

无人机航测成图在水利水电工程中的应用

李德伟

湖南省水利水电勘测设计研究总院 湖南 410007

【摘要】自“863 规划”以来，先进的航空摄影测量技术在测量领域得到了广泛的运用，无人飞机航摄系统软件、硬件技术难点不断突破，已达到民用阶段。莽山水库库区、涪天河水库扩建等工程的测绘利用了无人机摄影成图技术。以这三个工程为背景，以 MapMatrix 及 VirtuoZo 数字摄影测量系统制作地形图及正射影像图为研究对象，详细分析地形图及正射影像图的制作流程和方法，可用于指导生产实践，为设计人员提供更为详细和科学的基础资料，并与传统测量进行了对比分析。

【关键词】无人机；数字航空摄影测量；MapMatrix；VirtuoZo；PATB；水电工程

[Abstract] since the "863 Plan" since, aerial photography, advanced measurement technique has been widely used in the field of measurement, unmanned aircraft aerial system software, hardware technology constantly breakthroughs, has reached the stage of civil. Surveying and mapping, Mangshan reservoir in centianhe reservoir immigration highway, Shaanxi highway hydropower station project by the UAV photography mapping technology. In the three project as the background, using MapMatrix and VirtuoZo digital photogrammetric system topographic map and digital orthophoto map as the research object, method and flow of a detailed analysis of topographic map and orthophoto map, which can be used to guide the production practice, designed to provide more basic data for detailed and scientific, and compared with traditional measurement. [keyword] UAV; digital photogrammetry; MapMatrix; VirtuoZo; PATB; hydropower project

中图分类号：TV221

文献标识码：A

1. 概述

无人驾驶飞机简称“无人机”，它的历史可以追溯到 1914 年第一次世界大战时代。1927 年 A. M. 洛教授“喉”式单翼无人机的研制成功，划时代的使战役进入了非接触性的时代。无人机现已由只用于军事方面转向民用和多任务发展。与有人驾驶飞机比较，无人机有体积小、携带方便、运用地域广泛、可执行恶劣

环境工作等长处。并正朝着高可靠性、多种复杂任务完成能力、多种载荷、人工智能方向发展，在防汛抗旱、应急救援等领域也得到广泛应用。

目前，从水利水电工程测量工作看来，我们深感水利水电工程设计初期测量工作的困难。由于技术发展的限制，现阶段的常规测图工作还只停留在采用全站仪或者是 GPS RTK 实地测量绘制阶段，在新时期这两种较为落后的测绘方式不但需要很高的测绘技术和技能甚至还依赖非电子型平板仪的绘图基础，对测绘人员的要求就会比较高，而培育出一个合格的测图绘图员的周期也就自然十分长。另一方面，由于地形复杂，对于测绘人员需要更多的经验的积累、较好的体能，随着年龄的增长，即使积累的丰富的测绘经验，也会因体力、精力不济而无法加入现场测量工作。

无人机航测成图以当前先进的无人机遥感技术和卫星导航定位技术为核心，将遥感技术、卫星导航定位、地理信息、计算机、自动化控制、通讯、先进的数据处理等技术进行集成应用，形成一套基于无人机遥感技术的航测系统，为各部门的工作提供实时、清晰直观、准确可靠的遥感信息及测量数据，可有效地提高测绘工作的时效性、针对性、准确性和科学性，保障计划任务的完成。无人机航测成图项目的实施，将使水利行业测绘技术得到快速发展，极大提高劳动生产率，使勘测进度不再是影响水利工程进度的瓶颈，给我省的水利现代化建设注入新的活力。

2. 野外测量实验

我们选择了涔天河水库扩建工程、莽山水库工程二个工程作为航测试验，取得了预期的效果。

涔天河水库扩建工程是以灌溉、防洪为主，结合下游河道补水和发电，兼顾航运等综合利用的大型水利水电枢纽工程，是我省重点工程，总投资超过百亿。水库正常蓄水位 313.0m，总库容 15.1 亿 m^3 ，灌溉面积 112.31 万亩，灌溉江华、江永、道县、宁远四县，分左右灌区，其中左灌区 55.60 万亩，右灌区 56.71 万亩。

