



# 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌 预测预警系统研究<sup>\*</sup>

张存勇, 成 玮, 范园园

(江苏海洋大学 海洋技术与测绘学院, 江苏 连云港 222005)

**摘要:** 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌的监测一直缺乏有效的方法。为了预测预警淤泥质海底航道边坡失稳滑塌, 采用灰度共生矩阵提取的4个特征值作为识别特征, 并利用距离相似性进行声纹特征匹配, 设计完成一个用于航道边坡失稳滑塌检测的声纹识别系统。将待检测航道边坡浅地层剖面图像输入系统后, 可快速定位显示出航道边坡失稳滑塌预测预警位置。实测结果表明该系统具有较高的识别率, 有助于航道管理和工程技术人员检测航道边坡稳定性。

**关键词:** 海底航道; 边坡; 失稳滑塌; 预测预警

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0117-05

## Research on prediction and early warning system of slope instability and collapse in muddy submarine channel

ZHANG Cun-yong, CHENG Wei, FAN Yuan-yuan

(School of Marine Technology and Geomatics, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** There has been no effective method to monitor the slope instability and collapse of the muddy submarine channels so far. To predict and warn the instability and collapse of muddy submarine channel slope, the four features extracted by gray level co-occurrence matrix are used as recognition features, and the distance similarity is used for voiceprint feature matching, a voiceprint recognition system is designed and completed for the detection of instability and slumping of channel slopes. After inputting the sub-bottom profile images of the side slope of the channel to be detected into the system, it can quickly locate and display the image similar to the slope instability and collapse image. The test results show that the system has a high recognition rate, which is helpful for channel management and engineering technical personnel to detect the stability of channel slopes.

**Keywords:** submarine channel; slope; instability and collapse; prediction and early warning

淤泥质海底航道边坡失稳滑塌是人工开挖航道斜坡自身求得稳定状态的一种自然调整过程, 即使坡度很缓, 航道也可能产生失稳滑塌<sup>[1-2]</sup>。海水以流、浪、潮等运动形式作用于航道边坡, 受动荷载的强度和周期以及边坡土体自身状态的影响, 使海底土体强度软化、抗剪强度衰变以及孔隙水压升高, 极易引起有效应力降低<sup>[3]</sup>, 航道可

能产生失稳滑塌、几何形状改变, 导致港口堵塞, 造成重大的经济和社会损失。由于淤泥质海域海水具有良好的导电性、极强的吸热能力和极差的透光性使得雷达、红外线望远镜、卫星遥感等依赖于激光、电磁波传播的探测技术束手无策, 无法对海底沉积层进行高效探测<sup>[4]</sup>。此外, 由于人们较难接近海底, 尤其是在恶劣的海况下, 对淤

泥质海底航道边坡失稳滑塌的监测一直缺乏有效的方法,绝大多数是事后借助测深的方法或者多波速扫描的方法查看滑塌情况<sup>[5]</sup>,但对哪里可能出现滑塌以及何时出现滑塌难以提出有效的证据并及时采取预防措施。

声波在固体和液体中较强的穿透能力和相对较小的衰减使其在海底沉积物探测中发挥了重要作用<sup>[6]</sup>。浅地层剖面探测是利用声波在海水和海底沉积物中的传播和反射特性对海底沉积物进行连续探测,从而获得直观的海底浅部地层剖面的一种海底声学探测技术。沉积物的声学特性和内部组织的变化对声波的传播产生一定的影响,当沉积物的成分、结构和密度等因素发生变化时,声波的传播速度、能量衰减及频谱成分等亦将发生相应变化<sup>[7-8]</sup>,形成具有一定色彩或灰度的点、线和块状图形组成的浅地层剖面声纹图像<sup>[9]</sup>。海底航道边坡在其失稳滑塌的不同发育周期内,其应力、应变和物理性状不同,对声速的响应也有所不同,因而在一定程度上形成了具有鉴别特征的“声学指纹”。

目前,浅地层剖面声学图像大多以人工方式进行判读识别,劳动强度大、对检测人员要求较高,大部分还停留在定性描述层面,人为检测还可能出现漏判、误判。此外,单凭肉眼很难将图像隐藏的信息提取出来。实现淤泥质海底航道边坡失稳滑塌预测预警已成为一项迫切任务。淤泥质海底航道边坡失稳滑塌预测预警系统的开发可为航道安全运营以及防灾减灾提供依据。

## 1 系统原理

声波在不同类型的沉积物中具有不同的传播特征,当沉积物的成分、结构和密度等因素发生变化时,声波在其中的传播也会发生相应的变化。根据这一原理可以利用声波在海底沉积物中的传播信息探测相应沉积物的结构、致密程度和完整程度等特征。同一海底沉积物在不同应变阶段,声速具有明显的随应力变化而变化的特征,航道

