

# 航空遥感辅助淤泥质海滩地形测量的研究\*

翟京生

(天津海洋测绘研究所)

1987年7月15日收稿

## 摘 要

本文依据海滩所具有的既不同于陆地也不同于海洋的覆盖特性,对一直未能很好解决的淤泥质海滩地形测量问题,提出了航空摄影测量与水深测量相结合的方法。其特点在于滩地地形的平面位置用航测方法处理,高程采用经起算面改化的原始水深资料。试验结果表明,在等高距一米,比例尺 1:5 万的淤泥质海滩地形图上,其等高线高程中误差为 0.38 米。

**关键词:** 航空摄影测量 海道测量 淤泥质海滩 普通地形测量

淤泥质海滩(亦称泥质滩涂、潮坪——Tidal Flat)在我国广为发育,全长约 3000 公里。典型的淤泥质海滩有苏北海岸,山东黄河口海岸,渤海湾西海岸等。目前,均为我国海岸带经济重点开发区。由于滩面宽广、平缓、易陷,水动力条件复杂,给普通地形测量和航空摄影测量方法带来了较大的困难。即使作为滩涂测量主要手段的水深测量,由于其方法的局限性也受到了一定的限制。至今,淤泥质海滩仍是地形测图极不完善的区域之一。为了适应经济开发的需要,本文以苏北盐城地区的淤泥质海滩为例,在常规水深测量的基础上,提出了一种航空遥感辅助淤泥质海滩地形测量的简易方法。本方法的特点在于将滩面地形航空遥感的平面表象与水深测量的滩面高程模型相结合。

## 一、基本依据

从测量学的观点出发,每种测量手段的选择,都是根据被测物体的状态来决定的。地球表面、大气和海水两种不同的下垫面覆盖的被测物体的存在,决定了航空摄影测量和水深测量方法的出现。然而,海滩是陆、海交互作用的地带,是大气和海水两种下垫面交替覆盖的典型地区。显然,对于海滩地形测量,采用航空摄影测量与水深测量相结合的方法,是与海滩所具有的这种既不同于陆地也不同于海洋的覆盖特性相适应的。

淤泥质海滩不同于一般的滩地,滩面平坦,易陷。选点和布点都极为困难,单纯采用航空摄影测量的方法,测量大、中比例尺淤泥质海滩地形图,其高程误差很难满足 0.5 米的精度要求<sup>[1]</sup>。水深测量经高程起算面改化后,能获得一定密度的精确的滩面地形高程

\* 本文承章大初、史发枝具体指导,特此致谢。

点。由于这种方法无法了解滩面地形的真实形态,因此,直接详细地勾绘滩地地形图,显然也是不行的。对此,本文依据淤泥质海滩的地貌学特性,综合了两种测量方法的特点,既采用航测方法确定滩地各种地貌、地物的平面位置,如海岸线、潮水沟和各种地形特征线等,同时还可以通过像对建立室内滩地的立体模型,并与水深测量所获得的地形高程模型相结合,显然,这种方法是符合普通地形测量(如平板测量)的基本要求的。从而,根据其基本原理和方法,就可以测制出满足用户要求的淤泥质海滩地形图。其主要过程如图 1 所示。主要差别在于,高程点的分布是随机的,不一定落在地形特征线上,原则上会出现误差,但由于淤泥质海滩滩面平坦,类型单一,理论分析与实验表明,对等高线精度影响不大,能满足制图要求。

