

ICS: 13.040.20

CCS: Z 10

# 团 体 标 准

T/ACEF □□□-20□□

## 固定翼通用航空平台 大气污染物航空遥感测量 技术指南

Technical guidance for airborne remote sensing measurement of air pollutants for  
fixed-wing universal aircraft platform

(征求意见稿)

20□□-□□-□□发布

20□□-□□-□□实施

中华环保联合会 发布

# 目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 系统组成与功能	3
5 技术要求	5
5.1 航空测量飞行平台	5
5.2 大气污染物航空遥感测量系统	6
5.3 数据采集、存储和处理系统	10
6 检测与质量控制	11
6.1 检测内容	11
6.2 质量保证与质量控制	12
6.3 数据质量分析	12

## 前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《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。

本标准由中国科学院合肥物质科学研究院提出。

本标准由中华环保联合会归口。

本标准起草单位：中国科学院合肥物质科学研究院、中国科学技术大学、北京市人工影响天气中心、山西省人工增雨防雷技术中心、北京大学、浙江大学

本标准主要起草人：王薇、周海金、奚亮、司福祺、刘诚、赵德龙、周崑、黄梦宇、丁德平、李义宇、任刚、杨永龙、董亚宁、吴志军、陈景川、张萃琦、刘丹彤、李少萌。

## 引言

准确观测区域大气污染物的时空分布，对评估区域大气污染演变趋势、认清大气污染的形成机制和解析大气污染来源具有重要意义。航空遥感测量大气污染物，具备观测区域广、空间分辨率高、多组分、非接触等技术优势。为了提高大气污染物航空遥感监测结果的准确性，规范航空遥感测量大气污染物的观测技术和方法，特制定本指南。

## 1 范围

本文件提出了固定翼通用航空平台大气污染物航空遥感测量系统的组成与功能、技术要求、检测与质量控制方法的指南。

本文件适用于固定翼通用航空平台上采用航空遥感测量方法对大气污染物分布的高空观测，也可用于大气污染物航空遥感测量系统的设计、改装、集成、检测和应用。

注：本文件大气污染物航空遥感测量系统的固定翼通用航空平台，不包含无人驾驶飞机。

## 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 4793.1-2007 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求 第1部分：通用要求

GB 17799.3-2012 电磁兼容 通用标准 居住、商业和轻工业环境中的发射

GB/T 17799.1-2017 电磁兼容 通用标准 居住、商业和轻工业环境中的抗扰度

GB/T 18268.1-2010 测量、控制和实验室用的电设备电磁兼容性要求

GJB 150.18A-2009 军用装备实验室环境试验方法第18部分：冲击试验

GJB 181B-2012 飞机供电特性

GJB 2700-96 卫星遥感器术语

HB 6167.6-2014 民用飞机机载设备环境条件和试验方法 第6部分：振动试验

HJ 524-2009 大气污染物名称代码

QX/T 505-2019 人工影响天气作业飞机通用技术要求

MH/T 1075-2020 飞机增雨作业安全规范

## 3 术语和定义

GJB 2700-96、HJ 524-2009 中界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**大气污染物** air pollutants

