



基于声学相机的水下潜坝三维信息 重建试验研究*

李 豪¹, 张 鹏², 杨胜发², 胡 江², 李文杰²

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 针对潜坝在水下毁坏情况难以实时监测的问题, 引入声学相机对水下潜坝外形进行实时监测。基于声学相机的映射原理, 提出采用多视角声学图像, 建立多视点高度弧, 并依据视点间约束关系, 确定潜坝外形特征点三维信息的方法。结合该方法, 开展室内潜坝模型外形特征点三维信息重建试验, 结果表明: 基于4个视点的声学图像重建的水下潜坝模型外形尺寸误差在0.8%~8.6%范围内, 将该设备及方法应用于潜坝外形水毁情况实时监测具备实际可行性, 可为航道部门进行整治建筑物维护提供可行的参考及思路。

关键词: 潜坝; 水毁监测; 声学相机; 三维信息重建

中图分类号: TV 698.1; U 617.9+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0202-06

Experimental study on 3D information reconstruction of submerged spur dike by acoustic camera

LI Hao¹, ZHANG Peng², YANG Sheng-fa², HU Jiang², LI Wen-jie²

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center of Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Regarding the problem that it is difficult to monitor the water-destruction of submerged spur dike in real time, this paper introduces acoustic camera to monitor the shape of submerged spur dike in real time. Based on the mapping principle of acoustic camera, a method is proposed to establish multi-view height arc using multi-view acoustic image and to determine the three-dimensional information of external structural feature points of submerged spur dike according to the constraint relationship between views. Combined with this method, the three-dimensional information reconstruction experiment of the shape feature points of the indoor submerged spur dike model is carried out. The results show that the external dimension error of the submerged spur dike model reconstructed based on the acoustic image of four viewpoints is in the range of 0.8%~8.6%. It is feasible to apply the equipment and method to the real-time monitoring of submerged spur dike shape damage, which can provide a feasible reference and idea for the waterway department to maintain the regulation buildings.

Keywords: submerged spur dike; water-destruction monitoring; acoustic camera; 3D information reconstruction

在内河航道中, 潜坝受坡陡流急、水沙动力条件急剧变化等因素的影响, 易发生水毁, 导致河势恶化, 危及过往船只^[1]。进行潜坝外形的实

时监测, 及时获悉其损毁情况, 并采取相应的应急措施, 则可极大程度避免因潜坝水毁造成的航运事故的发生。在水下浑浊、阴暗的条件下, 声

收稿日期: 2022-02-21

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600400)

作者简介: 李豪(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事山区河流航道整治技术研究。

通讯作者: 杨胜发(1970—), 男, 博士, 教授, 从事航道整治, 水力学及河流动力学研究。E-mail: ysf777@163.com

学相机相较于以往的监测手段, 能够以较高的帧率, 实时清晰获取目标的高分辨率二维声学影像资料, 从而达到监测的目的^[2-4], 但声学相机所获取的二维声学影像资料提供的信息较为有限^[5], 若能基于二维声学图像对水下潜坝进行三维信息的重建, 则有利于更为准确地研判潜坝的水毁情况。

目前针对声学图像三维重建方面的研究较少, 且主要处于理论层面。Wang 等^[6]采用数字图像处理的方法, 依据声学图像中目标阴影长度信息, 完成目标三维信息的重建, 但该方法难以适用于凹凸不平的地形。Aykin 和 Negahdaripour^[7]提出一种空间雕刻的目标三维信息重建方法, 采用类似于“与”运算的方式实现了三维信息的恢复, 不过该方法对于目标曲率较大的凹面区域重建效果较差。Assalah^[8]提出采用多视角的声学图像进行目标三维信息的重建, 但该方法不能通过多幅任意视点声学图像完成重建, 具有一定限制。Kwak 和 Ji 等^[9-10]在此基础上, 建立了目标物特征点高度弧的映射模型, 通过求解特征点高度弧交点完成了水下目标三维信息的重建, 该方法可通过任意视点声学图像进行目标物三维信息的重建, 且不受地形地貌限制, 具有较强的适用性。

