

基于电磁感应原理的堤坝隐患探测技术及其应用

Based on electromagnetic sensing technology of hidden dyke safety problems and its application

刘广明, 杨劲松, 李冬顺
(中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘 要: 磁感式堤坝隐患探测技术是一项新型先进的实用技术, 该技术应用电磁感应工作原理, 易于操作且结构并不复杂。应用实际表明, 本技术适用于对土坝隐患进行探测, 结果可靠。

关键词: 电磁感应; 新型技术; 堤坝安全; 应用

中图分类号: TV 698. 2; S 121

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2003) 02- 0196- 05

作者简介: 刘广明(1975-), 男, 山东邹城人, 助理研究员, 在职博士, 研究方向: 土壤盐渍化管理及其防治。

LIU Guang-ming, YANG Jing-song, LI Dong-shun

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Electromagnetic sensing technology to explore the hidden safety problems of dyke is a new and advanced practical technology. With a not very complex frame, this technical system is easy to operate. Case histories show that this technology is suitable to assess dyke safety with a good reliability.

Key words: electromagnetic; new technology; dyke safety; application

0 引 言^①

目前我国存在着大量土质堤坝, 由于施工、荷载(作用)及环境等原因, 这些堤坝内部可能存在裂隙、孔洞及局部坝体质地低劣等安全隐患。如果这些隐患不能在其出险前及时发现, 就不能采取有效措施对堤坝进行加固从而防患于未然, 将可能导致溃坝等灾害的发生。磁感式堤坝隐患探测技术应用了电磁感应工作原理, 可以对土质堤坝的结构性质进行快速、高精度的调查评估, 与其他堤坝隐患探测技术相比, 本技术具有快速、投资少、简便易操作等优点。在我国应用磁感式堤坝隐患探测技术对土质堤坝进行安全隐患探测, 具有重要的实际应用价值。

磁感式堤坝隐患探测技术主要应用了电磁感应式土地性质测定技术。电磁感应理论应用于土地性质测定最早出现于 20 世纪 80 年代。近年来该理论在土地性质测定方面的应用受到国际相关领域的普遍关注, 得到了广泛研究和应用。目前电磁感应式土地性质测定技术在澳大利亚、以色列等发达国家已有较多应用, 技术比较成熟并且是当今国际相关领域的研究应用热点之一。现在该技术系统已经被成功应用于测定多种土地性质, 如土体黏粒含量^[1], 土层埋深及厚度^[2], 土壤养分^[3], 土壤水分^[4, 5], 土壤盐分^[6, 7], 以及洪水灾害评估等方面^[8]。为了进一步提高数据采集的效率, 人们利用由全球定位系统和电磁(EM)感应装置组合而成了移动式电磁感应系统(MESS)进行土地性质测定^[9], 从而形成移动式电磁感应土地性质测定技术。

笔者从澳大利亚引进了移动式电磁感应土地性质测定技术, 并把该技术成功应用于海堤隐患探测, 形成了适合我国应用的磁感式堤坝隐患探测技术。水利部国科司于 2002 年 9 月组织专家对该技术进行鉴定, 与会专家高度评价了磁感式堤坝隐患探测技术。

1 工作原理及基本架构

1.1 磁感式隐患探测技术的工作原理

磁感式堤坝隐患探测技术系统的关键设备是电磁感应仪。电磁感应仪具有信号发射及信号接收两个端子(见图 1), 二者之间相隔一定距离 S 。工作时, 信号发射端的发射线圈激发交变电流产生磁场强度随大地深度增加逐渐减弱的磁场——原生磁场^[3]。原生磁场是随时间变化而动态变化的, 因此该磁场使得大地中出现了非常微弱的交流感应电流。这种电流又导致大地中产生了次生磁场。信号接收端子既接收原生磁场信息又接收次生磁场信息。

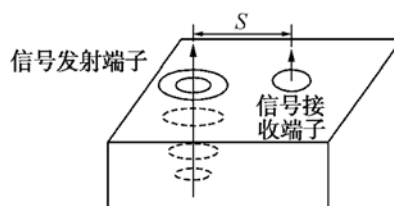


图 1 电磁感应仪工作原理示意图

Fig. 1 Principle of EM sensing

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011803); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(ISSASIP0107)
收稿日期: 2002- 06- 20

