

# 考虑泥沙水下休止角的淤积量测报模型及优化

孙小军<sup>1,2</sup>,魏炳乾<sup>1</sup>,周孝德<sup>1</sup>,燕荔<sup>1</sup>

SUN Xiao-jun<sup>1,2</sup>,WEI Bing-qian<sup>1</sup>,ZHOU Xiao-de<sup>1</sup>,YAN Li<sup>1</sup>

1.西安理工大学 水电学院,西安 710048

2.西安浐灞生态区管理委员会,西安 710033

1.College of Hydraulic and Hydropower,Xi'an University of Technology,Xi'an 710048,China

2.Xi'an Chan-ba Ecological District Management Committee,Xi'an 710033,China

SUN Xiao-jun,WEI Bing-qian,ZHOU Xiao-de,et al.Optimization model of measuring and forecasting sediment amounts considering the angle of repose.Computer Engineering and Applications,2010,46(7):200-202.

**Abstract:** It is important for operation and management of reservoir to prompt the accuracy of measuring and forecasting reservoir storage or sedimentation amounts deposited in.By analyzing the geometric relationships among the angle of the sides in TIN (Triangular Irregular Network) constructed with topographic point under water,the angle of triangular face and the angle of repose of sediment,a condition about angle of repose for improving the model of measurement and forecast is proposed.Furthermore,by means of Matlab,program of measuring and forecasting sediments deposition is designed.Finally,the method is verified by using the data of sedimentation in Ba River rubber dam.The result shows that the method for measuring and forecasting sedimentation amounts based on the angle of repose not only may reject the data with gross error,but also can improve the accuracy of measuring and forecasting sediment amounts.

**Key words:** angle of repose;Triangular Irregular Network(TIN);sedimentation amount;model of measuring and forecasting

**摘要:** 提高水库泥沙淤积量的测报精度对水库的运行与管理有着重要意义。通过分析论证由水下地形点构建的 TIN 三角网的边、三角形面及泥沙水下休止角之间的几何关系,提出了优化测报模型的休止角条件;进而利用 Matlab 编制优化的测报程序;最后结合灞河橡胶坝库区的淤积数据进行了验证。结果表明:基于泥沙水下休止角的淤积量测报模型可以剔除带有粗差的地形点数据,提高了淤积量的测报精度。

**关键词:** 水下休止角;不规则三角网;淤积量;测报模型

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.07.062 **文章编号:** 1002-8331(2010)07-0200-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP39

## 1 前言

在研究水库演变的数学模拟或物理模拟以及库容调查中,都需要以现状地形资料为基础。由于测绘外业生产环境恶劣、劳动强度大等原因,测绘工作中较易出现测量粗差。所谓粗差,是指观测数据与真值之差不具有偶然误差特性的粗大误差,它属于系统误差范畴,会传递到终端成果而无法消减,直接影响到结果的可靠性。因此,对外业测量数据进行分析,剔除粗差数据,提高成果精度将尤为重要。

相关文献[1]给出了高程粗差的剔除方法,即从问题的结果出发,采用一种反馈迭代方法,利用当前匹配的结果指导新一轮的匹配过程,从而对粗差进行剔除,具有理论严密性和可行性;关于 GPS 高程数据粗差也有相关的剔除方法<sup>[2]</sup>,即抗差推估法,其原理是从一般的 GPS 水准高程拟合法出发,对所有参与拟合计算的控制点进行验后方差估计,通过动态重新赋予观

测值新的权,迭代计算,使其含有粗差的观测值的权越来越小甚至等于零,从而降低粗差对拟合结果的影响。对于地形点高程粗差的判断与剔除,在陆地地形测量时,观测员可凭借作业经验,如两次观测的图上衔接处地物、地貌的协调性等,来判断可能出现的粗差并加以解决;但对于掩蔽于水体之下、不可视的水下地形点来说,其高程粗差的判断与剔除的研究未见报道。鉴于此,通过分析水下任意三角形面和水平面间的夹角与泥沙水下休止角的关系,拟借助泥沙休止角条件检核水下地形点高程值的正确性,进而,对带有粗差的测量数据进行过滤和剔除,优化泥沙测报模型,提高淤积体的测报精度。

