



T/CECS XXXX

中国工程建设标准化协会标准

钻孔层析成像勘察标准

Standard for borehole tomography exploration

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

钻孔层析成像勘察标准

Standard for borehole tomography exploration

T/CECS XXXX

主编单位：中铁第四勘察设计院集团有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：XXXX年 XX月 XX日

中国计划出版社

2025 北 京

关于发布《钻孔层析成像勘察标准》的公告

作者：admin 单位：中国工程建设标准化协会

第 XXXX 号

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2023 年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字[2023]10 号）的要求，由中铁第四勘察设计院集团有限公司等单位编制的《钻孔层析成像勘察标准》，经协会勘测专业委员会组织审查，现批准发布，编号为 XXXXXX，自 XXXX 年 XX 月 XX 日起执行。

XXXX 年 XX 月 XX 日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2023 年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2023]10 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分 7 章，主要技术内容包括：总则、术语、基本规定、钻孔地震波层析成像、钻孔声波层析成像、钻孔电磁波层析成像和钻孔直流电层析成像。

本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会勘测专业委员会归口管理，由中铁第四勘察设计院集团有限公司负责具体技术内容的解释。施行过程中如有意见或建议，请反馈至中铁第四勘察设计院集团有限公司（地址：湖北省武汉市武昌区和平大道 745 号；邮政编码：430063）。

主编单位： 中铁第四勘察设计院集团有限公司

参编单位： 湖北省地质局地球物理勘探大队
中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所
中冶武勘工程咨询（湖北）有限公司
中水珠江规划勘测设计有限公司
中煤科工西安研究院（集团）有限公司
中国电子科技集团公司第二十二研究所
浙江数智交院科技股份有限公司
湖北省城市地质工程勘察院

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总 则	1
2 术 语	2
3 基本规定	3
4 钻孔地震波层析成像	9
4.1 一般规定.....	9
4.2 仪器设备.....	9
4.3 现场采集.....	10
4.4 数据处理与解译.....	10
5 钻孔声波层析成像	13
5.1 一般规定.....	13
5.2 仪器设备.....	13
5.3 现场采集.....	13
5.4 数据处理与解译.....	14
6 钻孔电磁波层析成像	15
6.1 一般规定.....	15
6.2 仪器设备.....	15
6.3 现场采集.....	15
6.4 数据处理与解译.....	17
7 钻孔直流电层析成像	18
7.1 一般规定.....	18
7.2 仪器设备.....	18
7.3 现场采集.....	18
7.4 数据处理与解译.....	20
附录 A 误差计算.....	22
附录 B 电磁波场强计算.....	23
用词说明.....	24
引用标准名录.....	25
条文说明.....	26

Contents

1	General provisions	1
2	Terms	2
3	Basic requirements	3
4	Borehole seismic wave tomography	10
4.1	General provisions	10
4.2	Instrument and equipment.....	10
4.3	On-site data acquisition.....	11
4.4	Data processing and interpretation.....	11
5	Borehole acoustic tomography	14
5.1	General provisions	14
5.2	Instrument and equipment.....	14
5.3	On-site data acquisition.....	15
5.4	Data processing and interpretation.....	15
6	Borehole electromagnetic wave tomography	16
6.1	General provisions	16
6.2	Instrument and equipment.....	16
6.3	On-site data acquisition.....	16
6.4	Data processing and interpretation.....	18
7	Borehole direct-current tomography	19
7.1	General provisions	19
7.2	Instrument and equipment.....	19
7.3	On-site data acquisition.....	19
7.4	Data processing and interpretation.....	21
	Appendix A: Calculation of error	23
	Appendix B: Calculation of electromagnetic field strength	24
	Explanation of wording	25
	List of quoted standards	26
	Addition : Explanation of provisions	27

1 总 则

1.0.1 为规范钻孔层析成像勘察的技术要求,提高勘察质量,做到技术先进,方法适用,经济合理,制定本标准。

1.0.2 本标准适用于工程勘察中采用的跨孔层析成像,包含钻孔地震波层析成像、钻孔声波层析成像、钻孔电磁波层析成像和钻孔直流电层析成像。

1.0.3 钻孔层析成像勘察除应符合本标准规定外,尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 层析成像 tomography

通过测量地震波、电磁波等地球内部物理场在不同位置的传播时间、振幅、相位等信息，然后利用数学算法和计算机技术对这些数据进行处理和反演，从而构建出地球内部介质的物理参数分布图像的一种物探方法。

2.0.2 钻孔层析成像 borehole tomography

通过在钻孔中发射地震波、电磁波或建立直流电位场，对被测区域进行多方位断面扫描，重建波速、能量吸收或电阻率图像的一类探测方法。

2.0.3 钻孔地震波层析成像 borehole seismic wave tomography

利用孔内地震波在介质中传播的速度快慢特征，对被测区域进行多方位断面扫描，重建被测区域地震波速度分布的一种探测方法。

2.0.4 钻孔声波层析成像 borehole acoustic tomography

利用孔内声波在介质中传播的速度快慢特征，对被测区域进行多方位断面扫描，重建被测区域声波速度分布的一种探测方法。

2.0.5 钻孔电磁波层析成像 borehole electromagnetic wave tomography

利用孔内电磁波在介质中传播的能量衰减特性，对被测区域进行多方位断面扫描，重建被测区域电磁波吸收系数分布的一种探测方法。

2.0.6 钻孔直流电层析成像 borehole direct-current tomography

利用孔内直流电源激发产生的电位场，通过观测被测区域不同位置的电位或电位差，重建被测区域电阻率分布的一种探测方法。

2.0.7 初至时间 first arrival time

波形记录上首波的到达时间。

2.0.8 电磁波吸收系数 electromagnetic wave absorption coefficient

表征电磁波幅度在介质中衰减程度的参数。

3 基本规定

3.0.1 钻孔层析成像应具备下列条件：

- 1 成像区域周边至少两侧应具备钻孔及作业空间条件；
- 2 成像扫描范围宜与目标规模相匹配，且被探测目标宜位于成像区域的中部，目标体轮廓可由成像单元组合构成；
- 3 探测目标体与周围介质存在明显物性差异。

条文说明：

3.0.1

- 1 作业空间是指人员和设备能够安全作业的空间。
- 2 在进行钻孔层析成像技术操作时，所设定的扫描范围应该与所关注的目标（物体、结构等）的规模相匹配。具体来说，假设目标是一个小型的地质结构，扫描范围过大会浪费资源、增加成本，并且可能引入不必要的误差。反之，如果目标是一个大型的地质结构，扫描范围过小则无法完整地获取到地质结构信息，导致对目标的分析和评估出现偏差。

3.0.2 钻孔层析成像应遵循下列工作原则：

- 1 宜按资料搜集、工作方案编制、现场试验、数据采集、数据处理与解译、成果报告编制的程序进行；
- 2 应结合被探测目标体的物性特点、孔间距离、钻孔成孔条件和成像精度要求等选用合理的方法；
- 3 重大工点、控制工点、地质条件复杂的工点，宜采用两种或以上有相互补充作用的综合方法。

