

# 空中国王350增雨飞机改装与集成设计

高扬<sup>1,2</sup> 李宏宇<sup>1</sup> 殷占福<sup>1</sup> 戴艳萍<sup>1</sup> 陈添宇<sup>1</sup> 李集明<sup>1</sup>

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081)

**摘要:** 介绍了西北区域人工影响天气能力建设项目的2架空中国王350国家级作业飞机差异化和通用化的设计思路, 以及西北空中国王飞机机载大气探测系统、机载催化作业系统、空地通信系统改装集成工作的所要遵循的原则、工作思路和初步方案。对后续人工影响天气区域工程项目飞机改装集成工作提供相应的技术支持。

**关键词:** 作业飞机, 大气探测系统, 空地通信系统, 飞机改装, 飞机集成

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.014

## Design and Implementation of King Air 350 National Operational Aircraft

Gao Yang<sup>1</sup>, Li Hongyu<sup>1</sup>, Yin Zhanfu<sup>1</sup>, Dai Yanping<sup>1</sup>, Chen Tianyu<sup>1</sup>, Li Jiming<sup>1</sup>

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** The ways of Design of two King Air 350 National Operational Aircraft in the Project of Weather Modification Capability Building in Northwest China, differentiation and generalization, are introduced. Meanwhile, the principles, train of thoughts and schemes of modification and integration of the airborne atmospheric observation system, airborne cloud seeding system and air-ground communication system are introduced. Finally, the way of aircraft modification will provide a basic support for the following Regional Weather Modification Project.

**Keywords:** seeding aircraft, atmospheric observation system, air-ground communication system, aircraft modification, aircraft integration

### 0 引言

飞机作为一种有效的观测平台, 已经在大气观测领域得到了广泛的使用<sup>[1]</sup>。与利用地基和天基遥感探测系统对大气垂直结构进行观测相比, 飞机观测可以在大气垂直方向实时开展针对气象要素、大气痕量气体、大气气溶胶、云和降水的高时空分辨率原位测量<sup>[2-6]</sup>。因此, 飞机观测平台作为空基平台的重要组成部分, 在气象观测方面发挥了巨大的作用。

从20世纪40年代开始, 不少国家都先后开始利用机载探测平台开展大气探测和人工增雨工作。美国1946年首次采用飞机进行了人工增雨作业, 作为飞机人工增雨技术发源地, 其探测飞机平台发展非常迅速, 装备先进<sup>[7]</sup>, 包括美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、美国国家航空航天局(NASA)、美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家自然科学基金(NSF)等机构拥有20多架不同飞行高度、不同航

速、不同载荷、不同型别的飞行平台, 建立了较为完备完善, 从地表层至平流层, 涵盖所有地球科学领域的空中观测体系<sup>[8]</sup>。其中, 空中国王350系列飞机平台由于优异的高低空飞行性能, 适中的飞行速度, 可靠的飞行稳定性和较高的可维护性等特点, 是使用最多的飞机平台。目前NSF下属1架空中国王350飞机由怀俄明大学使用并运行, 主要搭载了1套针对水汽、液水和云进行遥感探测的机载微波辐射计、弹性散射激光雷达和W波段云雷达, 通过开展云降水观测和人工影响天气试验研究, 得到了液水向冰晶转化的过程, 为云降水物理理论研究和人工影响天气的效果检验工作提供了客观可靠的依据和支撑<sup>[9-12]</sup>。同时, NSF正在改装1架空中国王350飞机, 后期同样会由怀俄明大学使用并运行, 该飞机将之前的弹性散射激光雷达更换成了拉曼散射激光雷达, 增强了对于水汽的探测能力, 同时增加了等速采样头和CVI采样头, 并在其后端增加了针对痕量气体、挥发性有机物、气溶胶、云和降水进行原位探测的设备, 增强了气溶胶对云降水影响方面的探测研究能力。NOAA同样最新采购了1架空中国王350飞机, 并对舱底进行了开双孔, 可作

收稿日期: 2021年1月29日; 修回日期: 2021年9月7日  
第一作者: 高扬(1985—), Email: yanggao@cma.gov.cn  
通信作者: 李宏宇(1975—), Email: hyli@cma.gov.cn

为多种遥感设备的平台,包括高清影像设备、高光谱遥感设备,地质和深海探测激光雷达等,可以开展针对水体、雪和土壤等进行过观测。此架飞机在美国飓风桑迪登陆后及时采样信息,为灾后电力系统的恢复等做出了突出的贡献。