本文通过水下潜坝模型外形特征点三维信息重建试验, 采用多视角声学图像的特征点高度弧重建算法, 开展基于声学相机的潜坝外形三维信息重建方法研究, 以期为航道部门对航道整治物水毁监测技术的完善提供可行的思路及参考。

1 试验概况

试验在 $40\text{ m} \times 18\text{ m} \times 5\text{ m}$ (长×宽×高) 的蓄水池中进行, 通过布设潜坝模型及 4 个视点, 并利用声学相机在不同视点对潜坝模型进行拍摄, 从而获取水下潜坝模型不同视角的声学图像及声学相机坐标和姿态参数。

1.1 潜坝模型预制

试验采用长江上游山区河流中典型潜坝的外形参数进行模型预制。预制迎水坡比为 1:2、背水

坡比为 1:3、坝顶宽度 0.25 m、坝高 0.25 m、坝头坡比为 1:2.5 的混凝土潜坝模型, 模型坝身长度确定为 1 m, 见图 1。

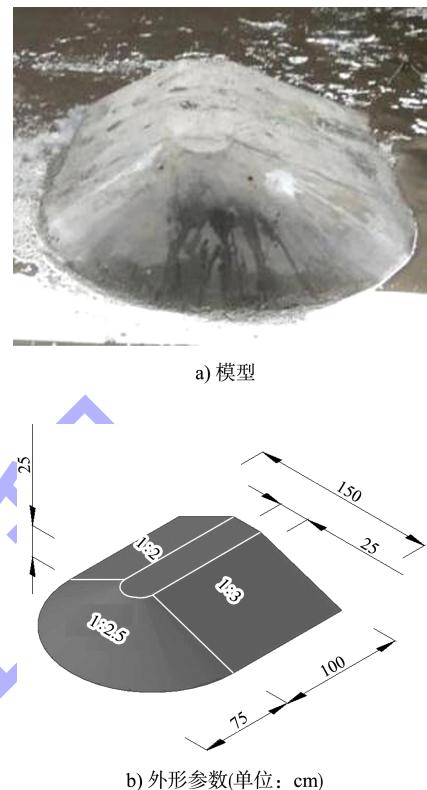


图 1 混凝土潜坝模型及外形参数

1.2 声学相机

试验采用的声学相机为 ARIS EXPLORER 1800 高分辨率双频识别声呐, 该设备在浑浊水体中具有优异的清晰成像性能。面对不同的应用需求, 能够以 1.1、1.8 MHz 2 种频率工作, 保证较高的帧率与分辨率以实时获取水下目标的声学影像资料, 具体参数见表 1。

表 1 高分辨率双频识别声呐主要参数

项目	频率/MHz	波束数	量程/m	视场角/(°)
低频(探测模式)	1.1	96	35	28×14
高频(识别模式)	1.8	96	15	28×14

1.3 试验布置与图像采集

试验将潜坝模型布设在蓄水池右下侧池底, 距水池右边壁 5 m, 距水池下边壁 7 m, 水池水深 3.5 m。共布置 4 个视点, 各视点间隔 3 m, 精度控制在 0.01 m 以内, 并以蓄水池右下角顶点作为原点建立水池局部坐标系, 见图 2。

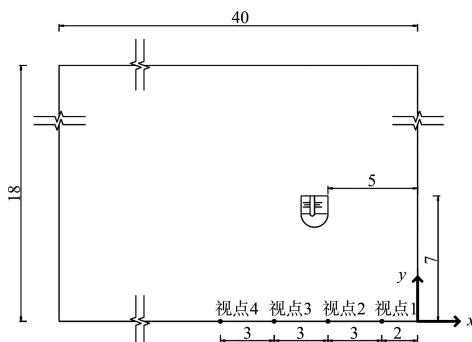


图 2 试验布置 (单位: m)

