瞬变电磁检测在堤防隐患检测的应用

王传全 齐永志 吴庆林
山东黄河勘测设计研究院有限公司，山东 济南 250014

[摘要]作为相对有效的电磁方法之一，瞬变电磁法具备抗干扰探测，深度大，简单易行等优势，在我国石油，电力，地矿等多个领域得到了广泛的应用，早在20世纪70年代，我国众多学者开始将研究视角聚焦在瞬变电磁检测技术上，随着各项技术的改革发展，在对瞬变电磁检测上由最初的金属矿勘探延伸到环境与工程，水资源和地热等领域。下文探究出瞬变电磁探测技术在黄河大堤上的具体应用，仅供借鉴。

[关键词]瞬变电磁检测；技术应用；措施
DOI：10.33142/hst.v6i6.9776 中图分类号：TV698 文献标识码：A

Application of Transient Electromagnetic Detection in Detecting Hidden Dangers in Embankments

WANG Chuanquan, QI Yongzhi, WU Qinglin
Shandong Yellow River Reconnaissance Design & Research Institute Co., Ltd., Ji'nan, Shandong, 250014, China

Abstract: As one of the relatively effective electromagnetic methods, transient electromagnetic method has the advantages of anti-interference detection, large depth, and simplicity. It has been widely applied in multiple fields such as petroleum, electricity, and geology in China. As early as the 1970s, many scholars in China began to focus their research perspectives on transient electromagnetic detection technology. With the reform and development of various technologies, the exploration of transient electromagnetic detection has extended from the initial metal ore exploration to the fields of environment and engineering, water resources, and geothermal energy. The following text explores the specific application of transient electromagnetic detection technology on the Yellow River embankment for reference only.

Keywords: transient electromagnetic detection; technology application; measures

引言

探测深度较大，具备较高的分辨率，速度较快，具备抗干扰能力是瞬变电磁探测技术的优势。在勘探地下水和浅层结构上会应用此种技术，在技术应用期间会分析信号到达的时间来判定深度，结合时间特点来分析信号源导电性，同时此技术对周边的探测环境要求不高，在一些恶劣的环境下，如沙漠和冻土地带就可发挥检测技术的优势，但此种技术也具备局限性，虽然此种检测技术具备较高的工作效率，但无法取代其他的电法勘探手段，在勘探期间，如周边存在较大的金属结构，应用此种技术勘探到的数据不可用，测量的数据不够精准。下文将研究视角聚焦在瞬变电磁检测技术应用上，为各部门提供参考。

1 瞬变电磁检测技术在各领域的应用

作为一种精细快捷的检测手段，瞬变电磁检测技术会在浅层，断层，地下溶洞等结构发挥作用，在各个领域应用瞬变电磁检测技术能取得良好的勘探效果。

1.1 在地质勘测中的应用

在岩层，采空区，断裂带等地段可以应用瞬变电磁检测法，荒漠地区水源较少，而应用瞬变电磁仪可以提高寻找地下水源的效率，为该地区钻井施工奠定坚实的基础[1]。在开采煤矿期间，因存在地下水层等问题，为施工建设人员带来了威胁，而善用瞬变电磁检测技术，能准确地分析异常地质，保障施工人员的安全。在实际勘测中要选择相应的测试区域，结合项目任务和勘测到的数据来做出布置，要结合现场的勘测情况选择测点[2]。

1.2 在埋地管道腐蚀检测中的应用

我国布设的输油气管道四通八达，一些埋地的管道受到腐蚀和破损的影响会引发较多问题，浪费了资源，也会对环境造成污染。一些被埋在地下的管道长时间受到土壤侵蚀，会导致局部破损，给国家带来经济损失，所以相关人员要定期检查管道腐蚀情况，也要更换管道。在检测管体腐蚀期间，常用漏磁检测法和超声波法，然而这两种检测方法应用的设备成本较高，此时就可善用瞬变电磁检测技术，此技术可在不断流的状态下进行检测，同时此技术不会受到管体的限制，在检测期间会收集精准的管道数据，为后续腐蚀检测提供依据。

1.3 在其他领域中的应用

在堤坝隐患检测中也可应用瞬变电磁法，应用此种方法，实施无损探伤来分析堤坝是否存在安全隐患，同时应用此种技术也能探究出堤坝中电导率异常的部位，在传统堤坝隐患探究中，只能结合感应电动势信号来分析出现安全隐患的大致范围，此种方法无法快速的定位存在的隐患

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

部位，背离了现实工程的需求。而应用瞬变电磁法能通过相应的系数修正，明确堤坝视深度和视电阻率，通过计算找到堤坝隐患部位，结合堤坝情况制定加固方案，为堤坝的运行奠定坚实的基础。

