



中华人民共和国国家标准

GB/T 41450—2022

无人机低空遥感监测的多传感器一致性 检测技术规范

Technical specification of multi-sensor consistency testing for unmanned aerial
vehicle(UAV)borne low altitude remote sensing monitoring

2022-04-15 发布

2022-04-15 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	3
5 基本要求	3
5.1 检测流程	3
5.2 检测内容	3
5.3 检测仪器	4
5.4 时空基准	4
5.5 数据采集	4
6 检测条件	4
6.1 一般规定	4
6.2 室外检测条件	5
6.3 室内检测条件	5
7 检测飞行	6
7.1 飞行计划书	6
7.2 飞行环境	6
7.3 飞行速度	6
7.4 飞行航高	7
8 辐射一致性检测	7
8.1 激光雷达辐射性能检测	7
8.2 光学遥感传感器辐射性能检测	8
8.3 多传感器辐射一致性检测	9
9 几何一致性检测	10
9.1 激光雷达几何性能检测	10
9.2 光学遥感传感器几何性能检测	12
9.3 多传感器几何一致性检测	13
10 检测结果评价与整理	14
10.1 检测结果评价	14
10.2 检测结果整理	15
10.3 检测材料归档	16
附录 A (资料性) 观测手簿示例	17
附录 B (资料性) 计算手簿示例	19
附录 C (资料性) 检测报告示例	21
参考文献	23

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

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(SAC/TC 230)归口。

本文件起草单位：同济大学、上海同繁勘测工程科技有限公司、中测新图(北京)遥感技术有限责任公司、北京四维空间数码科技有限公司、北京同创达勘测有限公司、南宁市勘察测绘地理信息院有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、湖北华中电力科技开发有限责任公司。

本文件主要起草人：刘春、周源、薛云、艾克然木·艾克拜尔、艾梦池、周晓腾、薛艳丽、张书航、戴芳、胡震天、王玮、刘行波、黄崇丰、赵胜光、余婷、王晓军、王海英、陈建军、任晓春、詹智民。

无人机低空遥感监测的多传感器一致性 检测技术规范

1 范围

本文件规定了无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测的基本要求、检测条件、检测飞行、辐射一致性检测、几何一致性检测、检测结果评价与整理。

本文件适用于以固定翼和多旋翼低空无人机为平台的多传感器遥感监测的辐射和几何一致性检测。

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。

GB/T 28591—2012 风力等级

CH/T 3004—2021 低空数字航空摄影测量外业规范

CH/T 3005—2021 低空数字航空摄影规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光学遥感传感器 optical remote sensing sensor

在电磁波谱的可见光、近红外、中红外和热红外波段范围内，接收或记录物体反射或辐射的电磁波谱信息的仪器。

3.2

激光雷达 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, 4.150]

3.3

多传感器 multi-sensor

由激光雷达和光学遥感传感器组成，把两者收集、提供的信息集合或组合在一起的集成系统。

3.4

辐射一致性 radiation consistency

相同观测条件下，对于同一观测目标，多传感器集成系统辐射测量值多次结果之间的吻合程度。

注：主要衡量指标包括反射率相关性和反射率相对中误差。

3.5

几何一致性 geometric consistency

相同观测条件下，对于同一观测目标，多传感器集成系统几何测量值多次结果之间的吻合程度。

注：主要衡量指标为平均标定误差。

3.6

一致性检测 consistency testing

对给定的多传感器集成系统,按规定程序确定辐射和几何一致性程度的技术操作。

3.7

真值 true value

在一定条件下,遥感传感器观测值理论上客观存在且无任何误差的实际值。

[来源:GB/T 36296—2018,3.3]

3.8

相对真值 relative true value

一个接近真值的值,它与真值之差可忽略不计。对于给定的目的,可用其来替代真值。

[来源:GB/T 36296—2018,3.4]

3.9

反射率 reflectance

物体反射的辐射能量占总辐射能量的百分比。

3.10

稳定性 stability

光学遥感传感器的辐射特性随时间保持恒定的能力。

3.11

重复性 repeatability

在重复性测量条件下,相同待测量的重复测量结果之间的吻合程度。

3.12

世界坐标系 world coordinate system

客观世界中固定不动的绝对直角坐标系。

3.13

像素坐标系 pixel coordinate system

图像左上角为坐标原点, u 轴向右, v 轴向下,以像素为单位的直角坐标系。

3.14

重投影误差 reprojection error

光学遥感传感器目标点根据位姿转换关系投影到像素坐标系后,与目标点实际测量值的像素坐标校差。

3.15

标定误差 calibrated error

多传感器集成系统中激光雷达目标点根据位姿转换关系投影到像素坐标系后,与同名点的像素坐标校差。

3.16

几何畸变 geometric distortion

目标成像过程中,在输出图像中像点相对于其理论真实位置的错误定位。

3.17

光谱平坦性 spectral flatness

在遥感传感器有效响应波段内,辐射特性靶标光谱的变化特性。

3.18

影像亮度 brightness of image

遥感影像在 HSV 色彩空间中明度的分量。

注：HSV: Hue(色调), Saturation(饱和度), Value(明度)。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CGCS 2000: 2000 国家大地坐标系统(China Geodetic Coordinate System 2000)

GNSS: 全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System)

UAV: 无人机(Unmanned Aerial Vehicle)