进行声学图像采集时, 将声学相机沿各视点采用钢管及固定架进行固定, 并将设备下放至水面下 0.15 m, 即在水池局部坐标系下 z 坐标为 -1.65 m, 见图 3。随即依次在各视点进行潜坝模型声学图像的获取, 声学相机在各视点姿态角 (heading 角、pitch 角、roll 角) 及在水池局部坐标系下坐标 $(x_w^{\text{Cam}}, y_w^{\text{Cam}}, z_w^{\text{Cam}})$, 见表 2。

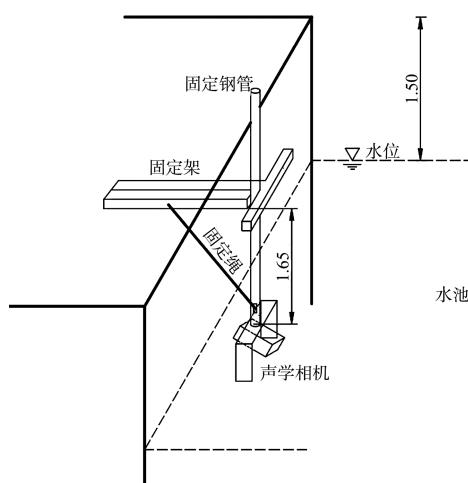


图 3 设备布置 (单位: m)

表 2 声学相机位置坐标及姿态角

试点 编号	heading 角/(°)	pitch 角/(°)	roll 角/(°)	x_w^{Cam}/m	y_w^{Cam}/m	z_w^{Cam}/m
1	285.6	-21.8	-1.6	-2.244	0.243	-1.650
2	310.5	-32.0	-2.3	-5.052	0.396	-1.650
3	336.7	-25.6	6.2	-7.964	0.218	-1.650
4	358.9	-20.6	3.7	-10.788	0.151	-1.650

2 三维信息重建方法

2.1 声学相机映射原理

声学相机是通过换能器以不同的方位角向前发射超声波, 传递到目标表面后产生反射形成回波信号, 再根据回波信号所携带的目标距离及方位信息, 结合回波信号强度, 从而构成水下目标

的声学图像^[11], 见图 4a)。其中坐标原点为声学相机位置, 灰色扇形区域为映射平面, 实心圆点为空间中目标点的实际位置, 空心圆点表示目标点在声学图像上的映射点, r 、 θ 、 φ 分别表示目标点的距离、方位角与高度角, R_{\min} 与 R_{\max} 分别表示声呐图像的最近距离与最远距离^[12]。

当目标的两个不同区域位于同一个波束中且与声学相机的距离完全一致时, 这两个区域产生的回波信号将完全一致, 会被映射到声学图像的同一区域中, 从而无法直接通过声学图像分辨出两者的高度信息, 如图 4b) 所示。图中正方体不同面上 A、B 两点位于同一个超声波束内, 且到声学相机的距离完全相同。在此情况下, 两点将被映射到映射面上的同一点 $x'(r, \theta)$ 上。因此, 声学图像中不包含目标的高度信息, 若已知声学图像中目标点的坐标 $x'(r, \theta)$, 则目标点的实际位置可能在图 4b) 中粗虚线(高度弧)上的任意位置。鉴于此, 可利用声学相机至少在两个视点对同一目标进行成像, 得到不同视角下的目标物声学图像。通过多张声学图像及声学相机在各视点的坐标和姿态参数, 即可构建目标同一特征点对应的多条不同高度弧, 再计算高度弧的相交点坐标, 即为特征点的实际空间坐标, 从而完成特征点的三维信息的重建, 见图 5。