边坡沉积物在其失稳滑塌的不同发育周期内,边坡所受的应力发生变化,相应地沉积物微结构也发生变化,进而导致声速也相应发生变化,因而在一定程度上形成了具有鉴别特征的“声学指纹”。

本系统利用沉积物“声学指纹”特征实现海底航道边坡失稳滑塌早期诊断并预测预警,可在计算机上直接输出和展示图形结果,包括5个主要功能模块:声纹模型库建立、图像处理、特征提取、声纹识别和预测预警。系统流程见图1。

### 1.1 声纹模型库建立

利用海底航道边坡失稳滑塌过程全周期声学图像,对航道边坡失稳滑塌过程不同阶段声学图像进行灰度处理和图像分割,采用灰度共生矩阵法提取图像声纹的能量、对比度、相关度、均质性4个特征值,组成声纹识别特征,利用淤泥质海底航道边坡失稳滑塌过程中沉积物声学指纹,识别失稳滑塌过程早期声纹特征,作为航道边坡失稳滑塌预测预警声纹识别标志,存入声纹模型库。

### 1.2 图像处理

浅地层剖面图像处理。由于输入的彩色图像包含大量颜色信息,会占用较多的存储空间,且处理时也会降低系统的执行速度,因此对图像进行处理时,将彩色图像转换为灰度图像,以加快处理速度。当输入一幅新图像后,系统会对待检测图像灰度化处理和图像分割,便于特征匹配。

### 1.3 声纹特征提取

借助灰度共生矩阵技术提取图像声纹特征。由于相邻像素之间的距离取值与图像的纹理信息有关,像素间距离较小可以更好表示纹理的细节构成,所以选择距离为1,提取图像0°、45°、90°和135°共4个方向的纹理特征值,组成特征向量。

### 1.4 声纹识别

声纹识别是将输入的浅地层剖面声学图像特征与已知的失稳滑塌过程早期声学图像特征进行比较,从声图序列中逐条对比识别,判断输入图

像的声纹特征是否含有已知模型库中边坡失稳滑塌早期声纹特征。在识别过程中, 系统根据声纹模型库对输入的特征参数进行特征匹配, 从而实现声纹识别。

### 1.5 预测预警

根据预先设定声纹特征相似度阈值进行判断, 若相似度小于阈值, 则识别成功并标记输出位置, 结合 GPS 空间定位, 据此鉴别出失稳滑塌早期地段, 并预测预警。若相似度大于阈值, 为相对稳定图像, 则继续往下进行识别, 并可视化显示。

### 1.6 识别率

根据相似度阈值检索出所有相似图像, 按照相似距离由小到大进行排序, 从而得到图像相似度排序, 距离越小说明两幅图像越相似, 并给出图像总张数, 查看其中包含多少幅子图属于被检测图, 并将该值除以总张数作为识别率。

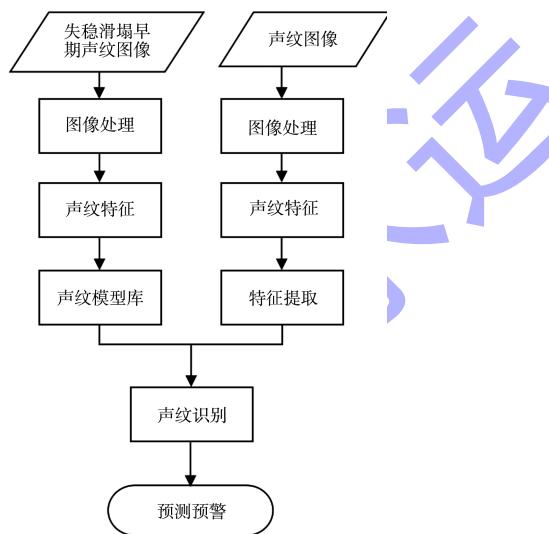


图 1 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌预测预警流程

## 2 技术实现

### 2.1 航道边坡失稳滑塌过程声纹模型库

由于很难在现场获得一个完整的海底航道边坡失稳滑塌过程, 因此在室内模拟一个完整的海底航道边坡失稳滑塌过程, 利用在连云港淤泥质海底航道中采取的沉积物在水槽中建立航道边坡模型模拟航道边坡在动力作用下失稳滑塌过程。采用 SES-2000 参量阵浅地层剖面仪发射低频声波对航道边坡失稳滑塌过程进行连续探测<sup>[10]</sup>。测量

过程中, 系统将所有原始数据存储在芯片中, 通过信号处理技术对回波信号放大和滤波等处理后, 形成以不同色彩显示的浅地层剖面声图, 据此建立淤泥质海底航道边坡失稳滑塌全周期过程不同阶段声纹图像。

