

河道清淤方量测、算方法应用分析

王德传¹, 苏秀永², 谢双俊³

(1.中煤浙江测绘地理信息有限公司, 杭州 310021; 2.浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 杭州 310014; 3.杭州纬地测绘有限公司, 杭州 311308)

摘要:疏浚河道, 是生态环境治理、防洪排涝有效手段。清淤方量测、算数据是工程招投标、施工预决算的重要依据。河道清淤测、算方法多样, 各具技术特点, 作业效率和成本投入迥异。以杭州市某年河道清淤工程为例, 列举不同的外业数据采集模式和内业数据处理方法, 对比测、算结果, 进行适用性和差异性分析。结果表明, 根据河道周边环境和历史数据, 选择适用的清淤方量测、算方法, 能够及时提供可靠测绘成果, 满足清淤工程规划设计和施工需要, 助力城市河道综合整治。对河道清淤方量测、算方法进行分析研究, 具有工程应用意义。

关键词:河道疏浚; 清淤方量; 断面法; 三角网法

中图分类号: P217; P258

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023253

王德传, 苏秀永, 谢双俊. 河道清淤方量测、算方法应用分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 160-164.

WANG Dechuan, SU Xiuyong, XIE Shuangjun. Application Analysis of Measurement and Calculation Methods for Dredging in River Channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 160-164.

0 引言

水乃生命之源、生产之要、生态之基。保护水资源、防治水污染、改善水环境、修复水生态, 促进人与环境和谐共存已成为现代社会共识^[1]。尽管各地努力打造“水清、岸绿、河畅、景美”的城市河道环境, 但伴随着城市建设快速发展、人口激增, 带来更多的生产、生活垃圾, 其中一部分不可避免地被雨水冲刷或人为偷排、漏排而进入城区大小纵横的河道, 时常造成部分河段明显淤积, 导致水流不畅引起河道水体黑臭。因此, 除了排水监管、水质监测、河面养护外, 清淤疏浚也是城市河道水体水质保障的重要一环、更是江南城市在梅雨季节防洪排涝有效手段。

河道清淤疏浚前、后, 需要测量水下地形或断面, 进行清淤方量计算, 用于清淤工程规划设计、招投标和施工预决算。早期的水下测量, 使用载人船、排筏或橡皮艇作为水上测量设备搭载平台, 通常将平面定位与测深分开进行: 采用经纬仪前方交会、全站仪极坐标法、无线电定位或全球导航卫星系统 GNSS (Global Navigation Satellite System) 差分定位; 采用测深杆、测绳、数显电子测深仪测量水深。平面与测深不完全同步, 造成测量的三维数据与水下实际地形不尽相符, 且劳动量大、作业效率低, 同时存在作业人员落水的安全风险。近些年搭载单波速、多波速、

惯导系统 IMU (Inertial Measurement Unit) 和 GNSS 等仪器设备的无人船测量技术日趋成熟, 成功应用于浅滩水域^[2-3]、水库^[4]、河道^[5]以及山地城市^[6]水下地形, 并在河道清淤测量中得到了可行性验证^[7]。赵薛强^[8]研发并应用了内外业全自动无人船测量系统, 蔡文兰^[9]对无人船水下测量技术的应用进行了系统深入研究, 关于无人船测量系统在河道水下地形测量中应用分析^[10-12]更是层出不穷。以上实践研究分析表明, 定位测深同步的无人船测量技术, 在测量精度和外业数据采集效率方面, 较传统水下测量有明显优势。但无人船测量设备价格较昂贵, 受河道形状、驳岸类型、沿河植被以及水草和半漂浮物等环境因素影响, 无人船水下测量系统也存在一定的局限性和缺陷, 传统水下测量方法仍有用武之地^[13]。

清淤方量计算方法众多, 各具特点。本文在简介河道水下测量模式和 2 种常用方量计算方法的基础上, 以杭州市某年河道清淤工程为例, 阐述不同的测算方法, 对比分析适用性、差异性, 以期今后城市河道清淤测量和方量计算项目提供一些借鉴和参考。