莽山水库工程位于北江二级支流长乐水的上游，宜章县所辖的东风乡、莽山乡境内，为湖南省重点工程，是以防洪、灌溉为主，兼顾供水和发电的等综合效益的大 II 型水利水电工程，坝址位于东风乡菜子冲的下燕，距宜章县城 72Km。

坝址控制流域面积 230 平方公里，水库正常蓄水位为 395m，总库容 1.431，最大坝高 97.6m。

水电工程一般大多建设于高山峡谷区，水利水电工程测量具有其特殊性，像这二个工程，测区植被厚，测量条件艰苦，任务紧，工作量大，如果用传统的全站仪或 RTK 测量难度都比较大。各测区相对高差较大，如莽山库区最低高程为 210m，最大高程为 650m，相对高差超过 400m，平均高程约为 410m；涔天河水库移民公路测区最低高程是 200m，最大高程 700m，相对高差约 500m。根据航高、比例尺、焦距关系公式，各区域摄影比例尺相差较大，将直接影响摄影质量及航片成图精度。在普通的飞行设计中飞行高度一般选用测区最大高程增加 800m 作为基本航高，以保证飞行安全性，同时再根据测区平均高程、摄影比例尺等因素做适当调整来确定实际飞行高度，但对于水电测绘而言，这种确定飞行高度的方法并不适用，这是由于建于高山峡谷区的电站工程，实际用图重点一般在河道两侧靠近峡谷底部范围，为此技术设计要保证峡谷底部实际摄影精度为主，由于操作不方便，航线折点太多，航线设计难度大，而且飞行安全不易掌握，实际操作过程中将重点部位单独设计飞行区域实现困难，航高一般按照正常蓄水位和河床平均高度统一设计。

莽山水库、涔天河水库测区都属于山区，测量范围内除了水面及少量耕地外都是原始次森林，植被覆盖率在 90%以上，植被较厚，不过主要都是落叶林，安排在春天发芽之前航拍，摄影效果较好。涔天河水库库区航飞面积为 150km²，另外还有 5 个区域的典型田间工程，由于测区分散又不规则，分 10 个架次进行航拍，每个架次的航带根据分段范围确定；莽山库区测量范围也比较大更加分散，包括大坝及库区、田间工程、左右干渠、供水线路主线及支线等区域，航拍面积为 200 多 km²，分为几次进场航拍，10 多个架次。

下图为莽山水库库区航带图。航线沿河道大致方向布设，飞机离地飞行高度约为 700m。地面平均高程莽山库区为 400m 左右，涔天河水库移民公路为 360m 左右，黄家湾电站高程约 580m。航拍时选择晴天、无云、无风或微风天气，保证无人机的姿态稳定、航拍相片的清晰度，使获得的相片各参数满足航测要求。

