

ICS 93.160

CCS P 59

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL/T 827—2024

水库大坝隐患探测技术规程

Code for hidden danger detection of dam

2024 - 08 - 01 发布

2024 - 11 - 01 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部

关于批准发布《建设项目水资源论证导则
第8部分：钢铁行业建设项目》等
5项水利行业标准的公告

2024年第16号

中华人民共和国水利部批准《建设项目水资源论证导则 第8部分：钢铁行业建设项目》（SL/T 525.8—2024）等5项为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	建设项目水资源论证导则 第8部分：钢铁行业建设项目	SL/T 525.8—2024		2024.8.1	2024.11.1
2	建设项目水资源论证导则 第9部分：纺织行业建设项目	SL/T 525.9—2024		2024.8.1	2024.11.1
3	建设项目水资源论证导则 第12部分：水源热泵建设项目	SL/T 525.12—2024		2024.8.1	2024.11.1
4	小型水电站技术管理规程	SL/T 529—2024	SL 529—2011	2024.8.1	2024.11.1
5	水库大坝隐患探测技术规程	SL/T 827—2024		2024.8.1	2024.11.1

水利部

2024年8月1日

前 言

根据水利技术标准制修订计划安排，按照 SL/T 1—2024《水利技术标准编写规程》的要求，编制本标准。

本标准共 7 章和 3 个附录，主要技术内容有：

- 基本规定；
- 渗流安全隐患探测；
- 结构安全隐患探测；
- 金属结构安全隐患探测；
- 成果报告；
- 附录和条文说明。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部运行管理司

本标准解释单位：水利部运行管理司

本标准主编单位：水利部 交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院

本标准参编单位：水利部大坝安全管理中心
长江勘测规划设计研究有限责任公司
中水东北勘测设计研究有限责任公司
山东大学

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：陈生水 李宏恩 高长胜 陆俊
刘岩 郭健玮 何勇军 卢建华
刘健 韩勃 周晓明 楚少义
江超 傅中志 李铮 吴允政
牛志国 徐思远 邓昌

本标准审查会议技术负责人：孙继昌

本标准体例格式审查人：陈 昊

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司（通信地址：北京市西城区白广路二条 2 号；邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn）。

目 次

1	总则	1
2	术语和定义	2
3	基本规定	3
3.1	工作准备	3
3.2	现场探测	4
3.3	资料整理与解译	5
4	渗流安全隐患探测	6
4.1	一般规定	6
4.2	土石坝	6
4.3	混凝土坝	9
4.4	其他坝型及建筑物	10
5	结构安全隐患探测	11
5.1	一般规定	11
5.2	土石坝	11
5.3	混凝土坝	12
5.4	其他坝型	13
5.5	溢洪道	14
5.6	水工隧洞和涵管	14
5.7	近坝岸坡	15
6	金属结构安全隐患探测	17
6.1	一般规定	17
6.2	钢闸门	17
6.3	启闭设备	18
6.4	压力钢管	18
6.5	拦污栅及清污设施	19
7	成果报告	20

附录 A 隐患探测方法与技术要求	21
A.1 电法	21
A.2 电磁法	24
A.3 地震探查法	29
A.4 层析成像法	37
A.5 水下探测方法	45
A.6 温度场法	49
A.7 渗流探测专用方法	50
A.8 声波探测方法	55
A.9 机器视觉测量法	56
A.10 车载隐患探测法	56
附录 B 探测钻孔封孔技术要求	58
附录 C 成果报告内容提纲	61
标准用词说明	63
条文说明	65

1 总 则

1.0.1 为规范水库大坝隐患探测工作的技术要求，保障隐患探测成果质量，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于水库大坝及其近坝岸坡的隐患探测。

1.0.3 隐患探测宜采用以地球物理探测方法为主的无损探测技术，对探测发现的隐患可选择坑探、钻探、测井等方法进行验证。

1.0.4 探测方法选择应遵循技术成熟、经济实用、安全环保原则，鼓励采用经实践验证可靠的新技术、新装备，提升探测工作的精准化、信息化、现代化水平。

1.0.5 本标准主要引用下列标准：

GB/T 21837 铁磁性钢丝绳电磁检测方法

GB 50027 供水水文地质勘察规范

SL 101 水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程

SL/T 291.1 水利水电工程勘探规程 第1部分：物探

SL/T 352 水工混凝土试验规程

SL/T 436 堤防隐患探测规程

SL 713 水工混凝土结构缺陷检测技术规程

NB/T 10349 压力钢管安全检测技术规程

JT/T 790 多波束测深系统测量技术要求

JT/T 1362 侧扫声呐测量技术要求

1.0.6 水库大坝隐患探测除应符合本标准规定外，还应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和定义

下列术语及其定义适用于本标准。

2.0.1 水库大坝隐患 hidden danger of dam

挡水、泄水、输水建筑物及金属结构、近坝岸坡等可能导致水库大坝出险或事故的各类渗流、结构、金属结构等不安全因素或缺陷。

2.0.2 渗流安全隐患 hidden danger of seepage

坝体、坝基、坝肩、溢洪道、穿坝建筑物等工程部位的异常渗流现象或缺陷。

2.0.3 结构安全隐患 hidden danger of structure

大坝、溢洪道、穿坝建筑物、水工隧洞等存在的裂缝、软弱夹层、滑坡、塌陷、脱空、空洞、不密实区、异常变形、动物巢穴、生物侵蚀等缺陷。

2.0.4 金属结构安全隐患 hidden danger of metal structure

影响钢闸门、启闭机、压力钢管等金属结构安全运行的质量缺陷、腐蚀、损伤及异常振动等隐患。

2.0.5 综合物探 integrated geophysical exploration

采用两种及以上探测技术方法进行联合探测，实现不同物探成果间的相互验证，提高探测成果质量。

2.0.6 时移探测 time-lapse geophysical exploration

对同一隐患部位开展多期或连续性探测，通过不同时点探测数据比对，识别隐患位置分布与发展变化趋势。

3 基本规定

3.1 工作准备

3.1.1 大坝隐患探测准备工作应包括资料收集与整理、隐患排查、大纲编制、仪器准备等。

3.1.2 资料收集与整理应根据大坝隐患探测工作需要确定，宜包括下列内容：

1 设计报告、审批文件、地质勘察等前期资料。

2 施工、检测、验收等建设期资料。

3 安全检查、安全鉴定、维修养护、除险加固资料，安全监测资料及整编分析报告，运行大事记等运行期资料。

3.1.3 编制探测工作大纲前应针对水库大坝可能存在的渗流、结构、金属结构安全问题开展隐患排查，并应符合下列规定：

1 宜通过书面调查、现场排查及走访座谈等方式开展排查。

2 书面调查应深入查阅工程设计、施工、运行、监测及安全鉴定等档案资料，重点排查历史上曾发生险情和监测数据异常的部位。

3 现场隐患排查应在书面调查基础上，重点排查坝顶、上下游坝面、坝脚及附近区域、泄洪设施、泄输水与穿坝建筑物、近坝岸坡、近坝水域、坝肩等部位。

4 应根据隐患排查成果提出现场探测工作的重点和建议。

3.1.4 探测工作大纲宜包括项目概况、存在的隐患及说明、探测方法及仪器设备、测区测线测点布置、进度安排、质量控制及成果要求、安全措施、人员配备等。

3.1.5 探测方法及仪器设备应根据地质条件、坝型特征、隐患类型等工程因素，并结合各类探测方法的适用范围与应用条件综合确定；宜在被测区域开展探测试验以对选定方法的探测精度、效率等进行验证；单一方法无法查明隐患时，应采用综合物探联

合探测。

3.1.6 隐患探测宜遵循有效性、适用性的原则，采用普查、详查或二者相结合的方式开展。

3.1.7 本标准涉及各类探测方法的技术要求应符合附录 A 的规定。

3.1.8 隐患探测工作结束后应对探测钻孔立即封孔，不应改变原坝体、坝基的渗流及稳定性态，并应符合附录 B 的有关技术要求。

3.1.9 隐患探测使用的仪器设备应经检定校准且在有效期内。

3.2 现场探测

3.2.1 现场探测工作应符合安全生产有关规定，落实现场安全措施，保证人员和设备安全。

3.2.2 现场探测前应检查仪器状况，填写现场记录表并经责任人签字确认。记录表内容应包括探测方法、隐患描述、探测位置、探测环境、仪器设备、库水位、天气、人员等。

3.2.3 探测测区、测线及测点布设应根据探测目的、探测方法、工程结构确定，并应符合下列规定：

1 测线、测点布置应根据大坝及其他被测建筑物尺寸、位置合理规划，测线布置应以排查的隐患区域为中心向两边延伸，探测范围应覆盖异常区域。

2 复杂隐患应扩大测区和加密测线、测点。

3 测线、测点应进行测量放样、定位，并确定测线、测点与大坝桩号、坝轴线和高程等相对位置关系。

3.2.4 探测过程中出现下列情况时，应及时分析原因并重复探测：

1 探测结果出现突变、畸变或与排查情况偏差较大。

2 探测环境发生较大改变。

3 复核发现测值记录不全或存在可疑等问题。

4 两次探测的平均相对误差大于等于 5%。

3.2.5 探测结束后，宜按下列规定开展检查探测，对现场探测结果进行复核：

- 1 检查探测工作量宜不少于该测区或测线总工作量的 5%。
- 2 检查探测点宜在测区范围内均匀分布，在异常地段、可疑点、突变点宜设加密检查点。

3.3 资料整理与解译

3.3.1 应遵循内外业同步、相互验证的原则，及时对探测资料整理、分析和解译。

3.3.2 探测成果解译和验证工作应结合相关地质勘察资料开展，常用物性参数可参照 SL/T 291.1 执行。

3.3.3 探测成果应与探测范围内地质条件、设计和施工资料、现场隐患排查结果，以及可能存在的干扰因素进行综合分析，明确提出隐患位置和性状。

3.3.4 采用多种方法开展综合探测时，不同方法的探测结果应对照解译。

3.3.5 探测结果数据处理、反演和成果图件绘制应使用专业软件，成果数据应采用国家法定计量单位。

4 渗流安全隐患探测

4.1 一般规定

4.1.1 渗流安全隐患探测应包括坝体、坝基渗漏的入渗区域、出逸区域和渗漏通道空间分布以及渗漏流量探测，绕坝渗漏探测还应包括渗漏水来源及其与库水连通情况等。

4.1.2 渗流安全隐患探测方法应根据坝型、坝高、防渗体型式、水文地质条件、库水位等综合确定。

4.2 土石坝

4.2.1 土石坝渗流安全隐患探测部位包括坝体、坝基、坝肩、心墙、面板等。

4.2.2 土石坝渗流安全隐患探测宜包括下列内容：

- 1 坝体、坝基入渗区域的位置、渗漏情况和范围等；
- 2 坝体、坝基出逸区域的位置、分布特征和渗漏流量等；
- 3 坝体、坝基渗漏通道及富水区域的位置、范围等；
- 4 心墙、面板等防渗体系渗漏的位置、分布特征等；
- 5 坝肩渗漏通道的空间分布、渗漏水来源及其与库水连通情况等。

4.2.3 坝体、坝基入渗区域的探测宜符合下列规定：

1 坝体、坝基渗漏入渗区域探测宜选用 A.7（I）同位素示踪法、A.7（II）拟流场法、A.7（III）磁电阻率法、人工潜水或潜水器探视法等。

2 防渗面板入渗区域探测宜选用 A.7（I）同位素示踪法、A.7（II）拟流场法、A.7（III）磁电阻率法、人工潜水或潜水器探视法等，宜选用 A.5 水下探测方法中声呐法、水下摄像等探查防渗面板破损的渗漏区域。

4.2.4 坝体、坝基出逸区域的探测宜符合下列规定：

- 1 渗漏出逸区域探测宜选用人工探视法、A.6 温度场法等。
- 2 可选用人工或无人机搭载红外热成像仪遥测大坝表面温度场，判断大坝的渗漏出逸区域。

4.2.5 坝体、坝基渗漏通道的探测应符合下列规定：

- 1 对于土质坝体渗漏通道探测，宜选用 A.2（Ⅱ）瞬变电磁法、A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.1（Ⅱ）直流电阻率法、A.3（Ⅰ）反射波法、A.3（Ⅲ）瑞雷波法。

- 2 对于堆石坝体渗漏或富水区域探测，宜选用 A.2（Ⅱ）瞬变电磁法、A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.1（Ⅱ）直流电阻率法。

- 3 坝基渗漏通道探测宜选用 A.2（Ⅱ）瞬变电磁法、A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.1（Ⅱ）直流电阻率法等。

- 4 坝体、坝基具备孔中探测条件或需要进一步详查时，渗漏通道或富水区探测宜选用 A.4（Ⅱ）电磁波 CT 法、A.4（Ⅲ）弹性波 CT 法、钻孔电视等。

- 5 对于高坝深埋渗漏病害的探测，宜通过探测浸润面畸变形态、渗漏特征或富水区域随库水位变化情况，并结合监测资料进行综合研判。

- 6 平原水库大坝渗流隐患探测宜选用 A.10 车载隐患探测法。

- 7 探测渗漏隐患后，应结合现场排查结果、监测勘察等资料综合分析研判。

- 8 探测结果验证，宜选用钻孔勘察、压（注）水试验等。

4.2.6 心墙等防渗体系渗漏探测应符合下列规定：

- 1 黏土心墙等渗漏通道探测宜选用 A.1（Ⅱ）直流电阻率法、A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.2（Ⅱ）瞬变电磁法、A.3（Ⅲ）瑞雷波法、A.3（Ⅰ）反射波法、钻孔勘察法等。

- 2 混凝土防渗墙宜选用 A.2（Ⅱ）瞬变电磁法、A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.3（Ⅲ）瑞雷波法探测，具备孔中探测条件时，宜选用 A.4（Ⅲ）弹性波 CT 法、钻孔勘察法、钻孔电视、压

(注) 水试验等。

3 沥青心墙宜选用 A.2 (I) 探地雷达法、A.2 (II) 瞬变电磁法等。

4 心墙、防渗墙搭接部位、心墙与大坝其他结构连接部位渗漏隐患宜选用 A.4 (II) 电磁波 CT 法、A.4 (III) 弹性波 CT 法、钻孔电视法、钻孔勘察法等。

4.2.7 面板防渗体系渗漏探测宜符合下列规定：

1 防渗面板后的堆石体富水区探测宜选用 A.2 (II) 瞬变电磁法、A.2 (I) 探地雷达法等。

2 防渗面板入渗区域宜选用水下人工或潜水器探视法、A.7 (I) 同位素示踪法、A.7 (II) 拟流场法、A.5 中声呐法等进行探测，可通过测量坝前流速进行详查。

4.2.8 坝肩渗漏通道的空间分布、渗漏水来源及与库水连通情况等探测宜符合下列规定：

1 坝肩渗漏通道探测宜选用 A.1 (II) 直流电阻率法、A.2 (II) 瞬变电磁法、A.3 (III) 瑞雷波法、A.4 (II) 电磁波 CT 法、A.4 (III) 弹性波 CT 法等。

2 坝肩渗漏通道探测宜在坝肩区域加密测点、布置测网，可采用 A.7 (I) 同位素示踪法、钻孔勘察等辅助探查。

3 选用电法探测坝肩渗漏通道时，宜采用网格化布线；有条件时可采用 A.1 (II) 直流电阻率法的三维或时移探测技术。

4 选用瞬变电磁法探测渗漏通道时，可在坝肩部位加密测点。

5 局部精细化探测宜选用 A.4 (III) 弹性波 CT 法、A.4 (II) 电磁波 CT 法、钻孔电视等。

4.2.9 坝内埋管（涵）渗漏探测宜符合下列规定：

1 坝内埋管（涵）接触渗漏探测宜选用 A.1 (II) 直流电阻率法、A.2 (II) 瞬变电磁法、A.2 (I) 探地雷达法、A.4 (III) 弹性波 CT 法、A.4 (II) 电磁波 CT 法、钻孔勘察等。

2 坝内埋管（涵）具备进入条件时，宜选用人工探视法、

管道机器人等详查。

4.3 混凝土坝

4.3.1 混凝土坝渗流安全隐患探测部分应包括坝肩、坝基、坝体层间结合部及裂缝。

4.3.2 混凝土坝渗流安全隐患探测应包括下列探测内容：

- 1 坝基渗漏通道的位置、范围及分布特征等；
- 2 绕坝渗漏通道的空间分布、渗漏水来源及与库水连通情况等；
- 3 坝体分缝位置以及裂缝、破损位置的渗漏流量等。

4.3.3 坝基渗漏入渗区域探测宜选用人工潜水或潜水器探视法、A.7（I）同位素示踪法、A.5 水下探测方法中的声呐法等；入口隐蔽、分散时，宜选用 A.7（II）拟流场法等。

4.3.4 坝基出逸区域探测宜选用人工探视法、A.6 温度场法等，高坝可采用人工或无人机搭载红外热成像仪遥测大坝表面温度场。

4.3.5 坝基渗漏通道探测宜符合下列规定：

- 1 坝基渗漏通道探测宜选用 A.2（II）瞬变电磁法、A.4（I）电阻率 CT 法等。

- 2 坝基具备孔中探测条件时，宜选用 A.4（III）弹性波 CT 法、A.4（II）电磁波 CT 法、钻孔勘察、钻孔电视等。

- 3 渗漏水来源、库水与渗漏出水区域连通探测宜选用 A.7（I）同位素示踪法、A.7（II）拟流场法。

- 4 坝基渗漏隐患探测结论应根据现场排查成果、监测资料分析等综合研判。

4.3.6 坝肩绕坝渗漏探测宜符合下列规定：

- 1 坝肩绕坝渗漏探测宜选用 A.1（II）直流电阻率法、A.2（II）瞬变电磁法、A.7（I）同位素示踪法、压（注）水试验。

- 2 设有灌浆平洞时，渗漏区域探测宜选用 A.2（I）探地

雷达法、A.2（Ⅱ）瞬变电磁法等，可采用钻孔勘察、A.4（Ⅰ）电阻率 CT 法等进行辅助判断。

3 库水与渗漏出水区域连通探测宜选用 A.7（Ⅰ）同位素示踪法、A.7（Ⅱ）拟流场法等。

4 可采用 A.4（Ⅲ）弹性波 CT 法、A.4（Ⅱ）电磁波 CT 法、钻孔勘察等对局部区域进行精细化探测。

4.3.7 坝体层间结合部及裂缝的渗漏通道探测宜符合下列规定：

1 坝体渗漏探测宜在上游坝面、坝体廊道内等部位进行，可根据廊道排水孔、灌浆孔内温度、流向等参数综合研判。

2 坝体层间结合部及裂缝渗漏探测宜选用 A.2（Ⅱ）瞬变电磁法、A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.3（Ⅲ）瑞雷波法、A.4（Ⅲ）弹性波 CT 法、A.4（Ⅱ）电磁波 CT 法、钻孔电视等。

4.4 其他坝型及建筑物

4.4.1 砌石坝渗漏隐患探测包括勾缝脱落、砌石断裂、上游防渗面板开裂等，探测方法参照 4.3.5 条。

4.4.2 堆石混凝土坝、胶凝砂砾石坝等渗流安全隐患探测方法参照 4.3.5 条。

4.4.3 泄输水建筑物的溢洪道接触渗漏探测宜选用 A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.2（Ⅱ）瞬变电磁法、A.4（Ⅲ）弹性波 CT 法等。

4.4.4 心墙与防浪墙结合部位的渗流安全隐患探测宜选用 A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.2（Ⅱ）瞬变电磁法、A.4（Ⅲ）弹性波 CT 法等。

5 结构安全隐患探测

5.1 一般规定

5.1.1 结构安全隐患应包括裂缝、破损、滑坡、塌陷、脱空、空洞、不密实区、不均匀变形、动物巢穴等。

5.1.2 结构安全隐患探测方法应根据坝型特点、现场情况、结构功能、地质条件、隐患类型、探测目的等综合确定。

5.2 土石坝

5.2.1 坝体结构安全隐患探测应包括下列内容：

1 坝体裂缝以及土石心墙裂缝深度、长度、宽度、走向、分布等。

2 坝体塌陷、滑坡滑面位置和埋深等。

3 混凝土防渗面板破损、脱空、塌陷的位置、范围、程度等，裂缝的深度、宽度、走向、分布等。

4 白蚁及其他动物巢穴位置、范围、直径、埋深等。

5.2.2 坝体结构安全隐患探测应符合下列规定：

1 坝体裂缝以及心墙裂缝，探测宜选用 A.1（Ⅱ）中的高密度电法、A.2（Ⅰ）探地雷达法等，必要时可辅以坑探、钻探等验证。

2 坝体滑坡探测宜选用 A.3（Ⅲ）瑞雷波法、A.1（Ⅱ）中的高密度电法、A.2（Ⅰ）探地雷达法、A.3（Ⅰ）反射波法、A.3（Ⅱ）折射波法等；当坝体滑坡成因复杂、环境干扰较大时，宜应用包含上述方法的综合物探，必要时可辅以坑探、钻探等验证。

3 混凝土防渗面板脱空探测宜选用 A.2（Ⅰ）探地雷达法、冲击回波法、A.8 超声波法、红外热成像法。

4 混凝土防渗面板裂缝深度探测宜选用 A.3（Ⅲ）瑞雷波

法、A.8 超声波法、A.2 (I) 探地雷达法；面波法探测裂缝深度应按 SL 713 执行，超声波法探测裂缝深度应按 SL/T 352 执行。

5 白蚁及其他动物巢穴探测宜选用 A.2 (I) 探地雷达法、A.1 (II) 中的高密度电法、A.6 温度场法、声发射法等，必要时可辅以坑探、钻探等验证。

5.2.3 防渗墙结构安全隐患探测内容及方法应符合下列规定：

1 防渗墙深度、厚度、墙体缺陷、墙体连接和均匀性宜选用 A.3 (I) 反射波法、A.1 (II) 中的高密度电法、A.2 (I) 探地雷达法、A.4 层析成像法、单孔声波法、穿透声波法等。

2 防渗墙体与基岩接触情况宜选用单孔声波法、穿透声波法、A.4 层析成像法、钻孔电视等。

3 测线应沿防渗墙中轴线布置；检测孔应利用墙体预埋管、钻孔，布置在防渗墙中心线上或紧贴防渗墙，检测孔底高程应低于设计墙底高程。

5.2.4 坝体水下结构安全隐患探测内容应包括裂缝、破损等隐患位置、分布、尺寸等，探测方法宜符合下列规定：

1 宜选用人工潜水或潜水器探视法、声呐法等。

2 水质清晰，目视观察有较好效果时，宜选用水下摄像，目视无法观察时宜选用声呐法探测。

3 宜先选用多波束声呐、侧扫声呐扫描普查，重点部位或普查异常部位再选用水下摄像、二维图像声呐、三维成像声呐详查。

4 宜选用水下雷达探测结构内部脱空等隐患。

5.3 混 凝 土 坝

5.3.1 坝体结构安全隐患探测应包括下列内容：

1 坝体裂缝及新老混凝土结合部位裂缝深度、长度、走向、分布等。

2 空洞、不密实区位置、范围、分布等。

5.3.2 坝体结构安全隐患探测应符合下列规定：

1 裂缝探测宜选用 A.8 超声波法、A.3 (Ⅲ) 瑞雷波法、A.2 (Ⅰ) 探地雷达法、超声横波反射三维成像法等。

2 空洞、不密实区探测宜选用 A.2 (Ⅰ) 探地雷达法、超声横波反射三维成像法、A.4 层析成像法、A.3 (Ⅲ) 瑞雷波法等。

3 新老混凝土结合部位裂缝探测宜选用超声横波反射三维成像法、冲击回波法等。

4 其他混凝土结构缺陷探测应参照 SL 713 执行。

5.3.3 坝肩结构安全隐患探测应包括隐伏软弱夹层、隐伏结构破碎带等。

5.3.4 坝肩结构安全隐患探测应符合下列规定：

1 隐伏软弱夹层探测宜选用 A.2 (Ⅰ) 探地雷达法、弹性波测试法、测井法等。

2 隐伏构造破碎带探测宜选用 A.1 (Ⅱ) 中的电测深法、A.1 (Ⅱ) 中的电剖面法、A.3 (Ⅱ) 折射波法、A.3 (Ⅲ) 瑞雷波法、A.1 (Ⅱ) 中的高密度电法、A.2 (Ⅱ) 瞬变电磁法、A.2 (Ⅰ) 探地雷达法、可控源音频大地电磁测深法、A.1 (Ⅲ) 激发极化法、A.4 层析成像法等。

