ICS 07.040
CCS A75
备案号：xxxxx--xxxx

CH

中 华 人 民 共 和 国 测 绘 行 业 标 准

CH/T XXXXX—XXXX

机载激光雷达检校检验技术规程

Technical Regulations for Airborne LiDAR Calibration and Inspection

（征求意见稿）

201X－XX－XX 发布　　201X－XX－XX 实施

中华人民共和国自然资源部　发 布

目 次

前言 II
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 检定项目 3
5 检定条件 3
5.1 场地条件 3
5.2 设备条件 4
5.3 待检测设备条件 5
5.4 其它条件 5
6 检定方法 5
6.1 外观检视与开机检查 5
6.2 测距误差检定 6
6.3 测角误差检定 6
6.4 加工误差检定 7
7 检定结果 9

前　言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国地理信息标准化技术委员会测绘分技术委员会归口。

本文件起草单位：北京四维远见信息技术有限公司、中国测绘科学研究院、国家测绘地理信息计量站（国家光电测距仪检测中心）、中测新图（北京）遥感技术有限责任公司、北京北科天绘科技有限公司、上海勘察设计研究院（集团）有限公司、同济大学

本文件主要起草人：暂略

机载激光雷达检校检验技术规程

1 范围

本文件规定了机载激光雷达设备检测过程中，对设备的测距误差、测角误差以及加工误差检测方法等方面的要求。

本文件适用于机载激光雷达设备的测距误差、测角误差及加工误差检测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GJB 5441-2005 固体激光器测试方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

激光雷达 light detection and ranging；LiDAR

发射激光束并接收回波获取目标三维信息的系统。

[来源：GB/T 14950-2009，数据获取 4.150]

3.2

机载激光雷达 airborne LiDAR

在航空平台上，集成激光雷达、定位定姿系统（POS）、数码相机和控制系统所构成的综合系统。

[来源：CH/T 8023-2011，术语和定义 3.2]

3.3

测距误差 distance measuring error

激光雷达扫描仪的设备坐标系原点至目标的扫描输出距离与真实距离的差异。

3.4

测角误差 angle measuring error

激光雷达扫描仪发射激光束的理论指向角与实际指向角之间的差异。

3.5

加工误差 machining error

机载激光雷达系统生产加工装配过程中造成的误差，主要包括光学中心标定误差、安置角、偏心距、束散角等。

3.6

束散角 divergence angle

3.6.1

束散角 divergence angle

$\Theta_u, \Theta_{x,u}, \Theta_{y,u}$[ISO]

光束宽度[内含功率（或能量）定义的]在远场增大形成的渐近面椎所构成的全角度。

注 1：对圆横截面，光束宽度为光束直径d_u。对于非圆横截面，束散角分别由相应的x方向和y方向的光束宽度

$d_{x,u}$和$d_{y,u}$确定。

注 2：当规定束散角时，应使用下标说明相关的光束宽度，如$\Theta_{x,50}$说明光束宽度为$d_{x,50}$。

注 3：这里坐标系的定义和光束宽度的定义不包括一般像散情况。

注 4：为了明确，束散角的标识要将符号及其适合的下标一起使用，即：$\Theta_\sigma, \Theta_{\sigma x}, \Theta_{\sigma y}$或$\Theta_u, \Theta_{x,u}, \Theta_{y,u}$。

[来源：GB/T 15313-2008，定义2.1.65.1]

3.6.2

束散角 divergence angle

$\Theta_\sigma, \Theta_{\sigma x}, \Theta_{\sigma y}$

光束宽度[功率（或能量）密度分布函数二阶矩定义的]在远场增大形成的渐近面椎所构成的全角度。

注 1：对圆横截面，光束宽度为光束直径d_σ。对于非圆横截面，束散角分别由相应的x方向和y方向的光束宽度

$d_{\sigma x}$和$d_{\sigma y}$决定。

注 2：这里坐标系的定义和光束宽度的定义不包括一般像散情况。

注 3： 为了明确，束散角的标识要将符号及其适合的下标一起使用，即$\theta_\sigma, \theta_{\sigma x}, \theta_{\sigma y}$或$\theta_u, \theta_{x,u}, \theta_{y,u}$。