通常,原生磁场是两端子间距 S 、交流电频率及大地电导率的复杂函数;次生磁场也是这些变量的函数。大地电导率就是根据信号接收端子获得的原生、次生磁场强度的相对大小关系得到的。次生磁场强度、原生磁场强度的比值与大地电导率呈线性关系:

$$\gamma_a = \frac{4(H_s/H_p)}{\omega\mu_0 S^2}, \quad (1)$$

式中 H_s 为信号接收端子处次生磁场强度; H_p 为信号接收端子处原生磁场强度; μ_0 为导磁率; f 为交流电频率 (Hz); $\omega = 2\pi f$; γ_a 为大地表面电导率 (mS/m); S 为信号发射端子与接收端子的间距 (m)。

特殊的工作原理决定了电磁感应仪不需要与大地接触就可以直接测定大地电导率,这就使得这些设备不需要配备任何探针,并且仅需要很少的电缆线。于是利用电磁感应仪进行大地电导率调查,可以大大缩短所需时间,工作效率明显提高。用传统电极法进行大地电导率测定,其测定结果对电极附近的不规则物质的反应较为敏感;而用电磁感应仪进行大地电导率测定时,设备自动对其测定范围内的大地电导率进行平均。因此,电磁感应设备可以显著提高测定结果的准确度(如 EM38 的测定准确度可达 $\pm 5\%$),这也使得磁感式堤坝隐患探测技术替代其他传统隐患探测方法成为可能。

电磁感应仪的测定值即大地表面电导率,它综合反映了大地的电磁传导性能。由电磁感应仪产生的感应磁场在大地中传播时,受到多种因素影响,这些因素通常包括黏粒含量、容重、结构性能、土体盐分含量、水分含量、温度等。对于同一堤坝而言,由于不同堤坝段分布空间的差异相对较小,并且受到水分浸润的程度以及浸润水体的含盐量的差异亦相对很微小,因此不同堤坝段间在坝体盐分、水分含量及温度方面的差异可忽略不计。黏粒含量、容重、结构性能结合在一起能综合反应堤坝结构及其组成一致性与否,从而为堤坝隐患探测提供依据。一般情况下,如果某位置处较其余位置处的黏粒含量低、容重小,或者该位置坝体中存在孔洞或裂隙,此位置电磁感应仪的测定值将表现为较附近位置处的小。通常在存在安全隐患部位会形成一个相对明显的测定值分布低谷,该谷底位置即存在安全隐患部位。

1.2 磁感式堤坝隐患探测技术系统的基本架构

磁感式堤坝隐患探测技术系统操作比较简便,可以节省大量人力物力,效率比较高,并且结构不是非常复杂,其基本架构(见图 2 及图 3)包括以下 4 部分。

(1) 电磁感应仪。包括 EM31 和 EM38 两种,可直接测读大地电导率,其特征参数见表 1。由于电磁感应设备对金属非常敏感的特性,EM31 装设于牵引机的前部约 2.0 m 距离处,EM38 位于牵引机后部 2.0 m 位置。



图 2 磁感式土地性质测定技术系统基本架构

Fig. 2 Basic composition of Chinese MESS

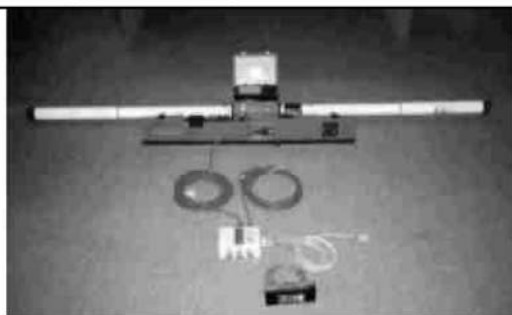


图 3 磁感式土地性质测定技术系统关键测定设备

Fig. 3 Key facilities of Chinese MESS

表 1 电磁感应仪特征参数

Table 1 Diagnostic parameters of EM sensors

电 磁 感应仪	设备总长 /m	有效测定深度/m	
		水平操作模式(h)	垂直操作模式(v)
EM38	1.0	0.75	1.5
EM31	3.7	3.00	6.0

(2) DGPS。差分 GPS 可处理差分信号,从而达到更高测定精度,用于实时收集地理位置信息进行精确定位,并可以暂时存储测得的大地电导率资料。一般情况下测定精度达 1~2 m,最佳状态下达 0.5 m。

