

李宏宇,周旭,张荣,等,2020.不同机载设备观测的气象要素与飞行参数对比分析[J].气象,46(9):1143-1152. Li H Y, Zhou X, Zhang R, et al, 2020. Comparison and analysis of several meteorological elements and flight parameters observed from different airborne detection instruments[J]. Meteor Mon, 46(9):1143-1152(in Chinese).

不同机载设备观测的气象要素与飞行参数对比分析^{*}

李宏宇^{1,2} 周旭^{1,2} 张荣^{1,2} 张骁拓^{1,2} 王晓辉^{1,2}

1 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081

2 中国气象科学研究院,北京 100081

提 要: 为了了解机载探测不同数据源之间差异,检验飞机探测数据质量,结合新舟 60 增雨飞机 2018 年 10 月 21 日一次飞行案例,对该飞机平台和飞机任务系统不同机载设备对关键飞行参数与气象要素的观测对比分析。结果表明:飞机平台全球卫星定位系统(GPS)和任务系统北斗卫星导航系统(BDS)、机载综合气象测量系统(AIMMS-20)三套定位源的经度、纬度和海拔高度定位偏差较小,飞机气压高度表观测海拔高度则明显低于任务系统 BDS 和 AIMMS-20。飞机平台大气数据系统(ADS)与任务系统 AIMMS-20、云粒子图像探头(CIP)观测的真空速、环境气压、温度以及相对湿度各参数变化趋势一致。ADS 与 AIMMS-20 真空速观测值非常接近,AIMMS-20 对环境风速瞬时变化响应更灵敏,CIP 探测真空速明显小于 ADS 和 AIMMS-20,平均偏慢约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; AIMMS-20 和 CIP 环境气压变化趋势完全一致,且观测值非常接近,ADS 环境气温比 AIMMS-20 平均偏低 1.4°C ,偏低最大时观测存在明显逆温。CIP 环境气温比 AIMMS-20 平均偏低 0.6°C ,环境湿度比 AIMMS-20 平均偏低 8.6% 。机上不同设备对环境与气象参数的观测差异,一方面因机载设备安装位置不同所致,另一方面也受大气与云结构不均匀的影响。飞机平台与任务系统不同设备观测对比分析,不仅为云物理机载探测数据合理应用提供指导,还能够为国家与地方人工影响天气飞机机载设备系统集成设计提供重要技术支持。

关键词: 云物理,机载探测,气象要素,新舟 60

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.002

Comparison and Analysis of Several Meteorological Elements and Flight Parameters Observed from Different Airborne Detection Instruments

LI Hongyu^{1,2} ZHOU Xu^{1,2} ZHANG Rong^{1,2} ZHANG Xiaotuo^{1,2} WANG Xiaohui^{1,2}

1 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Based on a flight case of the national MA60 seeding aircraft which took place on 21 October 2018, several flight parameters and meteorological elements observed from onboard various instruments are compared and analyzed to investigate their difference and verify the detection data quality. The results show that the deviations of the longitude, latitude and altitude location are relatively small showed on the GPS of aircraft platform, BeiDou Navigation Satellite System (BDS) and aircraft integrated meteorological measurement system (AIMMS-20). The observation of altitude on aircraft's barometric altimeter is sharply lower than it showed on BDS and AIMMS-20. The changing trend of ambient pressure, true air speed (TAS), temperature, relative humidity and other elements are almost the same as shown on aircraft platform

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507401、2019YFC1510301)和中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金项目(2017Y012、2018Z004)共同资助

2020 年 3 月 3 日收稿; 2020 年 4 月 30 日收修定稿

第一作者:李宏宇,主要从事大气物理与大气环境研究以及人工影响天气工作. E-mail:hyli@cma.gov.cn

air data system (ADS), AIMMS-20 and cloud image probe (CIP). The observed values are also close to each other on ADS and AIMMS-20. The instantaneous changes of wind on AIMMS-20 are more accurate than on the ADS. The TAS on CIP is significantly slower than on AIMMS-20, $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ on average. The changing trend of environment pressure is the same on AIMMS-20 and CIP. There is 1.4°C environment temperature lower on the average on ADS than on AIMMS-20, and there is obvious inversion when the lowest value happens. The ambient temperature on CIP probe is 0.6°C lower than on AIMMS-20 and relative humidity is 8.6% lower than on AIMMS-20. The differences of aircraft location and those environment elements between different airborne observation sources are the result of different installation locations of those detection instruments or sensors, as well as the influence of inhomogeneous cloud structures. This comparison and analysis could not only provide some scientific bases for reasonable application of the airborne detection data, but also help to guide the design of airborne integrated mission systems for future national and local high-performance seeding and detecting aircraft constructions.