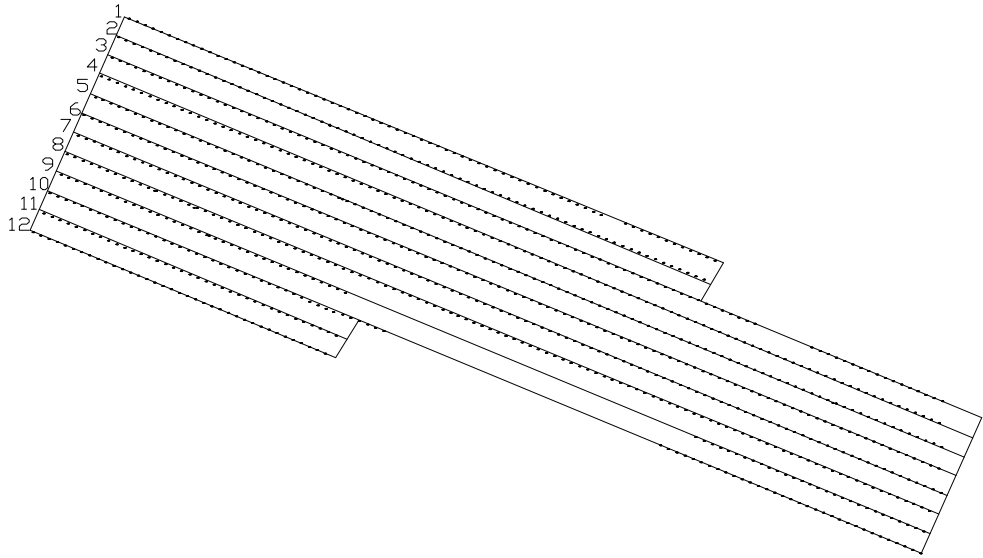


图 1 莽山水库库区航带图

2.1 航空摄影测量

航拍使用“低空数字测绘航空摄影系统”，对相机的姿态控制使用了姿态感应控制云台，云台对相机倾斜角的纠正角速率达到了 $15^{\circ}/s$ ，可以实现对相机倾斜角的实时改正，故航片倾斜角全部被纠正为零。航片旋偏角一般小于 6° ，最大不超过 8° ，航线弯曲不大于 3%。

在几十个飞行架次中，绝大多数架次航空摄影获得的影像较清晰、层次丰富、反差适中、彩色色调柔和鲜艳、均匀，相同地物的色彩基本一致。太阳高度角的选择保证了阴影不大于 2 倍。机组工作人员对天气条件把握较严，风力大于 3 级时，不进行飞行作业，姿态感应控制云台实时对相机进行高速纠正。由于航摄期间适宜飞行作业时间较少，每次飞行结束后即对获得航片的完整性、清晰度、旋偏角等进行了检查，使航片航向重叠不低于 65%，旁向重叠不低于 35%，满足规范要求，航片的旋偏角符合规范要求，整个测区没有出现相对漏洞和绝对漏洞，部分架次因为季节性天气原因，影像质量较差，经重飞后摄影质量满足规范及设计要求。

2.2 外业像控点布设方案及测量

像片控制点测量采用区域网布设方案，在照片拍摄之前进行实地布标和航拍后明显地物点相片刺点的方法。像控点分为平面控制点、高程控制点和平高点。根据各项目具体特点，涪天河水库和莽山水库库区所有像控点皆为平高点，像控点一般布设在沿河道的两旁公路边或地面较平坦处，由于涉及到淹没的问题，所

以在较平坦的耕地集中处布置较多像控点；田间工程等区域平均布点。莽山库区面积相对较小，共布设 40 个像控点，下图红色点即为像控点位（坝址区下游已测图，故未布设像控点）。

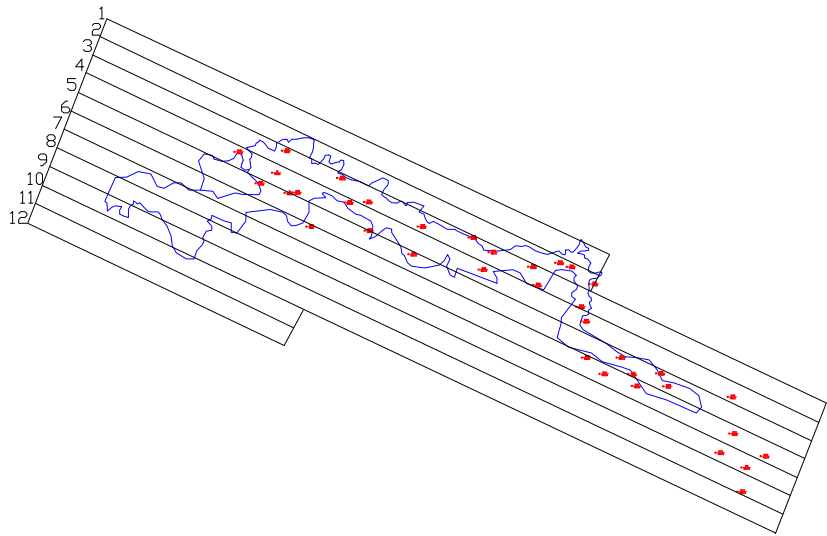


图 2 莽山库区像控点布置图

像控点布点原则按照相关规范进行。

2.3 像控点施测

像控点的精度要求不低于图根点精度，测量方法有很多种，如三角测量、导线测量、RTK 测量、GPS 静态测量等，本试验主要采用的方法是导线测量和 GPS RTK 测量，期间曾试用 CORS 网络 RTK 作业，但由于所处区域网络不稳定，所以最后采用 RTK 测量。黄家湾测区像控点测量采用全站仪导线测量。