(3) GIS 数据分析及规划软件。用于测定数据的管理、信息解译和分析处理,以及土地利用规划分析等。

(4) 机械牵引、传动及连接装置。包括 25 马力牵引机 1 台,用作外部牵引动力;液压传动装置,用于调整电磁感应仪的位置;同样由于电磁感应设备对金属极为敏感的特点,尽量减少其感应范围内的金属物,附属部件是 PVC 支架及其余一些非金属制品,用于联接、固定和调整设备。

2 技术系统的主要特点

与常规堤坝隐患探测方法相比,磁感式堤坝隐患探测技术主要具有以下优点。

(1) 探测调查信息量丰富。较高的实施费用制约了通过常规堤坝隐患探测方法取得大量调查样本的可能性,并因而可能导致某些堤坝隐患被遗漏掉,这无疑是常规探测方法的局限性并影响了其实用性能。应用磁感式堤坝隐患探测技术进行堤坝隐患探测调查,不需要采集样品就可以实现堤坝安全性能的连续测定,

从而保障探测的精确度和全方位性。

(2) 工作效率高。探测调查速度与牵引机运行速度相一致, 一般可以每小时调查 10 km 堤坝长度。

(3) 良好的实时性及重现性。应用该项技术系统可以在进行堤坝隐患探测调查时实时地收集地理位置信息、堤坝质量信息, 并且两者是完全一一对应的, 这充分保证了调查资料的重现性。

(4) 投资少。运用此项技术进行堤坝安全调查及评估, 虽然前期用于购买设备的支出较多, 但是对于设备可以长期、多次利用而言, 投资是很低的; 并且一人就可以应用本技术系统进行操作作业, 这与传统的堤坝隐患探测方法相比, 无疑节省了大量的人力、物力。

3 隐患探测调查结果误差分析

应用磁感式堤坝隐患探测技术进行堤坝隐患探测时, 电磁感应仪 EM31 和 EM38 距地面的设定高度分别为 1.0 m 和 0.25 m; 由于地面微地形等方面的差异, EM31 和 EM38 距设定高度的最大波动幅度相应分别为 10 cm 和 5 cm。电磁感应仪实际距地面高度与设定高度之间存在的这种差异, 将导致调查结果出现一定误差。为了分析该误差的大小, 对同位置的电磁感应仪测定值(即大地表观电导率)与其距地面高度之间的关系进行了分析, 分析结果如图 4 所示。

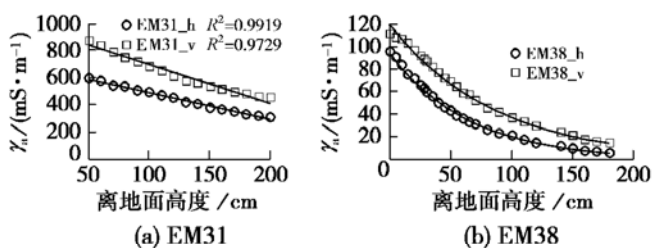


图 4 电磁感应仪测定值与其距地面高度的关系

Fig. 4 Relations between EM readings and the heights above the ground

分析结果表明, 电磁感应仪 EM31 的测定值与其距地面高度呈显著线性相关, 相关系数的平方分别为 0.97 和 0.99。电磁感应仪 EM38 的测定值与其距地面高度呈显著指数相关, 其关系可表示如下:

$$\left. \begin{aligned} Y_v &= 120.49e^{-0.0117x} \\ R^2 &= 0.9982 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} Y_h &= 94.417e^{-0.0153x} \\ R^2 &= 0.9981 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

式中 Y_v 、 Y_h 分别为电磁感应仪 EM38 在垂直和水平操作模式下的大地电导率(mS/m); x 为 EM38 距地面高度(cm), $0 < x < 180$ cm。

根据电磁感应仪测定值与其距地面高度之间的关系, 以及磁感式堤坝安全调查实际, 获得磁感式堤坝安全调查结果与电磁感应仪在设定高度位置时的测定值

之间的误差如表 2 所示。

表 2 测定误差分析

Table 2 Error analysis of EM readings

电磁感应仪	操作模式	设备设定高度 / cm	波动幅度 / cm	测定误差 / %
EM31	水平	100	10	3.4
	垂直	100	10	4.7
EM38	水平	25	5	9.1
	垂直	25	5	5.4

