

# 无人机航测产品在水运工程 测量中的新应用\*

冯玉全, 卢自来, 刘超群

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:** 近年来, 随着无人机搭载多种传感器进行航空摄影测量的实现以及计算机科学技术的发展, 航空摄影技术及产品被越来越广泛地应用到多种行业。采用大疆公司几款无人机搭载航测设备在四川省岷江、金沙江、沱江、嘉陵江开展水运工程测量项目应用, 指出无人机航测生产作业的原理和流程, 评定航测产品如照片、视频、数字正射影像图(DOM)、数字表面模型(DSM)、点云等的质量和精度, 分析其在陆域地形图测量、水域地形图测量、水文资料获取以及电力线悬高捕获等水运工程测量场景中的新应用, 展望无人机航测技术的未来发展。无人机航测技术产品相比传统作业方式更加先进, 可以更好地服务于水运工程测量事业。

**关键词:** 无人机; 航空摄影测量产品; DOM; 水运工程测量

**中图分类号:** U612.2; P216

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2025)04-0204-07

## New application of UAV aerial photogrammetry product in water transportation engineering survey

FENG Yuquan, LU Zilai, LIU Chaoqun

(Sichuan Communication Surveying and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

**Abstract:** In recent years, with the realization of aerial photogrammetry by unmanned aerial vehicle (UAV) carrying a variety of sensors and the development of computer science and technology, aerial photogrammetry technology and products have become more and more widely used to serve a variety of industries. Several drones from DJI are used to carry out aerial survey equipment in Minjiang, Jinsha, Tuojiang, and Jialing Rivers in Sichuan Province for the application of water transportation engineering survey projects. The principle and process of the drone aerial surveying production operation are pointed out. The quality and accuracy of aerial survey products are evaluated, such as photographs, videos, digital orthophotographs (DOM), digital surface models (DSM), point cloud, etc. Their new applications in water transportation engineering survey scenarios are analyzed, such as land topographic map survey, water topographic map survey, hydrological data acquisition, and power line overhang height capture. The future development of UAV aerial survey technology is looked forward to. The UAV aerial survey technology product is more advanced than traditional operation methods, and can better serve the cause of water transportation engineering survey.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV); aerial photogrammetry products; digital orthophoto map (DOM); water transportation engineering survey

近年来, 随着无人机技术的迅猛发展, 无人机在人类生产与生活中的应用逐渐增加。无人机

可以搭载诸如相机、激光雷达、热红外传感器和设备获取不同类型的数据<sup>[1]</sup>, 在地质测量、航空

**收稿日期:** 2024-07-25

**\*基金项目:** 四川省交通勘察设计研究院有限公司科技项目 (232022015)

**作者简介:** 冯玉全 (1985—), 男, 高级工程师, 从事公路与航运工程测绘。

测绘、灾情调查、紧急救援等领域有着广泛的应用。而在测绘领域中, 相对于传统的测绘方式, 无人机大比例尺测图技术经济成本低, 更加便于操作, 具有灵活性<sup>[2]</sup>, 可以生产数字正射影像图 (DOM)、数字表面模型 (DSM)、LAS (点云)、DEM (数字高程模型)、DLG (数字线划图) 等数字产品, 为各种工程勘察设计提供多种成果资料。无人机航测也越来越多地应用于港口工程、航道整治、航道疏浚、航运枢纽建设、通航论证等水运工程项目中。2021 年 1 月, 开展沱江内江市龙门镇航电枢纽工程测量; 2022 年 7 月, 开展岷江干流张坎航电枢纽船闸工程测量; 2023 年 3 月, 开展嘉陵江广安桐子壕电站库尾航道整治工程测量; 2024 年 1 月, 开展金沙江大型电站库尾航运条件研究测量。在这些工程中, 使用了大疆公司生产的精灵 4RTK 无人机、M300 航测无人机、御 M3E 无人机进行航空摄影测量, 使用 Pix4D Mapper、大疆智图、Global Mapper、Terrasolid、Quick Terrain Modeler (以下简称 QTM)、南方 CASS 等软件生产 DOM、LAS、DSM、DLG 等数字产品。相比传统的全球定位系统-实时动态载波相位差分技术 (GPS-RTK)、全站仪测绘, 无人机航测产品在水运工程测量中具有新的应用, 保证成果质量的同时, 极大提高了作业效率。