由于人类活动或自然过程排入大气的、浓度超过一定标准时对人或环境产生有害影响的物质。

### 3.2

#### 遥感 remote sensing

利用电磁辐射测量方法，非直接接触、远距离地(例如从气球、飞机、人造卫星上)获取地球及大气层的某些信息的技术。

### 3.3

#### 固定翼航空平台 fixed-wing aircraft platform

由动力装置产生前进的推力或拉力，由机身的固定机翼产生升力，在大气层内飞行的重于空气的航空器。

### 3.4

#### 背景区域 background region

受到人为排放影响小、空气洁净的区域。

### 3.5

#### 光谱波长标定 spectral wavelength calibration

通过标准光源的特征发射谱线对光谱仪测量的光谱进行波长标定，确定光谱仪探测器各像元对应实际的波长。

### 3.6

#### 航迹规划 route planning

在给定的规划空间内，寻找飞行器从起始点到达目标点，满足某些约束条件并使某项性

能指标达到最优的轨迹。

### 3.7

#### 参数反演 parameter inversion

基于模型知识的基础上，依据可测参数值去反推目标的状态参数，又称参量反演。

### 3.8

#### 痕量气体 trace gas

大气中含量在  $0.1 \times 10^{-6}$ （体积分数）以下的气体组分。

### 3.9

#### 太阳夫琅和费线 Fraunhofer line

实际的太阳光谱由于受到太阳大气层中气体的吸收，在连续光谱上叠加了许多相对较强的吸收线，这些吸收线称作夫琅和费线。

### 3.10

#### 斜柱浓度 slant column density

痕量气体浓度沿光路的积分浓度。

### 3.11

#### 垂直柱浓度 vertical column density

痕量气体浓度沿垂直路径穿过大气的积分浓度，它仅依赖于痕量气体浓度随高度的分布，而与观测方式和光在到达仪器之前在大气中穿过的实际路径无关。

## 4 系统组成与功能

## 4.1 系统组成

大气污染物航空遥感测量系统由航空测量飞行平台、大气污染物航空遥感测量系统、数据采集、存储和处理系统组成。其中：

- 航空测量飞行平台由固定翼飞机、网络通信模块、供电模块、环境控制模块、辅助集成模块组成。
- 大气污染物航空遥感测量系统由大气污染物航空遥感测量仪器组成，包括但不限于成像差分吸收光谱仪等设备。
- 数据采集、存储和处理系统由数据采集模块、数据存储模块和数据处理模块组成。

## 4.2 方法功能

### 4.2.1 航空测量飞行平台

航空测量飞行平台根据观测任务需要，能够搭载大气污染物航空遥感测量仪器和作业人员实施航空测量。

### 4.2.2 大气污染物航空遥感测量系统

大气污染物航空遥感测量系统用于遥感测量大气污染气体，主要是反应性气体，包括NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、HCHO等。各监测项目推荐的分析方法见表1。

表1 大气污染物体航空遥感测量系统推荐的分析方法

监测项目	推荐分析方法
NO <sub>2</sub>	差分吸收光谱分析法
SO <sub>2</sub>	差分吸收光谱分析法
HCHO	差分吸收光谱分析法

大气污染物航空遥感测量推荐设备是成像差分光学吸收光谱仪（Imaging Differential Optical Absorption Spectroscopy, IDOAS），是成像光谱技术与差分吸收光谱技术的结合。采用面阵 CCD 同时记录目标的高分辨率光谱信息和空间信息，仪器的工作方式是推扫式，即利用飞机平台本身的运动来实现对地物的扫描。成像光谱仪采集得到一个三维数据立方，立方前两个维度为空间维度，第三个维度为光谱维度，利用差分吸收光谱（DOAS）反演算法并结合大气传输模型对光谱数据进行反演，最终得到扫描目标的污染气体二维空间分布。

### 4.2.3 数据采集、存储和处理系统

数据采集、存储和处理系统用于采集大气污染物航空遥感测量仪器测量得到的数据，能够按指令实现本地存储数据和检测设备工作状态信息，并完成对数据和相关信息处理。

数据处理系统包括数据预处理、光谱数据反演、大气污染物浓度显示等。光谱数据反演软件用于分析大气污染气体的垂直柱浓度。光谱数据反演原理是对光谱作差分处理，以最小化实测光谱和模拟光谱的差异为目标函数，应用非线性最小二乘算法求解气体的斜柱浓度及其不确定度，然后通过大气质量因子 AMF 将气体斜柱浓度转化为垂直柱浓度。