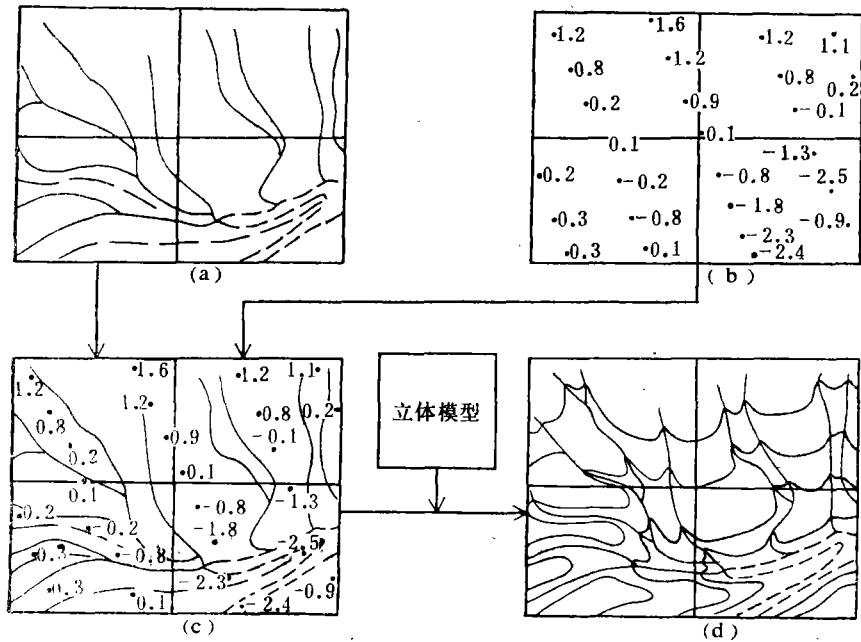


图 1

(a) 由像片平面图勾绘的滩地特征线图, (b) 水深样图,  
(c) 等高线勾绘底图, (d) 滩地地形图

Fig. 1

(a) The Terrain Characteristic Lines Draun by Photographic Map,  
(b) Sounding Figure, (c) Cartographic Base for Contouring,  
(d) Mud Foreshore Map

## 二、方法与步骤

### 1. 资料分析

#### (1) 航空像片资料

航空像片除满足常规要求外,还应考虑大潮低潮位的海滩部分应充分显露,像片上各类标志,尤其是摄影时间标志必须清晰、易读,以便利用摄影同步时间内有关验潮站的水

文资料,同时,应尽量保证航空像片的摄影时间与水深测量时间同步。

## (2) 水深样图

根据《近海水深测量规范》,水深点密度为图上 1 厘米,定位点精度为图上  $\pm 1.5$  毫米,测深精度,在 0—20 米水深范围内为 0.2 米,完全满足地形测量勾绘等高线的要求。

## 2. 建立平面控制

(1) 用航空摄影测量方法编制按国际标准分幅的像片平面图。

(2) 按像片平面图,参照实测底质资料勾绘滩地范围线、主干潮水沟。按水深样图转绘理论深度基准面零米线。

(3) 借助像对,在精密立体量测仪 A10 上,建立滩地立体模型,勾绘出滩地地形特征线,如滩地最高部位走向线、最大及最小坡度线、坡度转折线、单线潮水沟等。最后将其全部转绘到薄膜图相应位置上[图 1(a)]。

## 3. 建立滩地高程控制

(1) 通过验潮资料的水位改正,把水深样图上以理论深度基准面起算的水深点改化为以黄海平均海面起算的高程点<sup>1)</sup>。

(2) 以方里网作控制,把改正后的高程点转绘到薄膜图上,排除因潮水沟变动而不相应的高程点,同时借助滩地立体模型和滩面的高程变化规律内插部分高程点。由此实现平面与高程两种控制资料的配准,使其归化到同一比例尺和同一投影的薄膜平面图上[图 1(c)]。由于高程与平面位置的确定采用的是常规测量的处理方法,两种资料配准后的平面图,除产生 0.2 毫米(最大)套合误差外,与普通地形图的精度基本相同。

## 三、淤泥质海滩的地形分类与影像特征

宽广的淤泥质海滩,可根据相应的潮汐特征线划分为不同类型的带(表 1)。各带由于干出率的差异和水动力条件的不同,相互间在沉积物、地貌和植被等方面均有明显的区别<sup>[2]</sup>。除岸线和人工要素外,在沿垂直于岸线的方向上形成了不同的滩面覆盖和地貌类