3. 空中三角测量

空中三角测量（简称“空三”），是航空摄影测量中的重要部分，经过“空三”对影像进行纠正和数字高程输入才能提供正确的立体测图相片。“空三”的最主要的成果是相片的定向点大地坐标和相片外方位元素。

空中三角加密测量主要试用了 DATMatrix 和 ApplicationsMaster 5.3，两者都是比较优秀的国产软件。根据测区的航摄分区实际情况，按架次将整个测区划分加密区。通过空三加密过程，对于内业检核无误的外业像控成果，直接使用外业测量数据提供下道工序使用。空中三角测量作业流程如下几个步骤：创建工程→自动转点→交互编辑→PATBB 平差→输出加密点成果。

3.1 创建工程

在所有影像资料、相机参数及像控点准备好的情况下建立新工程，设置好测区参数、相机参数、加密点文件等；其次按航带号导入影像（可以是最原始的数字影像文件）设置好像片的像素，导入完影像后进行数码影像内定向自动处理。

3.2 自动转点

打开 DATMatrix 自动转点模块，导入刚建立的工程，设置好各项参数后就可以全自动转点操作，直到转点完成。图 3 为自动转点后生成的部分连接点图。

3.3 交互编辑与平差

虽然自动转点后生成了很多连接点，但不能完全满足平差要求，需要进行手工交互编辑。交互编辑也是整个“空三”人工工作量最大、耗费时间最多的地方，主要包括如下工作：

A、在标准点位增加连接点；B、量测控制点；C、编辑像点网；D、调用 PATB 平差程序进行平差计算；E、删除或编辑粗差像点；F、重复 D 和 E 直至满足加密要求。

在几个参考工程的空三加密过程中，我们根据测区的航摄分区实际情况，将整个测区进行分区解算。通过空三加密过程，对于内业检核无误的外业像控成果，直接使用外业测量数据提供下道工序使用。

从莽山几个架次的加密精度来看，加密后控制点与实测控制点位相对中误差： $m_x = \pm 0.267$ ， $m_y = \pm 0.21$ ， $m_z = \pm 0.272$ 。精度满足相关规范要求。

4. 立体测图与 DEM、DOM 生成

4.1 立体测图

立体测图采用 MapMatrix 和 VirtuoZo 全数字摄影测量工作站完成。这 2 种测量系统自动化程度都比较高，具有数据管理、自动定向计算、实时核线影像匹配处理，具有自动化程度相对较高的 4D 产品生产功能，处理速度快，缩短了作业时间，减少了操作员的工作量，提高了数据精度和工作效率，操作也各有特点。同时，系统也提供全自动，半自动和完全手工操作等人机交互的友好界面方式，可以充分发挥作业员的经验优势来处理复杂地形区域的影像。

在全数字摄影测量工作站上进行内业数据采集，像对定向元素直接由加密成果导入测图工作站，利用已有的加密资料，恢复测区，每个模型在自动相对定向

下重新相对定向，然后生成核线。数据采集以成图的模型为单位进行，每一幅图存放一个文件，文件名与图幅编号一致，扩展名为 xyz，然后经转换程序直接转换成 cass 数据。

立体测图的主要成果是带属性的线划图（DLG）。地物立体测绘的作业原则是内业定位，外业定性。

外业测量像控点时对重要的、对设计工作影响比较大的区域或者淹没实物指标比较多的区域尽量采集多些碎部点，用以检测航测成果，提高作业精度。

外业调绘主要是检查原图上表示的各种地物、地貌的准确性、完整性及合理性，对原图上漏表示、内业无法表示的各种地物、地貌或新增地物和影像不清的地方、内业漏测的电杆等采用全站仪进行补测。

