



中华人民共和国测绘地理信息计量检定规程

JJG(测绘) 3401—2016

数 字 航 摄 仪

Digital Aerial Camera

2016-05-17 发布

2016-05-20 实施

国家测绘地理信息局 发布

数字航摄仪检定规程

Regulation of Verification on

Digital Aerial Camera

JJG(测绘) 3401—2016
代替 JJG(测绘) 3401—2013

归口单位：国家测绘地理信息局

主要起草单位：国家光电测距仪检测中心

参加起草单位：北京四维远见信息技术有限公司

北京测科空间信息技术有限公司

本规程主要起草人：

方爱平（国家光电测距仪检测中心）

齐维君（国家光电测距仪检测中心）

左建章（北京四维远见信息技术有限公司）

袁 枫（国家光电测距仪检测中心）

参加起草人：

刘宗杰（北京四维远见信息技术有限公司）

苏国中（北京测科空间信息技术有限公司）

张 锐（国家光电测距仪检测中心）

于秀娟（国家光电测距仪检测中心）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
4 概述	(2)
5 计量性能要求	(2)
6 通用技术要求	(3)
7 计量器具控制	(3)
附录 A 实验室径向畸变计算公式	(11)
附录 B 地对地检定	(12)
附录 C 检定结果示例	(15)

引 言

本规程按 JJF 1002—2010《国家计量检定规程编写规则》，对 JJG(测绘) 3401—2013《数字航摄仪检定规程》重点做了如下内容的改动：

——对原规程中“术语和计量单位”进行了调整；

——对原规程中“实验室检定”检定项目、主要检定器具进行了调整，对部分检定方法进行了完善；

——对原规程中“空对地检定”检定项目进行了调整，对部分检定方法进行了完善。

本规程的历次版本发布情况为：

CH/T 8021—2010；

JJG(测绘) 3401—2013。

数字航摄仪检定规程

1 范围

本规程适用于数字航摄仪（包括数字相机）的首次检定、后续检定和使用中检查。其中，空对地检定适用于所有类型的数字航摄仪（包括数字相机），实验室检定仅适用于可拆卸的单镜头面阵光电成像器件的数字航摄仪（包括数字相机）。光学航摄仪（包括光学相机）的检定可参照执行。

2 引用文件

本规程引用下列文件：

GB/T 6962 1:500 1:1 000 1:2 000 地形图航空摄影规范

GB/T 7930 1:500 1:1 000 1:2 000 地形图航空摄影测量内业规范

GB/T 7931 1:500 1:1 000 1:2 000 地形图航空摄影测量外业规范

JJG 827 分辨力板

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规程；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

3 术语和计量单位

以下术语和定义适用于本规程。

3.1 光电成像器件 photoelectronic imaging device

利用光电效应将可见或非可见的辐射图像转换或增强为可观察、记录、传输、存储以及可处理的图像的器件系列总称。目前比较成熟的光电成像器件有电荷耦合器件（CCD）和互补金属氧化物半导体（CMOS）两大类。

3.2 实验室检定 laboratory calibration

在满足特定检定环境要求的实验室内，对数字航摄仪进行检定。

3.3 空对地检定 air-to-ground calibration

根据航空摄影测量原理，在具有一定地形起伏的地面检定场内布设控制点和各种形式的标志，用被检定的数字航摄仪对地面检定场进行航空摄影，利用控制点进行摄影测量区域网平差和全野外单像对测图，检定数字航摄仪的摄影测量精度，同时分析其影像质量。