[来源：GB/T 15313-2008，定义2.1.65.2]

3.7

光学中心 optical center

激光雷达扫描仪的激光发射原点，一般作为设备的扫描坐标系原点。

3.8

点云 point cloud

以离散、不规则方式分布在三维空间中的点的集合。

[来源：CH/T 8023-2011，术语和定义 3.3]

3.9

标靶 target

用于检测机载激光雷达测距、测角误差的目标板。

3.10

基座 pedestal

用于承载机载激光雷达扫描仪的可调连接装置。

3.11

数字高程模型 digital elevation model；DEM

数字高程模型是在一定范围内通过规则各网点描述地面高程信息的数据集，用于反映区域地貌形态的空间分布。数字高程模型是国家基础地理信息数字成果的主要组成部分。

[来源：CH/T 9008.2-2010，成果描述 3]

4 检定项目

机载激光雷达实验检定场与飞行检定场检定项目及要求见表 1。

表 1 检定项目

序号	检定类别	检定项目	检定场地	检定周期（年）	检定类别		
					首次检定	后续检定	使用中检定
1	测距误差	距离误差	实验检定场	1	+	+	+
2	测角误差	角度误差	实验检定场	1	+	+	+
3	加工误差	光学中心	实验检定场	1	+	+	-
4		束散角	实验检定场	1	+	+	-
5		安置角	飞行检定场	1	+	+	+
6		偏心距	飞行检定场	1	+	+	+
注：检定类别中，“+”为必检项目，“-”为可不检项目。							

5 检定条件

5.1 场地条件

5.1.1 实验检定场条件

a）实验检定场的长度宜不低于 120 米，宽度宜不低于 50 米；

b）实验检定场内应通视情况良好，地形平整开阔，无震动、强电磁、强热影响；

c）实验检定场所在区域应全年天气条件良好，气候干燥，无连续雨雪、大风等天气；

d）实验检定场中应具有明显标志点作为场地测量的控制点；

e）实验检定场中应布设有红外靶标板，具体制作要求与布设方式见 5.2.3，每个红外靶标板正前方安置红外相机，相机幅面能够覆盖整个红外靶标板；

f）实验检定场已完成场地坐标系的设计与测量；

g）实验检定场中的红外相机与红外靶标应完成几何校正，确定坐标转换关系，且各红外相机已完成图幅纠正。

5.1.2 飞行检校场要求

a）飞行检校场应适于机载激光雷达设备的整体检校；

b）飞行检校场应包含平坦裸露地形，应有用于检校的建筑物或明显凸出地物；

c）飞行检校场内目标应具有较高的反射率，存在明显地物点（如道路拐角点等）。

5.2 设备条件

5.2.1 全站仪

精度等级应在 0.5″及以上。

5.2.2 红外相机

5.2.2.1 相幅

幅面应不小于 320×256 像素。

5.2.2.2 畸变

畸变应不大于 5μm。

5.2.2.3 曝光时间

最小曝光时间应不大于 5μs。

5.2.2.4 相机布设

相机稳固应置于标靶前，影像应覆盖标靶有效范围。

5.2.3 标靶

5.2.3.1 标靶尺寸

标靶长度宜不小于 2m，宽度宜不小于 1m，表面平整度应不大于 10mm，标靶上设置反射率分别为 100%（纯白），80%，60%，40%和 20%的区域，标靶板上固定 6 个红外光源，供红外 CCD 相机标定，具体如图 1 所示。