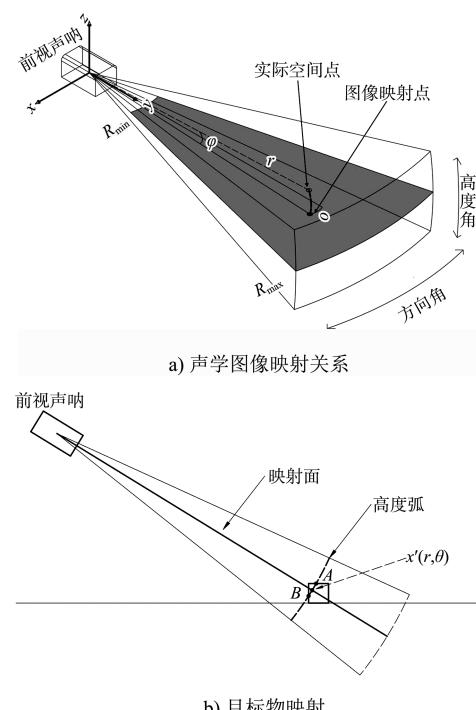


图 4 声呐图像映射原理

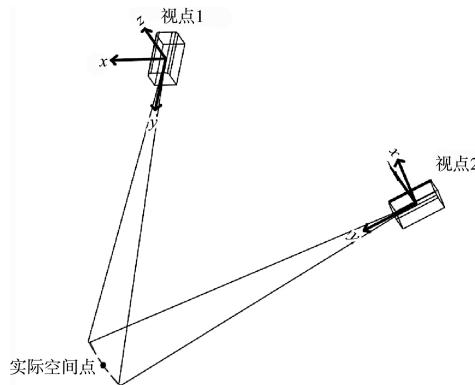


图 5 多视角声学图像三维重建原理

2.2 声学相机坐标系下特征点高度弧构建

针对在某一视点获取的声学图像中结合目标物的特征选定的特征点 p , 可根据其在声学图像中的图像坐标得到距离信息 r 及方位信息 θ 。再依据声学相机的高度角范围, 将高度角按 0.01° 的间距, 离散得到范围在 $(-7^\circ, 7^\circ)$ 的高度角数组 $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_{1401}]$ 。

结合得到的距离信息 r 、方位信息 θ 及高度角数组 j , 按照球坐标系与笛卡尔坐标系之间坐标的转换关系, 见式(1), 即可构建该视点声学相机坐标系下特征点 p 的高度弧 $P_i^{\text{Cam}1} = [P_1^{\text{Cam}1}, P_2^{\text{Cam}1}, \dots,$

$P_{1401}^{\text{Cam}1}]$, 构建得到的特征点高度弧中包含了 1 401 个备选点。

$$P_i^{\text{Cam}1} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \times \cos \varphi_i \times \sin \theta \\ r \times \cos \varphi_i \times \cos \theta \\ r \times \sin \varphi_i \end{bmatrix} (i=1,2,3,\dots,1401) \quad (1)$$

同理, 可构建同一特征点在另一视点声学相机坐标系下的高度弧 $P_i^{\text{Cam}2} = [P_1^{\text{Cam}2}, P_2^{\text{Cam}2}, \dots, P_{1401}^{\text{Cam}2}]$ 。

2.3 局部坐标系下特征点高度弧转换

不同视点的声学相机坐标系下构建的特征点高度弧, 还需根据空间三维坐标的转换原理将其转换到同一局部坐标系下, 进行特征点的三维信息重建。因此, 可通过声学相机在不同视点的 heading 角 α_i 、pitch 角 β_i 、roll 角 γ_i , 局部坐标系的 heading 角 α_w 、pitch 角 β_w 、roll 角 γ_w , 以及局部坐标系下声学相机在各视点的坐标 $[x_w^{\text{Cam}}, y_w^{\text{Cam}}, z_w^{\text{Cam}}]$, 计算转换矩阵, 并利用转换矩阵将各视点声学相机坐标系下的高度弧 P_i 转换到同一局部坐标系下 P_w , 转换矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} \cosh \cos r & \sinh \cos p + \cosh \sin r \sin p & -\sinh \sin p + \cosh \sin r \cos p \\ -\sinh \cos r & \cosh \cos p - \sinh \sin r \sin p & -\cosh \sin p - \sinh \sin r \cos p \\ -\sin r & \cos r \sin p & \cos r \cos p \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = [x_w^{\text{Cam}} \quad y_w^{\text{Cam}} \quad z_w^{\text{Cam}}]^T \quad (3)$$