条文说明：

3.0.2

2 在选用层析成像方法时，应以被探测目标体与周围介质存在明显物性差异为基础，具体方法选择一般按照以下原则进行：

- 1) 钻孔漏水严重无法贮水，且不具备封堵条件时，应选用钻孔电磁波层析成像法；
- 2) 孔周介质呈现低电阻率特征时，不宜选用钻孔电磁波和钻孔直流电层析成像法；
- 3) 受限于声波能量低、衰减快，当孔间距离大于 10m 时，不宜选用钻孔声波层析成像法；
- 4) 钻孔成孔条件差，成孔后易出现掉块或塌孔等情况时，一般不选用钻孔地震波层析成像法，因地震波震源释放的能量容易造成孔内事故；
- 5) 成像精度要求高，在数据质量满足要求条件下，宜选用钻孔声波层析成像法。

3 钻孔地震波与钻孔声波层析成像法，利用的是地震波在目标体与周围介质中传播的速度差异进行反演成像的；钻孔电磁波与钻孔直流电层析成像法，利用的是目标体与周围介质的电性差异进行反演成像的。因此，当目标体与周围介质同时存在地震波速度差异和电性差异时，选用两种或以上物探方法可以从两种物性角度互为补充、相互验证。

3.0.3 钻孔层析成像开展工作前，应收集下列资料：

- 1 工程概况；

- 2 区域地质资料；
- 3 既有勘察资料或设计、施工资料；
- 4 其他与开展工作有关的资料文件。

条文说明：与开展钻孔层析成像工作有关的资料一般包含：

- 1) 钻孔测量数据，包含钻孔坐标和深度数据，孔斜数据；
- 2) 设备相关文件，包含设备校验报告，设备操作手册；
- 3) 区域前期物探成果，主要包含地面物探成果和航空物探成果；
- 4) 钻孔岩芯资料或钻探施工记录。

3.0.4 钻孔层析成像工作前应编制工作方案，工作方案应包括下列内容：

- 1 项目概况，包含任务来源、目的、要求等；
- 2 遵循的规范与标准；
- 3 交通、地形地质及地球物理条件，物探工作的不利因素等；
- 4 方法选择、方法原理及仪器设备；
- 5 孔位布置、现场采集等要求；
- 6 数据质量控制措施；
- 7 计划工作量及人员、设备、工期安排；
- 8 预期提交的成果资料。

条文说明：钻孔层析成像工作的不利因素包含很多。例如：当测区位于闹市区时，孔位周围经常有行人、车辆通行，可能影响现场作业人员和设备的安全，对物探数据产生干扰。当采用地震波层析成像时，由于震源能量较强，可能会破坏孔壁完整性，甚至导致塌孔风险。当钻孔漏水严重无法贮水时，采用分段封堵措施采集十分费时费力。

3.0.5 钻孔层析成像钻孔，应符合下列规定：

- 1 钻孔孔深宜大于孔间距的 1.5 倍，且大于探测目标深度 5m；
- 2 钻孔孔径不应小于 76mm；
- 3 钻孔间距应根据任务要求、地质条件、仪器设备性能和方法特点合理布置，一般不宜大于 40m；
- 4 斜孔或孔深大于 100m 的钻孔，应进行孔斜测量；
- 5 钻孔孔壁条件较差时，应下套管护壁，钻孔电磁波和钻孔直流电成像应使用不导电套管；
- 6 工作前，应用直径略大于探头的重物进行探孔，检查水位、孔深和钻孔通畅情况；
- 7 现场应对钻孔孔口位置进行测量。

条文说明：

3.0.5

2 钻孔缩径或下套管时，钻孔孔径均会变小，为保证设备在孔内自由移动，钻孔孔径一般大于设备直径 10mm 以上。参考《水利水电工程勘探规程 第 1 部分：物探（SLT 291.1—2021）》第 4 章 4.8.4 节相关规定，钻孔孔径一般不应小于 76mm。

3 地质结构越复杂，探测目标体越小，钻孔间距应越小，以便精确地捕捉地质细节；仪器设备

性能较低，探测精度要求较高，钻孔间距应相应减小。

4 斜孔或孔深大于 100m 的钻孔，孔斜对坐标系建立产生重要影响，对后续的数据处理和地质解释也非常重要，因此必须进行孔斜测量。

6 工作前对钻孔进行探孔工作，可进一步明确可测段的深度，在很大程度上也可预防设备卡孔事故。孔内测试前应了解钻孔情况，包括孔径变化、套管深度、孔内是否发生过掉块或丢钻具等事故、有无洞穴漏水等，以便对可能发生的问题制定预防措施。有条件的情况下可先进行钻孔全景数字成像，避免安全事故的发生。

7 孔口位置测量应准确测定孔口坐标及高程，目的是在数据处理时准确建立坐标系。孔口位置测量应符合国家现行标准《全球定位系统（GPS）测量规范》GB/T 18314 和《物化探工程测量规范》DZ/T 0153 的有关规定。

3.0.6 仪器设备管理应符合下列规定：

1 应以一机一档的方式建立设备档案，详细记录其使用情况、校验情况、故障情况和维修情况等，设备上应有明显的状态标识；

2 仪器主机和主要配件应存放在清洁、干燥的专用库房内，对内置充电电池供电的仪器，长期不使用时应每个季度对仪器进行充电维护；

3 仪器校验周期不宜超过一年，设备主机或主要配件维修后应记录处理情况，并重新校验；

4 仪器应进行出入库检查，运输前应进行妥善包装，包装箱内应有防震材料，箱外应注明“防潮、防震、勿倒置”等警示字样，仪器到达工地后应检查。

3.0.7 在同一测区使用多台相同型号设备时，应符合下列规定：

1 正式开工前，各设备应进行一致性测定，一致性误差不应大于 5%，一致性测定误差应按照本标准附录 A 中 A.0.1 公式计算；

2 一致性测定应在相同孔位，使用相同工作参数，并选择环境干扰小的位置进行；

3 多台设备工作时，各设备应分开一段距离，避免相互干扰。

条文说明：多台设备在同一测区工作时，各设备之间应分开足够的距离，避免数据产生影响，一般情况下，各设备之间数据不产生影响的安全距离不应小于 100m。

3.0.8 项目实施前应开展试验工作，试验应符合下列规定：

1 试验应选在具有代表性的钻孔位置；

2 试验内容应包括观测系统选择、设备工作参数等。

条文说明：试验工作的目的是确保发射源能够有效穿透成像区域，采集的数据能够满足差异识别和反演成像的要求。

3.0.9 外业数据采集应符合下列规定：

1 钻孔地震波层析成像或声波层析成像工作前，宜先进行单孔地震波测井或单孔声波测井、钻孔全景数字成像；

2 观测数据发生明显畸变时，应查明原因并重测；重测后仍不满足要求，可适当移动发射或接收点位置重新观测；当移动后观测数据仍不满足要求，且畸变点超过总测点数 10%时，应终止观测并更换设备或方法；