3 探测测线宜布置在隐伏软弱夹层、构造破碎带的垂直方向和延伸方向。

5.3.5 坝体水下结构安全隐患探测应参照 5.2.4 条执行。

5.4 其他坝型

5.4.1 砌石坝的坝体结构安全隐患探测应符合下列规定：

1 砌体结构裂缝、不均匀变形等隐患探测应参照 5.3.1 条、5.3.2 条执行。

2 对于设置上游混凝土防渗面板的砌石坝，其混凝土防渗面板脱空、裂缝等结构隐患探测应参照 5.2.2 条执行。

5.4.2 堆石混凝土坝、胶凝砂砾石坝等结构安全隐患探测可参照 5.3 节执行。

5.4.3 以上坝型坝体水下结构安全隐患探测应参照 5.2.4 条执行。

5.5 溢 洪 道

5.5.1 溢洪道结构安全隐患探测内容应包括混凝土裂缝、底板接缝处混凝土脱空、错台等异常变形、边坡稳定性等。

5.5.2 溢洪道结构安全隐患探测应符合下列规定：

1 闸墩、边墙、底板、消能工等混凝土结构的裂缝、不密实区等结构隐患探测应参照 5.3.2 条执行。

2 底板混凝土脱空探测宜选用 A.2（I）探地雷达法。

3 闸墩、边墙异常变形、失稳隐患探测应参照 5.3.4 条执行。

4 进出口土质边坡稳定性探测应参照 5.2.2 条执行。

5 进出口岩质边坡稳定性探测应参照 5.3.4 条执行。

6 水下结构安全隐患探测应参照 5.2.4 条执行。

5.6 水工隧洞和涵管

5.6.1 水工隧洞结构安全隐患探测内容应包括衬砌结构缺陷、脱空、接缝止水隐患及进出口建筑物淤堵。

5.6.2 衬砌结构缺陷应包括衬砌裂缝、不密实、厚度不足，探测可参照 5.3.2 条执行。

5.6.3 衬砌结构脱空隐患探测内容应包括脱空位置、脱空范围等。

5.6.4 衬砌结构脱空隐患探测应符合下列规定：

1 混凝土衬砌脱空探测宜选用 A.2（I）探地雷达法、声波反射法、脉冲回波法、超声横波反射三维成像法等。

2 钢衬砌脱空探测宜选用脉冲回波法、中子法、声波反射法、超声横波反射三维成像法等。

3 衬砌脱空探测应沿隧洞轴线方向在拱顶、两侧拱肩、两侧墙、底部各布置 1 条测线。

4 钢衬与混凝土衬砌脱空测线应沿隧洞轴线方向在钢管顶部及两侧腰部各布置 1 条测线。

5.6.5 接缝止水隐患探测宜根据现场排查、监测资料分析选用人工潜水或潜水器探视法。

5.6.6 进、出口建筑物淤堵探测宜选用多波束声呐、测扫声呐法，并应符合下列规定：

1 淤积厚度小于 20 m 时，探测宜选用浅地层剖面法；淤积厚度大于等于 20 m 时，探测宜选用水域地层剖面法、水域多道地震勘探法和 A.1（Ⅱ）中的电测深法等。

2 淤积层砂质含量高时，宜选用水域多道地震勘探法；淤积层砂质含量低或不含砂时，宜选用水域地层剖面法。

3 测线应覆盖探测区域，宜采用网状或横河向布置。

5.6.7 坝下埋涵（管）结构安全隐患应包括管身裂缝、破损露筋、异常变形、内部淤堵，探测方法宜符合下列规定：

1 具备人工进入条件时，宜选用 A.2（Ⅰ）探地雷达法、冲击回波法、A.8 超声波法等。

2 不具备人工进入条件时，宜选用搭载管道潜望镜、闭路电视系统、水下摄像机、多波束声呐、测扫声呐等设备的管道机器人平台。

5.7 近 坝 岸 坡

5.7.1 近坝岸坡安全隐患探测应包括下列内容：

1 可能导致岸坡失稳的滑动面位置、埋深、产状等。

2 岸坡岩体（尤其是顺向坡岩体）劣化的程度、影响范围等。

5.7.2 土质岸坡失稳隐患探测方法可参照 5.2.2 条执行。

5.7.3 岩质岸坡失稳隐患探测应符合下列规定：

1 基岩裸露、且隐伏滑裂面埋深小于 20 m 时，宜选用 A.3（Ⅲ）瑞雷波法、A.2（Ⅰ）探地雷达法等；当隐伏滑裂面埋深大于等于 20 m 时，宜选用 A.3（Ⅲ）瑞雷波法、A.3（Ⅰ）

反射波法等。

2 含水率较高或埋深较大的隐伏滑裂面探测宜选用 A.1 (Ⅲ) 激发极化法、A.1 (Ⅱ) 中的电测深法、A.1 (Ⅱ) 中的高密度电法、可控源音频大地电磁测深法等。

3 岸坡场地地质情况复杂、环境干扰较大时，宜选用综合物探。

4 宜选用网格状测网，测线方向宜沿主滑带方向、顺坡向、平行等高线布置，测线宜延伸至隐伏滑坡体外。滑坡体转折处和重点部位，应加密测点。

5.7.4 岸坡岩体劣化隐患探测应符合下列规定：

1 当基岩表面无覆盖层或覆盖层较薄时，探测宜选用 A.2 (Ⅰ) 探地雷达法、A.3 (Ⅱ) 折射波法、A.2 (Ⅱ) 瞬变电磁法等。

2 当基岩表面具有一定厚度的覆盖层、风化界面起伏不大、各风化层物性差异明显时，探测宜选用 A.3 (Ⅱ) 折射波法、A.3 (Ⅲ) 瑞雷波法、A.1 (Ⅱ) 中的电测深法、A.1 (Ⅱ) 中的高密度电法、A.2 (Ⅱ) 瞬变电磁法等。

3 详细探测局部风化不规则岩体情况，宜选用 A.4 层析成像法。

6 金属结构安全隐患探测

6.1 一般规定

6.1.1 金属结构安全隐患应包括腐蚀、异常振动、损伤、质量缺陷等。质量缺陷应包括构件裂纹、焊缝的表面裂纹和内部缺陷。焊缝内部缺陷应包括群状气孔、不规则状夹渣、未焊透、未熔合、裂纹等严重缺陷。

6.1.2 金属结构安全隐患探测方法应根据现场情况、结构型式、运行年限、探测目的等综合确定。

6.2 钢 闸 门

6.2.1 闸门腐蚀探测应符合下列规定：

1 腐蚀隐患探测内容应包括腐蚀量和腐蚀状况。

2 腐蚀量宜选用测厚仪、测深仪、深度游标卡尺进行探测，对于均匀腐蚀，宜选用测厚仪探测腐蚀量，也可采用涡流脉冲技术进行探测；对点蚀等非均匀腐蚀，宜选用测深仪、深度游标卡尺探测腐蚀量。腐蚀状况宜选用卷尺、直尺等进行探测。

3 腐蚀隐患探测的范围应包括门体、支承行走装置、连接螺栓、吊耳、吊杆、止水装置、平压设备、锁定装置、埋件等。

6.2.2 闸门质量缺陷探测应符合下列规定：

1 表面裂纹探测宜选用磁粉法或渗透法。

2 内部缺陷探测宜选用超声波法或射线法，超声波法可采用脉冲反射法和衍射时差法，采用一种探测方法对缺陷不能定性和定量时，宜结合超声波相控阵综合探测及研判。

3 质量缺陷探测应包括闸门的一类、二类焊缝和易于产生疲劳裂纹的构件。

6.2.3 闸门运行中存在异常振动现象时，应进行振动探测，探测方法及内容应符合 SL 101 的有关规定，结构振动响应测试可

选用非接触式振动测量方法。

6.3 启闭设备

6.3.1 启闭设备腐蚀探测应符合下列规定：

- 1 腐蚀探测内容应包括腐蚀量和腐蚀状况。
- 2 腐蚀量宜选用测厚仪、测深仪、深度游标卡尺进行探测。腐蚀状况宜选用卷尺、直尺等进行量测。

3 腐蚀探测的范围应包括机架（门架、桥架、桁架）、卷筒、制动器、减速机、开式齿轮副、转动轴、滑轮组、液压缸、活塞杆、高强螺栓、蜗杆、蜗轮、机箱、螺母、螺杆等。

6.3.2 启闭设备质量缺陷探测应符合下列规定：

- 1 表面裂纹探测宜选用磁粉法或渗透法。
- 2 内部缺陷探测宜选用超声波法或射线法，超声波法可选用脉冲反射法和衍射时差法，采用一种探测方法对缺陷不能定性和定量时，宜结合超声波相控阵综合探测及研判。

3 质量缺陷探测应包括启闭设备的一类、二类焊缝和易于产生疲劳裂纹的零部件。

6.3.3 钢丝绳内部和外部损伤探测宜选用 A.2 电磁法、漏磁法、磁通法、剩磁法等，应符合 GB/T 21837 的有关规定。

6.3.4 当减速器齿轮副、开式齿轮副的齿面磨损严重时，应进行齿面硬度探测，宜选用里氏硬度计、肖氏硬度计等进行探测。

6.3.5 液压启闭机应关注液压缸的泄漏隐患，液压缸的内部泄漏隐患，可通过探测闸门 24 h 的沉降量进行排查，闸门的沉降量宜选用接触式位移计进行探测。

6.4 压力钢管

6.4.1 压力钢管腐蚀探测应符合下列规定：

- 1 腐蚀探测内容应包括腐蚀量和腐蚀状况。
- 2 腐蚀量宜选用测厚仪、测深仪、深度游标卡尺进行探测，也可选用漏磁法、涡流脉冲法进行探测。腐蚀状况宜采用卷尺、

直尺等进行量测。

3 腐蚀隐患探测的范围应包括管壁、支承环、伸缩节、加劲环等，应重点关注管道内壁的腐蚀情况。

6.4.2 压力钢管质量缺陷探测应符合下列规定：

1 表面裂纹探测宜选用磁粉法或渗透法。

2 内部缺陷探测宜选用超声波检测或射线检测，超声波检测宜选用脉冲反射法和衍射时差法，当采用一种检测方法对缺陷不能定性和定量时，宜结合超声波相控阵或其他方法综合探测及研判。

3 质量缺陷探测范围应包括管道的一类、二类焊缝。

6.4.3 压力钢管运行中存在异常振动现象时，应进行振动探测，探测方法及内容应符合 NB/T 10349 的有关规定。

6.5 拦污栅及清污设施

6.5.1 拦污栅及清污设施的腐蚀探测应符合下列规定：

1 腐蚀探测内容应包括腐蚀量和腐蚀状况。

2 腐蚀量宜选用测厚仪、测深仪、深度游标卡尺进行探测。腐蚀状况宜采用卷尺、直尺等进行量测。

3 腐蚀隐患探测的范围应包括栅条、栅槽、支承行走装置、栅块、机架、吊耳板、耙齿、齿耙、抓梁等。

6.5.2 清污机质量缺陷探测应符合下列规定：

1 表面裂纹探测宜选用磁粉法或渗透法。

2 内部缺陷探测应选用脉冲反射法超声波法、衍射时差法超声波法、射线法。采用一种检测方法对缺陷不能定性和定量时，宜结合超声波相控阵或其他方法综合探测及研判。

3 质量缺陷探测范围应包括一类、二类主要受力焊缝。

6.5.3 对于固定式拦污栅，异常变形、破损、淤积等隐患探测宜符合下列规定：

1 宜选用人工或潜水器探视法。

2 水质清晰，目视观察有较好效果时，宜选用水下摄像探测拦污栅前淤积情况，目视无法观察时宜选用声呐法。

7 成果报告

7.0.1 隐患探测成果报告应依据充分、内容全面、数据真实、结论可信并存档备查。

7.0.2 成果报告内容宜按附录 C 编写。

7.0.3 成果报告应有编制、审核、负责人员签字，标注版本日期与单位标识。

7.0.4 成果报告中的图件应符合下列规定：

- 1 图件应规范标注图号和图名，与成果报告内容相呼应。
- 2 现场布置图应注明测点、测线端点、转折点、钻孔、布置方向等。
- 3 探测成果图应包括探测得到的剖面或平面图，以及解译成果图参量的图例。图件可采用曲线图、等值线图或图像等。
- 4 成果解译图应注明隐患类型、位置、范围、性质等。

附录 A 隐患探测方法与技术要求

A.1 电 法

(I) 自然电场法

A.1.1 自然电场法包括电位法和梯度法，可用于探测大坝渗漏通道的位置和规模。

A.1.2 自然电场法适用于下列情况：

1 测区内具有良好的接地条件，目标体上方无高电阻屏蔽层。

2 测区内不存在较强的工业杂散电流、大地电流或电磁干扰。

A.1.3 外业工作应符合下列规定：

1 宜在大坝坝顶沿上、下游坝坡及马道等位置分别布置纵向测线，可根据现场探测需要加密布置测线或布置横向测线，布置测线时应避开电缆等设施。

2 探测点之间距离不宜超过 5 m，在异常位置附近宜采用小于 1 m 的点距加密探测。

3 各测区探测工作开始前后应分别测试所用不极化电极的极差；观测过程中应保证电极接地良好。

4 测线较长或游散电流影响较大时应分段观测，分段观测的测线衔接处应重复 3 个以上测点。

5 每 10 个测点应进行 1 次重复观测。

A.1.4 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 应计算单个测点的绝对误差和各测线/测区的平均绝对误差；单个测点的绝对误差应小于 3 mV；测线/测区的电位法测值平均绝对误差应小于 5 mV，梯度法测值平均绝对误差应小于 3 mV。

- 2 应根据工程、环境条件分段确定背景值，剔除干扰异常。
- 3 应将各测点电位换算至相应分基点和总基点上，计算各测点的数据，编制各测点的绘图数据文件。
- 4 相邻 3 个或 3 个以上测点数据与背景值之差超过测量平均绝对误差的 3 倍时，可确定为有效异常。
- 5 应根据剖面或平面等值线图确定异常体范围，可根据异常分布、幅值等特点估算异常体规模、埋深。
- 6 成果图表应包括自然电位曲线图、隐患分布图。

(II) 直流电阻率法

A.1.5 直流电阻率法包括剖面法、测深法、高密度电阻率法及跨孔、二维、三维、时移等电阻率成像方法。

A.1.6 直流电阻率法适用于下列情况：

- 1 测区内具有良好的接地条件，目标体上方无高电阻屏蔽层。
- 2 测区内不存在较强的工业杂散电流、大地电流或电磁干扰。
- 3 利用时移物探的方法探测大坝内部隐患，电极布设后可对大坝实现连续监测。

A.1.7 外业工作应符合下列规定：

- 1 采用剖面法、测深法、高密度电法探测时，电极宜沿直线布置；对大坝普测时，单条测线宜覆盖整个坝段，对坝肩开展普查时，宜布置测网。
- 2 仪器、供电导线与大地之间应绝缘，仪器外壳与电极间绝缘电阻应大于 $300\text{ M}\Omega$ ，电极连线绝缘电阻应大于 $2\text{ M}\Omega/\text{km}$ 。
- 3 M、N 的接地电阻应小于仪器输入阻抗的 1%；个别电极接地不良时，可通过堆土、挖坑填土的方式改善接地条件。
- 4 每班探测开始和结束后，应进行漏电检查；探测时发现漏电后应停止观测，并查明原因，在消除漏电影响后重新观测。

A.1.8 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 数据处理前应进行资料整理,内容包括整理探测班报、检查数据的正确性及完整性等。

2 应根据台班和仪器记录的信息进行数据格式整理、坏值剔除及格式转换、拼接等预处理。

3 应利用专业软件进行数据处理、反演和成果图件绘制;宜采用反演、目标相关算法等方法对剖面成像。

4 成果图件制作应基本居于图幅中间并突出异常,同一测区宜统一图件比例、等值线间隔和色尺设置。

5 绘制视电阻率剖面图可采用圆滑技术,并在报告中说明。

6 具有已知地质剖面、钻孔资料及其他探测方法成果时,应进行解释成果对比分析。

7 成果图件包括隐患分布图、视电阻率剖面曲线图、测深曲线图,二维电阻率等值线图、电阻率色谱图、相关系数成像图,三维电阻率分布图、切片图等。

(Ⅲ) 激发极化法

A.1.9 激发极化法可选用中间梯度、联合剖面、固定点电源、对称四极测深等装置。

A.1.10 外业工作应符合下列规定:

1 宜选择对称四极装置。进行长剖面探测时,可选用联合剖面或中间梯度装置。

2 对称四极装置的最大供电电极距 AB 应大于探测深度的 3 倍。

3 供电导线与测量导线之间的距离应大于 1 m,且应随导线长度增加而增大。

4 观测供电时间宜大于 30 s,供电电流随电极距增大而增加。

5 出现二次场电位差 ΔU_2 小于 1 mV、视激发比值 J_s 大于或接近视极化率值 η_s 、视衰减值 D_s 大于或接近 100% 时,应重复观测。

A. 1. 11 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 应计算、绘制每个测点的视电阻率 ρ_s 、视极化率值 η_s 、视激发比值 J_s 、视衰减值 D_s 、半衰时 $S_{0.5}$ 值和曲线。

2 应根据地质、环境条件分段确定背景值，也可将已知地下水位以上或干孔旁测得的视电阻率 ρ_s 、视极化率值 η_s 、视激发比值 J_s 、视衰减值 D_s 、半衰时 $S_{0.5}$ 值数据作为背景值，剔除干扰异常。

3 相邻 3 个或 3 个以上测点的数据与背景值之差超过测量平均绝对误差的 3 倍，可确定为有效异常，并应有一定的规律性和分布范围。

4 资料解译应结合电阻率和多种激电参数综合分析。

5 可结合其他方法的验证资料确定渗漏区域位置和规模。

A. 2 电 磁 法

(I) 探地雷达法

A. 2. 1 探地雷达法探测方式可根据探测和环境条件选用剖面法、透射法、宽角法、共中心点法、钻孔探测法、电磁波 CT 法和三维雷达探测。

A. 2. 2 探地雷达法探测作业时应符合下列规定：

1 隐患与周边介质的介电常数差异明显；相对于天线尺寸，探测表面较平整。

2 不宜探测高电导率屏蔽层下的隐患，测区内不宜有大范围的金属构件或无线电射频等较强的电磁干扰。

3 隐患应具有一定规模，埋深在雷达设备的有效探测范围内；隐患垂直方向厚度应大于电磁波在其周边介质中有效波长的 $1/4$ ，水平方向长度应大于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隐患时，其探测隐患间的最小水平距离应大于第一菲涅尔带直径。

4 宽角法与共中心点法测线范围内，目的层底界面应与测

试表面平行，测试的介质应均匀。天线移动步长应小于电磁波在测试介质中有效波长的 $1/4$ ，并按设计测试步长预先标识各测点位置。发射和接收天线最大距离宜大于反射界面埋深的 2 倍。

A.2.3 介质电磁波速度应按下列方法确定：

- 1 利用地层参数计算。
- 2 由钻孔或已知深度的目标体标定。
- 3 用线状目标体几何扫描法推算。
- 4 用透射法（两临空面透射法或钻孔透射法）、宽角法或共中心点法确定。

A.2.4 表面二维探测外业工作应符合下列规定：

1 点测模式下测点间距应为 $0.1\text{ m} \sim 0.5\text{ m}$ ，连续测量模式下天线移动速率宜用较小值。

2 探测坝体内部隐患时，应根据探测深度和分辨率合理选择中心频率。

3 探测面板、护坡脱空及破坏范围时，宜选用中心频率 250 MHz 及以上的天线。

4 记录时窗宜按最大探测深度与上覆介质平均电磁波速度之比的 $2.5\text{ 倍} \sim 3\text{ 倍}$ 数值选取。

5 采样率宜为天线频率的 $15\text{ 倍} \sim 20\text{ 倍}$ 。

6 发射与接收天线间距宜小于最大探测目标埋深的 20% 。

7 剖面法探测时天线标示的测量方向应与测线方向一致，天线中心线偏离测线的距离不应大于天线宽度的 $1/3$ 。

8 探测过程中，天线宜紧贴探测面，保持耦合良好。

9 连续测量时，天线的移动速度应均匀，并与仪器的扫描率相匹配，天线移动速度宜控制在 $6\text{ m/min} \sim 20\text{ m/min}$ ，每 10 m 应至少校对一次测量桩号，允许误差为 $\pm 1\%$ ；点测时，采样时应保证天线静止。

10 测线定位标注应与测线桩号一致，应避免仪器线缆干扰天线工作信号。

11 应记录测线上及邻近处存在的可能对雷达测量造成影响

的物体及环境因素。

12 多天线探测时应保证各天线测线重合。

A.2.5 钻孔雷达探测外业工作应符合下列规定：

1 应根据探测目的、工程及坝址条件布置钻孔位置。

2 对隐患方位进行定位时，应采用 2 孔或 3 孔测量方式，采用 3 孔测量方式时宜在平面上按三角形布置。

3 探测距离小于 10 m 时，宜选择收发一体天线；探测距离大于等于 10 m 时，宜选择分体式天线。

4 探测孔宜采用地质钻造孔，孔径应不小于 56 mm，孔深应深入探测下限 5 m 以上；实施孔内探测时，钻孔应采用非金属套管。

5 探测前宜进行探孔并测量孔斜，并对电缆进行深度标记。

6 探测时宜保持探测孔段满水或无水状态；孔中有水时，应记录水深。

7 点测时，测点间距宜为 20 cm；连续测量时，天线移动应保持匀速，移动速度宜为 4 m/min~6 m/min。

8 探测过程中，每 10 m 应校对一次孔深，允许误差为 $\pm 1\%$ 。

A.2.6 三维雷达探测外业工作应符合下列规定：

1 探测工作面大小应满足探测隐患空间分布范围的要求，并应根据隐患平面范围和埋深确定测网面积并进行标识。

2 网格密度应根据目标体大小确定，测线间距宜相等，且应保证同一方向有 3 条测线经过目标体。

3 使用三维雷达矩阵天线探测时，相邻测带搭接宽度不宜小于矩阵宽度的 1/4。

4 现场探测应按照事先标识的测网有序进行，各探测仪器工作参数应保持一致。

A.2.7 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 应对探测数据进行处理，处理目的包括压制干扰信号、突出反射波、地形校正等；处理方法可选用数字滤波技术、偏移

绕射处理技术、图像增强技术等。

2 数据道密度（水平比例）不一致、且存在位置标记时，应进行水平比例归一化。

3 频率滤波可选择低通滤波、高通滤波或带通滤波；低频截止频率宜取大于天线中心频率的 $1/4$ ，高频截止频率宜取小于天线中心频率的 2 倍。

4 宜采用反褶积处理方法压制多次反射波，提高垂直分辨率；当反射信号弱、数据信噪比低时不宜进行反褶积处理。

5 点平均处理时，参与平均的点数宜为奇数，点数最大值宜小于采样率与低通频率的比值。

6 宽角法和共中心点法反射波波至读取前，应先根据目标反射界面深度和双曲线特征对反射波进行识别，波至读取宜选择波形起跳点、波峰、波谷等特征点位置；电磁波速度计算应符合 SL/T 436—2023 附录 A 的规定。

7 三维探测各剖面数据处理完成后应形成三维图像；宜根据隐患的三维尺寸设定层析切片间距，制作切片图、截面图、剖面图，并对目标体范围进行空间位置标记。

8 资料解译包括辨认和追踪有效波的同相轴、反射波的提取、有效异常的确定、隐患分类原则等。

9 宜通过已知信息与雷达图像进行对比，建立测区探测对象的反射波组特征，然后应用于其他剖面的识别解译；宜根据反射波组的波形和能量特征进行同相轴追踪以识别反射波组界面。

10 可根据波形双曲线形态、能量和频率特征进行单个异常体识别。

11 同一测区有多条测线时，应比较相邻测线的雷达剖面图，识别相似图像特征的反射信息，进行比对及综合分析。

12 钻孔雷达探测解释应排除地面及水面造成的形态为 45° 的强反射同相轴的干扰波，多孔探测时宜根据多个单孔雷达图像上的目标体信号位置综合判断目标体方位。

13 应对三维数据体开展振幅、频率以及相位等属性分析；

并利用三维数据体显示功能进行隐患的空间形态分析、三维建模。

14 应依据上覆介质的电磁波速度参数进行时深转换，确定隐患埋深，隐患的性质宜结合地质资料确定。

15 成果图件应包括雷达解译剖面图、隐患探测成果表、综合成果图等；雷达解译剖面图上应标明探测位置、区域和隐患的性质、位置和规模。

(II) 瞬变电磁法

A.2.8 瞬变电磁法适用于下列情况：

1 大坝表面平坦，便于布设探测线圈；在坝坡上探测时应保持探测线圈水平，以对该位置的纵向剖面进行探测。

2 大坝隐患与周边介质之间电阻率差异明显，并在所用仪器的探测深度范围内。

3 测线应避开金属物体、高压电力线、表面积水以及其他易引起电磁噪声干扰的物体。

A.2.9 外业工作应符合下列规定：

1 测线宜布设在坝顶、马道等部位，测点距可根据探测任务需要调整；发现异常时可进行加密探测，中心回线加密探测时，每次移动的距离可为发射回线边长的 $1/2$ ；探测渗漏通道时，宜在上下游坝坡、坝肩等处增设测线。

2 测区内如有其他方法的测线、测点或钻孔等验证点时，测线宜与其重合或接近。

3 应根据探测要求选择回线边长、匝数及供电电流，保证有足够的发射磁矩。

4 应依据数据的信噪比及探测速度确定叠加次数。

5 应通过现场试验确定时间窗口，并采用多通道观测 U/I 或 B/I 。

6 每个测点观测完毕，应对数据和曲线进行检查，合格后方可搬站。

7 采用拖曳式瞬变电磁时应使电磁线圈处于平稳状态下拖曳；对异常区域进行加密复测时宜采用点测。

A.2.10 数据处理与成果解译应符合下列规定：

- 1 坝坡的测点，宜对早期电磁响应进行地形校正。
- 2 可对成果数据进行滤波处理。
- 3 应通过专业处理软件计算和绘制视电阻率-深度、视时间常数-深度、电压幅值比值、视纵向电导-深度断面图。
- 4 资料解译时，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。
- 5 应结合测点临近区域的钻探、物探、地质等有关资料进行综合解译分析，宜通过已知资料建立异常性质、深度、范围的对应关系，并据此对同测区其他视电阻率剖面进行解译。
- 6 解译应与资料处理工作交互进行，应结合垂直断面剖面与水平切面资料进行解释工作。
- 7 成果图件应包括视电阻率剖面图、解译成果剖面或平面图。