## 5 技术要求

### 5.1 航空测量飞行平台

#### 5.1.1 固定翼飞机

要符合 MH/T 1075-2020 中 4.3 规定的相关要求，或 QX/T 505-2019 中 5、6.1、7.1 规定的相关要求。

飞机上要搭载稳定平台，指向精度优于  $0.02^\circ$ ，用以固定航空遥感设备增加稳定性。

#### 5.1.2 网络通信模块

要符合 QX/T505-2019 中 6.2.3 规定的相关技术内容。

要符合下列要求：

- 具备飞机内部、飞机和地面之间的文本、语音、图像及视频等信息传输和交互功能。
- 飞机能够向地面实时传输飞机定位、飞行姿态、大气污染物航空遥感测量仪器测量数据和工作状态等信息。
- 具备地面向飞机实时传输卫星、雷达图像、飞行航线规划等功能。
- 加载的数值采集和通讯系统，不能对飞机航电系统带来电磁干扰，影响飞机操控。

#### 5.1.3 供电模块

要符合 GJB 181B-2012 和 GB/T 30203-2013 规定的相关要求。

要满足航空测量飞行平台满负荷搭载的所有仪器设备正常用电的需求，加装 28V 转 110V 和 220V 的逆变器，并配备 UPS 不间断电池，保证仪器不断电，并有冗余，供电性能要符合下列要求：

- 总功率：不小于 5kw。
- 电压要有两种：110V 和 220V。

#### 5.1.4 辅助集成模块

飞机配备有飞行管理和导航系统，可以连续地记录导航和气象资料。可获得以下数据：定位导航信息包括观测时间、飞机位置（经度、纬度、高度）、飞行姿态（俯仰角、滚转角、偏航角）、飞行速度（加速度）等有关数据。

气象参数信息包括风速、风向、气温、气压、湿度（或水汽混合比）等数据。

### 5.2 大气污染物航空遥感测量系统

#### 5.2.1 外观要求

- 测量系统仪器表面应完好无损，无明显缺陷，各零部件连接可靠，各操作键、按钮灵活有效。
- 仪器主机面板显示清晰，字符、标识易于识别。

#### 5.2.2 环境适应性

测量系统在以下条件中能正常工作：

- 使用环境：飞机舱内。
- 工作温度： $-10\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。
- 相对湿度： $\leq 85\%$ 。
- 大气压： $40\sim 101\text{kPa}$ 。
- 海拔高度：小于  $10000\text{m}$ 。
- 供电电压： $\text{AC}(220\pm 22)\text{V}$ ， $(50\pm 1)\text{Hz}$ 。
- 振动：满足 HB 6167.6-2014 中的 6.1 的相关规定。
- 冲击：满足 GJB 150.18A-2009 中 7.2.1.4 的相关规定。

#### 5.2.3 安全要求

系统要设有漏电保护装置，防止人身触电。安全要求要符合 GB 4793.1-2007 中 6 规定的相关内容。

##### 5.2.3.1 绝缘电阻

在温度为 $-10\sim 55^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 85\%$ 条件下，仪器电源端子对地或机壳的绝缘电阻不小于  $20\text{M}\Omega$ 。

##### 5.2.3.2 绝缘强度

仪器在 1500V(有效值)、50Hz 正弦波实验电压下持续 1min, 不应出现击穿或飞弧现象。

#### 5.2.4 功能要求

成像差分吸收光谱仪:

- 光谱分辨率: 小于 0.6nm。
- 视场角: 30.0°。
- 时间分辨率: 2s 以内。
- 角分辨率: 小于 0.5°。
- 观测精度: 大气污染物垂直柱浓度的精度要求 75%以上。
- 可导出测量参数: NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、HCHO 等大气污染物的垂直柱浓度。

#### 5.2.5 安装要求

##### 5.2.5.1 外观和结构

要符合下列要求:

