

宋俊磊,周丹,肖国强,等. 面向渗漏探测的堤防磁场分布特性分析. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1362-1372.
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230096.

Song Junlei, Zhou Dan, Xiao Guoqiang, et al. Analysis of Magnetic Field Distribution Characteristics of Embankment for Leakage Detection. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (4): 1362 - 1372. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230096.

面向渗漏探测的堤防磁场分布特性分析

宋俊磊^{1,2,3},周丹^{1,2,3},肖国强⁴,周华敏⁴,
董凯锋^{1,2,3},晋芳^{1,2,3},莫文琴^{1,2,3},惠亚娟^{1,2,3}

1.中国地质大学(武汉)自动化学院,武汉 430074

2.复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室,武汉 430074

3.地球探测智能化技术教育部工程研究中心,武汉 430074

4.长江水利委员会长江科学院,武汉 430019

摘要:快速确定堤防渗漏隐患的位置信息,对堤防的治理具有重要意义。然而在渗漏通道弱磁数据处理过程中,堤防正常场计算往往需要花费较长时间,严重制约着渗漏隐患的定位效率。为解决上述问题,本文基于有限单元法开展了磁电阻率法探测堤防渗漏的建模仿真工作,探究了不同尺寸堤防内稳定电流场及其外部磁场的分布特性,并构建了一定数量的模型数据库。研究表明,磁感应强度 y 分量在测域中部的整体波动相较于 x 分量和 z 分量更大,其值随堤防上宽的增加呈下降趋势,而随斜坡角度的增大或堤防主体高度的增加呈上升趋势。依据本文总结的分布特性,可以预测数据库中缺失的堤防正常场,堤防模型的预测平均相对误差为9.63%。

关键词:堤防渗漏;磁电阻率法;稳定电流场分布;磁场分布

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230096

中图分类号:P631

文献标志码:A

Analysis of Magnetic Field Distribution Characteristics of Embankment for Leakage Detection

Song Junlei^{1,2,3}, Zhou Dan^{1,2,3}, Xiao Guoqiang⁴, Zhou Huamin⁴,
Dong Kaifeng^{1,2,3}, Jin Fang^{1,2,3}, Mo Wenqin^{1,2,3}, Hui Yajuan^{1,2,3}

1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan 430074, China

3. Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Ministry of Education, Wuhan 430074, China

4. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430019, China

Abstract: It is of great significance to quickly determine the location information of seepage hazard for the treatment of embankments. However, in the process of magnetic weakening data processing of

收稿日期:2023-04-14

作者简介:宋俊磊(1980—),男,副教授,博士,主要从事地球物理仪器研制、传感器设计与微弱信号检测等研究,
E-mail: songjunlei@cug.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502600)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFC1502600)

leakage channel, it often takes a long time to calculate the normal field of an embankment, which seriously restricts the locating efficiency of potential leakage hazards. In order to solve the above problems, based on the finite element method, the modeling and simulation of the detection of embankment leakage by magnetometric resistivity method was carried out, and the distribution characteristics of the internal stable current field and the external magnetic field of the embankment with different sizes were explored, and a certain number of model databases were built. The results show that the overall fluctuation value of y component of magnetic induction intensity in the middle part of the measurement domain is larger than that of x component and z component, and its value decreases with the increase of the upper width of the embankment, and increases with the increase of the slope angle or the height of the embankment. According to the distribution characteristics summarized in this paper, the missing normal field of embankment in the database can be predicted, and the mean relative error of the embankment model is 9.63%.

Key words: embankment leakage; magnetometric resistivity method; stable current field distribution; magnetic field distribution

0 引言

堤防是人民生活和社会生产的重要保障^[1],在我国防洪体系中起着举足轻重的作用。但大量堤防受建设时期社会经济和技术水平的限制,以及地质灾害、环境因素和后期运管维护情况的综合影响,存在裂缝、松动、渗漏和管涌等安全隐患^[2-4]。

电磁电阻率法是一种测量由人工电流源在待测区所激发磁场的分布反演地质结构的物探技术^[5]。基于电磁电阻率法,本科研发团队与长江科学院开展合作,已研制了一套堤防渗漏通道探测装备,包括软、硬件系统和数据处理方法,并成功应用于江西省余干县鄱阳湖流域堤防和湖北省阳新县长江干堤等堤防渗漏通道探测,实现了堤防渗漏通道和渗漏入水口位置和走向的探测^[6]。

使用磁测仪获取的待测区域总磁场包含该区域的正常场与渗漏通道产生的磁场,因此需消除目标区域的正常场才能获得渗漏通道产生的磁场分布特征。为得到待测区域的正常场,需对所测堤防进行建模和数据分析。堤防建模的主要目的是获得堤防内激励电流的分布特性,依据电流分布特性得到待测区域正常场。该过程花费时间较长,在这期间堤防渗漏状况可能会恶化,显然无法满足汛期堤防应急抢险的需求。

在防汛期间,排查效率是重中之重。若能掌握不同尺寸堤防内稳定电流场的分布特性,就能根据堤防的具体尺寸快速获得堤防的正常场,大大减少每次依据具体堤防尺寸建模分析的时间,提升堤防渗漏的探测效率。因此,探究并获得堤防内部稳定

电流场及其外部磁场的分布特性是实现堤防快速建模的基础,为快速确定渗漏通道深度和位置信息提供数据支撑,对满足堤防应急抢险需要具有重要意义。

目前关于堤防内稳定电流场分布规律的研究较少,且现有研究往往仅停留在对电流场的定性解释上,没有对其分布规律进行定量的分析与解释。如:王朋^[7]运用二维电阻率层析成像技术和不同电极装置对土石坝渗漏进行探测,研究涉及了堤防二维电场的分布应用,但未对二维电场分布的规律进行研究和总结;张欣^[8]通过构建有限差分模型,采用MATLAB编程探究了含隐患土石堤坝的电场分布规律,但并未对规律进行理论分析与解释;欧元超^[9]通过试验研究获得了角度及埋深影响下渗漏通道的电场分布规律,但对影响因素的探讨不足。综上,目前采用电法手段进行堤防渗漏诊断后,诊断结论大多是通过人为判断获得,缺乏针对堤防三维电流场分布规律的理论支撑。因此,本文针对不同尺寸的堤防进行了有限元电流场仿真,根据仿真现象与仿真数据对堤防内电流场的分布特性进行分析,并在电流分布特性的基础上进一步开展磁场分布特性研究。

1 稳定电流场模拟方法对比

电法勘探模拟方法可分为三类:物理模拟、解析计算和数值模拟。其中数值模拟方法的主流方法包括:有限差分法、积分方程法、边界单元法和有限单元法等。每种模拟方法都有其优缺点^[10](表1)。数值模拟法能够很好地解决复杂场源以及具有不规则