1 河道测量、清淤方量计算方法

1.1 河道测量模式及特点

利用城市连续运行参考站系统 (Continuously Operating Reference Stations, CORS), GNSS-RTK 能够实时提供厘米级三维坐标数据, 很少再用经纬仪、全站仪进行平面定位。普遍使用 CORS 网络 RTK 结合测深仪、辅以测深杆进行水深测量是城市河道水下

收稿日期: 2023-06-07 修回日期: 2023-06-07

作者简介: 王德传 (1973-), 男, 高级工程师, 主要从事工程勘察、测绘。

E-mail: 517442296@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

测量主要内容。目前外业数据采集主要采用以下几种测量模式：

1) 河道横断面测量。沿河道两岸适当位置布置垂直河道的断面端点，清淤前、后沿断面方向测、量河道水下数据，具体作业方法分为：

①使用水准仪或 CORS 网络 RTK 测量水面高程（水位），沿两断面端点拉一根测绳，作业人员乘船量取各测点至断面端点距离，同时用测深仪或测深杆量取水深，如图 1 所示。必要时用测深杆或静力触探设备测量淤泥厚度。



(a) 手持式测深仪作业 (b) 测深杆作业

图 1 传统水下测量模式

Fig.1 Traditional underwater measurement model

②使用无人船搭载单波速换能器（内置 GNSS、IMU），如图 2 所示，采用自动导航或手动控制，沿断面方向无验潮模式同步测量水下三维数据。

沿河流方向，两条横断面间隔一般 40 m 左右，河道转弯处适当加密。测点间距一般 2~10 m，靠近岸边适当加密。

2) 河道水下地形测量。以往常用的方法，是将 GNSS-RTK 和测深仪固定在载人船上，GNSS-RTK 测量位置和高程，测深仪采集水深数据，测深、定位自

动化同步进行。目前常使用无人船搭载单波速或多波速一体化测量系统，如图 2 所示。测深系统可以在 GNSS 的协助下按照设定的间距或时间间隔进行水深测量，能够同步进行测深定位同时，还可以实现远程通讯、自主航行，并具有自动避障功能^[14-15]。



图 2 无人船测量系统

Fig.2 Unmanned ship measurement system signal

河面较宽或宽窄变化大的河道，适合施测比例尺为 1:500 的水下地形。在确定测量范围后，测深线按图 1 布设，其中图 3 (a) 适合单波速测量较长、较窄河道；图 3 (b) 适合多波速测量较宽河道；图 3 (c) 和图 3 (d) 适合河道交会处或池塘、湖荡较宽阔水域。使用单波速测深仪，主测深线间距不大于 10 m，测点间距 1~5 m；使用多波速测深仪，主测线间隔按水深的 2~5 倍布设，确保各测带边缘具有一定的重叠度。大量的测量数据需要误差改正、粗差探测和处理，内业数据处理时间稍长。有必要布设与主测线垂直的检查线，进行水深数据精度检验。

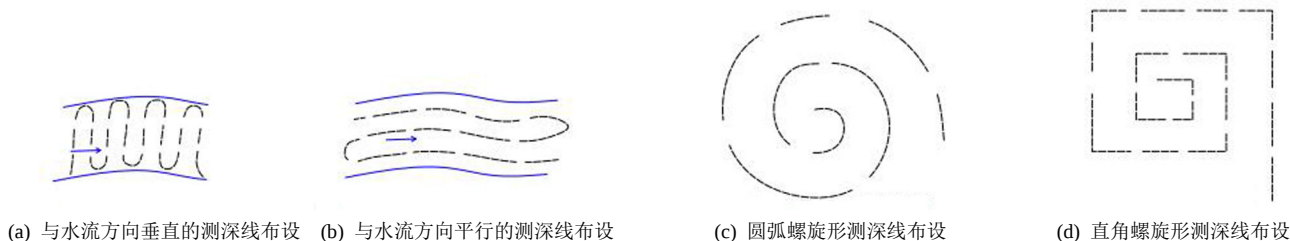


图 3 测深线布设

Fig.3 Sounding line layout

1.2 数据处理、清淤方量计算方法

1) 断面法。以河道水流方向为前进方位，左岸断面端点为起点，以各测点到起点距离为横坐标、各测点高程为纵坐标，绘制横断面图。使用 CASS 成图软件，绘制同一位置的清淤前后两期横断面图，叠加围成的截面积如图 4 所示。