$$P_w = [X_w \quad Y_w \quad Z_w]^T = R \times P_i + T \quad (4)$$

其中:

$$h = \alpha_i - \alpha_w, p = \beta_i - \beta_w, r = \gamma_i - \gamma_w \quad (5)$$

2.4 特征点三维信息重建

由于声学相机姿态、测量对象距离对高度弧构建精度的影响, 以及不同声学图像间特征点的匹配和映射误差, 转换得到的特征点高度弧不一定正好相交于一点。因此, 引入欧式距离寻求 2 条高度弧之间距离最近的两个点, 并将其中点作为交点。按式(6)计算 2 条高度弧中 1 401 个备选点之间的欧式距离 L , 取 L 值最小的两点作为特征点的实际空间备选点组

$[p_1(x_1, y_1, z_1), p_2(x_2, y_2, z_2)]$, 并计算两点坐标的均值作为特征点 p 的实际空间坐标, 如式(7), 从而完成特征点 p 三维信息的重建。

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (6)$$

$$p = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2}, \frac{z_1 + z_2}{2} \right) \quad (7)$$

3 试验结果分析

3.1 特征点选取与原始坐标读取

根据潜坝模型的特征及声学图像特点, 选取 8 个特征点进行潜坝模型外形三维信息的重建, 见图 6, 依据特征点所在图像像素坐标即可读取得到特征点的原始坐标 (r, θ) , 见表 3。