- 大气污染物航空遥感测量系统所包含仪器的种类和数量需要与飞机上搭载的其他仪器设备统筹考虑, 合理搭配, 固定在定制的航空架上, 满足飞机重心配置等航空规范的要求, 且满足适航取证要求。
- 固定大气污染物航空遥感测量系统仪器的航空架采用满足航空规范的材料, 定制化设计, 能够将测量仪器牢固地固定在飞机固定卡槽上。
- 航空架与飞机固定卡槽的连接处要设置有减振、隔振设施。
- 舱内测量系统的布局在满足航空规范的基础上, 合理布局, 突出可操作性, 各仪器的安装位置不应观测数据产生影响。
- 航空架焊接牢固, 结构件安装可靠, 紧固件无松动, 测量仪器与飞机机体无直接接触。
- 系统结构紧凑, 便于安装。
- 各测量仪器的标识、说明清晰、完整。

##### 5.2.5.2 安全性

- 系统结构应有足够的强度和刚度, 在满载荷下不应有影响工作的弹性变形; 在设计极限载荷下不应损坏。
- 系统所使用线缆连接接口要具备防插错功能。
- 电源线缆及信号线缆等接口应确保稳定可靠连接, 可采用螺纹旋紧或卡扣紧固的接口。

### 5.2.5.3 光学镜头安装要求

- 根据飞机内部结构，可以选择舱底观测镜头和光谱仪不分开，即一体式结构，或舱底观测镜头和光谱仪分开，即非一体式结构。
- 在一体式结构观测中，观测镜头从飞机机腹观测窗口位置直接朝地面观测，用天底观测方式，观测镜头用于聚焦太阳散射光，直接把光束传输到光谱仪。
- 非一体式结构，观测镜头从飞机机腹光学窗口朝地面观测，用天底观测方式，镜头垂直于飞机飞行方向。观测镜头一端朝向地面采集光线，另外一端通过光纤束连接到光谱仪。观测镜头用于聚焦太阳散射光，通过光纤束传输到光谱仪。飞机的光学窗口采用熔融石英材料，满足紫外透光要求。

## 5.2.6 观测要求

### 5.2.6.1 观测天气条件要求

大气污染物航空遥感测量需采集太阳散射光谱。良好的光照条件是最佳的观测天气要求。根据天气预报的天气类型，判断是否适合遥感测量。适合遥感测量的天气是晴朗有太阳，没有云的白天，太阳强度越大越合适。尽量选择在近中午飞行观测，减小太阳天顶角变化的影响。

### 5.2.6.2 飞行方式的选择

一般根据飞行任务和遥感观测实验目的来选择飞行方式，可选择梳状飞行、闭合路径飞行等方案。

航迹规划要求如下：

- a) 飞行航迹要综合考虑地形和下垫面，下垫面尽量平坦；
- b) 飞行航迹要兼顾污染背景区域；
- c) 飞行航迹要兼顾布设的地基验证站点位置和观测范围；
- d) 飞行高度的设计要综合考虑地形地貌，兼顾航空遥感设备的测距和扫描带宽。遥感观测实验中一般飞行高度保持不变。