A.3 地震探查法

(I) 反射波法

A.3.1 反射波法可选用纵波反射法和横波反射法。

A.3.2 适用范围和应用条件应符合下列规定：

- 1 反射波法可用于土石坝坝体滑坡、防渗墙深度和墙体连接等自身结构隐患、土质或岩质岸坡失稳等隐患探测。
- 2 被探测隐患与其相邻坝体坝基或坝坡之间应存在波阻抗差异。
- 3 隐患边界宜较平坦，入射波应能在界面上产生较规则的反射波。

A.3.3 外业工作应符合下列规定：

- 1 信号激发接收应符合下列规定：

- 1) 探测深度较大时,宜选用纵波反射法;在低坝渗漏隐患探测时,宜使用横波反射法。
 - 2) 在满足探测深度要求时,宜使用较高频段的震源和固有频率较高的检波器。
 - 3) 激发点宜选在较密实的地层上,或预先夯实;锤击板应与地面接触良好。
 - 4) 使用横波叩板震源时,木板长轴应垂直测线,且长轴中点应在测线或测线延长线上,木板上应压足够重物并可安装抓钉,保持叩板与地面接触牢固。
 - 5) 检波距应通过试验确定,宜采用 1 m~5 m;检波距、排列长度在同一测线上应一致。
 - 6) 检波器布设应位置准确,安置牢固,埋置条件一致,防止背景干扰;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。
- 2 观测系统应符合下列规定:
- 1) 可采用单边或双边展开排列观测系统,选择反射最佳窗口,确定偏移距和检波点距。
 - 2) 工程条件较简单,反射层位较稳定时,宜采用等偏移距观测系统,偏移距宜选在反射波窗口的中部。
 - 3) 观测条件比较复杂的测区,宜采用具有一定偏移距离的多次覆盖观测系统,覆盖次数不应小于 6 次。
- 3 记录质量控制应符合下列规定:
- 1) 当信噪比较低时,宜分析干扰来源,采取降低放大倍数、增大激发能量等措施提高信噪比。
 - 2) 遇到局部测段记录质量变差时,应分析原因,重新选择仪器工作参数或改变工作方法。
- A.3.4 数据处理与成果解译应符合下列规定:
- 1 数字滤波应符合下列规定:
 - 1) 应在频谱分析的基础上选择滤波频率。
 - 2) 应调整滤波频带宽度,提高信噪比和分辨率。

- 3) 隐患多发处数据处理时, 不宜采用叠前二维滤波, 应避免横向混波对地震波动力学特征的影响。
- 2 速度分析和叠加速度选取应符合下列规定:
 - 1) 可使用速度谱或速度扫描求取叠加速度, 当探测条件复杂时, 宜用 2 种方法互为校核。
 - 2) 速度扫描时, 应选取信噪比高的地震记录, 并应采用较小的速度增量。
 - 3) 测段数量、长度应满足开展速度分析的要求, 并应绘制速度展开图; 速度横向变化规律分析可结合速度测井资料开展。
 - 4) 对水平叠加效果欠佳的地段, 应对该段叠加速度做必要的修改。
- 3 有效波对比分析应符合下列规定:
 - 1) 有效波振幅宜大于干扰波振幅的 2 倍, 并应选择有效波的起始相位采用相位追踪对比分析。
 - 2) 对不同层位地震有效波应根据波形相似性、视周期相近性、振动连续性和同相性以及波的振幅远离震源点衰减的规律性等进行对比分析。
 - 3) 确定平均速度或有效速度时应分析近表层介质不均匀性和低速带与下伏层厚度的相对变化的影响。
- 4 处理方法应符合下列规定:
 - 1) 有效反射波组之间振幅强弱悬殊的记录, 应进行信号振幅归一处理。
 - 2) 深部反射信号与表层初始信号之间振幅强弱悬殊时, 应进行剖面均衡处理。
 - 3) 当反射界面倾角较大时, 可进行偏移叠加或叠加偏移。
 - 4) 当测区地质情况比较复杂时, 宜采用地震反射与散射联合成像方法; 成像单元边长宜设置为 0.2 m, 叠加半径不应小于检波距, 宜为 2 m~10 m。
- 5 资料解译应符合下列规定:

- 1) 反射波资料解释的基础图件上应注明探测项目名称、测线编号及桩号、偏移距、检波点距；时间剖面典型测段应附展开排列记录；等偏移距剖面图应注明是否经动校正处理及动校正速度值；联合成像剖面图应说明成像单元边长、叠加半径及深度波速变化。
 - 2) 探测项目的结构层位和各种隐患分布位置和性质应依据剖面成像基础图件确定，并应与地质和其他探测资料对比分析；对目标体应标注编号。
 - 3) 探测项目结构、隐患等目标体的性质、形态、位置可根据时间剖面图中波组分叉、合并、中断、尖灭等现象分析确定。
- 6 成果解译应符合下列规定：
- 1) 成果应包括观测系统布置图、波速扫描分析图、叠加时间剖面图和色谱图、地质分析解译成果图表。
 - 2) 解译成果图宜包括锥探、钻孔或其他验证资料。

(Ⅱ) 折 射 波 法

A.3.5 折射波法可选用纵波折射法和横波折射法。

A.3.6 适用范围和应用条件应符合下列规定：

1 折射波法可用于土石坝坝体滑坡、隐伏构造破碎带、岸坡岩体劣化、岩质或土质岸坡失稳等隐患探测。

2 被探测隐患岩土层的波速应大于各上覆层的波速，各层之间应存在明显的波阻抗差异。

3 被探测隐患岩土层应具有一定的厚度，中间层厚度宜大于其上覆层厚度。

4 沿测线被探测隐患岩土层的视倾角与折射波临界角之和应小于 90° 。

5 被探测隐患岩土层界面应起伏不大，折射波沿界面滑行时无穿透现象。

A.3.7 外业工作应符合下列规定：

1 观测系统应符合下列规定：

- 1) 采用单支时距曲线观测系统时，被探测层界面的视倾角应小于 15° ，并应保证被探测地段内至少有 4 个检波点接收折射波。
- 2) 采用单重相遇观测系统应保证被探测层的相遇时距曲线段至少有 4 个正常检波点。
- 3) 采用多重时距曲线观测系统时，应保证各层折射波的连续对比探测，并在综合时距曲线上均有独立解释的相遇段。
- 4) 利用追逐时距曲线补充折射波资料时，应保证在被探测段至少有 4 个检波点重复接收同一界面的折射波。
- 5) 宜在测线每 100 m 测段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。

2 原始记录存在下列缺陷之一的，应判定为不符合测试要求的记录：

- 1) 不能可靠追踪初至有效波的记录。
- 2) 同一张记录上，使用道数的 1/6 以上或相邻道工作不正常。

A. 3. 8 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 弹性波走时读取应符合下列规定：

- 1) 在波的干扰或置换位置，应分析波的叠加特征后正确读取波的初至时间。
- 2) 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并进行相位校正。
- 3) 应在典型波形记录的每道初至之前标注走时值，并在初至点打上标记。

2 时距曲线绘制应符合下列规定：

- 1) 互换道或连接道之间同相位的时间差，经震源深度校正后应小于 3 ms。

- 2) 根据追逐时距曲线经校正拼接后, 综合时距曲线互换时差应小于 5 ms。
 - 3) 绘制时距曲线前, 应对走时数据进行相位校正、震源深度校正、表层低速带校正。
- 3 依据测区地震地质条件和记录特点处理方法应符合下列规定:
- 1) 应由相遇时距曲线求取界面速度和界面深度, 当条件不满足时, 可采用单支时距曲线截距时间法或临界距离法求取界面深度。
 - 2) 当地面起伏较大时, 宜采用 t_0 法或延迟时法; 当折射界面起伏较大时、宜采用时间场法或共轭点法; 处理方法可参照 SL/T 291.1 执行。
 - 3) 对于探测项目的结构复杂或具有较多的隐患类型时, 宜采用多种计算解译方法和波路追踪正演拟合方法综合求解。
 - 4) 确定平均速度或有效速度时应分析近表层不均匀性的影响, 根据速度沿测线变化的曲线进行时深转换。
- 4 成果解译应符合下列规定:
- 1) 确定波速界面与被探测隐患层界面的对应关系应以钻孔资料或物性资料为依据。
 - 2) 用速度变化推断水平方向介质变化, 应有物性和地质资料为依据。
 - 3) 确定速度带与测区岩体或土体密实度的对应关系, 应分析速度带上有无伴随振幅增减和波形变化等现象。
 - 4) 成果宜包括测线上的锥探、钻孔或其他验证资料, 图件宜包括地震波速地质剖面图等。

(Ⅲ) 瑞 雷 波 法

A. 3. 9 瑞雷波法也称面波法, 可采用瞬态法和稳态法。

A. 3. 10 适用范围和应用条件应符合下列规定:

1 瑞雷波法（面波法）可用于土石坝坝体滑坡、混凝土防渗面板裂缝、混凝土坝空洞和不密实区、隐伏构造破碎带、岩质岸坡失稳和劣化等隐患探测。

2 被探测隐患层与其相邻层之间、透镜体或不良地质体与其周边地层应存在大于 20% 的面波波速差异。

3 被探测隐患层厚度在面波探测排列内应相对均匀，被追踪的地层透镜体或不良地质体应具有一定规模。

4 地面应相对平坦或坡面为单斜且起伏不大，应避免沟、坎等复杂地形和障碍物的影响。

A.3.11 外业工作应符合下列规定：

1 信号激发接收应符合下列规定：

- 1) 测点间距宜为 2 m~50 m，重点或异常坝段可适当加密；应使用宽频带震源。
- 2) 探测中遇到局部坝段记录质量变差时，应分析原因并通过试验重新选择仪器工作参数。
- 3) 接收仪器应设置全通，采样间隔应小于面波最高频率的半个周期，时间测程应包括最远道低频面波的最大波长。
- 4) 宜采用展开排列方式分析有效波和干扰波分布特征，试验干扰波压制方法，选择激发与接收方式和仪器工作参数及观测系统等。

2 观测系统应符合下列规定：

- 1) 稳态瑞雷波法应采用变频可控震源单端或两端激发，调整两个检波器间距和偏移距进行接收，取得不同频率的多种组合瑞雷波记录。
- 2) 瞬态瑞雷波法应采用锤击、落重震源，在排列的单端或两端激发，可用 12 道或 24 道为一排列进行接收；也可使用 2 通道或多通道以共中心点方式接收多个信号对组成排列。
- 3) 信号采集宜采用变偏移距和检波距方式；小偏移近距

离高频信号和大偏移远距离低频信号可分别探测浅部和深部目标。

- 4) 应通过试验选择合适的偏移距和检波点距,排列长度应大于探测深度,检波点间距应小于目标体规模,检波点间距、排列长度在同一测线上宜保持一致。
- 3 存在下列缺陷之一者应为不合格记录:
 - 1) 近源道波形出现削波、坏道或排列中连续两道为坏道。
 - 2) 记录长度不满足采集最大炮检距基阶面波的记录。
 - 3) 记录编号或主要内容与外业工作情况不符,又无法改正的记录。

A.3.12 数据处理与成果解译应符合下列规定:

- 1 数据处理应符合下列规定:
 - 1) 稳态法波速度计算应选择位于震源点同一侧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瑞雷波速度,以两个检波点连线的中心为探测点绘制频散曲线。
 - 2) 瞬态法宜选用相位差法、频率波数法和频率波速法计算绘制瑞雷波频散曲线,可选用近似法或法极值点法求取层速度、一次导数法或拐点法求取层厚度。
 - 3) 频率-波速曲线的处理,应以排列共中心点为测点,对变偏移距和检波距信号对进行叠加;宜使用频谱细化技术。
 - 4) 使用共激发点排列接收信号时,数据宜采用变偏移距叠加处理。
- 2 资料解译应符合下列规定:
 - 1) 瑞雷波的深度转换可选用半波长法,也可参照测区已有资料按泊松比校正。
 - 2) 频散曲线应以瑞雷波的频率为纵轴、瑞雷波的速度为横轴绘制波速-频率曲线,也可绘制波速-深度曲线。
 - 3) 剖面测试时,应将波速-深度曲线按比例绘制在同一剖

面上，也可根据最后反演计算的层速度和层深度绘制瑞雷波速度剖面等值图、色谱图。

- 4) 波的对比宜采用多相位对比，应辨认和追踪瑞雷波同相轴变化趋势；不同频率瑞雷波对比分析应包括波形相似性、视周期相近性、振动连续性和同相性、振幅随远离震源点衰减规律性等特征对比；应根据瑞雷波频散特征，在时间域和频率域综合对比分析。

3 成果解译应符合下列规定：

- 1) 成果宜包括探测测线布置图、实测波形图、频散曲线图、剖面波速等值线图、地质分析解译成果图表。
- 2) 成果图宜包括测线上的锥探、钻孔或其他验证资料成果。

A.4 层析成像法

(I) 电阻率 CT 法

A.4.1 适用范围和应用条件应符合下列规定：

- 1 电阻率 CT 法可用于隐伏构造破碎带、岸坡岩体劣化等隐患探测。
- 2 被探测目标体与周边介质应存在电阻率差异。
- 3 测区内不应存在足以影响观测质量的杂散电流和强电磁干扰噪声。
- 4 电极接地条件应良好，钻孔内应有井液耦合。
- 5 钻孔内不应有金属套管或其他金属介质。
- 6 孔间距或洞间距宜小于 50 m。

A.4.2 外业工作应符合下列规定：

- 1 观测系统应符合下列规定：
 - 1) 孔、洞间 CT 可采用两边观测系统。当孔间的地表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) 当发射点间距大于接收点间距时, 宜采用两孔互换观测系统。
 - 3) 在同一剖面上进行多组孔间或洞间 CT 观测时, 观测系统宜保持一致。
 - 4) CT 剖面宜垂直于地层或地质构造的走向, 成像剖面宜与地质勘探线和其他物探测线一致。
 - 5) 扫描断面的孔、洞等宜相对规则且共面。
 - 6) 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。
 - 7) 激发和接收点距应根据地质条件、成像区域尺寸、成像单元大小、探测目标体规模、探测精度和方法特点确定。
 - 8) 成像孔深与孔间距比值、成像洞长与洞间距比值均宜大于 1.5。
 - 9) 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或者加密钻孔。
 - 10) 激发和接收位置应准确, 误差应小于点距的 5%。
 - 11) 应测量钻孔、平洞的方位和倾角, 建立成像区域相对坐标系, 确定激发点和接收点的坐标, 绘制观测系统图和剖面图。
 - 12) 点距应根据探测精度和方法特点确定。电磁波 CT 法点距宜小于 1 m, 电阻率 CT 法电极间距宜小于 2 m。
- 2 现场工作应符合下列规定:
- 1) 观测孔段不宜采取护壁措施, 应有井液耦合。若孔壁完整性差, 宜使用 PVC 管护壁, PVC 管应制作成花管。
 - 2) 现场工作前, 应进行电法仪电极系、多芯电缆、多路电极转换器、主机等工作状态检查。应检查电缆电极间距, 允许相对误差应为 $\pm 5\%$ 。
 - 3) 两个无穷远电极应有良好的接地条件, 宜相向布置。

- 4) 当无穷远电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。当无穷远电极位于观测剖面延长线上时, 距钻孔的距离应大于孔间距的 20 倍。
- 5) 现场测量可采用手动测量和自动测量两种方式, 手动测量供电时间应大于 2 s, 自动测量供电时间应大于 1 s。
- 6) 手动测量时, 当测量电压小于 3 mV 或测量电流小于 3 mA 时应进行重复观测, 观测次数宜大于 3 次。自动测量时, 应对数据进行现场监视, 当观测数据异常时, 应进行重复观测。
- 7) 自动测量时, 可采用相邻排列重合部分电极的方式进行检查观测。

A. 4.3 数据处理与成果解译应符合下列规定:

- 1 资料整理应符合下列规定:
 - 1) 应对数据进行预处理, 剔除坏值。
 - 2) 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。
 - 3) 应根据地质资料、物性参数、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, 模型网格单元尺寸应大于测点间距。
 - 4) 正演计算应根据实际情况选择 a 中心法、有限差分法、有限单元法、积分方程法或边界单元法等方法。
 - 5) 钻孔或探洞壁介质的物性参数、测井资料宜作为边界条件加入反演。
 - 6) 反演宜选择最小二乘法、积分方程等方法, 以及由这些方法改进而成的其他方法。
 - 7) 反演迭代次数应根据电流场路径和图像形态的稳定程度或相邻两次迭代计算的电阻率方差确定。
 - 8) 对于相互连接的剖面, 应采用相同的反演方法、模型和参数。

2 资料解释应符合下列规定：

- 1) 应绘制电阻率等值线图或色谱图，根据电阻率值大小、分布范围以及梯度变化等特征对异常体进行识别，圈定异常范围。
- 2) 应依据等值线图或色谱图上的电阻率值的变化特征，结合钻探和地质资料进行综合分析判断。

3 成果解释应符合下列规定：

- 1) 成果图件宜包括探测工作布置图、射线分布图、射线平均波速分布图、CT 图像、CT 成果解释图。
- 2) CT 图像可采用等值线图、灰度图或色谱图表示。
- 3) CT 成果解释图中应有比例尺、高程、孔洞号、剖面桩号和解释结果等。
- 4) 同一条剖面的多组 CT 剖面可拼接成一幅剖面成果图。
- 5) 成果分析宜包括 CT 剖面的地质分层、目标体埋深及规模、岩体或混凝土质量等的分析和解释及成果精度评价。

(Ⅱ) 电磁波 CT 法

A. 4. 4 适用范围和应用条件应符合下列规定：

1 电磁波 CT 法可用于水库大坝渗漏隐患探测、隐伏构造破碎带、岸坡岩体劣化等隐患探测。

2 被探测目标体与周边介质应存在电性差异。测区内不应存在足以影响观测质量的强电磁干扰噪声。

3 钻孔内不应有金属套管或其他金属介质，孔间距或洞间距宜小于 60 m。

A. 4. 5 外业工作应符合下列规定：

1 观测系统应符合 A. 4. 2 条的规定。

2 现场工作应符合下列规定：

- 1) 应选取不少于两个发射频率和相应的天线进行全孔段同步观测，应选择观测数据不小于 -110 dB 时的最高

频率为工作频率。

- 2) 可选择单频或多频观测方式，当相邻有多组剖面进行电磁波 CT 时，宜采用相同的频率进行观测。
- 3) 宜采用双孔法或三孔法在地质条件相对简单的孔段试验，确定初始场强和背景吸收值。
- 4) 电磁波透视仪现场工作前，应进行工作状态检查，发射、接收天线穿孔前应校零。发射机上天线与电缆间宜使用长度为 2 倍所选波长的绝缘绳相连，发射、接收天线下端应悬挂重锤。
- 5) 定点扇形扫描观测前，宜进行水平同步和斜同步观测。现场观测发现异常或观测值发生畸变，应重复观测和加密观测。
- 6) 孔间或洞间电磁波 CT 应避开金属管件的影响。当仪器距孔口或洞口较近时，应用金属板将洞口、孔口进行封闭。

A. 4. 6 数据处理与成果解译应符合下列规定：

- 1 资料整理应符合下列规定：
 - 1) 对数据应按成像计算格式要求进行整理、编辑、剔除坏值等预处理。
 - 2) 应对扫描断面建立坐标系，将每条射线的发射点与接收点转换为成像剖面的二维坐标，与相应的观测数据建立数据文件。
 - 3) 应根据地质资料、物性参数、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。
 - 4) 反演方法宜选择代数重建法（ART）、奇异值分解（SVD）、联合迭代（SIRT）、共轭梯度（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。
 - 5) 钻孔孔内物性参数、测井资料宜作为边界条件加入反

演，反演迭代次数应根据射线路径和图像形态的稳定程度或相邻两次迭代计算的吸收系数方差确定。

- 6) 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。
- 7) 对于相互连接的剖面，应采用相同的反演方法、模型和参数。

2 资料解译应符合下列规定：

- 1) 应根据吸收系数等值线图确定异常范围、延伸方向。
- 2) 应结合成像区域的地层岩性、构造、风化卸荷及岩体质量等情况，对 CT 图像中吸收系数异常体进行综合分析和合理的解译。

3 成果解译应符合 A. 4. 3 条的规定。

(Ⅲ) 弹性波 CT 法

A. 4. 7 弹性波 CT 法可采用地震波 CT 和声波 CT。

A. 4. 8 适用范围和应用条件应符合下列规定：

1 弹性波 CT 法可用于水库大坝渗漏隐患探测，以及混凝土内部孔洞和缺陷、防渗墙结构隐患、隐伏构造破碎带、岸坡岩体劣化等隐患探测。

2 被探测隐患目标体与周边介质应存在地震波或声波速度差异。

3 声波 CT 的孔间距或洞间距宜小于 30 m；地震波 CT 的孔间距或洞间距宜根据激发方式和能量大小确定。

4 测试时周边环境宜不存在较大的振动噪声干扰，孔内应有井液耦合。

A. 4. 9 外业工作应符合下列规定：

1 观测系统应符合 A. 4. 2 条的规定。

2 现场工作应符合下列规定：

- 1) 孔间 CT 工作前，应确定钻孔护壁措施。应用直径略

大于探头的重物进行探孔，检查水位、孔深和通畅情况。观测完成后，应清理现场，做好钻孔保护。

- 2) 孔间声波 CT 或地震波 CT 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，洞间声波 CT 或地震波 CT 工作前应进行洞壁岩体地震波或声波速度测试。
- 3) 孔间声波 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，应采用塑料或金属套管进行保护。
- 4) 地震波 CT 激发孔宜采用塑料或金属套管护壁。采用爆炸震源时，激发孔宜采用金属套管护壁，或在激发点以上吊置一段金属套管，一边在管脚激发，一边提升套管。
- 5) 当接收距离较远或信号衰减较快时，宜选择高能量激发方式。地震波 CT 激发接收间距大于 50 m 时，宜选择炸药爆炸作为震源。
- 6) 采用多道接收方式观测时，同一震源点的相邻接收排列重复应大于一道。

A. 4. 10 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 资料整理应符合下列规定：

- 1) 应读取每条射线的初至时间，识别触发信号并校正初至时间，剔除坏值。
- 2) 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，并与相应的初至时间形成一定格式的数据文件。
- 3) 应计算每条射线的平均波速，分析初至时间异常，初步确定反演参数。
- 4) 钻孔或隧洞壁介质的波速宜作为边界条件加入反演。
- 5) 应根据地质资料、物性参数、观测系统、成像精度、分辨率、任务要求选择和建立数学物理模型。网格单

元尺寸应大于测点间距，单元总数不宜大于射线条数。模型的初始值和约束极值宜根据地质条件、经验值、现场试验值选取。

- 6) 射线追踪可选择试射法、弯曲法、求解程函方程法和最短路径法等方法。
 - 7) 反演方法可选择代数重建法 (ART)、奇异值分解法 (SVD)、联合迭代法 (SIRT)、共轭梯度法 (CG)、阻尼最小二乘法 (LSQR)，以及由这些方法改进而成的其他方法。对于成像区域发育条带状异常体时，宜选择阻尼最小二乘法 (LSQR) 及由该法改进的反演方法。
 - 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计算的波速方差确定。
 - 9) 对于相互连接的探测剖面，应采用相同的反演方法、模型和参数。
 - 10) 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。
 - 11) 宜采用克里金 (Kriging)、反距离加权或最邻近点等插值法计算波速插值并绘制波速等值线分布图。
- 2 资料解译应符合下列规定：
- 1) 应依据每条射线的波速，进行不同特征波速范围内的平均波速分布统计。
 - 2) 宜根据射线路径分布图初步确定高速区或低速区的范围，按 CT 图像参数的变化梯度初步确定异常范围、延伸方向。
 - 3) 用于探测时，应根据 CT 图像中波速分布规律，结合成像域的地层岩性、地质构造、风化卸荷及岩体质量等进行地质推断解译。
 - 4) 用于检测时，应根据 CT 图像中波速分布规律，结合