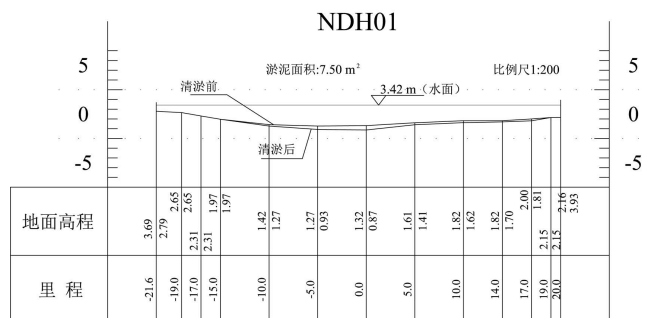


图 4 同一位置清淤前后横断面叠加截面示意

Fig.4 Cross-sectional superimposed cross-section before and after desilting at the same location

根据断面成果可知,相邻断面之间的清淤层形成一个近似于棱台的不规则实体,河道可视为被 n 个不规则实体分隔,清淤量由 n 个不规则实体积分所得。换言之,根据棱台的体积计算公式求得两断面之间的清淤方量,进而由各断面之间的清淤方量求和可得到整条河的清淤总方量。

$$W_{ij} = \frac{1}{3} (A_i + A_j + \sqrt{A_i \times A_j}) \times L_{ij}, \quad (1)$$

$$W = \sum W_{ij}, \quad (2)$$

式(1)、式(2)中 W_{ij} 为两相邻断面 i 、 j 之间清淤方量 (m^3); A_i 为第 i 条横断面清淤前后围成的截面积 (m^2); L_{ij} 为第 i 条横断面至第 j 条横断面之间间距, (m); W 为河道清淤方量 (m^3)。断面法数学模型简单,用 Microsoft Excel 计算方便、快捷,如图 5 所示。

断面区间	A_1	A_2	L_{ij}	$W_{ij} = \frac{1}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \times A_2}) \times L_{ij}$	备注
	(m^2)	(m^2)	(m)	(m^3)	
1	0.000	0.830	16.0	4.4	1—2
2	0.830	0.311	30.0	16.5	2—3
3	0.311	0.885	30.0	17.2	3—4
...	...	...	...	...	...
73	4.785	5.005	30.0	146.8	73—74
74	5.005	5.777	25.0	134.7	74—75
75	5.777	1.581	27.0	93.4	75—76
总计:			2257.4	6880.2	

图 5 断面法清淤方量计算

Fig.5 Section method for desilting cubic calculation

2) 三角网法。三角网法计算清淤方量精度高,其数学模型建立在把清淤前、后水下地形形态微分成 n 个三棱柱体,通过对每个柱体的体积求和,即可求得整个河道的清淤方量。

$$W = \sum p_i \Delta h_i, \quad (3)$$

式(3)中 W 为河道清淤方量 (m^3); p_i 为单个三角网的面积 (m^2); Δh_i 为三棱柱体高差 (m); n 为三角网个数。

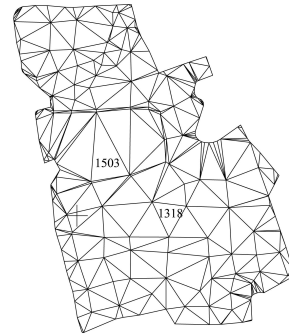
打开 CASS 软件,使用经过声速、定位、姿态等辅助参数改正以及粗差剔除后的测量数据,基于离散的水下高程点分别构建清淤前后不规则三角网,保存格式为*.sjw 的文件。使用下拉菜单命令:三角网法土方计算\计算两期间土方,按底端命令行提示,顺序选择清淤前后两期不规则三角网文件(或图面选择三角网),自动计算并生成结果,如图 6 所示。

