

水下地形与淤泥测量 Silas 技术

王 卫 国, 谢 津 平, 惠 武 权, 陆 日 壮

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘 要: 水下地形与淤泥测量 Silas 技术是采用 Silas 系统连续测定不同深度的淤泥密度, 以密度划分淤泥类别; 采用 GPSRTK 无验潮技术采集淤泥测点的空间信息, 确定其相对高差。应用实践表明, 它与传统淤泥测量方法相比, 具有速度快、精度高、费用省、对水下淤泥扰动小等优点, 可应用于水库、湖泊、海口、航道等水下地形与淤泥测量。

关键词: 水下地形; 淤泥测量; Silas 系统; 无验潮测深

中图分类号: P231.5; P217 文献标识码: A 文章编号: 1001-1412(2007)03-0236-04

1 科技发展与测量需求

水是人类生存的物质基础, 清泉细流、碧波万顷是人们理想中水的状态。由于自然和人类活动的影响, 山洪暴发、滑坡、泥石流, 使得大面积的水土流失, 大量的泥沙融入水体之中, 从而给人们的生产生活带来一系列问题。泥沙淤积对河道、堤岸、水库的安全造成严重影响; 泥沙夹杂有机物质淤积湖泊, 造成湖泊水体富营养化, 威胁饮水安全; 大量的海陆相沉积物壅淤河口地带, 影响航运和防洪。

根据工程建设需要, 对于水下地形与淤泥测量提出了越来越高的要求。传统的测量方法主要有钻孔取样法、静力触探/测杆法、声纳探测法、放射线探测法等。2003 年在水利系统引进 Silas 系统并加以开发, 经过研究和实践, 提出了按密度划分淤泥、走航式连续密度测量方法, 形成了水下地形与淤泥测量 Silas 技术。技术的创新之处在于有效地整合了 SILAS 走航式水底淤泥连续密度测量、GPSRTK 无验潮测深及淤泥密度测试等技术, 开发了数据处理配套软件, 形成了水下地形与淤泥测量的一整套系统方法。

2 淤泥分层理论概述

粒径 < 0.03 mm 的泥沙与颗粒分散的泥沙相比, 性质上有很多差异, 通常我们把它称为淤泥。根据《港口工程地质勘察规范》的表述, 淤泥的准确名称应为淤泥性土, 它是指在静水或缓慢的流水环境中沉积, 天然含水率大于液限、天然孔隙比 > 1.0 的粘性土, 可细分为淤泥质土、淤泥、流泥和浮泥(表 1)。

表 1 淤泥的分类

Table 1 Classification of sludge

土的名称	孔隙比 e	含水率 w (%)
浮泥	-	$w > 150$
流泥	-	$85 < w \leq 150$
淤泥	$1.5 < e \leq 2.4$	$55 < w \leq 85$
淤泥质土	$1.0 < e \leq 1.5$	$36 < w \leq 55$

不同淤泥层面的划分标准因不同地区泥质而异。按照一般情况, 可以大致按密度变化范围划分出 4 个淤泥层面。细颗粒泥沙经絮凝沉落到水底后, 要经过很长时间才能变得比较密实, 在尚未密实之前具有很强的流动性, 称为浮泥。浮泥的密度范围为 $1.0 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ 。浮泥进一步固结, 流动性减小, 当密度达到 $1.2 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ 时, 便成为流泥。当孔隙水被排走, 密度增加到 $1.5 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$ 时, 界面波不再发生, 在水流作用下不会直接悬扬, 已经

属于淤泥的范畴。密度达到 1.8 g/cm^3 以上时, 已成为淤泥质土(表 2)。

表 2 淤泥密度范围

Table 2 Densities of sludge

名称	密度范围(g/cm^3)	名称	密度范围(g/cm^3)
浮泥	1.0~1.2	淤泥	1.5~1.8
流泥	1.2~1.5	淤泥质土	> 1.8

按密度划分淤泥, 使对淤泥的量测从单纯的厚度到按密度的空间分布转化, 从而可以按照淤泥的物理性质对淤泥的运动规律和污染状况进行定量的分析。这将对河流、水库的淤积研究, 港口、航道适航水深的确定及生态清淤的标准有着重要的意义。