4 磁感式堤坝隐患探测技术的应用

技术人员在熟练掌握磁感式堤坝隐患探测技术之后, 应用该技术系统对多段海堤及多处塘坝进行了隐患探测调查。此处以对新、老海堤及鱼塘坝进行的隐患探测调查为例对该项技术的应用进行介绍。

4.1 新海堤隐患探测

新海堤位于江苏省东川农场外围, 堤外为我国黄海海域, 于 1999 年修筑完成, 行政区划隶属于江苏省东台市。该海堤堤高约 6 m, 堤顶宽约 5.5 m, 修筑海堤时工程技术人员采用了吹填施工工艺, 结构相对较均匀。

在分析电磁感应仪各测定位下的感应深度范围(见表 1)及坝体实际情况后, 技术人员采用了 EM3_v(即 EM31 的垂直测定模式, 以下与此处意义相同)和 EM38_v 两种测定位进行了新海堤隐患探测。调查海堤长度为 6.3 km, 获得调查数据记录 5300 多条, 对新海堤隐患探测的分析结果如图 5(a) 所示。

由图 5(a) 可见, 新海堤各断面的大地电导率波动幅度较大, 但是各断面 0~1.5 m, 1.5~6.0 m 以及 0~6.0 m 深度范围的电导率动态呈现一致的变化趋势, 由此可以得知海堤各断面由下部到顶部的质地比较均匀。所调查部分海堤段的大地电导率没有出现明显的谷值, 可见该段海堤中不存在较为明显的结构或组成缺陷。在 A—A' 段(约 2 km) 范围内无论 0~1.5 m、1.5~6.0 m 还是 0~6.0 m 深度范围的大地电导率, 都较为明显地小于其他堤段相应深度范围的大地电导率值; 但是该段海堤各断面不同深度范围大地电导率值的相对差别保持了基本恒定。可以得知, A—A' 段海堤的结构及组成仍然是比较均一的, 只是由于构成该段海堤的土体的性质与其他段海堤的差异导致海堤各处的大地电导率呈现了这种分布特征。此外由 A—A' 段海堤属于各深度范围大地电导率的最小值分布地段, 可以判知该段海堤是所调查海堤中相对较为薄弱的地段, 可能首先在该段出现隐患, 应当加强对海堤安全特别是对该段海堤安全的监测。