成像区域的设计、施工资料等对工程质量进行评价。

3 成果解译应符合 A.4.3 条的规定。

A.5 水下探测方法

A.5.1 水下探测可选用水下摄像、多波束声呐、侧扫声呐、二维图像声呐、三维成像声呐、示踪法。

A.5.2 适用范围和应用条件应符合下列规定：

1 适用于水库大坝水下结构裂缝、破损等隐患位置、分布、尺寸特征探测，以及渗流隐患探测。

2 水下摄像宜搭载在水下机器人上或由潜水员手持使用，水下环境能见度宜大于 1 m。

3 二维图像声呐、三维成像声呐宜搭载在水下机器人上使用，多波束声呐、侧扫声呐宜搭载在测量船或水下机器人上使用，水域及水下环境宜相对开阔。

4 水下探测时，水流流速不宜大于 1.5 m/s；水下详探工作宜在静水中开展。

5 示踪法应采用环保无毒、色泽鲜明的颜料示踪剂。

A.5.3 外业工作应符合下列规定：

1 工作布置应符合下列规定：

1) 水下摄像宜在水下工程重点区域开展；测线宜在检测区域内呈 S 形布置，检测管道类区域宜按环状测线进行覆盖检查，相邻测线重叠覆盖面积应超过 20%。

2) 二维图像声呐检测时，宜根据现场待检区域安排支架位置和探头方向，必要时可配合水下云台使用；采用水下机器人作为载体时，宜根据待检工程结构情况安排检测次序。

3) 三维成像声呐探测采用多次探测数据拼接时，各站数据重叠覆盖面积不应小于 20%。

4) 多波束声呐和侧扫声呐的主测线宜平行检测区域长轴方向布设；相邻测线数据重叠覆盖面积不应小于

20%；应在垂直主测线方向布置联络测线，长度应大于主测线长度的5%。

- 5) 开展示踪法探测时，示踪剂应在水流源头或上游位置或隐患处投放，在周边或下游区域开展观测。

2 水下摄像探测现场工作应符合下列规定：

- 1) 作业前准备和检查应包括：宜选择合适位置安置地面作业平台，应根据工作需要和现场实际情况选择合适的下水位置并搭建下水辅助设施，设备下水前应按设备检验规程开展密封性、通电性能、操作功能等检查工作。
- 2) 建筑物表面存在淤积、附着物等影响摄像检查效果时应先进行清理。
- 3) 水下定位可采用惯性导航定位系统、水声定位系统，可根据检查区域的特征点，利用深度传感器、图像声呐等进行定位。
- 4) 观测时应根据水下环境情况合理设置照明灯光亮度，能见度差时应增加辅助灯光，辅助灯光位置不宜使摄像发生反向散射现象。
- 5) 水下摄像应根据现场观测建筑物结构特点合理安排检查路线，宜贴近水下建筑物有序进行。
- 6) 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。
- 7) 渗漏检测时宜结合水下喷墨观察颜料吸入情况。
- 8) 观测过程中发现建筑物缺陷部位应暂停工作，进行重点观察和定位，人工记录探查时间、空间位置、异常特征等信息。
- 9) 判断缺陷尺寸宜利用激光标尺或其他带有刻度的参照物进行。

- 10) 当天收工后应对检查视频进行回放,发现遗漏或可疑处应进行重新观测。
- 3 二维图像声呐探测现场工作应符合下列规定:
- 1) 测量方式、测站或测线布置应根据现场环境和探测目的确定。
 - 2) 探头类型、频率和工作方式应根据探测要求选择。
 - 3) 探测中发现异常部位时应进行重复扫描。
- 4 三维成像声呐探测现场工作应符合下列规定:
- 1) 探头类型、频率和工作方式应根据探测目的选择,采集前应进行工作水域声速测定。
 - 2) 应根据现场环境和检测目的规划测站和测线位置。
 - 3) 可通过布置强反射定位标靶提高探测效果。
- 5 多波束声呐探测现场工作应符合下列规定:
- 1) 外业工作宜参照 JT/T 790 执行,水下构筑物缺陷检测精度应达到特等测量等级要求。
 - 2) 探测时应记录仪器位置信息;探测前后应记录测区水位。
 - 3) 仪器设备安装和固定应符合厂家的技术要求,并记录安装位置参数。
 - 4) 正式作业前应进行系统稳定性试验,重复观测差值在水深小于 30 m 时应小于 0.6 m,水深大于等于 30 m 时应小于水深的 2%。
 - 5) 每次探测前后应测量换能器吃水深度,测量误差应小于 5 cm;应测量代表性区域声速剖面,测量误差应小于 1 m/s。
 - 6) 测船最大航速应根据数据更新率、波束脚印和测区水深确定;测船在探测区域内应保持匀速直线航行。
 - 7) 探测过程中应实时记录探测数据、监控数据覆盖情况和质量;信号质量不稳定时,应及时调整多波束发射和接收单元参数;必要时宜补测或重测。

6 侧扫声呐探测现场工作应符合下列规定：

- 1) 外业工作宜参照 JT/T 1362 执行；探头宜采用船侧固定安装方式，记录仪应接地良好；探测前应在代表性区域调试，合理设置采集参数。
- 2) 探测过程中，测量船应保持匀速、直线航行，船速应低于 3 km/h；探测过程宜记录定位信息。
- 3) 探测过程中应及时检查探测数据质量，数据覆盖不足或漏测、信号质量不满足要求时，应及时进行补测或重测。

7 示踪法探测现场应符合下列规定：

- 1) 示踪剂可由潜水员在水下释放；示踪剂释放装置载体可采用水下机器人，喷嘴应固定在摄像头前方。
- 2) 应实时记录示踪剂运动情况；探测裂缝、结构缝或混凝土破损部位时应录像，并对缺陷部位进行示踪检查；应根据示踪剂的运动特征判断渗漏情况。
- 3) 普查时，可对渗漏区域进行单次喷墨；确定渗漏部位后，可对渗漏区域进行连续喷墨；可通过示踪剂连续吸入时间和吸入速率判断渗漏程度。

A.5.4 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 数据处理应符合下列规定：

- 1) 水下摄像数据应进行回放分析，截取缺陷部位视频；可对成果进行图像增强处理。
- 2) 多波束声呐数据处理应确认原始数据完整性，剔除不合格数据，进行水深改正。
- 3) 侧扫声呐数据处理应确认数据完整性、进行数据校正；应绘制侧扫声呐条幅平面图，并进行数据拼接，绘制侧扫声呐镶嵌图。
- 4) 二维图像声呐数据应进行回放分析，标识目标体信号。
- 5) 三维成像声呐数据应进行噪声处理、数据拼接处理、三维建模处理。

- 2 资料解译应符合下列规定：
 - 1) 宜进行水下探测数据对比分析。
 - 2) 水下摄像成果解译应判断缺陷位置、规模和性质。
 - 3) 多波束声呐资料解译应分析探测对象的异常情况。
 - 4) 侧扫声呐资料解译应分析水底或建筑物表面特征。
 - 5) 二维图像声呐资料解译应分析目标体规模、位置。
 - 6) 三维成像声呐资料解译应根据建模数据分析探测对象尺寸、位置及缺陷情况。
- 3 成果解译应符合下列规定：
 - 1) 水下摄像成果宜包括水下摄像编辑资料、缺陷位置分布图等。
 - 2) 二维图像声呐成果宜包括二维声呐图像及对应的解释图件。
 - 3) 三维成像声呐成果宜包括三维数据模型图及局部放大图、典型断面图、平面等值线图及缺陷分布图等。
 - 4) 多波束声呐成果宜包括水深图、三维数字高程模型图、典型断面图及缺陷分布图等。
 - 5) 侧扫声呐成果宜包括侧扫声呐镶嵌图及解释图，应根据成果分析水底或建筑物表面特征。

A. 6 温度场法

- A. 6. 1 温度场法适用于普查土石坝、混凝土坝背水坡渗漏逸出区或浸润区的位置和规模。
- A. 6. 2 采用温度场法探测渗流隐患应满足下列条件：
- 1 渗漏水体与环境温度存在温差。
 - 2 渗漏水体未被植被等物体完全遮挡。
- A. 6. 3 温度场法可采用红外测温仪、热成像仪、激光测温仪等非接触式测温设备，当坝高超过 30 m 时，宜采用机载红外热像仪航测。
- A. 6. 4 外业工作应符合下列规定：

1 宜对大坝下游坝坡、坝脚和其他可能逸出部位采用巡查式探测。

2 现场检测前应对仪器进行检查或校正。

3 应考虑地貌、植被对温度测量值的影响；发现温度异常部位应及时进行人工检查确认。

4 采用机载红外热像仪航测时，应选择合适的飞行高度、摄录角度和航线。拍摄角度与探测坝面的夹角不应超过 45° ，探测范围应覆盖整个坝体背水面；可通过多次复飞探测并结合可见光拍摄结果确定渗漏区域；也可结合目视法和现场踏勘细致检查，若发现渗漏现象，则判定该区域为渗漏区域。

A.6.5 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 探测时记录相关环境信息，包括气温、植被覆盖情况等。

2 探测结果应提供渗漏区域的可见光、红外热像图像或视频，并注明探测时的水温、气温和探测时间。

3 应对温度异常点进行复勘，确定渗漏逸出区的位置、规模、流量等，对发现的温度异常区域位置、分布范围、环境温度、异常温度、人工检查结果分条记录。

A.7 渗流探测专用方法

(I) 同位素示踪法

A.7.1 用于大坝隐患探测的同位素示踪法分为人工同位素示踪法和天然同位素示踪法；人工同位素示踪法分为单孔稀释法、单孔示踪法和多孔示踪法。

A.7.2 采用示踪法测渗漏隐患应满足下列条件：

1 单孔稀释法适用于测定水平流速和流向，地层渗透系数在已知水力坡降时，判断多含水层中的涌水含水层和涌水量、吸水含水层和吸水量以及各含水层的静水头高度，测定垂向流速和流向等。

2 单孔示踪法适用于测定垂向流速和流向，人工同位素多

孔示踪法适用于测定地下水流向、孔间平均流速、平均孔隙度、计算地层弥散系数等。

3 环境同位素示踪法用于识别渗漏水的补给、排泄、径流条件，探索渗漏水的成因，确定渗漏水与地表水、库内深水之间的水力联系，确定水文地质参数等。

4 天然同位素示踪法可用于确定渗漏水体的不同补给源。

5 采用人工同位素示踪法探测渗漏时，渗漏水流速应大于 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

A.7.3 外业工作应符合下列规定：

1 测试水文参数时，应选择合适的放射性同位素。测试地下水流速流向时，宜选用¹³¹I，每次投放量应低于 $1 \times 10^8 \text{ Bq}$ 。

2 测试渗透速度和流向应采用单孔稀释法，测试地层平均孔隙度，地层弥散系数等宜采用多孔示踪法。

3 开展多孔示踪法时，应事先估计投放点至检测点之间的距离、渗漏量、饱水层体积、孔隙度等基本参数；需要投放大量的放射性同位素时，应选用符合相关标准的放射性同位素，可选用¹³¹I，剂量范围宜为 $1 \times 10^9 \text{ Bq} \sim 100 \times 10^9 \text{ Bq}$ ；同位素应一次投放完毕。

4 同位素示踪法的测线和钻孔布置应符合 GB 50027 的要求；可在坝顶布置 1 条测线，钻孔沿测线布置；普查时，孔距宜为 100 m；详查时，孔距宜为 50 m，必要时可增加钻孔数量验证测量结果的准确性；可利用大坝已有的钻孔和观测孔开展测试。

5 现场测量时，测量仪器应进行本底测量、置零及现场测量方向校正。

6 垂直测点距离宜为 1 m；发现异常点时，应进行多次重复测量。

A.7.4 数据处理和资料解译应符合下列规定：

1 钻孔内或井间人工同位素示踪测量时，应计算渗透流速、流向及渗透系数。

2 天然同位素示踪法数据分析应考虑岩体、温度对天然同位素含量造成的漂移。

3 成果图件应包括测区的流速矢量平面分布图；渗漏路径的剖面分布图；渗透流速、渗透系数沿各孔的高程分布图；与图件相对应的渗透流速、渗透系数以及渗流方向统计表；环境同位素数据分布图。

(II) 拟流场法

A.7.5 拟流场法可用于土石坝的渗漏、管涌进水口部位探测。

A.7.6 采用拟流场法探测时，水深应大于 0.5 m；渗漏类型应为具有一定渗漏量和流速的集中渗漏，出口与入口应存在水流联系。

A.7.7 外业工作应符合下列规定：

1 探测时宜连续扫描，分为普查和详细定位 2 个工作阶段。普查宜按 3 m~5 m 间隔扫描；定位阶段宜按 1 m 左右间隔扫描；对水库渗漏探测可采用点测方式工作。

2 供电电极 A 应置于渗漏出水口；有多处渗漏时，可在每一渗漏处各布置一电极，然后将各电极并联；供电电极 B 应置于离查漏区域较远水体中。

3 供电导线宜使用直径 1.5 mm~2.5 mm 的多芯铜线。

4 探测前应测量感应探头两极电阻，电阻应大于 100 k Ω 。

5 船只宜采用非金属的橡皮艇、木板船，且能容纳 3 人~5 人。

6 发现有效异常时，应设置浮标定位或者记录 GPS 坐标，并重复观测。

7 测线距离宜为 1 m~5 m。

8 工作中，供电电流宜控制在 400 mA~500 mA。

9 发送机供电电流强度应保持稳定，电流强度变化不应超过 2%。

A.7.8 数据处理与资料解译应符合下列规定：

1 资料整理。根据野外记录表格应将探测结果按测线编号输入计算机；应检查数据是否完整；应计算原始观测与检查观测的相对误差等。

2 图件绘制。绘制流场法观测信号强度平面剖面图或平面等值线图；平面剖面图的横坐标为大坝桩号，比例尺宜取 1 : 1000；纵坐标为渗漏信号强度值，比例尺应据背景值确定，应满足下列规定：

- 1) 曲线基本居于图幅中间，充分突出异常。
- 2) 背景值相差不大的坝段保持相同的范围和比例。
- 3) 绘制视信号强度剖面图可采用圆滑技术，图上应标明线号、测线距离坝轴线的距离、渗漏位置和性质等。
- 4) 背景值宜根据信号强度曲线平稳程度，采用数理统计方法选取，相对异常大于等于 2 倍背景值时为有效异常。
- 5) 成果报告宜说明管涌渗漏发生的时间、流量以及已做的处理工作，并简要介绍管涌发生坝段的基本情况。

(Ⅲ) 磁电阻率法

A. 7. 9 磁电阻率法可用于渗漏探测。

A. 7. 10 采用磁电阻率法时应满足下列条件：

- 1 渗漏区与周围介质存在明显的电性差异。
- 2 测区内不应存在金属等可能引起干扰的物体。

A. 7. 11 仪器与设备性能和指标应符合下列规定：

- 1 发送机输出频率稳定度不应大于 $8 \times 10^{-6} / 7 \text{ h}$ 。
- 2 发送机输出电压不应小于 300 V；发送电流范围应为 100 mA ~ 3000 mA。
- 3 接收机采用三分量磁通门探测仪。
- 4 接收机最大量程不宜小于 1 mT。
- 5 接收机分辨率不宜小于 10 pT。
- 6 接收机带宽不宜窄于 3 kHz。

A. 7. 12 外业工作还应符合下列规定：

1 根据现场工作条件选择水平布置装置和垂直布置装置，水库大坝隐患探测宜选用水平布置装置。

2 根据工作任务和现场条件布置测线或测网，测线宜平行大坝轴线布置。

3 根据探测水平定位精度要求确定测线、测点间距，测线间距宜为 5 m~20 m，测点间距宜为 5 m~20 m。

4 供电电缆应远离测区边缘，距离应大于测区边长。

5 供电电流宜采用直流电或低频交流电，并避免采用电网工频。

6 供电电流不宜小于 0.5 A。

7 数据采集前，应设置基站并监测磁场变化。

8 不宜在雷雨天气进行野外作业，如遇雷电应迅速关机并断开仪器接线。

9 班报应记录测区内金属管道、金属栏杆、电缆等物体的分布情况。

10 重复观测和检查观测应符合下列规定：

1) 出现异常或曲线畸变的测点应重复观测。

2) 当重复观测点的均方相对误差大于 10% 时，应查明原因并消除误差，必要时可移动点位进行重测并记录。

3) 每个测区的检查点不应少于测点总数的 5%。

4) 检查测点应在测区均匀分布，异常地段、可疑点、突变点应设检查测点。

5) 单个测点的观测、重复观测或检查观测曲线形态应一致。

6) 测线或测区检查的总均方相对误差不应大于 10%。

A. 7. 13 数据处理和资料解释还应符合下列规定：

1 现场工作完成后应及时整理原始资料，确保测点、重复观测点、检查观测点的测试数据合格。

2 整理测区全部测点或测线的曲线记录。

3 剔除不符合质量要求的数据，并进行系统分析和评价，确定合理的滤波、圆滑、校正等预处理方法技术。

4 对比分析处理前后各测点和测线的数据，必要时可调整方法和参数重新处理。

5 应结合地质资料、现场记录及已有物探成果进行定性解释。

6 在定性解释的基础上进行反演与定量解释，结合已有资料和电性参数确定背景值和目标体的划分标准，确定隐患的空间分布。

7 数据反演计算过程中应选择不同的反演方法和参数，对比分析不同反演方法的结果，并与已知资料对比，确定合理的反演结果。

8 成果图件应包括磁电阻率分布图、定性解释成果图，进行反演和定量解释时，还应包括反演成果图和定量解释成果图。

A.8 声波探测方法

A.8.1 声波探测方法在本标准中主要指超声波法或超声波脉冲法。

A.8.2 声波探测法主要适用于结构隐患探测中的混凝土结构、金属结构安全隐患探测。

A.8.3 外业工作应符合下列规定：

1 依据探测要求和测试操作条件，确定隐患缺陷测试的部位。

2 测位混凝土表面应清洁、平整，必要时可用砂轮磨平或用高强度的快凝砂浆抹平。抹平砂浆必须与混凝土黏结良好。

3 在满足首波幅度测读精度的条件下，应选用较高频率的换能器。

4 换能器应通过耦合剂与混凝土测试表面保持紧密结合，耦合层不应夹杂泥砂或空气。

5 检测时应避免超声传播路径与附近钢筋轴线平行，如无

法避免，应使两个换能器连线与该钢筋的最短距离不小于超声测距的 $1/6$ 。

6 检测中出现可疑数据时应及时查找原因，必要时宜进行复测校核或加密测点补测。

A.8.4 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 根据不同的缺陷类型，对声速、波幅、主频值等声学参数进行统计和判断。

2 成果应给出混凝土隐患的性质、位置、范围及尺寸等信息，以便进行技术处理。

A.9 机器视觉测量法

A.9.1 机器视觉测量可选用相机、红外摄像机、激光雷达等。

A.9.2 适用范围宜符合下列情况：

1 机器视觉测量法可应用于坝体、坝基渗流出逸区、坝体裂缝、坝体不均匀变形隐患探测。

2 机器视觉测量设备宜搭载在无人机或车辆上使用，视觉可见度良好。

A.9.3 数据处理与成果解译应符合下列规定：

1 在具备机器处理条件下宜采用智能系统处理图像、点云等探测成果。

2 在不具备机器处理条件时，可采用人工方式处理图像、点云等探测成果。

3 探测成果应包括隐患的位置、形态、规模等参数的统计表，宜将图像、点云、轨迹等原始探测数据存档以备后查。

A.10 车载隐患探测法

A.10.1 车载隐患探测法是通过将多种物探、测绘方法集成于车载平台上，实现多种方法同时探测、现场研判数据，能够大幅提升探测效率。

A.10.2 适用于平原水库或具备车辆通行条件的大坝隐患快速

普查和应急探测。

A. 10.3 仪器性能应符合下列规定：

1 车载隐患探测装备应搭载两种及以上的探测设备，探测设备可同时工作，并应配有数据处理平台，可在现场快速研判结果。搭载的设备性能应能具备一定的互补性，如浅层探测与深层探测互补，探测结果应能够对比解释。

2 搭载设备优选探地雷达、瞬变电磁。搭载设备性能应符合各自的技术要求，还应支持连续拖曳式测量。

3 车载平台上宜搭载视觉测量设备，同步探测大坝的外部病害。

4 装备宜具备标记装置，可将隐患位置通过坐标记录，也可在现场进行实地定位。

A. 10.4 外业工作应符合下列规定：

1 探测场地应具备车辆通行条件。

2 探测区域内不宜探测高电导率屏蔽层下的隐患。

3 测区内不宜有大范围的金属构件或无线电射频等较强的电磁干扰。

A. 10.5 数据处理与资料解译应符合下列规定：

1 探测装备应配有数据处理平台，可在现场快速研判结果。

2 探测装备宜配备通信设施，以实现探测结果的远程传送。

3 数据的解译与处理应分别符合所搭载的具体设备要求。

附录 B 探测钻孔封孔技术要求

B.0.1 探测钻孔封孔宜采用封填法或回填法。封填法应按操作程序使用风干黏土球、水泥砂浆等特定材料对钻孔进行封堵；回填法应将钻孔取芯按照原始地层顺序回填到钻孔中并压实。

B.0.2 封孔方法与材料选择应根据土层性质合理选择，并应符合下列规定：

1 土石坝孔段按照“以土还土、以砂还砂”的原则，黏性土、粉土、砂壤土及坝基以黏性土为夹砂层应采用风干黏土球封孔；坝基砂层、砂卵石层可采用回填法，当孔段芯样不足时可采用中、粗砂封孔，也可采用风干黏土球封孔。

2 混凝土坝、砌石坝孔段宜采用岩芯回填法或水泥砂浆封填法封孔。

3 坝基、近坝岸坡黏性土层、碳酸盐岩层孔段应采用封填法封孔；砂性土、砂卵石层、非碳酸盐岩层孔段可采用回填法封孔，也可与封填法联合使用封孔。

4 当采用纯水泥浆、水泥黏土浆等其他新材料封孔时，应经试验研究论证后方可采用。

B.0.3 回填法封孔应符合下列规定：

1 可使用钻探机具等作为回填工具；孔内有套管时，应起拔套管并与回填封孔同步作业。

2 宜按原始坝体坝基填土顺序依次将钻孔芯样投入孔内，单个芯样长度不宜超过 0.5 m；芯样不足时，宜按 B.0.2 条的有关要求回填。

3 单次回填的长度不宜超过 2.0 m，并在回填前、后测量孔深；孔口段回填应捣实，孔口捣实段长度应不小于 3.0 m。

4 探测钻孔回填过程中若发现架空现象时，应用钻具捣实后再继续回填作业。

B.0.4 风干黏土球封填法应符合下列规定：

1 可选用穿心锤或击实器击实；穿心锤击实可使用重型或超重型动力触探试验的标准落锤，将圆锥探头替换为平头击实；击实器可利用套管或钻具充装铁砂、钢粒加工制作，直径宜小于封填钻孔孔径一个径级，长度为 2.5 m~3.5 m，质量不小于 100 kg。

2 单层封填一次投入黏土球不宜过多，以免造成架空现象，用击实器或穿心锤击实到预定的单层厚度并记录黏土球用量与击实后单层厚度，重复操作直至完成封孔。

3 单层封填厚度根据击实方法、击实能量等确定，并宜控制在 0.2 m~0.6 m，一次投入黏土球不宜过多，以免造成架空现象。

4 制作黏土球所用的黏土黏粒含量宜为 20%~40%，塑性指数宜大于 17，干密度不应低于 1.4 g/cm³，直径宜为 2.0 cm~3.0 cm。

5 单层封填黏土球用量宜根据钻孔孔径和单层封填厚度确定，并不低于表 B.0.4 的规定；软土孔段封填时，封填黏土球用量不宜小于表 B.0.4 建议数值的 2 倍。

6 宜用清水置换钻孔内浓泥浆，直至黏土球能顺利下沉到达预定位置为止，在封填过程中应控制封孔速度，防止孔内泥浆变浓而影响封孔质量。

表 B.0.4 不同孔径单层封填厚度黏土球用量

孔径 /mm	单层封堵厚度/m				
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
	黏土球用量/kg				
91	4.6	7.0	9.0	11.4	13.7
110	6.7	10.0	13.3	16.6	20.0
130	9.3	14.0	18.7	23.3	28.0
150	12.4	19.0	24.7	31.0	37.1
注：本表黏土球封堵用量取值为单层封堵体填土质量的 2.5 倍，黏土球干密度取 1.4 g/cm ³ 。					

B.0.5 水泥（砂）浆封填法应符合下列规定：

1 水泥浆封填宜采用泥浆泵灌注法，水泥砂浆封填宜采用水泥砂浆泵灌注法或导管灌注法。

2 制作水泥（砂）浆的水泥可采用 42.5 级普通硅酸盐水泥，砂可采用细砂。水泥（砂）浆中宜加入膨胀剂。

3 孔径小于等于 150 mm 的钻孔宜采用水泥浆封孔，深度小于 20 m 的干孔可用稠水泥浆，其他钻孔水灰比宜为 0.5~0.6。

4 孔径大于 150 mm 的钻孔宜采用水泥砂浆封孔，水泥砂浆配合比（清水：水泥：细砂），采用导管输送时宜为 0.4：1：1，采用水泥砂浆泵输送时宜为（0.5~0.6）：1：1。

5 封孔前，应用清水冲洗钻孔，清除孔内沉淀物，直至孔口返水基本变清为止；灌注水泥（砂）浆前，应先泵送或倒入清水检查钻具或导管，确认畅通；下入套管的钻孔进行封填时，应边起拔套管边灌注水泥（砂）浆。

6 灌注水泥（砂）浆时，输送器或导管应置于距孔底或封孔栓塞 0.3 m~0.5 m 处；封填孔段小于 2.0 m 时，在输送水泥（砂）浆过程中不应随意提升输送器或导管；封填孔段大于等于 2.0 m 时，应边灌注水泥（砂）浆边提升输送器或导管，输送器或导管不应提出水泥（砂）浆液面之上。