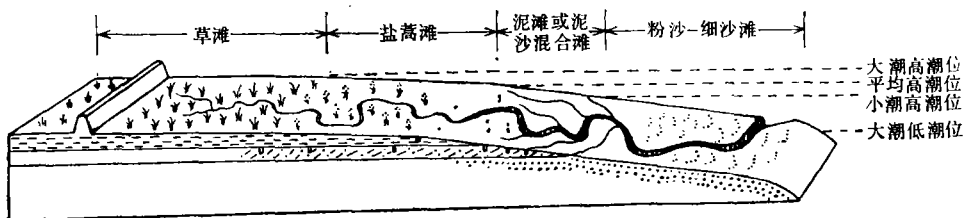


图 2 蹲门口滩地断面图

Fig. 2 Foreshore Topographic Profile in Dunckou

1) 大连舰艇学院,潮汐,1974年12月。

型(图 2)。在潮上带,滩面一般不受潮水影响。因此,它与潮间带地表湿度有较大的差异。潮间带三个潮滩的干湿程度随涨落潮而呈周期变化。一个月当中,在高潮滩,干多湿少;在中潮滩,干湿相当;在低潮滩,干少湿多。当太阳光照射到落潮后露出水面的潮间带时,地面反射光谱的组成取决于地面湿度、植被覆盖度、植被类型、盐碱化程度、地表组成物质和地下水埋藏深度等环境因素,在潮间带组成物质相同的情况下,地表干湿程度对地面反射光谱的程度起主要作用。因此,滩面各带的光谱特征是不同的。表现在航空像片上,不仅能反映出大致平行于海岸线的各海滩的分带影像,而且对各带不同的地貌类型亦有明显的显示(表 1)。

海岸线是多年平均大潮高潮位所作用的痕迹线。在实验区,淤泥质海岸主要分为蚀退岸和淤长岸两类。

在蚀退岸段,由于受潮流、波浪的冲蚀发生崩塌后退,形成形态平直的岸线。在图像上,其影像大都表现为陡坝。也有人工堤岸。

在淤长岸段,其岸线与草滩外围线相吻合,岸线具有较大的弯曲。同时由于部分沉积作用,在岸线外测形成块状高潮滩。显然,这也是岸线的组成部分。表现在影像上其色调呈黑色或黑色斑点状。

表 1 苏北盐城地区淤泥质海滩分类及影像特征表

Table 1 Detailed Classification of Mud Foreshore Geomorphology and the Features of Its Aerial Image in Yancheng Area of North Jiangsu Province

海岸带	潮汐特征线	海岸分类	滩面覆盖特点及影像特征	潮水沟与地形形态特点及影像特征
潮间带	平均大潮高潮位 (海岸线)	草滩	滩面平坦、茅草茂盛,影像呈黑色	潮水沟稀少、浅凹呈弯曲状,在影像上谷窄而浅,如同雨裂
		盐蒿滩	稀疏盐蒿,影像呈灰白色	滩面平缓为凸型坡,由于植被覆盖影像为斑点状,有人工建筑物
	平均高潮位	泥滩	滩面光滑、易陷被淤泥覆盖,影像呈灰白色	在光滑的泥滩上,潮水沟不发育,在下部至泥沙混合滩有树枝状和伞状潮水沟,其影像前者为树枝状,有主、枝谷之分。后者顶部为半圆弧齐整,向下汇流。滩面微凸,影像色调均匀
	平均小潮高潮位	泥沙混合滩	滩面被粉砂淤泥覆盖,部分有流水痕迹,影像呈灰色或灰白色	潮水沟较发育,主要有曲流状和树干状,前者影像形态呈大弧状弯曲,谷宽而深,两侧明显不对称。后者主谷宽大,下部少支谷,顶部呈树枝状分叉,滩面狭窄而陡,呈凹型,切割破碎
	平均小潮低潮位	粉沙滩	滩面波痕发育,黑色矿物富集于波痕的波谷中,影像呈灰黑色条纹状	主要发育平行状潮水沟,且密度较大影像呈平行状切割成“V”型谷,两侧有微型小沟,滩面较陡呈凹型,且沟谷上部较浅,底部深。
潮下带	海图理论深度基准面零米线	水下斜坡	海水影像呈灰白色有明显层次	滩面坡度明显变陡,较大潮水沟底部一直发育到这一区域,长年海水淹没