### 2.2 声纹提取

浅地层剖面图像是声波在沉积层成分、结构和密度等因素发生变化而相应形成的具有一定灰度或色彩的点、块和线状纹理图像。灰度共生矩阵从纹理的空间结构提取图像方向、间隔和变化幅度的特征参数用于描述某方向上间隔一定距离的一对像素灰度出现的统计规律, 是最常用的二阶纹理分析方法<sup>[11]</sup>。具体步骤为: 设图像的灰度级为  $L$ , 灰度共生矩阵的大小为  $L \times L$ , 从图像灰度为  $i$  的像元出发, 统计与其距离为  $d$ 、灰度为  $j$  的像元在特定方向的频度  $p(i, j)$ , 通常取  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  方向。由于很难对矩阵进行定量解释, Haralick 等总结了 14 个特征参数来度量纹理特征, 其中能量 (ASM)、对比度 (CON)、相关度 (COR)、均质性 (HOM) 是进行纹理分析的主要参数<sup>[12-13]</sup>, 其计算公式分别为:

$$ASM = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j)^2 \quad (1)$$

$$CON = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (i - j)^2 p(i, j) \quad (2)$$

$$HOM = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j) / [1 + (i - j)^2] \quad (3)$$

$$COR = (\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L i j p(i, j) - \mu_i \mu_j) / (\sigma_i \sigma_j) \quad (4)$$

$$\mu_i = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L i p(i, j) \quad (5)$$

$$\mu_j = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L j p(i, j) \quad (6)$$

$$\sigma_i = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (i - \mu_i)^2 p(i, j) \quad (7)$$

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (j - \mu_j)^2 p(i, j) \quad (8)$$

式中:  $\mu_i$ 、 $\mu_j$  为灰度共生矩阵行和列的均值;  $\sigma_i$ 、 $\sigma_j$  为行和列标准差。本系统采用  $16 \times 16$  窗口, 特征距离  $d = 1$ , 计算  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  共 4 个方

向特征值, 从而得到图像的特征向量。

### 2.3 声纹识别

通常两幅图像之间的相似性用其特征向量之间的距离来度量, 欧式距离是相似性度量最常用的方法。在获取特征参数的基础上, 将待识别的特征向量与数据库中特征向量作相似性匹配, 得到特征向量之间的相似性距离, 根据设定的阈值, 从而识别判断出可能结果。本系统采用距离相似性度量进行识别, 设检测图像用  $\mathbf{A}$  表示, 声纹模型库中图像用  $\mathbf{B}$  表示, 经过特征提取后, 它们的特征矢量分别用  $\mathbf{A} = (f(i_1), f(i_2), f(i_3), \dots, f(i_{16}))$ ,  $\mathbf{B} = (f(j_1), f(j_2), f(j_3), \dots, f(j_{16}))$  表示, 则其欧式距离公式为:

$$d = \sqrt{\sum_{k=1}^{16} [f(i_k) - f(j_k)]^2} \quad (9)$$

式中:  $f(i_k)$ 、 $f(j_k)$  分别表示  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  方向能量、对比度、相关度、均质性特征参数。

在进行特征匹配时, 系统设置可以选择逐幅图像进行特征匹配, 也可以选择卷积方式进行特征匹配。如果选择等分图像比对, 求出 4 个声纹特征矢量, 再与声纹模型库图像进行相似度比较。如果选择卷积方式进行图像声纹特征匹配, 以模型库中失稳滑塌早期声纹特征矢量遍历待检测图像声纹特征矢量, 实测结果表明卷积特征匹配提高了图像识别效果, 但运行效率降低。

## 3 运用

以连云港 30 万吨级淤泥质海底航道为例, 该航道是我国开敞型海湾淤泥质浅滩深水航道的典型, 人工开挖航道总长约 70 km, 其 30 万吨级航道浚深至  $-23.0 \sim -22.5$  m, 是迄今为止国内外开挖厚度最大的人工航道, 创造了在淤泥质海岸航道建设中等级最高、开挖厚度最深、开挖里程最长、疏浚量最多 4 个世界第一, 最大淤泥质开挖厚度 17 m, 最大开挖深度超过 20 m, 航道土质可挖性好, 疏浚边坡稳定性差<sup>[14-15]</sup>。利用 SES-2000 参量阵窄波浅地层剖面仪获取淤泥质海底航道边