2 河道清淤方量测算工程实践

2.1 项目概况

杭州市城区河道纵横交错,多达 470 余条,河汉、池塘、湖荡众多。该市历年来均有清淤规划和施

工,某年初计划对 15 条河道进行清淤,要求在梅雨季节来临前完成工程。清淤前需要测、算预计清淤方量用于施工招标,清淤后需要测、算实际清淤方量用于工程结算。



二期间土方计算

	一期	二期
平场面积	17 362.9 m ²	17 357.2 m ²
三角形数	390	542
最大高程	3.483 m	4.848 m
最小高程	1.190 m	1.212 m
挖方量	6 035.7 m ³	
填方量	3.8 m ³	

图 6 三角网法清淤方量计算

Fig.6 Triangulation net method for desilting calculation

接受测量业务委托后,经实地踏勘查明:有 13 条河道两岸基本为垂直石砌驳坎,河面宽度 15~50 m 不等,其中塘河平均宽度 45 m、水深 10 m 左右,有水上巴士通航;大南河平均水深 3 m,末端为面积约 0.08 km^2 不规则的消防演练用水塘;西行河为松木桩草坡入水驳坎,河窄水浅,水草生长茂密;白石河位于拆迁改建区和高铁施工地附近,驳坎多处崩塌,建筑垃圾淤积堵塞部分河段。除西行河外,均有历年清淤后河道断面数据,可作为预计清淤方量计算数据之一。

2.2 水下测量具体实施

根据踏勘结果和收集资料情况,结合各种测量技术特点,按如下具体测量方案实施:

清淤前后,选用科微 C170 无人船搭载 MS400P 多波速测深仪沿河流方向测量塘河、大南河末端水塘的 1:500 水下地形。考虑塘河有通航船只,按图 3(b)布设测深线;考虑水塘中间有一生态人工浮岛,按图 3(d)布设测深线,主测线间隔按水深的 3 倍布设,自主导航作业。用华微 6 号船搭载 D230 单频测深仪垂直主测深线施测一条检查线,经检查统计,图上 1 mm 范围内检查点高程较差小于 0.1 m 占 90% 以上,较差小于 0.2 m 占 100%,满足规范^[16]要求,水下测量数据质量可靠。长 3.4 km、平均宽 45 m 的塘河清淤河段,水下测量用时 3 h;大南河末端水塘水下测量用时不到 1 h。

西行河河面平均宽度 8 m、水深 2 m 左右,裹挟

泥浆和水草，无人船的螺旋桨容易被水草干扰、缠绕。清淤前后，一人乘坐橡皮艇，手持底端加载 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 塑料板的测深杆，沿河道横断面方向进行水深测量，同步沿测绳进行测点间距测量，如图 7 所示，并用尖端测杆量取淤泥底部至水面深度，计算出淤泥厚度。断面间距 40 m 左右，测点间距 2 m 左右。作业期间，间隔几条断面测量一次水面高程（水位）。西行河 2.1 km 清淤河段，外业测量用时 2 d 。



图 7 传统水下横断面测量

Fig.7 Traditional underwater cross section survey

针对白石河长约 500 m 淤积严重、几乎断流的河段，清淤前，使用飞马 D2000 无人机搭载 LiDAR500 进行扫测，使用全站仪免棱镜功能，测量部分检测点，检查无人机机载雷达扫测精度，确认数据质量可靠；清淤后，选用华微 6 号无人船搭载 D230 单频测深仪测量横断面，断面间距 40 m 左右，测点间距 2 m 。同样用测杆比对检验测深仪的数据质量可靠性。

其余河道清淤前、后，选用华微 6 号无人船搭载 D230 单频测深仪测量沿河道布设的典型横断面，断面间距 40 m 左右，测点间距设置 1 m ，靠近岸边尽量人工量取水深。施测前后，用测杆量取水深，比对检验测深仪的测量精度，经查验若干点，水深较差小于 0.1 m 普遍占 90% 左右，较差小于 0.2 m 占 100% ，符合规范要求，测深数据质量可靠。