Key words: cloud physics, airborne detection, meteorological element, MA60 aircraft

引 言

在过去几十年中,测量云中结构和水成物的新技术与装备已有很大发展(NRC, 2003; 雷恒池等, 2008; 郭学良等, 2013)。作为云物理学研究的重要组成部分与重要观测手段,飞机云物理探测特别是机载云物理探测系统应用,因具有穿云直接观测的特点,对于了解大气环境特征、云雾降水形成发展过程、人工影响天气科学指挥作业、天气气候变化与精细化数值预报研究以及飞行安全(如积冰)等方面都起着至关重要的作用,并被国内外广泛地应用于地球物理(大气)科学各类观测研究中以及指导人工影响天气作业实践(范慧君和马培民, 1981; NRC, 2003; 毛节泰和郑国光, 2006; IPCC, 2007)。

20 世纪 70 年代,国际上就开始广泛使用美国 PMS(Particle Measuring Systems)公司的光电探头进行云微物理参数探测(Knollenberg, 1981; 游来光, 1987; 魏强等, 1997; Lawson and Jensen, 1998; 郭学良和郑国光, 2010)。这些粒子测量设备作为探测云物理结构最常见仪器设备能够自动完成对粒子的取样、测量和记录,具有取样频率高、取样尺度分辨率高等特点,可对大范围云系进行连续观测。20 世纪 80 年代以后中国气象科学研究院先后主持或参与改装了多架不同型号的云物理观测和人工增雨播云作业飞机。飞机装载各种气象和云物理探测仪器进入云中直接测量,取得了十多个省(区)的云降水微物理结构和大气核的资料(姚展予, 2006)。“十五”期间,国家进一步加大对人工影响天气研究试验

支持,中国气象科学研究院集合新引进 PMS 粒子测量系统与自研的空地数传系统、碘化银末端燃烧器,主持改装完成了我国新一代人工增雨综合探测作业飞机夏延-III A 设备与技术集成(杨绍忠和陶文有, 2002; 刘卫国等, 2003; 王广河和姚展予, 2003)。之后国内陆续引进多套粒子测量系统及其他机载云物理探测仪器,先后改装建设了系列化作业飞机和探测飞机,并在我国西北、东北和华北等数个省市组织进行了飞机云物理结构探测和人工影响天气作业试验(雷恒池等, 2008; 郭学良等, 2013; 王磊等, 2014; 蔡兆鑫等, 2019)。随着人工影响天气业务科学化、规范化、现代化建设加快,人工增雨雪逐步向飞机作业为主的空中平台转变,空地一体化作业对飞机作业平台和配套机载探测能力、播撒能力和指挥调度能力的要求也越来越高。

作为空中催化播撒最主要的平台和云物理探测最直接的手段,高性能的人工影响天气专用飞机及其机载云物理探测能力建设对于促进人工影响天气现代业务发展起着举足轻重的作用。2012 年 5 月国家发展改革委批复立项“新增千亿斤粮食工程:东北区域人工影响天气能力建设项目”(以下简称“东北人影工程”),作为核心建设任务及项目最重要、最关键的技术装备,建设的两架新舟 60 国家高性能增雨飞机既可满足不同目的作业需要,又能作为空中试验平台开展大气科学等相关试验任务。2014 年 12 月国家发展改革委联合中国气象局共同编制颁布了《全国人工影响天气发展规划(2014—2020 年)》,提出大力加强飞机作业力量,加快国家高性能作业飞机建设,集成先进探测设备、催化播撒设备和

空地通信设备,建成具有国际先进水平的云物理飞机探测平台。伴随国家和地方人工影响天气能力建设,大量先进机载探测设备投入使用,对深入开展云降水物理科学研究和开拓新的研究领域均发挥出越来越重要作用,并对人工影响天气业务科技水平提高起到了重要推动作用(Guo and Zheng,2009)。

目前全国人工影响天气飞机平台与机载云物理探测设备建设应用相关技术标准和规范仍存在很多不足。与先进国家同类工作相比,人工影响天气飞机机载云物理探测系统应用中所存在的问题主要体现在进口机载探测设备使用过程中受标定、维护、培训等诸多条件制约,实际业务环境应用中部分探测设备的稳定性、可靠性以及数据质量也逐渐显露出了一些问题。本文针对“东北人影工程”建设的新舟 60 国家高性能增雨飞机,结合该飞机 2018 年 10 月 21 日在湖北省开展的一次飞行案例,通过飞机平台自身设备与加装的机载任务系统设备对一些关键飞行参数和环境气象要素进行观测对比分析,为后续国家和地方高性能人工影响天气飞机建设机载任务系统集成设计和机载探测数据合理应用提供重要技术支持。

1 飞机观测平台与功能

1.1 机载探测重要作用

人工影响天气是建立在云雾降水物理学基础上的一门应用科学技术。监测了解云雾降水形成和发展中各种物理过程及其宏观与微观特征变化,是揭示成云致雨机制、发展人工催化原理与技术方法的基础。作为云降水物理学研究的重要组成部分和空中催化播撒最主要平台,利用人工影响天气专用飞机及其配备的先进机载云物理探测系统进行穿云采样,它是获取云微物理特征和监测云降水演变最直接同时也是最有效的观测手段。在人工影响天气工作中,结合催化剂不同环境条件下的活化特性,充分利用高性能飞机及机载云物理探测设备实时准确地获取飞行位置及其周围环境基本气象要素以及云微物理特征量的时空分布变化,对突破和解决催化条件(表 1)监测识别、精准确定催化要素以及科学检验催化效果等诸项关键技术问题都具有重要支撑作用。

表 1 人工影响天气催化条件影响因子及其常用观测手段

Table 1 Influence factors of cloud seeding condition and common observation methods

