

大比例尺数字化航测成图方法研究及 在航道工程中的应用

吴旭, 朱春春

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 传统的立体像对测图和三维立体模型测图方法在精度、效率及适用性上各有局限, 难以满足复杂地形地貌条件下的高效高精度成图需求。通过对比分析这 2 种方法的优缺点, 采用“方法互补”的思路结合理论与效率分析提出一种融合测图方法, 提升大比例尺地形图的绘制效率与精度。结合实际项目, 利用无人机采集数据, 分别采用立体像对测图、三维立体模型测图与融合测图法进行试验, 并通过实测数据评估 3 种方法的平面与高程精度。研究结果表明, 融合测图方法在复杂地形条件下能够显著提高成图效率与精度, 具备较高的推广价值。

关键词: 航道工程; 无人机数字化航测; 立体像对; 三维立体模型; 融合测图

中图分类号: U6; U652.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-7874(2026)07-0043-06

doi: 10.7640/zggwjs202607007

Research on large scale digital aerial mapping method and its application in waterway engineering

Wu Xu, Zhu Chunchun

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430060, China)

Abstract: Traditional stereo pair and 3D model mapping methods respective limitations in terms of accuracy, efficiency, and applicability, making it difficult to meet the demands for highly efficient and high-precision mapping under complex topographic conditions. This paper proposes a fusion mapping method by comparatively analyzing the advantages and disadvantages of these two approaches and adopting a "complementary approach" based on theoretical and efficiency analysis to enhance the efficiency and accuracy of large-scale topographic map production. Through a practical project, data was collected using UAV. Experiments were conducted using stereo pair mapping, 3D model mapping, and the fusion mapping method, respectively. The horizontal and vertical accuracy of the three methods was evaluated using field survey data. The results demonstrate that the fusion mapping method significantly improves mapping efficiency and accuracy in complex terrain, indicating high potential for broader applicability.

Key words: waterway engineering; UAV digital aerial mapping; stereo pair mapping; 3D model; fusion mapping

0 引言

随着科技的快速发展和无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)技术的日益成熟, 无人机在许多领域都得到了广泛应用, 尤其是在航道工程地形图测量中。航道工程往往具备跨度大、要求高、涉及水陆一体数据融合等特点, 现如今搭载了多

元传感器的低空航空摄影测量的无人机设备, 凭借其高精度、高效率、跨河测量、数字化水陆成果融合等优势, 越来越受到行业青睐。

目前, 利用无人机大比例尺数字化航测成图的方法主要有: 数字化立体测图、三维立体模型裸眼测图、DOM(数字正射影像)二维绘图和三维

激光雷达点云测图等。其中数字化立体测图是基于SSK数字摄影测量系统,通过工作站与空中三角测量结果恢复立体像对来进行特征集成图^[1],是目前比较成熟且适用范围广的方法。三维立体模型裸眼测图是通过影像或雷达数据与空中三角测量结果建立三维实景模型,利用相应软件在实体模型上进行特征采集^[2-3],凭借可裸眼测量的优势与倾斜摄影测量技术的迅速发展,成为近几年行业中常用的方法。

本文基于北江航道扩能升级工程实例,重点解决以下问题:1)定量分析2种方法在不同地物类型中的平面与高程精度差异;2)提出一种融合测图方法,以兼顾点状地物精细化采集与面状地物高效生成的优势。并且通过实例验证,为复杂地形条件下的无人机大比例尺测图提供优化方案。

1 传统测图技术及存在问题

1.1 立体像对测图

数字立体像对测图就是利用不同摄站采用航空摄影测量或多线阵遥感传感器基于共线方程原理与相关软硬件设备,建立具有一定重叠度的立体像对,利用前方交会原理立体观测、采集像点三维坐标的数字化成图方法^[4]。测图流程见图1。