2.3 清淤方量计算

利用河道清淤前横断面测量数据绘制的横断面图，结合历年清淤后河道断面数据，采用断面法计算预计清淤方量。其中，利用石河清淤前无人机机载雷达扫测数据，图切清淤前横断面数据，绘制清淤前横断面图，作为清淤表面，进而计算预计清淤方量；由于西行河缺少历年河道断面数据，故参考本次测量的河道淤泥平均厚度，根据业主给定的清淤标高和河岸坡比，作为清淤底面，计算预计清淤方量。

利用河道同一位置的本次清淤前、后两期横断面测量数据，分别绘制的横断面图，将两期横断面图叠加构成不规则截面，量取、标注截面积。使用两期横断面截面积和相邻断面间距离，利用式（1）计算两断

面之间的清淤方量，进一步求和得到整条河段的实际清淤方量。

利用塘河、大南河末端水塘清淤前、后分别经过各项改正和粗差别除后的水下地形数据，用三角网法计算清淤方量。同时图切典型横断面数据绘制横断面图，用断面法计算清淤方量，2 种计算结果较差比例超过 5% ，详见表 1。

表 1 清淤方量不同计算方法比较

Table 1 Comparison of different calculation methods of

清淤河段名称	Silt removal quantity m^3		
	断面法	三角网法	差值
塘河	31 420.3	28 949.1	2 471.2
大南河末端水塘	27 525.6	25 931.8	1 593.8

注 塘河清淤段长 3.4 km 、平均宽度 25 m ；水塘面积约 0.08 km^2 。

3 清淤方量测算分析

1) 无人船测量系统在城市河道水下测量中优势明显，极大提高了作业效率和作业人员安全性；搭载于无人船的单波速测深仪适用横断面、检查线测量；多波速测深仪适用不规则水体水下地形测量，一般不用于水下横断面测量。

2) 城市河道水流平缓、水质类同，无人船行驶平稳，搭载的测量系统所测数据稳定，噪点少，精度高，数据后处理自动化程度高；声速、定位、姿态改正很小，可以忽略不计或用经验数据修正，以减少内业数据处理时间。

3) 无人船测量系统对水体扰动较小，符合生态清淤要求，但受限于裹挟泥浆和水草的河道测量；超声波避障功能对树枝等细小障碍物作用不明显。

4) 载人船结合测绳、测深杆，适合水浅河窄、特别是水草繁多的河道断面测量，但作业效率不高；考虑淤泥松软，在作业前，需将测深杆底端加载一块方形塑料板，防止测深杆因自重加上作业员力度，造成测深杆不同程度陷入淤泥之中；必要时，使用尖端测杆量取淤泥厚度，方便插入淤泥底部；尽管河流落差均匀，还是要防止上游水闸开闸放水带来水位变化，因此作业期间，需要经常测量水面高程；测深、定位数据若分别记录，需要电子化后合并处理。

5) 可利用横断面测量数据、水下地形散点图切断面数据，采用断面法计算清淤方量；由于各条断面之间离散数据少，需采取合理的内插方法加密、而多波速数据冗余，需要抽稀后，方可使用三角网法计算清淤方量。

6) 断面法计算结果直观、形象，数学模型简单、计算快捷，适合计算预计清淤方量；由于断面数据相对较少，局部水下微地貌不能精确反映，测点、测线间距过密又影响作业效率；横断面间距通常 40 m 左

右,实践中常见横断面之间存在欠挖现象,造成断面法计算结果与实际不尽相符,与三角网法计算结果较差偏大。

7) 三角网法计算精度高,适合计算实际清淤方量。还可视工程需要,可由不规则三角网生成水下等高线和数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 进而由 DEM 转为 FBX 格式的水下三维模型,提高三维成果可视化效果,推动河道治理数字化进程。

