,合成地震文件;
- b) 对微动信号进行带通滤波等预处理,可选用空间自相关方法 (SPAC)、常规频率-波数方法 (F-K) 或高分辨率-波数方法 (HRFK) 等提取面波的频散曲线;
- c) 应通过频散函数的计算,得到正演模型的频散曲线;
- d) 反演计算面波速度和层厚,绘制波速度等值线图。

8.5.7 微动勘探法成果图件宜包括布阵方式、正演模型频散曲线或波速—深度曲线、推断解释剖面 and 平面图。

8.6 地脉动测试

8.6.1 地脉动测试可为工程抗震和隔振设计提供场地的卓越周期和脉动幅值,为技术复杂大桥等重点工程结构抗震设计计算、提供场地土类别及地震反应谱计算提供参考。

8.6.2 地脉动测试使用的仪器应符合以下要求:

- a) 具有良好的低频响应和宽频响应,其下限应不低于 0.3 Hz/s;
- b) 具有足够的带宽和增益;

- c) 可连续进行数小时的数据记录和供电能力。
- 8.6.3 地脉动测试测点布置应符合下列要求：
 - a) 每个工点每个地质单元的观测点数一般不应少于 3 个；
 - b) 布置观测点的地面应密实平整，表层土壤松散时应挖坑设置，使检波器与大地耦合良好；
 - c) 水平检波器应平行和垂直于构筑物的轴线布置，垂直检波器应垂直于地平面，允许偏差为 $\pm 10^\circ$ 。
- 8.6.4 地脉动测试数据采集应符合下列要求：
 - a) 观测点半径 150 m 周围内没有人为连续性震动干扰；
 - b) 观测时间应选在干扰程度最低的时段进行，宜在深夜安静环境下进行测量；
 - c) 每个测点的观测不得少于 3 次，每次观测的连续时间不应少于 15 min，2 次观测间隔时间不得少于 30 min，重复观测宜隔日进行；
 - d) 每个测点在测试时应同时测定 2~4 个水平方向和 1 个垂直向的地脉动。
- 8.6.5 地脉动测试外业原始记录应符合下列规定：
 - a) 记录清晰，不得涂改；
 - b) 连续观测时间 > 15 min；
 - c) 在连续观测时间周期内，没有强干扰影响地脉动信号的识别；
 - d) 应准确记录下观测点位置、观测时间、周围条件，班报应整齐、准确、无改动。
- 8.6.6 地脉动测试内业工作应符合下列要求：
 - a) 频谱分析前应剔除记录中的干扰信号；
 - b) 卓越周期应采用专用软件确定；
 - c) 离散采样累计时间应 > 30 s；
 - d) 每个周期的采样点不应少于 3 点；
 - e) 干扰波较多的工点，宜结合位移谱、速度谱及加速度谱分析。
- 8.6.7 地脉动测试成果报告应提交标明卓越周期的振幅谱图。

9 井中物探法

9.1 一般规定

- 9.1.1 井中物探应根据钻孔或钻井内的地质条件、地球物理特征及周边电磁场、噪音等环境背景选择合适的物探方法。
- 9.1.2 井中物探的钻孔应符合下列规定：
 - a) 钻孔周围应具有测井仪器设备安置的条件；
 - b) 钻孔深度应大于要求测试深度 5 m 以上，且孔底沉渣应 < 2 m；
 - c) 钻孔内易坍塌、掉块等不安全井段应有可靠的保护措施；
 - d) 电测井、声波测井、地震波测井、超声波成像的孔段应有井液。
- 9.1.3 井中物探所使用的仪器设备除应满足工程物探设备的基本要求外，同时应符合下列规定：
 - a) 其下井部分应具有良好的耐压性、抗震性和防水性，电缆探头耐压强度应大于 2.5 MPa；
 - b) 地面仪器之间及其对地、绞车集流环对地、供电电源对地的绝缘电阻 > 10 M Ω ；
 - c) 电缆缆芯对地、电极系各电极之间、井下仪器线路与外壳之间的绝缘电阻 > 2 M Ω ；
 - d) 测井仪的深度测量相对误差不应超过 $\pm 0.5\%$ 。
- 9.1.4 井中物探的现场测试应符合下列规定：
 - a) 需要分次、分段测井时，数据或曲线衔接处至少重复测量一个深度标记；
 - b) 连续测井时电缆的升降速度应保持恒定，并不超过各测井方法所规定的限速值；