5 基本要求

5.1 检测流程

多传感器一致性检测流程如图 1 所示。

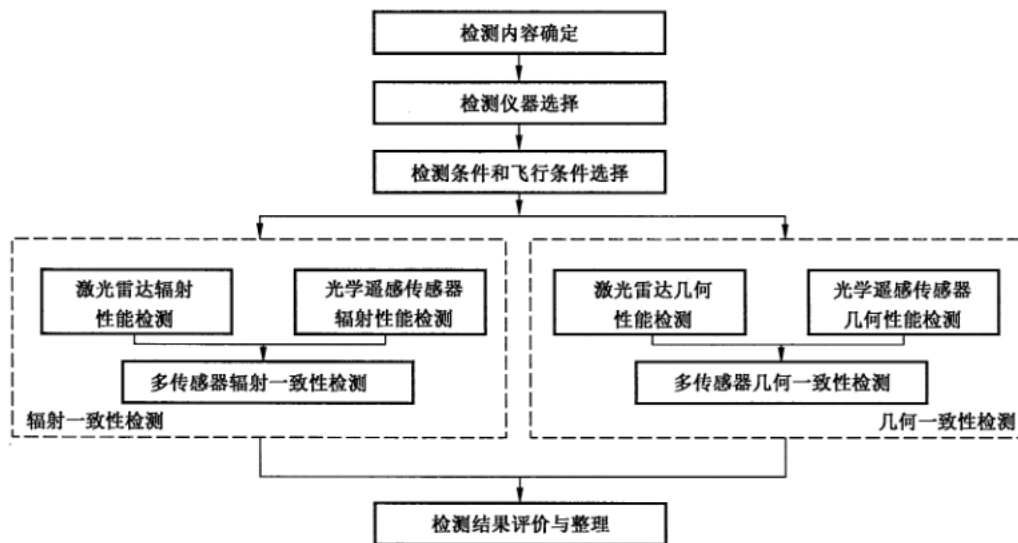


图 1 无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测流程

5.2 检测内容

多传感器一致性检测内容应符合以下要求：

- 检测前,应对单传感器辐射和几何性能进行检测;
- 检测过程应在符合要求的检测场内通过检测飞行获取检测数据,并通过数据处理和结果评价等手段,完成一致性检测;
- 检测结果应通过一致性程度进行衡量和评价;
- 检测的主要指标内容应符合表 1 的规定。

表 1 无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测指标内容

一致性类型	指标内容
激光雷达辐射一致性	反射率中误差
光学遥感传感器辐射一致性	稳定性、重复性
多传感器辐射一致性	反射率相关性、反射率相对中误差
激光雷达几何一致性	测距相对中误差
光学遥感传感器几何一致性	平均重投影误差
多传感器几何一致性	平均标定误差

5.3 检测仪器

主要检测仪器要求应符合表 2 的规定。

表 2 主要检测仪器及技术要求

检测仪器名称	技术要求
积分球	不低于三级溯源
漫反射参考标准板	光谱平坦性优于 5%；制作材料为硫酸钡、聚四氟乙烯或水基乙烷
几何一致性检测靶标	控制测量水平精度优于 1 cm，高程精度优于 2 cm
全站仪	10 mm 级仪器、5 mm 级仪器

5.4 时空基准

采用的时空基准应符合以下要求：

- a) 平面坐标系、高程基准应与所在地区基础测绘的平面坐标系、高程基准一致，如条件允许，应与 2000 国家大地坐标系(CGCS 2000)和 1985 国家高程基准建立联系；
- b) 日期应采用公元纪年，时间应采用北京时间。

5.5 数据采集

数据采集应符合以下要求：

- a) 所采集标准反射靶标影像亮度的均值应在 30%~80%之间；
- b) 所采集标准反射靶标上激光点云数应大于 100 点/靶标。

6 检测条件

6.1 一般规定

6.1.1 多传感器几何及辐射一致性检测、激光雷达几何及辐射性能检测应符合室外检测条件要求。

6.1.2 光学遥感传感器几何及辐射性能检测应符合室内检测条件要求。

6.2 室外检测条件

6.2.1 检测场环境

检测场的环境应符合以下要求：

- a) 建设区域应能够实施野外靶标控制测量；
- b) 建设区域地形坡度应小于 10° ；
- c) 光照条件应保持在 $10\ 000\ \text{lx} \sim 100\ 000\ \text{lx}$ 。

6.2.2 靶标材质

检测靶标的材质应符合以下要求：

- a) 标准反射靶标的材料应选用硫酸钡、聚四氟乙烯或水基乙烷；
- b) 标准反射靶标光谱平坦性应优于 5% ；
- c) 多传感器几何一致性检测靶标应符合图 2，靶标尺寸应不小于 $50\ \text{cm} \times 50\ \text{cm} \times 30\ \text{cm}$ ，具体包括：底面板和空心梯形锥体；

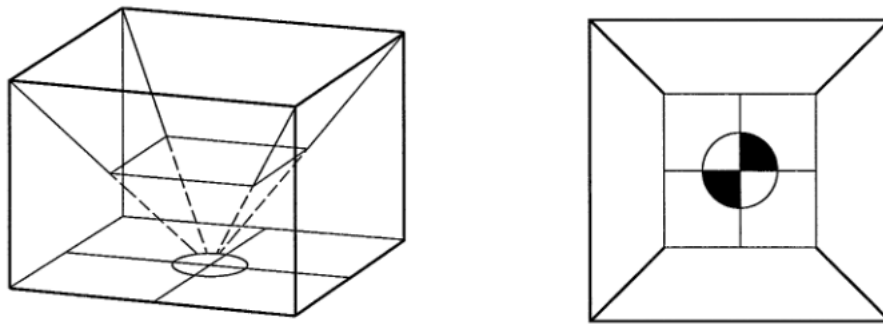


图 2 几何一致性检测靶标

- d) 空心梯形锥体的四个面板分别为底角 60° 、顶角 120° 的等腰梯形，上底长度为下底长度的 $1/2$ ；
- e) 空心梯形锥体材料由镀有漫反射材料的金属板制成，漫反射材料应选用硫酸钡、聚四氟乙烯或水基乙烷；
- f) 几何一致性靶标控制测量的水平位置精度应优于 $1\ \text{cm}$ ，高程精度应优于 $2\ \text{cm}$ ；
- g) 几何一致性靶标底板中心的材料应选用硫酸钡、聚四氟乙烯或水基乙烷。

6.2.3 靶标布设

检测靶标的布设应符合以下要求：

- a) 多传感器视场的中心和四角应布设一致性检测靶标，并保证靶标均匀覆盖传感器垂直向下 45° 观测角的可视范围；
- b) 靶标的摆放位置应保证光学遥感传感器在一次成像中清晰拍摄到每个靶标，激光雷达传感器可在短时间间隔内扫描到所有靶标。