## 1 无人机航测作业

### 1.1 无人机航测原理和流程

无人机搭载航测相机进行航拍时, 航测相机的内方位元素即坐标  $x$ 、 $y$  和相机主距  $f$  是已知的, GPS 辅助空中三角测量和导航定位定向系统 (POS) 辅助空中三角测量能自动记录每张照片曝光点的坐标和姿态信息, 即外方位元素坐标  $x_s$ 、 $y_s$ 、 $z_s$  和旁向倾角  $\varphi$ 、航向倾角  $\omega$ 、像片旋角  $\kappa$ 。无人机按照一定的航向重叠度和旁向重叠度对测区进行航拍。内业处理时, 航测软件通过空三计算把每张照片进行拼接, 完成相对平差, 得到每

个待求点的相对坐标, 然后通过像控点坐标进行绝对平差得到待求点的绝对坐标, 进而生产得到 DOM、DSM 等。

如果搭载了激光雷达, 则利用 LiDAR 的测距功能、GPS 的定位功能、IMU 的测角功能及飞机的飞行, 构成一个“移动式全站仪自动测量系统”, 其扫描的回波数据经处理后可直接生成地面点的三维坐标<sup>[3]</sup>。

使用无人机进行航空摄影测量的具体流程见图 1。

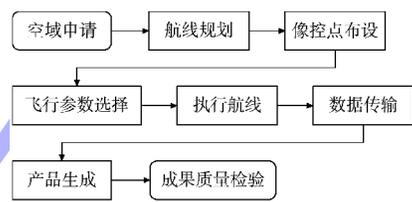


图 1 无人机航空摄影测量作业流程

Fig. 1 Operation process of UAV aerial photogrammetry

### 1.2 无人机航测产品

以上应用中, 生产提供的航测产品包括照片、视频、DOM、点云、DEM 等。DOM 见图 2, 基于 DEM 得到的等高线见图 3。

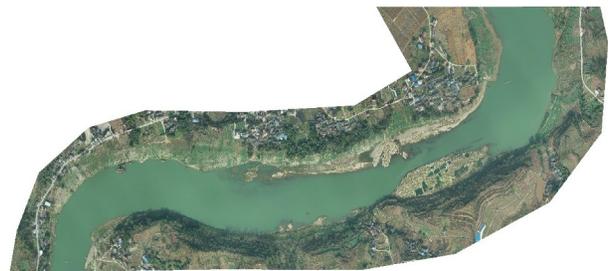


图 2 内江龙门航电枢纽坝址区正射影像  
Fig. 2 Orthophoto of dam site area of Longmen Navigation-power Junction, Neijiang

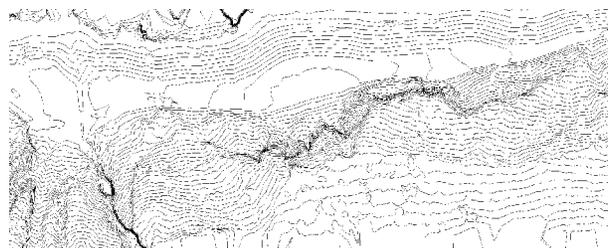


图 3 白鹤滩水电站库尾等高线局部  
Fig. 3 Partial contour lines at tail of Baihetan Hydropower Station

## 2 陆域地形测量中的应用

### 2.1 传统作业方式和无人机航测

在水运工程测量中,传统的陆域测量方式有 GPS-RTK 测量和全站仪测量。传统作业方式往往需要人工测量。在深沟高坎区、陡崖高坡区、房屋密集区、大面积作业区,人力方式难以覆盖,进而导致作业方式成本高、效率低。

而无人机搭载航测设备进行航空摄影测量,无需人力到达每个地物地形点。使用无人机对测区进行航拍,可解决深沟高坎区、房屋密集区人力测量困难的问题。以内江市龙门镇航电枢纽工程测量项目为例,作业组使用大疆精灵 4RTK 在 1.5 个工日完成测区 5 km<sup>2</sup> 地形图外业航飞,而传统作业需要 10 个工日完成。可见无人机航测技术大幅节省了外业测绘的时间。

### 2.2 DLG 产品

在南方 CASS 绘图软件中加载航测产品正射影像 DOM 进行矢量化成图,并加入 GPS-RTK 实测数据一同矢量化。对于裸露地形,可通过加入 Pix4D Mapper 软件生产的等高线成果作为地形图等高线使用。对于房区或者植被密集区,可使用 QTM 软件捕获 LAS 成果中的地面高程点,类似于在室内软件中采集野外地形点高程。在南方 CASS