- c) 在水下砂层、砂砾石层等松散地层进行测井时，完孔后及时安置塑料套管，并在孔壁和塑料套管之间的环状孔隙中注入水泥砂浆或用水砂冲填。

9.1.5 井中物探的质量检查与评定应符合下列规定：

- a) 检查段应设在钻孔或异常段上并应有足够的检查长度；
- b) 两次观测除曲线或图像应有良好的相似性和重合性外，同时符合下列规定：
 - 1) 视电阻率幅度允许相对误差为 $\pm 5.0\%$ ；
 - 2) 声速或时差的允许相对误差为 $\pm 5.0\%$ ；
 - 3) 电磁波或雷达测井基本测量与检查测量允许绝对误差为 $\pm 3\text{ dB}$ 。

9.1.6 井中物探的资料处理与解释应符合下列规定：

- a) 钻孔深度应以孔口为准，记录的深度比例尺宜与钻孔柱状图一致；
- b) 绘制综合测井曲线图时，应对符合允许深度误差的曲线在相邻深度记号内平差，每个平差点一次平差不应大于 1 mm ；同张图中所有曲线绘制的深度坐标应一致，并按各自的横向比例分别绘出参数坐标并注明曲线名称；
- c) 解释推断应根据测井资料和各种测井曲线的分层特征，对不同参数曲线进行综合对比，结合地质、钻探等有关资料，对钻孔剖面按物性和地质结构分层；同一测区，地质条件相同时，应统一解释原则；
- d) 对同一钻孔进行的电测井、地震波测井等，其有关测试曲线均应绘制在一张综合测井解释图上。

9.2 电测井

9.2.1 电测井主要用于划分钻孔地层、校正钻孔地质剖面，测定岩体电性参数及井液电阻率，确定含水层位置及其厚度、区分咸淡水、测量钻孔中含水层的补给关系等。

9.2.2 被探测目的层相对上下层应存在电性差异，目的层应具有足够的厚度。

9.2.3 电测井的电极系、电极距应根据探测任务的要求合理确定。测定井液电阻率宜选用电位电极系；测定岩体电性参数及划分地层分界宜选用梯度电极系。

9.2.4 地面供电电极(B极)、固定测量电极(N极)应接地良好，远离高压线或工业游散电流干扰。

9.2.5 电测井数据采集应符合下列规定：

- a) 测定井液电阻率时钻孔中无金属套管，有绝缘套管时应在套管上密布小孔，使管内外井液导通；
- b) 钻孔无井液时应采用贴壁装置，使电极井壁紧密接触；
- c) 电阻率测井宜选用梯度电极系，测量过程出现负值或零值电阻率时，应查明原因，消除故障后重新测量；
- d) 电流测井应减小线路电阻及地面电极的接地电阻，并确保恒压供电，记录电流曲线时应检查并确定增量方向；
- e) 自然电位和激发极化测量应采用不极化电极，使用金属重锤时，测量电极距离重锤应 $>2\text{ m}$ ；
- f) 激发极化测井在电缆下放时测量宜采用底部电极梯度系；提升电缆时测量宜采用顶部梯度电极系；
- g) 测量一次场电位差和二次场电位差时均应注意电极极性；
- h) 自然电位和激发极化测量应采用点测方式观测；
- i) 电阻率测井宜连续观测，测量速度宜 $<10\text{ m/min}$ 。

9.2.6 电测井的数据观测精度应符合下列规定：

- a) 电位差、电流测量允许相对误差为 $\pm 3\%$ ；
- b) 视电阻率允许均方相对误差为 $\pm 5\%$ ；
- c) 自然电位测量允许绝对误差为 5 mV ；
- d) 视极化率允许均方相对误差为 $\pm 5\%$ 。

9.2.7 电测井资料解释应符合下列规定：

- 利用电测井曲线求取电性参数应考虑相邻地层的影响，提取完整、厚层围岩中段电性参数作为近似值；
- 钻孔中有两个及以上含水层互相补偿时，应定性分析各含水层之间的补给关系；
- 自然电位和激发极化解释时应考虑井液矿化度、井径以及岩层电阻率等因素的影响，并进行相应的校正；
- 电测井用于水文测井时，应结合钻孔水文地质资料和井温曲线综合分析，估算地下水渗透速度，并定性比较岩层的含水性和渗透性。

9.3 地震波速测井

9.3.1 地震波速测井主要用于测定岩土体的纵、横波速度，划分松散沉积层序，计算岩土体动弹性参数，也可用于探测桩基完整性和长度。

9.3.2 地震波速测井的数据采集应符合下列规定：

- 钻孔可用泥浆护壁，钻孔无井液时应采用贴壁装置，使检波器与孔壁紧密接触。有护壁套管时，管外空间应事先注入水泥砂浆或水砂，使套管与地层耦合良好；
- 测量点距应根据地层分层厚度确定，宜为 0.5 m~2.0 m；
- 测点深度允许误差为钻孔深度的±1%；
- 在层位变化处应进行加密测点。