表 1 稳定电流场模拟方法对比
Table 1 Comparison of stable current field simulation methods

方法	优点	缺点
物理模拟法	直观	模型搭建困难,操作复杂,不适用于复杂地质体
解析计算法	计算结果准确度高	计算十分复杂,存在没有解析解的情况
数值模拟法	有限差分法	计算过程简单,效率高 对复杂场源或地形难以拟合
	积分方程法、边界单元法	计算速度快,占用内存小 只适用于格林函数易知的场合
	有限单元法	适应性强,能拟合复杂的地质体 占用存储空间大,对计算机硬件要求高,计算时间长

注:据文献[10]修编。

轮廓地下构造的模拟问题,并且彻底摆脱实物模型和解析公式,其中有限差分法和边界单元法的适应性不如有限单元法。计算机技术发展至今,有限单元法对计算机的要求已较易实现,故该方法已经成为现代地球物理研究的重要手段,应用范围很广,本文亦采用此方法。

2 堤防建模与内部电流场仿真分析

2.1 稳定电流场基本理论

假设在电阻率为 ρ 的均匀各向同性无限介质中,有一位于地表的点电源 A (图 1),其电流大小为 I ,则与 A 点距离为 r 的 M 点的电流密度值为

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1)$$

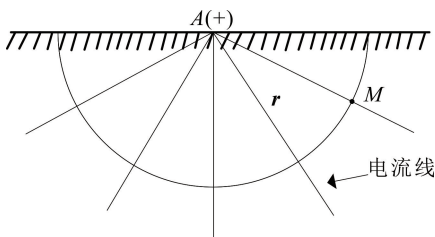
根据欧姆定律微分形式可知, M 点的电场强度为

$$E = J\rho = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (2)$$

由式(2)可求出 M 点的电压为

$$U = \int_r^{\infty} E dr = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (3)$$

由式(3)可知,在以 r 为半径的半球面上电压相等。

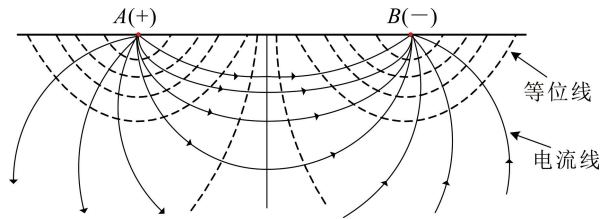


据文献[11]修编。

图 1 均匀各向同性半空间点电源示意图

Fig.1 Schematic diagram of point power supply at homogeneous isotropic half-space points

当有两个相距一定距离的电极置于地表时,两个电极所形成的电流场都会影响近地表任何一点的电位。图 2 为双电极供电时电流线与等位线的分布图。



据文献[11]修编。

图 2 双电极供电时电流线与等位线分布

Fig.2 Distribution of current lines and equipotential line when two electrodes are supplied

本文使用的磁电阻率法采用的是两个异性点电源的供电方式,其电流场分布应该服从上述理论,在此基础上观察地形对其电流场分布的影响。

2.2 堤防内电流场仿真计算

本文作者所在科研团队已在鄱阳湖流域堤防进行了堤防渗漏探测^[6],本文基于此堤防的实际尺寸建立基础仿真模型,并在此基础上改变堤防的不同参数,探究不同尺寸堤防内稳定电流场和磁场的分布特性。

图 3 为磁电阻率法测量示意图,本文即是对此过程进行仿真分析。

本模型采用的物理场类型为 AC/DC(交流/直流),为了将电场和磁场结合起来选用了多物理场耦合。堤防基础模型如图 4 所示,其中长方体为大地,棱台为堤防主体部分。大地的整体宽度(x 方向)设置为 180 m,长度(y 方向)为 100 m,高度(z 方向)为 20 m。同时考虑到实际情况中大地向无限远处延伸的属性,在模型周围建立了无限元域表征大地

无限远的属性。本文的研究内容是探究棱台参数的变化对堤防内稳定电流场与外部磁场分布的影响,即探究不同尺寸堤防内稳定电流场和磁场的分布特性。

使用磁电阻率法进行测量时需要施加人工激励电流,电极的位置与埋深会影响电流的分布^[12],因此考虑实际测量需求将两电极位置分别固定在点 A(-60, 50, 0)与点 B(60, 50, 0)处,其中 A 处为负电极,B 处为正电极,电极施加的电流大小为 0.5 A。堤防上宽为 5 m,堤防斜坡的坡度为 19°,坡长为 24 m。令堤防宽度变化值为 M ,基础高度为 H ,变化值为 N ;考虑堤防的材质以黄土为主,故将堤防整体电阻率设置为 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 。

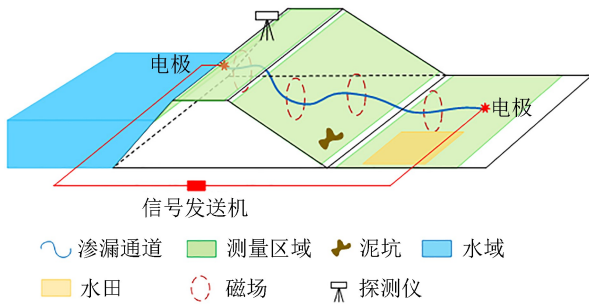


图 3 磁电阻率法测量示意图

Fig.3 Schematic diagram of magnetometric resistivity method measurement

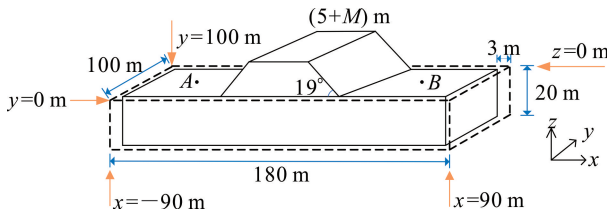


图 4 堤防模型

Fig.4 Embankment model

完成几何建模与物理场设置之后,需对模型进行网格剖分。网格剖分为物理场控制网格和用户控制网格两种:物理场控制网格能自动完成网格剖分,比较方便,但是不一定能满足用户需求;而用户控制网格可以根据需求自定义网格。自由四面体网格对几何的适应性最好,因此本文采用的网格类型是自由四面体网格。

在划分网格大小时,网格划分越细致,计算结果越精确,但也意味着更长的求解时间和更多的内存需求。本文将对重点研究对象堤防主体网格进行细

化剖分,对堤防边界无限元域网格进行粗化剖分。这样可以在所关注的区域获得更加精细化的结果,保证数据的可靠性。网格剖分结果如图 5 所示。

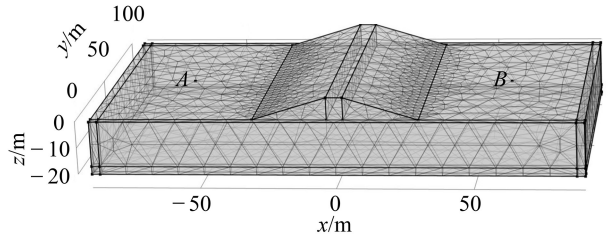


图 5 网格剖分图

Fig.5 Schematic diagram of grid subdivision

构建好堤防模型后,对模型的相关电场参数进行求解,图 6 为堤防模型电压等值线结果图。由图 6 可知,在正电极处电压最高,负电极处电压最低,电压等值线为以电极为中心的圆,符合式(3)。