3 当发射或接收点位置移动时，应在班报中记录新测点位置；

4 相邻测点的观测数据值差异较大时，应加密测点。

3.0.10 外业采集观测系统应符合下列规定：

1 孔间层析成像可采用双边或多边观测系统；

2 当采用双边观测系统时，成像剖面宜垂直于地层或地质构造的走向；

3 在同一测区进行多组孔间层析成像观测时，观测系统宜保持一致；

4 激发和接收点距应根据地质条件、成像区域大小、成像单元大小、探测目标体规模、探测精度要求和特点确定；

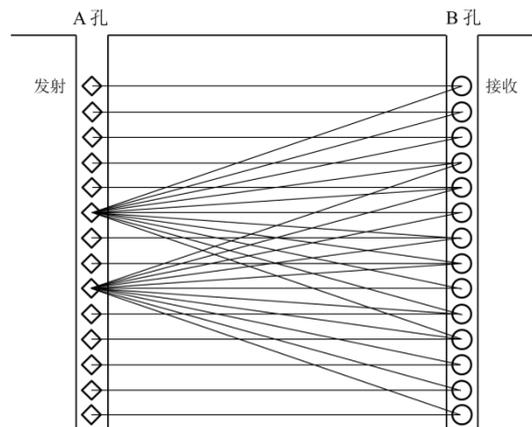
5 当发射点距大于接收点距时，宜采用两孔互换观测系统。

条文说明：

3.0.10

1 观测系统布置对钻孔层析成像效果起着至关重要的作用。所谓双边观测系统是指一发一收的孔—孔观测，而多边观测系统通常是指一发多收的孔—孔观测。实际工作中，使用双边观测系统的情况更为普遍。

孔—孔观测方式是在一个钻孔中发射，在另一个钻孔中接收（如图 3-1）。



3-1 孔—孔观测系统

2 层析成像剖面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地质异常的分辨率。

3 在同一测线采用一致的观测系统，是指采用相同的激发和接收点距，这样可以保证多组观测的分辨率相同，利于成像剖面拼接处成果图的一致性。

4 激发和接收点距决定了成像区域的射线密度，点距确定的原则是保证射线条数应大于反演剖分的单元格总数，从而保证反演矩阵超定，保证反演效果。

5 两孔互换观测系统是指发射孔和接收孔进行互换采集，采用两孔互换观测系统的目的是为了射线分布均匀，有助于提升反演精度。

3.0.11 外业工作记录应符合下列规定：

1 外业工作记录应完整、清晰、详细，包含工程名称、数据采集单位、孔号及坐标、仪器名称及型号、仪器主要工作参数、观测系统布置、重测数据记录、仪器操作人、班报记录人签字及影响

采集数据的干扰因素等；

- 2 在同一测区使用多台设备工作时，工作记录中应包含设备一致性测定记录。

3.0.12 外业工作质量检查应符合下列规定：

- 1 质量检查工作量不应少于工点总工作量的 5%；
- 2 检查点应在测区均匀分布，异常与可疑地段应有检查点；
- 3 检查观测应在正常观测结束后进行；
- 4 检查观测应采用和正常观测相同的设备型号、观测系统和采集参数；
- 5 检查观测误差应按照本标准附录 A 中 A.0.2 公式计算；
- 6 工点检查误差不应大于 5%，当检查误差不符合规定时应增加质量检查工作量，当增加到工作总量的 20%仍不符合规定时，整个工点数据应全部重测。

3.0.13 数据处理工作应符合下列规定：

- 1 应遵循内外业同步进行、内业指导外业的原则，数据处理过程中发现原始观测数据存疑时，应及时查明原因并做必要的外业补充工作；
- 2 对于相互连接的成像剖面，应采用相同的反演方法、模型和参数或将多剖面数据合并反演；
- 3 反演后，宜通过插值的方式对数据进行加密。

条文说明：

3.0.13

1 “内外业同步进行”原则，是指内业数据处理与分析宜在当天外业数据采集后同步开展；“内业指导外业”原则，是指通过对已获取数据的处理和分析，为外业工作提供指导和决策。内外业同步进行、内业指导外业的原则可第一时间发现外业数据质量缺陷，从而采取必要的措施及时补救，避免采集到更多的异常数据导致大面积返工。

2 针对相互连接的成像剖面，为避免剖面连接处成像结果的错位，应优先采用相互连接的多个剖面数据合并反演的方式。因特殊原因无法合并反演时，对单个剖面数据应采用相同的反演方法、模型和参数。

3 对反演结果进行插值计算时，宜采用克里金、反距离加权或最邻近点等插值法。针对钻孔地震波层析成像和钻孔声波层析成像法，应插值计算各插值点波速值；针对钻孔电磁波层析成像法，应插值计算各插值点吸收系数值；针对钻孔直流电层析成像法，应插值计算各插值点视电阻率值。

3.0.14 成果解译工作应符合下列规定：

- 1 地质解译应在充分分析既有地质、勘察、设计、施工资料和物探成果资料基础上，按“从已知到未知、从定性到定量”的原则确定；
- 2 针对岩溶勘察，成果解译应先划分覆盖层界线，在覆盖层以下再进行岩溶解译。

条文说明：钻孔层析成像方法用于勘察时，成像成果资料应结合既有地质、勘察资料进行解译；用于检测时，成像成果资料应结合既有设计、施工资料进行解译。“从已知到未知”原则，是指通过已知段地质信息与成像成果资料进行对比，找出异常区的成像特征，进而推测未知段的异常。“从定性到定量”原则，是指先对成像区进行宏观的异常存在性判断，进而推测异常区位置、形态、介质特性等信息。

3.0.15 成果资料应包括成果图、表和成果报告。

3.0.16 成果图、表应符合下列规定：

- 1 成果图件应包括工作布置图、成像结果图、成果解译图，宜包括成果平面图；
- 2 成果平面图可与工作布置图合并绘制，内容应包括地形和主要地物、钻孔孔位、测线测网、地质界线、异常平面投影等；
- 3 成像结果图可采用等值线、灰度、色谱等图示方法，图像可按等差分级或变差分级；
- 4 同一测线的多个连续成像剖面宜拼接成一幅结果图；
- 5 应结合成像结果图和既有地质、勘察、设计、施工资料进行地质解译并绘制成果解译图；
- 6 成像结果图与成果解译图宜绘制在同一张图上，便于对照分析；
- 7 成果解译图应有比例尺、高程、孔号、剖面桩号和解译结果等；
- 8 图件比例应满足工程需要，比例尺范围宜为 1:5000~1:200；
- 9 应根据实际需要编制成果表，成果表应包含异常编号、异常体水平范围和高程范围、异常体属性特征等基本信息。

3.0.17 成果报告应包括下列内容：

- 1 项目概况；
- 2 遵循的规范与标准；
- 3 地形、地质及地球物理特征；
- 4 物探方法与技术；
- 5 数据采集及质量评价；
- 6 数据处理与解译；
- 7 结论与建议。

条文说明：

3.0.17

- 1 项目概况宜包括任务来源、工程概况、工作内容、工作时间、以往工作情况、工作量完成情况等。
- 2 应结合项目概况确定遵循的规范与标准。
- 3 地形、地质及地球物理特征宜包括地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质、岩土体和被探测目标体的物性特征和钻孔孔位布置等。
- 4 物探方法与技术应包含所选用的成像方法及原理、仪器设备及工作参数等。
- 5 数据采集及质量评价应包括现场试验情况、检查点误差计算及数据质量评价。
- 6 数据处理与解译宜包括数据处理流程、反演成像结果、剖面解译结果及解译成果表等。
- 7 结论宜包括成果分析、任务解决的程度、成果验证对比情况及本次物探工作尚存在的问题等，宜包括需要补充开展的其他物探工作及验证工作等。