9.3.3 采用单孔法测试地震波速时，应符合下列规定：

- 激发纵波可采用锤击金属板或落重震源，震源距孔口的距离宜为 2 m~5 m，检波器固有频率≤40 Hz；
- 激发横波宜采用条状板，板的短轴应对准井孔中心，距离井孔 2 m~5 m，检波器固有频率≤15 Hz，上面堆压重物应超过 500 kg；
- 激发板的安置要避开地下构筑物、墙基等；
- 两端激发的横波波形应相位相反，初至时间应相等，否则应重复观测；
- 最小测试深度应大于激发板至孔口的距离。

9.3.4 采用跨孔法测试地震波速时，应符合下列规定：

- 震源孔和接收孔的间距：在土层中宜为 2 m~4 m；在岩层中宜为 5 m~8 m；
- 震源和检波器应置于同一地层的相同标高处；
- 波形初至不清晰或相位的延续性不良的测点应重复观测；
- 孔深>15 m 时应进行井斜测量。

9.3.5 单孔测试的波速计算应符合下列规定：

- 根据波形记录确定初至时间；
- 单孔法波速 V 按式 (14) 计算：

$$v = \frac{\sqrt{h_2^2 + x^2} - \sqrt{h_1^2 + x^2}}{t_2 - t_1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

- v ——波速层的纵波速度或横波速度 (m/s)；
 h_2 ——波速层底深度 (m)；
 h_1 ——波速层顶深度 (m)；
 t_2 ——纵波或横波传播到波速层底面的时间 (s)；
 t_1 ——纵波或横波传播到波速层顶面的时间 (s)；

x ——激发点中点或激发点到孔口的距离 (m)。

c) 以深度 H 为纵坐标, 时间 t 或速度 V 为横坐标, 绘制时距曲线图与深度—速度图, 并宜与地层柱状图同比例绘在同一表格上。

9.3.6 跨孔法测试的波速计算应符合下列规定:

a) 当测试深度 >15 m 时, 应根据钻孔井斜测量资料计算两接收钻孔同一高程测点之间的距离 L ;

b) 以深度 H 为纵坐标, 速度 V 为横坐标, 绘制深度—速度图。

9.3.7 地震波速度检查允许均方相对误差为 $\pm 5\%$ 。

9.3.8 地基土的动剪切模量 G_d 、动弹性模量 E_d 、动泊松比 μ_d 可分别按式 (15)、式 (16) 和式 (17) 计算:

$$G_d = \rho v_s^2 \quad \text{..... (15)}$$

$$E_d = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad \text{..... (16)}$$

$$\mu_d = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad \text{..... (17)}$$

式中:

ρ ——波速层密度 (g/cm^3);

v_s ——波速层横波速度 (m/s);

v_p ——波速层纵波速度 (m/s)。

9.4 声波测井

9.4.1 声波测井主要用于测定钻孔中不同岩层的弹性波速度, 评价岩体完整性和风化程度。

9.4.2 声波测井仪器的技术指标除应符合 9.1.3 的规定外, 同时应符合下列规定:

a) 计时精度为 $\pm 1 \mu\text{s}$, 测时允许误差为 $\pm 1\%$;

b) 声波主频 $\geq 20 \text{ kHz}$;

c) 接收换能器灵敏度 $\geq 3000 \mu\text{V}/\text{Pa}$ 。

9.4.3 声波测井应采用单发双收的观测系统。收发距应根据地层岩性和岩体中的裂隙的发育情况而定, 收发距宜取值为 $0.20 \text{ m} \sim 1.00 \text{ m}$, 双收接收器间距宜选 $0.20 \text{ m} \sim 0.30 \text{ m}$ 。

9.4.4 声波测井的数据采集应符合下列规定:

a) 当初至波不能有效地反映滑行波时, 应采取有效措施确认滑行波特征后方能正式观测;

b) 要求滑行纵波成为首波, 在地层纵波速度小, 井眼大的井中直达波可能成为首波;

c) 测井深度比例尺为 $1:200$ 时, 连续观测速度宜 $\leq 10 \text{ m}/\text{min}$; 测井深度比例尺为 $1:50$ 时, 连续观测速度宜 $\leq 5 \text{ m}/\text{min}$;

d) 两接收道的接收波型应相似, 信噪比应大于 5 倍, 基本观测与重复观测的波形应一致;

e) 针对不同岩性, 应采集多组新鲜完整岩芯, 测试其岩块纵波波速。

9.4.5 声波速度检查允许均方相对误差为 $\pm 5\%$ 。

9.4.6 声波测井资料解释应符合下列规定:

a) 计算岩体波速时应考虑井径、岩性变化和泥浆的影响;

b) 根据曲线变化分段求取对应岩性段的平均声速, 并进行地质分层解释;

c) 常利用“周波跳跃”现象, 判断裂缝发育地层、薄互层、疏松地层等;

d) 计算岩体的弹性力学参数时, 应将岩体声波速度换算成地震波速度;