7 水泥（砂）浆灌注完后，应注入适量的清水，将输送器或导管内水泥（砂）浆液全部压送替出，再提升输送器或导管并进行清洗。

B.0.6 存在溶洞发育、承压水等特殊情况，应对封孔方案进行专门论证设计。

B.0.7 封孔过程中应边封孔边做好记录，施钻单位的机长、操作人员和记录员等应在封孔记录表上签字。

B.0.8 封孔完成后宜对封孔质量、封孔记录等进行检查验收。黏土球封孔宜选择挖孔检查或套孔检查，水泥（砂）浆封孔宜选择表观检查。

附录 C 成果报告内容提纲

- 1 概述
 - 1.1 工程概况
 - 1.2 工作背景
 - 1.3 探测依据
- 2 隐患排查
 - 2.1 排查成果
 - 2.2 隐患初步分析
- 3 探测方法与技术
 - 3.1 探测方法
 - 3.2 探测原理
 - 3.3 探测仪器设备
- 4 现场工作
 - 4.1 测线布置
 - 4.2 实施情况
 - 4.3 质量控制
 - 4.4 验证情况
- 5 探测成果分析
 - 5.1 原始资料与评价
 - 5.2 资料处理与解译
 - 5.3 异常的定性和定量分析
 - 5.4 隐患推断解译
- 6 结论与建议
 - 6.1 结论
 - 6.2 建议
- 7 附录（含附图与附表，包括但不限于下列图表）：
 - 7.1 附表：工程特性表、隐患排查表、隐患统计表、工作量

统计表

7.2 附图：水库平面布置图、大坝典型断面图、渗透剖面图、测线布置图、探测成果图、隐患分布图

标准用词说明

标准用词	严格程度
必须	很严格，非这样做不可
严禁	
应	严格，在正常情况下均应这样做
不应	
宜	允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做
不宜	
可	有选择，在一定条件下可以这样做

中华人民共和国水利行业标准

水库大坝隐患探测技术规程

SL/T 827—2024

条 文 说 明

制 定 说 明

SL/T 827—2024《水库大坝隐患探测技术规程》，经水利部2024年8月1日以第16号公告批准发布。

本标准在制定过程中，编制组根据新阶段水利高质量发展对水库大坝隐患探测技术的要求，总结了我国水库大坝隐患探测方法选择及作业过程中存在的问题和实践经验，对当前水库大坝隐患探测工作中的无损探测方法选择、应用场景、适用条件、探测过程等加以规范，并推荐鼓励先进适用探测装备与技术的应用，旨在提升广大设计、施工、科研、管理等单位有关人员各类探测技术方法的掌握水平。

为便于广大设计、施工、科研、管理等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《水库大坝隐患探测技术规程》编制组按照章、节、条、款、项的顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	68
3	基本规定	69
4	渗流安全隐患探测	75
5	结构安全隐患探测	107
6	金属结构安全隐患探测	117
7	成果报告	118

1 总 则

1.0.1 本标准是在总结我国实施水库大坝除险加固工作以来积累的隐患探测经验、开展有关专题研究、广泛调查研讨和征求意见的基础上编制的。主要针对土石坝、混凝土坝等不同坝型的水库大坝工程渗流、结构等典型隐患特征，推荐了适用的探测技术装备和探测方法，对探测方法、资料解译分析、成果报告编写提出了明确具体要求，进一步规范地球物理探测方法在水库大坝隐患探测中的应用，保障隐患探测成果质量。

1.0.2 如无特别指出，本标准中“大坝”为广义上的大坝，除永久性挡水建筑物外，还包括泄水、输水、过船（木）等建筑物和金属结构，以及影响大坝安全的近坝岸坡。我国现行有关水库大坝的设计、施工、监（检）测等规范大多只适用于大中型水库的1级、2级、3级坝，应用本标准对小型水库4级、5级坝进行隐患排查和探测时，可能存在引用标准与适用范围不相匹配的问题，除特别说明外，小型水库大坝可以参照大中型水库大坝的相关规范执行。

1.0.3、1.0.4 本标准优先推荐技术相对成熟、隐患识别准确率高、抗干扰能力强、效率高、探测成本相对低的地球物理探测技术，如无特别需要，不建议使用可能影响人身安全和生态环境的探测技术，如地震探勘涉及的爆炸物激发震源、示踪法涉及的放射性物质等。

3 基本规定

3.1 工作准备

3.1.2 水库大坝设计、施工和运行管理等相关资料对提高隐患探测质量十分重要，在开展隐患探测前，建议充分搜集、深入分析上述资料。

3.1.3 隐患排查是隐患探测的重要指引，在开展隐患探测前进行现场查勘，查阅工程设计、施工与运行资料，与管理人员或熟悉工程情况的人员座谈等，重点关注水库大坝防洪、渗流、坝体结构、金属结构等安全问题。

根据 SL 551《土石坝安全监测技术规范》、SL 601《混凝土坝安全监测技术规范》、SL 764《水工隧洞安全监测技术规范》、SL 768《水闸安全监测技术规范》等规范要求，土石坝、混凝土坝、砌石坝、面板堆石坝及泄（输）水建筑物、金属结构隐患排查要点分述如下，其他堆石混凝土、胶凝材料等新坝型可以参照执行。

（1）土石坝。

①渗流安全隐患排查要点。

a. 坝基：是否存在库水位不变，坝基渗流量持续增加；坝基渗漏水出现浑浊或有细颗粒带出；坝后侧沼泽化、漏水、管涌、冒水翻砂、塌陷或松软隆起，或伴有坝前漩涡现象；监测数据异常或渗透坡降不满足要求。

b. 坝体与防渗体：是否存在上游坝坡塌陷或伴有坝前漩涡、聚集漂浮物；下游坝坡大面积散浸、松软隆起或塌陷；下游坝坡出现集中渗漏点，水质浑浊或有细颗粒带出，或出逸点高于反滤体顶高程；下游坝脚反滤体失效；库水位不变，渗流量或坝体渗流压力持续增加；监测数据异常或坝体渗透稳定性不满足要求；防渗面板漏水、止水失效。

c. 下游排水体及反滤料：截渗和减压设施有无破坏、穿透、淤塞等现象；排水反滤设施是否存在淤堵、渗水骤增骤减和浑浊现象；是否存在坝体浸润线抬高、局部位势集中、下游坝坡出现渗漏现象。

d. 穿坝建筑物：坝下（内）埋管与坝体接触部位是否有明显渗流，出水浑浊或有细颗粒带出；开敞式建筑物侧墙与坝体连接部位是否有明显渗流，出水浑浊或有细颗粒带出；建筑物出口与坝体接触部位是否有明显的出水口，水流呈泉状涌出；坝下（内）埋管是否因不均匀沉陷发生断裂或止水破坏，出现内水外渗或外水内渗现象；建筑物进、出口与坝体连接部位是否出现塌坑且土体湿软；涵管出口附近是否存在明显渗漏，涵管处上下游坝坡局部是否出现塌陷现象。

e. 岸坡（绕坝渗漏）：坝体与岸坡结合部是否出现明显漏水且有细颗粒带出、局部土体隆起或有细颗粒带出；坝体与岸坡结合部上下游出现塌坑；库水位不变下，绕坝渗流量或渗流压力是否持续增加；坝体与岸坡结合部是否存在明显的出水口，且水流呈泉状涌出。

f. 其他：是否存在由于水库周边及库底岩溶未进行防渗处理或处理不完善，致使大坝出现岩溶渗漏，造成大坝上游或下游坝坡出现塌陷或蓄水困难；是否存在由于坝基存在可溶成分，地下水侵蚀作用导致坝基透水性增大，产生明显渗漏；是否存在由于白蚁、獾、鼠等动物在大坝浸润线以上及水位变化区筑巢，形成渗漏通道，危及大坝安全。

②结构安全隐患排查要点。

a. 坝顶：是否存在塌陷、积水、路面起伏等情况；坝体与两坝肩及穿坝建筑物接触部位、防浪墙与防渗体结合部是否存在裂缝；心墙坝防渗心墙和坝壳接触部位在坝顶处是否出现裂缝。

b. 上下游坝坡：上游护坡是否出现风浪淘刷、剥蚀严重，松动脱落、架空坍塌、错动或开裂；上游护坡是否出现严重冻胀、鼓胀隆起、坍塌下滑；下游护坡是否出现严重冲刷，形成雨

淋沟、陡坎、坍塌；面板坝防渗面板是否出现挤压破坏、贯穿性裂缝、脱空、塌陷等现象，防渗面板分缝止水、周边缝止水是否出现破坏引起渗漏。

c. 坝坡稳定：是否存在水库高水位运行、大坝渗漏等引发的下游坝坡滑坡迹象；是否存在水库快速泄（放）水、风浪淘刷引发的上游坝坡滑坡迹象；是否存在地震引发的坝坡滑坡迹象；穿坝建筑物和坝肩附近是否存在坝坡滑坡迹象。

d. 近坝岸坡：坝肩、溢洪道、输（泄）水洞进出口附近是否存在岸坡滑坡迹象。

e. 泄水、输水建筑物：溢洪道闸室结构是否出现严重变形，致使闸门和启闭设施卡阻；溢洪道底板及两侧翼墙或边墙是否出现严重变形，产生裂缝漏水；放水涵（管）进口结构是否发生变形，致使闸门漏水，启闭设施失灵；放水涵（管）进口是否发生断裂、洞身严重变形，裂缝漏水；放水涵（管）启闭塔是否出现变形裂缝等。

f. 坝体与混凝土建筑物的连接：土石坝与混凝土坝、溢洪道、船闸、涵管等建筑物的连接部位，接触渗径、土体密实度、反滤设计是否满足规范要求；接触面附近是否因不均匀沉降而产生裂缝脱开，或出现渗漏现象。

g. 其他：白蚁及其他动物在是否在坝体内筑巢，形成蚁（兽）道和蚁（兽）穴，危及大坝结构安全；高土石坝坝料分区是否符合变形协调和反滤设计准则等。

（2）混凝土坝与砌石坝。

①渗流隐患排查要点。

a. 坝体：上游止水设施是否完好、有无贯穿性裂缝；下游面有无渗水、析钙；下游坝趾渗漏水量、颜色、浑浊度及其变化状况。廊道内有无漏水、射水、溶蚀、剥落；止水是否完好；排水孔有无堵塞；排水量、颜色、浑浊度及其变化状况。坝肩区有无溶蚀及绕渗等情况。

b. 坝基：坝基渗漏量是否在较高库水位年度内，呈持续骤

增态势，且随着时间推移无明显回落；是否存在几个年度内库水位无明显变化，气温与库水位的组合时段也大致相同，而坝基年均渗漏量却持续增大现象；是否存在坝基渗漏量或扬压力短时段内随库水位上升而发生突变，并伴有泥沙污物排出；是否存在坝基渗漏量短时段内突变的同时，坝体、坝基发生异常变形。

c. 近坝库岸：库区水面是否出现漩涡、冒泡、严冬不封冻现象；岸坡表面排水设施或排水孔是否正常工作；坝肩防渗帷幕后水位或渗压是否出现突变或持续增大现象。

②结构隐患排查要点。

a. 坝体：防浪墙有无裂缝、错动、沉陷；相邻坝段之间是否出现错动；伸缩缝开合情况；下游坝趾附近有无冲刷、淘刷、塌陷等现象。坝体混凝土是否存在裂缝、露筋、剥落、溶蚀等老化病害；砌石结构有无开裂、渗漏、砂浆溶蚀等显现象。

b. 坝基及坝肩：基础岩体有无挤压、错动、松动和鼓出；坝体与基岩（或岸坡）接合处有无错动、开裂、脱离等现象；两岸坝肩区有无裂缝、滑坡、沉陷等情况。坝基是否发生劣化、结构面抗剪强度降低情况。

c. 近坝库岸：是否有岸坡冲刷、塌陷、裂缝、滑移、冻融迹象；是否存在高边坡和堆积体。

（3）泄、输水设施。

①溢洪道隐患排查。

a. 溢洪道进水段有无堵塞，上游拦污设施是否正常；两侧有无滑坡或坍塌迹象；护坡是否有裂缝；沉陷、渗水；流态是否正常。

b. 溢洪道堰顶或闸室、闸墩、边墙、胸墙、溢流面、底板、工作桥等处有无裂缝、渗水、剥落、冲刷、磨损现象，排水孔及伸缩缝是否完好。

c. 泄槽有无气蚀、冲蚀、裂缝和破损。

d. 消能设施有无磨损、冲蚀、裂缝、变形和淤积。

e. 下游河床及岸坡有无冲刷、淤积。

②其他泄水、输水设施隐患排查。

a. 进水口和引水渠道有无淤堵、裂缝及损坏；进水口边坡有无裂缝及滑坡迹象。

b. 进水塔（或竖井）有无裂缝、渗水、空蚀或其他损坏现象；塔体有无倾斜或不均匀沉降。

c. 洞（管）身有无裂缝、坍塌、鼓胀、渗水、空蚀等现象；放水时洞内声音是否正常。

d. 出水口水流形态、流量是否正常，有无冲刷、磨损、淘刷；出水口有无淤堵、裂缝及损坏；出水口边坡有无滑坡迹象；停水期是否有渗漏水出现。

e. 下游渠道及岸坡有无异常冲刷、淤积和波浪冲击破坏等现象。

（4）金属结构安全隐患排查。

金属结构安全隐患排查主要包括闸门、启闭机、电气及自动控制设备、压力钢管及闸阀等。

3.2 现场探测

3.2.3 水库大坝埋设安装的金属体、电缆等，会影响探测效果，布置测线时尽量避开。桩号、轴距、高程是确定大坝位置的重要参数，建立测区、测线、测点位置与大坝桩号、坝轴线、高程的对应关系，有助于隐患位置确定与分析。

3.2.4 重复探测指不改变工作条件，进行 2 次或 2 次以上的探测。

3.2.5 检查探测指改变接地条件的重复探测，或有目的地另行指定专人对已测量过的部分测点或剖面进行抽测。

3.3 资料整理与解译

3.3.2 常用物性参数参照 SL/T 291.1—2021《水利水电工程勘察规程 第 1 部分：物探》附录 C 执行。

3.3.3 隐患的范围与严重程度，既要在探测成果图中合理反映，

又要能与现场隐患排查、运行管理等情况呼应，两者互相验证，以确保探测结果的准确性。

3.3.4 隐患探测资料的解译是在齐全的物理资料和地质资料基础上进行定量解译，不同的隐患探测方法采用了不同的物理参数，而这些参数有的与地层对应，有的可能不完全对应，由此可能导致不同解译结果，需通过对比分析确定。

4 渗流安全隐患探测

4.1 一般规定

4.1.1 渗漏是水库大坝的常见安全隐患，其渗漏入水口、渗漏水来源以及渗漏路径可以采用探测、钻探等方法探明。

4.1.2 为避免对水库大坝造成损伤，建议优先使用无损探测方法，必要时可以采用坑探、钻孔勘察、压（注）水试验等地勘手段进行探测和验证。

4.2 土石坝

4.2.2 坝体、坝基渗漏探测

(1) 坝体渗漏的范围与特征一般有以下特点：

- a. 上游坝坡塌陷或伴有坝前漩涡。
- b. 下游坝坡大面积散浸、松软隆起或塌陷。
- c. 下游坝坡出现集中渗漏点，水质浑浊或有细颗粒带出，或出逸点高于排水反滤体顶高程。
- d. 下游坝脚反滤体失效。
- e. 相同水库水位条件下，渗流量或坝体渗流压力持续增加。
- f. 监测数据异常，坝体渗透坡降不满足规范要求。
- g. 面板坝的防渗面板接缝破损、面板错台裂缝、面板塌陷。

(2) 坝基渗漏的范围与特征一般有以下特点：

- a. 坝基渗漏是指水库蓄水后由于上下游水头差，使水库中水沿坝基岩石的孔隙、裂隙、溶洞、断层等处向下游的渗漏。
- b. 坝基渗漏多发生在未进行防渗处理或防渗措施不当之处。
- c. 相同水库水位条件下，坝基渗流量持续增加。
- d. 坝基渗漏水出现浑浊或有细颗粒带出。
- e. 坝后冒水翻砂、塌陷或松软隆起，或伴有坝前漩涡现象。
- f. 监测数据异常，坝基渗透坡降不满足规范要求。

（3）坝基渗漏水可能来自于上游库水、两侧山体水以及河床下承压水，渗漏水来源不同，其处置方法和危害程度也存在差异，因此，对于坝基渗漏，确定渗漏水来源是十分有必要的，但考虑其工作的复杂性和难度，工作时可以采用排除法对库水来源进行分析。

土石坝渗流安全隐患探测常用的方法及特点等见表 1。

表 1 土石坝渗流安全隐患探测常用的方法及特点

分类	技术方法	探测原理	适用范围	局限性
电法	高密度电法	视电阻率差异	渗漏区域探测	电极接地，布置测线长
	自然电场法	自然电位差异	形成漏洞的渗漏区域探测	电极接地，容易受游散电流干扰
	拟流场法	电流密度差异	渗漏入口探测	无法探测渗漏通道
电磁法	探地雷达法	介电性能差异	浅部渗漏探测	高电导区域衰减快，探测深度不足
	瞬变电磁法	电阻率差异	大深度渗漏普查	浅层存在盲区
	磁电法	感应磁场差异	坝体渗漏区域	无法探测渗漏入口
	多分量雷达（共中心点法）	电场强度、磁场强度	坝体渗漏区域精细化探测	布置测线长
地震法	微动法	介质波速差异	较大范围的渗漏区域探测	敏感性不足
	地震波反射法			受表层结构干扰大
层析成像法	弹性波 CT 法	波速差异	精细化探测渗漏通道	需钻孔，有损探测
	电磁波 CT 法	介电性能	精细化探测渗漏通道	需钻孔，有损探测
其他方法	人工探视法	直接观察	背水面巡查出逸水、大面积潮湿迎水面潜水观察渗漏入口	劳动强度大
	红外热成像法	温度差异	背水面巡查出逸水、大面积潮湿	准确度较低，只能观测表面有温度的渗漏出水区域

电法探测包括电阻率法（电剖面法、电测深法、高密度电法）、充电法、自然电场法、激发极化法、拟流场法；电磁法探测包括频率测深法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁探测法、探地雷达法等；地震法探测包括地震反射波法、微动法等。层析成像法包括弹性波 CT 法、电磁波 CT 法；其他方法包括人工探视法、红外热成像法等。

单种探测方法的结果反映一种探测物理量，根据物理量是否异常判断大坝病害。由于库大坝往往多种隐患并存，环境较为复杂，且存在探测干扰源，单一探测方法可能导致误判和漏测。因此推荐采用两种及以上的物理探测方法进行探测，当条件允许时，建议在探测区域进行钻孔验证。

水库大坝受周边环境、附属设施等限制，测线布置需要根据现场情况因地制宜、灵活布置，测线、测点桩号位置要尽可能与大坝原设计中规定的桩号等位置信息对应，以便于对照分析。探测报告中，应当明确信号参量解译原则，对探测成果图的异常区域解译要全面，对于探测信号参量异常但经分析后为非隐患的部位要重点说明。

4.2.3 坝体入渗区域附近一般有明确的破损，因此可以采用人工探视、水下摄像等方式进行。对于面板坝，可以通过探测防渗面板破损情况确定渗漏入水区域，可以借助测试流速的方法对面板入渗区域进一步进行详查。

4.2.4 渗漏出逸区域一般多有明显的明流、冒水等现象，可以通过人工探视。渗漏出水区与坝体存在温度差异，可以借助红外热像成像法探测坝体温度场对其进行识别。

4.2.5 物理探测方法均有随深度增加分辨率下降的特点，因此，需根据目标体的深度选择合适的探测方法并确定合理的探测参数。

（1）大坝渗漏区域与其周围材料的介质电性差异较大，建议选用电法、电磁法。

（2）对于埋深大于 20 m 的渗漏病害，无损探测方法受辨能

力限制，很难直接探测。但渗漏病害通常会引起渗流场的畸变，可以通过探测渗流场畸变形态，结合监测资料等，确定渗流场畸变的区域，判定渗漏病害存在的坝段，再通过钻孔勘察、层析成像、入渗区域探测等进一步详查。

(3) 平原水库大坝长，一般坝顶、坝脚能够通车，为提高探测效率，可以选择车载探测平台进行快速探测。“南水·坤宁”车载堤防险情隐患快速探测成套技术装备包括综合探测指挥车和巡堤查险无人车组，通过创新时变和瞬变电磁波技术探测内部隐患，融合车载三维激光系统和云台全景摄像诊断外部险情，1 min 可以完成 100 m 堤防风险预报，能快速探明管涌、渗漏、崩岸等险情隐患，可以实现土石坝安全隐患高效准确探测。

(4) 物理探测结果一般存在多解性，除采用综合物探法进行相互印证外，可以采用钻孔勘察、压（注）水试验等地勘手段进行验证。

案例分析一：某土质堤坝高密度电法探测

(1) 图 1 为某均质土坝二级马道探测结果。从视电阻率云图上看，二级马道部位的视电阻率同一高度左右分布不均，右边区域较高，为高电阻率区域，左边区域较低，为低电阻率区域，且呈现单个整体低阻闭合区；下部总体上偏高，高电阻率区域为含水率较低区域，说明土层土性或密实度沿着水平方向分布不均匀，靠近 TS9+300 部位为含水率较高区域，靠近 TS9+444 部位为含水率较低区域。

(2) 图 2 为某均质土坝坝顶探测所得结果。从视电阻率云图上看，视电阻率在同一高度左右分布不均，左边区域和右边区域均较高，为高电阻率区域，中间区域较低，为低电阻率区域，在测线 58 m~69 m 区域、深度 5.5 m~13.4 m 范围呈现单个低阻闭合区，推测该区域土层土性含水率较高、土体相对偏软，可能存在渗漏通道。

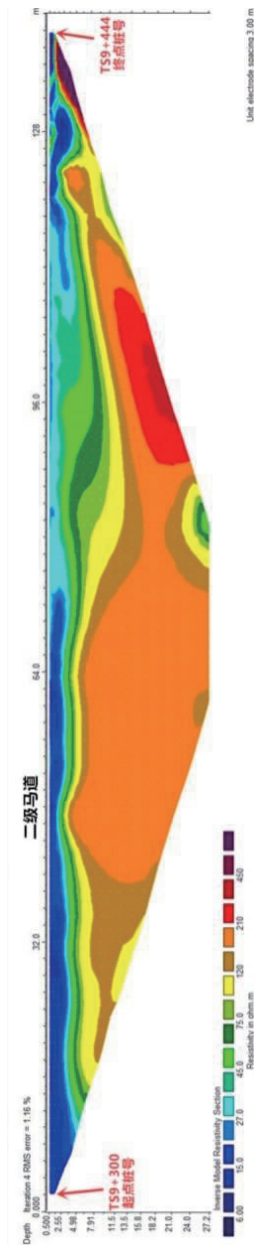


图 1 某坝段二级马道高密度电法结果

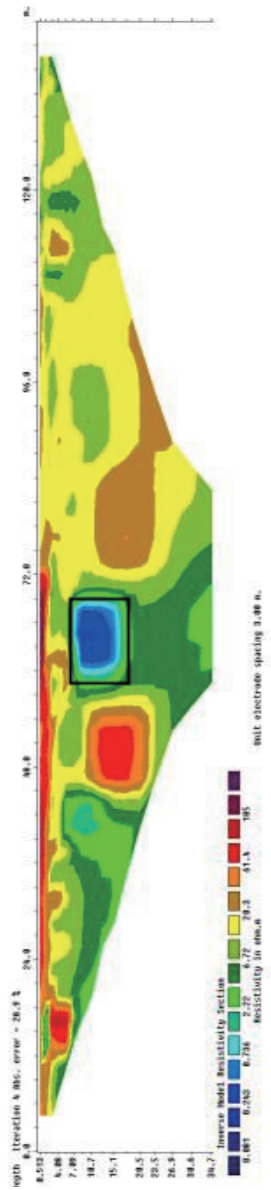


图 2 某坝段高密度电法探测结果

4.2.6 防渗心墙渗漏探测

1 防渗心墙出现渗漏时，心墙防渗体破损区域和正常区域波速通常存在较大差异，建议选择弹性波方法进行探测。

3 沥青心墙出现渗漏时，建议选择对渗漏水较敏感的电磁法进行探测。

案例分析二：某沥青混凝土心墙坝 1 : 10 原位物理模型

模型中按照实际大坝浇筑工艺，设置了 1 : 10 的物理模型，并在沥青心墙内设置了不同类型病害，采用探地雷达法获得了较好的探测效果。典型结果见图 3、图 4。图 3 是沥青混凝土心墙固结前地质雷达检测剖面图像，其中在第 14 层和第 15 层之间埋置了标定板，同样标定板在雷达探测剖面图像上显示反映强烈，沥青混凝土碾压分层界面清晰，根据雷达波反射波的显示特征，检测时该位置沥青混凝土碾压不密实，上下沥青混凝土未能融合一起，心墙内的空洞病害在雷达探测剖面图像上显示明显，裂缝病害模型显示不明显，仅裂缝 2 存在微弱显示，可以判断此时在熔融状态下预制的裂缝已经基本愈合。