4 钻孔地震波层析成像

4.1 一般规定

4.1.1 钻孔地震波层析成像法可用于探查岩层分界线、岩溶、采空区、破碎带等不良地质体的空间位置和形态。

4.1.2 钻孔地震波层析成像法工作条件除应符合本标准第 3.0.1 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1 被探测目标体与周边介质存在一定地震波速度差异；
- 2 周边环境不应存在足以影响观测数据的震动噪声干扰；
- 3 孔内有井液；
- 4 当采用套管护壁时，应用细砂或黏土填实套管与地层之间的缝隙。

4.2 仪器设备

4.2.1 主机宜选用多道浅层数字地震仪，相关参数应符合下列规定：

- 1 通道数不应少于 12 道；
- 2 采样频率可选，最大采样频率不应小于 2000Hz；
- 3 采样时长可选，最小采样时长不应小于 200ms；
- 4 模数转换精度不应低于 24bit；
- 5 通频带范围不应小于 1Hz~2000Hz；
- 6 放大器内部噪声不应大于 $1\mu\text{V}$ ；
- 7 动态范围不应小于 120dB；
- 8 应具有信号增强、延时、内外触发、前置放大、滤波等功能。

4.2.2 震源宜采用炸药爆破、电火花激化、可控机械震动震源等

4.2.3 当采用炸药爆破震源时，相关参数应符合下列规定：

- 1 雷管延迟时间小于或等于 1ms；
- 2 炸药爆速在 4000m/s~6000m/s；
- 3 炸药包中的雷管安置在药包的顶端，采用正向起爆。

4.2.4 当采用电火花激化震源时，相关参数应符合下列规定：

- 1 充电电压不宜小于 1000V；
- 2 最大输出功率不宜小于 1000J；
- 3 充电时间不宜大于 4s。

4.2.5 当采用可控机械震动震源时，相关参数应符合下列规定：

- 1 可控机械震源启动信号、无线参考信号零时校准，两信号的相位误差不大于 100us；
- 2 编码器每发出 100 次启动指令，可控机械震源启动扫描信号的次数不低于 99 次；
- 3 可控机械震源信号启动平均延迟时间误差不大于 200us。

4.2.6 检波器宜采用多道水听器，相关参数应符合下列规定：

- 1 检波器及线缆应具有良好的防水性能，密封性能大于 2MPa；

- 2 检波器响应带宽应大于 10Hz~2000Hz;
- 3 各道之间固有频率允许偏差应小于±10%，灵敏度允许偏差应小于±10%，相位允许偏差应小于±1ms;
- 4 绝缘电阻应大于 10MΩ。

4.3 现场采集

- 4.3.1 钻孔内水位低于探测孔段时，应向钻孔内注水以达到探测要求；钻孔漏水严重无法贮水时，宜采取分段封堵措施逐段采集。
- 4.3.2 震源应根据孔间距离、地质条件等合理选择，数据采集时宜自下而上激发。
- 4.3.3 应选择围岩完整性好的孔作为激发孔，宜选择浅孔作为激发孔。
- 4.3.4 检波器道间距应根据钻孔深度、岩性特征确定，且不应大于 2m。
- 4.3.5 可采用定激发点采集或定接收点采集，激发点距宜与检波器道间距一致。
- 4.3.6 仪器增益应根据背景噪声确定，各道增益应保持一致。
- 4.3.7 采样频率不宜小于 2000Hz，采样时长应根据钻孔间距和地层岩性确定，首波宜位于记录长度 1/3~2/3 区间。受采样点数制约，当采样时长与采样频率发生矛盾时，可配合使用延时功能。
- 4.3.8 地震仪触发应根据实际条件，合理选择内、外触发方式，合理设置触发灵敏度参数，做到不随意产生触发，也要避免有信号不触发情况发生。
- 4.3.9 检波器串移动时，应有不少于一个点的重复接收。

条文说明：

4.3.2 采集工作开始前，选择合适的震源对提高数据质量起到至关重要的作用，震源选择一般应遵循以下原则：

1) 震源应具有足够的能量，保证地震波能够穿透目标体并被检波器接收。孔间距离越大，孔周介质中地震波传播速度越低，所需要的震源能量越大，宜优先选用炸药爆破震源。

2) 震源所产生的地震波频率应与目标体的规模相匹配。对于较大规模的目标体，较低频率的震源穿透效果更好；而对于较小规模的目标体，较高频率的震源分辨率更好。

3) 震源重复性好，应保证每次激发所产生的地震波特征相似，保证数据的一致性和可靠性。

4.4 数据处理与解译

4.4.1 数据处理除应符合本标准第 3.0.13 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1 应建立坐标系，将每条射线的激发点与接收点转换为成像剖面的二维坐标，形成数据文件；
- 2 深孔或斜孔中采集的数据应在反演前根据井斜资料校正激发、接收点坐标；
- 3 应根据观测系统和成像分辨率要求确定单元格大小；
- 4 正演时宜采用弯曲射线追踪，如走时差值法、波前构建法等；
- 5 反演前应对拾取的走时数据畸变点进行剔除或圆滑处理；
- 6 反演时可测井资料或原位测试资料作为边界条件加入计算中；
- 7 反演算法宜选择代数重建（ART）、奇异值分解（SVD）、联合迭代（SIRT）、最小二乘共轭

梯度 (LSCG)、最小二乘 QR 分解 (LSQR) 和以上方法改进的其他方法等;

8 反演迭代终止条件宜根据射线路径、图像形态的稳定程度和相邻两次迭代计算的初至时间方差确定。

条文说明:

4.4.1 地震波层析成像数据处理过程可表述为根据地质资料假定初始速度模型,进行射线追踪,计算出地震波理论走时,计算观测值与正演值走时残差,修改速度模型,重复上述过程,直到获得满意的结果。常规处理步骤为:原始数据导入、坐标系建立、初至时间读取、畸变数据剔除或圆滑、初始模型建立、正演计算、反演成像。

3 在确定单元格大小过程中,除满足观测系统和成像分辨率要求外,还应保证单元格射线密度(单元格内射线条数),如所有单元格(或主要单元格)内的射线条数不低于 5 条,这样才能得到可靠的反演结果。

4 正演计算首先把初始模型离散化,然后计算震源到每个网格节点的走时,选取到接收点具有最小走时的路径作为地震波射线路径,求出所有震源和接收点对的最小走时和射线路径后,完成射线追踪。目前应用较多的射线追踪方法主要有走时差值法和波前构建法。

走时差值法尤其适用于信噪比较低的远震波形资料。利用互相关方法计算波形间的偏移时间时,引入波形相位信息,通过有限差分方法求取程函方程的数值解来获取地震波走时,从而提高了时间计算的准确性。

波前构建法利用运动学基本理论和数值计算方法来模拟地震波在介质中的传播过程。将区域边界作为初始波前,并根据一定规则向区域内部推进,同时进行网格生成。这种边界推进的策略使得波前构建法在处理复杂几何形状时具有较高的灵活性。

5 反演前对走时数据畸变点进行剔除或圆滑是十分重要的一步,如果不进行此步处理,会严重影响反演的数据拟合过程,导致出现较大的反演结果偏差,甚至无法得到满足残差要求的结果。