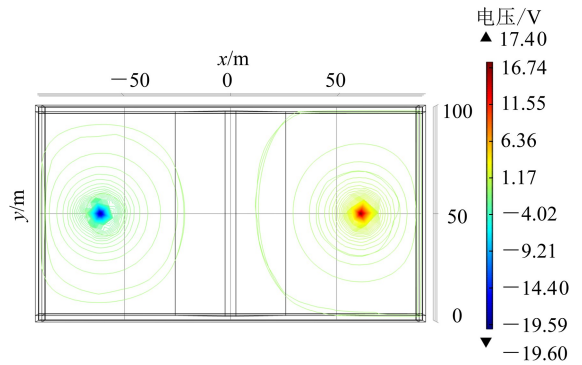


图 6 堤防模型电压等值线图

Fig.6 Voltage contour map of the embankment model

图 7 是堤防模型电场模结果。由图 7a、b 可知,两个电极所在处电场模较大,越远离电极,电场模越小。因为是均匀介质,故可以认为堤防非主体部分电场线分布符合图 2 所示的双电极供电时的电流分布。由图 7c 可知,堤防主体部分对大地电流的分布产生了影响,导致部分电流向上分散,电场线向上弯曲。下文即针对堤防不同参数的变化,分析堤防主体分走的电流占比,初步探究其内部电流分布特性。

在模型中取一组对称的截面($y=30, 70 \text{ m}$,图 8a)与截线($x=40, -40 \text{ m}, z=-5 \text{ m}$,图 8b),探究电流分布的对称性。图 8a 中截点在 x 与 z 方向间距均为 5 m , x 方向布置范围为 $[-100, 100] \text{ m}$, z 方向覆盖范围为 $[-20, 10] \text{ m}$ 。由图 8a 可知,两个关于 $y=50 \text{ m}$ 截面对称的截面上对应测点的电流

密度相差较小,在电极 x 坐标位置 ($x = -60, 60$ m)处电流密度最大,越远离电极电流密度越小,电流密度分布关于 $x=0$ 对称。图 8b 可以进一步验证该结论,两根关于 $x=0$ 截线对称的截线上电流密度相等,且均在 $y=50$ m 截面上电流密度最大。

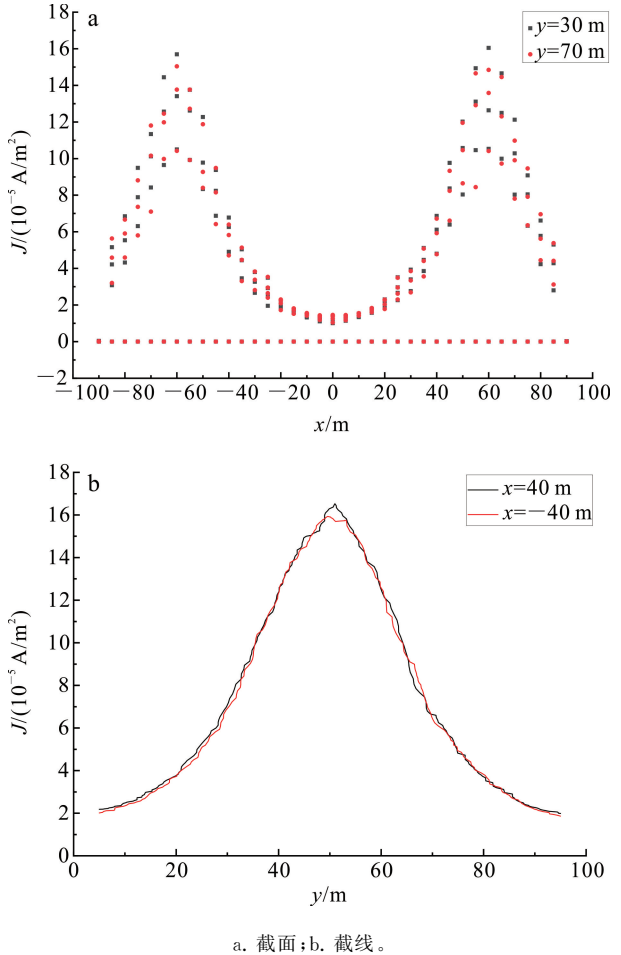
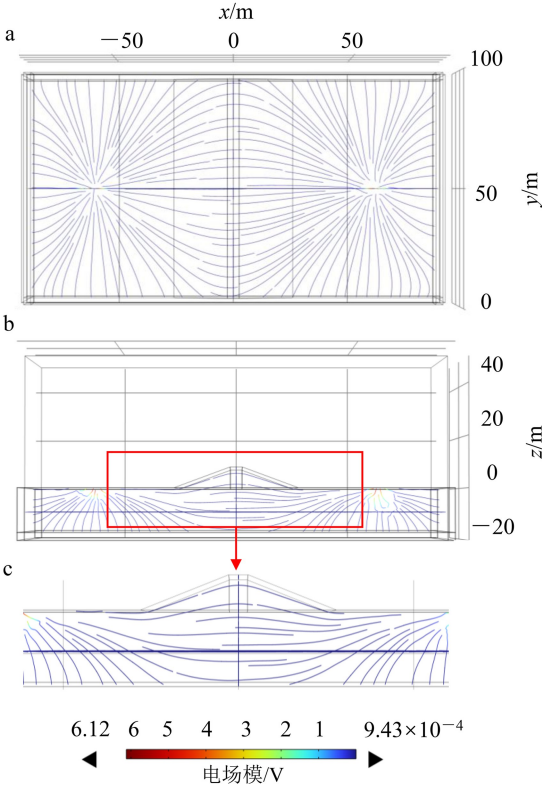


图 8 电流密度对称性

Fig.8 Symmetry of the current density



a. 俯视图(xy 平面); b. 正视图(xz 平面); c. 局部放大图。

图 7 堤防模型电场模结果

Fig.7 Result of electric field mode of the embankment model

2.3 堤防尺寸变化时电流分布特性

以图 4 模型为基础,通过改变堤防的上宽、斜坡角度和高度来建立一定数量的模型数据库,研究堤防尺寸变化对电流分布的影响,并在电流场分布的基础上研究堤防背景磁场的分布特性。