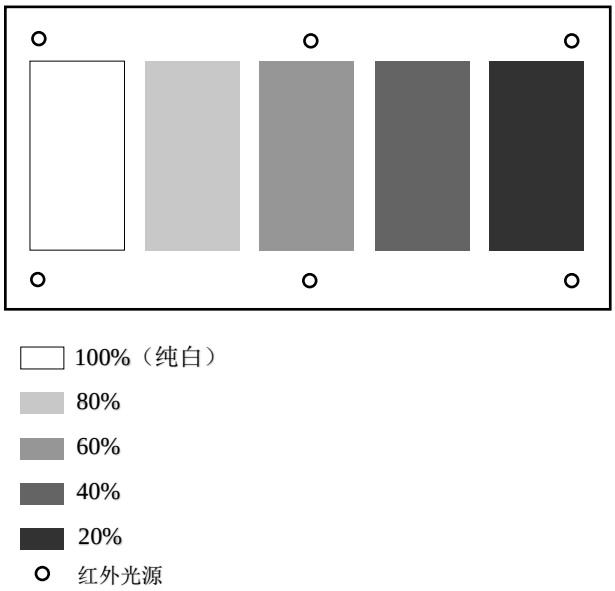

图 1 标靶示意图

5.2.3.2 标靶布设

标靶的具体布设方式如图 2 所示。

a） 标靶距激光扫描位置分别为 200m，100m 和 50m；

b） 相机不遮挡激光扫描光线；

c） 标靶架空、铅垂、稳固安装，底边距地面不低于 50cm，各标靶处于同一扫描面。

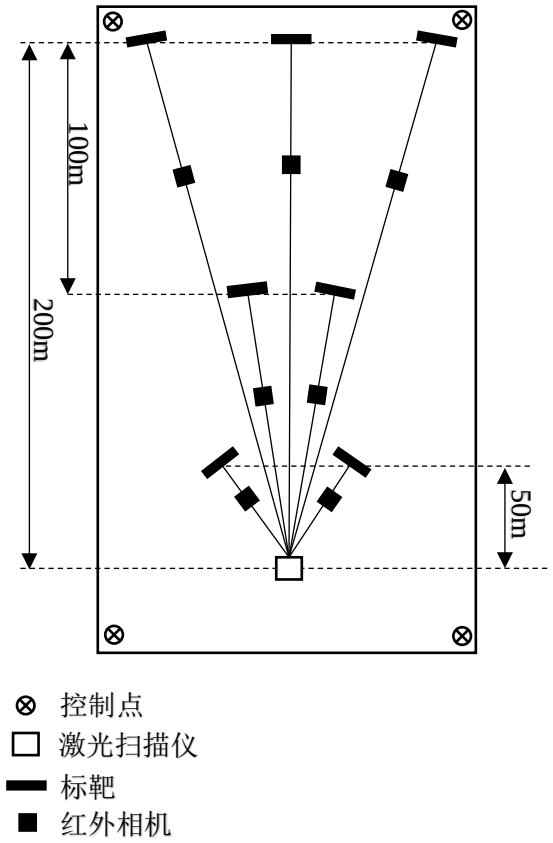

图 2 标靶布设

5.2.3.3 标靶测量

a)按格网间距不大于 20cm 的布设方式在标靶表面粘贴的反射片，使用全站仪对其进行精确测量，中误差需优于 1mm;

b)将反射片十字丝对准标靶上的红外光源点中心，使用全站仪对各个红外光源点进行准确位置测量。

5.2.4 基座

支持水平、竖直方向上的角度调节，支持各种尺寸、孔径的设备固定与连接。

5.3 待检测设备条件

a）表面应无明显磕碰、划痕，且部件完整；

b）接电后应正常运行；

c）设备应已标定光学中心与表面标志点相对关系。

5.4 其它条件

对后续检定和使用中检验的仪器，允许有不影响仪器准确度和技术功能的缺陷。

6 检定方法

6.1 外观检视与开机检查

对 5.3 所列各项逐项进行目视与操作检验。

6.2 测距误差检定

a）在检校场中架设机载激光雷达设备（图 2），置平扫描面。

b）开启机载激光雷达与红外相机，设定机载激光雷达点频和线频，调节相机参数和激光扫描仪姿态，直至红外相机能够清晰捕捉落在对应标靶上的激光光斑。

c）记录红外影像和对应激光雷达点云数据。

d）全站仪测量激光雷达相关标识，解算扫描仪光学中心 O(x_o,y_o,z_o)。

e）全站仪测量所有标靶上的红外光源坐标作为控制点，根据近景摄影测量原理后方交会，确定红外相机的外方位元素；

f）根据近景摄影测量单片前方交会原理，解算红外相机影像中激光脚点光斑的空间坐标。

g）利用后处理软件，每个标靶在不同反射率区域取不少于 20 个红外影像光斑点$P_n(x_n,y_n,z_n)$，计算其到O(x_o,y_o,z_o)的距离 l_n，获取$P_n(x_n,y_n,z_n)$对应的激光脚点的点云坐标$P_n^{'}(x_n^{'},y_n^{'},z_n^{'})$。