6 将钻孔物性参数、测井资料作为边界条件,加入相应的反演计算中,可克服边界误差。钻孔声波测井和全景数字成像成果可作为解译的基础资料。

7 地震波层析成像反演属于不适定问题,不同反演方法有各自优势,对初始模型的依赖程度也不同。反演前,合理选择反演方法和设置初始模型,可有效改善参数反问题的不适定性,利于获得接近实际的解。

代数重建技术 (ART) 算法在每轮迭代过程中,将每一条射线的走时误差分配给射线经过的所有成像单元,也称逐线重建法。ART 计算速度较快,能够更容易地将先验知识整合到重建过程中,有助于提高重建图像的准确性。但是,ART 法收敛性能较差,并且依赖于初值选择,通常需要较多的迭代次数,否则解的误差较大。

奇异值分解法 (SVD) 能够将数据矩阵分解为一系列的奇异值和对应的奇异向量,通过保留较大的奇异值而舍弃较小的奇异值,通常可以有效去除数据中的噪声成分。SVD 法不仅具有较好的稳定性,也可应用于任何形状的矩阵,可以处理不同大小的数据集。但是,在使用 SVD 法进行数据降维时,如果保留的奇异值过多,可能会导致模型过于复杂,如果保留的奇异值过少,可能会丢失有用信息。

联合迭代重建技术（SIRT）在每轮迭代过程中，利用所有射线走时误差依次对每一个单元进行修正，也称逐点重建法。SIRT 法能有效地消除采集数据过程中噪声干扰，收敛性能好，能够在数据不完整的有限观测角的情况下进行图像重建。但是，SIRT 法需要占用更多的内存用于计算，计算效率相对较低，不利于处理复杂的地质结构问题。

最小二乘共轭梯度法（LSCG）在每次迭代中，算法会沿着一个搜索方向找到一个最小化目标函数的点，是一种高效的迭代优化方法。其优点是所需存储量小，避免了复杂的矩阵运算，迭代稳定性高，而且不需要任何外来参数。但是，LSCG 法性能受到问题条件数的影响，如果问题的条件数较大，算法的效率会受到影响。

最小二乘 QR 分解法 (LSQR) 是一种将矩阵分解为一个正交矩阵 Q 和一个上三角矩阵 R 的方法，是一种有效求解线性方程组的方法。其优点是在处理超定系统时（方程数多于未知数）的一种有效方法。但是，对于病态矩阵，QR 分解法可能导致大量误差累积，影响结果的准确性。

8 反演迭代终止条件一般设置为相邻两次迭代计算的方差达到设定值或迭代次数达到最大迭代次数设定值。此时，射线路径和反演成果图像形态应基本稳定，否则，应查明原因后重新反演计算。

4.4.2 成果解译除应符合本标准第 3.0.14 条、第 3.0.16 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1** 用于探测时，应根据成像结果图中波速分布规律，结合既有地质、勘察资料解译；
- 2** 用于检测时，应根据成像结果图中波速分布规律，结合既有设计、施工资料解译。

条文说明：

4.4.2 一般情况下，介质越致密完整，其波速越高，介质越疏松破碎，其波速越低。由于层析成像结果存在多解性，用于探测时，波速异常体应结合既有地质、勘察资料解译；用于检测时，波速异常体应结合既有设计、施工资料解译。

5 钻孔声波层析成像

5.1 一般规定

5.1.1 钻孔声波层析成像法可用于探查混凝土大坝坝基、混凝土桩基桩身缺陷等。

5.1.2 钻孔声波层析成像法工作条件除应符合本标准第 3.0.1 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1 被探测目标体与周边介质存在一定声波速度差异；
- 2 周边环境不应存在影响观测数据的震动噪声干扰；
- 3 孔内有井液；
- 4 钻孔间距宜小于 10m。

5.2 仪器设备

5.2.1 主机宜选用非金属声波仪，相关参数应符合下列规定：

- 1 信号触发方式应有连发、单发、信号、稳态、单次外和连续外 6 种触发方式；
- 2 采样频率可选，最大采样频率不应小于 200kHz；
- 3 采样时长可选，最小采样时长不应小于 20ms；
- 4 发射电压可调，最大发射电压不应小于 1000V；
- 5 模数转换精度不应低于 24bit；
- 6 通频带范围不应小于 100Hz~200kHz。

5.2.2 声波震源宜采用电火花、压电超声、超磁致震源等。

5.2.3 当采用电火花震源时，相关参数应符合下列规定：

- 1 充电电压不宜小于 1000V；
- 2 最大输出功率不宜小于 1000J；
- 3 充电时间不宜大于 4s。

5.2.4 当采用压电超声震源时，相关参数应符合下列规定：

- 1 发射脉冲电压可调范围不小于 200V~1000V；
- 2 发射脉冲频率可调范围不小于 10kHz~200kHz；
- 3 发射脉冲宽度可调范围不小于 1 μ s~100 μ s。

5.2.5 当采用超磁致震源时，相关参数应符合下列规定：

- 1 发射脉冲电压可调范围不小于 200V~1000V；
- 2 发射脉冲频率可调范围不小于 100Hz~10kHz；
- 3 发射脉冲宽度可调范围不小于 5 μ s~5ms。

5.2.6 声波接收宜采用超声换能器，相关参数应符合下列规定：

- 1 超声换能器频带宽度不宜小于 100Hz~200kHz；
- 2 超声换能器灵敏度不宜小于 1000 μ V/Pa；
- 3 超声换能器应具有良好的防水性能，密封性能不小于 2MPa。

5.3 现场采集

5.3.1 钻孔内水位低于探测孔段时，应向钻孔内注水以达到探测要求；钻孔漏水严重无法贮水时，宜采取分段封堵措施逐段采集。

5.3.2 正式工作前，应对仪器设备进行零声时检查。

5.3.3 深度控制编码器精度不应低于 $\pm 0.5\%$ 。

5.3.4 激发和接收点距宜相同，进行缺陷检测时，点距不宜大于 0.5m。

5.3.5 当收发距离较远或信号衰减较快时，宜选择高电压激发。

5.3.6 应在目标体预埋声测管或在目标体周围钻孔埋设声测管。声测管应选用直径比换能器直径大 10mm~20mm 的金属管或硬质塑料管。用于混凝土桩基桩身缺陷检测时，声测管数量应根据桩径大小确定，桩径为 0.6m~1.0m 时宜埋二根管；桩径为 1.0m~2.5m 时宜埋三根管，按等边三角形布置；桩径为 2.5m 以上时宜埋四根管，按正方形布置。

5.4 数据处理与解译

5.4.1 数据处理应符合本标准第 3.0.13 条和第 4.4.1 条的规定。

5.4.2 成果解译应符合本标准第 3.0.14 条和第 4.4.2 条的规定。

6 钻孔电磁波层析成像

6.1 一般规定

6.1.1 钻孔电磁波层析成像法可用于探查岩层分界线、岩溶、采空区、破碎带等不良地质体空间位置和形态等。

6.1.2 钻孔电磁波层析成像法工作条件除应符合本标准第 3.0.1 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1 被探测目标体与周边介质存在一定电性差异；
- 2 周边环境不应存在影响观测数据的电磁干扰；
- 3 钻孔内不应有金属套管或其他金属介质。