我国江河大多泥沙量大, 所建水库淤积严重, 由此带来了一系列问题: 库容损失影响水库效益的发挥; 淤积上延影响上游地区的生态环境; 水库变动回水区的冲淤对航运带来不利影响; 坝前泥沙淤积影响枢纽的安全运行; 水库下泄清水对下游河道河床的冲刷以及附着在泥沙上的污染物对水库水质的影响等。按密度划分淤泥可以定量地分析从悬移质到硬底的变化情况, 尤其可以实现对水库异重流、高含沙水流这类浮泥层的监测。淤泥测量的成果对水库淤积形态、水库排沙及运行方式、变动回水区的冲淤、下游河道的冲淤变形, 以及水库淤积数学模型等方面的研究都有着重要的贡献。

适航水深一直是港口、航道疏浚部门十分关注而又未彻底解决的问题。对于适航水深来说, 关注的焦点在于流动的密度相对较小的浮泥层。按密度划分淤泥, 可以细化浮泥的密度分层, 有助于分析特定目标层的流变特性, 从而确定适航深度, 减少疏浚量, 节约资金。

生态清淤是为减少污染, 促使生物实现良性循环而进行的清淤。生态清淤在工程上要求清淤的准确性和选择性, 即清除目标是富含污染物的易流动的浮泥和流泥层。按密度划分淤泥, 为生态清淤提供了一个清晰的选择标准。

3 水下地形与淤泥测量 Silas 技术原理

3.1 系统流程

(1) 布设和建立覆盖测量区域的基本控制网, 包

括平面控制和高程控制, 通过 GPS 观测和水准测量得到高精度(毫米级)的平面坐标和高程作为进行水下地形与淤泥测量 GPSRTK 作业时的基准点及输入数据。

(2) 应用水下地形与淤泥测量 Silas 技术进行水下地形与淤泥测量点空间信息的同步外业采集: 基准点设置 GPS 接收机, 基准点与测船流动站同时接收卫星信号, 基准站将接收到的卫星信号通过专用电台发送给测船流动站, 流动站将接收到的卫星信号及基准站发送来的信号传输至测船流动站接收机控制单元, 通过专用软件进行实时差分及平差处理, 实时得出测点的平面坐标和高程。获得的平面和高程坐标与 Silas 系统的高频水底深度数据/低频淤泥深度数据实时叠加而获得厘米级精度的水下地形与淤泥测量点空间信息。

(3) 外业采集结束后, 采用专用软件进行数据内业处理, 输出水下地形与淤泥测量的各种成果。

3.2 技术原理

水下地形与淤泥测量 Silas 技术的核心是采用 Silas 系统以密度划分淤泥, 采用 GPSRTK 无验潮测深技术采集淤泥测量点的空间信息。

Silas 系统是一个声学数据采集及处理系统, 它利用双频测深仪获取水底淤泥层的声学反射信息(反射信号强度、信号增益、时变增益等), 高精度地测定密度的梯度值。利用密度计的单元密度测量获得代表点(标定点)断面的绝对密度柱状图, 通过 Silas 专用软件自动推定剖面上各点的密度值, 根据标定点的数值结合声学反射信息来推断、划分剖面上其他点的密度。当确定的密度值被输入后, 此密度层面即可连续划分出来。

GPSRTK 可以精确地测定两点之间的相对高差, 小区域范围内通过该高差便可反算出流动站 GPS 天线相位中心的高程, 该高程同基准站具有相同的高程基准面。无验潮水下地形测量是利用高精度实时相位差分 GPS 测出天线相位中心的平面位置和大地高程, 在此同一瞬间由 Silas 系统测出淤泥点的深度, 从而获得淤泥测量点的空间位置。

3.3 系统作业过程

(1) 以岸边(或岛屿上)平面和高程控制点为参考站, 利用 GPS 实时动态载波相位差分(RTK)无验潮技术进行测点的平面高程定位。载有 Silas 系统的作业船为流动站, 按照既定的成图精度比例尺, 沿着设计航线行进。