2 瞬变电磁检测技术在堤坝隐患检测中的具体应用

2.1 工程背景

黄河大堤运行历史悠久，距今已有 500 多年的历史。为保障堤坝顺利运作，要分析黄河大堤存在的隐患，并结合工程情况制定加固措施。针对堤身隐患部位采取灌浆和锥探的方法，依据临河防渗保渗的原则来制定加固防渗措施，借助黄河含沙量较多的特征巩固堤身是黄河大堤加固的主要措施。在 1949 年之前，下游大堤具备较弱的防御能力，堤身残破，自此之后，对黄河下游大堤进行了三次的加固加高，同时也在堤旁植树造林，加大管控和防守力度，尽可能地降低或消灭堤身隐患，为有效的探测黄河大堤内部的隐患，要应用对应的探测方法，常用的几种探测技术如下所示：

第一，瞬变电磁检测技术，该技术是对二次电磁场接收和分析，从而判定介质含水情况的一种探测技术。国内外学者利用此技术做出了大量的实验，得出的结论如下所示：借助瞬变电磁探测技术，地层和地质探测效果非常明显，随着各项技术的不断发展，该技术也趋于成熟，我国各个学者在金属物体探测等领域广泛地应用了瞬变电磁法，通过具体的实验也证明此技术具备可行性。也有一些学者在海洋领域探究出瞬变电磁法的应用情况，得出的结论如下所示：受到技术自身的限制，瞬变电磁法于浅层结构存在盲区，导致数据不够精准，在大范围探测上数据粗略[3]。

第二，探地雷达。最早该技术起源于德国，电磁波在地下介质和空气介质中能量衰减有所差异，在地下介质中，电磁波能量衰减更为严重，某种程度影响了探地雷达技术的应用，后随着电子信息技术的不断发展，为探地雷达技术提供了先机。各软件公司纷纷研制出探地雷达设备和系统，至此，该技术发展越来越成熟，具备较强的抗干扰力，高效，高分辨率是探地雷达技术的优势，该技术在地雷探测，岩土工程勘测，无损检测等众多领域都能发挥作用。对比国外来说，我国研究探地雷达技术起步较晚，随着经济的不断发展和信息技术的改革，我国各个科研院联合各大高校，将研究视角聚焦在雷达设备的研制上，为探地雷达技术的发展奠定了坚实的基础，现如今探地雷达技术在我国矿产资源调查，地雷探测和无损检测等领域都发挥着效果。

2.2 瞬变电磁检测技术在黄河大堤隐患检测中的应用

本课题以山东黄河大堤为探测对象，应用了拖曳瞬变电磁法，沿着山东黄河大堤堤顶布设测线，为尽可能避免金属物体对探测产生的干扰，在车辆拖曳设备期间，线圈和车辆保持特定的距离，为保障数据测量的精准，在实际测量期间也会将堤顶过往车辆的干扰数据记录进去。瞬变电磁阀具体的应用原理如下所示：检测探头是主要的传感器装置，是由激励回线和接收回线组成，在实际探测期间，激励回线装置对地下发送脉冲信号，在空间范围内接收此信号产生一次磁场信号，被称作一次磁场，异常体在脉冲信号间断期间会产生相对不稳定的涡流场信号，空间接收涡流信号，产生二次磁场信号，被称作二次磁场。回路电流数值会受到二次磁场强度变化的影响，应用瞬变电磁阀对回线电压动态加以接收，展示出二次磁场变化过程，相关人员对磁场信号加以分析，就可判定出黄河堤坝渗漏和异常的部位[4]。图 1 是瞬变电磁法工作原理。

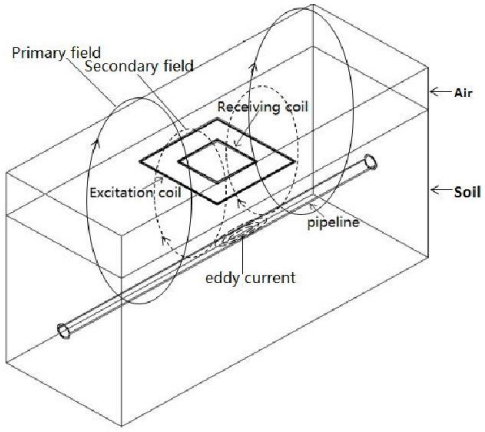

图 1 瞬变电磁法工作原理

在本次探测期间，应用 CLD700 探测线圈，采用 24V 的蓄电池，在具体数据处理期间，进行视电阻率反演，借助现有的地电模型对响应信号的过程加以求解属于正演，而利用测试到的响应信号对地下导电体成分进行分析属于反演，本数据处理则应用后者，即反演。在数据处理期间，结合勘探结果绘制剖面图。实质上，多种介质组成了现实的地质体，因此在计算和求解得出的电阻率值彰显的是岩石和土壤导电性能，也被称作视电阻率，每种介质的真电阻率和介质的分布情况会影响视电阻率的数值，在数值计算上要将现实观测到的磁场值设想为同一个探测设备对同一条件下介质的响应值，将此假想空间的电阻率数值计算得出，可以通过数值逼近和反演迭代法来求解。