4.2 DEM 和 DOM 的生产

DEM 生成常用的有两种方法，一种是利用 MapMatrix 所带的“匹配生成 DEM”模块，另一种是利用采集完成的线划图（DLG）生成 DEM。第一种方法可以在做好“空三”以后直接进行，优点是全自动，中间不用进行操作，缺点是运行时间长，需要一台单独的电脑日夜连续运行；第二种方法的优点是精度高，运行时间很短，缺点是必需要等线划图数据采集完成后才能生产。图 3 为生成的部分三维 DEM 模型。

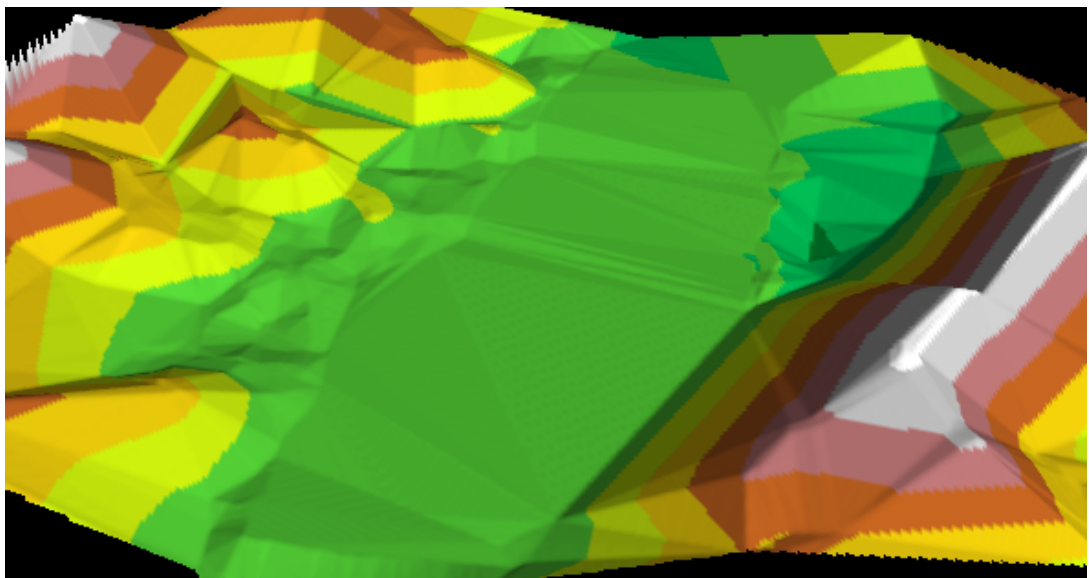


图 3 部分三维 DEM 模型

DOM（数字正射影像）的生产主要包括影像纠正、色彩调整、影像镶嵌、图幅裁切等工作，MapMatrix 提供的 EPT 模块中可利用已做好的参考影像把所有像片色彩调整好，另外影像镶嵌、图幅裁切等工作可以一次性全自动完成。

4.3 DEM 与 DOM 的套合

另一方面 DEM 与 DOM 也可以进行叠加，生成非常直观的三维现势性图，立体感更强，下图为生成的 DEM 与 DOM 的叠加生成的三维立体景观图，从图上看非常直观。



图 4 生成的 DEM 与 DOM 的叠加图（涿天河库区）

4.4 DLG 与 DOM 的套合

在数字线划图（DLG）与正射影像（DOM）生产完成后，由于两者都是带坐标的，在解决好图层对应、属性兼容等问题后，即可直接在 GIS 软件中把两者导入进行叠加，考虑到我们单位的设计工作大部分是在工程 CAD 的环境下进行，为了便于设计人员的工作，我们进行了改进，主要是在 CAD 环境下修改了导入的 DOM 图形的比例、坐标等与线划图（DLG 在 CAD 和 GIS 环境中的坐标与属性完全一致，不需要进行任何修改）完全一致问题，也可以自己编制小工具挂接在 CAD 环境下直接导入带坐标的 DOM 文件。下图就是 CAD 环境下 DOM 与 DLG 的叠加图。有了这种叠加图以后设计人员能更加方便直观地进行设计与修改工作，哪里是路，哪里是沟、田、土等更是一目了然，提高设计人员的实用性和便利性。