## 2 泥沙水下休止角

水下休止角不仅在水库淤积、底孔排沙时的冲刷漏斗、桥墩及丁坝的局部冲刷、岸坡稳定、推移质运动等问题的研究中

**基金项目:**陕西省教育厅科学研究计划项目(Scientific Research Planing Project of Shaanxi Provincial Department of Education under Grant No.04JK230);陕西省重点学科建设专项资金资助项目(the Special Funding Project of Shaanxi Provincial Key Disciplines and Specialities Construction)。

**作者简介:**孙小军(1967-),男,博士生,高级工程师,主要从事河流工程泥沙研究;魏炳乾(1963-),男,博士,教授,主要从事河流工程泥沙研究。

**收稿日期:**2009-08-10 **修回日期:**2009-10-16

得到广泛应用,在河工模型实验和数学模型模拟计算中也具有一定的实用价值,颇受国内外学者重视。

静水中的泥沙,由于摩擦力的作用可以形成一定的倾斜面而不塌落,此倾斜面与水平面的夹角  $\phi$  即为泥沙的水下休止角。已有研究表明<sup>[3-5]</sup>,泥沙水下休止角  $\phi_0$  主要与泥沙颗粒的粒径、形状、重率及形体和粒面粗糙度等因素有关,  $\phi_0$  随着泥沙颗粒物理特性和几何特性的沿程变化而变化。

泥沙的动水水下休止角的大小与水流流速有关。沙波迎流面上泥沙的动水水下休止角随水流流速增大而减小,其值小于  $\phi_0$ <sup>[6]</sup>;在沙波背流面,由于横轴环流的作用,背水面动水休止角大于迎流面,其大小受流速等影响,但由于水库库区的水流流速的不断减小,泥沙的动水水下休止角也会随之减小,其值接近于  $\phi_0$ 。

如图1所示,水下任意三个地形点可构成  $\triangle ABC$ , 顶点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的坐标分别为  $(X_1, Y_1, H_1)$ 、 $(X_2, Y_2, H_2)$ 、 $(X_3, Y_3, H_3)$ , 点  $A$  所在的水平面为  $OAD$ , 过点  $C$  的垂线交  $OAD$  面于  $O$  点,  $CB$  的延长线交面  $OAD$  于点  $D$ 。由图可知,  $\angle OEC$  即为  $\triangle ABC$  面的倾角  $\phi$ 。

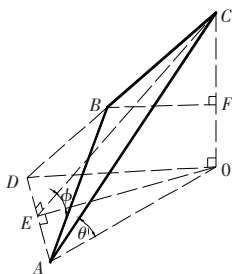


图1 边倾角  $\theta$  与水下休止角  $\phi_0$

若三角形三个顶点不全在水下沙丘同一斜面上,该三角形的倾角应小于相应区域的泥沙休止角;当三顶点位于同一沙丘同一斜面时,该三角形倾角将可能为泥沙的水下休止角。因此可知,三角形倾角值  $\phi$  的极限为泥沙的水下休止角  $\phi_0$ 。即:

$$\text{三角形面倾角 } \phi \leq \phi_0 \quad (1)$$

### 3 计算模型的优化

#### 3.1 淤积体计算模型

水库泥沙淤积量实际上是原始水下地表和最终水下地表之间的体积值。为计算库区的淤积量,首先采用经纬仪测记法、电磁波测距极坐标定位法等方法,结合杆测或锤测的测深方法来采集水下地形点的三维坐标数据。近年来,多采用 RTK GPS 和测深仪相结合的方法来采集水下地形点的三维坐标数据。然后对采集的水下地形点,按照 Delaunay 三角剖分法连接成如图2所示的不规则三角网格(TIN)<sup>[7]</sup>。网格中每个三角形在铅垂方向与原始水下地表之间都对应着一个三棱柱,所有的三棱柱体积之和就是当前淤积体的体积,不同期、次间的体积差就是该两期次期间的库区泥沙冲淤量。