- e) 对声速测井应把全孔划分为若干个声速或密度不同的大层,并求得对应的平均波速和平均密度值后,再划分薄层作精细推断。

9.5 超声波成像测井

9.5.1 超声波成像测井是利用井壁地层反射特性的差异,获取钻孔孔壁的展视图像,主要用于判定断层和软弱夹层的倾向、倾角、厚度以及井壁的孔洞、裂隙等。

9.5.2 超声波成像测井应采用大尺寸的聚焦换能器,换能器应在无套管的钻孔中与井液直接接触。

9.5.3 超声波成像测井的图像采集应符合下列规定:

- 观测仪器下井前应进行声反射和磁扫描的监视检查;
- 深度比例应根据岩层倾角的大小、孔洞、裂隙、断层的规模、软弱夹层的厚度以及观测精度确定;
- 测井观测速度宜 $<4\text{ m/min}$,记录应清晰反映井壁的地质情况。

9.5.4 超声波成像测井的资料解释应符合下列规定:

- 超声波成像测井应对观察到的井壁地质情况进行描述,计算岩脉、裂隙、断层及软弱夹层的倾向、倾角及厚度;
- 孔斜 $>5^\circ$ 时,解释结果应根据井径、井斜资料进行校正。

9.6 弹性波 CT

9.6.1 弹性波 CT 主要用于探测井间地质构造、岩溶裂隙、断裂破碎带等不良地质体的位置及规模。弹性波 CT 穿透距离大、适合探测大规模目的体。

9.6.2 弹性波 CT 数据采集应符合下列规定:

- 孔间距宜 $5\text{ m}\sim 30\text{ m}$,孔深宜大于孔间距 1.5 倍;
- 宜采用共炮点道集工作方式观测;
- 弹性波 CT 成像段应无金属套管且有井液,宜等间距激发、等间距接收,且间距不应大于目标体尺寸;
- 井下震源或地表震源的激发能量应能保证在观测井产生足够的信号强度,且不破坏井内套管的安全使用;
- 井下检波器宜为多通道水听器,水听器移动时,应有至少一个点的重复测量;
- 对水平分辨要求较高的探测任务,可在井间的地表处补加激发点或观测点。

9.6.3 弹性波 CT 的外业检查、观测精度应符合下列规定:

- 检查观测工作量不少于总工作量的 5% ;
- 数据观测精度应采用相对误差评价,相对误差 δ 按式(18)计算,旅行时间的允许相对误差 δ 为 5% 。

$$\delta = \frac{2(t-t')}{t+t'} \times 100\% \dots\dots\dots (18)$$

式中:

t ——旅行时间原始观测值(ms);

t' ——旅行时间检查观测值(ms)。

9.6.4 弹性波 CT 的资料处理与解释应符合下列规定:

- 弹性波 CT 数据处理应抽取共激发点道集,准确拾取初至时间;
- 当井斜 $>5^\circ$ 时,宜进行井斜校正;
- 成像区域宜按正方形剖分,边长应等于激发点间距、接收点间距的最小值。

9.7 电磁波 CT

9.7.1 电磁波 CT 主要用于探测裂隙、断层、破碎带、岩溶、风化囊等地质体的位置及规模。

9.7.2 井间被探测的目的体与周围介质间应存在电磁性的差异。

9.7.3 电磁波 CT 数据采集应符合下列规定：

- a) 孔深宜大于孔间距 1.5 倍，孔间距不宜大于 40 m；
- b) 应在无金属套管的井中进行，探测井段应为岩石，对井壁完整性差的钻井宜采用 PVC 套管防护；
- c) 发射机与接收机的悬挂线(电缆)处宜有相应的绝缘绳和滤波器，并宜使用重锤往下放天线；
- d) 现场宜实施双频观测，工作频率应由现场试验确定。

9.7.4 电磁波 CT 的质量检查及评价应符合下列规定：

- a) 各种观测曲线应符合电磁波在介质中相应路径的传播规律，否则，应查明原因，进行复测或改变观测方法重新测量；
- b) 检查工作量不得少于总工作量 10%，至少对一个透射断面进行系统检查；
- c) 采用均方误差评价数据观测精度，场强值允许均方相对误差为±5%。