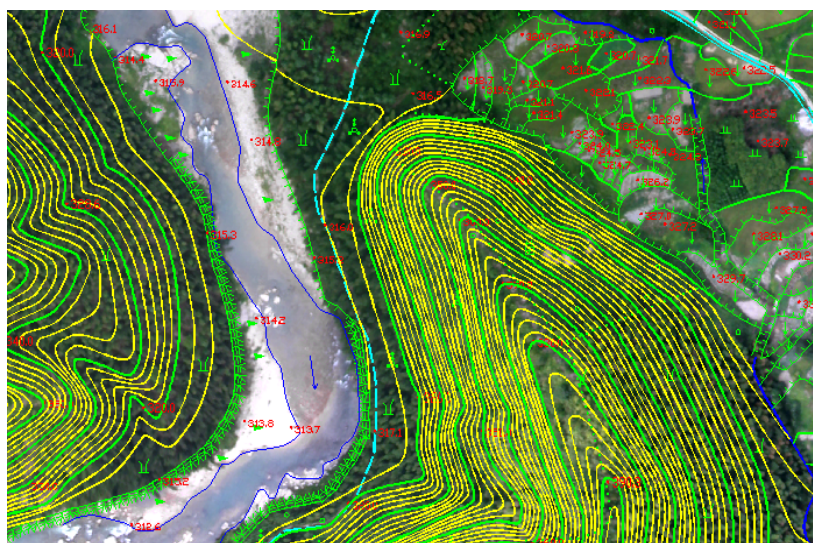
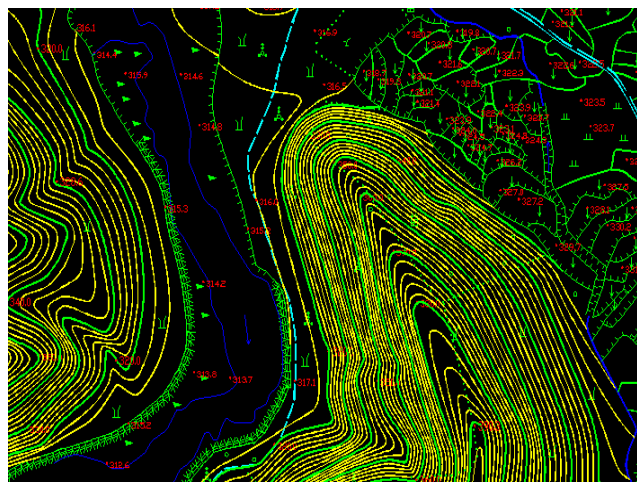


图 5CAD 环境下 DOM 与 DLG 的叠加图

5. 无人机测量在水利水电工程中应注意的问题

无人机航空测量有其优点，同时也有其缺点。受机舱体积和载重量限制目前无人机还无法搭载“相机稳定平衡系统（俗称云台）”，POS 数据记录的是飞机姿态而非相机姿态，相机的固定一般仅限于镜头固定在特殊装置上，相机的减震平衡用普通海绵围绕成简易减速震系统。与大航空复杂的装置无法比较，是目前无人机质量摄影不稳定，可靠性差的主要原因，所以航拍时间一定要选择晴朗、无云、能见度良好、无风或风小的天气下进行，并且根据工程具体要求和地形，计算好行高，制定周密的航拍计划，以便获得清晰的影像。

像控点的测量精度及布设直接影响到空中三角测量精度，我们这二个工程的像控点都采用航拍前做实地标志，且均匀布设在各个测区内，以白色十字为主，这样保证了像控点目标清晰易判，提高精度，但缺点是费工时、成本高，但也取

得了丰富的外业像控测量经验，在今后的工作中要与像片刺点相结合使用，这样即能提高精度又能降低成本，提高了效益。像控点平面坐标和高程施测方法与普通工程测量中一致，遵循“从整体到局部，先控制后碎部的原则。二个工程中都采用了 GPS 网、全站仪导线测量等传统方法进行施测，并对所有像控点做好点之记。开始时，作业员对刺点要求没理解透彻，按平时点之记绘草图，结果航拍后有少数点不能确定正确位置，取得经验后，在后来的像控测量中都能精确的刺点并进行详细位置描述。