影响因子	参考指标	常用观测手段	其他方式
水分供应与分布	水汽供应 水汽密度 $>10\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 饱和条件(冰水转化区)	环境气象要素传感器(气压/温度/湿度/风等)	探空,机载/地基微波辐射计
	液态水/固态水含量 液水含量 $>0.01\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 液态水/总水比率 >0.5	机载液水/总水传感器 机载云滴谱探头 机载云粒子图像探头、云粒子成像仪 机载降水粒子图像探头、降水粒子光谱仪 机载云粒子(成像)组合探头	机载/地基激光雷达
云凝结核和冰核分布	云凝结核尺寸和数浓度 粒径 $>0.01\text{ }\mu\text{m}$ 数浓度 $<10^2\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$	云凝结计数器 气溶胶粒子谱仪 机载气溶胶-云-降水粒子谱组合探头	机载/地基激光雷达
	冰核尺寸和数浓度 粒径 $>0.01\text{ }\mu\text{m}$ 数浓度 $<10^2\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$	冰核计数器 气溶胶粒径谱仪 机载气溶胶-云-降水粒子谱组合探头	
云粒子和降水粒子分布	云滴尺寸和数浓度 有效粒径 $<20\text{ }\mu\text{m}$ 数浓度 $>20\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$	机载云滴谱探头 机载气溶胶-云-降水粒子谱组合探头	机载/地基云雷达
	冰雪晶尺寸和数浓度 冰雪晶形态 有效粒径 $<300\text{ }\mu\text{m}$ 数浓度 $<20\text{ 个}\cdot\text{L}^{-1}$	机载云粒子图像探头、云粒子成像仪 机载降水粒子图像探头、降水粒子光谱仪 机载气溶胶-云-降水粒子谱组合探头	机载/地基云雷达

1.2 新舟 60 增雨飞机系统

新舟 60 国家高性能增雨飞机(图 1)是“东北人影工程”的核心建设内容。自 2012 年 8 月飞机建设

项目正式启动,2015 年 12 月加入业务运行,同时参与系列重大科学试验和气象服务保障任务。该飞机也是我国首次拥有具有适航资格的专业化大中型人工增雨专用飞机。



图 1 国家新舟 60 增雨飞机及其外挂
云物理探测设备

Fig.1 National MA60 seeding aircraft and
some wing-mounted detecting probes

新舟 60 增雨飞机机上构建有一套任务系统,将
加装的大气探测、催化作业、宏观成像、空地通信等

子系统的任务设备高度集成化和自动化(表 2)。在
飞机任务系统中,大气探测子系统(亦为粒子测量系
统)与宏观成像系统相配合可实时连续测量大气气
溶胶、云凝结核、云降水(云滴、雨滴、冰雪晶等)粒子
谱分布,云和降水粒子形状或图像,云中液态/固态
水含量,大气温压湿和风等环境气象要素监测数据,
飞行高度、经纬度、空速、航姿和航向等飞机位置参
数,云宏观尺度、云中降水粒子相态、飞机积冰状况
和飞机催化作业情况等云宏观影像。另外,大气探
测子系统配套的粒子分析与显示系统(PADS),集
成了卫星导航定位、云粒子测量系统、气象数据监测
系统等多参量数据采集、处理和分析显示一体,用于
对大气探测子系统数据的收集、处理、存储,对各类
探测仪器工作参数和采样数据的基本显示及数据回
放。

表 2 新舟 60 增雨飞机任务系统构成和功能

Table 2 Composition and function of the mission systems onboard of MA60 seeding aircraft

子系统名称	主要功能	设备组成
大气探测	气溶胶-云-降水微物理特征、 环境气象要素以及重要 飞行参数的观测与收集	机载综合气象测量系统(AIMMS-20) 云凝结核计数器(CCN-200) 被动腔式气溶胶粒子谱探头(PCASP-SPP-200) 云滴探头(CDP) 后向散射云滴探头(BCP) 云粒子图像探头(CIP) 降水粒子图像探头(PIP)
催化作业	冷云、暖云催化剂播 撒作业的控制与显示	焰条播撒器 焰弹发射器 致冷剂(液态二氧化碳)播撒装置
宏观成像	云体宏观特征、降水现象及 催化作业工作状态实时监视	作业监控摄像机(机身左侧和右侧) 非制冷红外热像仪(机尾右上部和右下部) 广角云宏观成像仪(机腹下部) 尾翼结冰监控摄像机(机尾左上部) 舷窗雨线监控摄像机(驾驶舱内左侧)
空地通信	飞机与地面之间数据、文本、图像、 语音信息的实时互传和共享	海事卫星通信系统 北斗卫星导航系统
任务集成	机载任务设备与系统的集中 控制、综合显示和统一管理	机载电源管理、显控计算机、数据接入、 视频语音、通信控制等设备和应用软件

在飞机任务系统建设应用中,一方面需要充分
考虑各子系统对引用的重要飞行参数与气象要素相
同参数的验证(廖捷和任芝花,2011;赵增亮等,
2011),并加以优选集成设计,另一方面也需考虑为
同一基本参数增加必要备份,避免实际使用中这些
基本参数的观测缺失,为探测试验和人工影响天气
指挥作业提供基础保障。

2 机载不同观测设备及其性能比较

2.1 飞机导航定位

飞机导航定位主要用于确定飞机位置信息,通
常包括经度、纬度和海拔高度等重要飞行参数,它是

航空管制与飞行安全必不可少的组成部分,同时也是了解云物理特征时空分布和精准识别催化部位并实施播云作业的前提。新舟 60 增雨飞机目前机上同时存在三套定位源:(1)飞机平台自身全球卫星定位系统(GPS),其天线安装在机头顶部正上方;(2)任务系统大气探测子系统中机载综合气象测量系统(AIMMS-20),其自含 GPS 全球卫星定位系统;(3)任务系统空地通信子系统加装的中国自主建立的北斗卫星导航系统(BDS),其天线安装在机身前部顶部。此外,飞机飞行高度值还可由飞机平台自身气压高度表来测定。