9.7.5 电磁波 CT 成像宜采用等值线方式，当存在多条剖面首尾相连时，方向相同和相近的剖面应连接在一起形成剖面。

9.8 电阻率 CT

9.8.1 电阻率 CT 主要用于探测岩溶裂隙、断裂、破碎带等不良地质的发育、分布及连通性。

9.8.2 电阻率 CT 数据采集应符合下列规定：

- a) 应在有井液、无金属套管的井中进行，对井壁完整性差或者土层中的钻井可采用筛状 PVC 套管防护；
- b) 二极法观测的两个远电极应有良好的接地条件，距观测剖面的距离应为井间距的 5 倍以上；
- c) 在井间和两井连线外侧的地表宜同时布设地表测量电极，用以改善成像的精度。

9.8.3 电阻率 CT 成果宜包括影像图、地质剖面图，同一剖面或测线的影像与地质剖面应绘制在同一图件中。

9.9 钻孔全景光学成像

9.9.1 钻孔全景光学成像主要用于准确划分岩性，确定软弱夹层、断层、裂隙、破碎位置，观察地下水活动，检查混凝土浇筑质量和灌浆效果等。

9.9.2 钻孔全景光学成像应在干孔或清水孔中进行。孔中井液透明度不够时，应用清水循环冲洗，必要时加沉淀剂澄清。

9.9.3 设备下井前应预先录制工程名称、钻孔编号、岩芯及钻孔附近地形地貌、场地环境等。

9.9.4 钻孔全景光学成像的观察质量应符合下列规定：

- a) 图像显示的深度与电缆标记深度允许绝对误差 10 cm；
- b) 井下录制的电视图像和罗盘显示的方位应清晰可辨。

9.9.5 钻孔全景光学成像的资料解释除应符合 9.1.6 的规定外，还应对观测到的地质异常现象、地下水活动情况用文字进行详细描述。

9.10 管波探测法

9.10.1 管波探测法主要用于探测钻孔旁一定范围内的溶洞、溶蚀裂隙、软弱夹层等不良地质体。

9.10.2 管波探测法现场采集时，除应符合 9.1.4 的规定外，还应符合下列规定：

- a) 钻孔内无金属套管，破碎地层的孔段可放置塑料套管；

- b) 测试孔段应有井液，且井液比重应 $\leq 1.2 \text{ g/cm}^3$ ；
- c) 测试记录的采样间隔应 $\leq 20 \mu\text{s}$ ，记录长度应 $\geq 25 \text{ ms}$ 。

9.10.3 管波探测法资料处理与解释应符合 9.1.6 的规定外，同时应符合下列规定：

- a) 各测点的测试曲线应采用相同的显示增益；
- b) 应在分层并确定其深度基础上，判定钻孔周围不良地质体。

9.11 井中雷达法

9.11.1 井中雷达法主要用于划分地层、区分含水层，确定岩层中裂隙、溶洞、松散层的位置等。

9.11.2 应用井中雷达法应满足下列条件：

- a) 钻孔中应无金属套管；
- b) 孔壁应光滑，不应坍塌和掉块，在有坍塌或掉块的孔段宜采用 PVC 套管防护。

9.11.3 现场工作应符合 9.1.4 的规定外，同时应符合下列规定：

- a) 工作频率与天线应根据地质条件和精度要求进行选择确定；
- b) 应根据地球物理条件和探测目的体的规模选择一个或多个工作频率。

9.11.4 资料处理与解释应符合 9.1.6 的规定。

10 工程物探成果报告

10.1 一般规定

10.1.1 报告应实事求是、内容全面、重点突出、立论有据、逻辑严谨、文字简炼、附图附表资料齐全。

10.1.2 公路工程物探应按勘察设计阶段编制阶段性物探成果报告。

10.1.3 采用单一物探方法完成一个工程（或工点）的一项或几项工作任务应编写单项物探（或专题）成果报告，采用综合物探完成一个工程（或工点）的一项或几项工作任务应编写综合物探成果报告。完成工程（或工点）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。

10.2 内容编制

10.2.1 物探成果报告应根据任务要求、现场地质、地球物理条件和结合工程特点进行编写，并应包括以下内容：

- a) 概述，包括项目概况，任务依据、目的及要求，执行的技术标准，工作完成情况等；
- b) 地质概况及地球物理特征，包括地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件、不良地质、地球物理条件等；
- c) 外业工作方法，包括物探方法与仪器设备、测量定位、工作参数及数据质量保证措施等；
- d) 工作质量评价，包括对物探测量定位精度、数据观测精度、解释精度及勘探效果的综合分析与评价；
- e) 数据处理与资料解释，包括数据处理与解释方法、成果分析及其地质解释等；
- f) 结论与建议，包括物探工作各项主要地质结论和技术结论；存在的问题及对成果验证、后续勘察、设计、施工提出的合理建议。

