

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.06.003

云雾环境智能化无人监测作业系统框架设计

蔡军¹, 许丽人^{2*}, 孙海洋², 赵一鸣³, 戴学兵³

(1 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100190;

2 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;

3 北京遥测技术研究所, 北京 100094)

摘要: 针对人工影响云雾环境监测作业的需求, 基于无人机平台, 通过搭载主动微波激光探测和传感器载荷、航线气象仪和云雾催化播撒装置, 分别实现对航线下云、雨、气溶胶、风的三维立体监测, 对航线上温、湿、压、风速等常规气象要素的连续监测, 以及对冷云/暖云的判别和催化剂的选取自动播撒。在此基础上, 设计综合控制软件, 通过数据信息链路, 实现了地面对无人机及监测作业载荷的智能化指挥控制; 构建了集人工影响云雾监测、作业及评估于一体的空基智能无人监测作业系统, 实现了多要素精细探测、冷暖云高效催化作业、智能化指挥控制和量化评估的目标。

关键词: 智能化; 无人监测作业; 云雾环境; 人工影响天气

中图分类号: TP29

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)06-532-009

Design of intelligent unmanned observation and operation system framework for cloud and fog environment

CAI Jun¹, XU Liren^{2*}, SUN Haiyang², ZHAO Yiming³, DAI Xuebing³

(1 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China;

3 Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to meet the observation and operation requirements of artificial cloud and fog environment, based on the advanced active microwave laser detection and sensor loads, route meteorological instruments and cloud catalytic seeding devices equipped on a unmanned aerial vehicle (UAV) platform, three-dimensional monitoring of cloud, rain, aerosol and wind below the route, the continuous observation of conventional meteorological elements such as temperature, humidity, pressure and wind speed on the route, and the sowing of cold cloud/warm cloud catalyst are realized respectively. Furthermore, an integrated control software is designed to realize the intelligent command and control of UAV and the observation and operation loads through data information link. And an intelligent unmanned observation and operation system, which integrates the observation, operation and evaluation of artificial

作者简介: 蔡军 (1959-), 四川成都人, 博士, 研究员, 主要从事大气环境影响仿真及信息工程方面的研究。E-mail: caijun_6666@163.com

收稿日期: 2022-03-21; 修改日期: 2022-05-04

*通信作者。E-mail: xuliren2016@sina.com

cloud and fog, is developed finally to achieve the goals of multi-element fine observation, cold and warm cloud efficient catalytic operation, intelligent command and control, and quantitative evaluation.

Key words: intelligence; unmanned observation and operation; cloud and fog environment; weather modification

0 引言

人工影响云雾技术经过半个多世纪的发展取得了较大的进展,在云和降水物理研究、云和降水数值模拟研究、人工影响天气研究和云化学研究等领域取得了一大批成果,在有限的地域范围内具备了一定的业务应用能力,产生了较好的经济、生态和社会效益^[1-3]。但是,由于人工影响云雾环境本身的复杂性,人工影响云雾技术在云雾环境三维精细化探测、云动力学问题、人工催化的水成物演变问题、效果评估问题等方面还存在很多不确定性,使得人工影响云雾应用技术尚有许多问题亟待解决。目前,人工影响云雾环境的监测手段以卫星、雷达、有人飞机粒子探测系统为主,这些数据可用来分析云的宏微观特征、热动力结构及云系生消过程等。人工影响云雾环境的作业手段以地面火箭、高炮和有人飞机作业为主,主要通过火箭、高炮、飞机焰条焰弹等方式进行催化^[4]。

近些年,随着小型无人机技术的不断进步,无人机的应用领域正在逐步扩大^[5-8]。与有人飞机相比,无人机具有成本低、重量轻、适应能力强、维护使用方便、机动灵活、用途广等特点^[9]。无人机平台搭载适当的气象观测载荷及催化作业装置,在直接获取云雾宏微观结构的基础上,有效实施催化作业,为开展人工影响天气业务应用提供一种新的有效手段,弥补了卫星观测、高空观测、地面观测等传统气象观测手段在时间和空间尺度上存在的不足,结合地面观测网,组成空地协同一体化观探测网络,为开展时间和空间尺度精细化空基大气环境探测技术研究、复杂环境下人工影响天气作业响应实施,以及应急救援等应用提供有效的技术支持。