任务系统加装的加拿大 Aventech Research Inc. 公司制造的机载综合气象测量系统 AIMMS-20 (图 2),该系统由舱内、舱外两部分构成。舱内设备有全球定位系统(GPS)模块、惯导测量单元(IMU)、中央处理模块(CPM)。舱外设备包括外挂挂在左机翼下方的大气数据探头(ADP)和分别安装在左右机翼末端的 GPS 天线。该设备所含 GPS 模块具备精密三维定位能力,能够实时获取飞机惯性加速度及角速率,提供飞机位置、速度、姿态(滚转角、俯仰角和偏航角)和精密授时。

2.2 环境气象要素监测

新舟 60 增雨飞机平台自备大气数据系统(ADS)用来测量、计算以及显示机体周围自由气流的大气压力(包括静压和全压)、总温、大气密度、气压高度、升降速度、马赫数、指示空速、真空速、攻角和侧滑角等重要飞行参数及环境气象要素,这些大气数据是飞行控制系统、导航系统、指示系统等不可或缺的信息,ADS 的性能和精度也直接关系到飞行安全。在诸多大气数据中,包括全压、静压、总温、攻



图 2 机载综合气象测量系统 AIMMS-20 主要部件
(细长:ADP;方体:GPS、IUM 和 CPM 模块)
Fig. 2 AIMMS-20 air data probe (ADP) paired with three modules including GPS, IUM, CPM

角和侧滑角等最基本参数直接通过 ADS 安装在飞机机头外部和机身上的空速管、静压孔、总温传感器和迎角传感器采集获取,其他飞行参数则通过对基本大气数据进一步解算加以获得。

任务系统中的 AIMMS-20,除了具备对飞机导航定位功能外,其自带的大气压力、温度、湿度传感器还为登机人员指挥作业提供了环境气象条件实时测量参考。AIMMS-20 环境气象要素测量的主要性能参数如表 3 所示。

表 3 机载综合气象测量系统 AIMMS-20 主要性能参数
Table 3 AIMMS-20 technical specifications

参数	技术指标
大气压力(静压)/Pa	精度:100
温度/℃	精度:0.1 分辨率:0.01
相对湿度/%	精度:2.0 分辨率:0.1
风速/(m·s ⁻¹)	精度:0.50
尺寸/cm	ADP:长 61.0×直径 3.8 GPS/IUM/CPM:12.1×12.1×10.9
重量/kg	ADP:1.9 GPS+IUM+CPM:2.1

图 3 为加装在增雨飞机右机翼下方由美国 DMT(Droplet Measurement Technologies Inc.)公司制造的组合式云粒子图像探头(CIP)。该探测设备除了能够实时探测云粒子谱和显示粒子二维成像外,其还自带了对气压、温度、湿度等环境气象要素测量的传感器。通过 CIP 获取环境气压与温度,可转换得到真空速,一方面为本探头及其他粒子探头提供粒子数浓度计算用,如式(1)所示,另一方面这些要素也可作为 AIMMS-20 相同环境参数的备份,同时为指挥人员提供催化条件识别的关键参数,用以指导播云作业。

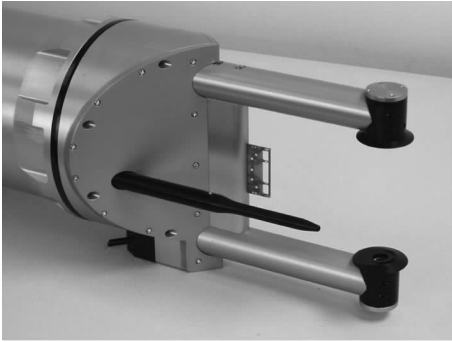


图 3 云粒子图像探头外观图
Fig. 3 Cloud imaging probe

$$N_T = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{S \cdot TAS \cdot t} \quad (1)$$

式中: N_T 为总的粒子数浓度, 单位为 $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$; n_i 为第 i 通道测得粒子数; m 为总测量通道数; S 为探头采样面积; TAS 为真空速; t 为采样时间。

3 飞行参数不同观测对比分析

结合 2018 年 10 月 21 日一次飞行案例, 以下对新舟 60 增雨飞机平台 GPS、ADS 与飞机任务系统 BDS、AIMMS-20、CIP 等不同观测源获取的飞机位置及真空速等关键飞行参数及环境气象要素进行简单的对比分析。

3.1 飞机定位观测比较

图 4 为 2018 年 10 月 21 日新舟 60 增雨飞机(机号 B-3726)在湖北省的一次飞行航迹显示。飞机定位信息取自任务系统 AIMMS-20。当日 12:21:53 飞机从襄阳刘集机场起飞, 至 16:28:47 落地, 共飞行约 4 h。飞机起飞后快速爬升到适宜催化高度执行人工增雨作业, 随后下降进入设定目标区, 并在该目标区内按 300 m 一层分层先上后下对云系的上下部分别做探测。探测零度层高度约为 3900 m, 飞行中还观测到较强程度的结冰。

飞行高度随时间变化显示, 飞机起飞后向上一直升, 12:39:23 达到 4650 m, 然后维持在该高度

做平直飞行, 机上人员开展增雨播撒作业。13:33:54 飞机再向上爬升, 13:36:30 上升到 4939 m 并保持高度继续平飞。13:45:24 后飞行下降, 约 6 min 后于 13:51:20 降至 3050 m, 然后维持高度水平探测。自 14:17:06 开始, 飞机在设定的目标区内按垂直 300 m 一层分层盘旋做垂直探测, 并向云系上部爬升, 最高飞行至 4640 m 附近。15:11:00 后飞机再次快速下降高度, 15:16:54 飞行高度降为 2770 m, 随后继续每 300 m 一层分层盘旋向下垂直探测到 1840 m。完成目标区内垂直探测后, 飞机于 16:19:00 返场, 并在 16:28:47 落地。