#### (1) 梳状飞行

对于限定在特定区域的污染源的观测，用于评估特定区域的污染状况，或者掌握大气污染物的空间分布，一般选用梳状飞行方案，如图 1 所示：

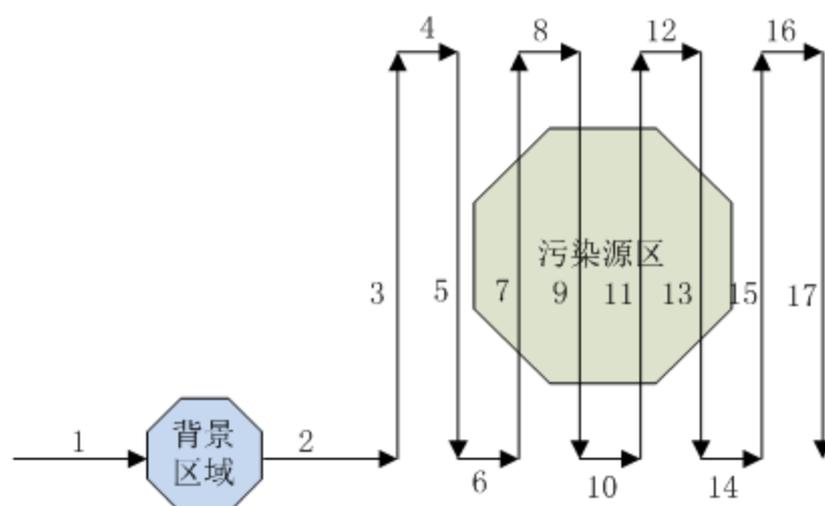


图 1 梳状飞行方案

要求先飞过污染背景区域，再绕着污染源区进行梳状路径飞行。如果污染源区或污染分布未知，梳状推扫时两条相邻路径的距离可以设置较大，完成飞行实验确定了重污染区域或识别了污染点源后，可以对飞行航线作适当的调整，在该地区进行密度高的飞行测量。

### (2) 闭合路径飞行

对于限定在特定区域的污染源的排放进行定量评估，一般选用闭合路径飞行方案，如图 2 所示：

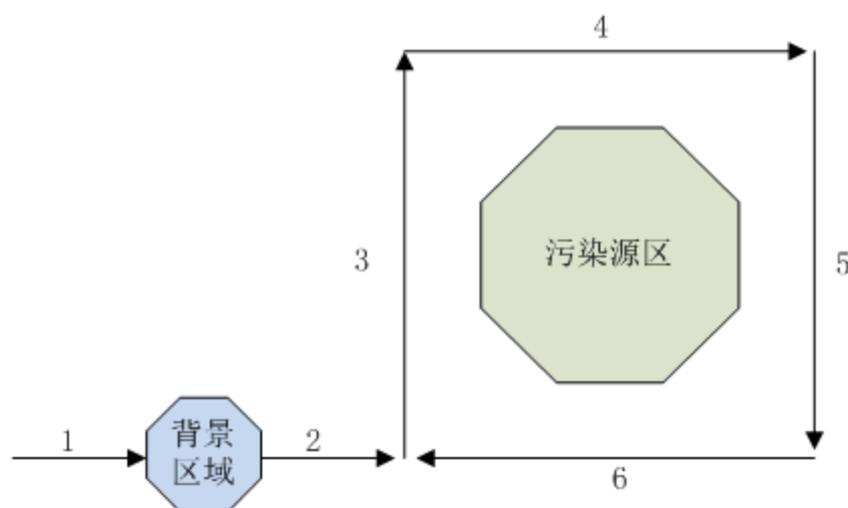


图 2 闭合路径飞行方案

要求先飞过污染背景区域，再绕着污染源区进行闭合路径飞行。图 2 中的闭合飞行可以重复。

#### 5.2.6.3 观测背景区域的选择

光谱数据反演过程中需要一个在清洁区域上空测量的光谱作为参考谱，用于扣除平流层背景、太阳夫琅和费结构和仪器不稳定性的影响。

#### 5.2.6.4 观测配套支撑设备及条件

- 为提高大气污染物立体分布探测精度，除航空遥感设备外，可选配星地同步遥感技术手段，多平台协同观测。
- 可利用地基大气成分高光谱扫描与分析仪在航测区域布点，获取边界层和自由对流层底部大气气溶胶消光系数、大气污染气体  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{HCHO}$  等的垂直结构，为航空遥感测量提供比对和验证。
- 可利用卫星遥感获取观测区域对流层污染物时空分布，为大气航测选择重点观测区域、制定航测路线，提高航测观测效率。