高升限、大载荷、抗风雨、强生存的无人机空基云雾监测和作业平台系统是当前和未来人工影响天气技术与应用发展的重要方向。从目前的发展现状看,无人机的控制系统自动化已解决了飞行自动安全控制,但对于人工影响天气工作而言,还没有解决以智能自主控制为代表的环境监测、目标特性研判、作业实施等自主控制问题。因此,人工影响天气无人监测作业系统的发展,应以智能化自主可控为前提,以高升限、大载荷、强生存、多机协同为发展目标,从而提高人工影响天气的作业效率。

本工作基于一种高升限、大载荷无人机平台,搭载微波激光雷达、气象探测、催化作业系统等,以智能控制系统为核心,建立云雾环境智能化无人监测作业系统,设计了系统框架,介绍了系统的主要组成和关键技术,从人工影响云雾环境基本原理、系统框架、功能作用、智能算法策略、任务自主智能化实施等维度给出了分析,最后对多机协同智能化发展的可行性作了展望。

1 人工影响云雾环境基本原理

人工影响云雾环境是指在有限区域、有限时段内,运用大气科学基本原理,通过一定的设备和技术手段改变自然云雾环境的发生发展及其演变过程,达到趋利避害的目的。开展人工影响云雾工作的前提是准确认知云雾环境变化过程,在此基础上找准敏感点,利用有效手段实施激发,最后对人工影响效果进行评估。

云雾降水的形成,与云宏观结构、内外部动力、热力条件以及云雾环境催化效果密切相关。大气中云和降水过程及人工影响天气,从凝结核到锋面云系,空间尺度从 $0.01\ \mu\text{m}\sim 10^3\ \text{km}$,相差14个数量级,考虑到从形成核尺度的气体分子向气溶胶的转化,相差倍数更是达到 10^6 ,因此,对人工影响天气进行全覆盖的观测需要多种途径和手段^[10]。利用有人或无人机加载探测载荷实时探测,获取探测作业前后云和降水过程的基本特征,深入了解云和降水过程的各种尺度及物理机制,已经成为一种有效探测手段^[11,12]。

人工影响云雾的主要途径是向缺乏一定条件或降水效率不高的云中播撒催化剂,催化云体使之改变云质粒相态或谱分布,促使云体胶性不稳定发展,由影响其微物理过程而间接引起宏观动力过程产生改变。按照云微物理结构和降水机制不同,分为冷云催化和暖云催化。冷云催化的基本原理是设法破坏云的物态结构,人工引进一定数量的冷云催化剂(如AgI、干冰等),使云中产生足够数量的冰晶,人工冰晶通过贝吉龙效应形成降水。而暖云催化的基本原理是向暖云中播撒吸湿性催化剂(如盐类等),通过改变云滴谱分布的均匀性,破坏其稳定状态,产生大云滴,从而促进水汽凝结和碰并过程,提高降水^[13]。

2 云雾环境智能化无人监测作业系统框架设计

2.1 系统框架设计思路

云雾环境智能化无人监测作业系统采用一体化总体结构设计,按照“一车一机”方案,提高机动能力。系统由无人机平台、多频段微波激光云雨雷达、航线气象仪器、影像监测系统、云雾催化播撒装置、地面载车、链路系统、任务规划与控制系统、数据处理与分发管理系统组成,系统框架设计思路如图1所示。