6.3 室内检测条件

6.3.1 辐射性能检测设施

辐射性能检测设施应符合以下要求：

- a) 检测场所在室内，确保无尘；

- b) 检测场所内只有单一光源,无杂光;
- c) 检测场所内温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- d) 检测场所内相对湿度为 $50\%\sim 70\%$;
- e) 检测场所内大气压为常压 $86\text{ kPa}\sim 106\text{ kPa}$;
- f) 积分球标准不低于三级溯源。

6.3.2 几何性能检测设施

几何性能检测设施应符合以下要求:

- a) 检测场所在室内,确保无尘;
- b) 检测场所内只有单一光源,无杂光;
- c) 检测场所内温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- d) 检测场所内相对湿度为 $50\%\sim 70\%$;
- e) 检测场所内大气压为常压 $86\text{ kPa}\sim 106\text{ kPa}$;
- f) 棋盘格制作材料应保证影像成像清晰;
- g) 棋盘格尺寸不小于 $20\text{ cm}\times 25\text{ cm}$;
- h) 几何畸变检测的影像数不少于 20 张。

7 检测飞行

7.1 飞行计划书

检测飞行前应编制飞行计划书,飞行计划书编制应遵守 CH/T 3004—2021 和 CH/T 3005—2021 的规定,具体应包括以下内容:

- a) 飞机型号;
- b) 起降点信息;
- c) 以经纬度和图幅号略图表明的飞行区域;
- d) 飞行区域及面积;
- e) 飞行季节及飞行时间的选择;
- f) 飞行任务的执行期限;
- g) 其他相关的技术要求等。

7.2 飞行环境

检测飞行环境应符合以下要求:

- a) 飞机起降点四周视野开阔,视场内障碍物的高度角应不大于 20° ,GNSS 信号接收不应失锁;
- b) 检测飞行前应评估 GNSS 信号强度、观察到的卫星数量和无人机平台静止时的准确位置,观察到的卫星数量应不少于 10 颗;
- c) 检测飞行时,既要保证充足的光照度,又要避免过大的阴影,太阳高度角应大于 35° ,且飞行期间太阳高度角变化应不大于 20° ;
- d) 飞行环境风应不大于 GB/T 28591—2012 所定义的风力等级 5 级。

7.3 飞行速度

检测飞行过程中,飞行速度(地速)应符合以下要求:

- a) 固定翼无人机最大飞行速度应不大于 30 m/s ,多旋翼无人机最大飞行速度应不大于 16 m/s ;
- b) 应根据地面实际风速对任务航速进行调整,风力较大时降低任务航速,无人机应在任务高度稳

- 定飞行；
- c) 航线中飞行加速度应不大于 2.5 m/s^2 。

7.4 飞行航高

检测飞行过程中,飞行航高应符合以下要求。

- a) 平台飞行升限应不大于 $1\ 000 \text{ m}$,飞行高度(H)应根据公式(1)由机载多传感器地面观测分辨率要求决定:

$$H = \frac{f \times GSD}{a} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- H ——飞行高度,单位为米(m);
- f ——镜头焦距,单位为毫米(mm);
- GSD ——地面分辨率,单位为米(m);
- a ——传感器像元尺寸,单位为毫米(mm)。

- b) 一条航线内航高变化应不大于相对航高的 $5\% \sim 10\%$,实际航高变化应不大于设计航高的 5% 。
- c) 一条航线上相邻观测数据的航高之差应不大于 5 m ,实际航高与设计航高之差应不大于 5 m 。

8 辐射一致性检测

8.1 激光雷达辐射性能检测

8.1.1 衡量指标

应采用反射率中误差(m_f)作为衡量指标,激光雷达反射率中误差(m_f)应按公式(2)进行计算:

$$m_f = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \hat{R}_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

- m_f ——反射率中误差,以百分数表示;
- R_i ——第 i 个标准反射靶标由激光雷达所测反射率,以百分数表示;
- \hat{R}_i ——第 i 个标准反射靶标实际反射率,以百分数表示;
- n ——标准反射靶标个数。

8.1.2 检测方法

应按以下步骤进行:

- a) 在检测场内均匀布设反射率为 5% 、 20% 、 40% 、 60% 和 100% 的标准反射靶标各不少于 4 个;
- b) 利用地物光谱仪采集每个标准反射靶标的实际反射率值,作为反射特性相对真值 \hat{R}_i ;
- c) 利用激光雷达获取靶标场内不同标准反射靶标的距离数据;
- d) 利用激光雷达获取靶标场内不同标准反射靶标的波形数据;
- e) 使用经验模型波形分解方法进行回波波形的参数提取,获得激光回波脉冲的振幅、波宽以及中心波长位置;
- f) 对地物波峰峰值 A 、测距距离 L 和反射率 R 之间的关系进行二次多项式曲面拟合,获得经验

辐射校正模型 $f(A, L, R)$;

- g) 对经验辐射校正模型进行内插,得到地物波峰峰值 A 、测距距离 L 和反射率 R 之间的连续关系,从而将波形波峰峰值校正成地物的反射率;
- h) 利用经验校正模型测得每个标准反射靶标的反射率值 R_i ;
- i) 将激光雷达所测反射率值与地物光谱仪所测反射率值代入公式(2),求出激光雷达反射率中误差。

8.2 光学遥感传感器辐射性能检测

8.2.1 衡量指标

应采用稳定性和重复性作为衡量指标,计算方法如下。

- a) 稳定性 (RSD) 应按公式(3)进行计算:

$$RSD = \frac{SD}{\overline{DN}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- RSD ——稳定性,以百分数表示;
- SD —— n 次测量值的标准差;
- \overline{DN} —— n 次测量所得结果的算术平均值。