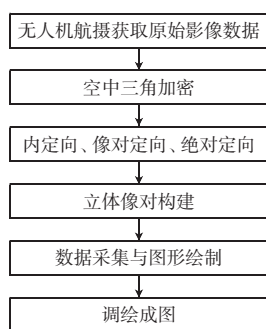


图1 立体像对测图流程图

Fig. 1 Flowchart of stereo pair mapping

该技术核心原理是利用双目视差模拟恢复立体像对,因此需要必备的高配置工作站、双频影像发射装置(通常为高频偏振光显示器)与接收装置(立体测图眼镜),同时为了方便观测还要搭配脚轮与手盘等采集设备。因此立体像对测图带来较高设备投入成本的同时对采集人员自身素质也有较高要求。另一方面,立体像对测图属于纯人工判读绘图,也受限于立体像对图幅限制,绘制过程中需要不断切换立体像对,造成部分地物尤其是带状地物绘制效率较低。

1.2 三维立体模型测图

三维立体模型测图通常被称为裸眼立体测图,即依据倾斜摄影或正射摄影在空中三角测量的成果基础上构建可视可量测的空间立体模型的数字化成图方法^[5]。测图流程见图2。



图2 三维立体模型测图流程图

Fig. 2 Flowchart of 3D model mapping

三维模型测图通过无人机设备采集高分辨率影像,生成的真实影像纹理实景三维模型^[6-7]。三维实景模型以DSM(三维表面模型)为基础,部分所需地物如果被遮挡或者干扰,那么其相对应的模型的精度会受到严重影响甚至无法获取。同时模型几何精度由高密度前方交会点构建TIN生成,尤其是在人工构筑物上,难以精确恢复其几何特性。

1.3 2种测图法对比分析

本文主要对立体像对测图与三维立体模型测图2种方法进行分析。结合2种绘图方法原理与特点依据实际作业项目绘图经验,分别对2种方法的质量与效率进行分析,其中质量主要包括地形地物绘制精度与准确度,效率主要包括内业绘制时间、外业调绘时间与人员设备因素综合分析。

以立体像对测图法与三维模型测图法作业生产的地形图成果文件及过程文件作为依据,对数据进行统计与分析,地形要素尽量涵盖常规地貌地物。

其中,质量评定标准以调绘与查图过程中GNSS-RTK或全站仪测图采集特征点(通常情况下精度高于航测精度,可认为高精度检测)与航测特征点平面和高程残差对比结果作为评判依据。分析不同地形要素中误差评定质量标准。效率评定标准以已完成项目的内业作业班报与成果质量检核记录作为评判依据,统计有效作业天数(时长)与单位面积下不同地形要素完成效率。质量评定

标准依据相应规范或技术设计书要求的中误差,效率评定标准依据作业天数平均数。

本文选取了 8 个测量项目的地形图数据, 其中具有代表性的 73 幅图作为分析数据源, 分析成果见表 1。

表 1 地形要素绘制质量效率分析成果表
Table 1 Results of quality and efficiency analysis of terrain elements mapping

地形要素		立体像对测图		三维立体模型测图	
		质量	效率	质量	效率
居民地	城镇	高	中	较高	中
	乡村	高	较高	高	较高
水系	沟渠	高	中	较高	较高
	河流	高	中	较高	较高
交通	道路	高	中	较高	高
	交通要素	较高	较高	中	中
管线	地面管线	高	中	高	较高
	架空电线	高	中	中	较低
植被	草地	较高	较高	中	较高
	林地	较高	中	较低	中
地貌土质	坡坎陡崖	高	较高	较高	高
	等高线	高	较低	高	高
	高程注记	较高	较低	高	高

2 融合测图法研究

2.1 理论基础与必要性

融合测图法的核心逻辑源于测量学中“方法互补性”理论: 不同测图技术因原理、数据来源和处理方式的差异, 在地形要素采集过程中呈现出“优势与短板并存”的特性, 而通过合理整合这些技术, 可实现对单一方法局限性的规避, 最终达成整体精度与效率的提升^[8]。

由表 1 可知, 由于 2 种测图方法原理与操作方法上有较大区别, 因此面对不同的地形要素时在质量与效率方面的成果也有不同。立体像对测图依赖双眼视差原理, 通过 2 张具有重叠区域的影像, 模拟人眼立体视觉, 这种“局部细节优先”的原理可精准恢复地物的细节形态, 细节清晰对于点状地物、小型地物、密集地物与属性判读上有更明显的优势。而三维立体模型基于密集匹配技术, 通过海量影像生成覆盖测区的整体三维模型, 其“整体约束优先”的原理测图在线面状地物、大型地物与高程要素绘制有明显的优势^[9]。