#### 四、滩地各要素的描绘

在建立了如图 1(c) 所示的等高线勾绘底图后,参照像对所建立的滩地立体模型,按普通地形测量方法,根据上述滩地地形的影像特征,即可对滩地地形的各要素进行勾绘。

### 1. 海岸线

首先按海测地形原图描绘海岸线,再用像片平面图进行核对;特殊情况下对部分地段可进行外业调绘。

### 2. 潮水沟

主干潮水沟要按其水边线勾绘,在像片图上,如镶嵌误差造成的位移较大,则查看相邻两航空像片中间与此连续重叠的像片,按水边线自然衔接;支沟应注意其影像在立体镜下是下切的、而不是流水的痕迹,同时要保持潮水沟的形态、类型及密度分布。

### 3. 等高线<sup>1)</sup>

等高线和潮水沟是反映滩地形态和特点的主要要素。

(1) 利用高程点和地形特征线进行轮廓勾绘,主要解决滩地地形等高线的形态和走向。

(2) 具体沟谷形态的处理,其中包括潮水沟两侧等高线的密度,上逆位置的确定以及等高线与潮水沟的相交部位和不同潮水沟等高线的沟谷类型如“V”型谷,“U”型谷的确定等。

(3) 套合与协调。将薄膜图象在像片平面图上,对照单张像片,按像对的立体模型进行修改。重点解决航空影像与高程不一致、潮水沟位置变动、等高线平滑程度及滩地坡度变化带来的等高线的收缩与展开等。

### 4. 滩地性质和下陷深度

淤泥质滩地的物质组成,随潮汐特征线的变化,表现出明显的分带特征,在航空像片上与相应潮间带基本一致的各海滩,分带影像的密度必有一定的差异。所以,确定其范围线时,主要以水深样图的底质点作为控制,按各相应潮汐特征线的位置和航空影像密度进行勾绘。下陷深度一般按实测资料转绘。

以上列举的均为潮间带要素,至于陆地部分和潮下带,分别按陆地地形图和海图成图的有关规定执行。

## 五、精度分析

除等高线外,其它各主要要素是采用常规航测成图方法确定的,其平面位置精度与相应的航测地形图一致。等高线的描绘采用了新的测图方法,它具有独特的误差来源。影响着等高线的勾绘精度。

### 1. 平面位置中误差及联合引起的等高线高程中误差

(1) 航测像片图平面位置精度,主要受模型定向误差和测图中量测误差的影响<sup>[3]</sup>,其

1) 史发枝,江苏淤泥质海滩滩地形态的现图方法,江苏测绘,1985年第3期。

平面位移中误差的估计式为

$$m_{s1} = 2.14m_0$$

$m_0$  为测绘地物前, 测标切准已知起始点的判、切误差。归化为实地误差

$$m_{s1} = 2.14m_0M_b \quad (1)$$

$M_b$  为摄影比例尺分母。

(2) 滩涂测深定位, 一般采用经纬仪前方交会, 由此引起的定位中误差<sup>1)</sup>为

$$m_{s2} = \pm 0.3 m_s \csc \omega \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$$