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

10.2.3 阶段性综合物探成果报告以现阶段的物探成果编写报告，并结合各阶段的物探成果。

10.2.4 物探成果报告的插图可包括方法原理图、工作照片、典型曲线图、对比分析图等；插表可包括工作量表、物性参数表、成果解释列表、测试数据列表、精度统计表等。

10.2.5 物探成果报告附图应符合下列规定：

- a) 图件应包括物探工作平面图、物探成果图、综合解释成果图；
- b) 物探成果图应根据采用的物探方法绘制相应的专业图件，包括各种类型的曲线图、剖面图、等值线图及图像等；
- c) 物探成果图应清晰完整标注相应物理参数的国际制单位；
- d) 综合解释成果图应是对实测物探资料进行的定性和定量解释的成果体现，应与物性资料对应。

附录 A

(规范性)

几种主要物探方法的应用范围和适用条件一览表

见表A.1。

表 A.1 几种主要物探方法的应用范围和适用条件一览表

方法名称			应用范围	适用条件
直流电法	电阻率法	电阻率测深法	探测地层在垂直方向的电性变化, 解决与深度有关的地质问题。	被测岩层有足够厚度, 岩层倾角 $<20^{\circ}$; 相邻层电性差异显著, 水平方向电性稳定; 地形平缓, 接地良好。
		电阻率剖面法	探测地层岩性、地质构造在水平方向的电性变化, 解决与平面位置有关的问题。	被测地质体有一定的宽度和长度, 电性差异显著, 电性界面倾角 $>30^{\circ}$; 覆盖层薄, 地形平缓, 接地良好。
		高密度电阻率法	探测浅部不均匀地质体的空间分布。	被测地质体与围岩的电性差异显著, 其上方没有极高阻或极低阻的屏蔽层; 地形平缓, 覆盖层薄, 接地良好。
	充电法		用于钻孔或水井中测定地下水流向流速; 测定滑坡体的滑动方向和速度。	含水层埋深 $<50\text{m}$, 地下水流速 $>1\text{m/d}$; 地下水矿化度微弱; 覆盖层的电阻率均匀。
	激发极化法		寻找地下水, 测定含水层埋深和分布范围, 评价含水层的富水程度。	在测区内没有游散电流的干扰, 存在激电效应差异。
电磁法	音频大地电磁法		探测中、深部地质构造、岩溶等。	被测地质体有足够的厚度及显著的电性差异; 电磁噪声平静。
	可控源音频大地电磁测深法		探测中、深部地质构造、岩溶等。	被测地质体有足够的厚度及显著的电性差异; 电磁噪声比较平静; 具有适合布设场源的场地。
	瞬变电磁法		可在基岩裸露、沙漠、冻土及水面上探测断层、破碎带、地下洞穴及水下第四系厚度等。	被测地质体相对规模较大, 且相对围岩呈低阻; 其上方没有极低阻屏蔽层; 没有外来电磁干扰。
	地质雷达		探测地下洞穴、构造破碎带、滑坡体; 划分地层结构; 管线探测等。	被测地质体上方没有极低阻的屏蔽层和地下水的干扰; 没有较强的电磁场源干扰。
浅层地震法	直达波法		测定波速, 计算岩土层的动弹性参数。	
	折射波法		探测覆盖层厚度及基岩埋深。	被测地层的波速应明显大于上覆地层波速。
	反射波法		探测不同深度的地层界面、空间分布。	被探测地层与相邻地层有一定的波阻抗差异。
	主动源面波法		探测覆盖层厚度和分层; 探测不良地质体, 进行工程建设场地类别评价。	被探测地层与相邻地层之间、不良地质体与围岩之间, 存在明显的波速和波阻抗差异。
	微动勘探法		探测覆盖层厚度和分层; 探测不良地质体, 进行工程建设场地类别评价。	被探测地层与相邻地层之间、不良地质体与围岩之间, 存在明显的波速和波阻抗差异。排列附近不能有强震源干扰。
	地脉动测试		为工程抗震和隔振设计提供场地的卓越周期和脉动幅值	观测点半径 150m 周围内没有人连续性震动干扰; 宜在深夜安静环境下进行测量。