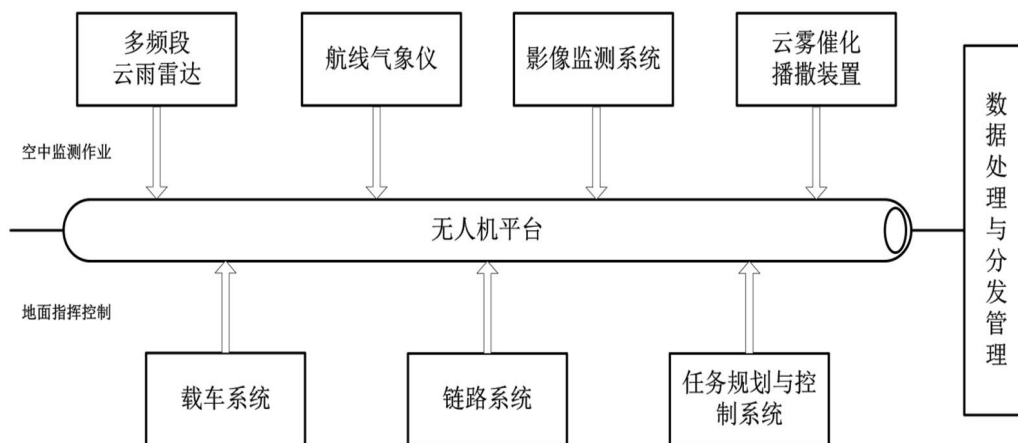


图1 智能化无人监测作业系统框架设计思路

Fig. 1 Framework design of intelligent unmanned observation and operation system

对于空中监测作业,机上任务载荷及机载设备分别通过串口、网口与网络交换机相连,并由机载数据终端与地面任务规划与控制系统预期实现实时通信,完成机上各设备参数、飞行状态、探测数据、作业数据、视频影像等信息的下行传输。地面载车系统、链路系统接收的无人机下行数据信息分别通过串口、网口与网络交换机相连,并经过网络交换机传输至地面监控与信息处理计算机,完成对整个平台信息数据的处理显示,并实现对整个平台运行状态及任务载荷的监控及控制;地面任务规划与控制系统发出的遥控指令经过网络交换机传输给地面链路系统,最后通过上行链路发送至无人机平台。通过体系化设计实现云雾环境精

细探测、高效作业、智能指挥和定量评估的目标。

2.2 系统设计原则

1) 标准化。系统设计按照“通用化、模块化、实用化”的设计思想,遵循总体规划、统一设计、统一规范的研制原则,具有较好的互补性、兼容性和可扩展性。

2) 可靠性。充分结合人工影响天气任务特点,采用大负载、高升限、长航时的无人机平台,确保实现人工影响天气任务所需的航高、航速、航时。为保障系统安全可靠,创新性使用多余度飞行控制技术 & 容错飞行控制技术,可确保无人飞机在复杂气象环境中的飞行安全。

3) 自动化。为契合无人机人工影响天气业务,充分利用现代无人机技术、计算机技术、地理信息系统技术、遥感技术、大数据分析技术、人工智能技术、云计算分析技术以及空地通信传输技术,构建自动化、智能化、科学化、现代化、集约化的无人机智能化探测作业显控软件。

2.3 工作模式

无人监测作业平台工作流程如图2所示。结合作业区域天气背景,制定作业计划,确定作业区域、路线,以及作业模式,上传至任务规划与调度模块,下达作业指令,无人机监测作业平台接到作业指令后,启动监测功能通过机载监测载荷对作业区云雾环境和气象参数进行监测,经由系统软件给出目标作业云层区域,在适当区域开启播撒装置开展作业,并对全过程运行状态进行监控。在作业过程中,机载监测载荷通过地面链路系统,将探测数据实时回传,融合反演各探测载荷数据产品至任务规划与调度模块,对作业任务进行修订,智能化引导催化作业载荷实施催化作业任务。整个系统通过数据链路,实现作业条件判断、催化作业实施、作业跟踪指挥、作业效果评估及态势综合显示等功能。