3.4 地对地检定 ground-to-ground calibration

将数字航摄仪搭载在可控导轨上以模拟航空摄影，在设定曝光处拍照获取检定场地面控制点影像，采用摄影测量的空间后方交理解算航摄仪的标定主距、对称主点以及各项畸变参数。

3.5 标定主距 calibrated focal length

根据最适合使用条件的畸变值分布，对等效主距进行数学调整后得到的主距值。

3.6 对称主点 principal point of symmetry; PPS

像场内所有几何影像的径向畸变，无论是由于物镜的像差，还是镜片在加工和安装过程中的缺陷所造成的，都应该尽可能地对称于某点 S。该点就称为对称主点。

3.7 径向畸变 radial distortion

以对称主点为中心，沿辐射方向的畸变，以实际像点与理论像点的距离之差表示。

3.8 光学分辨率 optical resolution

镜头对 1 mm 宽度内所能清晰分辨的线条数，用以表示获取传递或显示图像细节的能力，单位为线对每毫米 (lp/mm)。

3.9 摄影分辨率 photographic resolution

衡量成像系统对黑白相间、宽度相等的线状目标影像分辨的能力，以每毫米内线对数表示，单位为线对每毫米 (lp/mm)。

3.10 动态摄影分辨率 dynamic photographic resolution

数字航摄仪在空中对地面检定场进行摄影后测得的摄影分辨率。也可以图像中靶标的最小可分辨线条宽度的 2 倍所对应的地面距离来表示，单位为米 (m)。

3.11 杂光系数 coefficient of stray light

在规定检定条件下，物镜的焦平面上杂光的光通量与总光通量的比值。

3.12 透过率 transmittance

从物镜输出端接收到的光通量与入射光通量之比。

3.13 地面采样距离 ground sample distance; GSD

一个像素所覆盖的地面长度，即数字成像的地面采样间隔，单位为米 (m)。

4 概述

数字航摄仪是在进行航空影像数据获取时，利用光电成像器件阵列记录影像信息的航空摄影设备。它由光学镜头、光电成像器件和存储器等主要部分构成。按其结构可以分为单镜头数字航摄仪和多镜头数字航摄仪，按光电成像器件的排列形式又可以分为线阵式数字航摄仪和面阵式数字航摄仪。

5 计量性能要求

检定的计量性能要求见表 1。

表 1 检定的计量性能要求

序号	检定类别	检定项目	计量性能要求
1	实验室检定	径向畸变	畸变改正后残差的中误差小于 1/3 像素
2		光学分辨率	大于 100 lp/mm
3		杂光系数	小于 5%
4		透过率	大于 70%
5		信噪比	不小于 35 dB

表 1 (续)

序号	检定类别	检定项目	计量性能要求
6	空对地检定	空中三角测量精度	满足标称最大比例尺航空摄影测量成图所规定的地物点平面位置中误差与高程注记点中误差要求
7		立体像对摄影测量精度	满足标称最大比例尺航空摄影测量成图所规定的地物点平面位置中误差与高程注记点中误差要求
8		动态摄影分辨率 (全色相机)	不大于 2.8 倍地面采样距离
9		线性度	大于 95%
10		信噪比	不小于 30 dB
注：地面采样距离应满足的数学关系为 $L_{GSD} = H\mu/f$ ，其中： L_{GSD} 为地面采样距离，单位为米 (m)； H 为相对航高，单位为米 (m)； f 为相机焦距，单位为毫米 (mm)； μ 为单个像素大小，单位为毫米 (mm)。			

6 通用技术要求

通用技术应满足下列要求：

- 仪器表面不应有碰伤、划痕、脱漆和锈蚀，各部件应接合整齐、密封良好；
- 光学零部件应无水渍、霉斑、灰尘；
- 操作面板上各按键应反应灵敏、功能正常；
- 数据输入输出接口及电源接口应完好；
- 仪器的附件应满足调校及使用的要求；
- 对后续检定和使用中检查的仪器，允许有不影响仪器准确度和技术功能的缺陷。

7 计量器具控制

7.1 检定条件

7.1.1 主要检定器具及技术要求

数字航摄仪检定所用的主要检定器具及技术要求见表 2。

表 2 主要检定器具及技术要求

序号	主要检定器具	技术要求
1	航摄相机检测仪	轴角编码器测角精度优于 2"
2	积分球	在 320~1 080 nm 波长范围内，反射率大于 80%
3	均匀光源	在 380~1 080 nm 波长范围内，出口光斑的均匀性优于 96%
4	分辨力板	符合 JJG 827 的规定

表 2 (续)

序号	主要检定器具	技术要求
5	光照度计	相对示值误差优于 8%
6	空对地检定场	平面位置精度优于 1 cm, 高程精度优于 2 cm

7.1.2 实验室检定环境

7.1.2.1 环境温度控制在 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

7.1.2.2 环境相对湿度满足 30%~75%。

7.1.2.3 环境洁净度满足 100 000 级。

7.1.2.4 工作区无杂散光进入。

7.1.2.5 远离强电场、磁场和震动的影响。

7.1.3 空对地检定条件

7.1.3.1 检定场位置

检定场包括几何检定场和影像质量检定场, 其选址应满足以下条件:

- 空域开阔, 在天气状况良好时能随时起飞进行航空摄影检定飞行;
- 区域上空的大气湍流较小, 并且区域内无危险的垂直障碍物;
- 所在地区晴天日数多、光照条件好;
- 几何检定场的地形应具有一定起伏, 且地物、地貌具有多样性。

7.1.3.2 检定场范围

几何检定场范围按照大比例尺测图设计, 且满足每条航线最少曝光 12 次、不少于 2 条航线的要求。

7.1.3.3 控制点

几何检定场内的控制点布设应分为稀疏区和密集区, 且应满足以下要求:

- 稀疏区控制点应均匀地分布于检定场内, 且单张像幅最少含有 9 个控制点;
- 密集区相邻控制点间距不大于 100 m;
- 控制点平面位置精度优于 1 cm, 高程精度优于 2 cm;
- 控制点尺寸设计应覆盖 6 个像素以上, 且控制点中心颜色应与周围物体有较大的反差。

7.1.3.4 影像质量检定目标

用于影像质量检定的目标在选材上应满足以下要求:

- 应具备耐高低温、耐候性的特点, 适应野外工作环境的要求。
- 在可见光和近红外波段具有较好的光谱平坦性、朗伯性和均匀一致性。
- 西门子星: 由角度为 10° 的黑白扇形拼接而成, 可见光和近红外波段内对比度应在 $1/11 \sim 1/6$ 。

d) 分辨率目标: 分两组铺设, 一组平行于飞行方向, 一组垂直于飞行方向, 每组由若干宽度按约 12% 的公比增减的三线对分辨率单元组成。

e) 灰度比例尺和矩形反射目标: 由一系列经过测定的已知反射系数的反射目标组成, 反射系数应在 5%~80% 内均匀分布。

7.1.3.5 航摄计划与航摄设计

航摄计划与航摄设计参照 GB/T 6962 中相关章节执行。

7.1.3.6 飞行质量和摄影质量

飞行质量和摄影质量参照 GB/T 6962 中相关章节执行。

7.2 检定项目

数字航摄仪的检定项目见表 3。

表 3 数字航摄仪的检定项目

序号	检定类别	检定项目	检定类别		
			首次检定	后续检定	使用中检查
1	实验室检定	径向畸变	+	+	-
2		光学分辨率	+	+	-
3		杂光系数	+	+	-
4		透过率	+	+	-
5		信噪比	+	+	-
6	空对地检定	空中三角测量精度	+	+	+
7		立体像对摄影 测量精度	+	+	+
8		动态摄影分辨率 (全色相机)	+	+	-
9		线性度	+	-	-
10		信噪比	+	-	+

注：检定类别中，“+”为必检项目，“-”为可不检项目。

7.3 检定方法

7.3.1 实验室检定

7.3.1.1 检定前准备

检定前将被检数字航摄仪置于实验室内进行温度平衡，时间不少于 2 h。各检定设备的用电系统接通电源预热 20 min 以上。

7.3.1.2 径向畸变

7.3.1.2.1 主要检定设备是航摄相机检测仪。

7.3.1.2.2 检定步骤如下：

a) 将被检数字航摄仪安装在航摄相机检测仪上，调整被检数字航摄仪的位置，使其入瞳落在畸变测量仪转臂的旋转轴上；

b) 打开点光源，将被检数字航摄仪对平行光管和点光源形成的无穷远点目标成像，保证覆盖 2×2 个像素以上，便于细分测量；

c) 精确调整被检数字航摄仪的位置，使得转臂在从一端旋转到另一端的过程中，

无穷远点目标成像在被检数字航摄影光电成像器件的中心行上；

d) 依次以相同角度转动畸变测量仪的转臂，使无穷远点目标成像在被检数字航摄影的光电成像器件靶面上，从被检数字航摄影的输出影像中提取目标在光电成像器件上的位置，同时记录相应的轴角编码器的角度值；

e) 测量完该方向后，重复步骤 c)、d)，测量被检数字航摄影光电成像器件的中心列上的数据；

f) 按附录 A 分别计算出光电成像器件行向和列向的对称主点坐标和标定主距，以及各目标点的畸变；

g) 按公式 (1) 的畸变模型，根据最小二乘法计算出各个畸变系数；

h) 各个目标点的畸变值与按公式 (1) 计算得到的各个目标点畸变值之差，即为目标点畸变改正后的残差，以其中误差作为检定值，其结果应满足表 1 的要求。检定结果示例参见表 C. 2。

$$\left. \begin{aligned} D_{ix} &= (x_i - x_0)(K_1 r_i^2 + K_2 r_i^4 + K_3 r_i^6) + P_1[r_i^2 + 2(x_i - x_0)^2] + \\ &\quad 2P_2(x_i - x_0)(y_i - y_0) + B_1(x_i - x_0) + B_2(y_i - y_0) \\ D_{iy} &= (y_i - y_0)(K_1 r_i^2 + K_2 r_i^4 + K_3 r_i^6) + 2P_1(x_i - x_0)(y_i - y_0) + \\ &\quad P_2[r_i^2 + 2(y_i - y_0)^2] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中：