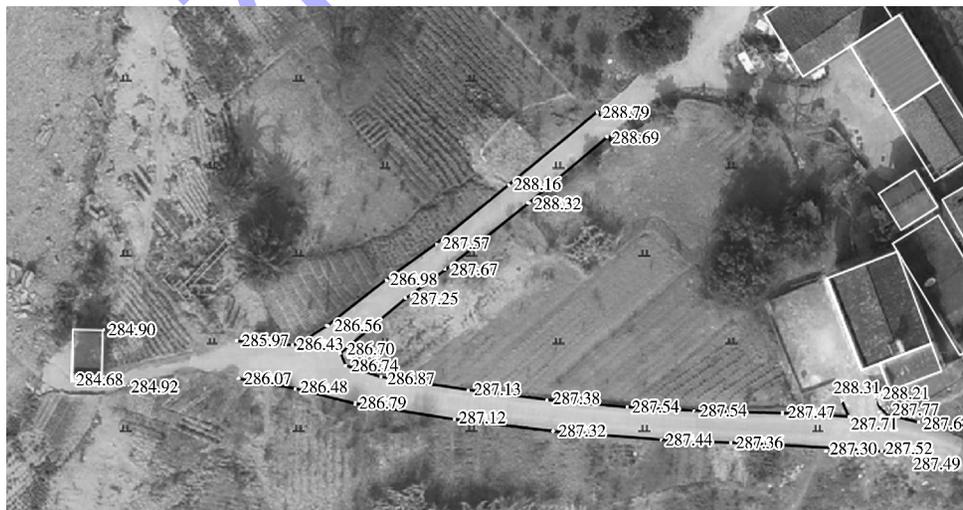
软件中展绘高程点,建立三角网,生成等高线,最后把地物成果和等高线合并形成数字线划图 DLG 航测产品。

### 2.3 DOM 产品精度

在以上应用中,使用无人机航测时,可通过连接千寻连续运行卫星定位导航服务系统(CORS),布设少量的像控点,显著提高无人机航测产品的精度。DOM 分辨率为 0.09 m,满足 CH/Z 3005—2021《低空数字航空摄影规范》<sup>[4]</sup>中 1:1 000 测图比例尺地面像元分辨率值不大于 0.1 m 的精度要求。千寻 CORS 实测点和 DOM 平面位置情况对比见图 4,精度对比见表 1。

表 1 千寻 CORS 实测点与 DOM 平面精度对比  
Tab. 1 Comparison of plane accuracy between CORS and DOM

x(CORS)/m	y(CORS)/m	x(DOM)/m	y(DOM)/m	ΔS/m
3 260 290.425	501 968.900	3 260 290.402	501 968.938	0.044
3 260 289.071	501 980.343	3 260 289.081	501 980.342	0.010
3 260 288.099	501 992.801	3 260 288.086	501 992.814	0.018
3 260 287.740	502 000.873	3 260 287.738	502 000.873	0.002
3 260 291.114	502 006.850	3 260 291.114	502 006.832	0.018
3 260 291.411	501 996.569	3 260 291.433	501 996.558	0.025
3 260 291.811	501 988.870	3 260 291.764	501 988.842	0.055
3 260 292.667	501 979.600	3 260 292.634	501 979.632	0.046
3 260 293.778	501 970.521	3 260 293.751	501 970.500	0.034



注:图中数值点为千寻 CORS 实测点。

图 4 内江龙门千寻 CORS 实测点和 DOM 位置对比 (单位: m)

Fig. 4 Comparison of CORS survey points and DOM positions at Longmen, Neijiang (unit: m)

由图1可以看出,千寻 CORS 实测道路和 DOM 位置基本吻合。由表1可看出,正射影像和千寻 CORS 实测数据的平面差值  $\Delta S$  均在厘米级,最大为 0.055 m,能够满足 JTS 131—2012《水运工程测量规范》<sup>[5]</sup>中 1:1 000 地形测量地物点位中误差小于图上 0.6 mm,即实际距离 0.6 m 的精度要求。

### 3 水域地形测量中的应用

#### 3.1 传统作业方式和 DOM 产品

传统测量水域地形图的方法是使用测量船搭载单波速测深仪、测深杆等进行水深测量。如水中存在礁石、浅滩等,则需要用船直接靠近这些区域进行测量。如果礁石等重要障碍物在水下较深,例如在水面以下深度大于 2 m,尤其是在水流速度较慢的情况下,采用传统的断面法测量方式可能无法准确测量到这些礁石。