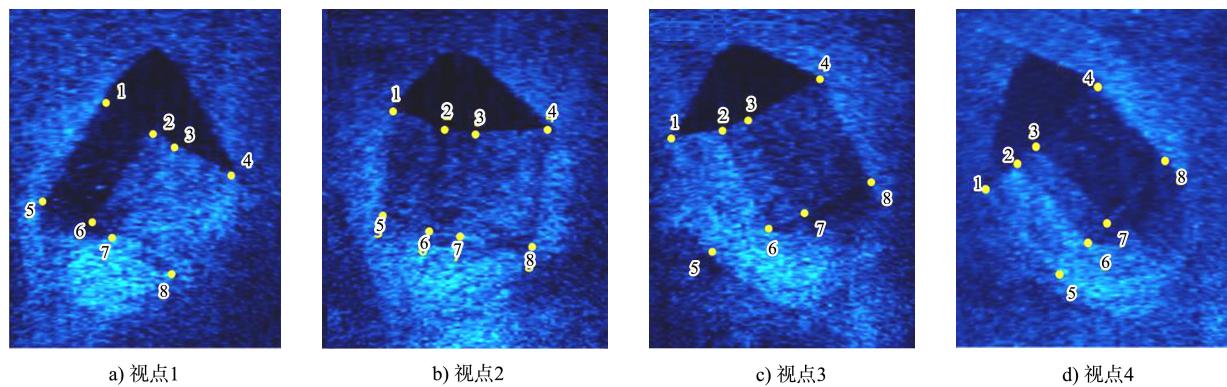


图 6 潜坝模型外形特征点

表 3 各视点声学图像特征点原始坐标

视点编号	特征点 1	特征点 2	特征点 3	特征点 4	特征点 5	特征点 6	特征点 7	特征点 8
1	(8.56 m, -1.37°)	(8.34 m, 1.72°)	(8.23 m, 3.42°)	(8.03 m, 7.43°)	(7.80 m, -4.93°)	(7.60 m, -2.07°)	(7.48 m, -0.44°)	(7.21 m, 4.48°)
2	(7.55 m, -4.71°)	(7.39 m, -1.29°)	(7.34 m, 0.61°)	(7.42 m, 5.53°)	(6.59 m, -6.11°)	(6.52 m, -2.86°)	(6.50 m, -0.65°)	(6.45 m, 5.20°)
3	(7.66 m, -7.01°)	(7.71 m, -3.35°)	(7.77 m, -1.88°)	(8.13 m, 2.89°)	(6.72 m, -4.93°)	(6.86 m, -0.39°)	(6.95 m, 1.70°)	(7.29 m, 6.51°)
4	(8.70 m, -8.14°)	(8.90 m, -6.07°)	(9.04 m, -4.79°)	(9.53 m, -1.39°)	(7.96 m, -4.28°)	(8.21 m, -2.12°)	(8.37 m, -0.76°)	(8.92 m, 2.66°)

3.2 特征点高度弧构建与转换

根据 4 个不同视点下 8 个特征点原始坐标, 即可对特征点在声学相机坐标系下的高度弧进行构建, 以视点 1 为例, 构建结果见图 7, 图中编号为 1~8 的弧段分别表示特征点 1~8 在视点 1 声学相机坐标系下的高度弧。结合表 1 中的设备姿态角以及各视点声学相机在局部坐标系下的坐标, 按式(2)~(3)计算得到转换矩阵 R 与 T , 再按式(4)将特征点在声学相机坐标系下的高度弧转换到水池局部坐标系下, 以特征点 1 为例, 转换结果见图 8, 其中编号为 1~4 的弧段分别表示在水池局部坐标系下特征点 1 对应的视点 1~4 的 4 条高度弧。同理, 可得到其余特征点在水池局部坐标系下的高度弧。

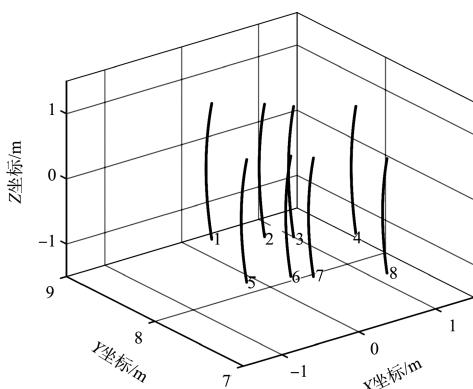


图 7 视点 1 声学相机坐标系下特征点高度弧

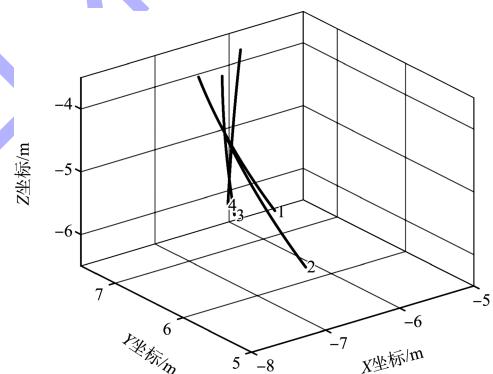


图 8 特征点 1 对应的 4 条高度弧

3.3 特征点三维坐标信息重建

根据特征点 1 在水池局部坐标系下对应的各视点高度弧转换结果, 对 4 条高度弧进行两两分组, 可划分为 6 组, 分别计算各组内 2 条高度弧中 1 401 个备选点之间的欧式距离, 并取欧式距离最小的两点作为一对备选点组, 再计算该备选点组中两点坐标的均值作为特征点 1 在此组合的备选实际坐标。据此, 特征点 1 可计算得到 6 个对应的备选实际坐标, 进一步求取均值, 最终重建得到特征点 1 的实际坐标。同理, 即可重建所有 8 个特征点的三维坐标, 结果见图 9。