D_{ix} ——列方向第 i 个目标点的畸变，mm；

D_{iy} ——行方向上第 i 个目标点的畸变，mm；

K_1 、 K_2 、 K_3 ——径向畸变系数；

P_1 、 P_2 ——偏心畸变系数；

B_1 ——像素形状改正系数；

B_2 ——面阵坐标轴改正系数；

x_0 、 y_0 ——对称主点坐标；

r_i ——第 i 个目标点的径向半径，mm；

x_i ——第 i 个目标点的列方向坐标，mm；

y_i ——第 i 个目标点的行方向坐标，mm。

7.3.1.2.3 径向畸变检定也可采用附录 B 的方法。

7.3.1.3 光学分辨率

7.3.1.3.1 检定采用目视法，检定设备主要包括平行光管、分辨力板、显微镜。

7.3.1.3.2 检定步骤如下：

a) 将分辨力板安置在平行光管物镜的焦平面上；

b) 将被检数字航摄影物镜安置在平行光管物镜正前方；

c) 打开光源照亮分辨力板；

d) 调整物镜或平行光管的位置，使两者的光轴重合；

e) 用显微镜测出分辨力板刚能分辨的相互垂直的两个方向线条组数，查分辨率图案附表，得出对应的线条数，按公式 (2) 求出物镜目视的分辨率，其结果应满足表 1

的要求。

$$R = R_n (f'_0 / f') \quad (2)$$

式中：

R ——被检数字航摄仪物镜的目视分辨率，lp/mm；

R_n ——靶标上刚能分辨的线条数，lp/mm；

f'_0 ——平行光管的焦距，mm；

f' ——镜头的焦距，mm。

7.3.1.4 杂光系数

7.3.1.4.1 检定设备主要包括精密光学平台、准直镜、积分球。

7.3.1.4.2 检定步骤如下：

a) 将供给积分球灯室直流稳压电源的插头插在交流稳压电源上，并打开电源开关进行预热；

b) 将被检数字航摄仪安置在测量机架上，调整数字航摄仪使其位于积分球出射光阑中心位置；

c) 先把白目标放在积分球的目标孔处，积分球另一端的准直镜焦点落在白目标上，用数字航摄仪对白目标获取图像，并使图像的灰度值不超过图像饱和值的80%；

d) 把白目标替换为吸收腔，形成测量所需要的黑斑，再用数字航摄仪对黑斑目标成像；

e) 按公式(3)计算被检数字航摄仪杂光系数作为检定值，其结果应满足表1的要求。

$$\eta = \frac{m'}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

η ——杂光系数；

m_0 ——数字航摄仪获取白目标图像的灰度值；

m' ——数字航摄仪获取黑斑目标图像的灰度值。

7.3.1.5 透过率

7.3.1.5.1 检定设备主要包括精密光学平台、平行光管、光照度计。

7.3.1.5.2 检定步骤如下：

a) 将平行光管的光源接到直流稳压电源上，使平行光管焦面上的星点孔照亮，并发出平行光；

b) 目标通过平行光管出射的平行光束经过可变光阑进入积分球，从光照度计得到空测时的读数 m_0 ；

c) 保持可变光阑口径与空测时一致，在测量机架上安置被检数字航摄仪物镜并调整位置，使物镜光轴与平行光管的光轴重合，此时，在物镜的焦平面上可以看到平行光管的星点目标的像；