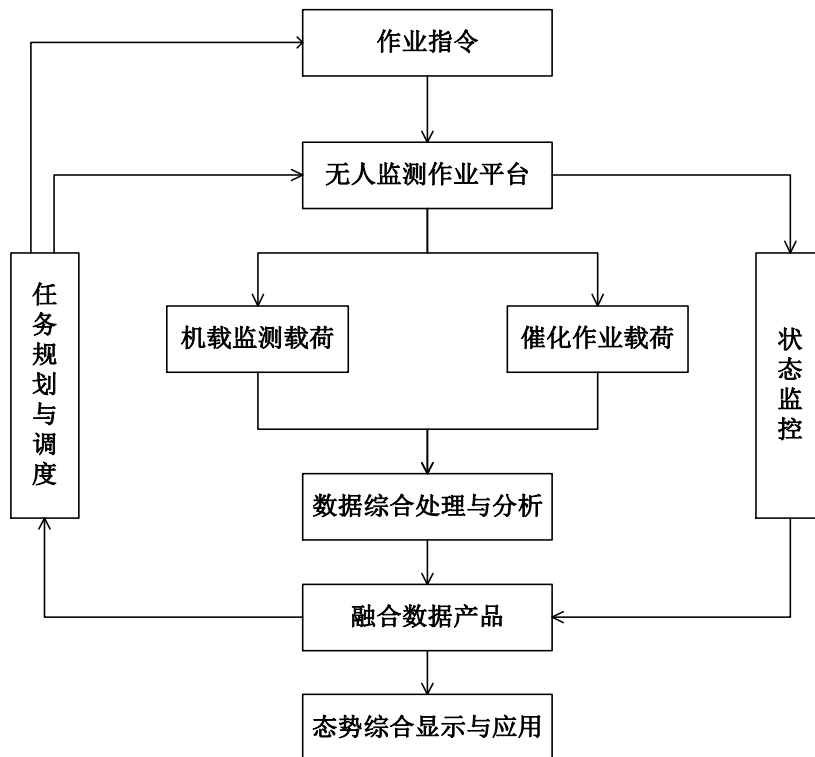


图2 无人监测作业平台工作流程

Fig. 2 Workflow of the unmanned observation and operation platform

3 系统组成与功能

3.1 无人机平台

根据无人机监测作业平台的设计需求,考虑到人工影响天气需要穿云探测作业,该平台会面临复杂的云雨环境。平台要有可靠的防结冰系统,具备应对恶劣复杂条件下的整机伞降能力,以确保整机安全。由于系统面向业务应用,因此,必须选用长航时、高升限、大载荷、机动性强、安全性高的无人机作为平台备用。

3.2 多频段云雨雷达

在无人机平台上加载多频段、多模式云雨探测雷达,如激光气溶胶雷达、毫米波云雨雷达等,通过信号采集与处理单元和数字信号预处理,经遥感数传接口与无人机平台相连,实现对航线区域及空中云雾环境的宏微观探测,实时获取气溶胶厚度、气溶胶类型、气溶胶粒子数浓度,云相态、云粒子、云水含量,以及气溶胶粒子垂直分布等,实现飞行目标区域气溶胶、云、雨、风等要素的三维立体探测。

3.3 航线气象仪

采用原位探测方式,在无人机上加装航线气象仪,可实现对航线常规气象要素(温度、湿度、气压、风速等)的连续测量,支撑作业条件判据,规划指导高效作业。航线气象仪由温湿度测量单元、气压测量单元、数据采集器单元组成。

3.4 影像监测系统

云总量及云的动态变化,是人工影响天气作业条件和安全飞行等指标选择的重要依据。搭载航空平台CCD相机,记录飞行环境中云量及云动态变化的实时影像,为实施催化剂作业决策提供指导,同时为飞机的安全作业提供视频监控。影像监测系统安装于无人机头部下方,可实时观测飞行环境中的实时影像,为地面指挥控制提供作业前、作业中以及作业后的云总量分布等直观判断依据。

3.5 云雾催化播撒装置

云雾催化播撒装置用于进行冷云或暖云催化剂的播撒,外挂在机翼两侧,能够与飞机快速安装拆卸,可根据不同作业条件及要求控制播撒催化剂的时空密度。催化剂通过飞机定向向云中播撒,经过动力扩散,达到催化高度。根据作业任务的不同,播撒装置可以设计为点火式或喷撒式。

3.6 地面载车

主要由车底盘和方舱组成,方舱内设置控制席位、机柜和供电设备,席位上配备显示器、油门杆、操作杆、键盘鼠标及电源控制面板等主要设备。主要用于加载无人监测控制作业系统,完成飞机出航、返航和执行人工影响天气作业任务的指挥控制及任务规划的支撑平台。

3.7 任务规划与控制系统

主要用于完成无人机起飞和降落控制、飞行中的任务执行控制、各种数据链的工作状态监测和信息传输、探测作业载荷监控、航空遥感信息处理以及飞行前任务规划和飞行中实时任务重规划、本机信息与空管系统信息融合处理等功能,实现无人监测作业系统全过程任务规划、飞行控制、任务载荷设备控制、飞行状态信息和飞机任务信息处理显示与记录。

3.8 链路系统

包括视距链路和卫通链路。能够进行地面数据终端和机载数据终端工作参数设置与工作状态信息显示, 监控 C 波段、UHF 波段、Ku 波段、Ka 波段测控链路, 进行卫星链路入网管理等。