6.2 仪器设备

6.2.1 主机宜选用电磁波仪，相关参数应符合下列规定：

- 1 工作频率范围应大于 0.5MHz~32MHz，扫频间隔不大于 0.1MHz，频率稳定；
- 2 测量分辨率不应低于 0.1dB；
- 3 发射机输出脉冲功率不应小于 10W；
- 4 接收机输入端噪声电平宜小于 0.2 μ V；
- 5 接收机测量范围不应小于 -140dB~-20dB，线性测量范围应大于 100dB，测量误差应小于 \pm 3dB。

6.2.2 发射天线和接收天线，相关参数应符合下列规定：

- 1 发射天线宜为半波偶极子天线，接收天线宜为半波偶极子天线或鞭状天线；
- 2 应配备覆盖 1MHz~32MHz 频率范围的系列天线；
- 3 发射与接收天线应具有良好的绝缘和防水性能，防水性能应大于 2MPa；

6.3 现场采集

6.3.1 外业观测一般采用定发扇形扫描观测方式，在扇形扫描观测前，宜进行水平同步或斜同步观测。

6.3.2 仪器工作频率应由现场试验确定，宜选取不少于两个工作频率进行观测。

6.3.3 天线选择应与工作频率相匹配，天线下端应悬挂重锤。

6.3.4 发射探头宜布置在围岩完整性好的孔中。

6.3.5 发射、接收点距不宜大于最小目标体尺寸的 1/2。

6.3.6 收发射线水平角范围宜小于 $\pm 45^\circ$ 。

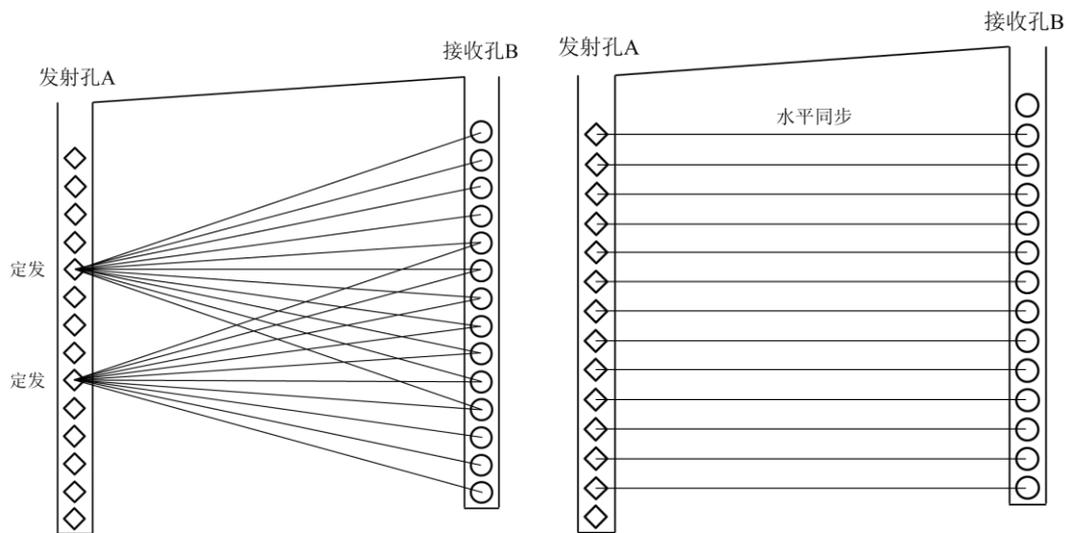
6.3.7 数据采集应待天线稳定后进行。

6.3.8 相互连接的成像剖面宜采用相同的工作频率进行观测。

条文说明：

6.3.1 定发扇形扫描观测方式是，将发射天线放置在一个钻孔中保持固定位置，接收天线在另一个钻孔中沿固定间隔向下移动采集。然后将发射天线移动一个发射点距，接收天线在另一个钻孔中沿固定间隔向上移动采集。如此重复观测，最终获得几百至几千次扫描射线对数据，如图 6-1 所示。

水平同步或斜同步观测是，发射和接收天线在两个钻孔中同步移动采集，采集过程中保持两组天线相对位置固定，如图 6-2 和图 6-3 所示。同步观测数据可以作为初始模型建立的依据。在某些情况下，水平同步或斜同步观测有助于增加探测深度，使得深层结构的特征也能被有效捕捉。



6-1 定发扇形扫描观测示意图

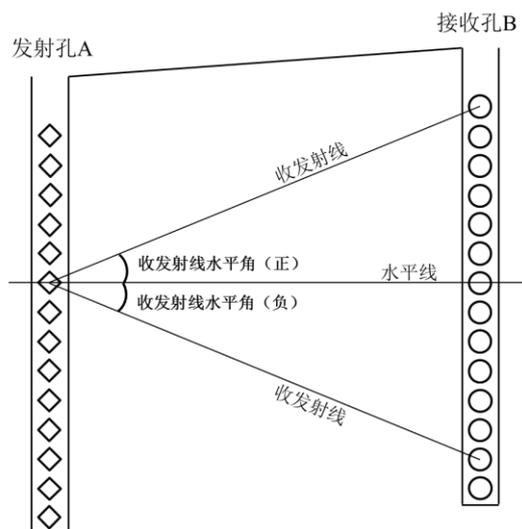
6-2 水平同步观测示意图



6-3 斜同步观测示意图

6.3.2 在同一介质中，电磁波吸收系数随着工作频率的增高而变大，透射距离随之变小。因此，大孔距或介质吸收系数较高时，应选用较低的工作频率；探测目标体规模较小时，应选用较高的工作频率。工作频率选择的基本原则是在有效穿透的前提下确保最高分辨率，宜根据现场水平同步观测试验确定。

6.3.6 收发射线水平角是指收发射线与水平线之间的夹角，夹角在水平线以上为正，夹角在水平线以下为负，如图 6-4 所示。



6-4 收发射线水平角示意图

6.4 数据处理与解译

6.4.1 数据处理应符合本标准第 3.0.13 条和第 4.4.1 条的规定。

6.4.2 成果解译除应符合本标准第 3.0.14 条、第 3.0.16 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1 用于探测时，应根据成像结果图中吸收系数分布规律，结合既有地质、勘察资料解译；
- 2 用于检测时，应根据成像结果图中吸收系数分布规律，结合既有设计、施工资料解译。

条文说明：

6.4.2 一般情况下，介质越致密完整，其吸收系数越低，介质越疏松破碎，其吸收系数越高。由于层析成像结果存在多解性，用于探测时，吸收系数异常体应结合既有地质、勘察资料解译；用于检测时，吸收系数异常体应结合既有设计、施工资料解译。

7 钻孔直流电层析成像

7.1 一般规定

7.1.1 钻孔直流电层析成像法可用于探查岩溶、采空区、破碎带、导水通道等不良地质体空间位置和形态，也可用于探查盾构隧道孤石、水库坍岸、堤坝渗漏等重大安全隐患。

7.1.2 钻孔直流电层析成像法工作条件除应符合本标准第 3.0.1 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1 被探测目标体与周边介质存在一定电阻率差异；
- 2 周边环境不应存在影响观测数据的游散电流和电磁干扰；
- 3 孔内有井液；
- 4 钻孔内不应有金属套管或其他金属介质。