d) 调整积分球和光照度计的位置，使光束全部进入积分球，从光照度计得到实测时的读数 m_1 ，按公式(4)计算被检数字航摄仪透过率作为检定值，其结果应满足表1

的要求。

$$\tau = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

- τ ——透过率；
- m_0 ——空测时光照度计读数；
- m_1 ——实测时光照度计读数。

7.3.1.6 信噪比

7.3.1.6.1 检定设备主要包括均匀光源。

7.3.1.6.2 检定步骤如下：

- a) 打开均匀光源的电源开关进行预热；
- b) 将被检数字航摄影安置在测量机架上并调整，使其位于均匀光源出光口中心位置；
- c) 使被检数字航摄影对均匀光源出光口成像，调整均匀光源亮度，使图像的灰度值不超过图像饱和值的 80%；
- d) 根据被检数字航摄影获取的图像，按公式 (5) 计算被检数字航摄影的信噪比作为检定值，其结果应满足表 1 的要求。

$$V_{\text{SNR}} = 20 \times \lg \frac{M}{S} \quad (5)$$

式中：

- V_{SNR} ——信噪比，dB；
- M ——图像的最大灰度值；
- S ——图像灰度值的标准差。

7.3.2 空对地检定

7.3.2.1 检定前准备

检定飞行前，进行飞行相关的准备工作，包括设备的安装调试、量测偏心分量、航线和航高设计、布设卫星导航定位基准站等。准备工作完成后，严格按照航摄设计要求在检定场上空进行航摄检定飞行。飞行结束后，进行飞行质量和摄影质量的检查，在满足相应质量要求后进行检定数据处理。

7.3.2.2 空中三角测量精度

按照 GB/T 7931 中相关章节的要求选择控制点，采用被检数字航摄影配套软件或厂家推荐的软件，按照 GB/T 7930 中相关章节的要求进行空中三角测量处理，其他控制点作为检查点，在统一的坐标系中，按照公式 (6) 和公式 (7) 分别计算被检数字航摄影空中三角测量的平面位置中误差和高程中误差作为检定值，其结果应满足表 1 的要求。检定结果示例参见表 C.3。

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{i0})^2 + (y_i - y_{i0})^2]}{n}} \quad (6)$$

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_{i0})^2}{n}} \quad (7)$$

式中:

S_{xy} ——空中三角测量平面位置中误差, m;

S_h ——空中三角测量高程中误差, m;

x_i 、 y_i 、 h_i ——第 i 个检查点的量测坐标值, m;

x_{i0} 、 y_{i0} 、 h_{i0} ——第 i 个检查点的标准坐标值, m;

n ——控制点数量。

7.3.2.3 立体像对摄影测量精度

在空中三角测量结果的基础上进行立体像对摄影测量, 以立体像对内的控制点作为检查点, 在统一的坐标系中, 按照公式 (8) 和公式 (9) 分别计算被检数字航摄影仪立体像对摄影测量的平面位置中误差和高程中误差作为检定值, 其结果应满足表 1 的要求。检定结果示例参见表 C.4。

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_{i0})^2 + (y_i - y_{i0})^2]}{n}} \quad (8)$$

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_{i0})^2}{n}} \quad (9)$$

式中:

S_{xy} ——立体像对摄影测量平面位置中误差, m;

S_h ——立体像对摄影测量高程中误差, m;

x_i 、 y_i 、 h_i ——第 i 个检查点的量测坐标值, m;

x_{i0} 、 y_{i0} 、 h_{i0} ——第 i 个检查点的标准坐标值, m;

n ——控制点数量。

7.3.2.4 动态摄影分辨率

检定飞行时, 被检数字航摄影仪对影像质量检定场中的分辨率目标或西门子星进行成像, 目视判读图像中目标, 以最小可分辨线条宽度的一对黑白靶标所对应尺寸为被检数字航摄影仪动态摄影分辨率, 并将其作为检定值, 其结果应满足表 1 的要求。

7.3.2.5 线性度

检定飞行时, 被检数字航摄影仪对影像质量检定场中不同反射率的灰度比例尺目标进行成像, 得到不同反射率目标的图像灰度值; 在检定飞行的同时, 利用光谱仪测量灰度比例尺目标的反射率, 利用太阳光度计测量大气参数, 根据辐射传输模型, 得到航摄影仪镜头入瞳处的辐亮度值, 按公式 (10) 计算被检数字航摄影仪线性度作为检定值, 其结果应满足表 1 的要求。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L}) \times (G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2}} \times 100\% \quad (10)$$