国内大气探测主要依靠各级人工影响天气部门所租用的人影飞机开展。2013年,北京市人工影响天气办公室根据自身需求,首次引进了空中国王350飞机,飞机搭载了气象要素、气溶胶理化特性和云降水微物理结构开展原位探测的大气探测系统和催化播撒系统,同时实现了大气探测和人工影响天气作业功能<sup>[13-14]</sup>。河北省人工影响天气办公室、中国气象局人工影响天气中心和山西省人工降水防雹办公室在先后在2014年、2017年和2018年也分别引进了空中国王350飞机,用于大气探测和人工影响天气作业<sup>[15-16]</sup>。以上对于空中国王350飞机在各领域的应用以及改装集成的经验为西北区域人工影响天气能力建设项目(简称西北人影项目,下同)以及后续人工影响天气工程中该型飞机的改装和集成工作提供了新的思路,也为该型飞机的国内改装积累了丰富的经验。

西北区域地域广袤,降水稀少且分布不均,生态环境脆弱,对于人工影响天气业务的辐射范围、作业手段和质量提升需求紧迫,目前西北区域所使用的人工增雨飞机的性能有限,不能有效覆盖西北主要生态区域和区域内重要流域,无法满足生态环境保护、粮食生产安全、降低草原森林火险等级、缓解用水紧张等社会需要。该区域所用飞机上搭载的大气探测系统、催化作业系统和空地通信系统性能不佳,且没有进行很好的集成,无法实现科学化、精准化和量化的作业要求,不能满足未来人影业务与科研的发展要求。西北工程建设的2架空中国王350国家级作业飞机(简称西北空中国王飞机,下同)和2架新舟60国家级作业飞机能够实现大范围、复杂天气下、应急性、跨区域作业,西北工程建设的空中国王350国家作业飞机与新舟60国家作业飞机相比,其飞行的升限更高和机动性更好,可以针对更为复杂的天气系统开展业务和科研工作,同时,通过遥感探测设备,可以针对大范围云系的发展变化进行连续观测,特别是作业前后云系的垂直结构变化和液水向冰晶转化过程进行有效观测,这能够有效提升人影业务的能力和水平。但是,空中国王350国家作业飞机内部空间狭小,载重能力有限,不具备新舟60国家作业飞机针对不同云系开展多种催化作业的能力。因此,在2架西北空中国王飞机改装集成设计中,需要根据特点以及区域和国家对于该型飞机的需求进行有针对性的设计,这为2

架西北空中国王飞机的设计、改装和集成工作带来了挑战。

## 1 西北空中国王350国家作业飞机的设计原则与思路

西北空中国王350国家级作业飞机作为西北人影项目最为重要的作业实施平台之一,在建设过程中应满足以下设计原则和思路。

### 1.1 设计原则

#### 1.1.1 自主可控

西北人影项目是首次对空中国王350飞机在国内进行改装集成,具有完全自主知识产权,在改装方案设计中,充分考虑和吸收了以往国外改装经验和未来发展趋势,在设计机身集成方面,充分吸收东北区域人工影响天气能力建设项目在飞机集成工作中的经验与不足,面向人影业务和科研实际需求,并首次在该机型上针对探测设备、作业设备和通信设备的进行了集成设计,以实现了机载设备的集成控制以及各类数据的集成采集、质控、处理、决策产品制作、显示和存储功能。

#### 1.1.2 安全可靠

西北空中国王350国家级作业飞机的设计首先要保证作业飞机和机上人员的运行安全。改装和集成方案要从完整的安全体系结构出发,综合考虑飞机加载各类设备、飞机改装、后期维护等对飞行安全性影响的各种因素和各个环节,确保空中国王350国家作业飞机的运行安全。

#### 1.1.3 可扩展性高

西北空中国王350国家级作业飞机在改装设计中,充分考虑了未来人影发展以及其他行业的需求,舱内设计了多个标准的电力、网络、气路采样接口,舱外采用了通用化设计,可以根据不通过任务更换不同的探头,在集成方面,系统柜采取了开源架构,预留了多种接口与算力资源,根据用户需求,定制相应功能。

#### 1.1.4 协同性强

西北人影项目根据空中国王350飞机空间狭小,载重能力有限的特点,对2架空中国王350飞机采取差异化改装设计,实现功能上的互补。

### 1.2 设计思路

西北空中国王的飞机探测和作业系统由作业飞机平台、机载任务系统与集成改装构成(图1)。其中,机载任务系统与集成改装包括大气探测子系统、催化作业子系统、空地通信子系统和任务集成子系统。大气探测子系统包括云和降水粒子探测设备、大