2.3 具体的探测成果和分析

堤身和堤基密实度，电阻率受到重力和水分蒸发的影响会产生一定的差异，在堤坝内部出现松散区或冲水孔洞时，也为瞬变电磁法有效勘测提供了基础。瞬变电磁仪是一个多系统组成的精密仪器，它可以利用地层捕捉磁场变化产生的涡流检测出堤坝所在地理位置的地质异常情况，工作人员通过使用瞬变电磁仪就可以对堤防内部存在的安全隐患进行排查，同时还可以迅速捕捉到隐患的具体位

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

置。在应用瞬变电磁仪进行堤坝检测时，还应当注意影响低深基础电导率的因素。一方面要注意土质的变化情况，依据实际情况针对土的组成成分和比例变化灵活调整检测方案，并依据土的颗粒度和密度情况，确保电导率的检测结果与实际相符。另一方面，还要注意水对于堤身的影响。比如水质以及含水量等，都会影响电导率的具体数值，同时水的矿化度也会对其产生一定影响，导致堤防电导率增加或减少。与此同时，工作人员也应当意识到，当上述一种或多种原因发生时，就可能导致检测结果的不准确。因此，工作人员在应用瞬变电磁仪进行检测时，可以使用联合物探法，确保检测结果的真实性。

2.3.1 聊城段黄河大堤探测成果

对山东聊城段堤防隐患做出普查，应用瞬变电磁法探测，成果如下所示：在堤坝不同的里程区进行普查，得出的探测成果有所差异，比如在 77+500-78+000 里程堤防范围内，于堤顶布置了测线，经探测得出的结论如下：视电阻分布相对均匀，但靠近里程堤防内部存在异常区，具体的表现为感应电动势突变，结合探测信息和工程数据，经推断了解此区域地质体存在异常，两个侧线分布的位置相对接近，也可推断在汛期可能演变为渗漏通道[5]。

2.3.2 菏泽东明大堤探测成果

针对菏泽东明大堤隐患作出普查，应用瞬变电磁法，总里程为 177+400-178+300，经探测分析了解到，视电阻总体分布情况相对均匀，在 178+225，178+300 里程附近内部存在地质异常，了解工程资料和现实，推测此区域地质体异常，在该区域下方可能存在金属质材料。

2.3.3 东营段黄河大堤探测成果

针对东营段黄河大堤隐患作出普查，应用瞬变电磁法，总探测里程为 145+200-148+300，在该里程区间堤防，并于堤顶处布设测线，结合探测数据了解到视电阻总体分布情况相对均匀，在 146+755，147+560 等区域，堤身存在异常区域，局部低阻，结合工程资料和数据，推测此区域地质体存在异常。

2.3.4 滨州黄河大堤探测成果

针对滨州黄河大堤隐患做出普查，应用瞬变电磁法，总探测里程为 171+500-172+500，结合工程资料得出的数据如下所示：视电阻总体分布情况相对均匀，但 171+725，172+480 等里程区域内部出现异常。内部出现了低阻异常区域，结合数据推测此区域地质体存在异常，同时两条布设的侧线位置比较接近，推测在汛期可能演变为渗漏通道。

而无论是洪水期还是枯水期，顺便电磁技术对于堤坝隐患探测都具有良好的应用效果，在洪水期磁变电技术可以对堤坝的管涌、滑坡以及散浸等安全风险进行排查，规范进行管涌通道定位检测工作，并依据堤坝散浸的具体范围，合理制定探测区域，一旦检测出低电导率，就可以对堤坝管涌渗漏情况加以把控，如果发生堤坝及低电导率区，那么工作人员就予以高度重视，核定堤身是否出现缝隙，并及时进行养护和修补。在枯水期，瞬变电磁技术也具有良好的工作成效。当堤坝所在区域处于长期干旱天气，成为干堤后，工作人员也可以利用瞬变电磁技术进行检测，并将检测结果与以往的测试数据进行比对分析，排查堤身电导率的变化情况，以此提升堤防防洪加固工程的养护效果。除此之外，还要将检测结果与堤坝隐患渗漏探测数据进行比对分析，从而实现对堤防渗漏情况的全面排查。

3 发挥瞬变电磁技术优势，加强堤坝隐患探测有效性措施

前文分析了瞬变电磁技术的优势和原理，也探究出此技术在黄河大堤隐患探测中的应用，为更好地发挥探测技术优势，有必要设置出完善的探测系统，比如，可以应用 SDC 型堤坝渗漏探测仪。此仪器优势如下所示，操作简洁，分辨率较高，动态范围较大，更适合在坝坡和坝顶上探测，同时测量时间较短。在具体设计期间，要做好以下结构的布设。