在国家实行为期 10 年禁渔政策期间,很多江道上的小型船只不再使用。因此,传统小型船只搭载测深设备工作的方案无法实施,导致测量人员无法进行水上中坝、岛礁测量,这给水上测量工作带来了很大困扰。

然而,无人机航测技术无需人力到达即可航拍礁石、浅滩、中坝等区域,生产 DOM 产品,在 DOM 上绘制地物,解决了上述传统水上测量方案的困扰。

#### 3.2 DOM、LAS 辅助水域测图

无人机航空摄影测量能够很好地解决传统作业中存在的问题,通过航空摄影测量生成正射影像,测量人员能清晰地识别礁石、浅滩的位置、范围和形状,在航测产品点云成果中捕获礁石、中坝的高程。作业时,应选在江道水位较低的时候进行航测,以获取更多的水下地貌。在应用中,DOM 成果均给水域测量带来了极大帮助。水下礁石探测范围见图 5。可以看出,采用单波速测深仪断面法测深时,右侧箭头所指区域的水深值 2.0 和 3.3 m 为暗礁高程点,而断面上附近其他区域测点的水深值为 4.6、4.4、4.7、4.4 m。通过正射影像,可以辨识出此礁石的左下位置还有一处黑色阴影,为暗礁。而传统断面法测深线间距为 20 m,又因测量人员在船上会受到水面反射的影响视线有限,导致断面法测量漏测了该处暗礁的数据信息。可见,DOM 能够很好地辅助测量水域礁石信息。

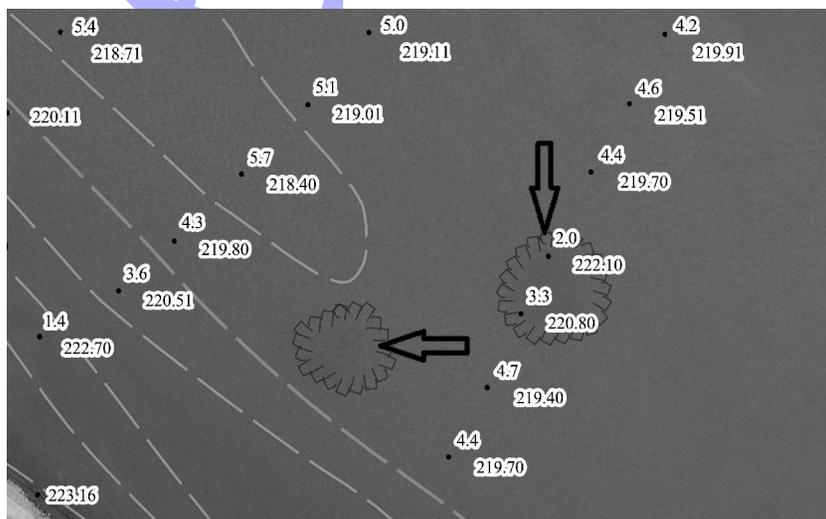


图5 嘉陵江桐子壕电站库尾水下礁石范围(单位:m)

Fig. 5 Range of submerged reefs at tail of Tongzihao power station reservoir on Jialing River (unit: m)

岷江张坎航电枢纽坝址区水域地形见图6。可以看出,江道内水深很浅,由于上游流量很小,

小于  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ,使用华测公司华微4号无人船测量少数深水区域得知此段江道水深基本在 1 m 以下。

由于动力渔船吃水深度至少 0.5 m，而无人船吃水深度为 0.15 m，且水深小于 0.45 m 时无人船无法自动测深。故动力渔船和无人船均很难在此复杂浅水区域作业，人员到达更加困难、危险。而无人机航测成果 DOM 能较好地解决浅滩、中坝、礁石问题，在 DOM 中可绘制出浅滩、中坝和礁石范围。

只需结合无人船部分水深数据和水边线信息即可帮助分析浅滩水深值。在点云数据中可捕获礁石、中坝高程值，QTM 软件捕获礁石、中坝点云成果高程值见图 7。



图 6 岷江张坎航电枢纽坝址区水域地形  
Fig. 6 Water area topography of Zhangkan navigation and hydropower hub dam site on Minjiang River



图 7 在 QTM 中捕获礁石、中坝点云高程 (单位: m)  
Fig. 7 Reef and mid-dam point cloud elevation captured in QTM (unit: m)