空中三角测量中要注意已知点的选取，原则上所有满足精度的像控点都参与进来。空中三角测量具体工作是一项复杂过程，需要反复进行，以取得最好的解算结果。空中三角测量完成后就可进行像片解译工作，在解译工作中我们要注意以下几个问题：

(1) 立体建模应注意的问题：如果影像重叠度过大（ $\geq 90\%$ ），那么建模时就要进行抽稀处理。由立体模型测图原理可以知道：建模的两张像片的像主点间的正方形内精度最高，如果模型的重叠度过高，两像主点之间的距离减小，为了保证精度（曾试验不以像主点间的空间为测量范围，相邻两个模型的接边误差明显变大，且超限）就会出现频繁切换模型现象，降低工作效率，见图 6：

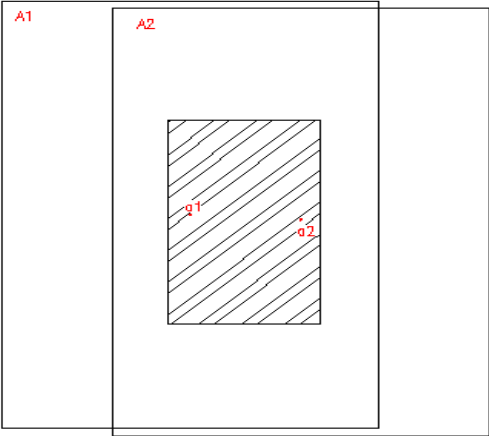


图 6 立体测图模型（阴影部分为测量精度最高区域）

(2) 地貌测绘中高程点的点位选取，一般要选在明显地物点和地形点上，如：山头、鞍部、洼地、地形变换处等。山头应选在最高处，鞍部点选在最低处，对于个别矛盾的地物点要尽量避开（如突出的石头等）。绘制等高线时要先绘计曲线，然后再绘制首曲线，对于复杂地形应根据需要先绘出山脊线、山谷线以控制山形使曲线不发生扭偏。

（3）由于受三维立体测图的硬件和软件及外界条件的影响，最后生成的线划图精度（主要是高程精度），现阶段还不能完全满足移民专业有关淹没调查的要求，所以在淹没线附近需利用传统测量方法（全站仪及 GPS 测量）进行配合补充测量。

（4）外业调绘。受内业成图的局限性，需要进行外业调绘和补测。针对水利水电工程的特殊性，外业调绘的主要工作包括：地理名称的调查和注记，管线、垣栅的调绘，单独的居民地的层数、结构的调绘，内业不能确定的植被类别、范围等的调绘。只有经过了外业调绘的成果才能进入下一道工序。

7. 无人机航测成图与传统测量成图比较

无人机航空测量技术在这三个工程中得到了成功应用，开创了我省将全数字 RS（遥感）测量技术应用于水利水电工程的先河。我院在八十年代末九十年代初在模拟航测方面还是比较先进的，并且配置了当时比较先进的 B8S 航测成图设备，但从九十年代中期以后，在航测方面投入就很少了，也没有航测应用了，直到 2008 年测绘处再次成立信息中心，先后完成了四个县市 1:10000 的遥感影像解译和建库工作，为这次无人机航测打好了坚实的基础，本次测量从埋设像控点、航带的确定到所有内业数据采集、DEM 与 DOM 的生成都由本部门技术人员完成，但由于资金有限，没有自己的无人飞机，航空摄影测量只能委托外单位承担，我们只能派员参与，为今后本单位开展无人机摄影测量打下一定的基础。其次，无人飞机航空测量极大地提高了生产效率节约了外业成本，下面以涪天河水库移民公路测量及莽山水库库区测量为例进行详细比较。

涪天河水库扩建工程中，移民公路总长 117.546km，测量宽度为一百五十米的带状地形图。测量基本划分 3 个工序：1、控制测量；2、地形测绘；3、内业整理。

具体比较情况（控制测量未作比较）见下表 2：

表 2 涪天河库区移民公路测量成本分析表

方法	外业时间	外业成本	内业时间	内业成本	总成本	费用节约率
1. 传统测量	592 工作日	266400 元	120 工作日	18000 元	284400 元	63%
2. 无人机航测	20 工作日	7000 元+80000 元	120 工作日	18000 元	115000 元	时间节约率
两者比较	2 更优	2 更优	相等	相等	2 更优	60%