融合测图法核心理念是依据 2 种测图法的理论基础、采集方式、时间成本等综合分析, 根

据优势互补理论, 融合测图通过对不同地物类型精准分工, 可实现对细节地物(点状、小型、密集地物)保留立体像对的细节捕捉能力, 对整体地物(线面状、大型地物、高程要素)发挥三维模型的整体精度优势, 最终通过数据融合弥补单一方法精度的不足, 实现“1+1>2”的效果, 使精度与效率提升。

融合测图法核心理念示意图如图 3 所示。

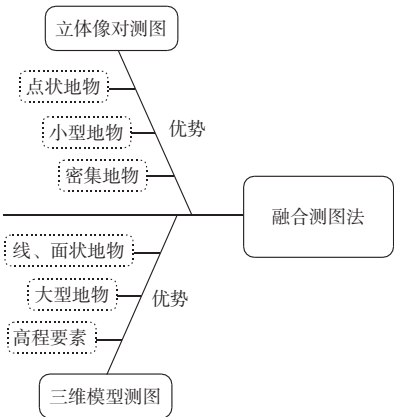


图 3 融合测图法核心理念示意图
Fig. 3 Schematic diagram of core concepts of fusion mapping method

2.2 地物分类采集

参照 GB/T 20257.1—2017《国家基本比例尺地图图式 第 1 部分: 1:500 1:1 000 1:2 000 地形图图式》^[10]要求并结合 2 种测图方法的理论基础与采集特点, 本文将典型地物大致分为 3 类, 对于不同的地物匹配不同的采集方法, 如表 2 所示。

表 2 地物采集分类表
Table 2 Classification of ground feature collection

地物类别	定义	匹配采集方法	核心需求
I 类 (细节型)	尺寸、非依比例尺绘制(房角、电杆、交通标志)	立体像对测图	点位精度优先
II 类 (整体型)	面积、长度(旱地、硬化路面、池塘)	三维模型测图	边界效率优先
III 类 (遮挡型)	植被覆盖度、构筑物遮挡程度	立体像对补充测绘	消除盲区优先

依据以上 I 类、II 类、III 类的地物类别区分方法, 可以对航道工程地形图典型的地物类别进行区分, 方便后续精度与效率分析、方案实施与比较。

2.3 精度与效率分析

立体像对测图的误差主要源于局部匹配偏差与人工采集误差, 局部匹配偏差表现为“细节精准

但整体离散”。例如，对道路边线的逐个测绘可保证其平面精度，但因缺乏全局约束，带状道路位置可能出现不均匀偏差。同时在空中三角测量成果误差的基础上，人工目视判读采集仍然会带来不稳定误差，深度依赖作业人员素质这一不稳定因素。

三维立体模型测图的误差则源于模型简化与模型的表面化，表现为“整体一致但细节模糊”。例如，某比例尺道路边线的整体走向精度可以达到 ± 0.1 m，但路边的小型路缘石可能因模型分辨率限制而被忽略。三维模型通常为表面模型，易被遮挡丢失关键信息(如植被覆盖)，造成无法获取真实地表数据。

依据上述分类标准与误差传播定律，忽略其他非主要因素影响，地物采集中误差 σ 可以如式(1)所示。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 + \sigma_{III}^2} \quad (1)$$

式中： σ_I 、 σ_{II} 、 σ_{III} 分别为I类、II类、III类地物类别采集的中误差。

依据融合测图法的理论思路，立体测图误差 $\sigma_{立}$ 主要来源为：航测误差(包含空中三角测量误差、刺点误差、匹配误差等通用误差)+人工判读误差+像对切换误差；三维模型测图误差 $\sigma_{模}$ 主要来源为：航测误差+模型偏差、遮挡误差。采用融合测图法在三类地物中会减小部分 $\sigma_{立}$ 与 $\sigma_{模}$ 的采集误差，可以得出结论：融合测图法误差 $\sigma_{融} \leq \sigma_{立}$ 且 $\sigma_{融} \leq \sigma_{模}$ ，融合测图法精度更高。