通过 DOM，还可以为无人船自动规划测深航线提供准确范围<sup>[6]</sup>，无人船能自动执行航线而无需测量人员手动控制遥控器，无人船能避开水中礁石、中坝的干扰，避免水域范围不准造成的作业安全风险。

综上所述，DOM 和 LAS 产品能够辅助水域测图。

### 3.3 LAS 产品精度

在内江市龙门镇航电枢纽工程中，将 GPS-RTK 测得的水中垅埂、中坝高程值和 QTM 中捕获的点云产品高程值进行对比，结果见表 2。可以看出，高程差值  $\Delta H$  在 0.13 m 以内，满足 JTS 131—2012《水运工程测量规范》中重点地区小于 0.3 m 的精度要求。

表 2 GPS-RTK 高程值和 QTM 高程值精度对比  
Tab. 2 Accuracy comparison of elevation values between GPS-RTK and QTM

x/m	y/m	H(RTK)/m	H(QTM)/m	$\Delta H/m$
3 259 589.224	502 035.208	277.655	277.731	-0.08
3 259 601.238	502 042.137	277.838	277.749	0.09
3 259 552.173	502 064.958	277.659	277.559	0.10
3 259 592.689	502 069.646	277.782	277.696	0.09
3 259 602.870	502 061.287	277.838	277.917	-0.08
3 259 570.572	502 145.982	277.783	277.698	0.08
3 259 565.227	502 129.514	277.768	277.731	0.04
3 259 564.364	502 105.543	277.834	277.895	-0.06
3 259 548.777	502 098.747	277.610	277.545	0.07
3 259 547.915	502 112.472	277.866	277.743	0.12
3 259 555.847	502 139.922	277.517	277.650	-0.13
3 259 584.904	502 153.618	278.070	277.957	0.11
3 259 602.578	502 143.623	278.070	278.199	-0.13
3 259 612.428	502 140.306	278.059	277.985	0.07

## 4 水文资料获取中的应用

### 4.1 无人机获取流态信息

在水运工程测量中,表面流速流向的观测十分重要。传统测量表面流速流向的方法有全站仪前方交会浮标法与浮筒法<sup>[7]</sup>。然而浮标和浮筒在江中的个数有限,难以全面反映复杂水流流态情况。相比之下,无人机航测照片和视频资料则能作为测量表面流速流向的有效补充手段,能够为流态测量提供更全面的信息。在金沙江大型电站库尾航运条件研究测量中,通过无人航测照片获得白鹤滩电站库尾某处滩险水流分布情况见图8。可以看出,此处滩口水流比降大、滩口整体位于左岸、水流汇聚于一股等流态信息。所以,无人机航测照片能够获取流态的有效信息。



图8 金沙江白鹤滩电站库尾滩险流态

Fig. 8 Dangerous flow pattern of tail beach of Baihetan power station on Jinsha River

### 4.2 DOM 获取瞬时水边线

在水运工程测量中,准确测量瞬时水边线是至关重要的。传统方法测量水边线用 GPS-RTK 采集水边形状。由于使用 GPS-RTK 测量水边线需要人力到达,水边线测量时间较长,一般为 1.5 km/h。以此推算,测量一岸 5 km 的水边线需要 3.3 h。在 3.3 h 内,由于上下游水位可能会有涨落变化,内业时工作人员还需要结合临时水尺的观读和地形情况修正水边线位置。这种测量方法内业工作量巨大,成果质量和效率不高。

无人机航测产品中 DOM 正好能解决瞬时水边线测量问题。测量人员通过一段时间的水尺观读,掌握水位涨落规律后,可以在水位较为稳定(来流

较为稳定)的时间段进行航测。由于航测时间往往较短(5 km 两岸水边线测量只需 1.5 h),这正好能够在来流稳定期间获得瞬时水边线的形状。在特定水位和来流时,使用 DOM 能够准确获取一些中坝、浅滩、边滩的瞬时水边线形状。

利用航测产品 DOM 准确绘制出了岷江张坎航电枢纽航测时间段内岸边、中坝的瞬时水边线见图9。在这个时间段内,经过水尺观读,水位变化是稳定的,所绘制的瞬时水边线符合设计水文资料的要求。



图9 张坎航电枢纽 DOM 瞬时水边线局部(单位:m)

Fig. 9 Partial instantaneous water line of Zhangkan hydropower hub by DOM (unit: m)