3.9 数据处理与分发管理系统

数据处理与分发管理软件设计如图 3 所示。主要实现对无人机监测作业平台的状态数据、大气探测数据、业务数据和管理信息统一分析处理, 实现无人机监测作业平台的全作业过程链信息的统一管理, 为无人机监测作业平台任务运行提供数据支撑。具备实时处理地面和机载平台任务载荷的数据、将多模式探测数据融合分析上报并提供决策依据的功能; 能够根据大气探测数据分析结果, 智能化制定无人机作业路线和催化剂播撒作业方案, 下达作业指令; 可经实时监控并显示无人机飞行状态、各任务载荷运行以及各地面设备的工作情况, 综合管理控制无人机平台及载车平台各设备。

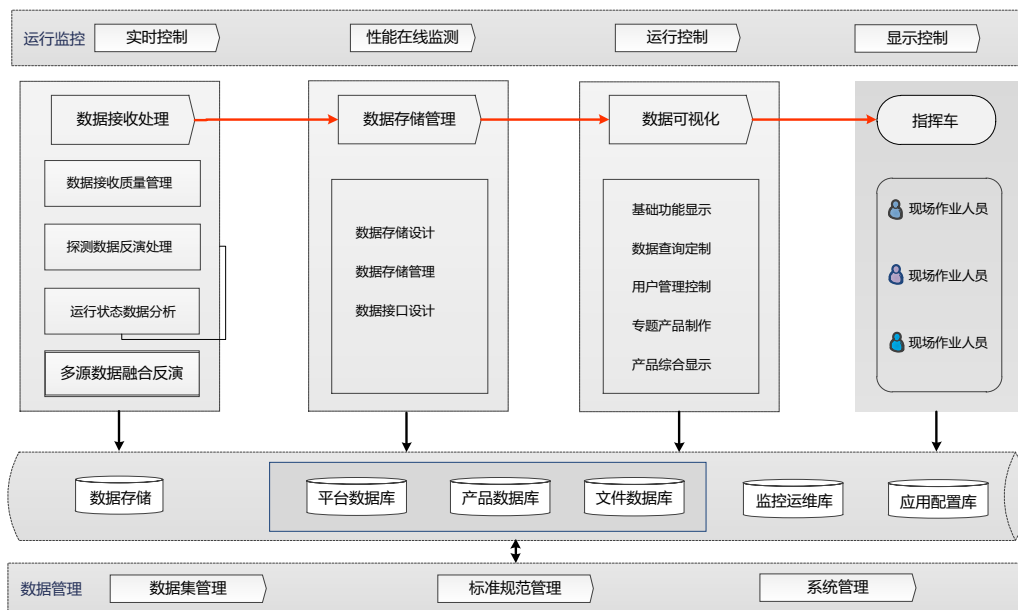


图 3 数据处理与分发管理软件设计

Fig. 3 Design of data processing and distribution management software

4 关键技术分析

在信息化、网络化、体系化背景下, 无人机技术得到迅猛发展, 平台 (含动力) 技术、通信技术、载荷技术是发展无人机最基本的几项技术。随着无人机在多领域的应用拓展, 平台、通信、有效载荷的协调发展成为未来无人机应用的关键技术^[14,15]。在人工影响天气领域的应用须在传统技术基础上, 重点关注无人机平台的云雾环境智能化无人监测作业、空地多设备协同、多机智能化作业、实时大数据分析等关键技术。

4.1 复杂云雾环境监测作业无人智能飞行规避技术

人工影响天气监测作业飞行属于临界气象条件飞行, 有时需要入云探测, 飞行气象条件差、难度大、探测作业安全风险高。针对复杂作业天气环境条件, 研究探测目标智能感知和无人作业安全飞行技术是未来的重要发展方向之一。

4.2 人工影响天气监测作业智能任务规划与决策技术

利用数据挖掘、机器学习、深度学习及神经网络等智能算法模型,实现对数据产品的智能化应用,并通过不同任务的算法实现任务规划、作业条件自动判据等功能,形成人工影响天气监测作业中人机智能的任务规划和作业决策能力,使监测作业由经验决策向基于气象环境态势感知数据的人工智能分析和决策转变。