式中：

r ——线性度；

L_i ——第 i 个目标的表观辐亮度， $W/(m^2 \cdot sr)$ ；

\bar{L} —— n 个目标表观辐亮度的均值， $W/(m^2 \cdot sr)$ ；

G_i ——第 i 个目标的图像灰度值；

\bar{G} —— n 个目标图像灰度值的均值；

n ——目标个数。

7.3.2.6 信噪比

检定飞行时，被检数字航摄仪对影像质量检定场中的大面积矩形反射目标进行成像，以图像的最大灰度值作为信号，不同矩形反射目标图像的标准差作为噪声，按公式 (11) 计算信噪比，取最大信噪比作为检定值，其结果应满足表 1 的要求。

$$V_{SNR} = 20 \times \lg \frac{M}{S} \quad (11)$$

式中：

V_{SNR} ——信噪比，dB；

M ——图像灰度的最大值；

S ——图像均匀区的灰度值标准差。

7.4 检定结果的处理

经实验室检定或空对地检定合格的数字航摄仪，应发给检定证书。

对后续检定的仪器：实验室检定时，除表 1 中的第 1 项（径向畸变）外，如其他检定项目仅有一项超差，且其超差值小于该项要求的 1/3，则该数字航摄仪也作检定合格处理；空对地检定时，除表 1 中的第 6 项（空中三角测量精度）、第 7 项（立体像对摄影测量精度）外，如其他检定项目仅有一项超差，且其超差值小于该项要求的 1/3，则该数字航摄仪也作检定合格处理。

经检定不合格的数字航摄仪，应发给检定结果通知书，并注明不合格项目。

7.5 检定周期

数字航摄仪检定周期一般不超过 2 年。

附录 A

实验室径向畸变计算公式

公式 (12) 为实验室径向畸变计算公式。

$$\left. \begin{aligned}
 p &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n L_i \tan W_i \times \sum_{i=1}^n \tan^3 W_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n L_i \tan^2 W_i \times \sum_{i=1}^n \tan^2 W_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \tan^2 W_i \times \sum_{i=1}^n \tan^4 W_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n \tan^3 W_i \right)^2} \\
 f &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n L_i \tan W_i \times \sum_{i=1}^n \tan^4 W_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n L_i \tan^2 W_i \times \sum_{i=1}^n \tan^3 W_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \tan^2 W_i \times \sum_{i=1}^n \tan^4 W_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n \tan^3 W_i \right)^2} \\
 D_i &= f \times \tan\left(W_i - \frac{p}{f}\right) - (L_i - p)
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中：

p ——行向或列向的对称主点位置，mm；

W_i ——第 i 个目标点对应的角度测量值，rad；

L_i ——第 i 个目标点到光电成像器件靶面中心的长度，由单个像素尺寸和目标点到光电成像器件靶面中心的像素个数得到，mm；

f ——标定主距，mm；

D_i ——第 i 个目标点的畸变，mm；

n ——目标点个数。

附录 B

地对地检定

B.1 地对地检定条件

B.1.1 检定场位置

检定场位置应满足以下要求：

- a) 地基稳固，交通便利；
- b) 周围环境光和震动等因素不应对成像质量产生影响。

B.1.2 检定场范围

检定场范围应满足以下要求：

- a) 被检数字航摄仪在工作高度能获得满幅检定场图像，并能在不同高度进行左右拍照；
- b) 控制点分布应具有一定的层次。

B.1.3 控制点目标

控制点目标布设应满足以下要求：

- a) 控制点应密集地布设在有效的控制区域内，点间距小于 4 m；
- b) 控制点大小最少覆盖 6 个像素大小，且具有较高对比度；
- c) 控制点的三维坐标测量精度优于 2 mm。

B.1.4 空中滑道设计

空中滑道设计示意图参见图 B.1，且应满足以下要求：

- a) 滑道设计高度（工作面高度）应不小于 50 m；
- b) 塔身良好接地，避雷击；
- c) 可在 6 级风力下正常工作，抗风性能达 11 级；
- d) 水平性控制在 $0^\circ \pm 3^\circ$ 。