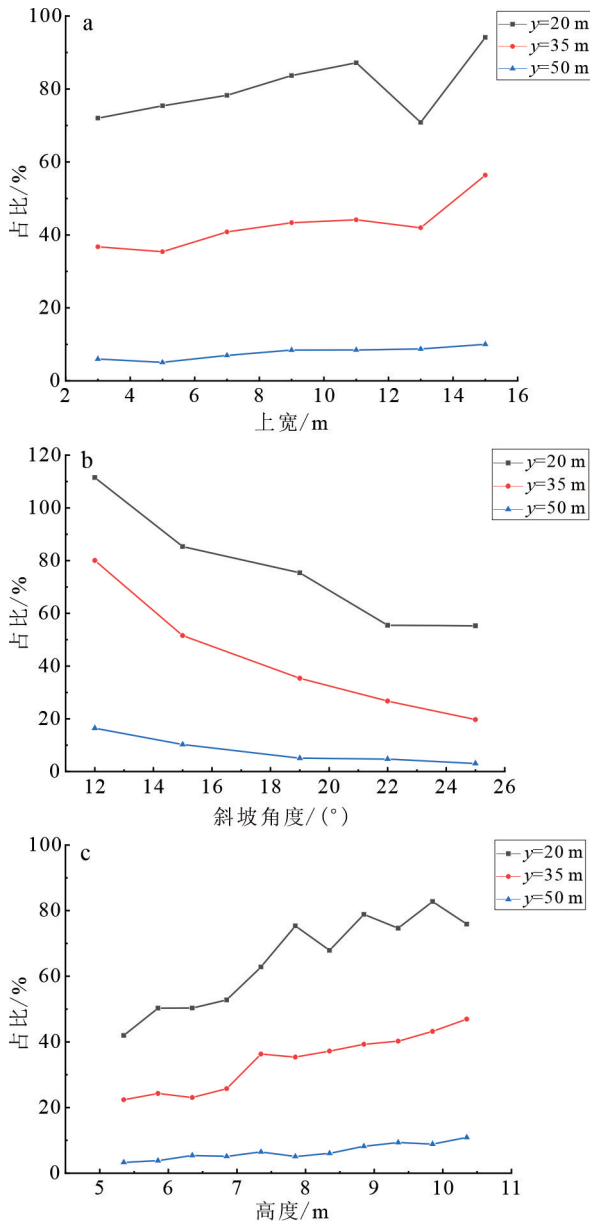
基于基础模型参数,以 2 m 为跨度,建立上宽为 3~15 m 的堤防模型,其他主要参数保持不变。对各个模型中的电流密度进行仿真计算,求得堤防主体部分在某个具体截面中的占比关系,结果如图 9a 所示。由图 9a 可知:随着堤防上宽的增加,堤防主体电流密度占比整体呈上升趋势;截面越远离中心面($y=50$ m),相同条件下占比越大。

基于基础模型参数,保持其他参数不变,建立斜坡角度为 $12^\circ \sim 25^\circ$ 的堤防模型,斜坡角度变化时堤

防主体部分电流密度在截面中的占比关系结果如图 9b 所示。由图 9b 可知,随着斜坡角度的增加,堤防主体电流密度占比整体呈下降趋势,且截面越远离中心面,相同条件下占比越大。

基于基础模型参数,以 0.5 m 为跨度,建立高度为 5.35~10.35 m 的堤防模型,其他主要参数保持不变。图 9c 为在不同堤防高度下,堤防主体电流密度在对应截面中的占比变化。由图 9c 可知,随着堤防高度的增加,占比整体呈上升趋势,且截面越远离中心面,相同条件下占比越大。

为了进一步了解堤防尺寸对电流分布的影响,本文探究了电流密度 x 、 y 、 z 三分量的分布特性。图 10 以 $y=30$ m、 $z=-5$ m 截线为例,绘制了电流密度三分量在该截线上的分布特性。由图 10 可知:电流密度 x 分量是轴对称的,其值在两个电极向外达到了最大值,在靠近电极处下降,堤防中心处有极大值;电流密度 y 分量在正电极处($x=60$ m)附近下降且为最小值,在负电极处($x=-60$ m)附近



a. 上宽; b. 斜坡角度; c. 高度。

图 9 堤防主体电流密度占比随堤防尺寸变化关系图

Fig.9 Relation diagram of current density ratio of main body of embankments changing with size

上升且为最大值; 电流密度 z 分量的分布特性与 y 分量一致, 但其绝对值比 y 分量小。

基于基础模型改变堤防参数, 探究堤防尺寸变化对电流密度三分量的变化。图 11 分别为堤防上宽、斜坡角度和高度变化时, 在 $y=30\text{ m}$ 、 $z=-5\text{ m}$ 截线处电流密度 x 、 y 、 z 三分量的值。由图 11 可知, 在堤防尺寸变化的情况下, 电流密度 y 分量曲线重合度最高, 即受影响最小; 电流密度 z 分量曲线波动稍大, 受影响较大; 电流密度 x 分量受影响程度处于两者之

间。不难发现, 在模型中段, 即 $x \in [-20, 20]\text{ m}$ 区间内, 三分量受堤防尺寸影响较小, 曲线重合度较高且相对平滑; 而在电极处曲线波动较大。

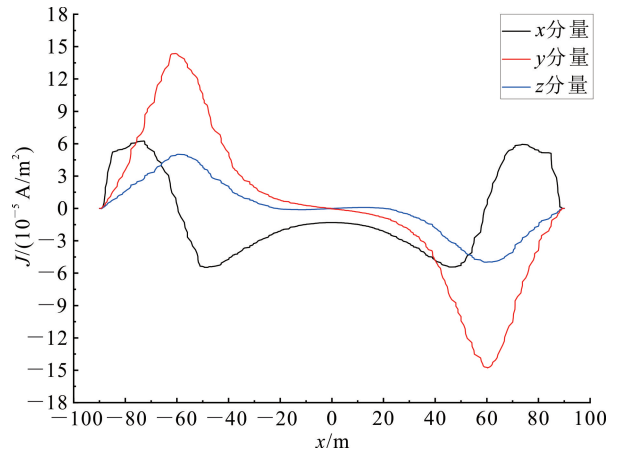


图 10 $y=30\text{ m}$ 、 $z=-5\text{ m}$ 截线处电流密度三分量

Fig.10 The three components of current density at $y=30\text{ m}$, $z=-5\text{ m}$ transversal line

3 堤防背景磁场仿真分析

3.1 磁电阻率法基本原理

在本实验方案中, 外部电流通过一对电极施加到地面, 磁场为人工施加的电流通过地下导电介质而激发。因为所施加的激励电流为直流电, 故频域中一般麦克斯韦方程组的解可以简化为稳态问题, 即:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0; \tag{4}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J}; \tag{5}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \tag{6}$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁感应强度, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, \mathbf{H} 为磁场强度; μ 为真空磁导率, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}\text{ T} \cdot \text{m/A}$; \mathbf{J} 为电流密度。