4 结 语

无人船测量系统在城市河道测量中适用性较强,作业效率高,但设备投入也高;传统的水下测量方法,设备投入少,但作业效率低下,人工成本增加。应根据河道周边环境具体情况,顾及作业效率和测量成本投入,选用适用的测量方法。数学模型计算结果有一定的差异性,适用于不同工程阶段。以项目需要为导向,选用不同的清淤方量计算方法,及时提交了可靠的测绘成果,为杭州市河道疏浚、防洪排涝和河道生态环境综合治理提供参考依据,具有一定程度上的经济效益、社会效益和环境效益。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

[1] 苏秀永,刘会东,李垚. 实景三维 GIS 在数字水利监管平台的基础

应用和拓展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S2): 88-93.

- [2] 李勇,洪剑,朱春春. 无人船测深系统在浅水河道测量中的应用[J]. 水运工程, 2021(4): 20-24.
- [3] 陈俊任,周晓华. 无人船测量系统在水下地形测量中的应用[J]. 测绘技术装备, 2020, 22(4): 65-68.
- [4] 梁昭阳. 无人船测量系统在水库地形测量中的应用[J]. 城市勘测, 2018(1): 132-135.
- [5] 罗旭,石明旺. 无人船测量系统在河道水下地形测量中的应用[J]. 城市勘测, 2020(4): 164-167.
- [6] 岳仁宾,张均,陈公军. 无人船测量系统在山地城市水下测量中的应用[J]. 城市勘测, 2020(5): 133-136.
- [7] 叶斌,陈立波,罗正龙,等. 无人船测量系统在河道清淤中的应用[J]. 地理空间信息, 2017, 15(11): 21-23, 9.
- [8] 赵薛强. 无人船水下地形测量系统的开发与应用[J]. 人民长江, 2018, 49(15): 54-57.
- [9] 蔡文兰. 无人船水下测量技术的应用研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2019.
- [10] 李松勤. 无人船测量系统在河道水下地形测量中的应用[J]. 工程技术研究, 2021, 6(14): 66-67.
- [11] 汪振松. 水下地形测量中无人船的应用分析[J]. 水电水利, 2021, 5(4): 15-16.
- [12] 高艳. 无人船在水下地形测量中的应用与探讨[J]. 城市勘测, 2019(4): 173-175, 179.
- [13] 吉绪发. 结合无人船与网络 RTK 技术测量露天矿坑土方量[J]. 测绘通报, 2019(7): 151-155.
- [14] 杨瀚,许佳宾,黄鹤,等. 无人船测绘系统对大宁水库的水下地形测绘[J]. 北京测绘, 2017(S2): 51-54.
- [15] 张晨,牟乃夏,周霞,等. 无人智能技术在水库地形测量与库容计算中的应用[J]. 测绘通报, 2017(11): 72-76.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.

Application Analysis of Measurement and Calculation Methods for Dredging in River Channels

WANG Dechuan¹, SU Xiuyong², XIE Shuangjun³

(1. China Coal Zhejiang Surveying and Mapping Geo-information Co., Ltd, Hangzhou 310021, China;

2. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd, Hangzhou 310014, China;

3. Hangzhou Weidi Surveying and Mapping Co., Ltd, Hangzhou 311308, China)

Abstract: Dredging river channels is an effective means of ecological environment management and flood control and drainage. The measurement and calculation data of dredging are important basis for engineering bidding and construction budget and final settlement. There are various methods for measuring and calculating river dredging, each with its own technical characteristics, and the operational efficiency and cost investment vary greatly. Taking a certain year's river dredging project in Hangzhou as an example, different field data collection modes and internal data processing methods were listed, and the results of measurement and calculation were compared for applicability and difference analysis. The results indicated that selecting suitable dredging measurement and calculation methods based on the surrounding environment and historical data of the river could provide reliable surveying and mapping results in a timely manner, meet the planning, design, and construction needs of dredging engineering, and assisted in the comprehensive improvement of urban river channels. Analyzing and researching the measurement and calculation methods for dredging in river channels has engineering application significance.

Key words: river dredging; dredging volume; cross section method; triangulation method

责任编辑: 赵宇龙