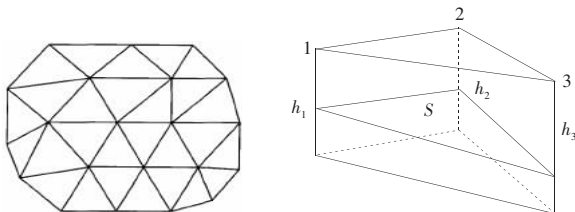


图2 不规则三角网模型(TIN) 图3 相邻3个测点构成的三棱柱

图3为水下不规则三角网中某三角形所对应的三角柱,三个水下地形点的高程分别为  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ ,那么,该三角柱起算于高程基面的体积  $V_k$  为:

$$V_k = \sqrt{(l-a_{12})(l-a_{23})(l-a_{13})} \left( \frac{h_1+h_2+h_3}{3} \right) \quad (2)$$

式中:  $a_{ij}$  为三角形的边长,且  $a_{ij} = \sqrt{(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2}$ ;  $l$  为半周长,即  $l = (a_{12}+a_{23}+a_{31})/2$ 。

进而,该库区水下地形面在高程基面以上的体积为:

$$V = \sum_{k=1}^n V_k \quad (3)$$

式中,  $n$  为整个库区构成的三角形个数。

若前一期、次所测水下地形点数据中任一三角形的三个地形点高程为  $h_1'$ 、 $h_2'$ 、 $h_3'$ ,同样可计算得到三角柱起算于高程基面的体积  $V_k'$ ,以及库区水下地形面在高程基面以上的体积  $V'$ 。那么,两期、次期间内库区的泥沙冲淤量  $\Delta V = V - V'$ ,若  $\Delta V < 0$ ,说明库区冲刷;若  $\Delta V > 0$ ,说明库区内泥沙淤积。若测得初始地形(空库),同样,也可以求得某期次库区的绝对冲淤量。

#### 3.2 基于泥沙水下休止角条件的模型优化

在水下地形测量中,由于水下地形可视上的障碍,测点数量众多、工作量大等原因,以及一些非人为因素,如船速效应、测深延迟效应、水中大块悬浮物、测深仪换能器不水平等,都将会使测量数据带有粗差。水下淤积体上的地形点高程直接影响淤积体体积的计算,粗差数据势必会导致淤积体积以及河床演变结果的错误估计。因此,剔除带有粗差的测点数据,优化测报系统意义重大。

由图1不难确定  $AC$  边倾角  $\theta$  为:

$$\begin{aligned} \angle \theta &= \arcsin \frac{OC}{AC} = \\ &= \arcsin \frac{|H_3 - H_1|}{\sqrt{(X_3 - X_1)^2 + (Y_3 - Y_1)^2 + (H_3 - H_1)^2}} \quad (4) \end{aligned}$$

图4为不规则三角网内任意三角形  $ABC$ ,  $A$  点高程最低,过  $A$  点的水平面  $I$  与三角形  $ABC$  所在面  $II$  交于  $MN$  线,水平面  $I$  上直线  $AE \perp MN$  于  $A$  点,过  $A$  点在面  $II$  上作垂直于  $MN$  的直线  $AF$ ,过  $C$  点作垂直于面  $I$  的垂线  $CC'$ ,连接  $EF$ 、 $AC'$ 。图中,  $\angle EAF$  为面  $II$  的倾角  $\phi$ ,  $\angle CAC'$  为  $AC$  边的倾角  $\theta$ ,由立体几何可知,  $\theta$  值的变化范围为  $0 \sim \phi$ 。