电流密度由与信号源相关的一次电流与待研究区域内的传导电流组成^[13], 即

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_s. \tag{7}$$

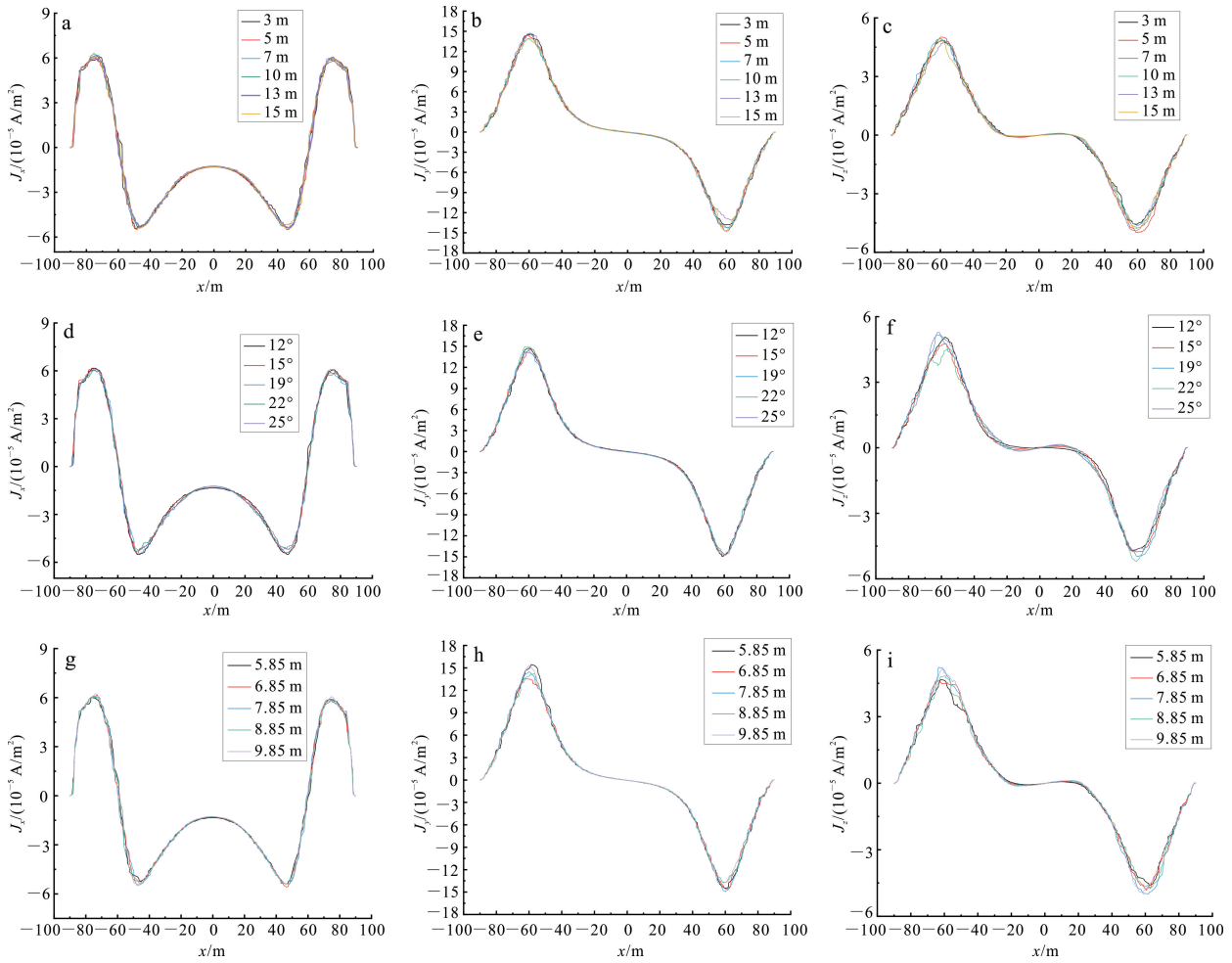
式中: \mathbf{J}_s 为信号源的电流密度; σ 为电导率; $\sigma \mathbf{E}$ 为待测区域电流密度。 \mathbf{E} 可以写为^[14]

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \tag{8}$$

式中, φ 为电势。可以得出^[13]

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = I [\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_A^+) - \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_B^-)]. \tag{9}$$

式中: \mathbf{r} 为某一点的位置矢量; \mathbf{r}_A^+ 与 \mathbf{r}_B^- 为激励电极 A 和 B 的位置。



J_x, J_y, J_z 分别为电流密度 x, y, z 分量。

图 11 $y=30\text{ m}, z=-5\text{ m}$ 截线电流密度三分量随堤防上宽(a、b、c)、斜坡角度(d、e、f)和高度(g、h、i)的变化

Fig.11 The three components of current density vary with embankment width (a, b, c), slope angle (d, e, f) and height (g, h, i) at $y=30\text{ m}, z=-5\text{ m}$ transversal line

为了求解磁场强度,需引入磁矢势(A)^[14],使得

$$\mu\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{10}$$

对磁矢势施加经典规范条件 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, 避免由磁矢势定义引起的不确定性,即可将方程(5)写成 $\nabla \mathbf{A} = \mu\mathbf{J}$ 。又因为 $\mathbf{A}_{(|r| \rightarrow \infty)} = 0$, 则可以得出测量点的通解^[15]:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\tau' \tag{11}$$

式中: \mathbf{r}' 为源邻域中积分点的位置; $d\tau'$ 为围绕源点周围的体积元。

对于磁电阻率法来说,可以先由电流密度计算磁矢势,然后通过计算磁矢势的旋度得到磁感应强度。从而毕奥-萨伐尔定律可以表示为^[15]

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int [\mathbf{J}_s(\mathbf{r}') - \sigma(\mathbf{r}') \nabla \varphi(\mathbf{r}')] \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d\tau' \tag{12}$$

3.2 堤防尺寸变化时磁场分布特性

在研究堤防内电流分布特性的基础上,开展了堤防正常场分布特性的研究工作。图 12 为 $z = 10\text{ m}$ 截面堤防正常场分布图。由图 12 可知,在两个电极处磁感应强度最大,且电极附近磁场梯度较大,而在堤防中部磁场变化较小。

图 13 以 $y=30\text{ m}, z=10\text{ m}$ 截线为例,绘制了磁感应强度三分量在该截线上的分布特性。由图 13 可知,磁感应强度 x 分量在正电极处最小,在负电极处最大;磁感应强度 y 分量整体在两个电极中部即 $x \in [-60, 60]\text{ m}$ 区间内最大;磁感应强度 z 分量较小,在 $x \in [-20, 20]\text{ m}$ 区间内其曲线较为平滑,在其他区间内波动较大。