再以莽山库区测量为例，莽山库区测量面积为 6.5km^2 ，传统外业测量每个测量小组每天平均只有 0.08km^2 ，四人两个测量小组需要不少于四十天的测图工作量；无人飞机测量外业四人一天即可完成，内业测图每人每天 0.4km^2 ，四人 5 天即可完全成；也同样来计算成本效益：1. 全站仪外业测量，四人食宿 400 元/人/天，车辆使用 600 元/天，人工费 800 元/天，40 天外业期所需费用为 120000 元，无人飞机一天外业费用为四人食宿 400 元/人，车辆使用 600 元，共需 2200 元（委外则为 50000 元），航拍委外有个最低起步价格，所以面积越小，分摊成本约高越不经济），外业减少成本 117800 元（委外则为 70000 元）。内业成本以 150 元/人/天计算，具体情况见下表 3：

表 3 莽山库区测量成本计算

方法	外业时间	外业成本	内业时间	内业成本	总成本	费用节约率
1. 传统测量	160 工作日	120000 元	40 工作日	6000 元	126000 元	64%
2. 无人机航测	4 工作日	2200 元+30000 元	80 工作日	12000 元	44200 元	时间节约率
两者比较	2 更优	2 更优	1 更优	1 更优	2 更优	48%

8. 结论

显然不管是工作效率还是经济效益无人飞机测量都远远优于传统全站仪测量，需要说明的是时间节约率考虑了调绘和补测的时间，没有考虑气候原因等候航拍的时间延误；另外，成本比较的 2 个项目的航拍是捆绑在一起总承包，所以分摊成本较低，如果单独对所进行比较的区域进行航空摄影测量，航拍成本将会增加 50%左右，但是相对于全站仪器测量方法，还是极大的节约了测绘成本，项目越大，效益越明显。在科学技术高速发展和广泛应用的今天，工作效率就是保住企业生命力的保证。当然无人飞机也存在一些不足之处，比如无人机的精度是低空摄影测量的主要问题，由于无人机份量轻的受风力影响比较大，拍摄的品质也成为了重中之重，解决办法是在优良的天气情况下进行航拍，同时适当增加像控点。其次无人机采集的高程精度暂时还不能作为库区淹没调查的全部依据，解决办法有两种，一种是采用传统方法在淹没线附近，补测外业高程点；另一种是开发新技术，提高采集高程点的精度。其中以刘先林院士为首的北京四维空间数码科技有限公司已在这方面突破了关键的技术难题，估计不久的将来就能应用于生产中。另外需要前期投入资金用于购买无人飞机（含量测相机、导航和监控系统）。

统等测量设备一套)、空三解算软件、内业采集测图软件以及高性能的测图工作站等。

参考文献:

1. 武汉远景公司. MapMatrix 多源空间信息综合处理平台用户手册[M]. 2011
2. 适普公司. 自动空中三角测量软件 VirtuoZo 使用手册. 2002
3. 韩志晟. 浅谈无人机低空摄影测量在南水北调工程中的应用[J]. 数字通信世界, 2011 (2)
4. 韩玲, 李斌, 顾俊凯, 等. 航空与航天摄影技术[M]. 湖北: 武汉大学出版社, 2008
5. 张永, 何宝根, 王小刚. 无人机在江西永泰航电枢纽工程测量中的应用. 测绘时空. 2012 (2)
6. 孙红菊. 航空摄影测量数字化测图采集方法探析(J). 测绘地名学. 2008

无人机航测成图在水利水电工程中的应用

作者: [李德伟](#)
作者单位: [湖南省水利水电勘测设计研究总院](#)
刊名: [城市建设理论研究（电子版）](#)
英文刊名: [ChengShi Jianshe LiLun Yan Jiu](#)
年，卷(期): 2013(16)
被引用次数: 2次

引用本文格式: [李德伟](#) [无人机航测成图在水利水电工程中的应用](#)[期刊论文]-[城市建设理论研究（电子版）](#) 2013(16)