在效率方面：1) 立体像对测图具有目视判读带来的直观性，可以避免部分干扰(如植被、车辆、水体等因素)，从而减少外业调绘工作量。另一方面，像对切换采集的方式也让大部分地物采集效率略逊一筹。2) 三维立体模型测图由于已经有构建好的模型坐标信息，部分信息可以快速自动获取采集，但是不具备可辨别性，遮挡与干扰地物容易造成粗差、遗漏，需要通过外业调绘来对地形图进行补充。两者结合可以优势互补的同时提高数据内业化程度，从而提高效率。

2种测图方法精度与效率对比分析见表3。

表3 精度与效率对比分析表

Table 3 Comparison analysis of accuracy and efficiency

测图方法	精度分析	效率特点
立体像对测图	局部匹配偏差：细节精准但整体离散； 人工采集误差：内业误差叠加人员误差	优势：目视判读的直观性可避免部分地物干扰，减少外业调绘工作量； 劣势：人工立测采集方式效率较低
三维立体模型测图	模型简化：整体一致但细节模糊； 模型表面化：易被遮挡丢失关键信息	优势：已构建的模型坐标信息可使部分信息快速自动获取采集； 劣势：信息不具备可辨别，易造成粗差、遗漏，需外业调绘补充

2.4 方案实施

融合测图方法流程如下：

1) 结合测区卫星影像、DOM(数字正射影像图)开展内业预判，同时辅以现场踏勘(重点核查影像中模糊区域的地物真实性)，系统分析待绘范围内地形要素的类型、分布密度及复杂程度。根据分析结果，明确立体像对测图与三维立体模型测图的分工边界，并形成书面规划方案。

2) 基于预处理阶段划定的范围，利用立体测图系统对点状地物、小型地物、密集地物进行要素采集。作业中需通过视差微调确保点位平面精度，同时记录地物属性(如房屋结构、电杆材质)，并对采集成果进行即时自检，避免漏测或重复测绘。

3) 调用测区三维立体模型，重点提取线面状地物、大型地物的边界与轮廓，并通过模型插值

获取高程要素。同步采集建筑物立面信息，对于模型中存在的轻微噪声，采用平滑处理工具进行修正，确保线面连续性。

4) 针对三维立体模型易受遮挡或分辨率限制的区域(如茂密植被覆盖区、陡峭坡坎)，再次启用立体像对进行补充测绘，重点核查并补测遗漏要素：包括植被边界、坡坎、沟渠、电力线等。补测过程中需与已有成果进行坐标比对，确保数据一致性。

5) 将上述3)、4)阶段采集数据进行融合拼接，通过同名点(如道路交叉口、地物拐角)校准消除系统偏差。随后开展内业调绘、外业补测，并进行成果整饰，最终形成符合精度标准的数字化地形图。

2.5 方案比较

对某一代性的测区分别以3种方法进行测

图比较,即立体像对测图法、三维立体模型测图法与本文融合测图法,按 GB/T 20257.1—2017《国家基本比例尺地图图式 第 1 部分:1:500 1:1 000 1:2 000 地形图图式》^[10]中相应比例尺地形图绘制要求进行数字化成图以保证相同质量约束标准。

最终成果分别统计绘制工时、调绘工点、预估调绘时间与预估整饰时间(工时均按 8 h/d 计算),其中调绘工时可依据现场情况进行预估。最终以本文融合测图法和 2 种传统方法的总作业工时对比来评估 3 种作业方式的作业效率。

现场通过 GNSS-RTK 与全站仪测量的方法对地形地物平面与高程特征点进行实际采集,以采集点的残差计算检查地物类型下的点位与高程中误差,该指标作为本方案精度评估的标准。

GNSS-RTK 与全站仪测量通常精度高于航空摄影测量,因此检测点可作为高精度检测,不同地物中误差检测公式见式(2)、式(3)。

$$m_h = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_h^2}{n}} \quad (2)$$

$$m_d = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_x^2 + \Delta_y^2)}{n}} \quad (3)$$

式中: m_h 为高程检测中误差; m_d 为平面检测中误差; Δ_h 为特征点与检测点高程残差; Δ_x 、 Δ_y 分别为特征点与检测点平面 X 、 Y 方向残差; n 为检测点个数。