基于基础模型改变堤防参数,探究堤防尺寸变化对磁感应强度三分量的变化。图 14 分别为堤防

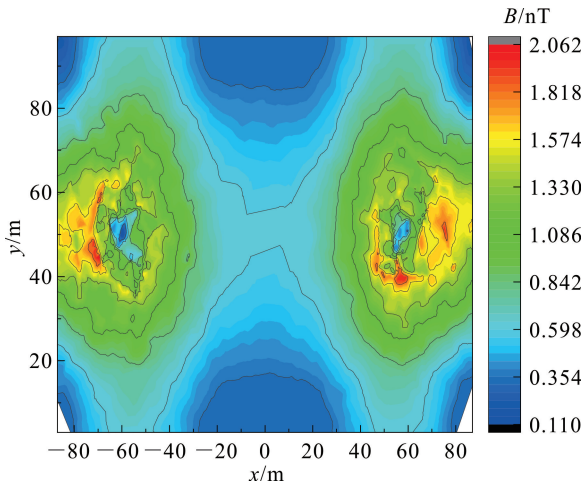


图 12 $z = 10$ m 截面堤防正常场

Fig.12 Normal field of embankment at $z = 10$ m cross section

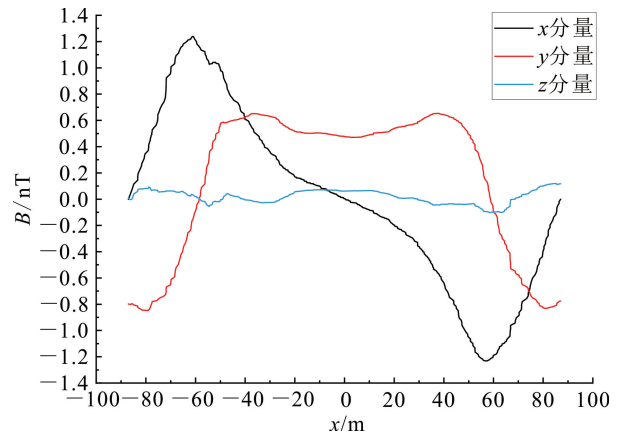


图 13 $y = 30$ m, $z = 10$ m 截面处磁感应强度三分量

Fig.13 The three components of magnetic field at $y = 30$ m, $z = 10$ m transversal line

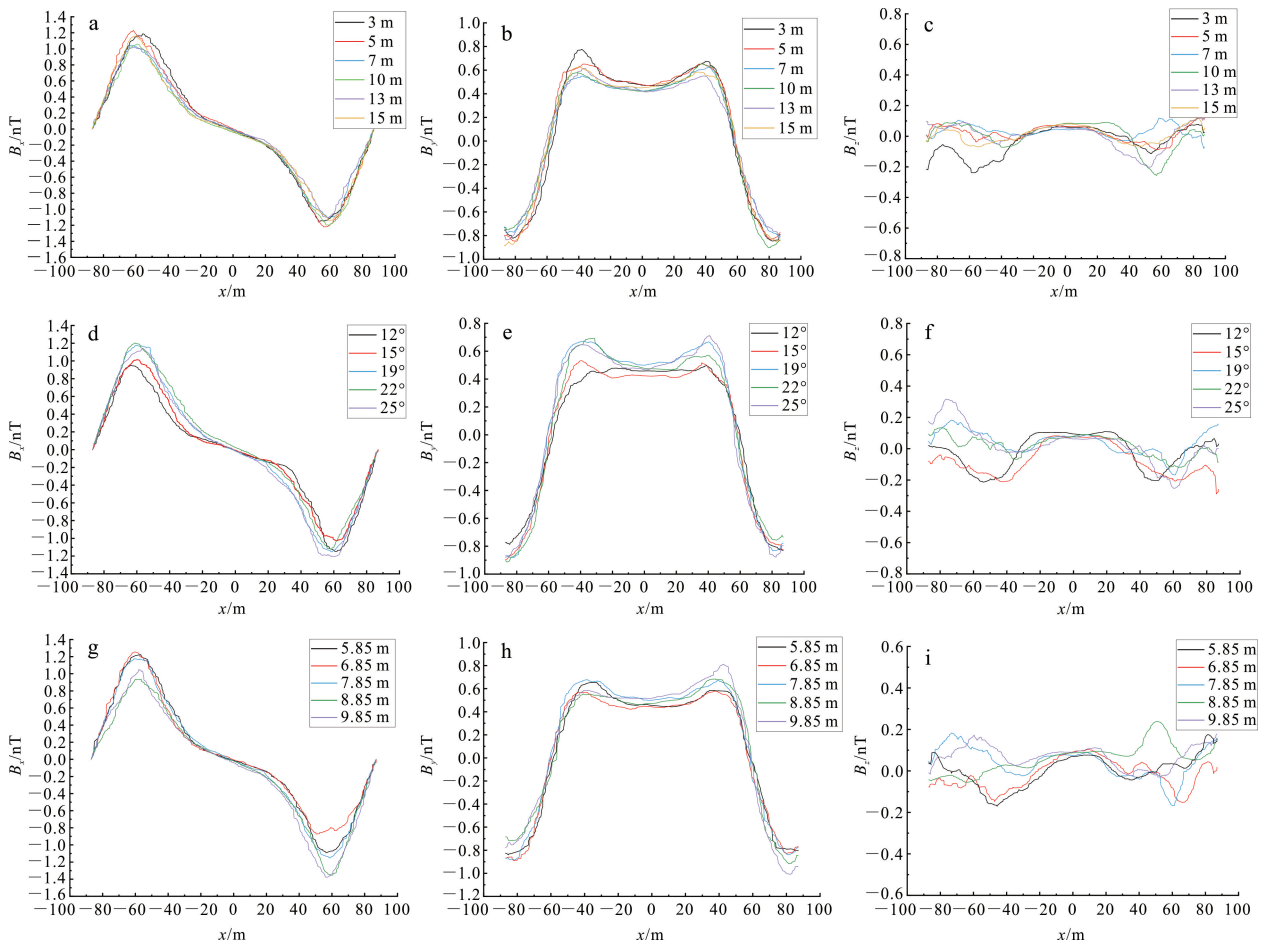


图 14 $y = 30$ m, $z = 10$ m 截面磁感应强度三分量随堤防上宽(a、b、c)、斜坡角度(d、e、f)和高度(g、h、i)的变化

Fig.14 The three components of magnetic induction intensity vary with embankment width (a, b, c), slope angle (d, e, f) and height (g, h, i) at $y = 30$ m, $z = 10$ m transversal line

上宽、斜坡角度和高度变化时, $y = 30\text{ m}$ 、 $z = 10\text{ m}$ 截线处磁感应强度 x 、 y 、 z 三分量的值。由图 14 可知, 在堤防尺寸变化的情况下, 磁感应强度三分量在电极附近变化较大, 在曲线中段 $x \in [-20, 20]\text{ m}$ 区间内受堤防尺寸影响较小, 与电流规律吻合。即使曲线中段磁感应强度受堤防尺寸影响较小, 但是磁感应强度 y 分量曲线中段整体波动相较于另外两个分量更大。在曲线中段: 随着堤防上宽的增加, 磁感应强度 y 分量整体呈下降趋势(图 14b); 随着斜坡角度的增大, 整体上呈上升趋势(图 14e); 随着堤防主体高度的增加, 整体上亦呈上升趋势(图 14h)。在曲线中段外的其他区域, 磁感应强度 x 分量相较于 y 分量变化波动更大, 其变化规律在堤防上宽和斜坡角度的影响下与 y 分量一致, 堤防高度增加时在两个电极处与之相反。磁感应强度 z 分量的变化规律不明晰, 且其值相较于 x 和 y 分量更小, 对堤防总磁感应强度影响最小。