4.3 云雾环境多设备空地协同观测作业技术

基于无人机平台,搭载激光微波主动雷达,可实现对作业云层内微观结构及演变进程的精确三维立体监测。结合地面机动监测车和日常业务观测网,形成协同探测作业模式,这对实时、准确、高效控制管理各探测设备提出高需求。基于信息系统管理架构技术,为一体化平台设备提供数据管理、状态监控、任务控制等支撑,提升平台设备的智能化管理水平,实现设备智能管理与协同。

4.4 智能化多机协同人工影响云雾环境作业技术

对于人工影响云雾环境催化作业,单架无人机装载的催化剂重量有限,造成作业区域范围受限,设计多机协同方式开展作业,可大大提高作业时空范围和效率。重点需解决协同多机指挥控制、多路径规划,多机编队等技术,实现复杂云雨环境监测作业的多机智能协同运行。

4.5 智能化条件研判与评估技术

开展机载多频段毫米波云雨雷达、多通道激光气溶胶雷达、温湿压风传感器,以及地面机动多模式雷达、业务化常规观测设备等探测资料大数据分析研究。通过对多源载荷反演数据产品融合分析,基于神经网络的模式识别系统,运用加权平均、逻辑判别、条件运算等方法,建立一套实用、量化的无人机人工影响天气作业条件判别指标,对云状、云类型、云微观结构进行自动化识别,实现高度自动化、科学决策的作业条件智能化判别。基于作业过程云雨数据产品,利用机器学习目标识别算法,结合统计经验和数值模型,生产出云和降水宏微观结构的精细化探测数据产品及融合数据产品,支撑后续系统业务化应用。

5 系统应用可行性分析

人工影响天气的物理基础是时空尺度上对典型天气现象的准确认知,人工影响云雾技术面临的最大难点是对动态云系进行精细化追踪探测。地面固定观测设备对动态云系的精细化感知存在不足,本系统可以在复杂云雨环境下实现对动态云系的实时跟踪探测,深入认识云雾微物理结构和云场动态变化特征,进而找到敏感区域和敏感要素,结合地面协同作业设备,有效实施激发,从而提高人工影响云雾作业效能。

为使平台和载荷能够进行有效结合,需要根据载荷工作特点,对平台和载荷进行双向加改装集成,开展环境适应性试验、风洞试验、机载吊舱改造、平台适应性改造、电磁兼容性测试,以确保整系统安全设计,待整机系统集成后将进行多次试飞试验,进一步摸清应用模式。

云雾环境智能化无人监测作业系统集成后,可通过开展复杂云雨环境下人工影响天气无人探测试验、区域空地协同观测试验、探测综合效能评估研究等,检验复杂云雨环境下新型无人监测作业系统的综合运用能力和各项技术指标,探索系统应用模式。其中,复杂云雨环境无人探测试验目的是进行复杂云雨环境无人监测作业系统飞行试验、复杂云雨环境数据无线传输试验,以及复杂云雨环境任务载荷探测试验,籍此

测试无人监测作业系统在复杂云雨环境中的飞行状态、防结冰能力、穿越复杂云雨环境的平台功能和性能, 检验探测载荷在复杂云雨环境下的运行状态及探测能力; 区域空地协同观测试验目的是基于机载探测载荷以及地面观测设备, 获取空地一体化的人工影响天气作业前、中、后区域气象数据, 进行空地协同观测方法探究, 完成空地一体化探测数据反演产品分析; 综合效能评估研究的目的是, 通过空地观探测数据融合分析和催化作业效能评估, 进一步获取载荷对任务目标的实际探测能力及其探测数据在人工影响天气作业决策中的应用权重, 评估其应用效能。

6 结 论

将智能化技术应用于大载荷和高升限无人机系统, 设计了一个集机载激光雷达、毫米波云雨雷达、航线云雾探测、常规气象要素探测和云雾催化作业为一体的空基无人监测作业系统框架, 为建立云雾宏微观相态精细感知、云降水变化(增雨消减云雾等)的全过程监测、智能化无人机自主飞行、作业条件分析与研判、催化作业与效果评估等全信息链条的空基无人机监测作业平台系统提供了思路, 该框架是人工影响天气领域新技术新方法发展与应用的初步思考, 有望为进一步探索推进人工影响天气技术精细化、高效化提供一种有效手段。该系统框架的推广应用还存在需要进一步突破的关键点, 一是应用于人工影响天气工作的飞机平台须具备高抗环境变化能力, 表现在机身的坚固设计、动力高冗余设计、防水防积冰等设计上; 二是空地一体网格化多源数据智能分析应用算法技术还需要不断进化提升; 三是新技术新手段的运用规程和法规亟待建立。