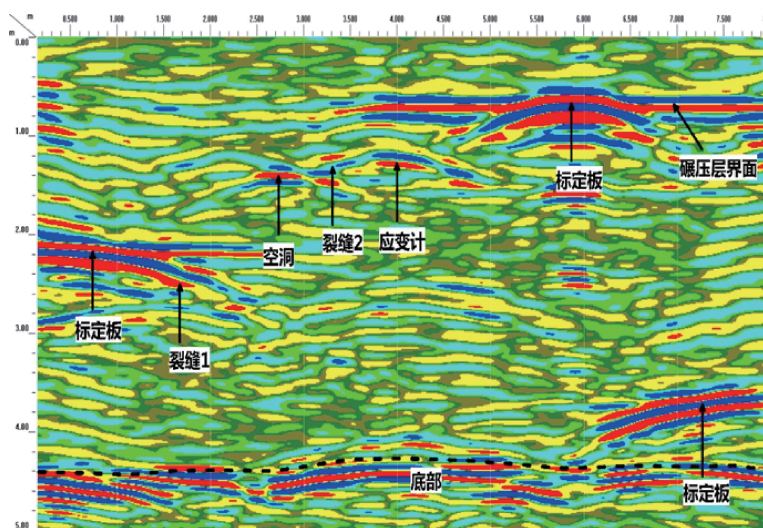


图 3 沥青混凝土心墙全断面雷达剖面图（固结前）

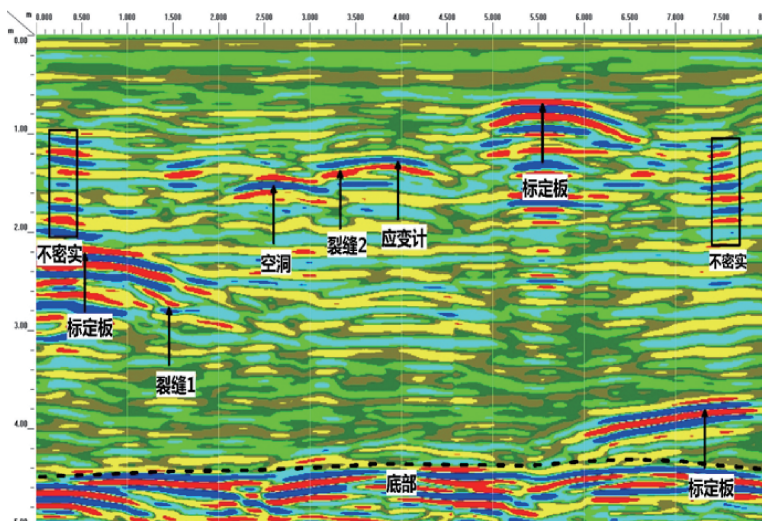


图 4 沥青混凝土心墙全断面雷达剖面图（固结后）

图 4 是沥青混凝土心墙固结后地质雷达探测剖面图像，探测时间相隔半年，经过了一个冬季，心墙已经完全固结。探测结果显示心墙内的标定板和空洞病害在雷达剖面图像上显示清晰，裂缝 1 和裂缝 2 病害模型在雷达剖面图像上信号微弱，碾压分层现象消失，分层浇筑过程中疑似不密实的雷达异常信号消失，说明沥青混凝土心墙已经完全融为一体，密实性增强。图 4 中心墙的两侧位置，心墙内出现强振幅散射信号，受场地条件限制，该位置沥青混凝土碾压不充分，固结后沥青混凝土局部出现不密实现象。

4 心墙搭接等部位目标区域小，但是渗漏病害的频发位置，建议选择 CT 扫描、注水、压水等对其进行探测。

4.2.7 面板防渗体系渗漏探测

1 防渗面板渗漏多伴随面板破损，可以采用人工潜水、水下摄影、声呐法等探测面板破损情况。

2 渗漏入口周边流速异常并有水流声，可以采用流速仪和

声呐法探测渗流入口。

4.2.8 坝肩渗漏探测

(1) 坝肩渗漏探测可以选择高密度电法、瞬变电磁法、层析成像法、拟流场法、磁电阻率法、示踪法、微动法探测，其布置方式如下：

a. 高密度电法探测建议选择对称四极装置；在测线端点处，应当使探测范围处于选用装置和布极条件所确定的有效范围之内；同一排列的电极应当呈直线布置。

b. 瞬变电磁法应当根据地形地质条件、探测目的选择重叠回线、中心回线、偶极、大定源回线、电性源等装置；可以选择点测或连续拖曳的方式进行探测。

c. 层析成像法包括弹性波 CT 法、电磁波 CT 法。

d. 拟流场法激发场的无穷远极应当布置在库区内水体中，并远离查漏区位置，距离建议为测区边长长度的 2~5 倍；出水点电极建议采用电极板，电极板入水面积建议为电极板面积的 $1/3 \sim 2/3$ 。

e. 磁电阻率法测线建议平行于坝体结构的轴向；应当根据任务水平定位精度要求确定测线、测点间距。

f. 示踪法是通过向上游水体投放可以追踪的离子或颜料，查找渗漏水来源及与库水的连通情况。

g. 微动法探测区域较为狭窄时，应当选择二维阵列采集阵列，二维阵列可以采用圆形阵列（嵌套三点圆形阵列等）、“十”字阵列、菱形阵列、L 形阵列和不规则密集阵列等。

(2) 综合测井和钻孔勘察可以对局部区域进行精细化探测，也可以作为验证的手段。

(3) 坝肩渗漏是土石坝既多发又特殊的病害，渗漏水可能来自于上游库水、也可能来自于两侧山体渗水，受场地条件限制，坝肩部位探测测线延伸难度可能较大，使用高密度电法等测线布置方法，两侧存在盲区，采用测网布置并进行电阻率反演能在一定程度上减少盲区。

案例分析三：某土坝渗流安全隐患探测

图 5 是某土石坝高密度电法数据处理成果剖面图像，上图是测量视电阻率拟断面图，中间为正演视电阻率拟断面图，下图是反演模型电阻率断面图。高密度电法资料的解释主要依据围堤内各介质的电阻率差异性来圈定电性异常范围，根据异常特征在判别异常所对应的地质属性，如含水体、高阻体。土石坝一般渗漏点相对于围堤是呈现低阻特征，在高密度电法成果剖面图上显示为低电阻异常区。图中是桩号 0+10 m~0+620 m 段高密度探测剖面，探测发现 5 处低阻异常区，中心位置分别在 0+106 m、0+196 m、0+236 m、0+286 m、0+406 m 段，表明这几处低阻异常区的土体含水率相对较高，推断低电阻率特征区是坝体可能存在的渗水区。

案例分析四：某土坝渗流安全隐患探测

探测主要针对大坝的右坝肩渗漏，桩号范围 0+000 m~0+430 m，其平面布置图见图 6。探地雷达测线布置在大坝的坝顶路面和下游坝坡面和马道，测线采用测绳定距离；瞬变电磁测线与探地雷达测线重合。

探地雷达布置了 16 条测线（R1~R16），当坝体密实不存在渗漏时，雷达波同相轴连续，波形、波向和波幅一致性较好，电磁波衰减均匀，没有畸变等异常雷达波同相轴存在。当坝体存在渗漏区时，渗漏区雷达波同相轴发生改变，雷达波同相轴不连续，波形、波向和波幅发生改变，雷达波在渗漏区呈现粗波形，低频低速特征。瞬变电磁布置 2 条测线（S1、S2），坝体密实时，电阻率剖面图上坝体电阻率数值分布均匀，渗漏区呈现低电阻率区域。

（1）探地雷达探测成果。

本次探测共发现 12 处雷达波异常区，其分布特征如图 7~图 18 所示。

图 7 和图 8 是坝顶测线 R2 雷达异常剖面图像，测线采用 20 MHz 天线进行探测，最大探测深度达到 35 m，但随着深度的

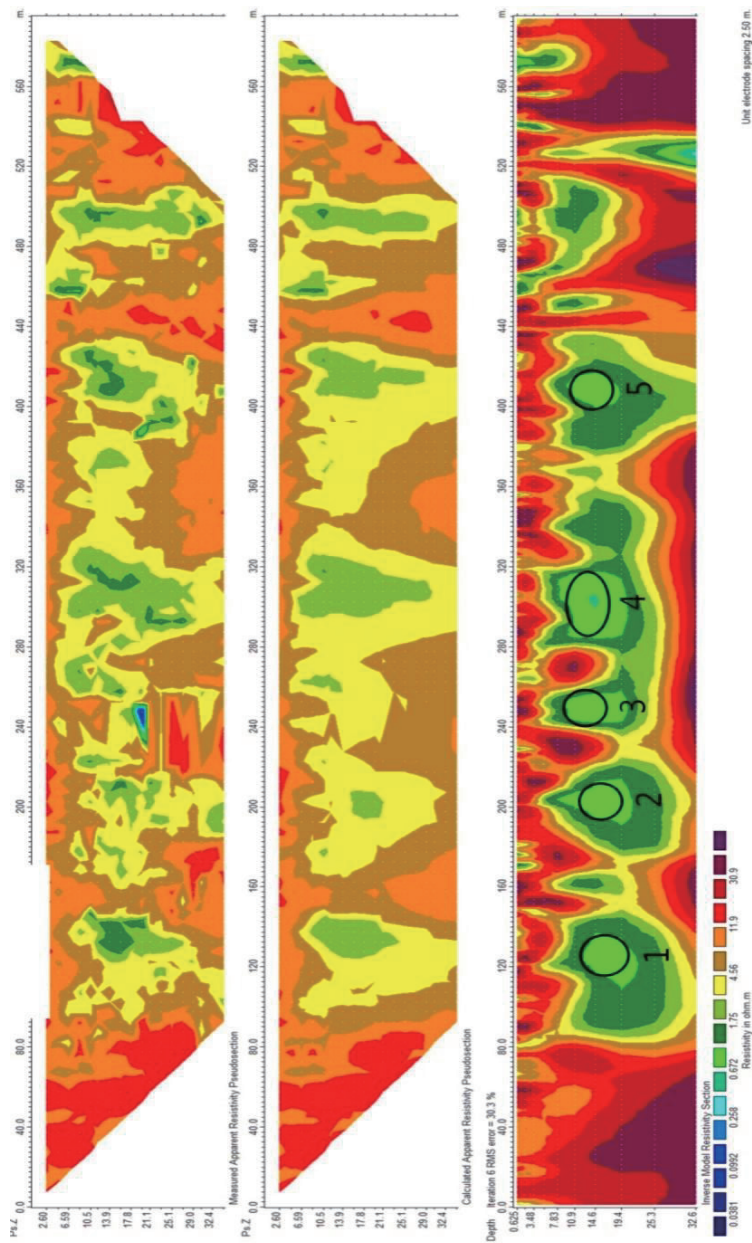


图 5 高密度电法反演成果图

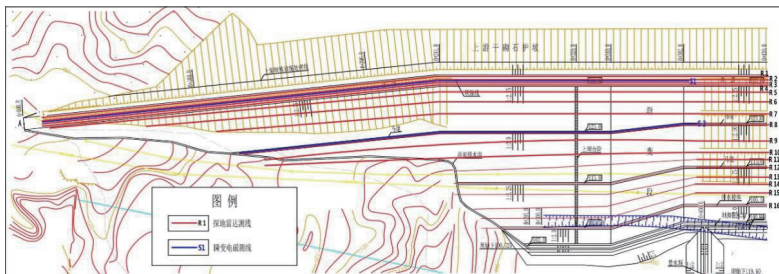


图 6 大坝右坝肩平面布置图

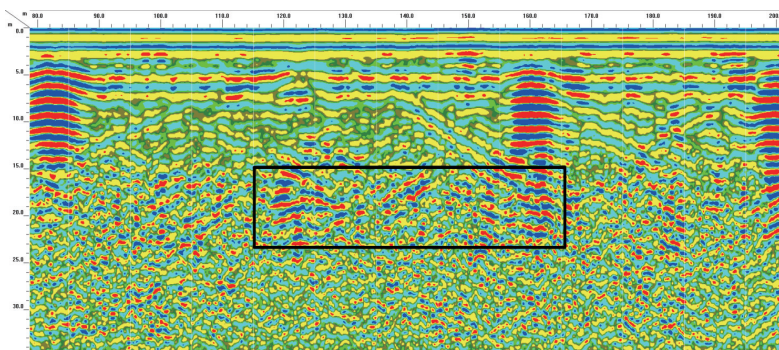


图 7 测线 R2 雷达异常剖面图 (20 MHz)

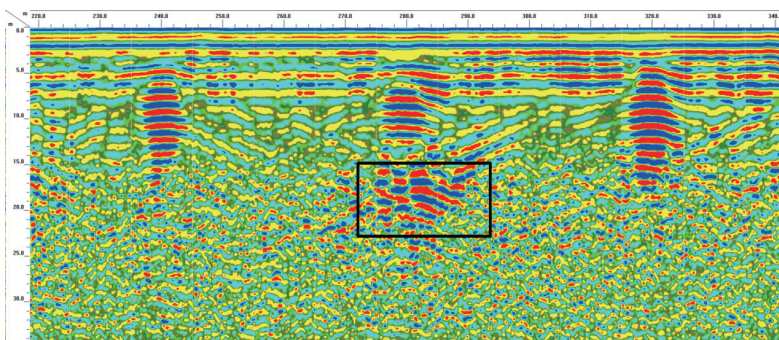


图 8 测线 R2 雷达异常剖面图 (20 MHz)

增加，雷达波能量衰减快，其中测线水平距离 115 m~165 m、大约埋深 15 m~22 m 的区域范围，局部雷达波反射波能量强，雷达波振幅变强，推测该区域坝身土体局部欠密实，可能存在渗漏；水平距离 270 m~300 m、大约埋深 15 m~22 m 的区域范围，雷达反射波能量强，雷达波的波形变粗，振幅变强，呈现低频低速特征，根据电磁波传播理论，推断该区域坝体可能存在渗漏。

图 9 和图 10 是坝顶测线 R3 雷达异常剖面图像，同样采用 20 MHz 天线进行探测。其中测线水平距离 115 m~165 m、埋深 15 m~24 m 的区域范围，雷达波同相轴不连续，散射能量强，

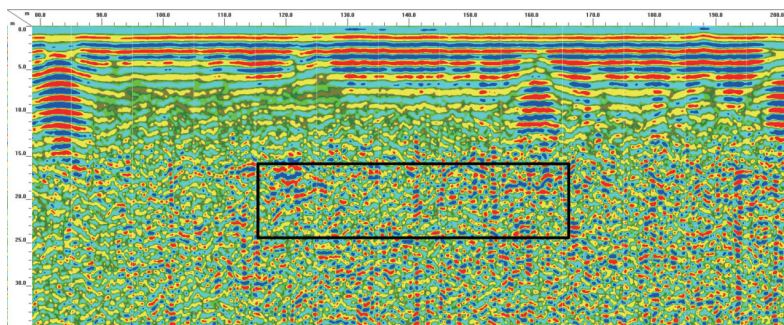


图 9 测线 R3 雷达异常剖面图 (20 MHz)

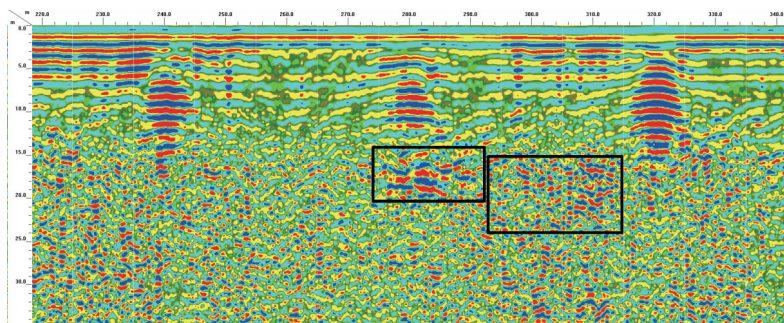


图 10 测线 R3 雷达异常剖面图 (20 MHz)

说明该区域的坝身土体密实性相对较差，推测该区域坝身土体局部欠密实，可能存在渗漏；水平距离 275 m~315 m、大约埋深 15 m~24 m 的区域范围，雷达反射波能量变强，波形变粗，振幅变强，呈现低频低速特征，根据电磁波传播理论，推断该区域坝体可能存在渗漏。

图 11 是坝坡面测线 R6 雷达异常剖面图像，测线采用 40 MHz 天线进行探测，最大探测深度达到 25 m，但随着深度的增加，雷达波能量衰减快。其中测线水平距离 135 m~165 m、埋深 10 m~15 m 的区域范围，雷达波同相轴错断，波形变粗，振幅变强，波长变长，呈低频低速特征，推断该区域范围坝体局部欠密实，可能存在渗漏。

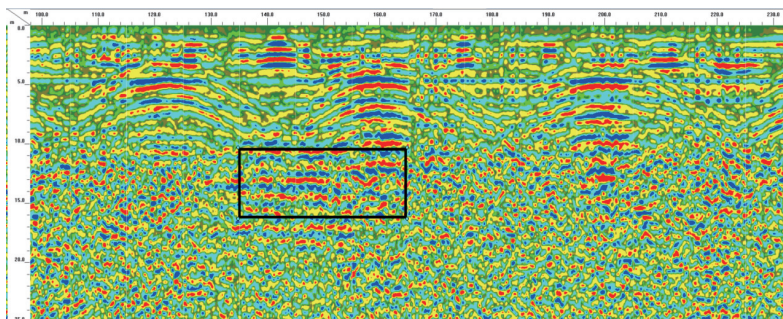


图 11 测线 R6 雷达异常剖面图 (40 MHz)

图 12 是坝坡面测线 R7 雷达异常剖面图像，测线采用 40 MHz 天线进行探测。其中测线水平距离 245 m~295 m、大约埋深 10 m~15 m 的区域范围，雷达波同相轴错断，粗波形、强振幅，推断该区域范围坝体局部欠密实，可能存在渗漏。

图 13 是坝坡面测线 R8 雷达异常剖面图像，同样采用 40 MHz 天线进行探测。其中测线水平距离 240 m~285 m、大约埋深 7 m~12 m 的区域范围，雷达波同相轴变化明显，波形变粗、振幅减小，推断该区域范围坝体高富水，可能为坝体的渗水区。

图 14 是坝坡面测线 R9 雷达异常剖面图像，采用 40 MHz 天

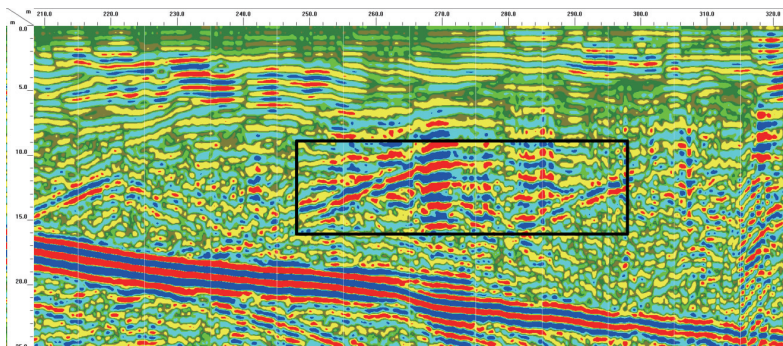


图 12 测线 R7 雷达异常剖面图 (40 MHz)

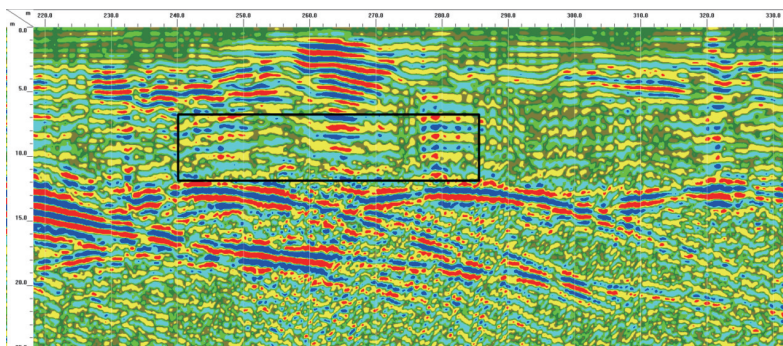


图 13 测线 R8 雷达异常剖面图 (40 MHz)

线进行探测。其中测线水平距离 240 m~300 m、埋深 10 m~14 m 的区域范围，雷达波同相轴变化明显，波形变粗、振幅变强，推断该区域范围坝体相对欠密实，可能为坝体的渗水区。

图 15 是坝坡面测线 R10 雷达异常剖面图像，测线采用 40 MHz 天线进行探测。其中测线水平距离 200 m~250 m、大约埋深 6 m~10 m 的区域范围，雷达波同相轴变化明显，波形变粗，振幅变弱，推断该区域范围坝身土体含水率相对较大，可能为坝身的渗水区。

图 16 是坝坡面测线 R12 雷达异常剖面图像，采用 40 MHz

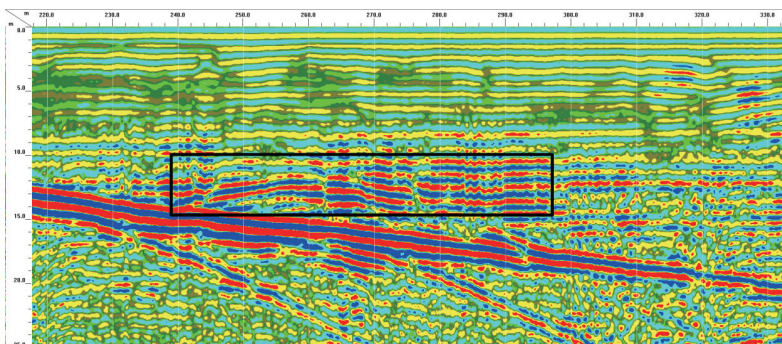


图 14 测线 R9 雷达异常剖面图 (40 MHz)

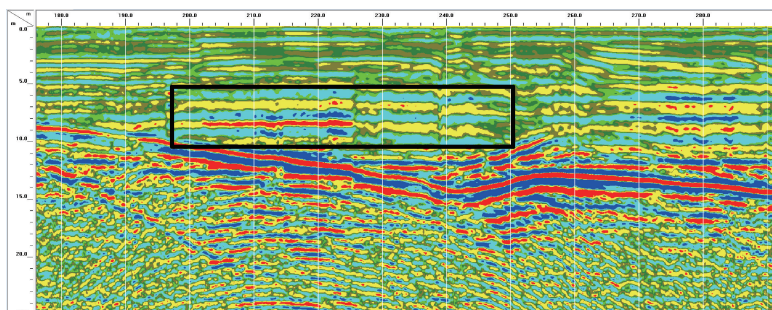


图 15 测线 R10 雷达异常剖面图 (40 MHz)

天线进行探测。其中测线水平距离 280 m~295 m、大约埋深 6 m~9 m 的区域范围，该区域范围雷达波波形变粗，振幅变弱，推断该范围坝身土体相对含水率高，可能为坝身的渗水区。

图 17 是坝坡面测线 R14 雷达异常剖面图像，采用 40 MHz 天线进行探测。其中测线水平距离 280 m~320 m、大约埋深 4 m~8 m 的区域范围，该区域范围雷达波波形变粗，振幅变弱，推断该范围坝身土体相对含水率高，可能为坝身的渗水范围。

图 18 是坝坡面测线 R15 雷达异常剖面图像，采用 40 MHz

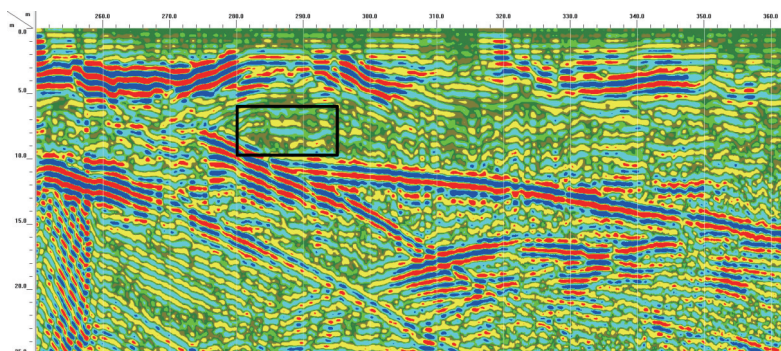


图 16 测线 R12 雷达异常剖面图 (40 MHz)

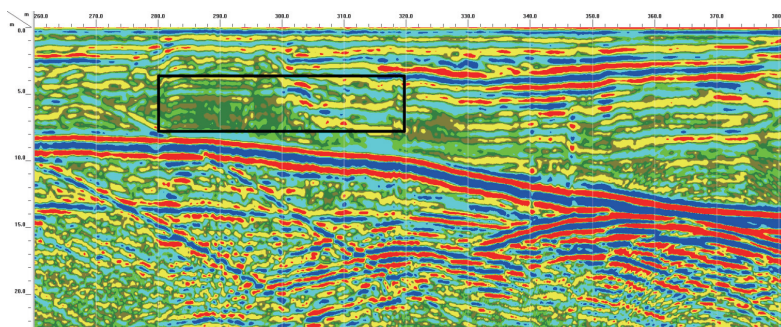


图 17 测线 R14 雷达异常剖面图 (40 MHz)

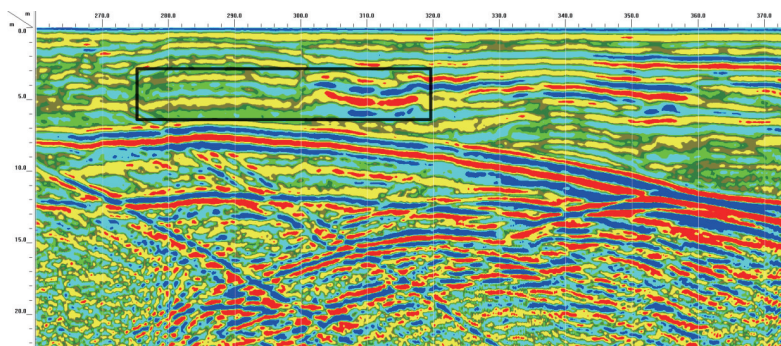


图 18 测线 R15 雷达异常剖面图 (40 MHz)