该融合测图方法以“方法互补性”理论为核心逻辑,精准把握立体像对测图与三维立体模型测图的技术特性差异,基于“方法互补性”理论,对地物科学分类解决了水运工程地形图要素采集中地形复杂、地物要素繁多区域的采集难题,破解了传统单一测图方法中精度与作业效率的矛盾。

3 应用实例及效果

3.1 项目简介

本项目位于广东省韶关市,需要对北江某段航道扩能升级工程进行 1:500 地形图测量,其中陆域部分面积约 3.7 km²。测区范围内涵盖居民地、护岸、田地、林地、滩涂、现有船闸等,地物地貌特征较全面,具有代表性,适合本文不同测图方法在同一测量内容下的对比。

3.2 应用过程

本项目外业数据均采用大疆 M350 无人机航摄影系统搭载 P1 相机采集外业影像数据,依据现场采集像控点进行空中三角加密,在相同空中三角

测量成果下分别建立立体像对测图工程与三维模型测图工程。选取了地形图特征较具代表性的七星墩船闸附近约 1.4 km² 作为试验对比区。分别对该区域采用 3 种测图方法:立体像对测图法、三维立体模型测图法与本文融合测图法,按 GB/T 20257.1—2017《国家基本比例尺地图图式 第 1 部分:1:500 1:1 000 1:2 000 地形图图式》^[10]中 1:500 地形图绘制要求进行数字化成图以保证相同质量约束标准。其中立体像对测图采用 Photoscan3.7 进行空中三角测量计算,采用 MapMatrix 5.0 进行构建绘制,三维模型测图采用 ContextCapture 5.0 进行模型生产,采用南方 CASS10.1 绘图软件进行绘制,最终试验结果如表 4—表 6 所示。

表 4 七星墩船闸 1:500 地形图作业工时统计表

Table 4 Work time statistics table for 1:500 topographic map of Qixingdun ship lock

绘制方法	绘制 工时/d	调绘 工点/处	预估调绘 工时/d	整饰 时间/d	合计/ d
立体像对测图法	8	35	2	1	11
三维立体模型测图法	4	94	4	2	10
本文融合测图法	5	21	1.5	0.5	7

注:结合测区交通、地貌条件与工作经验,以 18~23 处工点/d 预估调绘工时。

表 5 七星墩船闸 1:500 地形图平面精度评定

Table 5 Horizontal accuracy assessment table for 1:500 topographic map of Qixingdun ship lock

项目	检查 点数	点位中误差/m			限差/ m
		立体像对 测图法	三维立体模 型测图法	本文融合 测图法	
房角(I类)	26	0.076	0.103	0.074	±0.15
交通标志(I类)	14	0.061	0.076	0.059	±0.15
其他特征地物	18	0.083	0.092	0.068	±0.15
合计	58	0.073	0.090	0.067	±0.15

表 6 七星墩船闸 1:500 地形图高程精度评定

Table 6 Vertical accuracy assessment table for 1:500 topographic map of Qixingdun ship lock

项目	检查 点数	高程中误差/m			限差/ m
		立体像对 测图法	三维立体模 型测图法	本文融合 测图法	
硬化路面(II类)	32	0.088	0.056	0.054	±0.166
旱地(II类)	16	0.073	0.067	0.071	±0.166
草地(III类)	22	0.062	0.099	0.051	±0.166
林地(III类)	28	0.097	0.124	0.098	±0.166
其他	36	0.082	0.069	0.067	±0.166
合计	134	0.080	0.083	0.068	±0.166

3.3 成果分析

立体像对测图法内业绘制完成覆盖率很高,外业调绘补充测量较少,但绘图工时较长,且对绘图设备和绘图人员的专业能力要求较高,总工期为11 d;三维立体模型测图法内业效率很高,但存在绘制盲区较多,后期外业调绘补充测量与整饰工作量较大,总工期为10 d;本文融合测图法结合了2种方法的优点,内业绘制工时远远小于立体像对测图法且仅高于三维立体模型测图法,外业工作时间被大大缩减,总工期为7 d。相较于2种方法,融合测图法效率提高了约30%~36%。