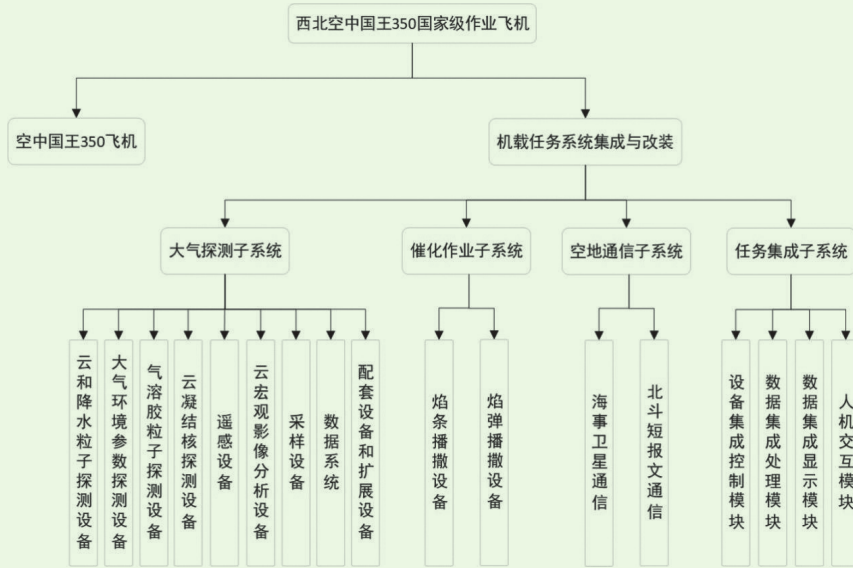


图1 西北人影飞机结构示意图

Fig. 1 System diagram of King Air 350 in the project of weather modification capability building in Northwest China

气环境探测设备、气溶胶粒子探测设备、云凝结核探测设备、遥感雷达等，实现观测云降水系统的宏观特征量，探测云中过冷水含量、云中温度、湿度、液态水量和水汽含量等，以判别作业条件、确定作业时机和部位、修订作业方案、检验作业效果，提高人工增雨作业技术水平和监测区域空中云水资源动态。催化作业子系统由焰条播撒设备、焰弹播撒设备构成，实现对不同云系的不同部位进行催化作业。空地通信子系统含有海事卫星通信和北斗短报文通信两部分，实现空地通信子系统具备作业飞机与地面人影业务平台之间文字、语音及数据信息的互传与共享。任务集成子系统由设备集成控制模块、数据集成处理模块、数据集成显示模块和人机交互模块构成，实现对机载大气探测子系统、催化作业子系统和空地通信子系统进

行集成控制以及各类数据的集成收集、处理、显示和存储。

## 2 西北空中国王350国家作业飞机的改装设计

空中国王350作业飞机的改装，包括加装大气探测、催化作业、空地通信和任务集成各类设备，同时配备必须的机载电源管理、操作台/机柜等。飞机改装充分考虑各系统间协调配合、相互联动，并合理布局，保证飞机系统建设的安全性和先进性。能够满足单机和协同开展催化作业和科学探测试验等任务。

### 2.1 西北空中国王350飞机改装的安全性设计

西北空中国王飞机改装必须符合CCAR-23-R3部适用条款，本着对原机改动最少的原则，确保飞行安全，在改装方案里应确保其重量重心满足原飞机重量重心包线要求，尽量不破坏原机的气动外形，露出机体部分的构件进行优化设计，并采取整流措施减小对飞机气动特性（图2）的影响。保证不会对飞机的安全飞行产生影响，并且在后期维护过程中可迅速、方便地拆除加装改装设备。

西北2架空中国王飞机须对大气探测系统、催化作业系统、空地通信系统、任务集成系统的硬件设备进行改装。大气探测系统的改装包括对左、右机翼中部局部加强，在下部分别安装挂架，每个挂架可以安装3个探头。在空中国王飞机（B-10E5），左挂架用于安装探头PCASP-100X、AIMMS-30（ADP）、FCDP，共计3个探头，右挂架用于安装探头3V-CPI、