7.2 仪器设备

7.2.1 主机宜选用直流电法仪，相关参数应符合下列规定：

- 1 测量通道数不应小于 4 道；
- 2 电压测量精度不应低于 $\pm 0.2\%$ ，分辨率不应大于 1 μV ；
- 3 电流测量精度不应低于 $\pm 0.2\%$ ，分辨率不应大于 1 μA ；
- 4 输入阻抗不应小于 20M Ω ；
- 5 电极插口与设备外壳间的绝缘电阻不应小于 500M Ω /1000V ；
- 6 最大供电电压不应小于 1000V，最大供电电流不应小于 5A；
- 7 50HZ 工频干扰压制不应小于 100dB；
- 8 极化最大补偿范围不应小于 $\pm 10\text{V}$ ；
- 9 设备宜具有现场编码跑极功能。

7.2.2 电缆可选用集中式或分布式电缆，相关参数应符合下列规定：

- 1 采用分布式电缆时，电缆接头应具备防水功能，防水性能应大于 2MPa；
- 2 应根据需要配备所需电极间距的电缆；
- 3 电缆任意两根芯线间的绝缘电阻不应小于 500M Ω /1000V 。
- 4 电极通道数应大于 60 道。

7.3 现场采集

7.3.1 二维直流电层析成像观测模式可采用四极观测模式、三极观测模式或二极观测模式等。

7.3.2 宜通过现场试验确定最佳观测模式、电极间距等参数。

7.3.3 钻孔不宜采取护壁措施，若孔壁完整性差，可使用开孔 PVC 花管护壁。

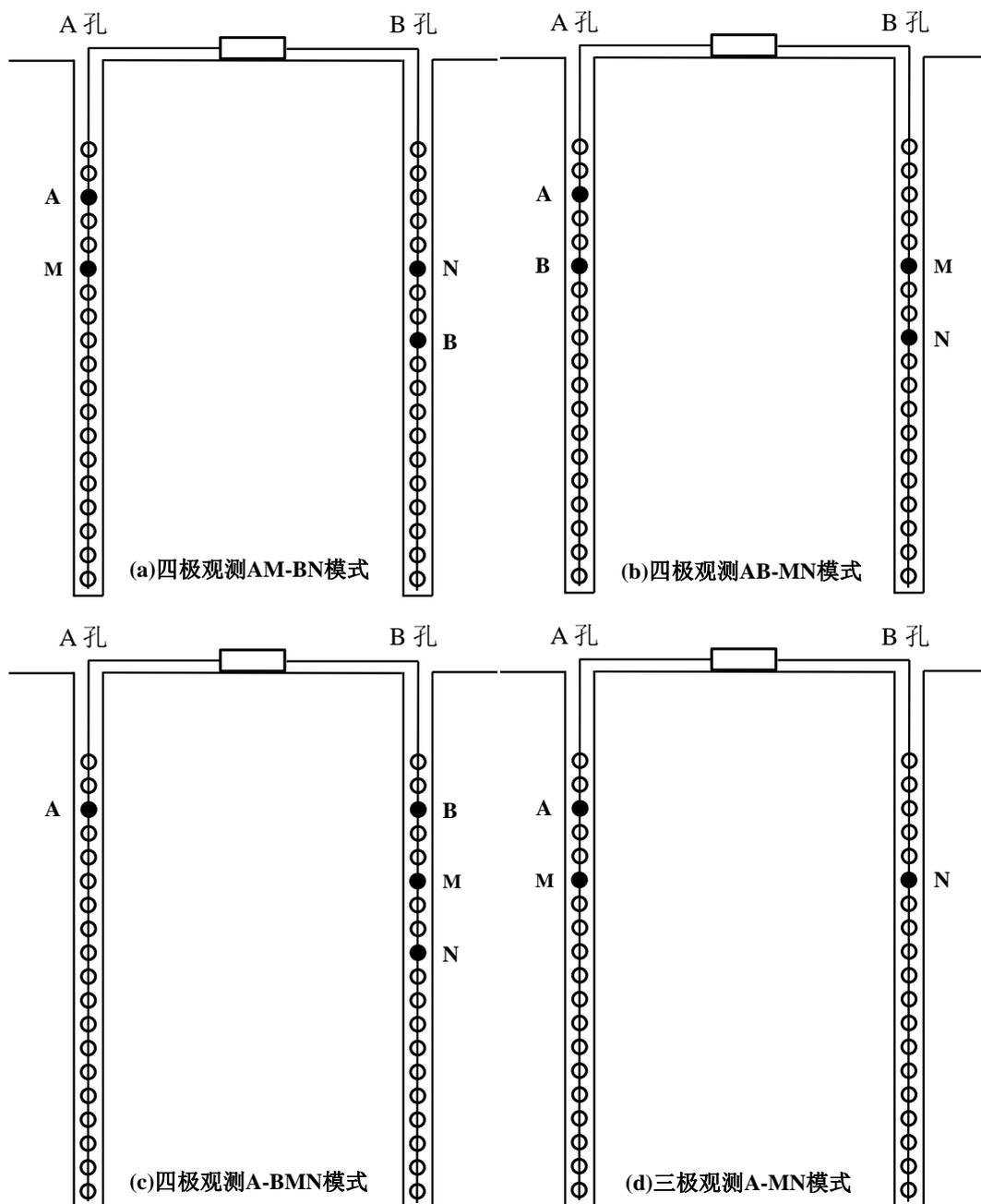
7.3.4 无穷远电极应有良好的接地条件，宜相向布置。当无穷远极位于剖面的中垂线时，距观测剖面的距离应大于孔间距的 5 倍。当无穷远极位于剖面的延长线时，距钻孔的距离应大于孔间距的 20 倍。

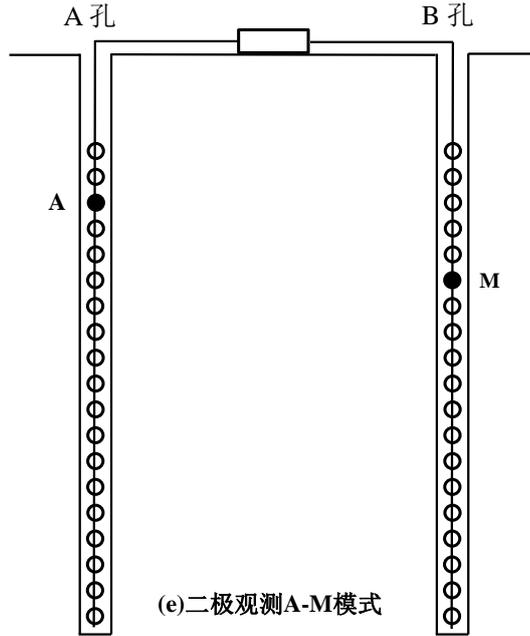
7.3.5 宜采用预编码自动测量方式，单个测点供电时间应大于 1s。

7.3.6 自动测量时，应实时监测现场数据，当观测数据异常时，应查明原因后重复观测。

条文说明：

7.3.1 不同成像观测模式使用的电极数不同，采集的数据量不同，在空间中产生不同的电场分布。常用的观测模式有：AM-BN 四极阵列、AB-MN 四极阵列、A-BMN 四极阵列、A-MN 三极阵列、A-M 二极阵列。AM-BN 四极阵列为供电—测量电极对分别位于不同的孔中；AB-MN 四极阵列为供电电极对和测量电极对分别位于不同的孔中；A-BMN 四极阵列为第一供电电极位于其中一个孔中，第二供电电极和测量电极对位于另一个孔中；AM-N 三级阵列供电电极 B 位于无穷远；A-M 二级阵列供电电极 B 和测量电极 N 位于无穷远。各观测模式如图 7-1 所示。