$S_1, S_2$  分别表示两测站至船的距离,  $m_s$  为观测位置函数中误差,  $\omega$  为位置线交角。

经纬仪测角中误差为  $\pm 1'$ , 设  $S_1 = S_2$ , 则

$$m_{s2} = \pm 0.4S \csc \omega \quad (2)$$

(3) 水深样图和像片平面图依据方里网套合。由此引起的平面位置中误差一般小于 0.2 毫米。归化为实地距离

$$m_{s3} = 0.2M_c \quad (3)$$

$M_c$  为图的比例尺分母。

总之, 由  $m_{s1}, m_{s2}, m_{s3}$  等平面位置中误差, 联合引起的等高线高程中误差为

$$m_{z1} = \pm \operatorname{tg} \alpha \sqrt{m_{s1}^2 + m_{s2}^2 + m_{s3}^2}$$

$\alpha$  为滩面坡度, 淤泥质海滩, 一般  $\alpha < 1^\circ$ 。把 (1), (2), (3) 式代入上式可得

$$m_{z1} = \pm 0.017 \sqrt{(2.14m_0M_b)^2 + (0.2M_c)^2 + (0.4S \csc \omega)^2} \quad (4)$$

## 2. 高程点随机分布和勾绘所引起的等高线高程中误差估计

根据地形特征线和高程点勾绘滩地等高线, 其精度主要受地形概括误差和内插等高线高程误差的影响。由此引起的等高线高程中误差<sup>2)</sup>为:

$$m_{z2} = \pm \sqrt{u^2L + m^2}$$

式中:  $u$  为地形概括的影响系数(平地取 0.04),  $L$  为地形点间距(以 10 米为单位),  $m$  为内插等高线和高程点引起的等高线高程中误差。

水深样图上水深点相对的地形特征线是随机分布的。影响  $m$  的因素除内插等高线和高程点的精度外, 还有高程点在地形特征线上随机分布的概率值大小。由于淤泥质海滩滩面极为平坦、地貌类型单一, 地物及其它要素的影响很小。水深测量按常规布线方法, 岸边高程点密度约为图上 1 厘米时, 相邻两高程点的高差不大于 0.4 米。而且, 滩地地形特征线极为完备, 所以,  $m$  值不会超过 0.1 米, 则

$$m_{z2} = \pm \sqrt{1.6 \times 10^{-3}L + 0.01} \quad (5)$$

## 3. 由于两种资料的测量时间差所引起的等高线高程中误差

淤泥质海岸可分为稳定型、堆积型、侵蚀型三类。后两类属不稳定型海岸, 最大滩

1) 大连舰艇学院, 近海水深测量, 1979 年。

面淤高达 20 厘米/年。根据航测与海测的特点,滩面地形特征线与高程点是不可能同时获得的。由此引起的等高线中误差为:

$$m_{z3} = T \cdot \Delta h / 12 \quad (6)$$

$\Delta h$  为滩面高程最大年变率(米/年),  $T$  为两种资料的测量时间差(月)。

综上所述,  $m_{z1}$ ,  $m_{z2}$ ,  $m_{z3}$  各项误差联合对等高线高程中误差的影响为:

$$m_z = \pm \sqrt{0.0003[(2.14m_0M_b)^2 + (0.2M_c)^2 + (0.4S\text{csc}\omega)^2] + 0.01 + 1.6 \times 10^{-3}L + \left(\frac{\Delta h T}{12}\right)^2} \quad (7)$$

其中,  $\Delta h$  最大为 0.2 米, 常规海道测量  $\omega$  允许范围为  $20^\circ - 60^\circ$ , 可设  $\omega = 25^\circ$ ,  $S = 10$  公里  $m_0 = 0.08$  毫米。

然而,水深点本身还存在测量误差,根据技术规范,在 0—10 米深的海区,水深点深度误差为 0.2 米。

因此,等高线高程中误差最后估计式为

$$m_z = \pm \sqrt{3.79 \times 10^{-12}M_b^2 + 1.2 \times 10^{-11}M_c^2 + 0.04 + 1.6 \times 10^{-3}L + (0.017T)^2 + 0.04} \quad (8)$$