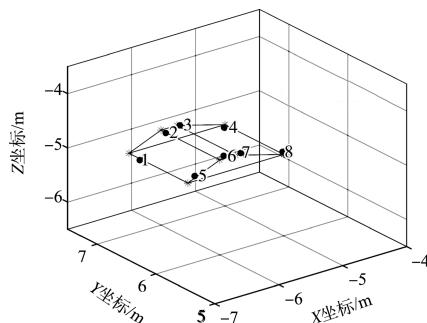


图 9 特征点三维坐标

表 4 特征点计算结果

特征点	特征点重建坐标/m	模型重建数据/m	模型实际数据/m	重建误差/%	均方根误差/m
1	(-6.421, 6.902, -5.101)	-	-	-	
2(坝顶宽)	(-5.940, 6.983, -4.815)	0.248	0.250	0.8	
3(迎水坡宽)	(-5.705, 7.000, -4.765)	0.473	0.500	5.4	
4(背水坡宽)	(-5.026, 6.985, -5.037)	0.685	0.750	8.6	
5(坝总宽)	(-6.394, 6.001, -4.909)	1.402	1.500	6.5	
6(坝高)	(-5.937, 6.007, -4.700)	0.252	0.250	0.8	
7(坝身长)	(-5.678, 5.995, -4.733)	0.927	1.000	7.3	
8	(-4.988, 6.035, -4.976)	-	-	-	

从表 4 可以看出, 通过多视角声学图像的三维重建方法计算得到的潜坝模型外形数据与实际外形数据相比, 误差在 0.8%~8.6% 范围内, 引入总体均方根误差 RMSE 衡量该方法的重建精度:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\hat{T}_i - T_i)^2}{n}} \quad (8)$$

式中: n 为模型外形参数个数; \hat{T} 与 T 分别为模型外形参数重建值与实际值。计算得到重建值与实际值的总体均方根误差为 0.058 m, 可见此方法能够基本恢复水下潜坝模型的外形三维信息。

依据重建方法原理, 重建精度会随着高度角离散密度的减小及目标距离的增加而降低, 且该方法对声学相机设备的坐标位置精度要求较高, 故在实际应用中, 可考虑结合 RTK、CORS 等高精度定位技术进行声学相机的定位, 并根据测量距离调整高度角离散密度, 从而对误差进行有效抑制。受制于设备硬件, 最远监测距离不会超过 35 m, 且原型潜坝的外形尺寸远大于室内模型, 因此实际误差在可控范围内。将此方法应用于航道水下潜坝的实时监测具备实际可行性。

3.4 水下潜坝模型三维信息重建与分析

根据重建得到 8 个特征点的三维坐标, 结合水下潜坝的外形特征, 可对水下潜坝模型的坝顶宽度、迎水坡宽度、背水坡宽度、坝体总宽度、坝高、坝身长度等外形数据进行计算, 将其与水下潜坝模型实际的外形数据进行对比, 对重建误差进行研判, 结果见表 4。

4 结论

1) 基于声学相机成像原理, 构建了声学图像坐标系与直角坐标系的三维空间转换矩阵, 提出多条三维空间高度弧最小距离交点的计算方法, 为水下潜坝三维信息重构提供技术支撑。

2) 开展了室内水下潜坝模型外部特征点三维信息重建试验, 采用 4 个视点对水下潜坝进行声学图像采集, 重建外型尺寸误差在 0.8%~8.6% 范围内, 总体均方根误差为 0.058 m。

3) 采用声学相机能够实时监测水下潜坝外形, 且原型潜坝尺寸大、水深小, 更有利于声学相机高精度测量, 对其外形尺寸计算的误差能够控制在 10% 以内。该设备及方法具备实际可行性, 能够为航道部门实时监测整治建筑物提供可行的思路及参考。

参考文献:

- [1] 唐银安, 吴安江.山区冲积性河流整治建筑物水毁原因及防治初探[J].水运工程, 1997(4): 38-41.
- [2] 赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学.海底地形测量技术现状及发展趋势[J].测绘学报, 2017, 46(10): 1786-1794.