天线进行探测。其中测线水平距离 275 m~320 m、大约埋深 2 m~6 m 的区域范围,该区域范围雷达波波形变粗,振幅变强,雷达波同相轴扭折展布,推断该范围坝体含水率高,可能为坝身的渗水区。

(2) 瞬变电磁探测成果。

本次探测共发现 2 处雷达波异常区,其分布特征见图 19、图 20。

a. S1 测线剖面异常综合解释。

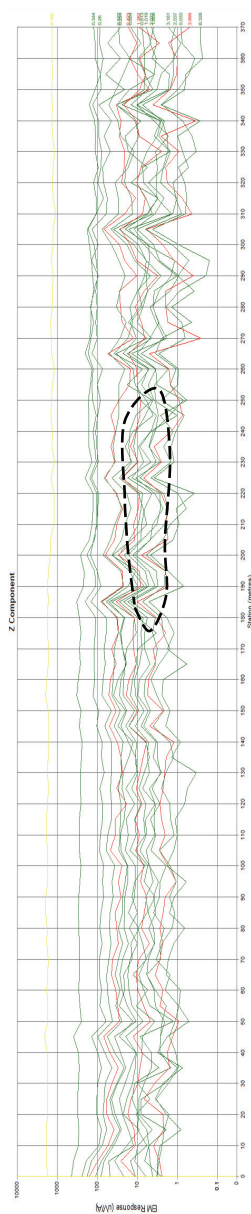
S1 测线在坝基顶部,旨在查明坝顶里面下方坝身可能的渗漏通道位置,剖面的桩号为 0+000 m~0+390 m。

由图 19 (b) 的拟电阻率成果图可以看出,该剖面由浅至深大体可以分为三层电性结构,分别表现高阻—低阻—高阻的特征,结合相关资料分析可以推断其分别对应为填筑壤土、风化程度不同的基岩层,其中壤土层的层底深度为 5 m~15 m。其中,在剖面的水平位置 225 m~240 m 处,表现为连续的高阻等值线发生错断,推断该处存在一处富水区域,且其周围由于渗水的作用也表现为范围相对较大的低阻区,该处低阻异常在多测道电压成果图上也可以看出,如图 19 (a) 所示,在中心时间 2.5 ms 以后,多测道电压曲线在该段表现为相对杂乱,具较强的二次场特征,综合推断该处可能为疑似渗漏通道,结合相邻剖面成果,推断该处未与地表连通。

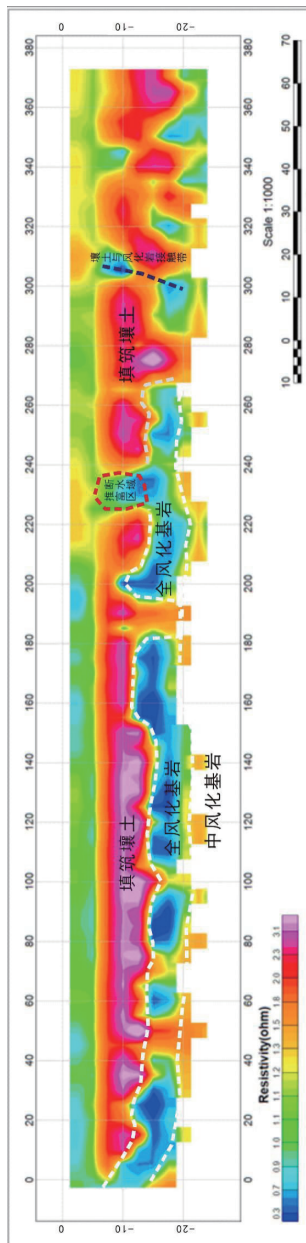
b. S2 测线剖面异常综合解释。

S2 测线剖面布设于坝体的一级平台,与 S1 剖面近似平行布设,旨在查明坝身里面下方坝身可能的渗漏通道位置,剖面的桩号为 0+220 m~0+390 m。

由图 20 (b) 的电阻率成果图可以看出,除去表层探测盲区外,该剖面由浅至深大体可以分为两层电性结构,表现高阻—低阻的特征,结合 I 剖面成果推断其分别对应为填筑壤土及风化基岩层,壤土深度为 5 m~15 m;其中,在剖面的水平位置 30 m~50 m 处,表现为连续的高阻等值线发生错断,推断该处存在一

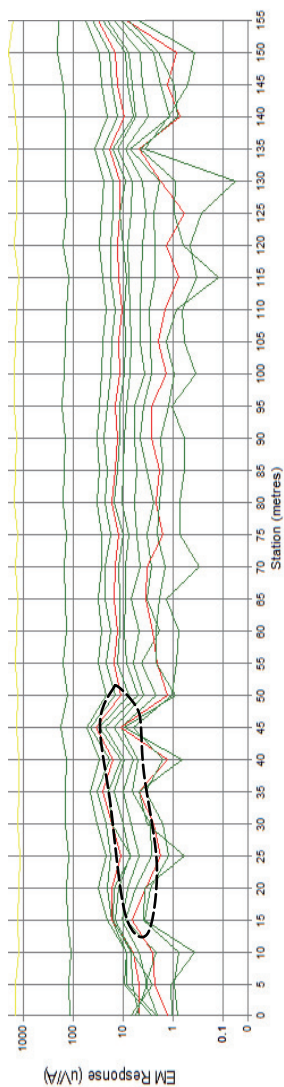


(a) 多测道电压成果图

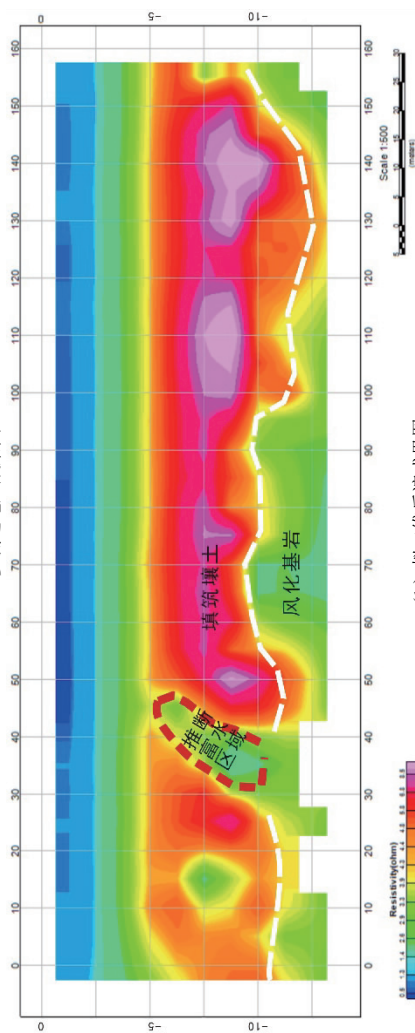


(b) 拟二维反演成果图

图 19 S1 测线瞬变电磁法多测道电压成果及拟二维反演成果图



(a) 多测道电压成果图



(b) 拟二维反演成果图

图 20 S2 测线瞬变电磁法多测道电压成果及拟二维反演成果图

处富水区域，且其周围由于渗水的作用也表现为范围相对较大的低阻区，该处低阻异常在多测道电压成果图上也可以看出，如图 20 (a) 所示，在中心时间 1.0 ms 以后，多测道电压曲线在该段表现为相对杂乱，具较强的二次场特征，推断该处疑似渗漏通道。

相较于 S1 剖面，S2 剖面为了保证浅层分辨率，采用了更小、更密的中心时窗，此外，由于该条剖面在坝体的斜面上进行探测，使得其等效磁矩变小，故其有效探测深度相较于 I 剖面要浅，综合两条剖面看，两条剖面上在水平方向上反映的渗漏位置大致对应，综合推断其为同一渗漏通道反映。

(3) 综合分析。

本次采用了探地雷达法和瞬变电磁法联合探测，取得了较好的效果，共发现 3 处渗漏区，渗漏区在大坝上的相对位置见图 21。

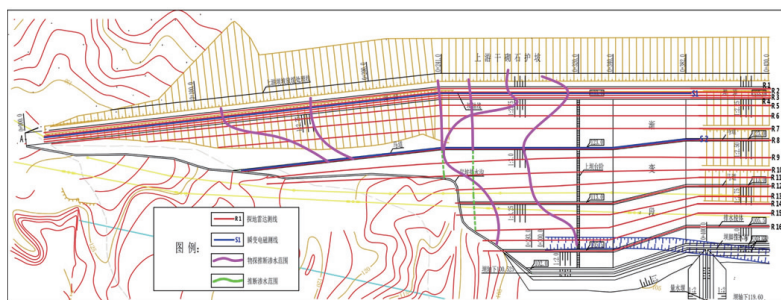


图 21 某大坝渗漏范围示意图

第一处渗漏区位于桩号 0+115 m~0+165 m，埋深 15 m~22 m，渗漏路径由南向北。该区域坝体密实性稍差，含水量相对较高。

第二处渗漏区位于桩号 0+240 m~0+260 m，埋深 15 m~30 m，渗漏路径由西向东，基本垂直于坝轴线方向。

第三处渗漏区位于桩号 0+270 m~0+320 m，埋深 15 m~

22 m, 由西向东基本贯穿整个坝体, 与第二处渗漏区在下游坝身中交汇, 最终到达右坝肩 3 级马道的出水点附近。

(4) 瞬变电磁法现有拖曳式和点测试, 采用多点叠加密集测量可以提高探测精度。

(5) 孔中 CT 能够对局部区域进行精细探测, 但是耗时较长且有损, 可以作为验证方法, 或者对局部区域进行精细探测使用。

4.3 混凝土坝

4.3.2 混凝土坝坝体渗漏探测

(1) 混凝土坝坝体渗漏的范围与特征一般有以下特点:

a. 混凝土坝(包括混凝土重力坝、拱坝及碾压混凝土坝等)坝体渗漏主要表现为集中渗漏、散渗、坝面裂缝/结构缝渗水。

b. 集中渗漏一般为有压射流, 渗漏水多从坝体的孔穴或贯穿性裂缝内集中流出。

c. 散渗一般是混凝土抗渗性能差或网状深层裂缝形成大面积潮湿和微渗水。

d. 坝面裂缝/结构缝渗水多由施工、沉降或荷载产生的贯通性裂缝导致。

混凝土坝多为高坝, 除采用相关探测方法外, 还需要结合其他检测方法和监测资料等进行综合分析, 必要时可以采用排除法判断渗漏路径。

例如, 对某碾压混凝土坝进行隐患探测时, 采用探地雷达法在廊道内进行详细探测, 分别在不同高程位置的廊道进行探测, 在廊道内共布置了 4 条地质雷达测线, 测线布置在地面、侧墙和拱肩。

(2) 图 22~图 25 是廊道地面、侧墙和拱肩地质雷达图像, 其中地面、侧墙的雷达波的同相轴连续、均匀、无明显错断、振幅一致性均良好, 视频率相对较高, 电磁波衰减均匀, 无明显的

强振幅或突变雷达波组存在，表明这 3 条测线的混凝土均匀，没有脱空或不密实等缺陷存在。图 25 是某段廊道拱肩地质雷达图像，显示雷达波的同相轴总体连续、均匀、振幅一致性均良好，雷达波为细条纹的反射波同相轴，视频率相对高，但在测线 29 m~35 m、深度 13 m~14.5 m 的位置，雷达波同相轴明显错中断、波形弯曲显示、粗波形，强振幅，视频率低，说明混凝土介质发生改变，根据雷达波形特征，推断该区域混凝土相对不密实。

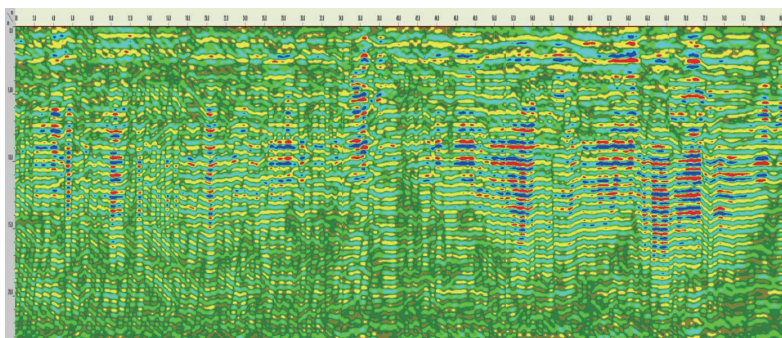


图 22 地面（上游）地质雷达检测剖面图像

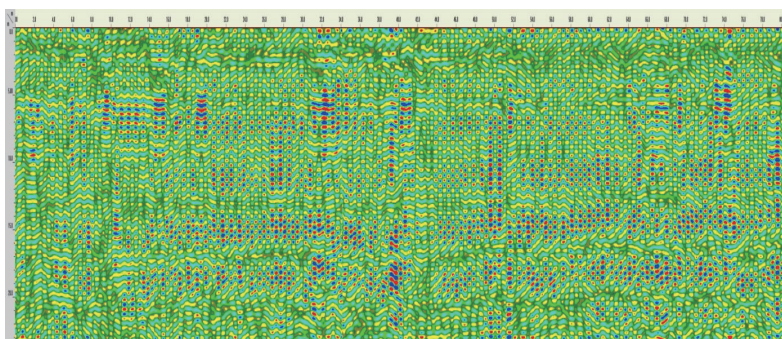


图 23 地面（下游）地质雷达检测剖面图像

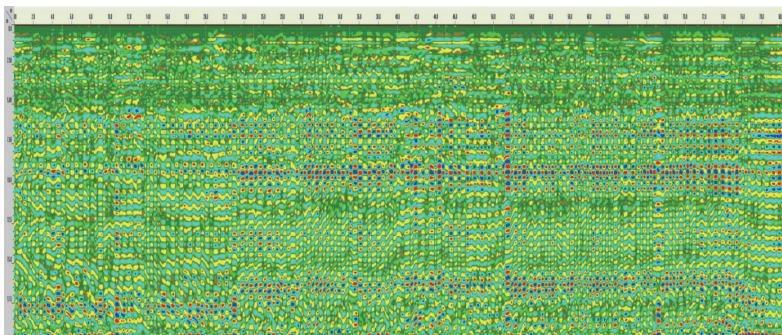


图 24 侧墙（下游）地质雷达检测剖面图像

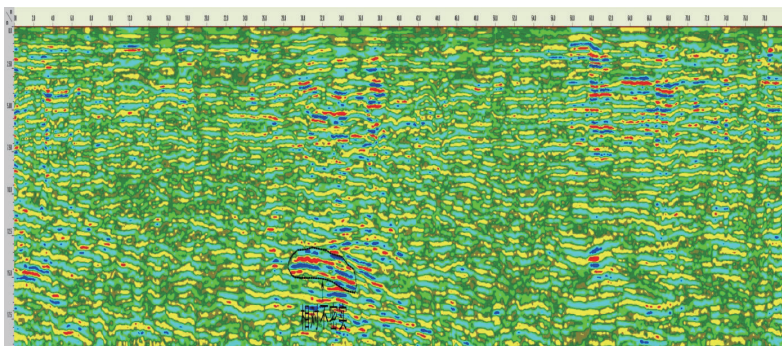


图 25 廊道拱肩（下游）地质雷达检测剖面图像

(3) 图 26~图 28 是某坝段各测线的地质雷达图像, 图 26 为坝段横向排水廊道地面测线, 雷达波同相轴总体连续、均匀、振幅一致性均良好, 表明混凝土总体均匀, 不存在脱空或不密实等缺陷。

图 27 是某坝段横向排水廊道右侧墙地质雷达检测图像, 显示雷达波的同相轴总体连续、均匀、振幅一致性良好, 雷达波为细条纹的反射波同相轴, 视频率相对高, 但在测线 5 m~7 m、深 11 m~17 m 的范围, 对应的水平位置大致在坝块的结构分缝处, 雷达波同相轴明显扭折、波形变粗, 振幅变强, 根据雷达波形的显示特征, 推断该区域的混凝土孔隙率高, 其物理特征为该

区域混凝土孔隙内富含水。

图 28 是某坝段横向排水廊道拱顶地质雷达检测图像，显示雷达波的同相轴总体连续、均匀、振幅一致性良好，雷达波为细条纹的反射波同相轴，视频率相对高，但在测线 10 m~15 m、深 8.5 m~10.5 m 的范围，不密实长度占本测线长度 25.0%，雷达波同相轴明显扭折，连续性变差，振幅变强，根据雷达波形的显示特征，推断该区域混凝土相对不密实。

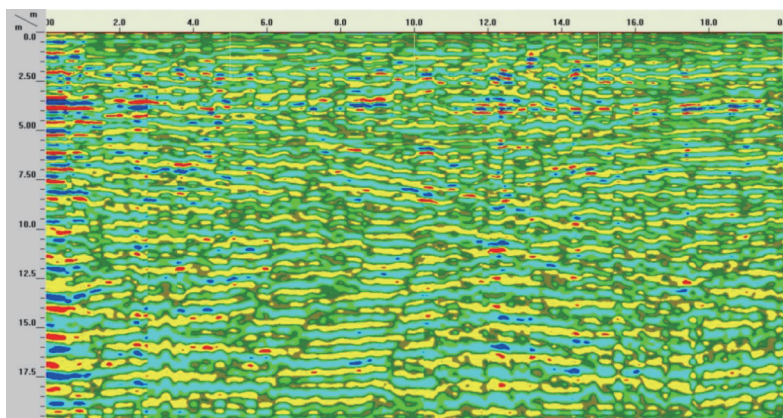


图 26 某坝段横向排水廊道左侧墙地质雷达检测图像

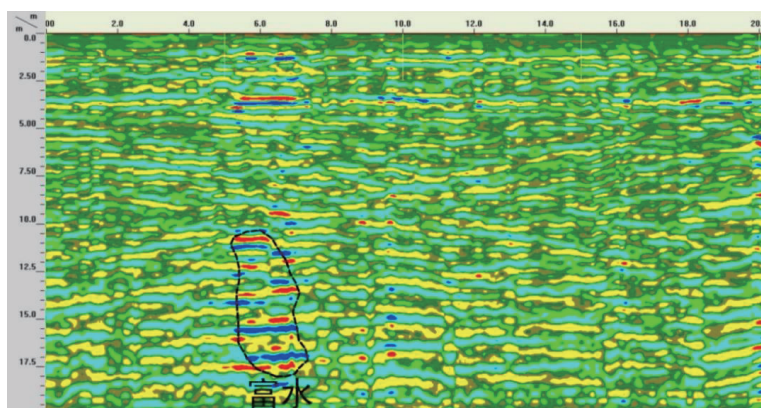


图 27 某坝段横向排水廊道右侧墙地质雷达检测图像

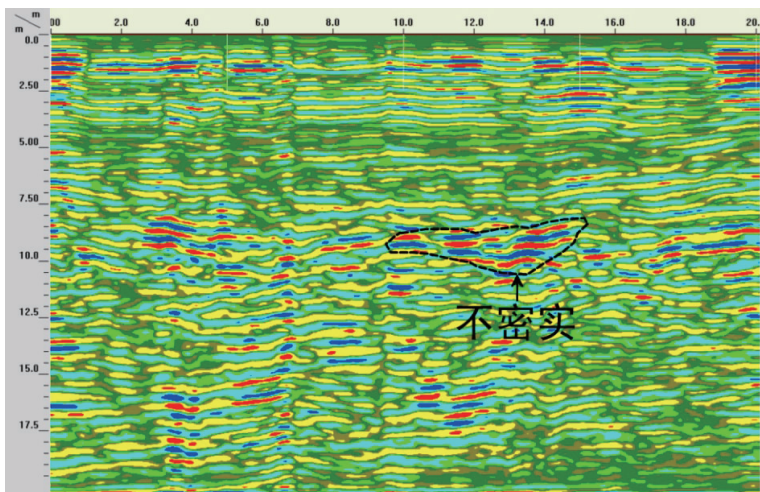


图 28 某坝段横向排水廊道拱顶地质雷达检测图像

(4) 图 29 为某混凝土坝地震波反射法探测成果图，图中地震波同相轴分布均匀，振幅、频率、连续性、波形一致性均较好，目标地层内无强反射相位，无明显畸变反射波组存在，说明该测线混凝土密实性良好，没有脱空或空洞等缺陷。

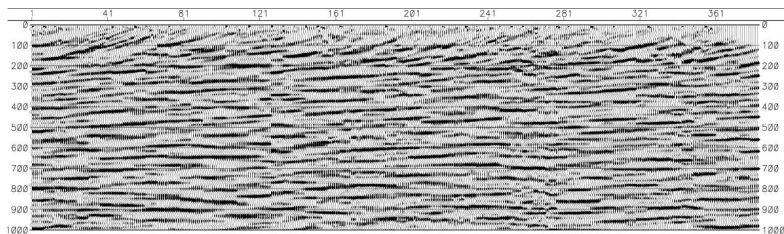


图 29 某混凝土坝地震波反射法探测成果图

4.3.3~4.3.5 坝基渗漏探测

混凝土坝基渗漏主要表现为坝基覆盖层、强风化岩体、基岩裂隙或结构面发生渗漏，岩溶地区还存在岩溶渗漏问题。在选择探测方法时，应当充分考虑探测方法的有效探测深度，结合坝体

实际情况进行选择。

4.3.6 坝肩渗漏

渗水通过坝肩山体未挖除的坡积层、岩石裂缝、溶洞和生物洞穴等从下游岸坡逸出。坝肩岩体破碎、帷幕灌浆失效造成渗漏；渗水通过坝肩土质岸坡透水层、山体断层裂隙区等薄弱部位逸出形成渗漏。

绕坝渗漏主要包括以下情形：

- (1) 坝体与岸坡结合部明显漏水且有细颗粒带出。
- (2) 坝体与岸坡结合部局部土体表面隆起或有细颗粒带出。
- (3) 坝体与岸坡结合部上、下游出现塌坑。
- (4) 相同水库水位下，绕坝渗流量或渗流压力持续增加。
- (5) 坝体与岸坡结合部有明显的出水口，水流呈泉状涌出。

坝肩渗漏探测应当查清渗漏水来源，可以结合探测、勘探等方法进行。必要时，可以采用排除法推测坝肩渗漏水来源。

4.4 其他坝型及建筑物

4.4.1 砌石坝渗漏

(1) 砌石坝防渗措施主要有：混凝土防渗面板或防渗墙；砌石、水泥砂浆勾缝；钢丝网水泥喷浆护面。

(2) 砌石坝出现渗漏的特征主要有：坝体出现裂缝而导致渗漏；砌石上游防渗部分出现裂缝、接触冷缝或其他漏水通道；砌筑时砌缝中砂浆不饱满或砂浆过稀，干缩后形成裂缝，导致坝体渗漏；砌石石料本身抗渗性能较差，库水渗过石料而形成阴湿面。

4.4.2 堆石混凝土坝、胶凝砂砾石坝，可以参照混凝土坝的探测方法。

4.4.3 泄输水建筑物

(1) 土石坝穿坝建筑物等部位接触渗漏的范围与特征一般有以下特点：

- a. 坝下（内）埋管出口与坝体接触部位有明显渗流，出水

浑浊或有细颗粒带出。

b. 开敞式建筑物侧墙与坝体连接部位有明显渗流，出水浑浊或有细颗粒带出。

c. 建筑物出口与坝体接触部位有明显的出水口，水流呈泉状涌出。

d. 坝下（内）埋管因不均匀沉陷断裂或止水破坏，发生内水外渗或外水内渗。

（2）泄输水建筑物渗漏中的接触渗漏，主要包括两种表现形式：一是土石结合层面不密实或存在空洞出现渗漏现象；二是泄输水建筑物基础防渗处理不到位，在高水位时出现渗水。因此，对于此类渗漏，首先应当考虑的是探测建筑物与坝体结合部位的接触情况，结合具体工况选择探测方法。

（3）进入坝下埋涵（管）进行探测，结果较为直观可靠，具备条件时可以进行详查。

（4）土石坝穿坝建筑物等部位的接触渗漏，应当在穿坝建筑物区域加密点测、布置测网，建议采用电法、瞬变电磁法、探地雷达法、地震反射法等无损探测方法对穿坝建筑物区域进行探测，当具备进入穿坝建筑物内部探测的条件时，应当进入穿坝建筑物内部进行探测。

4.4.4 心墙与防浪墙结合部位

案例：某黏土心墙堆石坝主坝坝顶上游侧设有防浪墙，防浪墙全长为 1501.34 m，为钢筋混凝土结构。防浪墙高出坝顶公路 107 cm，高出电缆沟盖板面 101 cm，顶部宽度为 47.5 cm，墙体厚度为 30 cm，下部为一倒 T 形结构（如图 30 所示），底宽 150 cm，坐落在大坝心墙上。

由于坝体的不均匀沉降，而防浪墙的刚度相对较大，不能与坝体协同变形，防浪墙接缝处出现了拉开或压碎的现象，如图 31 所示。

为探清防浪墙底部可能存在脱空缺陷的位置、范围等信息，对防浪墙电缆沟下游侧边墙底部进行两次探地雷达探测，以及

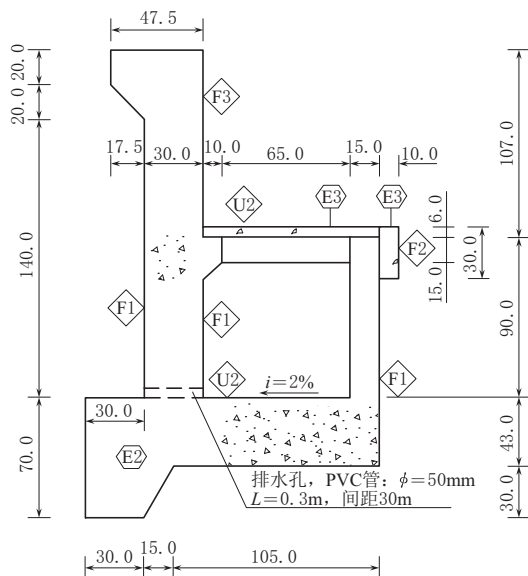


图 30 防浪墙横剖面图 (单位: cm)