以任务系统 AIMMS-20 定位信息为基准, 图 5 给出了该飞行案例飞机平台 GPS 与任务系统 BDS 二者相对 AIMMS-20 定位经纬度的偏差。虽然上述定位设备机上安装位置有所差异, 但总体上看三者经纬度定位较为接近, 经纬度定位偏差较小, 飞机平台 GPS 比 BDS 定位经纬度值更接近 AIMMS-20。比较经度定位偏差, 飞机平台 GPS 与 AIMMS-20 经度最大、最小偏差分别为 0.003° 、 -0.0031° , 平均偏差为 0.0001° , 小于 10 m; BDS 与 AIMMS-20 经度最大、最小偏差分别为 0.0035° 、 -0.0032° , 平均偏差也为 0.0001° 。纬度定位偏差比较显示, 飞机平台 GPS 和 AIMMS-20 最大、最小偏差分别为 0.0018° 、 -0.0021° , BDS 和 AIMMS-20 最大、最小偏差分别为 0.0025° 、 -0.0026° , 飞机平台 GPS、任务系统 BDS 与 AIMMS-20 纬度定位平均偏差均为 0° , 非常相近。

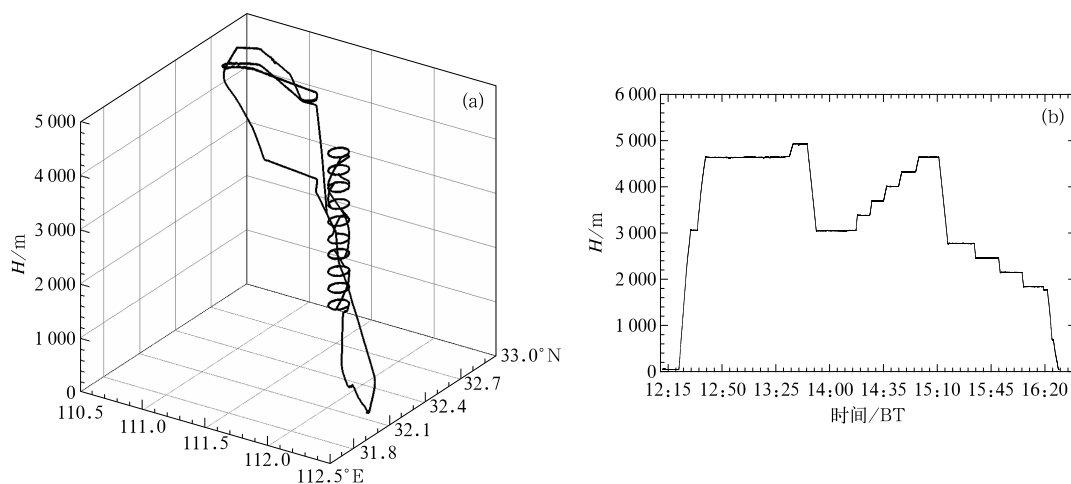


图 4 2018 年 10 月 21 日飞行航迹

(a) 三维航迹, (b) 飞行高度变化

Fig. 4 3-D trajectory (a) and times series of flight altitude (b) on 21 October 2018

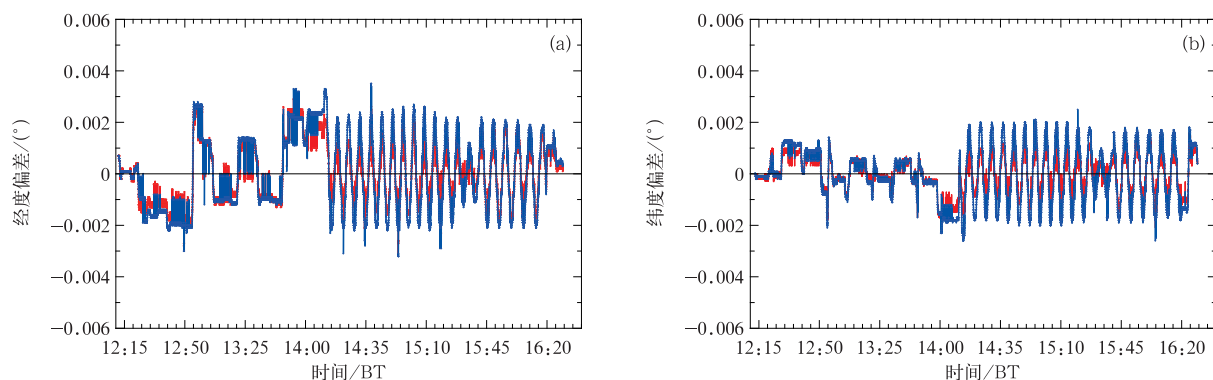


图5 不同设备经度(a)与纬度(b)观测偏差

(红色:飞机平台 GPS 与 AIMMS-20 偏差;蓝色:任务系统 BDS 与 AIMMS-20 偏差)

Fig. 5 Longitude deviation (a) and latitude deviation (b)

(red: between airplane and AIMMS-20, blue: between BDS and AIMMS-20)