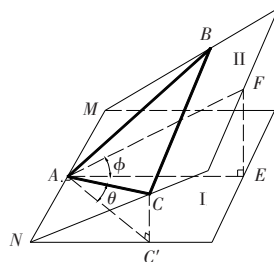


图4 边倾角  $\theta$  与面倾角  $\phi$  的关系

三角网中各三角形面的位置和形状都是不同的,上述用图4所示斜面的结果同样也适于三角网中其他斜面。如在斜面  $II$  上,绕  $A$  点旋转  $\triangle ABC$  后就会得到其他位置的形状:当  $AC$  边与  $AN$  重合时,  $\angle CAC'$  为零,即  $AC$  边的倾角  $\theta$  为零;  $AC$  边从  $AN$  旋转至直线  $AF$  的过程,角  $\theta$  值逐渐增大,  $AC$  与  $AF$  重合,倾角  $\theta$  最大与  $\phi$  相等;之后,继续旋转  $AC$  边至  $AM$  的过程,  $\theta$  逐渐减小,至与  $AM$  重合时  $\theta$  又变为零。考虑式(1)和式(4),边

倾角  $\theta$  与三角形面倾角  $\phi$  以及泥沙的水下休止角  $\phi_0$  之间有:

$$\theta = \frac{|H_3 - H_1|}{\sqrt{(X_3 - X_1)^2 + (Y_3 - Y_1)^2 + (H_3 - H_1)^2}} \leq \phi \leq \phi_0 \quad (5)$$

因此可知三角网中任意三角形边的倾角  $\theta$  均不超过泥沙的水下休止角  $\phi_0$ 。

为了剔除水下地形点的高程粗差, 保证淤积体体积测报的正确性, 在建立水下数字高程模型三角网时, 考虑上述结论, 即式(5), 利用 Mat lab 语言编制的测报系统程序。首先对三角网中每个三角形的三个边进行倾角检核, 即不能超过泥沙的水下休止角; 然后, 对与超限边两端点相连的所有边进行逻辑分析, 判断出高程值含有粗差的端点; 最后, 剔除粗差点, 达到优化泥沙淤积量测报系统的目的。

#### 4 验证与应用

验证所提出的淤积测报系统的优化方法是在灞河 C1# 库区河工模型试验中进行。灞河 C1# 库区的初始地形按 2005 年实测地形制作, 对模型实验施放的三次水沙过程后的淤积地形分别进行了测量, 并按 Delaunay 三角剖分法构建 TIN 网, 图 5(a) 为第一次水沙过程后的淤积地形 Delaunay 三角网。然后, 利用该文提出的基于水下休止角的淤积量测报系统对数据进行处理、构网, 所得三角网如图 5(b) 所示。由图可见, 修正后的三角形数目较修正前有所减少。根据修正前后的三角网计算的淤积量如表 1 所示。表中所示淤积量是将模型值按相似律转换的原型值, 已知淤积量是在淤积地形自然排水后, 按恒定流向库区注水, 初始库容与注水体积之差求得。

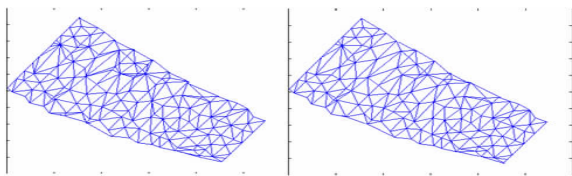


图 5 模型优化前、后构建的 TIN 三角网对比

表 1 测报系统优化前、后的淤积量对比

测次	已知淤积量		原系统与已知值		新系统与已知值	
	原系统/m <sup>3</sup>	优化后/m <sup>3</sup>	互差/m <sup>3</sup>	相对误差/(%)	互差/m <sup>3</sup>	相对误差/(%)
1	44 981.165	45 002.557	-71.394	-0.16	-50.002	0.11
2	56 502.385	56 195.744	431.379	0.77	124.738	0.22
3	70 447.259	70 536.873	-57.342	-0.08	32.272	0.05