表 A.1 几种主要物探方法的应用范围和适用条件（续）

方法名称		应用范围	适用条件
声波探测		测定岩体的动弹性参数；评价岩体的完整性和强度；测定洞室围岩松动圈和应力集中区的范围。	
井中物探	电测井	划分地层，区分岩性，确定软弱夹层、裂隙破碎带的位置和厚度；确定含水层的厚度；划分咸、淡水界面；测定地层电阻率。	无套管、清水洗孔。
	地震波速测井	测定岩土体的纵、横波速度，划分松散沉积层序，计算岩土体动参数。	有无套管均可。
	声波测井	区分岩性，确定裂隙破碎带的位置和厚度；测定地层的孔隙度；研究岩土体的力学性质。	无套管、有井液。
	超声波成像测井	判定断层和软弱夹层的倾向、倾角、厚度以及井壁的孔洞、裂隙等。	无套管、有井液。
	层析成像（CT）	评价岩体质量、划分岩体风化程度、圈定地质异常体、对工程岩体进行稳定性分类；探测溶洞、地下暗河、断裂破碎带等。	目标体与围岩有明显的物性差异。弹性波CT法测试段有井液；电磁波CT法测试段无金属套管，外界电磁干扰小；电阻率CT法测试段宜有井液。
	钻孔全景光学成像	确定钻孔中岩层节理、裂隙、断层、破碎带和软弱夹层的位置及结构面的产状；了解岩溶洞穴的情况；检查灌浆质量和混凝土浇筑质量。	无套管和清水钻孔中进行。
	管波探测	桩位岩溶勘察、评价桩基持力层完整性；钻孔岩土分层；钻孔含水层划分；桩基质量检测等。	测试段无金属套管、有井液。
井中雷达		于划分地层、区分含水层，确定岩层中裂隙、溶洞、松散层的位置等。	不适宜在导电环境中应用，如水，淤泥等介质中。

附 录 B
(规范性)
公路工程物探方法选用一览表

见表B.1。

表 B.1 公路工程物探方法选用一览表

物探方法		应用范围										
		覆盖层 与基岩 风化带	隐伏构 造破碎 带	软弱 夹层	岩溶	采空区	滑坡	超前地 质预报	地下水	地基加 固效果 评价	岩体完 整性评 价	场地 评价
直 流 电 法	电测深法	●	△	△	●	△	●		●			
	电剖面法	△	●	△	△	△	△		●			
	高密度电法	●	●	△	●	●	●		●	△		
	充电法		△		△				●			
	激发极化法	△	△		△		△		●			
电 磁 法	音频大地电场法	△	●		●	●	●		●			
	可控源音频大地电磁法	△	●		●	●	●		●			
	瞬变电磁法	△	●		●	●	△	△	△			
	地质雷达	●	△		●	△	△	●	△	△		
浅 层 地 震 法	折射波法	●	●				●				△	△
	反射波法	●	●		●	●	●	●	△	△		△
	主动源面波法	●	△	△	●	△	●			●		●
	微动勘探法	●	△	△	●	△	●			△		△
	地脉动测试法											●
声波探测法		●	●	●	△	△	●			●	●	△
井 中 物 探	电测井	●	●	●	●	△	△		△			
	地震波测井	●	●	●			△			●	●	●
	声波测井	●	●	●	△	△	●			△	●	
	超声成像测井	●	●	●	△	△	●		△			
	井间层析成像	△	●	●	●	●	△	△		△		
	钻孔全景光学成像	△	△	△	△	△	△				△	
	管波探测法		△		●	△					△	
	井中雷达	●	●		△	△	△	△	△			
注：●推荐方法；△可选方法。												

附录 C

(资料性)

常用物探方法适用探测对象、探测深度及相对分辨率对比表

见表C.1。

表 C.1 常用物探方法适用探测对象、探测深度及相对分辨率对比表

方法	一般适用探测对象	一般适宜探测深度或距离 (m)	一般相对分辨率
音频大地电磁法	较大规模构造或对象	$\leq 2\,000$	粗
可控源音频大地电磁法	较大规模构造或对象	$\leq 1\,800$	粗
瞬变电磁法	较大规模构造或对象	≤ 800	较粗
电测深法	中等规模构造或对象	≤ 500	较细~较粗
高密度电法	中小规模构造或对象	≤ 200	较细
浅层地震法 (非炸药震源)	较小规模构造或对象	≤ 150	较细
层析成像 (CT)	小规模构造或对象	≤ 40	细
地质雷达	很小规模构造或对象	≤ 30	很细
综合测井	细微构造或对象	-	特别细

附录 D

(资料性)

可控源音频大地电磁法工作参数的计算

D.1 收—发距

D.1.1 因素

CSAMT远区测量中, 由于使用有限场源, 在平面上允许采集数据的范围受到限制。限制平面探测范围的因素有三个:

- 最小收—发距 $r_{\min}$, 它受到进入近场的限制;
- 最大收—发距 $r_{\max}$, 它受到最小可探测信号的限制;
- 信号强度与偏离 AB 场源中垂线方位角 ϕ 的依赖关系。