坡失稳滑塌声学图像(图 2)。海底航道边坡浅地层剖面声图是由一系列像素点顺次组成的二维时空矩阵, 矩阵中的元素代表不同的声强。对图像进行灰度化处理, 采用 Canny 算子进行边缘检测, 使声学图像中的声纹更加突出。对处理过的图像采用卷积方式分割成大小为  $130 \times 130$  像素分幅, 采用灰度共生矩阵法提取声纹能量、对比度、相关度、均质性 4 个特征(图 3), 组成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  共 4 个方向声纹特征向量。相似度阈值范围为 0~1, 设定预警阈值为 0.99~1, 选择卷积方式进行图像声纹特征匹配, 结合设置的阈值利用航道边坡失稳滑塌早期声学指纹特征向量对航道边坡声学图像进行自动识别检测, 根据声纹特征相似度阈值检索出所有相似图像。检测样本总数为 70 幅, 正确识别数为 65 幅, 识别率计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$W = \frac{V_c}{V_s} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $W$  为识别率;  $V_c$  为正确识别的样本数;  $V_s$  为测试样本总数。得出识别率为 93%。结合浅地层剖面声图空间定位识别出其相应位置, 据此鉴别出失稳滑塌早期地段, 并预测预警。从运行结果(图 4)看, 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌预测预警系统对边坡失稳滑塌识别定位非常有效, 具有较高的识别率。



图 2 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌过程声纹图像



图3 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌过程声纹图像特征提取

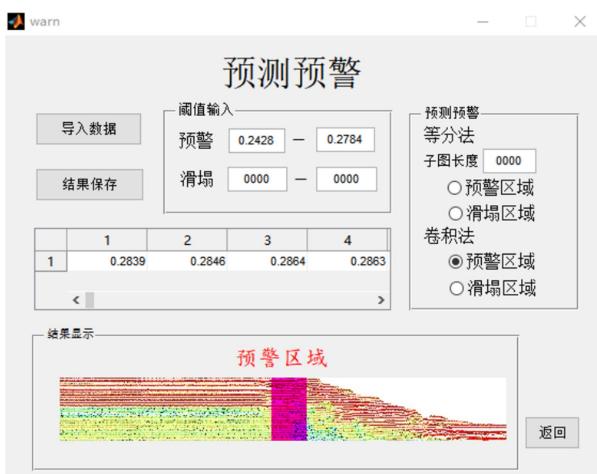


图4 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌预测预警

#### 4 结论

1) 针对淤泥质海底航道边坡失稳滑塌难以预测预警, 设计开发了一个淤泥质海底航道边坡失稳滑塌预测预警系统, 包括声纹模型库建立、图像处理、特征提取、声纹识别和预测预警 5 个主要功能模块。

2) 淤泥质海底航道边坡失稳滑塌预测预警系统对探测的海底航道浅地层剖面图像进行灰度处理和分割, 采用灰度共生矩阵提取每个图像的纹理特征值和对应特征向量, 利用距离相似性进行比较识别, 按距离的大小输出检测结果。根据相似度阈值, 若检测结果小于阈值, 则为边坡不稳图像, 发出预警; 否则, 为相对稳定图像。为淤泥质海底航道边坡稳定性探测

提供了一个有效方法。

3) 连云港 30 万吨级淤泥质海底航道边坡浅地层剖面声学图像实例结果表明, 该系统可快速定位边坡失稳相似图像, 结合浅地层剖面声图空间定位, 据此识别出失稳滑塌早期地段, 并预测预警, 识别率可达 90% 以上, 对航道安全运营以及防灾减灾具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] WEAVER P, TALLING P J, WYNN R B, et al. Onset of submarine debris flow deposition far from original giant landslide[J]. *Nature*, 2007(450): 541-544.
- [2] HANCE J J. Development of a database and assessment of seafloor slope stability based on published literature[M]. Austin: University of Texas at Austin, 2003: 89-90.
- [3] 刘立. 周期荷载下饱和粘性土动力特性[D]. 北京: 清华大学, 1986.
- [4] URLAUB M, VILLINGER H. Combining in situ monitoring using seabed instruments and numerical modeling to assess the transient stability of underwater slopes[M]. London: Oceanrep Geomar, 2018.
- [5] 胡光海, 刘忠臣, 孙永福, 等. 海底斜坡土体失稳的研究进展[J]. *海岸工程*, 2004, 23(1): 63-72.
- [6] SALEH M, RABAH M. Seabed sub-bottom sediment classification using parametric sub-bottom profiler [J]. *NRIAG journal of astronomy and geophysics*, 2016(5): 87-95.
- [7] 卢博, 梁元博. 海洋沉积物声速与物理参数的关系[J]. *海洋科学*, 1993(6): 54-57.
- [8] HAMILTON E L, BACHMAN R T. Sound velocity and related properties of marine sediments[J]. *The journal of the acoustical society of America*, 1982, 72(6): 1891-1904.
- [9] MOSQUERA R, GROPOSO V, PEDOCCHI F. Acoustic measurements of a liquefied cohesive sediment bed under waves[J]. *Advances in geosciences*, 2014, 39(39): 1-7.
- [10] 张兆富. SES-96 参量阵测深/浅地层剖面仪的特点及其应用[J]. *中国港湾建设*, 2001(3): 41-44.
- [11] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEIN I. Textural features for image classification [J]. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 1973, SMC-3(6): 610-621.

(下转第 170 页)