(上接 199 页)

(2) 在图像尺寸改变到 40%~60% 时, 特征点数大约减少 20%~30%, 可以满足移动机器人视觉定位的精度要求。

(3) 该方法适用于实时性强的移动机器人视觉定位系统, 获得的实验数据为移动机器人定位提供了技术支持。

#### 参考文献:

[1] 历茂海, 洪炳熔. 一种鲁棒性的室内移动机器人定位方法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(4): 1-3.

由表 1 可见, 利用水下休止角可成功地将有粗差的水下地形点数据剔除, 用原系统(剔除前)计算的泥沙淤积量与已知值相差较大; 而运用本优化系统的计算值与已知值较为接近, 说明了加入水下休止角修正后, 系统剔除了粗差点, 淤积量的计算精度有所提高。

#### 5 结语

通过以上研究分析, 可得出以下结论:

(1) 几何分析结果表明, 水下地形点连线的倾角  $\theta$  的变化范围为  $[0, \phi]$ , 也即边倾角的极大值为所在三角形的面倾角  $\phi$ ; 当三角形三顶点在同一沙丘同一斜面时, 其面倾角最大, 趋近于泥沙的水下休止角值  $\phi_0$ ; 三角形任一边的倾角不应超过泥沙的水下休止角。

(2) 对于采集的含有粗差的水下地形点数据, 通过休止角条件和超限边端点的逻辑分析, 剔除含有粗差的地形点数据, 编制 Matlab 程序, 使得基于 Delaunay 剖分原理构建的三角网淤积量计算模型得以优化。实例验证表明, 基于泥沙水下休止角的优化模型不但可以剔除粗差数据, 而且使得淤积量的测报精度得以提高。

(3) 在优化淤积量测报系统时, 文章对经分析确定的粗差地形点进行了单纯的剔除而未修正; 当然, 对粗差点高程进行修正无疑会进一步提高模型的测报精度, 需进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 巩凡超, 黄小波, 邓雪清. 数字高程模型的粗差探测与剔除[C]//地理空间信息技术与应用. 中国科协 2002 年学术年会论文集, 2002.
- [2] 杨凤芸, 张旭东. 采用抗差推估法剔除 GPS 调程数据粗差[J]. 测绘通报, 2005(10): 9-11.
- [3] Mignlot C. 不同的极细沙(淤泥质)物理性能的研究及其在水动力作用下的性质[J]. La Houille, Blanche, 1968(7): 12-16.
- [4] 张红武. 沙石及模型沙水下休止角试验研究[J]. 泥沙研究, 1989(3): 90-96.
- [5] 金腊华. 试论模型沙的水下休止角[J]. 泥沙研究, 1990(3): 87-93.
- [6] 黄长伟, 詹义正, 卢金友. 粘性-散体均匀沙的动水休止角公式[J]. 广东水利水电, 2008(6): 1-3.
- [7] 燕荔. 基于 GIS 技术暨泥沙水下休止角的水库淤积量测算方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [8] Lowe D G. Object recognition from local scale invariant features[C]// International Conference on Computer Vision, 1999: 1150-1157.
- [9] 张春美, 龚志辉, 孙雷. 改进 SIFT 特征在图像匹配中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(2): 95-97.
- [10] 刘立, 彭复员, 赵坤, 等. 采用简化 SIFT 算法实现快速图像匹配[J]. 红外与激光工程, 2008: 181-184.
- [11] 王彭林, 石守东, 洪小伟. 基于 SIFT 算法的移动机器人同时定位与地图创建[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2008, 3(1): 68-71.
- [12] 杨晶东, 洪炳铭, 周彤, 等. 移动机器人里程计非系统误差不确定性分析方法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 7-12.