随着无人技术、智能技术的发展和应用领域的拓展, 必将带来人工影响天气领域智能化无人监测作业技术的快速发展, 安全性、智能性、及时性和有效性是未来的发展趋势, 积极探索无人机在人工影响天气领域应用模式、提高无人监测作业系统整体效率是一项长期持续的课题, 对推动该领域的技术发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] Huang M Y, Shen Z L, Hong Y C. Advance of research on cloud and precipitation and weather modification in the latest half century [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 536-551.
黄美元, 沈志来, 洪延超. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 2003, 27(4): 536-551.
- [2] Lei H C, Hong Y C, Zhao Z, et al. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 967-974.
雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 2008, 32(4): 967-974.
- [3] Guo X L, Fu D H, Hu Z X. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008—2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 351-363.
郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展 (2008—2012年) [J]. 大气科学, 2013, 37(2): 351-363.
- [4] Zhang Q, Guo E M, He H, et al. *Experimental Study and Application of Weather Modification* [M]. Beijing: Meteorological Press, 2011.

- 张 蕾, 郭恩铭, 何 晖, 等. 人工影响天气试验研究和应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [5] Fan B K, Zhang R Y. Unmanned aircraft system and artificial intelligence [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1523-1529.
樊邦奎, 张瑞雨. 无人机系统与人工智能 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2017, 42(11): 1523-1529.
- [6] Li B, Li X B, Li C, *et al.* Impacts of wind fields on the distribution patterns of traffic emitted particles in urban residential areas [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 68: 122-136.
- [7] Wang D S, Peng Z R, Li B *et al.* Vertical atmospheric PM_{2.5} structure observation technology based on multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) platform [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(6): 35-40.
王东生, 彭仲仁, 李 白, 等. 基于多旋翼无人机平台的大气 PM_{2.5} 垂直结构观测技术 [J]. 装备环境工程, 2019, 16(6): 35-40.
- [8] Wang J F, Deng H, Wei Y C, *et al.* UAV onboard ocean observing system [J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(5): 157-162.
王军锋, 邓 豪, 魏育成, 等. 无人机海洋观测系统集成技术研究 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(5): 157-162.
- [9] Qi J T, Ping Y. Survey on flight control technology for hanging load UAV [J]. *Unmanned Systems Technology*, 2018, 1(1): 83-90.
齐俊桐, 平 原. 无人机吊挂飞行控制技术综述 [J]. 无人系统技术, 2018, 1(1): 83-90.
- [10] Department of Science and Technology Development of China Meteorological Administration. *Training Materials for Weather Modification Jobs* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
中国气象局科技发展司. 人工影响天气岗位培训教材 [M]. 北京: 气象出版社, 2003
- [11] Zhou J, Lei H C, Wei C, *et al.* Retrieval method of path-integrated cloud liquid water content for airborne upward-looking microwave radiometer using a cloud model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(5): 1071-1082.
周 珺, 雷恒池, 魏 重, 等. 机载微波辐射计反演云液水含量的云物理方法 [J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1071-1082.
- [12] Shen H R, Shao Q L, Wang S J, *et al.* *Meteorological Detection Technology of UAV* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
沈怀荣, 邵琼玲, 王盛军, 等. 无人机气象探测技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [13] Deng B S. *Weather Modification Technology and Management* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011.
邓北胜. 人工影响天气技术与管理 [M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [14] Yan D, Qi Y H, Wang C. Discussion on the new mode of construction and application based on large-scale UAV system [J]. *Computer Engineering & Software*, 2019, 40(1): 88-92.
闫 东, 齐宇航, 王 诚. 浅谈大型无人机平台应用建设新模式 [J]. 软件, 2019, 40(1): 88-92.
- [15] Tao Y J, Li P F. Development and key technology of UAV [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(20): 34-39.
陶于金, 李沛峰. 无人机系统发展与关键技术综述 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(20): 34-39.