## 5 电力线悬高测量中的应用

在通航论证、航道测量等水运工程测量项目中,测量跨江电力线的悬高是至关重要的。设计人员以此论证各种水位下,航道是否具备船只安全通航的净空高度,没有安全事故风险。传统的悬高测量方法是使用全站仪测量距离、位置和角度计算电力线各处的高程。

如今测量跨江电力线悬高有了新的方式,可以通过无人机航测产品的点云数据来捕获电力线各处的高程。通过表2的数据显示,无人机航测点云高程值误差在 0.2 m 以内,高程精度满足设计要求。这种新方法可以任意捕捉电力线各处的高程值,代替了使用全站仪进行外业电力线悬高测量工作。

在 QTM 中捕获跨江高压铁塔电力线 LAS 悬高值见图10。可以看出,LAS 产品成果在电力线悬高测量中得到很好的应用。

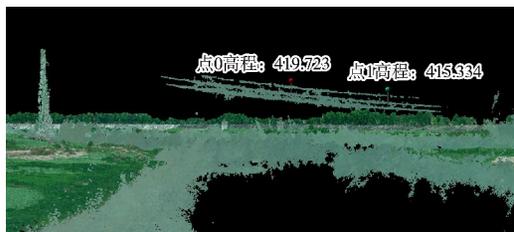


图 10 QTM 中捕获电力线 LAS 悬高 (单位: m)  
Fig. 10 Power line LAS elevation captured in QTM  
(unit: m)

## 6 结论

1) 无人机航测技术产品为水运工程陆域地形图测量带来革命性的改变, 保证陆域地形测量质量的同时, 极大地提高了外业测量效率。

2) 无人机航测技术产品为水运工程水域地形测量带来新的方式, 可获得岛礁、中坝的信息, 为无人船自动测深提供支持, 有效替代传统作业方式。

3) 无人机航测技术产品在水运工程水文流态和瞬时水边线测量中有了新的应用。

4) 无人机航测产品点云成果可以捕获跨江电力线悬高, 代替全站仪外业测量。

5) 无人机航测技术产品的用途是丰富的、多样的, 但低空摄影测绘毕竟不能完全代替人工测绘, 仍需要进行外业调绘, 传统的 GPS-RTK 技术也并不是毫无用武之地, 例如仍用于像控点测量、地面管线测量等。随着无人机航测技术的蓬勃发展, 使用新式的无人机搭载新设备将实现更高效率的地形图作业, 例如使用飞马 V500 进行大面积的航空摄影测量, 使用飞马 V10 搭载激光雷达系统进行激光航测, 将为水运工程测量提供更多便利。

## 参考文献:

[1] 张涛, 姚月, 张云昌, 等. 无人机机载 LiDAR 在地质灾害数据采集中的应用研究: 以金沙江白格堰塞湖应急处置旧址科学考察为例[J]. 中国应急救援, 2023(2): 49-54.

ZHANG T, YAO Y, ZHANG Y C, et al. Research on application of UAV airborne LIDAR in geological hazard data acquisition: taking the scientific investigation of the emergency response site in Baige Barrier Lake on Jinsha River as an example[J]. China emergency rescue, 2023(2): 49-54.

[2] 周丽晨, 苏紫乾. 无人机大比例尺测图技术及应用研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(2): 175-177.

ZHOU L C, SU Z Q. UAV large-scale mapping technology and application research [J]. Theoretical research in urban construction, 2024(2): 175-177.

[3] 王双亭. 摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 2017.

WANG S T. Photogrammetry[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2017.

[4] 低空数字航空摄影规范: CH/Z 3005—2021[S]. 北京: 测绘出版社, 2022.

Specifications for low-altitude digital aerial photography. CH/Z 3005-2021 [S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2022.

[5] 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

Specifications for port and waterway engineering survey: JTS 131-2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

[6] 刘超群, 卢自来, 刘敏, 等. 基于无人机和无人船的河(江)道地形测绘技术应用[J]. 水运工程, 2023(S1): 138-142.

LIU C Q, LU Z L, LIU M, et al. Application of river channel topography mapping technology based on UAVs and unmanned ships[J]. Port & waterway engineering, 2023(S1): 138-142.

[7] 冯玉全, 卢自来, 高桃峰. 几种新测绘方法在西部航道原型观测中的应用[J]. 水运工程, 2023(7): 164-168.

FENG Y Q, LU Z L, GAO T F. Application of several new surveying methods in prototype observation of western waterway [J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 164-168.

(本文编辑 王璁)