#### 5.2.7 维护性

系统各部件要便于检查和维护，系统部件易于更换。

#### 5.2.8 电磁兼容性

系统设备要具备电磁兼容性，要符合 GB/T 18268.1-2010 的规定。

### 5.3 数据采集、存储和处理系统

#### 5.3.1 数据采集

- 提供人机交互界面，实现对大气污染物航空遥感测量系统的集中监测，以及对数据信息的采集、显示、存储和回放及分析处理。

#### 5.3.2 数据存储

- 舱内仪器数据存储容量：不少于 240h 有效观测数据的存储。
- 数据处理单元存储容量：满足 1a 有效观测数据的存储。
- 具备查询历史数据的功能。

#### 5.3.3 数据处理、展示

- 能够显示和设置系统时间。
- 能够显示仪器的工作状态等参数信息。
- 能够显示实时数据。
- 具备时间标签功能，数据为设置时段的平均值。
- 具备数字信号输出功能。
- 数据输出类型可包括报文、数据库、图形产品。

- 处理后的数据不应覆盖原始数据。
- 实现地面对飞机平台的监视和指挥。
- 显示气象卫星、雷达、数值模式等图像产品并能叠加飞机位置等信息。

#### 5.3.4 电磁兼容性

具有电磁兼容能力，对其他电子设备不产生干扰。电磁兼容发射标准要符合 GB 17799.3-2012 的规定，电磁兼容抗扰度标准要符合 GB/T 17799.1-2017 的规定。

## 6 检测与质量控制

### 6.1 检测内容

#### 6.1.1 系统装置

- 按工作要求，检查系统配置的仪器设备的类别和数量。
- 目测系统的外观，满足 5.2.1 的要求。
- 实际操作检查部件连接是否齐全、可靠，满足 5.2.5 的要求。
- 实际操作检查系统的安装情况，满足 5.2.5 的要求。
- 系统选用的设备、器材等原材料应为合格产品，其性能指标应符合相关的国家标准。
- 检查仪器测量性能的准确性和稳定性。
- 检查远程数据通讯与传输是否稳定。

#### 6.1.2 测量数据

- 原始数据检查和备份。检查各测量参数的原始数据并存储，检查原始数据是否存在异常，判断该数据是否可用。
- 各测量仪器的时间同步。
- 各测量参数的时间序列完整，对有疑问处结合其他信息查询、分析，辅助检查的可靠性。
- 各测量参数的时间序列波动变化是否合理。
- 数据测量时间分辨率、数据准确性是否满足要求。
- 数据传输有无重复或者丢失。
- 检查数据、文档等文件的编号记录完整性。

## 6.2 质量保证与质量控制

- 每次航测飞行前，查看仪器工作状态，发现异常应及时检修，对仪器相关部件进行维护或更换。
- 仪器在工作时保持工况条件和工作参数相对稳定。
- 仪器在每次使用之前或者经过维修后，需要用线性光源和平行光源进行初始定标，包括测量其波段范围、光谱分辨率、视场角和角分辨率。
- 在飞行工作中，可利用太阳散射光谱中的夫琅和费结构对光谱仪波长进行再次定标，确认其性能指标是否有变化。
- 在应用航空遥感数据前要保证数据的质量。航空遥感产品质量控制，首先一定要保证所需要的输入数据质量符合要求，包括原始光谱数据、先验数据、辅助数据（云、气溶胶数据等）。
- 产生的航空遥感数据产品的质量控制包括：
  - a) 筛选和排除异常影响的像元；
  - b) 筛选和排除云量大于 30% 的像元；
  - c) 轨道扫描带边缘像元观测角大、反演误差大，排除该类像元；
  - d) 排除光谱拟合残差的均方根（RMS）大于 0.002 的反演值；
  - e) 排除太阳天顶角大于  $70^\circ$  的结果；
  - f) 排除污染气体柱总量反演值为负值的结果。

## 6.3 数据质量分析

为了确保航空遥感数据的质量，需要对遥感数据进行误差分析。

遥感数据的误差一般包括系统误差和随机误差，进行误差分析后，给出数据对应的误差值。