注 1: 因此, 要保证所使用的频率均在远区且信号强度足够强, 需要对最小和最大收—发距进行初步估计。

注 2: 当测区大地岩性参数未知时, 为保证在“远区”工作, 经验上通常按 $r \geq 4 H_m$ (H_m 为目标体最大埋深) 来设计收—发距 r 。在特高阻地区相比较低阻地区会过早地进入过渡区, 这种测区条件下既要考虑降低频率也要考虑进一步加大收—发距满足远区工作条件。

D.1.2 最小收—发距

在 CSAMT 测量中, 收—发距是以趋肤深度为标准来确定, 若要求在远区观测, 则对于旁侧装置测量, 要求 $r_{\min} > 4\delta$ (δ 为趋肤深度), 对于轴向装置测量, 要求 $r_{\min} > 5\delta$; 如果允许在近场观测, 则可放宽到 $r_{\min} > 0.5\delta$ 。

D.1.3 最大收—发距

根据远区水平电场公式, 见式 (D.1); 对于旁侧装置测量, 当收—发距 $r \gg \overline{AB}$ 时, 最大收—发距见式 (D.2)。

$$E_{\phi} \approx \frac{I \overline{AB}}{\pi \sigma r^3} \sin \phi \quad \text{..... (D.1)}$$

$$r_{\max} \approx \left(\frac{I \overline{AB} \rho \sin \phi}{\pi E_{\min}} \right)^{1/3} \quad \text{..... (D.2)}$$

式中:

I ——电流强度 (A);

σ ——大地电导率 (S/m);

ρ ——大地电阻率 ($\Omega \cdot m$);

$\overline{AB}$ ——有限场源长度 (km);

$E_{\min}$ ——为在一定噪声条件下可探测到的最小电场信号强度 ($\mu\text{V}/\text{km}$);

$r_{\max}$ ——最大收—发距 (km)。

注：根据式 (D.2) 估算最大收—发距 $r_{\max}$ 示例：若大地平均电阻率为 $20\ \Omega\cdot\text{m}$ ，供电电流 $I=20\ \text{A}$ ， $\overline{AB}$ 长度 $1\ \text{km}$ ，旁

侧 E_x/H_y ($\phi=90^\circ$) 测量，外界随机噪声水平 $10\ \mu\text{V}$ ，当 $E_{\min}=0.1\ \mu\text{V}/\text{km}$ 时（假定最低信噪比为 1:100，目前的 CSAMT 数字采集系统可在信噪比为 1:100 时随机噪声条件下经过叠加和平均得到最小准确信号），可计算得到 $r_{\max}=10.8\ \text{km}$ 。 $r_{\max}$ 随电阻率增高和噪声水平降低而增大，反之则减小。事实上，仪器观测系统本身的分辨率由于各种噪声的存在， $E_{\min}$ 一般应 $>0.5\ \mu\text{V}/\text{km}$ ，因此实际的 $r_{\max}$ 应 $<10.8\ \text{km}$ 才能观测到最小准确信号。

D.2 探测深度

在技术设计中，首先要对测区内大地平均电阻率有一个恰当的估计，这个估计可根据收集或采集的岩（矿）石物性样品的电阻率值、测井电阻率值，以及测区以往经验来估计，然后可根据经验公式 (D.3) 初步估算有效探测深度 h ，其与大地电阻率和工作频率有关：

$$h \approx \delta / \sqrt{2} = 356 \sqrt{\rho / f} \dots\dots\dots (\text{D.3})$$

式中：

δ ——为趋肤深度 (km);

ρ ——大地电阻率 ($\Omega\cdot\text{m}$);

f ——工作频率 (Hz);

h ——探测深度 (m)。

D.3 最低工作频率

技术设计中，根据探测深度要求在确定最大探测深度后，可根据最大探测深度估算所需要的最低工作频率 f_L ，见式 (D.4)。当大地电阻率已知时，保证在远区测量的最低工作频率与最小可探测信号的收—发距 $r_{\max}$ 有关。计算最低工作频率 f_L 的经验公式见 (D.5)、(D.6)，这两个公式假定最低信噪比为 1:100。

$$f_L = \left(\frac{356}{h} \right)^2 \cdot \rho \dots\dots\dots (\text{D.4})$$

$$f_L = 4.0 \times \frac{\rho}{r_{\max}^2} \dots\dots\dots (\text{D.5})$$

$$f_L = 0.06 \times \frac{\rho}{r_{\max}^2} \dots\dots\dots (\text{D.6})$$

式中：

h ——探测深度 (m);

$r_{\max}$ ——最大收—发距 (km);

ρ ——预测的测区平均大地电阻率 ($\Omega \cdot m$);

f_L ——最低工作频率 (Hz)。

注：通常，为保证不漏掉所要探测的地质目标体，要求野外应测到比最低工作频率 f_L 还要低几个频率，以确保适合的探测深度。