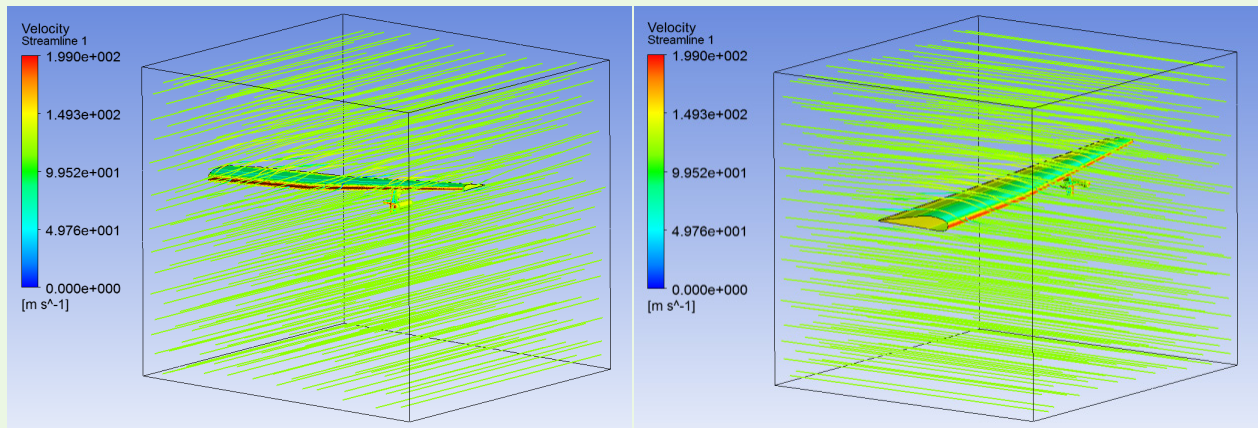


图2 西北空中国王350飞机机翼下探头流场分析图

Fig. 2 The flow field of instruments that under the King Air 350's Wing

HVPS和1个探头预留筒，共计2个探头1个预留筒，垂尾上安装总水/液水探头TWC/LWC，在机顶中段安装Brechtel Cvi Inlet 1204及Brechtel Iso Inlet 1200提升作业效果探测能力；在空中中国王飞机（B-10E6），左挂架用于安装AIMMS-30（ADP）以及2个探头预留筒，其中1个探头预留筒用于安装GVR并对内部连线进行相应改装提升人影作业指挥能力。因此左侧挂架共计1个探头及2个预留筒，右挂架用于安装PCASP-100X、Hawkeye和KPR，因此右侧挂架共计3个探头，机舱内尾部安装用于弹性散射偏振激光雷达观测所需的高透光率玻璃，在机舱中部安装面积为 $(640 \times 720) \text{ mm}^2$ 的高透光率玻璃；2架飞机的数据采集系统均安装于机舱中部，以确保重心位置不发生偏离。对于机载催化播撒系统，在左右机翼的发动机后方安装焰条播撒设备，在机腹下部安装焰弹播撒设备，所有固定点均经过强化处理。对于空地通信系统，机身顶部蒙皮上安装海事卫星天线，后机身上安装北斗用户机天线，GPS天线安装于左右机翼上表面，其通信集成系统安装于舱内操作台。任务集成系统所需的机载通信控制设备、计算机、显示器、数据存储以及控制单元等监控、操作系统所需硬件集成安装于舱内综合设备机柜及机载操作台上，机柜、操作台以及舱内安装设备通过专用地脚螺栓固定于座椅导轨上。通过CFD模拟表明探头的安装位置能够保证正确的颗粒物数据采集，通过强度计算表明挂架及舱内设备的安装均满足强度及疲劳强度要求，并且改装后飞机的重量重心在允许范围内。

## 2.2 西北空中国王 350 飞机改装的通用化设计

为了拓展飞机平台的应用范围，对西北空中国王350国家作业飞机平台接口、机载催化作业子系统和空地通信子系统进行了通用化设计。

在飞机座舱两侧，共计安装了5组通用化航空插头接口，包括1个28 V和1个12 V直流航空插头接口，1个115 V交流供电航空插头接口，1个422串口航空插头接口和1个以太网航空插头接口（图3）。该项设计主要是为了后期加装或者更换探测设备提供统一的供电和数据传输接口，使得该平台具备了执行多任务的能力。对于具备作业效果探测能力的西北空中国王飞机（B-10E5），可以通过调整舱内的采样类设备，实现针边不同层结痕量气体、气溶胶的空间分布特性及其组成特性的观测，配合机翼下所搭载的云微物理探头，可以为研究边界层过程、新粒子生成、气溶胶活化特性及其对云降水的影响等研究提供客观可信的数据支持。对于具备人影作业指挥能力的西北空中国王

飞机（B-10E6），可以通过调整架设在预留高透光率观测窗口上的遥感设备，开展针对植被、水体、沙漠等对地遥感和拍照观测，以及针对各类对地观测卫星遥感元器件进行测试。