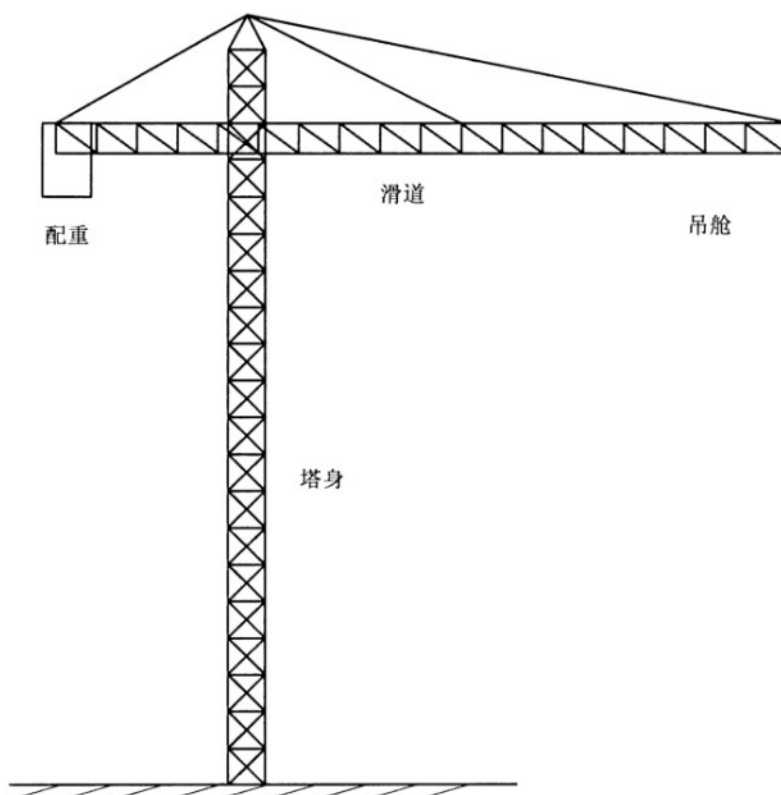


图 B.1 空中滑道示意

B.1.5 吊舱设计

B.1.5.1 吊舱分为 3 部分：吊舱控制平台部分、舱体部分及无线通信部分。

B.1.5.2 吊舱控制平台应满足以下技术要求：

- a) 能实现航偏角、俯仰角、横滚角模拟，俯仰角、横滚角的旋转角度为 $[-10^\circ, 10^\circ]$ ，航偏角的旋转角度为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ；
- b) 全球导航卫星系统天线安装在平台上，且应与仪器设备刚性连接；
- c) 具有姿态保持和姿态角输出功能；
- d) 控制平台的最大载荷不小于 200 kg。

B.1.5.3 舱体能够实现与地面的吊舱控制平台手动脱离与连接。

B.1.5.4 无线通信应满足以下技术要求：

- a) 工作频段不影响全球导航卫星系统及其他设备工作；
- b) 传输距离不小于 400 m；
- c) 有配套的操作软件或电子手簿。

B.2 地对地检定方法

采用摄影测量的空间后方交会原理，以共线方程为基础、像点坐标作为观测值，基于最小二乘法原理，按公式 (13) 解求对称主点、标定主距和径向畸变系数以及其他附加参数，再按公式 (14) 计算每一个控制点畸变改正后的残差，其中误差应满足表 1 的要求。检定结果示例参见表 C.2。

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= -x_0 - \frac{\bar{x}}{f} \Delta f + \bar{x} r^2 K_1 + \bar{x} r^4 K_2 + \bar{x} r^6 K_3 + (r^2 + 2\bar{x}^2) P_1 + \\ &\quad 2\bar{x}\bar{y} P_2 + \bar{x} B_1 + \bar{y} B_2 \\ \Delta y &= -y_0 - \frac{\bar{y}}{f} \Delta f + \bar{y} r^2 K_1 + \bar{y} r^4 K_2 + \bar{y} r^6 K_3 + (r^2 + 2\bar{y}^2) P_2 + \\ &\quad 2\bar{x}\bar{y} P_1 + \bar{y} B_1 + \bar{x} B_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:

K_1 、 K_2 、 K_3 ——径向畸变系数;

P_1 、 P_2 ——偏心畸变系数;

B_1 ——像素形状改正系数;

B_2 ——面阵坐标轴改正系数;

Δx 、 Δy ——像点畸变改正后的残差, mm;

\bar{x} 、 \bar{y} ——像点相对于主点的量测坐标, mm;

x_0 、 y_0 ——相机主点坐标, mm;

Δf ——相机标定主距改正值, mm;

r ——像点的径向半径, mm。

$$dr_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} / \mu \quad (14)$$

式中:

dr_i ——第 i 个控制点畸变改正后的残差, 像素;

Δx_i ——第 i 个控制点列方向上畸变改正后的残差, mm;

Δy_i ——第 i 个控制点行方向上畸变改正后的残差, mm;