总结对新围海堤的探测结果可以得知: ①所探测海堤段各断面由下部到顶部的质地比较均匀; ②该段

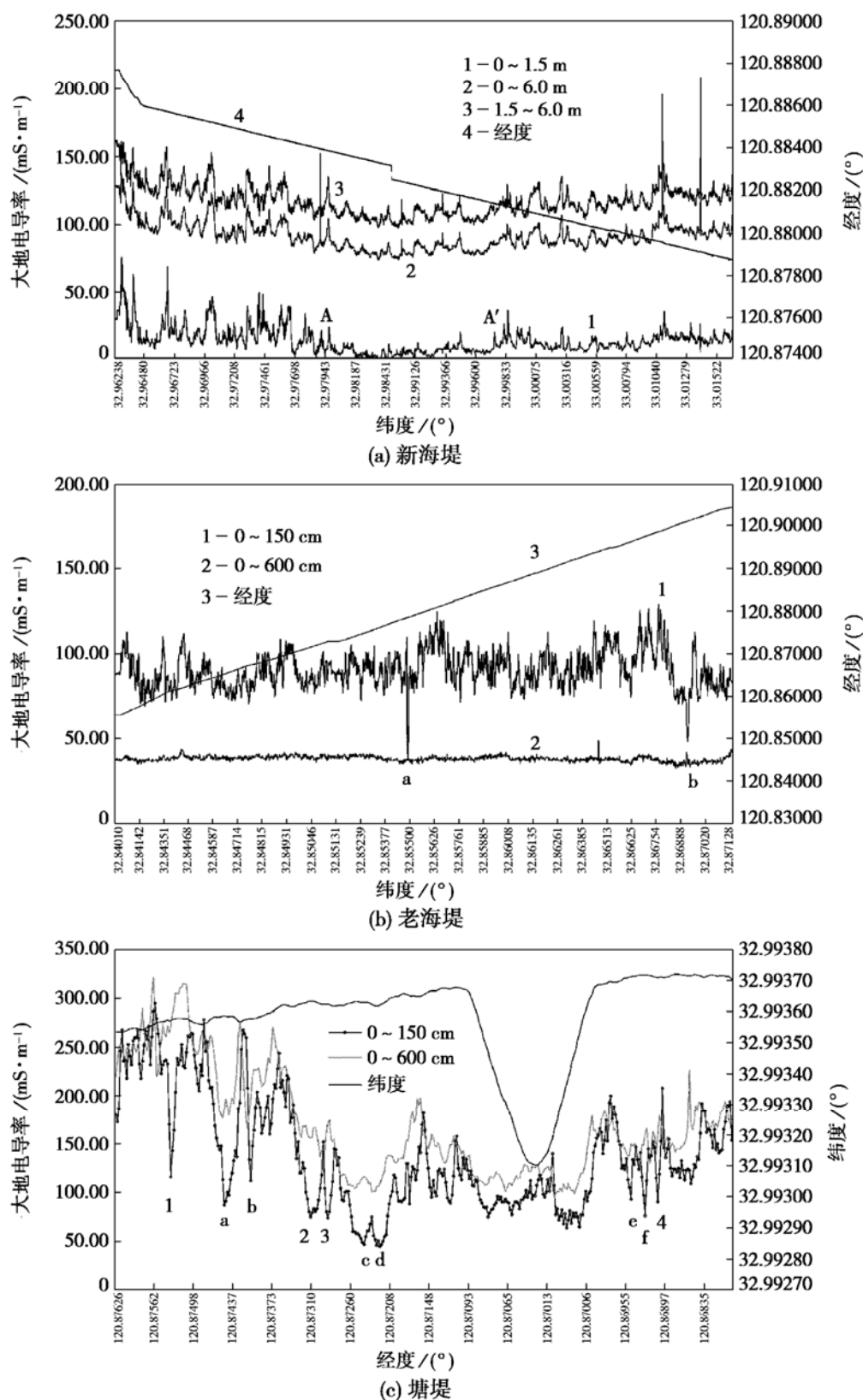


图 5 大地电导率分布

Fig. 5 Ground electrical conductivity distribution

海堤中不存在较为明显的结构或组成缺陷; ③A—A'段海堤的结构及组成是比较均一的, 但是该段海堤是所调查海堤中相对较为薄弱的地段, 可能首先在该段出现隐患, 应当加强对海堤特别是对该段海堤安全监测。

4.2 老海堤隐患探测

老海堤可能由于新成陆滩涂的不断围垦而不再直接受到海潮的侵蚀, 在没有特大暴雨或海啸等特殊情

况下, 一般不具有可能造成重大损失的隐患。但是长期以来一直受到海潮侵蚀的老海堤或其部分地段, 以及因为船闸的存在而间接受到海潮侵蚀影响的老海堤地段, 则可能存在安全隐患。如不对这些老海堤进行隐患探测, 就可能会因此而在将来造成难以弥补的损失。

技术人员选择了东台粮垛船闸处的老海堤并应用磁感式堤坝隐患探测技术对其进行隐患探测。该海堤

于 1982 年与粮垛船闸同期建成,属东北-西南走向。在进行隐患探测调查过程中仍然采用了 EM31_v 和 EM38_v 两种测定位,以便能够获得 0~1.5 m 以及 0~6.0 m 深度范围的海堤性质。总计获得老海堤隐患探测调查数据记录 2000 余条,调查海堤长度约 5.5 km。对老海堤隐患探测的分析结果如图 5(b) 所示。由该图可以发现,0~6.0 m 深度海堤的大地电导率平均值保持了基本恒定,波动幅度很小。据此可以判断出该段老海堤 0~6.0 m 深度的平均结构性能比较均一。沿调查路径,海堤 0~1.5 m 深度的平均大地电导率值波动幅度比较大,这可能与堤顶微地形差异有关。0~1.5 m 深度海堤大地电导率分布中出现了两个谷,分别位于断面 a(N32.85488967°,E120.8785884°)和断面 b(N32.86919497°,E120.901058°)。此两断面位置应当存在孔洞或质地相对非常疏松,系潜在危害存在部位。