3.1 发射机

发射机的作用即为一次场提供能源，在具体设计期间，要考虑电流强度和发射频率等参数，触发器，分频器，振荡器，同步信号电路是组成发射机的设备。本系统应用脉冲方波发射电流波形，在具体设计期间，应用对称正负磁场交替工作的模式，避免地层发生极化效应。同时为使系统在运行期间不受到一次场信号的干扰，会于正负脉冲间预留较长的零信号时间。与此同时，在系统设计期间应用了同步信号电路，以此提升仪器信噪比。

3.2 接收机

程控放大，高通滤波，低通滤波，同步信号是组成接收机的主要设备，在具体设计期间要关注二次场信号的特征，其具备的特点如下：第一，信号较弱，第二，具备较大的动态范围，第三，频带宽。设置出来的仪器要发挥堤防隐患探测效果，所以还具备一个特点，即探深浅而分辨率较高，接收机要以较快的速度将二次场信号检测出来，同时自身要具备较快的采样速率和较高的分辨率，同时也要具有一定的抗干扰力。为提升系统具备的抗干扰力，可以采取如下措施：增添发射矩，在系统设计中，设计低通滤波器和高通滤波器，将低通滤波器控制在 3 khz 以下，高通滤波器控制在 30 hz 以上。也要在系统中添加 50hz 线波器，同时在处理数据期间，应用粗大误差剔除和叠加平均法。

3.3 发射天线和接收天线

发射矩与接收矩和系统灵敏度呈现显著的正比关系，在系统设计上，为保障信噪比，要应用大发射线圈，结合堤防特征来满足机械强度需求。与此同时，为提高线圈总面积，要在此基础上增加线圈的圈数。同时，在堤防上，为便于后续的移动作业，可以应用 12V 免维护蓄电池作为

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

主电源。发射机部分和微机分别供电来减少彼此的干扰。

3.4 软件的设计

在软件设计上混编了汇编语言和高级语言，采用 c 语言来编制主程序。同时也应用了人机对话的方式，为操作人员提供了便捷。软件提供多元的功能模块，在屏幕上会显示测量的数据参数，测线的方向，探测结果会以三维立体图的方式展示出来。本系统主要的应用程序即数据采集软件，发射机向 A / D 转换器传送同步信号，A / D 转换器在接收之后第一时间采样二次场信号，以 DMA 的方式将数据送入内存完成采样周期，通过重复的方式进行 n 次采样，针对采样的数据来做出积分和滤波。

3.5 数字滤波和误差剔除软件

TEM 系统具备非常微弱的二次场信号，信号在探测期间会被周边的噪声所淹没，本系统应用了信号叠加法来提高信噪比。同时应用了粗大误差剔除软件，在采样过后对测量值加以判定，剔除其中的可疑值，同时在瞬变电磁仪应用期间，为避免地层产生极化效应，本系统在发射信号期间应用了对称正负脉冲方波，同时针对各个时间窗在软件中添加了各个采样个数和频率。此种设计的主要原因是保障在特定的时间窗内，相关人员可以采集更多的信息。

4 结论

瞬变电磁技术具备应用简洁，反应灵敏等优势，在低阻电性构造探测期间发挥的作用非常明显。本课题探究出瞬变电磁检测技术的优劣势，分析出其在黄河大堤隐患检测中的具体应用，应用此种检测技术能探究各里程地质体是否异常，最后，为发挥技术优势，本课题加强了软件和设备的布置，以此提高堤坝隐患探测的有效性。

[参考文献]

[1]耿庆桥,王晓亮,叶英.基于瞬变电磁雷达的检测技术及其在隧道衬砌中的应用[J].交通运输研究,2020,5(6):119-129.
[2]朱裕振,汝亮,马延君,等.瞬变电磁探测技术在煤矿防水注浆检测中的应用与研究[C].中国地球物理学会:中国地球物理,2022.
[3]李永年,陈德胜,尚兵,等.瞬变电磁技术在检测管体缺陷上的应用研究[J].管道技术与设备,2021(4):27-29.
[4]李勇桥.瞬变电磁技术在巷道顶板注浆检测中的应用[J].山东煤炭科技,2022(2):37-38.
[5]石仁委,魏国栋,柳言国.埋地金属管道腐蚀剩余壁厚地面检测技术研究及应用[C].北京:胜利油田腐蚀与防护研究所,2021.

作者简介：吴庆林（1978.8—），男，籍贯：山东，民族：汉族，毕业学校：兰州大学，学历：本科，职称：高级工程师，研究方向：工程勘察。

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.