- b) 测量值算术平均 (\overline{DN}) 应按公式(4)进行计算:

$$\overline{DN} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DN_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- DN_i ——第 i 次测量的数字响应值;
- i ——测量值序号;
- n ——总观测次数。

- c) 测量值的标准差 (SD) 应按公式(5)进行计算:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (DN_i - \overline{DN})^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

- d) 重复性 [$s(x)$] 应按公式(6)进行计算:

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

- $s(x)$ ——重复性,以百分数表示;
- i ——测量值序号;
- n ——总测量次数;
- x_i ——第 i 次测量的测得值;
- \bar{x} —— n 次测量所得结果的算术平均值。

8.2.2 检测方法

8.2.2.1 稳定性检测方法

应按以下步骤进行:

- a) 接通积分球直流稳压电源,使积分球的灯源亮度均匀地形成无限大扩散光源;
- b) 把被测传感器安置在专用架上,并调节积分球光栏的中心部位,使积分球光源通过被测传感器

物镜成像在焦平面上；

- c) 调节积分球灯源输出功率，等待积分球灯源输出稳定后，预热 20 min；
- d) 调整被测传感器的感光度 ISO 值和积分时间，保证传感器成像清晰且不过曝；
- e) 触发被测传感器成像，得到该输出功率下的光学遥感影像；
- f) 以 3 min 为时间间隔，重复步骤 e)，共测量 1 h；
- g) 可利用中心像元区域 9 点平均法，代替光学遥感影像的单次测量平均数字响应值 DN_i ；
- h) 根据公式(3)、公式(4)、公式(5)求出光学遥感传感器的稳定性。

8.2.2.2 重复性检测方法

应按以下步骤进行：

- a) 接通积分球直流稳压电源，使积分球的灯源亮度均匀地形成无限大扩散光源；
- b) 把被测传感器安置在专用架上，并调节积分球光阑的中心部位，使积分球光源通过被测传感器物镜成像在焦平面上；
- c) 调节积分球灯源输出功率，等待积分球灯源输出稳定后，预热 20 min；
- d) 调整被测传感器的感光度 ISO 值和积分时间，传感器应清晰成像且不过曝；
- e) 触发被测传感器成像，得到该输出功率下的光学遥感影像；
- f) 以 15 s 为时间间隔，重复步骤 e)，共测量 5 min；
- g) 可利用中心像元区域 9 点平均法，代替光学遥感影像的单次测量平均数字响应值 DN_i ；
- h) 根据公式(6)求出光学遥感传感器的重复性。

8.3 多传感器辐射一致性检测

8.3.1 衡量指标

应采用反射率相关性 (r_f) 和反射率相对中误差 (M_f) 作为衡量指标，计算方法如下。

- a) 反射率相关性 (r_f) 应按公式(7)进行计算：

$$r_f = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{1,i} - \overline{R_1})(R_{2,i} - \overline{R_2})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{1,i} - \overline{R_1})^2 \sum_{i=1}^n (R_{2,i} - \overline{R_2})^2}} \dots\dots\dots(7)$$

式中：

- r_f ——反射率相关性，以百分数表示；
- $R_{1,i}$ ——第 i 个标准反射靶标由激光雷达所测反射率，以百分数表示；
- $R_{2,i}$ ——第 i 个标准反射靶标由光学遥感传感器所测反射率，以百分数表示；
- $\overline{R_1}$ ——激光雷达所测反射率值的算术平均值，以百分数表示；
- $\overline{R_2}$ ——光学遥感传感器所测反射率值的算术平均值，以百分数表示；
- n ——标准反射靶标个数。

- b) 反射率相对中误差 (M_f) 应按公式(8)进行计算：

$$M_f = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{1,i} - R_{2,i})^2}{2(n-1)}} \dots\dots\dots(8)$$

式中：

- M_f ——反射率相对中误差，以百分数表示；

- $R_{1,i}$ ——第 i 个标准反射靶标由激光雷达所测反射率,以百分数表示;
- $R_{2,i}$ ——第 i 个标准反射靶标由光学遥感传感器所测反射率,以百分数表示;
- n ——标准反射靶标个数。

8.3.2 检测方法

应按以下步骤进行:

- a) 在检测场内均匀布设反射率为 5%、20%、40%、60% 和 100% 的标准反射靶标各不少于 4 个;
- b) 利用多传感器集成系统同步获取标准反射靶标的激光雷达点云数据和光学遥感影像数据;
- c) 通过人工目视判别从激光雷达与光学遥感传感器观测值中提取标准反射靶标;
- d) 基于激光雷达数据,使用经验模型波形分解方法进行回波波形的参数提取,获得激光回波脉冲的振幅、波宽以及中心波长位置;
- e) 对地物波峰峰值 A 、测距距离 L 和反射率 R 之间的关系进行二次多项式曲面拟合,获得经验辐射校正模型 $f(A, L, R)$;
- f) 利用经验校正模型测得每个标准反射靶标的反射率值 $R_{1,i}$;
- g) 基于光学遥感影像数据,采用相对辐射校正的方法,计算标准反射靶标的反射率值 $R_{2,i}$;
- h) 根据公式(7)计算激光雷达测得的反射率与光学遥感传感器测得反射率之间的相关性;
- i) 根据公式(8)计算激光雷达和光学遥感传感器反射率相对中误差。

9 几何一致性检测

9.1 激光雷达几何性能检测

9.1.1 衡量指标

应采用测距相对中误差 (m_z) 作为衡量指标,计算方法如下。

- a) 测距中误差 (m_j) 应按公式(9)进行计算:

$$m_j = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \hat{L}_i)^2}{n}} \dots\dots\dots(9)$$

式中:

- m_j ——测距中误差,单位为米(m);
- L_i ——第 i 个标准反射靶标由激光雷达所测距离,单位为米(m);
- \hat{L}_i ——第 i 个标准反射靶标实际距离,单位为米(m);
- n ——标准反射靶标个数。

- b) 激光雷达平均测距值 (\bar{L}) 应按公式(10)进行计算:

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{L}_i}{n} \dots\dots\dots(10)$$