h）计算激光雷达测量的激光脚点$P_n^{'}(x_n^{'},y_n^{'},z_n^{'})$在扫描坐标系下的测量距离。

$$l'_n = \sqrt{{x_n'}^2 + {y_n'}^2 + {z_n'}^2} \qquad \text{……（1）}$$

式中：

$l_n^{'}$ ——激光脚点在 LiDAR 系统的测量距离；

i）计算测量距离误差。

$$\Delta_n = l'_n - l_n \qquad \text{……（2）}$$

式中，

Δ_n——激光脚点测距误差；

l_n——距离标准值；

l'_n——激光雷达距离测量值。

i）计算测距中误差。

$$m_{distance}=\pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta_i\Delta_i}{n}} \qquad \text{……（3）}$$

式中：

$m_{distance}$——测距中误差；

n ——选取的光斑数量；

Δ ——激光脚点测距误差。

6.3 测角误差检定

a）利用 6.2 获取的设备光学中心位置$o(x_o,y_o,z_o)$，以及红外相机测定的激光光斑坐标$P_n(x_n,y_n,z_n)$，计算设备光学中心到两相邻光斑之间的夹角作为观测值（实际指向角）。

$$\alpha=arccos\left(\frac{\overrightarrow{OP_n}\cdot\overrightarrow{OP_{n+1}}}{|\overrightarrow{OP_n}|\cdot|\overrightarrow{OP_{n+1}}|}\right) \qquad \text{……（4）}$$

式中：

α——设备光学中心到相邻光斑之间的夹角观测值。

b）利用 6.2 获取的激光扫描点坐标$P_n'(x_n', y_n', z_n')$，计算相邻扫描线之间的夹角。

$$\alpha' = arccos\left(\frac{\overrightarrow{O'P_n'} \cdot \overrightarrow{O'P_{n+1}'}}{\left|\overrightarrow{OP_n'}\right| \cdot \left|\overrightarrow{OP_{n+1}'}\right|}\right) \quad \text{……（5）}$$

式中：

α'——相邻光斑与设备测量原点的角度观测值。

O'——激光扫描仪坐标系原点（0,0,0）。

c）计算测角误差。

$$\Delta_\alpha = \alpha - \alpha' \quad \text{……（6）}$$

式中：

Δ_α——相邻光斑的测角误差。

d）利用n组光斑的测角误差，计算激光扫描仪的测角中误差。

$$m_{angle} = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta_\alpha \Delta_\alpha}{n-1}} \quad \text{……（7）}$$

式中：

m_{angle} ——测距中误差；

n ——选取的光斑数量；

Δ_α ——相邻光斑测角误差。

6.4 加工误差检定

6.4.1 光学中心

选取n组对应激光脚点与激光光斑检测数据，计算其残差v_n，调整已知光学中心位置$O(x_o, y_o, z_o)$，令$lim\sum_{i=1}^{n} v_n \to 0$。

利用最小二乘法，计算当v_n值最小时机载激光雷达光学中心位置，记为$O'(x_o', y_o', z_o')$，机载激光雷达光学中心建议改正值为：

$$\Delta O = (x_o' - x_o, y_o' - y_o, z_o' - z_o) \quad \text{……（8）}$$

式中：

x_o, y_o, z_o ——已知机载激光雷达光学中心位置坐标；

x_o', y_o', z_o' ——利用最小二乘法计算的机载激光雷达理论光学中心位置坐标。

6.4.2 光斑大小

光斑大小按照 GJB 5441-2005 中 5.8 节规定的激光光斑宽度或光斑直径测量方法进行测定。

6.4.3 光束发散角

光束发散角按照 GJB 5441-2005 中 5.9 节规定的激光光束发散角测量方法进行测定。

6.4.4 安置角

6.4.4.1 人工检校

6.4.4.1.1 侧滚角检校

a) 选取两条重合的对飞航线，将侧滚角（*Roll*），俯仰角（*Pitch*）和航向角（*Heading*）三个安置角设置为 0，解算点云。

b)选取垂直于航线方向的平坦道路，沿道路方向绘制断面图。在断面的两端量测两条航线点云的高差值h_1、h_2，航带宽度 *Width*，如图 3，计算安置角 *Roll* 改正值。