从飞机自带气压高度表和任务系统 BDS 分别与 AIMMS-20 定位的海拔高度偏差(图 6)易看出,飞行中飞机气压高度表观测海拔高度明显低于 BDS 和 AIMMS-20 测量值,且随飞行高度升高,气压高度表观测海拔高度偏差也越大,与飞行高度基本呈反相关。这与气压高度表高空气压测量和压高转换计算有关。在 2018 年 10 月 21 日飞行案例中,飞机气压高度表海拔高度值比 AIMMS-20 探测高度至少低 21.4 m,最多时偏低 151.2 m(约 3%)。

图 6 中同时给出了 BDS 与 AIMMS-20 探测的海拔高度偏差。相对 AIMMS-20, BDS 定位高度最大高出 43.1 m,最小低 55.7 m(约 6%)。二者高度偏差总体较小,特别是在飞机飞行高度较高时,二者

更为接近。

3.2 真空速观测比较

图 7 显示了飞机平台 ADS 与任务系统 AIMMS-20、CIP 探头对真空速 TAS 观测比较。TAS 是飞机相对于空气的真实速度,其用于粒子测量系统采样体积计算,其测量准确程度直接关系着基于该测量值所有机载探头采样粒子数浓度计算准确度。由图 7 可见,飞机平台 ADS 与任务系统 AIMMS-20、CIP 探头真空速观测变化趋势相同,飞机平台 ADS 与 AIMMS-20 观测非常接近,二者相关系数达到 0.99; CIP 探测真空速则明显低于 ADS 和 AIMMS-20。此飞行案例中,ADS 的 TAS 比 AIMMS-20 平均偏快 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最高偏快 $8.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最低则

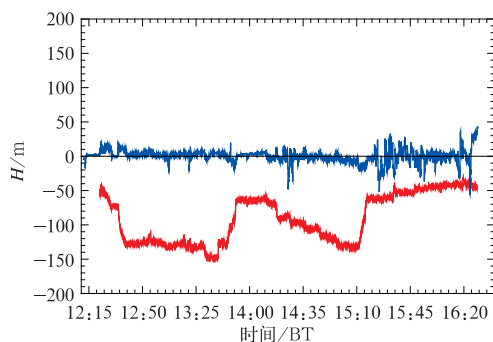


图6 不同设备海拔高度观测偏差

(红色:飞机气压高度表与 AIMMS-20 偏差;
蓝色:任务系统 BDS 与 AIMMS-20 偏差)

Fig. 6 Flight altitude deviation

(red: between airplane barometric altimeter and AIMMS-20, blue: between BDS and AIMMS-20)

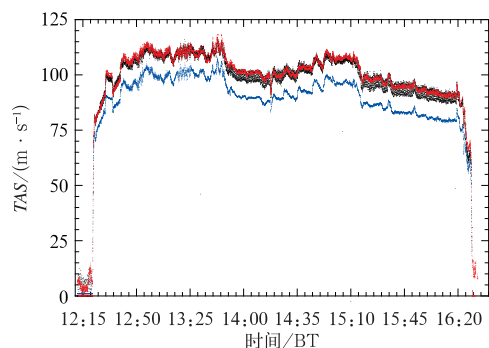


图7 不同设备观测的真空速变化

(红色:飞机平台 ADS;蓝色:任务系统 CIP;
黑色:任务系统 AIMMS-20)

Fig. 7 Time series of TAS from ADS (red), CIP (blue) and AIMMS-20 (black)

偏慢 $10.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且均发生在起飞或降落阶段。二者差异较大时均发生在 AIMMS-20 秒记录的瞬时风速出现陡增或陡降的时候, 这表明 AIMMS-20 对环境风速瞬时变化响应要比飞机平台 ADS 观测更灵敏。同 AIMMS-20 相比, CIP 探测真空速平均偏慢约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 二者相关系数亦为 0.99。

另外, 任务系统 AIMMS-20 飞行中真空速偶尔会出现奇异值, 如 13:31:40、16:18:10 机载 AIMMS-20 探测 TAS 分别为 46.1 和 $48.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而对应时刻前后秒记录的 TAS 值分别大于 100 和 $87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 实际飞行中基本不可能发生。因此, 出现的明显低于前后秒记录数值应为仪器观测异常需加以剔除。

4 环境气象要素不同观测对比分析

4.1 气压观测比较

图 8 显示, 新舟 60 增雨飞机任务系统 AIMMS-20 与 CIP 探测的环境气压二者变化趋势完全一致。在 2018 年 10 月 21 日飞行中, 任务系统 AIMMS-20 探测环境气压从地面 1015.7 hPa 一直变化到飞行高度最高时 554.0 hPa 。与 AIMMS-20 比较, CIP 探测的环境气压最大偏高 6.0 hPa , 最小偏低 8.6 hPa (不到 1%), 平均偏高 1.9 hPa 。二者对环境气压观测总体上非常接近。

4.2 气温与相对湿度观测比较

图 9 显示的是飞机平台 ADS 与任务系统 AIMMS-20、CIP 观测的环境气温及相对湿度变化。三者对气温观测变化的趋势相同, 且观测值也较接近。飞机平台 ADS 观测气温总体上偏低, 该案例中, ADS 观测环境气温比 AIMMS-20 平均偏低 1.4°C , 最大偏高 1.4°C , 最小偏低 6.0°C , 低幅最大时出现在 12:15:38, 观测显示该时段大气中存在明显逆温, 自 12:15:33—12:15:38, 5 s 短暂飞行环境气温从 16.5°C 上升到了 21.5°C , 增幅达 5°C 。任务系统 CIP 探测的环境气温比 AIMMS-20 平均偏低 0.6°C , 最大偏高 1.9°C , 最小偏低 3.7°C 。从环境相对湿度变化看, AIMMS-20 与 CIP 湿度变化趋势相近, 相关系数为 0.9, 但二者观测湿度值存在较