式中:

- \bar{L} ——平均测距值,单位为米(m);
- \hat{L}_i ——第 i 个标准反射靶标实际距离,单位为米(m);
- n ——标准反射靶标个数。

- c) 激光雷达测距相对中误差 (m_z) 应按公式(11)进行计算:

$$m_z = \frac{m_j}{L} \dots\dots\dots(11)$$

式中:

m_z ——测距相对中误差,以百分数表示。

9.1.2 检测方法

应按以下步骤进行。

- a) 在激光雷达标称的可观测距离范围,根据距离值差异,均匀布设不少于5个标准反射靶标。
- b) 调整激光雷达和标准反射靶标位置,激光雷达应在短时间间隔内扫描到所有标准反射靶标。
- c) 利用测距精度不低于10 mm级全站仪测算激光雷达与标准反射靶标之间的斜距,每个标准反射靶标独立观测次数应不少于5次。
- d) 全站仪测算斜距的加常数 K_1 、乘常数 R_1 的改正值应根据仪器检测结果进行计算。
- e) 全站仪测算斜距的气象改正值 (ΔD),应按公式(12)进行计算:

$$\Delta D = S(n_0 - n_g) / n_g \dots\dots\dots(12)$$

式中:

ΔD ——气象改正值,单位为米(m);

S ——观测距离,单位为米(m);

n_0 ——仪器气象参考点上的折射率,以百分数表示,由仪器设计给出;

n_g ——作业气象条件下实际的群折射率,以百分数表示,按仪器说明书指定的公式计算。

- f) 利用点云数据计算激光雷达与不同标准反射靶标之间的距离,每个标准反射靶标独立观测次数应不少于5次。
- g) 利用激光雷达测算的标准反射靶标距离和全站仪测算的距离,列出测距误差方程式,如公式(13)所示:

$$\tilde{L}_r = (L_r + v_r) + K_2 + R_2 L_r \dots\dots\dots(13)$$

式中:

\tilde{L}_r ——第 r 个标准反射靶标距离相对真值,利用全站仪测得,单位为米(m);

L_r ——激光雷达测距观测值,单位为米(m);

K_2 ——激光雷达测距加常数,以百分数表示;

R_2 ——激光雷达测距乘常数,以百分数表示;

v_r ——激光雷达测距改正值,单位为米(m)。

- h) 将公式(13)改写成测距误差方程式,如公式(14)所示:

$$v_r = -K_2 - R_2 L_r + (\tilde{L}_r - L_r) \dots\dots\dots(14)$$

- i) 采用最小二乘法计算误差偏移改正数,分别为加常数 K_2 和乘常数 R_2 。
- j) 按照公式(15)计算激光雷达改正测距值 (L_Q):

$$L_Q = L_L + K_2 + R_2 L_L \dots\dots\dots(15)$$

式中:

L_Q ——激光雷达改正测距值,单位为米(m);

L_L ——激光雷达测距值,单位为米(m);

K_2 ——激光雷达测距加常数,以百分数表示;

R_2 ——激光雷达测距乘常数,以百分数表示。

- k) 将改正后的距离作为激光雷达测距值,将测距精度5 mm级全站仪测得的距离作为相对真值,利用公式(9)、公式(10)和公式(11)计算激光雷达测距相对中误差。

9.2 光学遥感传感器几何性能检测

9.2.1 衡量指标

应采用平均重投影误差 (M_z) 作为衡量指标,计算方法如下。

a) 任意三维空间点的像素坐标与世界坐标之间的转换关系应按公式(16)进行计算:

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(16)$$

式中:

- s_i ——深度;
- u_i ——三维空间点的像素坐标;
- v_i ——三维空间点的像素坐标;
- \mathbf{K} ——光学传感器内参矩阵;
- $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ ——光学传感器外参矩阵;
- X_i ——三维空间点的世界坐标,单位为米(m);
- Y_i ——三维空间点的世界坐标,单位为米(m);
- Z_i ——三维空间点的世界坐标,单位为米(m)。

b) 将公式(16)改写成矩阵形式,如公式(17)所示:

$$s_i \mathbf{w}_i = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}] \mathbf{P}_i \dots\dots\dots(17)$$

式中:

- \mathbf{w}_i ——三维空间点的像素坐标矩阵;
- \mathbf{P}_i ——三维空间点的世界坐标矩阵。

c) 利用重投影误差构造代价函数,并最小化代价函数,如公式(18)所示:

$$\xi^* = \arg \min_{\xi} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\| \mathbf{w}_i - \frac{1}{s_i} \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}] \mathbf{P}_i \right\|_2^2 \dots\dots\dots(18)$$

式中:

- ξ —— $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ 的李代数表示;
- ξ^* ——使得代价函数最小的一组 $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ 。

d) 在满足公式(18)的条件下,应按公式(19)计算平均重投影误差 (M_z):

$$M_z = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left\| \mathbf{w}_i - \frac{1}{s_i} \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}] \mathbf{P}_i \right\|_2^2}}{n} \dots\dots\dots(19)$$

式中:

- M_z ——平均重投影误差,单位为像素(pixel);
- n ——三维空间点个数。

9.2.2 检测方法

应按以下步骤进行:

- a) 制作一张棋盘格板,并将棋盘格安放在稳定位置;
- b) 设置传感器参数,保证传感器拍摄影像清晰;
- c) 确定光学传感器与棋盘格之间的距离,通过调整棋盘格或光学传感器的方向,拍摄不同角度的

照片,保证棋盘格影像能完整覆盖光学传感器视场;

- d) 调整光学传感器与棋盘格的距离,重复步骤 c),保证在 4 个以上不同位置获取能覆盖光学传感器视场的影像;
- e) 从影像中提取棋盘格角点,并在理想无畸变情况下,估算光学传感器内外参数矩阵;
- f) 采用最小二乘法计算光学传感器径向畸变和切向畸变参数;
- g) 根据几何畸变参数,对传感器几何畸变进行纠正;
- h) 根据公式(16)~公式(19)计算光学遥感传感器平均重投影误差。