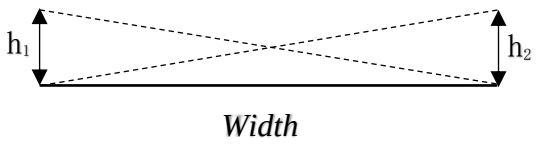

图 3 安置角 *Roll* 改正值计算示意图

$$Roll=arctan(\frac{h_1+h_2}{2\cdot Width}) \quad \cdots\cdots (9)$$

式中：

Roll ——侧滚角改正值；

h_1,h_2 ——断面两端两条航线的点云高差；

Width ——航带宽度。

c)将 *Roll* 值累加代入解算点云，*Pitch* 和 *Heading* 设置为 0，重复 a)和 b)，迭代计算，直至 *Roll* 改正值小于 0.001 度。

6.4.4.1.2 俯仰角检校

a) 选取两条重合的对飞航线，将 *Roll* 设置为 6.4.4.1.1 检校值，将 *Pitch* 和 *Heading* 设置为 0，解算点云。

b) 在航线中心位置附近选择坡度变化明显位置（如尖顶房）的点云数据，沿航线方向绘制断面。选择明显特征点（如屋脊线），量取两条航线点云沿航线方向前后偏移量 *D*。利用轨迹文件和点云数据，计算两条航线的相对高度*H*。计算安置角 *pitch* 改正值。

$$Pitch=arctan(D/2H) \quad \cdots\cdots (10)$$

式中：

Pitch ——俯仰角改正值；

D ——两条航线点云沿航线方向前后偏移量；

H ——两条航线的相对高度。

c)将计算的 *Pitch* 值累加代入，*Roll* 设置为 6.4.4.1.1 检校值，*Heading* 设置为 0，重复 a)和 b)，迭代计算，直至 *Pitch* 改正值小于 0.001 度。

6.4.4.1.3 航向角检校

a) 选取两条重叠度约 60%平行航线，在重叠区选取坡度变化明显地物（尖顶房），将 *Roll* 设置为 6.4.4.1.1 检校值，*Pitch* 设置为 6.4.4.1.2 检校值，*Heading* 设置为 0，解算点云。

b) 在一条航线中心选取坡度变化明显地物，该地物处于另一条航线的边缘，在地物上沿航线方向绘制断面，沿航线方向量取地物特征点在两条航线的点云偏移量 S 和地物特征点到第二条航线点云中心线的垂直距离 L，计算安置角 *Heading* 的改正值。

$$Heading=\frac{S}{L} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（11）$$

式中：

Heading ——航向角改正值；

S ——两条航线点云沿航线方向前后偏移量；

L ——地物特征点到第二条航线点云中心线的垂直距离。

c)将计算的 *Heading* 值累加代入，*Roll* 设置为 6.4.4.1.1 检校值，*Pitch* 设置为 6.4.4.1.2 检校值，重复 a)和 b)，迭代计算，直至 *Heading* 改正值小于 0.001 度。

6.4.4.1.4 微调安置角

重复 6.4.4.1.1、6.4.4.1.2、6.4.4.1.3 对 *Roll*, *Pitch* 和 *Heading* 进行微调，直至三个角度的改正值均小于 0.001 度。

6.4.4.2 自动检校

a) 将 *Roll*, *Pitch*, *Heading* 三个安置角设置为 0，解算点云；

b) 提取点云数据中的特征线和特征面，并对不同航带的同名特征线和特征面进行匹配，获得同名点在不同航线的坐标差异；

c) 依据特征点坐标差异、姿态数据和点云原始数据，采用最小二乘法解算安置角改正值；

d）将计算的安置角代入机载激光雷达系统配套的点云解算软件，计算点云。评定点云精度，若不满足，重复步骤 b）和 c），直到点云精度满足要求。

7 检定结果

检测报告中须注明机载激光雷达设备检测场的场地信息，主要包括场地名称、场地位置、检测人员信息及设备检测时间。

经本规程检测合格的机载激光雷达出具合格检测报告；经检测不合格的机载激光雷达，出具检测报告，并注明其不合格项。