## 六、实 验

(1) 实验区位于江苏省盐城市以东弼港附近,干出滩宽达 20—30 公里,滩面平坦易陷,其最大下陷深度单人步涉为 0.8 米,滩面坡度平均为 0.5—10‰。滩面被众多的潮汐水道所切割。由于本区处于南北潮汇合处,潮差大,水动力条件复杂。滩面地形变化迅速,海岸线年变化率最大为 50 米/年,滩面淤高 10 厘米/年。是我国典型的不稳定型淤泥质海岸之一。

(2) 测图资料采用 1980 年 5 月摄制的比例尺 1:5 万的航空像片; 1979 年 9 月海测水深样图,水深点平均密度为 400 米。及其它外业测深手簿和验潮资料。

(3) 编制了六幅 1:5 万海滩地形图和一幅全开海岸带专题图。等高距为 1 米。其等高线高程中误差估计可由式 (8) 确定,其中  $T = 9$ ,  $L = 40$ ,  $M_b = M_c = 50000$ , 则

$$m_z = \pm \sqrt{8.79 \times 10^{-12}M_b^2 + 1.2 \times 10^{-11}M_c^2 + 0.0016L + 0.0003T^2 + 0.08} \\ = \pm \sqrt{2.2 \times 10^{-2} + 3.0 \times 10^{-2} + 0.064 + 0.02 + 0.08} = \pm 0.46 \text{ 米}$$

为了进一步确定等高线的实际勾绘精度,用 4 条实测滩面剖面进行了检核,在删除个别不合理的点后,以等高线插求检查点高程与实测高程点比较,按较差求得等高线高程中误差,计算公式采用  $m = \sqrt{[\Delta\Delta]/n}$ , 其结果见表 2。

等权平均得等高线高程平面中误差  $M_z = 0.38$  米。显然,比理论分析的结果要好得多。若采用本方法可能要小得多。

其它各要素位置精度与 1:5 万航测地形图相同。

表 2  
Table 2

滩地实测剖面	统计点数	等高线高程中误差
鱼舍剖面	18	0.30
礮门口剖面	7	0.34
新东堤断面	30	0.41
淤港东断面	28	0.47

## 七、结 论

(1) 本文提出的淤泥质滩涂地形测图方法,是依据淤泥质海滩的地质特性,采用常规的水深测量和航测方法,遵照普通地形测量学原理提出的。所以有较可靠的理论依据。

(2) 从测图精度分析,其平面位置由于采用常规航测方法,其精度与相应的航测地形图一致。高程精度通过以上理论分析和实测剖面的检验,完全满足制图要求。

(3) 成图内容由于采用了 1 米等高距,海滩的地形形态、特点和主要微地貌都得到了详细的表示,从而可满足各种用户对海滩地形的需要。

(4) 对于一直未能解决的淤泥质海滩地形测量来说,本方法主要采用常规测图工艺,并立足于内业处理,从而节省了大量人力、物力。更重要的是解决了航测和水深测量方法各自对淤泥质海滩测量的局限性。

## 参 考 文 献

- [1] 国家测绘局, 1:5 千, 1:1 万比例尺地形图航测内业规范, 测绘出版社, 1983 年。
- [2] 章大初, 海滩地形遥感测量研究, 科学通报, (3), 1985。
- [3] 地质部区测局实验小组, 1:2000 比例尺航测成图实验报告, 测绘学报, (3), 1982。

## Discussion on Topometry Survey of Tidal Mud Flat with Aerial Remote Sensing Technology

Zhai Jingsheng

(Tianjin Institute of Hydrographic Surveying and Charting)

### Abstract

Up to now, the problem on tidal mud flat topometry has not been solved well. According to the covering characteristics of tidal mud flat which is different from ocean and land as well. This paper presents a method that combines bathymetry with aerial photogrammetry. Its characteristics is that the horizontal position of the tidal flat topometry is dealt with aerotopographic technology, and the elevation is based on the original bathymetric data which has been corrected from the datum. The test results show that, on a tidal mud flat topographic map of 1:50000 with contour interval of one meter, the elevation error is 0.38 meher.