9.3 多传感器几何一致性检测

9.3.1 衡量指标

应采用平均标定误差 (P_m) 作为衡量指标,平均标定误差 (P_m) 应按公式(20)进行计算:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \dots\dots\dots(20)$$

式中:

P_m ——平均标定误差,单位为像素(pixel);

P_i ——第 i 个几何一致性检测靶标标定误差,单位为像素(pixel);

n ——几何一致性检测靶标个数。

9.3.2 检测方法

应按以下步骤进行:

- a) 在多传感器集成系统的有效视场内布设不少于 20 个几何一致性检测靶标;
- b) 调整靶标的位置,应在视场内的位置和深度有差异,同时多传感器集成系统应能够对靶标结构特征进行有效识别;
- c) 同步进行数据采集,获取激光雷达点云与光学遥感影像,通过人工目视判别从激光雷达与光学遥感传感器观测值中提取几何一致性检测靶标;
- d) 针对单个检测靶标,获取属于靶标的激光三维点云,即落于空心梯形棱台内、外不同侧平面中的三维数据点,依次利用单个平面数据点计算所观测到的梯形棱台侧平面参数,完成至少 3 个以上参数的计算后,基于梯形棱台的多个侧面相交于一点的关系,计算梯形棱台公共顶点的空间位置坐标;
- e) 计算检测靶标底面标识图案中心在光学遥感传感器影像中的像素坐标;
- f) 假设单个靶标得到的梯形锥体公共顶点坐标在激光雷达坐标系下的值为 (X_L, Y_L, Z_L) ,标识图案中心像点坐标为 (x_c, y_c) ,两坐标系在激光雷达坐标系下的原点偏移量为 (dX, dY, dZ) ,坐标系之间的旋转矩阵如公式(21)所示:

$$\mathbf{R}_{LC}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(21)$$

- g) 基于该靶标已知的空间对应关系,地面标识图案中心的空间位置应与梯形棱台的公共顶点重合,重复步骤 d)和 e)以收集视场内的所有靶标观测值,根据共线方程列出如公式(22)所示的约束关系:

$$\begin{cases} x_c = -f \frac{a_1(X_L - dX) + b_1(Y_L - dY) + c_1(Z_L - dZ)}{a_3(X_L - dX) + b_3(Y_L - dY) + c_3(Z_L - dZ)} \\ y_c = -f \frac{a_2(X_L - dX) + b_2(Y_L - dY) + c_2(Z_L - dZ)}{a_3(X_L - dX) + b_3(Y_L - dY) + c_3(Z_L - dZ)} \end{cases} \dots\dots\dots(22)$$

h) 将共线方程关系进行泰勒公式展开,并忽略其中的二次项,得到公式(23)所示的标定参数误差方程:

$$V = C_1 \times \Delta dX + C_2 \times \Delta dY + C_3 \times \Delta dZ + C_4 \times \Delta \alpha + C_5 \times \Delta \beta + C_6 \times \Delta \gamma + L \dots\dots(23)$$

式中:

V ——残差向量;

C_i ——对标定参数求导之后的未知数系数(*i*=1,2,3,4,5,6);

L ——观测值常数项。

i) 在设定初始值的基础上,解算法方程未知数,并迭代更新未知数向量,最终求得未知数,即标定参数的最佳值。由此获取激光雷达坐标系到光学遥感传感器坐标系下的转换关系如公式(24)所示:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \mathbf{R}_{LC} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(24)$$

式中:

s ——深度;

u ——几何一致性检测靶标的像素坐标;

v ——几何一致性检测靶标的像素坐标;

K ——光学传感器内参矩阵;

R_{LC} ——光学传感器与激光雷达坐标系转换矩阵;

X ——几何一致性检测靶标的世界坐标,由激光雷达测得,单位为米(m);

Y ——几何一致性检测靶标的世界坐标,由激光雷达测得,单位为米(m);

Z ——几何一致性检测靶标的世界坐标,由激光雷达测得,单位为米(m)。

j) 按公式(24)将激光雷达所测几何一致性检测靶标的坐标重投影至影像中,并计算影像中同名标志点像素坐标校差;

k) 按公式(20)计算多传感器平均标定误差。

10 检测结果评价与整理

10.1 检测结果评价

检测结果评价应符合表3的规定。

表3 无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测结果指标评价

内容		衡量指标	数值范围	一致性程度	计算依据
辐射一致性	激光雷达 辐射一致性	反射率中误差	$m_f \leq 3\%$	优	公式(2)
			$3\% < m_f \leq 5\%$	良	
			$5\% < m_f \leq 10\%$	一般	
	光学遥感传感器 辐射一致性*	稳定性	$RSD \leq 1\%$	优	公式(3)、公式(4)、 公式(5)
			$1\% < RSD \leq 3\%$	良	
			$3\% < RSD \leq 5\%$	一般	
		重复性	$s(x) \leq 0.5\%$	优	公式(6)
			$0.5\% < s(x) \leq 1\%$	良	
			$1\% < s(x) \leq 3\%$	一般	
	多传感器 辐射一致性*	反射率相关性	$r_i \geq 99\%$	优	公式(7)
			$95\% \leq r_i < 99\%$	良	
			$90\% \leq r_i < 95\%$	一般	
反射率相对中误差		$M_f \leq 3\%$	优	公式(8)	
		$3\% < M_f \leq 5\%$	良		
		$5\% < M_f \leq 10\%$	一般		
几何一致性	激光雷达 几何一致性	测距相对中误差	$m_z \leq 1\%$	优	公式(9)、公式(10)、 公式(11)
			$1\% < m_z \leq 3\%$	良	
			$3\% < m_z \leq 5\%$	一般	
	光学遥感传感器 几何一致性	平均重投影误差/pixel	$M_z \leq 0.3$	优	公式(16)、公式(17)、 公式(18)、公式(19)
			$0.3 < M_z \leq 0.5$	良	
			$0.5 < M_z \leq 1.0$	一般	
	多传感器 几何一致性	平均标定误差/pixel	$P_m \leq 0.5$	优	公式(20)
			$0.5 < P_m \leq 1.0$	良	
			$1.0 < P_m \leq 2.0$	一般	
注：*为较低单指标一致性程度所评估的一致性检测结果。					