μ ——单个像素的大小, mm/像素。

附录 C

检定结果示例

C.1 对称主点、标定主距和径向畸变检定结果示例

对称主点、标定主距检定结果示例参见表 C.1。径向畸变检定结果示例参见表 C.2。

表 C.1 对称主点、标定主距

对称主点/mm		标定主距/mm
x	y	
-0.265	-0.079	50.210

表 C.2 径向畸变

点号	像点位置/像素		畸变改正后的残差/像素
	x_i	y_i	dr_i
1	6 597.774	2 706.884	-0.017
2	6 447.870	2 706.682	-0.046
3	6 300.384	2 706.730	-0.075
4	6 154.729	2 706.693	-0.092
5	6 010.643	2 706.606	-0.040
6	5 868.501	2 706.588	-0.050
7	5 727.861	2 706.476	0.030
8	5 588.548	2 706.458	0.092
9	5 450.807	2 706.370	-0.011
10	5 314.018	2 706.309	0.052
11	5 178.413	2 706.231	0.088
12	5 044.027	2 706.106	0.031
13	4 910.369	2 706.081	0.149
14	4 777.558	2 705.946	0.253
15	4 645.819	2 705.960	0.102
16	4 514.378	2 705.842	0.079
17	4 383.827	2 705.776	0.052
18	4 253.675	2 705.669	0.043
19	4 123.912	2 705.637	0.011
20	3 994.488	2 705.645	-0.112
21	3 865.360	2 705.626	-0.171
畸变改正后残差的中误差	$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (dr_i)^2}{n-7}} = 0.118 \text{ 像素}$		

C.2 空中三角测量精度检定结果示例

空中三角测量精度检定结果示例参见表 C.3。

表 C.3 空中三角测量精度(成图比例尺 1 : 1 000)

点号	检查点平面位置误差		检查点高程误差
	dx_i/m	dy_i/m	dh_i/m
1	0.019	-0.035	-0.095
2	0.047	-0.061	-0.082
3	0.058	-0.046	0.019
4	0.042	-0.050	0.038
5	-0.031	-0.034	0.087
6	-0.032	-0.038	-0.046
7	-0.002	0.046	-0.104
8	0.007	-0.073	0.032
9	0.003	0.032	-0.236
10	0.058	-0.025	-0.228
11	-0.027	-0.094	-0.103
12	-0.040	-0.123	-0.068
13	-0.048	0.057	-0.022
14	0.005	-0.033	0.060
15	0.010	0.126	-0.236
16	-0.007	0.012	-0.100
17	0.027	-0.134	-0.004
18	-0.050	-0.084	-0.184
19	-0.003	0.064	-0.266
20	0.008	-0.087	-0.176
21	0.050	-0.052	-0.182
22	-0.038	-0.063	-0.080
23	0.001	-0.071	-0.057
空中三角测量精度	平面位置中误差 $S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(dx_i)^2 + (dy_i)^2]}{n}} = 0.072 \text{ m}$		高程中误差 $S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (dh_i)^2}{n}} = 0.102 \text{ m}$

C.3 立体像对摄影测量精度检定结果示例

立体像对摄影测量精度检定结果示例参见表 C.4。

表 C.4 立体像对摄影测量精度(成图比例尺 1:1 000)

点号	检查点平面位置误差		检查点高程误差
	dx_i/m	dy_i/m	dh_i/m
1	0.058	0.096	0.022
2	-0.023	0.046	0.054
3	0.013	-0.082	0.132
4	-0.017	0.011	0.002
5	0.039	-0.033	0.140
6	0.069	-0.008	0.011
7	0.125	0.027	-0.074
8	-0.032	0.015	0.001
9	0.019	0.107	0.017
10	0.067	0.070	0.077
11	0.039	0.053	0.015
12	0.006	0.005	0.009
13	0.041	0.044	-0.116
14	-0.065	0.071	-0.014
15	-0.011	0.024	0.021
16	0.105	0.046	-0.029
17	0.007	0.076	0.103
18	0.117	0.039	-0.018
19	-0.029	0.052	0.007
20	0.086	0.043	-0.119
21	0.048	0.019	-0.120
22	0.051	0.062	-0.086
23	0.103	0.066	-0.014
立体像对摄影测量精度	平面位置中误差 $S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(dx_i)^2 + (dy_i)^2]}{n}} = 0.067 \text{ m}$		高程中误差 $S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (dh_i)^2}{n}} = 0.072 \text{ m}$