本次精度检查共检测平面检测点58个,高程检测点134个,尽量覆盖了不同地形地貌特点的平面与高程特征点。立体像对测图法、三维立体模型测图法和本文融合测图法点位中误差分别为0.073 m、0.090 m、0.067 m;高程中误差分别为0.080 m、0.083 m、0.068 m。其中平面精度立体测图在I类地物(房屋、墩台、塔等构筑物)方面,高程精度在III类地物(草地与林地等地貌特征)方面,凭借其立体效果明显的特点占据一定优势;而三维立体模型测图法由于其高程注记较少受人员操作与经验判断影像,在II类地物如硬化路面与旱地等裸露地面都有较高的精度。相较于2种方法,本文融合测图法在精度方面基本吸取了2种测图方法应对不同地形地貌的特征点优势,虽然没有在某一种地形与地物方面有明显提升,但是从地形图整体精度方面仍有5%~15%小幅度提升。

4 结语

本文通过对传统无人机大比例尺数字化航测成图方法的理论与实践分析,依据立体像对测图法与三维立体模型测图法结合现场地形地貌条件,提出了一种融合测图方法,适用于复杂地形要素的大比例尺测图,并通过实际项目案例进行试验对比分析,表明该方法能够有效提高复杂地形地貌与地物要素综合性大比例地形图的效率,同时小幅度提升地形图平面与高程精度。

参考文献:

- [1] 李海祥. 利用SSK全数字摄影测量系统进行立体测图[J]. 测绘科学, 2008(增刊2): 66-67, 13.
- [2] Li H Y. The SSK digital photogrammetry system for stereoscopic

mapping[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008(S2): 66-67, 13.

- [2] 杜洪涛,郭敏,魏国芳,等. 基于无人机倾斜摄影技术的大比例尺地形图测绘方法[J]. 城市勘测, 2018(6): 63-66, 81.
- [3] Du H T, Guo M, Wei G F, et al. A novel large scale urban map updating method based on unmanned aerial vehicle (UAV) oblique photogrammetric technology[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(6): 63-66, 81.
- [3] 赵喜春. 倾斜摄影测量技术在地籍测绘领域应用探讨[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(6): 172-174.
- [4] Zhao X C. Discussion on the application of tilt photogrammetry technology in cadastral surveying and mapping[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(6): 172-174.
- [4] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [5] Zhang Z X, Zhang J Q. Digital photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.
- [5] 郑泽鹏. 基于ContextCapture的无人机实景三维建模与修模[J]. 地矿测绘, 2019, 35(2): 39-41.
- [6] Zheng Z P. 3D modeling and modification of UAV scene based on context capture[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2019, 35(2): 39-41.
- [6] 温天勇,刘宏伟. 基于DEM及DOM构建三维实景地形图[J]. 数字技术与应用, 2014(6): 123-124.
- [7] Wen T Y, Liu H W. Constructing 3D realistic topographic maps based on DEM and DOM[J]. Digital Technology and Application, 2014(6): 123-124.
- [7] 李伟. 机载激光雷达辅助地形图绘制的应用实践[J]. 测绘通报, 2019(增刊2): 130-133.
- [8] Li W. Application practice of airborne LiDAR aided topographic map drawing[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(S2): 130-133.
- [8] 蓝万灵. 现阶段数字化测绘技术在工程测量中的应用探讨[J]. 科技创新与应用, 2017(36): 134, 136.
- [9] Lan W L. Exploration on the application of digital surveying technology in engineering surveying at the current stage[J]. Technology Innovation and Application, 2017(36): 134, 136.
- [9] 孙晓静,王春来,赵蕊. 无人机航摄系统测绘1:1 000大比例尺地形图精度分析[J]. 中国科技信息, 2016(20): 43-44.
- [10] Sun X J, Wang C L, Zhao R. Accuracy analysis of 1:1 000 large-scale topographic map mapping using unmanned aerial vehicle aerial photography system[J]. China Science and Technology Information, 2016(20): 43-44.
- [10] GB/T 20257.1—2017 国家基本比例尺地图图式 第1部分: 1:500、1:1 000、1:2 000地形图图式[S].
- [10] GB/T 20257.1—2017 Cartographic symbols for national fundamental scale maps—Part 1: Specifications for cartographic symbols 1:500 1:1 000 & 1:2 000 topographic maps[S].