纵观对老海堤隐患探测的分析结果,可以获得如下结论:①所评估老海堤 0~6.0 m 深度的平均结构性能比较均一;②所评估的老海堤中存在两处孔洞或质地相对非常疏松部位,此二部位系潜在危害存在位置,其位置分别为 a(N32.85488967°,E120.8785884°)和 b(N32.86919497°,E120.901058°);

(3)应当对潜在危害存在部位(a、b 断面)进行进一步探查,必要时进行加固处理。

4.3 塘堤隐患探测

所探测堤为鱼塘堤。该段塘堤于 2000 年筑成,系 4 个鱼塘的联接堤段。每个鱼塘的堤段中约 1.5 m 深处都设有一个直径 0.5 m 的素混凝土涵洞以便鱼塘换水。该段塘堤是人工填筑而成的,质地均一性较差,并且背水一侧已经可见有几处稍微渗水或局部坍塌现象。图 5(c)为应用磁感式隐患探测技术调查得到的该堤段大地电导率分布特征。图 5(c)中 1、2、3 和 4 断面是涵洞所在位置(已为实地单独获得的涵洞定位信息所证实)。根据该堤段大地电导率分布特征,判定出 a、b、c、d、e 及 f 断面为隐患存在部位,其中 b 和 d 断面实景如图 6 所示。

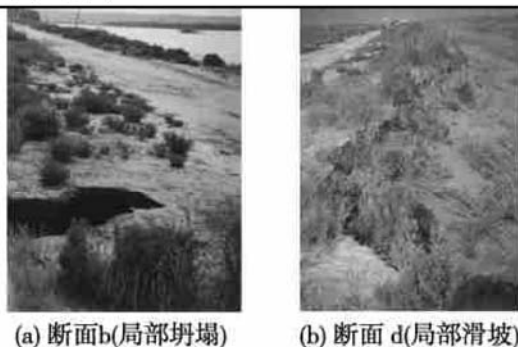


图 6 断面实景

Fig. 6 Photos of section b and d

5 结 语

(1)磁感式堤坝隐患探测技术具有可连续测定(测定点距可小于 1 m)、快速、高效、投资少等特点,适用于对均质堤坝(包括土坝、均质砌石坝等)进行隐患探测。其单次探测的最大有效深度为 6 m,可以对坝高在 6 m 内的堤坝直接进行隐患探测;对于坝高超过 6 m 的均质坝可以采用沿坝坡各设定高程进行探测。

(2)本技术系统的探测设备具有对距地高度较为敏感的特性,应用本系统对堤坝特别是在坝顶直接进行探测时应尽可能减小设备振动,以便提高探测精度。

(3)本项新技术的广泛应用,对于充分保障我国堤坝安全性能具有深远意义及重要实用价值。目前已经充分具备应用磁感式堤坝隐患探测技术进行堤坝隐患探测的各项条件,相关人员应当积极推广应用本项先进技术进行堤坝安全评估。

参考文献:

- [1] Williams B G, Hoey D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils [J]. *Aus J Soil Res*, 1987, **25**: 21- 27.
- [2] Doolittle J A, et al. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods [J]. *J Soil Water Cons*, 1994, **49** (6): 572- 575.
- [3] Davis J Glenn, et al. Using electromagnetic induction to characterize soils [J]. *Better Crops with Plant Food*, 1997, (4): 108- 113.
- [4] Keith R Sheets, Hendrickx Jan M H. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction [J]. *Water Resources Research*, 1995, **31**(10): 2401- 2409.
- [5] Hendrickx J M H, et al. Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, **56**: 1933- 1941.
- [6] Triantafilis J, et al. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton [J]. *The Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(3): 1009- 1017.
- [7] Donald K, Bennett, et al. The use of ground EM system to accurately assess salt store and help define land management options for salinity management [J]. *Exploration Geophysics*, 2000, **31** (1): 249- 254.
- [8] Kitchen N R, et al. Mapping of sand deposition from 1993 mid-west floods with electromagnetic induction measurements [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, **51**(4): 336- 340.
- [9] Triantafilis J. Application of a mobile electromagnetic sensing system (MESS) to describe the spatial distribution of soil properties relevant to sustainable irrigated cotton farming systems [A]. *Sustainable Management of Irrigated Land for Salinity and Toxic Element Control* [M]. California, USA, 2001.