大差异, CIP 环境湿度比 AIMMS-20 平均偏低 8.6% , 最大偏高 7.2% , 最小偏低 19.4% 。CIP 与 AIMMS-20 探测环境湿度最大值分别为 95.7% 、 100% , 最小值分别为 57.2% 、 64.5% 。结合云区湿

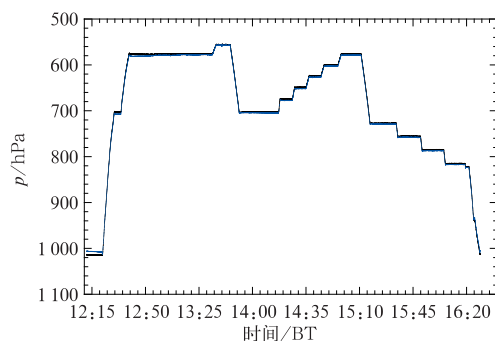


图 8 不同设备观测的环境气压变化
(蓝色:任务系统 CIP;黑色:任务系统 AIMMS-20)
Fig. 8 Time series of ambient pressure from CIP (blue) and AIMMS-20 (black)

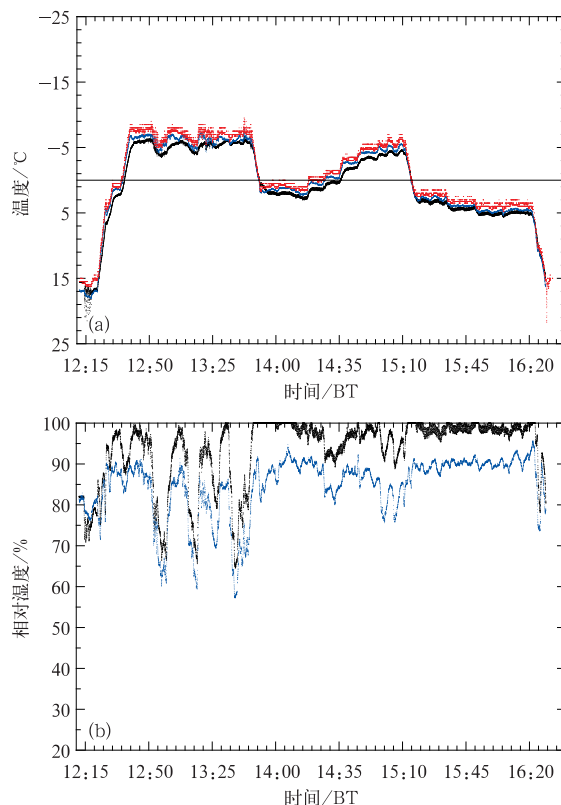


图 9 不同设备观测的环境气温(a)和湿度(b)变化
(红色:飞机平台 ADS;蓝色:任务系统 CIP;
黑色:任务系统 AIMMS-20)

Fig. 9 Time series of ambient temperature (a) and relative humidity (b) from ADS (red), CIP (blue) and AIMMS-20 (black)

度特征和云降水粒子实际采样分析,飞机入云并长时间探测到云滴粒子,环境空气湿度一般不低于85%,很容易得知 AIMMS-20 探测环境湿度比 CIP 更为准确。

5 结论与讨论

结合新舟 60 国家增雨飞机 2018 年 10 月 21 日飞行案例,通过对该飞机平台 GPS、ADS 与任务系统加装的 BDS、AIMMS-20、CIP 等不同观测源获取的关键飞行参数及气象要素观测对比分析,结果表明:

(1)飞机平台 GPS 与任务系统 BDS、AIMMS-20(GPS 模块)三套定位源经纬度定位偏差较小,飞机平台 GPS 比任务系统 BDS 定位经纬度更接近 AIMMS-20。BDS 与 AIMMS-20 二者探测海拔高度偏差总体较小,飞行高度较高时更接近。飞机平台气压高度表观测海拔高度明显低于任务系统 BDS 和 AIMMS-20 测量值,且随飞行高度升高,气压高度表与后两者对海拔高度观测偏差也越大。

(2)飞机平台 ADS 与任务系统 AIMMS-20、CIP 观测的真空速变化趋势相同,飞机平台 ADS 与 AIMMS-20 真空速观测值非常接近,ADS 观测真空速比 AIMMS-20 平均偏快 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,AIMMS-20 对环境风速瞬时变化响应要比飞机平台 ADS 更灵敏;CIP 探测真空速明显低于 ADS 和 AIMMS-20,CIP 探测真空速比 AIMMS-20 平均偏慢约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3)任务系统 AIMMS-20 和 CIP 探测环境气压变化趋势完全一致,且环境气压观测值非常接近。飞机平台 ADS 与任务系统 AIMMS-20、CIP 观测环境气温变化趋势相同且观测值较接近。ADS 观测环境气温比 AIMMS-20 平均偏低 1.4°C ,偏低最大时观测显示该时段大气存在明显逆温。CIP 探测环境气温比 AIMMS-20 平均偏低 0.6°C 。AIMMS-20 与 CIP 湿度变化趋势相近,相关系数为 0.9,但二者观测湿度值存在较大差异,CIP 环境湿度比 AIMMS-20 平均偏低 8.6%,AIMMS-20 探测环境湿度比 CIP 更为准确。