10.2 检测结果整理

检测结果的整理应符合以下要求：

- 检测结果应以具体的检测指标为单位整理，包括一致性检测数据结果、观测手簿、计算手簿；
- 辐射一致性检测观测手簿格式参照附录 A 中 A.1 的示例，应记录环境数据、标准反射靶标布设位置、人工判别的标准反射靶标观测值等检测条件描述和观测数据；
- 辐射一致性检测计算手簿格式参照附录 B 中 B.1 的示例，应包括反射率相关系数、反射率相对中误差、稳定性、重复性的求解过程及结果；
- 几何一致性检测观测手簿格式参照附录 A 中 A.2 的示例，应记录环境数据、几何一致性靶标布设位置、人工判别的几何一致性靶标观测值等检测条件描述和观测数据；

- e) 几何一致性检测计算手簿格式参照附录 B 中 B.2 的示例,包括平均标定误差、平均重投影误差、测距相对中误差的求解过程及结果。

10.3 检测材料归档

多传感器一致性检测数据处理和结果整理完成后,应将检测过程中记录材料进行归档,主要包括以下内容:

- a) 检测项目清单;
- b) 光学遥感影像数据;
- c) 激光雷达点云数据;
- d) 检测报告;
- e) 其他资料。

检测报告可参照附录 C 的图 C.1,但不限于样例提供的格式和内容。

附录 A
(资料性)
观测手簿示例

A.1 辐射一致性检测观测手簿示例

多传感器辐射一致性检测观测手簿示例见图 A.1。

基本信息	检测场范围	×××××	天气条件	晴朗
	温度	20 ℃	风速	小于 4 m/s
	辐射靶标反射率范围	5%~100%	靶标布设个数	20
	检测场典型地物	裸地、道路、植被	观测起讫时间	9:00—11:00
	光学遥感传感器型号	GUESS V3	激光雷达型号	VUX-1UAV
辐射靶标布设略图				
光学遥感传感器观测值	靶标 1	靶标 2	...	靶标 20
第一架次	(500,20);(521,20); (522,20);(518,21)...			
第二架次				
第三架次				
第四架次				
激光雷达观测值	靶标 1	靶标 2	...	靶标 20
第一架次	P1100,P1121, P1360...			
第二架次				
第三架次				
第四架次				
<p>注：光学遥感传感器观测值表示辐射靶标在光学遥感影像中的像素坐标；激光雷达观测值表示落在辐射靶标上的激光雷达点号。</p> <p>记录员：××× 日期：××××年××月××日</p> <p>检查员：××× 日期：××××年××月××日</p>				

图 A.1 多传感器辐射一致性检测观测手簿示例

A.2 几何一致性检测观测手簿示例

多传感器几何一致性检测观测手簿示例见图 A.2。

基本信息	检测场范围	×××××	天气条件	晴朗
	温度	18.5 ℃	风速	小于 4 m/s
	检测靶标布设个数	20	观测起讫时间	9:00—11:00
	光学遥感传感器型号	GUESS V3	激光雷达型号	VUX-1UAV
几何一致性检测靶标布设略图				
光学遥感传感器观测值	靶标 1	靶标 2	...	靶标 20
第一架次	(480,30);(481,30); (480,31);(481,31)...			
第二架次				
第三架次				
第四架次				
激光雷达观测值	靶标 1	靶标 2	...	靶标 20
第一架次	P1130,P1151, P1368...			
第二架次				
第三架次				
第四架次				
<p>注：光学遥感传感器观测值表示辐射靶标在光学遥感影像中的像素坐标；激光雷达观测值表示落在辐射靶标上的激光雷达点号。</p> <p>记录员：××× 日期：××××年××月××日</p> <p>检查员：××× 日期：××××年××月××日</p>				

图 A.2 多传感器几何一致性检测观测手簿示例

附录 B
(资料性)
计算手簿示例

B.1 辐射一致性检测计算手簿示例

多传感器辐射一致性检测计算手簿示例见图 B.1。

靶标点号	激光雷达测量反射率值	光学遥感传感器测量反射率值	反射率差值平方
1	0.061	0.042	0.000 361
2	0.058	0.045	0.000 169
3	0.123	0.145	0.000 484
4	0.119	0.139	0.000 4
5	0.209	0.226	0.000 289
6	0.211	0.223	0.000 144
7	0.291	0.306	0.000 225
8	0.316	0.293	0.000 529
9	0.411	0.426	0.000 225
10	0.403	0.392	0.000 121
11	0.519	0.491	0.000 784
12	0.506	0.516	0.000 1
13	0.609	0.596	0.000 169
14	0.616	0.591	0.000 625
15	0.704	0.719	0.000 225
16	0.696	0.709	0.000 169
17	0.829	0.813	0.000 256
18	0.809	0.792	0.000 289
19	0.982	0.969	0.000 169
20	0.976	0.986	0.000 1
Σ	—	—	0.005 833

注：

$$\text{反射率相关性: } r_f = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{1,i} - \bar{R}_1) (R_{2,i} - \bar{R}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{1,i} - \bar{R}_1)^2 \sum_{i=1}^n (R_{2,i} - \bar{R}_2)^2}} = 99.83\%$$

$$\text{反射率相对中误差: } M_f = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{1,i} - R_{2,i})^2}{2(n-1)}} = 1.24\%$$