7-1 钻孔直流电层析成像观测模式示意图

7.3.2 试验时，采用不同极距对相同钻孔进行重复观测，选择最佳极距和电极数。在保证观测精度的前提下，选择大极距可有效提高观测效率，但极距一般不应大于 2 米。在极距和电极数确定以后，同一断面采用多种观测模式进行对比观测。

7.4 数据处理与解译

7.4.1 数据处理除应符合本标准第 3.0.13 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1 应建立坐标系，将供电电极和测量电极位置转换为成像剖面的二维坐标，形成数据文件；
- 2 深孔或斜孔中采集的数据应在反演前根据井斜资料校正电极点坐标；
- 3 根据观测系统和成像分辨率要求确定单元格大小，单元格尺寸应大于测点间距，单元格总数宜小于观测数据个数；
- 4 正演计算应根据实际情况选择有限差分法、有限单元法、边界单元法等；
- 5 反演前应对数据畸变点进行剔除或圆滑处理；
- 6 反演时可将测井资料或原位测试资料作为边界条件加入计算中；
- 7 反演宜选择最小二乘法、贝叶斯法、深度神经网络以及以上方法改进的其他方法等；
- 8 反演迭代终止条件宜根据电流场路径、图像形态的稳定程度，相邻两次迭代计算的电阻率方差确定。

条文说明：

7.4.1 直流电层析成像数据处理过程可表述为根据地质资料假定初始电阻率模型，正演计算接收点处的视电阻率值，计算观测值与正演值视电阻率残差，修改电阻率模型，重复上述过程，直到获得满意的结果。常规处理步骤为：原始数据导入、坐标系建立、数据文件形成、畸变数据剔除或圆滑、初始模型建立、正演计算、反演成像。

- 4 有限差分法的基本原理是将微分方程中的微分项用差分来近似，从而将微分方程转化为一组

代数方程，这组方程可以通过迭代或直接求解的方法来得到数值解。这种方法的关键在于如何选择合适的差分格式来近似微分。

有限单元法的基础是变分原理和加权余量法。这种方法的基本原理是将计算域划分为有限的、互不重叠的单元，然后在每个单元内选择合适的节点作为函数值的插值点。通过这种方式，可以将微分方程中的连续变量离散化为节点值，并通过插值函数表达为线性表达式。

边界单元法的基本原理是将描述物理问题的偏微分方程转化为边界上的积分方程，该方法仅在定义域的边界上进行单元划分，将积分方程转化为线性方程组进行求解。方法优势在于减少了问题的维度，减少计算量和数据处理的复杂性。

7 最小二乘法通过寻找参数的最优值，使得预测值与实际观测值之间的误差平方和达到最小。在实际应用中，最小二乘法通常涉及到矩阵的运算，特别是矩阵的逆运算。如果设计矩阵是可逆的，可以直接计算出最优解。但如果矩阵不可逆或者病态，就需要采用其他方法。最小二乘法也存在一些局限性，其一，当样本特征数量非常大时，计算矩阵的逆矩阵会非常耗时甚至不可行；其二，对异常值非常敏感，因此数据中的离群点会极大地影响最终的拟合结果。

贝叶斯法基于贝叶斯定理，在给定观测数据的情况下，通过对模型参数的先验分布和似然函数进行建模，来推断模型参数的后验概率分布。其优势在于通过直接操作先验概率分布和似然函数来引入关于问题的额外信息或者专业知识，提高了解的精确度和可靠性，其后验概率分布可评估反演结果的不确定性。贝叶斯法也存在一些局限性，其一，方法对先验概率和数据的依赖性较强，训练数据中的噪声可能产生不准确的结果；其二，方法通常需要大量的计算资源，当模型较复杂时，可能需要较长时间才能收敛到稳定的解。

神经网络是一种数据驱动的方法，它能够从大量的训练数据中学习到数据的本质特征，这使得它在处理实际观测数据时更加有效。其优势在于其能够用较少的参数表示复杂的函数，尤其适合处理大规模和复杂的数据集，提供比传统方法更高分辨率和精度的结果。神经网络也存在一些局限性，其一，方法性能在很大程度上依赖于训练数据的质量，方法鲁棒性稍差；其二，计算需要多次迭代才能达到收敛，尤其是在处理大规模数据集时，这可能导致训练过程耗时较长。

7.4.2 成果解译除应符合本标准第 3.0.14 条、第 3.0.16 条的规定外，还应符合下列规定：

- 1 用于探测时，应根据成像结果图中电阻率分布规律，结合既有地质、勘察资料解译；
- 2 用于检测时，应根据成像结果图中电阻率分布规律，结合既有设计、施工资料解译。

条文说明：

7.4.2 一般情况下，介质越致密完整，其电阻率越高，介质越疏松破碎，其电阻率越低。由于层析成像结果存在多解性，用于探测时，电阻率异常体应结合既有地质、勘察资料解译；用于检测时，电阻率异常体应结合既有设计、施工资料解译。

附录 A 误差计算

A.0.1 多次观测相对误差应按下列式计算:

$$\delta_i = \pm \left| \frac{d_i - \bar{d}}{\bar{d}} \right| \times 100\% \quad (\text{A.0.1})$$

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i$$

式中 δ_i ——第 i 次观测的相对误差(%)($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

\bar{d} ——观测平均值;

d_i ——第 i 次观测值;

n ——观测次数($n > 1$)。

A.0.2 均方相对误差应按下列式计算:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \delta_j^2}{m}} \times 100\% \quad (\text{A.0.2})$$

$$\bar{\delta}_j = \pm \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\delta_{ji}| \times 100\%$$

式中 ε ——均方相对误差(%);

$\bar{\delta}_j$ ——第 j 个测点 n 次观测的平均相对误差(%)($j = 1, 2, 3, \dots, m$);

δ_{ji} ——第 j 个测点第 i 次观测的相对误差(%)($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

n ——同一观测点观测次数($n > 1$);

m ——观测点个数($m > 1$)。

附录 B 电磁波场强计算

孔间探测
$$E = E_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} f(\theta) \sin(\theta)$$

孔地探测
$$E = E_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} f(\theta) \cos(\theta)$$

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta}$$

式中 E ——接收电磁波场强(V/m);

E_0 ——偶极子天线初始辐射场强(V/m);

β ——电磁波吸收系数(dB/m);

r ——收发距(m);

$f(\theta)$ ——方向系数, 简化时可取 $f(\theta) = \sin \theta$;

θ ——收发射线与天线的夹角($^\circ$)。

用词说明

为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

《浅层地震勘察技术规范》 DZ/T 0170-2020

《水利水电工程勘探规程 第 1 部分：物探》 SL/T 291.1-2021

《铁路工程物理勘探规范》 TB10013-2023

《城市工程地球物理探测标准》 CJJ/T7-2017

《水电工程层析成像技术规程》 NB/T 35112-2018

条文说明