(2) 在行进中启动 GPS-RTK 系统和 Silas 系

统,连续获取测量点的平面位置和高程并记录航线上水下地层的柱面信息。由系统通过换能器向湖底发射高、低 2 个频率的声波,再由换能器接收反射声波传入系统进行分析处理,生成瀑布图。

(3) 根据瀑布图 and 实际走航情况,每条航线选取几个代表点,应用 Densitone 音叉振动密度计获取密度值,作为该航线或该区域的标定点。

(4) 按照 Silas 的程序要求对密度计本身密度测定的准确度进行标定。

(5) 利用密度计获得代表点(标定点)断面的密度柱状图,通过软件自动推定剖面上各点的密度值,根据标定点的数值结合声学反射信息来推断、划分航线剖面上其他点的密度。

(6) 结合平面和高程定位信息,提取各目标淤泥层面的淤泥测量点的空间信息。

3.4 系统工作成果

根据控制网成果和采集的水下地形与淤泥测量点的空间信息,经过滤波和筛选,可以建立 DEM、淤泥声学图像信息库,开发淤泥空间分布动态监测系统,绘制不同比例尺的水下地形图、淤泥厚度分布图,计算水域面积和库容、不同淤泥层面的覆盖面积和层间的淤积量。

3.5 系统的应用实例

太湖是我国五大淡水湖之一,水域面积 2 338 km²,最大水深约 3 m,是一个典型的浅水湖泊。长期以来,由于受入湖河流及周边工业污染造成水质明显下降,再加之多年的行蓄洪及围垦、围湖养殖造成了湖底淤泥沉积物的不断增加,对湖床、湖线产生了较大影响。太湖湖底水下地形和淤泥测量项目应用水下地形与淤泥测量 Silas 技术确立了淤泥测量的创新方法,实现了以密度划分太湖淤泥,走航式连续密度测量方法。解决了淤泥测量空间信息采集的关键技术问题,着重解决了船体姿态改正、浅水的多重回波、密度计的标定等技术难点,获得了按密度值划分太湖浮泥、流泥、淤泥、淤泥质土的成果,绘制了太湖各种密度值淤泥的水平、垂直分布图,并计算出太湖浮泥、流泥、淤泥、淤泥质土的储量。

永定新河是天津市防洪的北部防线,在海河流域防洪治理工程中占有极其重要的地位。由于受大气降水与人类频繁活动的影响,上游径流匮乏,河道长期受潮汐水流控制,出现严重的海相泥沙沉积。2005 年 4 月至 5 月,技术人员采用水下地形与淤泥测量 Silas 技术,实践了按密度划分淤泥、走航式连续密度测量的创新方法,获得了按密度值划分河口、

近海淤泥的成果,特别细分了浮泥、流泥层面,绘制了河口和近海不同密度值淤泥的水平、垂直分布图,并计算出对应密度值下淤泥的储量。永定新河河口床面淤泥厚度、容重测定工作的顺利完成为进一步分析和研究永定新河口水流、泥沙运动规律,寻求兼顾防洪和河口综合开发的合理方案提供了宝贵的基础资料。

4 水下地形与淤泥测量 Silas 技术优于传统方法

通过对湖泊、河口和近海等不同水域水底淤泥测量的应用实践,“水下地形与淤泥测量 Silas 技术”已成为水利领域的一项新技术,可广泛应用于我国现有大中型水库、湖泊、海口、航道及其他水域的水下地形与淤泥测定,在水文测量,水下工程、江河湖泊污染治理、水土流失监测、水土保持规划、水库/河道清淤、河堤防护等工作中发挥作用。