防浪墙底部、上游侧堆石体底部进行对比探测。

探测分为两次进行, 具体测线布置如图 32 所示:

(1) 第一次沿着坝体轴线方向上共布置 3 条测线: 一条测线为电缆沟下游侧边墙 (测线 1), 一条是防浪墙顶部 (测线 2), 另一条是防浪墙上游侧堆石体 (测线 3), 其中测线 1 与测线 2 是连续测量, 测线 3 是以接缝点为中心的点测。

(2) 第二次沿着坝体轴线方向上共布置 3 条测线: 一条测线为电缆沟下游侧边墙顶 (测线 4), 另一条是防浪墙顶部 (测线 5), 一条是电缆沟下游侧边墙向下游侧平移 30 cm 处 (测线 6), 测线 4~6 均为连续测量。

(3) 探测起始点为大坝防浪墙上桩号标识为 D 0+000 m 处, 用 50 m 钢卷尺丈量实际测线长度, 每隔 10 m 打一个标。测线 1、测线 4 和测线 6 分别总长度为 1200 m, 测线 2 和测线 5



(a) 防浪墙接缝处拉开



(b) 防浪墙接缝处压碎

图 31 防浪墙破损特征

包括 128 处接缝，其位置在实际测线上标注。测线 3 是根据墙顶接缝处出现拉开或压碎现象较严重的部位进行点测，全段共选择了 10 处探测点。

通过采用探地雷达对主坝防浪墙底部、电缆沟下游侧边墙底部和上游侧堆石体底部的检测，发现防浪墙底部存在不同程度的脱空缺陷，具体特征如下：

(1) 电缆沟下游侧边墙底部出现一定范围的脱空，总长度为 214 m，占下游侧电缆沟边墙底总长度的 17.1%，且都以水平状的薄层脱空为主，脱空量为 24 cm，脱空区充填土石料。

(2) 防浪墙底部脱空缺陷以防浪墙底部与心墙顶部脱离而产生的间隙或高透水料侵入到防浪墙底部而产生的松散区的形式存在，脱空缺陷总长度为 190.5 m，占所检测防浪墙底部总长度的 15.2%，最大松散扰动区高度达 45 cm。地面上特征体现为在防浪墙顶部接缝出现了拉伸或挤压破碎现象。

(3) 防浪墙上游堆石体以下出现的缺陷异常，主要体现在防浪墙接缝位置处堆石体较松散。

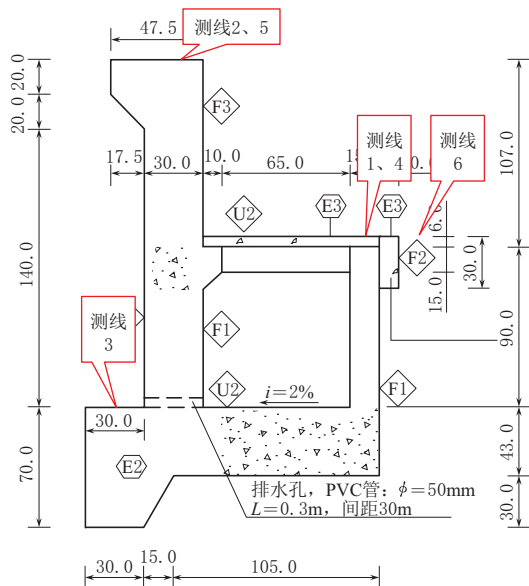


图 32 防浪墙破损特征 (单位: cm)

为了验证主坝防浪墙底部脱空无损检测结果,进行了现场挖开检查。检查坑位置确定在 D0+602 m 两段防浪墙伸缩缝处,开始开挖,检查坑开挖深度 2.6 m,检查结束后回填并恢复原貌。

检查情况如下:

(1) 防浪墙底部没有发现脱空现象。现场检查发现防浪墙(包括电缆沟)混凝土底板与下部黏土心墙土料结合紧密,土料实测干容重为 1.62 kg/dm^3 ,未见脱空。

(2) 防浪墙底部部分 1 区黏土料被 4 区堆石料侵占。现场检查发现防浪墙底部部分本应属于 1 区黏土料的位置被 4 区堆石料侵占,宽度(上下游方向)约 1.2 m,本应属于 3 区过渡料的位置被 4 区堆石料侵占,挖开范围未见 3 区过渡料。

(3) 防浪墙电缆沟下游底部有小空腔。现场开挖检查发现在防浪墙电缆沟下游底部黏土心墙内有一宽约 5 cm、高约

35 cm、顺坝轴线方向长约 80 cm 的闭合空腔。检测报告所描述的 D0+600 m 电缆沟下游边墙底部的 40 cm 厚脱空即为该空腔。

检查结果及现场开挖检查照片见图 33～图 37。

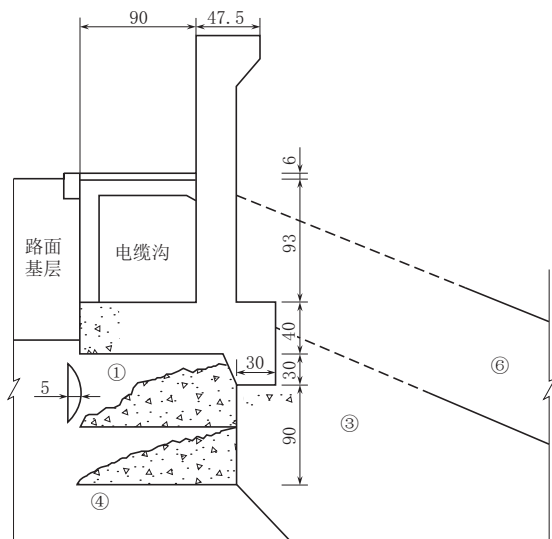


图 33 检查结果示意图 (单位: cm)



图 34 现场照片 (一)



图 35 现场照片 (二)



图 36 现场照片 (三)



图 37 现场照片 (四)

5 结构安全隐患探测

5.1 一般规定

5.1.1 结构安全隐患是水库大坝的常见安全隐患，其位置、特征可以采用探测、坑探、钻探等方法探明。

5.1.2 为避免对水库大坝造成损伤，建议优先使用无损探测方法，必要时可以采用坑探、钻探等手段进行探测和验证。

5.2 土石坝

5.2.1 危及土石坝安全的常见结构安全隐患主要包括坝体裂缝、坝体滑坡、坝体白蚁及其他动物危害；此外针对面板坝，防渗面板的破损、脱空、塌陷、裂缝也是需要重点关注的隐患。当发现以上隐患或征兆，但无法经隐患排查判断其范围和危害程度时，需要进一步开展探测。

1 土石坝坝体裂缝包括发生在上下游坝坡、坝顶、坝体与坝肩结合处等部位的外观裂缝和深入坝体内部的裂缝。一般呈现出以下情形：上下游坝坡、坝顶出现基本平行于坝轴向的纵向裂缝；坝体与坝肩结合处出现横向裂缝；上下游坝坡出现弧形裂缝，裂缝两端呈现向坝坡下部弯曲；坝顶出现弧形裂缝，基本位于坝轴线的一侧，且裂缝与坝顶边缘范围内有局部沉陷、塌陷等现象；防浪墙贯穿性裂缝；坝体与坝肩沿接触部位开裂，或有沿裂缝两侧的位移错动。土石坝心墙裂缝不易直接观察到，通常与坝体渗漏、坝坡散浸等隐患关联出现。

2 土石坝上下游坝坡均可能发生滑坡或存在隐伏滑坡界面，滑坡是多种原因共同作用的结果，水位下降、汛期雨水入渗、坝前高水位、坝面排水不畅等均可能造成坝体滑坡，或导致隐伏滑坡界面。

坝体滑坡发生前会呈现一些征兆，如：坝坡或坝顶出现弧形

裂缝，裂缝两端呈现向边坡下部弯曲，裂缝上、下侧有错动；坝体局部短时间出现持续而显著的位移，特别是伴随裂缝出现连续性的位移；坝坡下部水平位移量大于坝坡上部水平位移，坝坡上部垂直位移向下，坝坡下部垂直位移向上，表现为坝坡上部塌陷、凹陷，下部隆起、外凸等。

3 面板坝防渗面板与垫层之间出现脱空后，导致面板工作状况恶化，在水压力作用使得面板接缝止水破坏、面板产生裂缝，甚至出现塌陷破坏，进而造成大坝防渗体系破坏，危及大坝安全。面板裂缝的产生直接破坏了混凝土的结构，使得混凝土力学性能、抗冻抗渗性能、耐久性等下降，不利于面板结构安全；同时面板严重开裂、接缝止水破坏使得大坝防渗体系失效，是面板坝发生渗漏险情的主要原因之一。

4 白蚁危害是威胁土石坝安全的重大隐患之一。对土石坝有危害的动物还有獾狐、鼠类。白蚁活动痕迹主要表现为大坝表面有白蚁活动取食、坝身有泥被和泥线等；獾狐、鼠类活动痕迹主要表现为大坝坝顶或坝坡发现不明洞口，或出现土包等。

5.2.2 土石坝结构安全隐患探测方法需根据隐患类型和现场条件选用，当探测作业面较大时，可以采用多种探测方法结合的方式，以提高探测结果的准确性。

1 高密度电法即高密度电阻率法，是电剖面法和电测深法的结合，根据电阻率图像推测隐患部位，直观明显；探地雷达法适用于探测埋深较浅的坝体裂缝位置和深度，具有较高的探测精度。测线建议采用网格状布置，纵向沿等高线、横向顺坡布设。电极距根据坝体轮廓、材料及探测目标规模选择，电法电极距一般不大于 2 m。采用探地雷达法时，可以向裂缝内灌入与坝体电性差异大的示踪材料，以提高裂缝探测精度。

2 不同方法在探测滑坡体埋深的适用性上有差异。根据已有经验，当滑坡体厚度小于 20 m 时，建议选用瞬态面波法、天然源面波法、高密度电法、地震折射波法；滑坡体厚度大于等于

20 m 时, 建议选用天然源面波法、地震反射波法、高密度电法、可控源音频大地电磁测深法。测线建议采用网格状测网, 测线方向一般沿主滑带方向, 顺坡向、平行等高线布置, 测线延伸至滑坡体外。

3 探地雷达法和红外热成像法是混凝土防渗面板脱空探测较为常用且有效的方法。探地雷达法采用电磁波扫描技术对混凝土面板断面扫描, 具有穿透性强、成果连续性好的特点, 能较好识别面板脱空隐患, 在分辨率及探测深度上基本可以满足脱空定位的需求。红外热成像法采用红外热成像技术, 具有扫描速度快、工作效率高的特点, 可以做到全覆盖扫描。

由于面板中钢筋对电磁波有很大干扰, 实际隐患探测作业时, 建议两种方法组合使用, 先采用红外热成像法普查, 再针对红外温度异常部位采用探地雷达法探测。

5 由于白蚁等动物巢穴与正常坝体的电阻率和电磁波波速差异明显, 可以采用高密度电法或探地雷达法探测动物巢穴。现场探测过程中测点布置要避开混凝土表面蜂窝、结构缝位置, 测线需与裂缝走向正交或大角度斜交。

高密度电法和探地雷达法探测坝体动物巢穴探测已有多个成功案例。探地雷达法探测效率较高, 但对场地环境要求也比较高, 一般要求场地无障碍且比较平坦, 探测深度受地下水位影响较大; 高密度电法相较于探地雷达法, 场地要求较低, 不易受到外界环境干扰, 信号可靠度较好。

5.2.3 防渗墙结构安全隐患主要有墙体深度不足、墙体厚度不均匀、墙体连续性差、墙体裂缝、墙体与基岩接触不良等。防渗墙为地下隐蔽工程, 常规巡查无法发现其结构隐患。当坝体出现渗漏病害, 经初步分析怀疑是坝基防渗墙缺陷导致渗漏时, 建议使用声波 CT 法、地震波 CT 法对其进行探测。

5.2.4 水工建筑物水下结构可以分为混凝土结构和非混凝土结构。水下混凝土结构隐患主要有蜂窝、麻面、破损、露筋、裂缝、破碎、脱落、冲蚀等; 水下非混凝土结构隐患主要有裂缝、

破损、异常变形、陷坑等。由于水下环境复杂，影响因素较多，主要针对裂缝、破损等危害程度高的隐患进行探测。

1 水下结构隐患多采用人工潜水探测或潜水器水下探测。潜水器水下探测包括有人探测、无人探测。近年来，水下无人探测机器人在水库大坝水下结构隐患探测中的应用日益增多。水下无人探测机器人探测可以避免人工水下探测面临的安全风险问题，同时与人工水下探测相比也提高了探测效率。由水下浮游式机器人、爬行式机器人、吸附式机器人和管道检测机器人等装备组成的全系列水下检测平台，集成高分辨摄像、多波束图像声呐、高清示踪装置、孔内渗流检测仪等专业化检测装备，形成全场景水下检测机器人及配套检测设备，不仅可以用于水下结构隐患探测也可以用于水下渗流隐患探测，相关装备及探测技术在重庆蓼叶、云南马鹿塘、柬埔寨达岱、柬埔寨额勒赛等 10 余座坝高 100 m 以上深水检测中得到成功应用。图 38、图 39 分别为柬埔寨达岱防渗面板孔洞破损的水下机器人声呐探测成果、摄像探测成果，两图中显示的孔洞破损为同一位置。

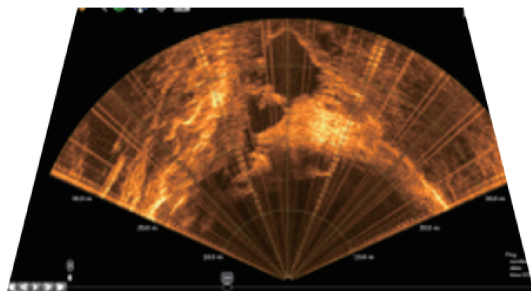


图 38 声呐图像探测成果

禹龙号载人潜水器（图 40）：该潜水器长 4.7 m，宽度和高度均为 2.4 m，总重 6.6 t，是一种可以搭载两位成员的潜水器，兼具观察、探测和精细作业能力，设计水下作业深度 300 m，涵盖目前我国所有水库大坝深度，可以用于高坝大库水下结构隐患



图 39 水下摄像探测成果

和渗漏隐患探测、修复。潜水器搭载专用机械手、喷墨示踪、附着物清理、激光标尺等工具，可以扩展搭载三维成像、三维激光、钻进、液压锯等工具。



图 40 禹龙号大坝深水检测载人潜水器

2 水下结构隐患也可以采用水下摄像、声呐进行探测。水下摄像具有显像直观、快速的优势，但由于工作效率低，不适合大面积的探测；此外，水下摄像的成像质量受水下能见度的直接影响，当水下环境浑浊、水下光线昏暗时，水下摄像将无法得到可靠清晰的图像。要根据现场作业实际需求和水下作业环境情况选择水下探测方法。当探测面积较小时，可以选用水下摄像或二

维图像声呐、三维成像声呐，水质较清时建议采用水下摄像，水质浑浊时建议采用二维图像声呐、三维成像声呐。当探测面积较大时，建议先选用侧扫声呐、多波束声呐进行大面积普查，再对普查异常部位或工程重点关注部位采用水下摄像、二维图像声呐、三维成像声呐进行详细探测。

4 当需要进行水下结构内部隐患探测，如水下面板脱空等隐患，建议采用水下探地雷达法进行探测。

5.3 混凝土坝

5.3.1 混凝土坝体常见的结构隐患有裂缝、空洞、不密实区等。

1 混凝土坝体裂缝主要呈现在坝体上下游坝面、廊道、坝体与坝肩结合部位，当坝体出现裂缝，同时裂缝伴有渗漏时，要引起重视，要及时进行探测分析，查明原因，并适时采取处理措施。

新老混凝土结合部位特指大坝加高工程的新老混凝土结合部位，混凝土坝加高的困难在于新浇混凝土很难与老坝混凝土紧密结合，处置不当时结合部位容易出现裂缝。

2 空洞、不密实区等结构隐患位于坝体内部，一般无法通过日常巡视发现，常伴随如裂缝、破损等现象。

5.3.2 坝体结构隐患探测方法需要根据隐患类型和探测目的选用。

1 探测裂缝总体分布特征时，建议选用探地雷达法；探测裂缝纵向分布等详细特征时，建议选用超声横波反射三维成像法；探测大体积混凝土浅表裂缝时，建议选用表面声波法。探测时裂缝内不应当存在水或泥浆等填充物。

2 无（少）钢筋的大体积混凝土浅埋空洞、不密实区等隐患探测建议选用探地雷达法；钢筋较多的大体积混凝土浅埋空洞、不密实区等隐患探测建议选用超声横波反射三维成像法；对于需要详细探测的混凝土内部缺陷建议选用声波 CT 法。探地雷达法探测裂缝时，建议布置网格测线，线距以 1 m~5 m 为宜，

点距以 0.2 m~0.5 m 为宜；表面声波法探测裂缝时，测线以裂缝为中心，正交或大角度斜交；超声横波反射三维成像法探测裂缝时，沿裂缝布置成像带，长度大于裂缝长度，宽度大于预估的裂缝分布范围。

5.3.4 浅表软弱夹层、结构破碎带探测建议选用探地雷达法、弹性波法；有一定埋深的软弱夹层探测建议选用测井法。当软弱夹层、结构破碎带位于低阻覆盖层下，且埋藏不深，呈现低阻低速异常时，建议选用瞬变电磁法、高密度电法、电测深法、电剖面法、地震折射波法、面波法进行探测；当软弱夹层、结构破碎带位于高阻高速覆盖层或崩塌堆积体下时，根据埋深情况建议选用面波法、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进行探测；当软弱夹层、结构破碎带中富集地下水时，建议选用激发极化法、高密度电法、瞬变电磁法进行综合探测；软弱夹层位于产状建议选用电磁波 CT 法、地震波 CT 法进行探测。

5.4 其他坝型

5.4.1 砌石坝主要包括砌石重力坝、砌石拱坝，与混凝土重力坝、混凝土拱坝体型、结构相似，其结构隐患探测可以参照混凝土坝体结构隐患探测执行；对于上游设置了混凝土防渗面板的砌石坝，其面板的结构隐患探测可以参照面板坝面板结构隐患探测执行。

5.5 溢洪道

5.5.1 环境侵蚀、混凝土填筑质量不合格、溢洪道基岩不均匀沉降、地基基岩劣化等均可能导致溢洪道发生结构隐患，常见的结构隐患主要有结构裂缝、底板接缝处混凝土脱空、异常变形、边坡失稳等，一般呈现为以下情形：控制段的闸墩、底板存在危及结构安全的深层或贯穿裂缝；控制段、翼墙、泄槽及消能段处异常的位移、变形和倾斜；工作桥或交通桥混凝土主梁等存在严

重的钢筋锈蚀及由此引起的顺筋裂缝和剥蚀；消能建筑物冲刷破坏严重；溢洪道过流面冲蚀破坏；溢洪道泄槽段底板接缝处混凝土脱空；溢洪道进出口边坡失稳等。

5.5.2 闸墩、边墙异常变形、失稳等隐患可能因基岩劣化、基础承载力不足所致，当发生此类隐患时可以考虑探测建筑物基础的整体性、力学性能是否发生变化。

5.6 水工隧洞和涵管

5.6.1 水工隧洞进口建筑物位于隧洞的最前端，主要为竖井式、塔式、岸塔式和斜坡式等结构形式。水工隧洞出口建筑物主要包括渐变段、闸室段及消能设施。水工隧洞进口建筑物应当重点探测进水口前孔口前沿泥沙淤积、漂浮物及堵塞，边墙、闸墩、胸墙、牛腿、支铰、门槽等混凝土结构的空蚀、破损、冲刷露筋、冻融冻胀、裂缝和渗水等，启闭机排架柱、梁、板结构破损、裂缝及不均匀变形等。水工隧洞出口建筑应当重点探测底板、边墙等混凝土结构空蚀、冲刷露筋、破损、裂缝、渗水、错台、平整度等，门槽混凝土破损、渗水等。

5.6.2 水工隧洞衬砌结构运行期易产生开裂，当衬砌表面产生明显的锈胀裂缝或剥蚀时，应当检测钢筋的锈蚀程度。

5.6.3 衬砌脱空探测建议选用探地雷达法、脉冲回波法或超声横波反射三维成像法。采用探地雷达法，建议采用自动连续测点方式，使用手动方式时测点间距应当不大于 0.05 m；采用脉冲回波法或超声横波反射三维成像法，测点间距建议不大于 0.1 m。必要时，可以增加钻孔验证，钻孔测点位置结合初测显示的疑似脱空部位布置。

5.6.5 衬砌接缝主要包括变形缝和施工缝。变形缝常见于隧洞地质条件变化处、洞井与进出口建筑物连接处及其他可能产生较大相对变形处。施工缝主要根据施工方法和混凝土浇筑过程设置。衬砌接缝填缝材料缺损易引发隧洞防渗失效，一般是渗漏多发位置。接缝止水隐患探测建议结合隧洞监测资料，初步排查是

否存在接缝止水隐患，如是再采用人工或潜水器探视法进行探测。

5.6.7 坝下埋涵（管）多见于中小型水库，影响大坝安全的结构隐患主要为涵（管）身裂缝、破损露筋、异常变形、管道淤堵等，一般呈现为以下情形：涵（管）内壁发现贯穿性裂缝，并伴渗流；涵（管）分缝处异常位移、错动，涵（管）身断裂；涵（管）严重堵塞；涵（管）与坝体接触面出现分离。

大多数中小型水库建设年代久远，涵（管）采用的材质有砌石（砖）管、竹筋混凝土管、混凝土预制管、钢筋混凝土管等。涵（管）裂缝（断裂）将导致其结构破坏、产生漏水，危及土坝安全。涵（管）断裂的可能原因有基础存在不均匀沉降，涵管受荷载不均匀，管身强度不足，未设置分缝等。涵（管）堵塞主要发生在断面小，强度低的小型水库坝下埋涵（管），堵塞物主要有被树枝、块石、淤泥等杂物。

坝下埋涵（管）埋设于坝体中，运行时进口位于水面以下，而且小型水库涵管直径一般小于1 m，当不具备人工进入探测条件时，可以采取管道无人探测技术，由管道机器人搭载如管道潜望镜、闭路电视系统、水下摄像机等设备对其隐患进行探测。

5.7 近 坝 岸 坡

5.7.1 受自然侵蚀、人类活动、生物活动的影响，以及未探明的不良地质条件，在水库运行过程中，坝肩、溢洪道边坡、穿坝建筑物进出口边坡等近坝岸坡可能会发生滑坡、崩塌，危及水库大坝安全。近坝岸坡失稳发生前一般有以下征兆：边坡发生明显位移，坡面出现横向及纵向放射状裂缝，边坡某处坡面隆起，或同时伴有渗漏水；边坡出现局部垮塌、松弛现象等。

5.7.4 岸坡岩体尤其是顺坡向岩体劣化是常见近坝岸坡结构安全隐患之一。岸坡岩体劣化一般有以下情形：岸坡表部岩体松动、变形、局部脱落；岸坡表部出现细微裂纹岩体破碎，完整性变差。可以选用弹性波测试法、声波穿透法、层析成像法对近坝

岸坡岩体的完整性、强度（波速）进行探测，以判断岩体劣化程度。采用弹性波测试法探测岩体完整性时以声波波速测试法、地震波波速测试、地震波穿透法为主，声波穿透法为辅；采用层析成像法时，以地震波 CT 为主，电磁波 CT 为辅。探测劣化深度时测线建议垂直于边坡布置，并适当布置与边坡平行的辅助测线；在岩体劣化宽度变化较大地段，适当加密测线和测点。

6 金属结构安全隐患探测

6.1 一般规定

6.1.1 水工金属结构包括钢闸门、启闭设备、压力钢管、拦污栅及清污设施，本标准对现行相关规范推荐的方法进行了适当补充。

6.1.2 金属结构隐患中未涉及电气、监测等控制系统、人因不安全行为及管理缺陷等隐患。焊缝内部质量缺陷主要有气孔、夹渣、未焊透、未熔合、裂纹等。单个气孔、点状夹渣属一般缺陷，对焊缝整体强度影响较小，群状气孔、不规则状夹渣、未焊透、未熔合、裂纹属严重缺陷，会降低焊缝整体强度等性能，要予以重点关注。

6.3 启闭设备

6.3.2 对启闭设备，除本标准推荐的隐患探测方法外，功能性测试是查找启闭机系统隐患的重要手段，建议在日常运行管理中重视启闭设备的功能性测试。

7 成果报告

7.0.4 本条强调对图件的基本要求。图件作为隐患探测报告的重要组成部分，是隐患探测资料整理、数据处理和解译探测结果的集中体现，是报告文字论述的基础，尤其是综合解译成果图表在很大程度上反映了隐患探测报告的编制水平和质量。