在对数据库中缺失的堤防模型进行预测时, 可以依据此分布特性进行。

3.3 堤防测点数据预测

根据实地测量需求, 在仿真模型中布置测点如图 15 所示。测点布置范围为 $100\text{ m} \times 60\text{ m}$, 测点之间在 x 与 y 方向上均间距 10 m 。电流密度测点布置在 $z = -5\text{ m}$ 平面上(图 15a), 磁感应强度测点布置在 $z = 10\text{ m}$ 平面上(图 15b)。

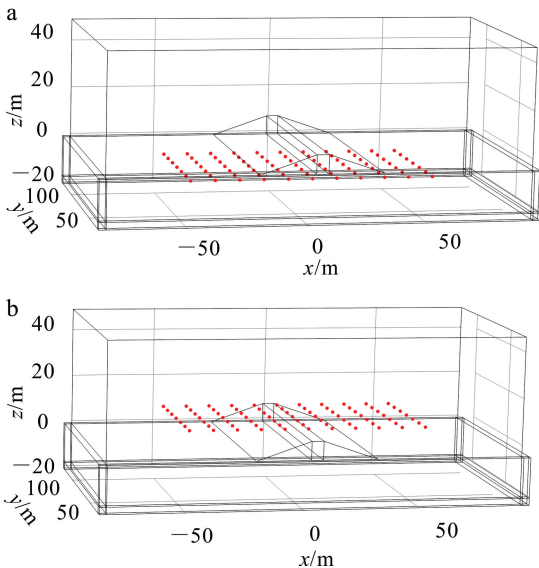
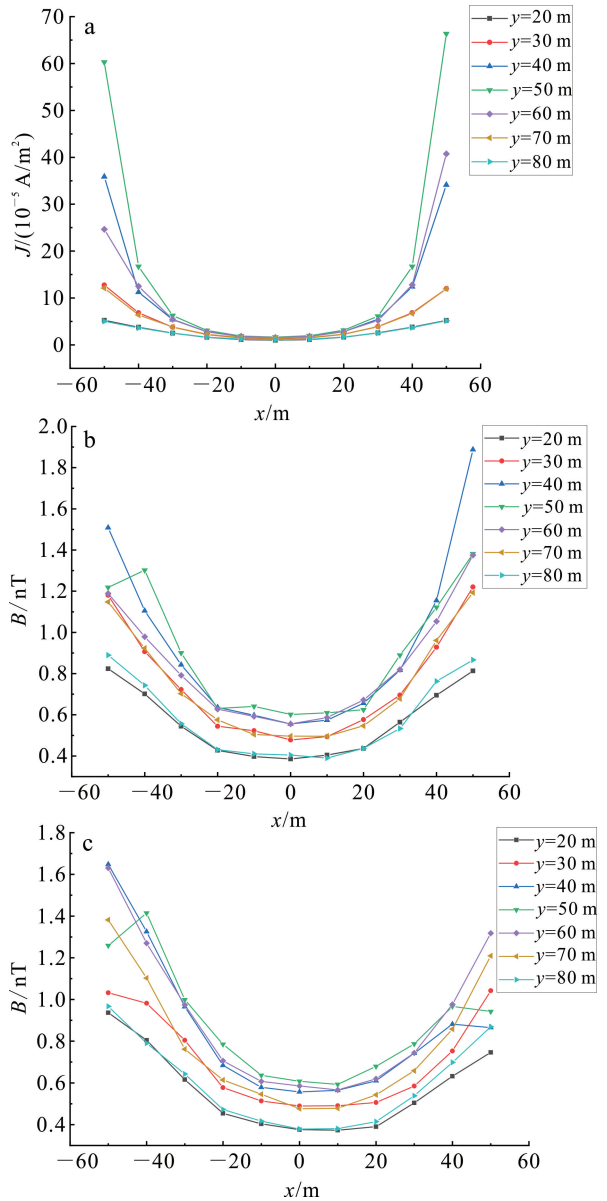


图 15 电流密度测点 (a) 及磁感应强度测点 (b) 布置情况
Fig.15 Measuring points layout of current density (a) and magnetic induction intensity (b)

完成测点的布置后, 分别对电流密度和磁感应强度进行仿真研究, 部分仿真结果如图 16 所示。由图 16a 可知: 在曲线中段 $x \in [-20, 20]\text{ m}$ 区间内, 电流密度随 x 的增大变化梯度较小, 在 $[-40, 20]\text{ m}$ 与 $[20, 40]\text{ m}$ 区间内变化较大; 同时, 测点所在截面越靠近中心面 ($y = 50\text{ m}$), 电流密度越大, 越靠近两端的测点, 电流密度也越大。所得磁场分布趋势(图 16b、c)与电场分布趋一致。



a. 上宽 5 m , 斜坡角度 19° , 高度 7.85 m ; b. 上宽 5 m , 斜坡角度 19° , 高度 7.85 m ; c. 上宽 5 m , 斜坡角度 22° , 高度 7.85 m 。

图 16 电流密度、磁场感应强度部分仿真结果
Fig.16 Simulation results of current density and magnetic induction intensity

通过建立一定数量的模型数据库,可以获得较多的测点数据,以达到对数据库中缺失的模型尺寸进行预测的目的。例如现需要对上宽为 6 m、斜坡角度为 17°、高度为 8.35 m 的堤防进行渗漏通道探测工作,使用磁电阻率法对该堤防开展作业前,首先需要获取其正常场,即获得如图 17 所示测点处的磁感应强度,进而可以依据现有数据库以及堤防磁场分布特性对测点处的磁感应强度进行预测,预测结果如图 18a 所示。为了验证预测结果的准确性,在

仿真软件中搭建了该尺寸的模型,仿真获得该尺寸下堤防的实际磁感应强度数据,结果如图 18b 所示。分别计算每条预测曲线与实际曲线对应的均方误差以及模型整体的均方误差,其结果如表 2 所示。

由图 18 及表 2 可知,模型的均方误差较小,从整体趋势来看,越靠近电极所在 y 平面,预测数据的均方误差越大。

表 2 预测曲线与实际曲线均方误差

Table 2 Mean square error between predicted curve and actual curve

曲线	均方误差/ nT^2
$y=20\text{ m}$	0.005 7
$y=30\text{ m}$	0.005 4
$y=40\text{ m}$	0.010 7
$y=50\text{ m}$	0.022 3
$y=60\text{ m}$	0.007 8
$y=70\text{ m}$	0.008 2
$y=80\text{ m}$	0.004 6
整体	0.009 3