新舟 60 增雨飞机不同机载设备观测获取的飞行参数和气象要素存在一定差异。这些差异,一方面由于飞机上不同机载设备安装位置不同所致,另

一方面,大气与云结构不均匀性也会导致不同设备观测差异。通过飞机平台与飞机任务系统不同设备观测对比分析,提供的飞行参数和气象要素等基础观测数据,不仅为云物理机载探测数据合理应用提供技术指导,还能够为国家 and 地方人工影响天气飞机机载设备系统集成设计提供重要技术支持。

参考文献

- 蔡兆鑫,蔡森,李培仁,等,2019. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J]. 大气科学,43(6):1191-1203.
- Cai Z X, Cai M, Li P R, et al, 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6):1191-1203(in Chinese).
- 范惠君,马培民,1981. 云的卫星探测和飞机探测[J]. 气象,7(7):42-44. Fan H J, Ma P M, 1981. Satellite and aircraft detection of clouds[J]. Meteor Mon, 7(7):42-44(in Chinese).
- 郭学良,付丹红,胡朝霞,2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008—2012 年)[J]. 大气科学,37(2):351-363. Guo X L, Fu D H, Hu Z X, 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008—2012 [J]. Chin J Atmos Sci, 37(2):351-363(in Chinese).
- 郭学良,郑国光,2010. 大气物理与人工影响天气[M]. 北京:气象出版社:526-527. Guo X L, Zheng G G, 2010. Atmospheric Physics and Weather Modification [M]. Beijing: China Meteorological Press:526-527(in Chinese).
- 雷恒池,洪延超,赵震,等,2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学,32(4):967-974. Lei H C, Hong Y C, Zhao Z, et al, 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4):967-974(in Chinese).
- 廖捷,任芝花,2011. 我国飞机观测气温和常规高空观测气温的对比分析[J]. 气象,37(3):263-269. Liao J, Ren Z H, 2011. Comparative analysis on aircraft and radiosonde temperatures in China [J]. Meteor Mon, 37(3):263-269(in Chinese).
- 刘卫国,苏正军,王广河,等,2003. 新一代机载 PMS 粒子测量系统及应用[J]. 应用气象学报,14(S1):11-18. Liu W G, Su Z J, Wang G H, et al, 2003. Development and application of new-generation airborne particle measuring system[J]. J Appl Meteor Sci, 14(S1):11-18(in Chinese).
- 毛节泰,郑国光,2006. 对人工影响天气若干问题的探讨[J]. 应用气象学报,17(5):643-646. Mao J T, Zheng G G, 2006. Discussions on some weather modification issues[J]. J Appl Meteor Sci, 17(5):643-646(in Chinese).
- 王广河,姚展予,2003. 人工增雨综合技术研究[J]. 应用气象学报,14(S1):1-10. Wang G H, Yao Z Y, 2003. Study of comprehensive techniques for precipitation enhancement[J]. J Appl Meteor Sci,

- 14(S1):1-10(in Chinese).
- 王磊,李成才,赵增亮,等,2014.飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J].气象,49(2):196-205. Wang L, Li C C, Zhao Z L, et al, 2014. Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteor Mon, 49(2):196-205(in Chinese).
- 魏强,高建春,钱越英,1997.机载粒子测量系统及资料处理[J].气象,23(5):37-40. Wei Q, Gao J C, Qian Y Y, 1997. Airborne partical measuring system and data processing[J]. Meteor Mon, 23(5):37-40(in Chinese).
- 杨绍忠,陶文有,2002.一种新型机载测温仪[J].气象,28(12):43-46. Yang S Z, Tao W Y, 2002. A new type airborne thermograph [J]. Meteor Mon, 28(12):43-46(in Chinese).
- 姚展予,2006.中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾[J].应用气象学报,17(6):786-795. Yao Z Y, 2006. Review of weather modification research in Chinese Academy of Meteorological Sciences[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6):786-795(in Chinese).
- 游来光,1987.我国云物理和人工影响天气研究工作新进展[J].气象科技,(1):59-64. You L G, 1987. The new progress of cloud physics and weather modification research in China[J]. Meteor Sci Technol,(1):59-64(in Chinese).
- 赵增亮,毛节泰,王磊,等,2011.一次典型层积云的飞机观测结果及与卫星资料的对比分析[J].气象学报,69(3):521-527. Zhao Z L, Mao J T, Wang L, et al, 2011. In situ aircraft observations of one typical stratocumulus cloud process compared with the satellite measurements[J]. Acta Meteor Sin, 69(3):521-527(in Chinese).
- Guo X L, Zheng G G, 2009. Advances in weather modification from 1997 to 2007 in China[J]. Adv Atmos Sci, 26(2):240-252.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The physical science basis[R]. Cambridge and New York, NY: Cambridge University Press.
- Knollenberg R G, 1981. Techniques for probing cloud microstructure [M]//Hobbs P V. Clouds, Their Formation, Optical Properties, and Effects. New York: Academic Press.
- Lawson R P, Jensen T L, 1998. Improved microphysical observations in mixed phase clouds[C]//Proceedings of the AMS Conference on Cloud Physics. Boston: AMC.
- NRC (National Research Council), 2003. Critical Issues in Weather Modification Research[M]. Washington D. C. : National Academy Press: 51-53.