多传感器辐射一致性按照表 3 进行评价。

记录员: ×××
日期: ××××年××月××日

检查员: ×××
日期: ××××年××月××日

图 B.1 多传感器辐射一致性检测计算手簿示例

B.2 几何一致性检测计算手簿示例

多传感器几何一致性检测计算手簿示例见图 B.2。

靶标点号	激光雷达点世界坐标 m	激光雷达点 像素坐标	光学遥感传感器 同名点像素坐标	标定误差 pixel
1	(0.538, -0.808, 0.295)	(305.1, 144.2)	(304.9, 144.4)	0.233
2	(0.745, 2.104, 1.301)	(487.1, 409.1)	(487.2, 409.1)	0.103
3	(-1.208, 0.711, -2.030)	(155.3, 370.2)	(155.4, 370.5)	0.315
4	(0.632, -1.235, -2.437)	(65.0, 30.7)	(64.9, 30.9)	0.161
5	(1.425, -1.398, 0.851)	(353.6, 71.8)	(354.0, 71.6)	0.397
6	(0.003, 2.061, 0.038)	(430.4, 451.0)	(430.1, 451.4)	0.563
7	(-0.138, 1.751, 0.215)	(394.1, 426.7)	(394.0, 426.7)	0.148
8	(0.420, -1.919, 1.288)	(248.9, 98.7)	(248.6, 98.7)	0.304
9	(-0.617, -1.566, 1.349)	(182.6, 176.9)	(182.7, 176.7)	0.167
10	(-0.078, 0.472, 0.152)	(319.0, 293.4)	(319.9, 293.7)	0.282
11	(1.797, -0.985, -0.596)	(415.6, 13.2)	(415.1, 13.2)	0.426
12	(-2.198, 0.460, -0.944)	(57.2, 423.8)	(56.7, 423.7)	0.507
13	(1.871, -0.019, -0.109)	(480.7, 122.4)	(481.2, 122.6)	0.588
14	(-1.841, -0.327, 0.182)	(100.6, 323.2)	(100.6, 322.9)	0.223
15	(-1.755, 0.226, 0.398)	(145.8, 373.2)	(145.9, 347.0)	0.235
16	(0.201, -2.046, 0.980)	(221.1, 87.6)	(221.1, 88.0)	0.356
17	(0.375, 1.204, 0.630)	(407.5, 343.2)	(407.2, 342.5)	0.786
18	(0.607, -0.532, 0.281)	(327.2, 164.1)	(326.9, 163.9)	0.290
19	(-0.379, 0.861, -1.243)	(300.8, 332.0)	(300.8, 331.7)	0.277
20	(0.853, 0.986, -0.599)	(452.7, 270.3)	(453.1, 269.8)	0.619
Σ	—	—	—	0.349

注：

$$\text{平均标定误差: } P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} = 0.349 \text{ pixel}$$

多传感器几何一致性按照表 3 进行评价。

记录员: ×××
日期: ××××年××月××日

检查员: ×××
日期: ××××年××月××日

图 B.2 多传感器几何一致性检测计算手簿示例

附录 C
(资料性)
检测报告示例

图 C.1 给出了检测报告的示例。

<h1>检 测 报 告</h1>	
报告编号: ×××××	
产品名称:	×××××
委托单位:	×××××
检测日期:	_____年 _____月 _____日
检测者:	_____

图 C.1 多传感器几何一致性检测计算手簿示例

1. 检测目的：
对××××公司生产的低空多传感器集成系统的辐射和几何一致性进行检测，为该集成系统开展低空遥感监测作业提供指标依据。
2. 检测依据：
GB/T 41450—2022《无人机低空遥感监测的多传感器一致性检测技术规范》。
3. 检测项目：
多传感器一致性检测主要项目如表 C.1 所示。

表 C.1 主要检测项目

一致性类型	检测项目
激光雷达辐射一致性	反射率中误差
光学遥感传感器辐射一致性	稳定性、重复性
多传感器辐射一致性	反射率相关性、反射率相对中误差
激光雷达几何一致性	测距相对中误差
光学遥感传感器几何一致性	平均重投影误差
多传感器几何一致性	平均标定误差

4. 检测仪器：
多传感器一致性检测过程中相关检测仪器性能参数如表 C.2 所示。

表 C.2 主要检测仪器及性能参数

检测仪器名称	性能参数
积分球	不低于三级溯源
漫反射参考标准板	光谱平坦性优于 5%；制作材料为硫酸钡、聚四氟乙烯或水基乙烷
几何一致性检测靶标	控制测量水平精度优于 1 cm，高程精度优于 2 cm
全站仪	10 mm 级仪器、5 mm 级仪器

5. 检测结果
多传感器一致性检测结果如表 C.3 所示。

表 C.3 检测结果表

内容		检测项目	检测结果	一致性程度
辐射一致性	激光雷达辐射一致性	反射率中误差		
	光学遥感传感器辐射一致性*	稳定性		
		重复性		
	多传感器辐射一致性*	反射率相关性		
反射率相对中误差				
几何一致性	激光雷达几何一致性	测距相对中误差		
	光学遥感传感器几何一致性	平均重投影误差		
	多传感器几何一致性	平均标定误差		

注：* 为较低单指标一致性程度所评估的一致性检测结果。

6. 附件
观测手簿、计算手簿。

图 C.1 多传感器几何一致性检测计算手簿示例（续）

参 考 文 献

- [1] GB/T 14950—2009 摄影测量与遥感术语
 - [2] GB/T 15314—1994 精密工程测量规范
 - [3] GB/T 27411—2012 检测实验室中常用不确定度评定方法与表示
 - [4] GB/T 36100—2018 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法
 - [5] GB/T 36296—2018 遥感产品真实性检验导则
 - [6] GB/T 38058—2019 民用多旋翼无人机系统试验方法
 - [7] CH/T 8021—2010 数字航摄仪检定规程
 - [8] CH/T 8023—2011 机载激光雷达数据处理技术规范
 - [9] CH/T 9029—2019 基础性地理国情监测内容与指标
-

中华人民共和国
国家标准
无人机低空遥感监测的多传感器一致性
检测技术规范

GB/T 41450—2022

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.75 字数 52 千字
2022年4月第一版 2022年4月第一次印刷

*

书号: 155066·1-70164 定价 34.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 41450-2022



码上扫一扫 正版服务到