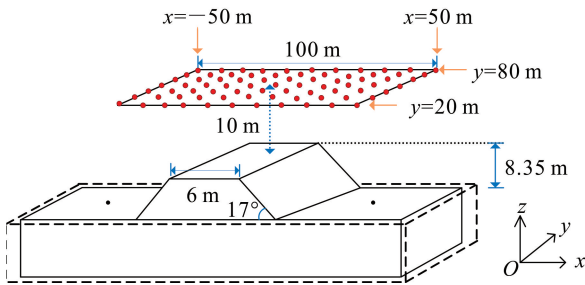


图 17 正常场测点示意图

Fig.17 Normal field measurement point diagram

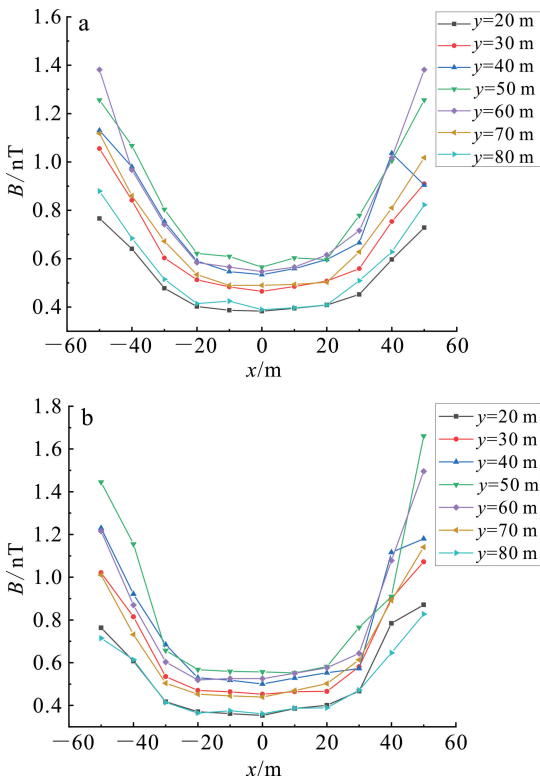


图 18 上宽 6 m、斜坡角度 17°、高度 8.35 m 磁感应强度预测值(a)及实际值(b)

Fig.18 Predicted data (a) and actual data (b) of 6 m wide, 17° slope angle, 8.35 m high magnetic field

另外计算得知,此假设模型中,预测数据的平均相对误差为 9.63%,整体预测效果较好。

4 结论

本文针对渗漏通道弱磁数据处理过程中堤防正常场计算时间长的问题,开展了堤防磁场分布特性分析的研究工作,得到以下结论。

1)在堤防中段,磁感应强度 y 分量最大,在实际测量过程中,中段的测量区域覆盖了堤防自身所在的地域,故为研究中更关心的区域。

2)磁感应强度 y 分量在测域中部的整体波动相较于另外两个分量更大,其值随着堤防上宽的增加呈下降趋势,而随着斜坡角度的增大或堤防主体高度的增加呈上升趋势。在对数据库中缺失的堤防模型进行预测时,可以依据此分布特性进行。

3)依据本文总结的分布特性和现有的模型数据库能够较好地预测与之尺寸相近堤防的正常场,对远离电极的平面预测准确度较高,堤防模型预测的平均相对误差为 9.63%。

本研究可以在探测现场快速得到待测堤防正常场,大大缩减了堤防正常场精细化建模所需花费的时间。综上,本研究工作对于提升堤防渗漏探测的效率具有一定的实际工程意义。

参考文献 (References):

- [1] 苏怀智,周仁练. 土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 1-10.
Su Huaizhi, Zhou Renlian. Research Progress and Prospect of Earth-Rockfill Dam Leakage Detection Modes and Method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 1-10.
- [2] 王少伟,苏怀智,付启民. 病险水利工程除险加固效果评价研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 77-85.
Wang Shaowei, Su Huaizhi, Fu Qimin. Advances in Reinforcement Effect Evaluation for Dangerous Hydraulic Projects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(6): 77-85.
- [3] 杜新强,何立滢,任思睿,等. 中国北方地区水资源演变和供水构成变化特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(2): 566-577.
Du Xinqiang, He Liying, Ren Sirei, et al. Water Resources Evolution and Water Supply Composition Changes in Northern China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 566-577.
- [4] 王福刚,盘惠林,李胜伟,等. 含膏岩地层地下水环境对混凝土建筑侵蚀实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(4): 1185-1194.
Wang Fugang, Pan Huilin, Li Shengwei, et al. Experiment on Concrete Building Erosion by Underground Water in Gypsum Rock Formation [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(4): 1185-1194.
- [5] Abderrezak B, Bernard G, Michel A. Down-Hole Magnetometric Resistivity Inversion for Zinc and Lead Lenses Localization at Tobermalug, County Limerick, Ireland [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 137: 25-33.
- [6] 周华敏,邬爱清,肖国强,等. 堤防管涌通道微弱磁场信号检测技术[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(8): 112-119.
Zhou Huamin, Wu Aiqing, Xiao Guoqiang, et al. Weak Magnetic Field Signal Detection Technology for Dike Piping Channel [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(8): 112-119.
- [7] 王朋. 二维电阻率层析成像技术在土石坝渗漏诊断中的应用[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009.
Wang Peng. The Applied Research of Two-Dimensional Resistivity Tomography Technology in the Earth Dam Leakage [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [8] 张欣. 含隐患土石堤坝三维电场特征分析及成像识别技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2017.
Zhang Xin. Analysis of 3D Electric Field Characteristics and Imaging Recognition Technology of Earth-Rock Dam with Hidden Trouble [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [9] 欧元超. 土石坝水库渗漏并行电法探查工程应用研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2017.
Ou Yuanchao. Study on the Application of Parallel Electrical Prospecting Method for Seepage of Earth Rock Dam [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [10] 宋昊翔. 起伏地形下高密度电法地形响应研究:以松潘地区为例[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017.
Song Haoxiang. A Research on Topographic Response of High-Density Resistivity Method in Rugged Area-Illustrated by the Case of Songpan Area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [11] 李鹏慧. 露天矿台阶内电流场分布对高密度电法勘探的影响研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2021.
Li Penghui. Research on the Influence of Current Field Distribution in Strip Mine Steps on High-Density Electrical Exploration [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021.
- [12] 叶青,王晓,杜学彬,等. 中国地震井下地电阻率研究进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 669-683.
Ye Qing, Wang Xiao, Du Xuebin, et al. Research Progress of Seismic Underground Geo-Resistivity in China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 669-683.
- [13] 万玲,叶睿,汪满满,等. 基于磁电阻率法的堤坝渗漏路径磁异常分布特征分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(8): 3031-3039.
Wan Ling, Ye Rui, Wang Manman, et al. Analysis of Magnetic Anomaly Distribution Characteristics Caused by Seepage Path in Dam Based on Magnetometric Resistivity [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(8): 3031-3039.
- [14] Chen J, Haber E, Oldenburg D W. Three-Dimensional Numerical Modelling and Inversion of Magnetometric Resistivity Data [J]. Geophysical Journal International, 2002, 149(3): 679-697.
- [15] Jessop M, Jardani A, Revil A, et al. Magnetometric Resistivity: A New Approach and Its Application to the Detection of Preferential Flow Paths in Mine Waste Rock Dumps [J]. Geophysical Journal International, 2018, 215(1): 222-239.