国内外淤泥测量普遍采用钻孔取样、静力触探/测杆法、声纳探测、放射线探测等。①钻孔取样法使用钻机单点采集柱状淤泥样本,用环刀法测定柱状样中各分层淤泥的天然密度;钻孔取样对淤泥的扰动不能避免,浮泥和流泥样无法采集,对于面积大精度要求高的区域,工作量大,价格昂贵;②静力触探法使用专用测杆进行,其原理是通过单点测定淤泥层对测杆的比贯入阻力来计算淤泥的承载力,从而确定淤泥厚度;静力触探/测杆法无法测定淤泥的绝对密度,也无法查明浮泥和流泥的分布;③多普勒双频超声波测量,以高频测量泥水界面,再通过低频测量淤泥底层距水面距离,从而得到淤泥厚度;这种方法较之其他方法高效快速,但淤泥的绝对密度值无法测定,只能测定水底和某一硬底层间的厚度;④放射线探测是根据核射线(如 γ 射线)的放射衰减比率来测定淤泥的密度;放射线探测法通过单点测量淤泥的密度,测定精度较高,但工作效率低,对人员和被测区域环境有潜在的放射性危害,安全性较差。

Silas 技术方法和上述方法比较技术优势非常明显。首先,Silas 技术方法对淤泥的扰动小(尤其对浮泥和流泥层),可以查明其原始的密度和空间分布情况;其次,Silas 技术方法既可以在水平、垂直方向进行高效、连续和重复测量,也可以根据需要通过音叉振动密度计进行单点测量;第三,Silas 技术将水下地形测量和淤泥测量同步进行,测量效率很高;第四,Silas 技术方法测量密度范围从 1.0~1.8 g/

cm^3 , 涵盖了浮泥、流泥、淤泥和淤泥质土 4 个层次, 测量深度可达 200 m, 能够穿透水底 40 m 的泥层。尤其可以准确划分浮泥、流泥, 测量密度, 精度达到

了 10^{-4} g/cm^3 , 高程和厚度精度达到了厘米级。这些特点是其他方法所不具备的(表 3, 表 4)。

表 3 不同方法的淤泥测量能力比较

Table 3 Comparison of sludge measurement with different methods

项 目	钻孔取样	静力触探/测杆	声纳探测	放射线探测	Silas
能否测定淤泥密度	能	不能	不能	能	能
能否单点测量	能	能	不能	能	能
能否连续测量淤泥剖面	不能	不能	能	不能	能
能否查明流泥和浮泥空间分布	不能	不能	不能	能	能

表 4 不同淤泥测量方法的综合比较

Table 4 Synthetic comparison of different methods

项 目	钻孔取样	静力触探/测杆	声纳探测	放射线探测	Silas
测量费用	昂贵	高	便宜	中等	便宜
淤泥测量点的高程精度	较低	一般	较高	较高	很高
对淤泥的扰动程度	很大	较大	较小	较小	较小
测量效率	很低	低	较高	一般	较高
综合评分	C-	D	C+	B-	A+

Silas 技术方法的测量效率和经济效益优势可举这样的例子说明: 如果按精度比例尺为 1:10000, 目标区域为 100 km^2 计算, 钻孔取样法需要 2 个月/台, 费用 1 028 万; 而 Silas 技术方法只需要 2 天即可完成, 费用仅为钻孔取样法的 1/3。

参考文献:

[1] 冯增昭, 五英华, 刘焕杰, 等. 中国沉积学[M]. 北京: 石油工业

出版社, 1994.

[2] 王昌杰. 河流动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[3] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[4] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 北京: 武汉大学出版社, 2005.

[5] 港口工程地质勘察规范(JTJ240-97)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

SILAS TECHNOLOGY FOR SURVEYING SUB-WATER TOPOGRAPHY AND SLUDGE

WANG Wei-guo, XIE Jin-ping, HUI Wu-quan, LU Ri-zhuang

(China Water Beifang investigation, Design & Research Co. Ltd, Tianjin 300222, China)

Abstract: Silas technology for surveying sub-water topography and sludge is a system to measure continuously the density of sludge at different depth then the measured densities are used to make classification of the sludge. GPSRTK technology is adopted to collect spatial information of sludge measurement points and determine their relative differential height. Compared to the conventional technologies the system is characterized by measurement in high speed and precision, low cost and less disturbance of sludge thus suitable to sub-water topographic survey and sludge measurement in reservoir, lake, seaport and channel.

Key Words: sub-water topography; sludge measurement; Silas system; depth survey by no tiding method