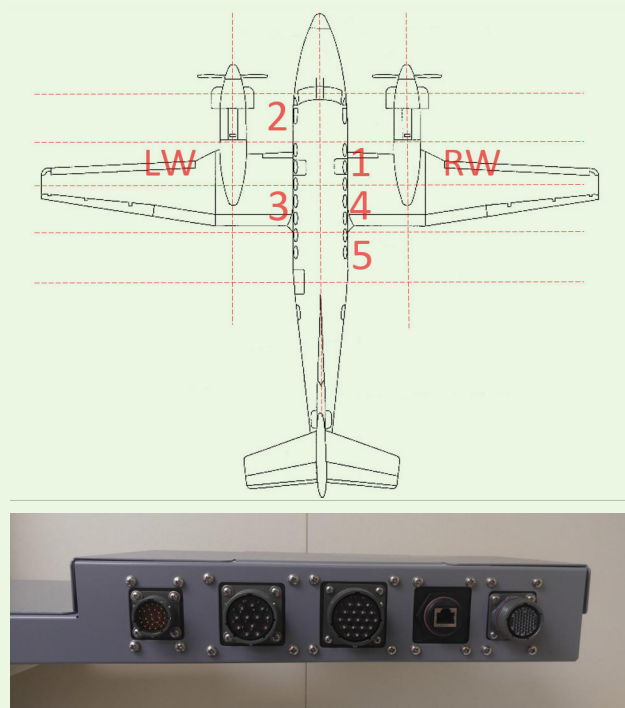


图3 每组航空插头接口分布图  
Fig. 3 The distribution of each aviation plugs

对于机载催化作业子系统，2架西北空中国王飞机均在2边机翼后缘各安装1组可装载18根焰条的焰条播撒架，并在机腹下方安装1组可装载102枚焰弹的焰弹播撒架。2种催化剂均可通过安装于机舱内部系统控制台的点火器遥控发射，2种焰架的发射时间都会被记录在数据接收和显示系统上，并通过串口传到控制平台，之后通过控制平台下传至指挥中心。对于空地通信子系统，2架西北空中国王飞机均在机顶前部安装1套海事卫星通信设备，在机顶中部安装1套北斗通信设备。

## 2.3 西北空中国王 350 飞机改装的差异化设计

针对空中国王350飞机载荷与空间有限的问题，对大气探测子系统进行了差异化设计。

其中一架西北空中国王飞机（编号：B-10E5，图4）搭载了快速云滴探头（FCDP），三视场云滴谱成像探头（3V-CPI）、大容量降水粒子光谱仪（HVPS）、飞机综合气象测量系统（AIMMS-30）、总水/液水探头（Nevzorov Probe）、被动腔式气溶胶粒子谱探头（PCASP）以及由等速采样头（Isokinetic Inlet 1200）和逆流冲击式采样头（CVI 1205）所组成

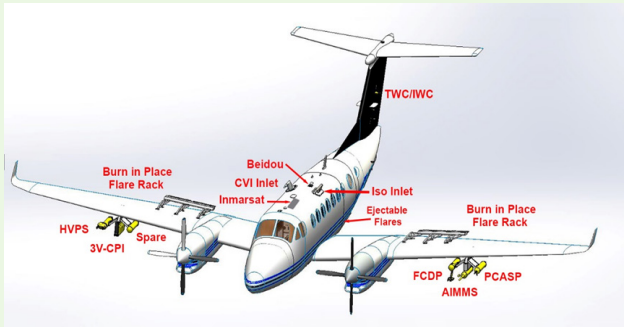


图4 西北人影飞机 (B-10E5)

Fig. 4 King Air 350 in the project of weather modification capability building in Northwest China (B-10E5)

表1 西北空中国王飞机 (编号: B-10E5) 探测设备配置情况

Table 1 Detection equipment for King Air 350 in Northwest China (B-10E5)

类别	简称	制造商	中文名称	测量范围
飞行参数及环境要素	AIMMS-20/30	加拿大 Aventech	飞机综合气象测量系统	温度: 40~50℃ 相对湿度: 0~100%
气溶胶	PCASP-SPP+200	美国DMT	被动腔式气溶胶粒子谱探头	气溶胶数谱: 0.1~3 μm
	Isokinetic Inlet 1200	美国 Brechtel	等速采样头	粒径谱: 0.005~10 μm; 采样气: 100 L
	CVI 1205	美国 Brechtel	逆流冲击式采样头	粒径谱: 7~15 μm; 采样气: 15 L
云降水	FCDP	美国SPEC	快速云滴探头	云滴谱: 1~50 μm
	3V-CPI	美国SPEC	云粒子成像组合探头	云、降水滴谱、二维粒子图像: 10~6500 μm; 云降水粒子照片: 5~2300 μm
	HVPS	美国SPEC	高容量降水粒子光谱仪	降水粒子谱: 150~19200 μm
	TWC/LWC		总水/液水含量仪	0~3 g/m <sup>3</sup>

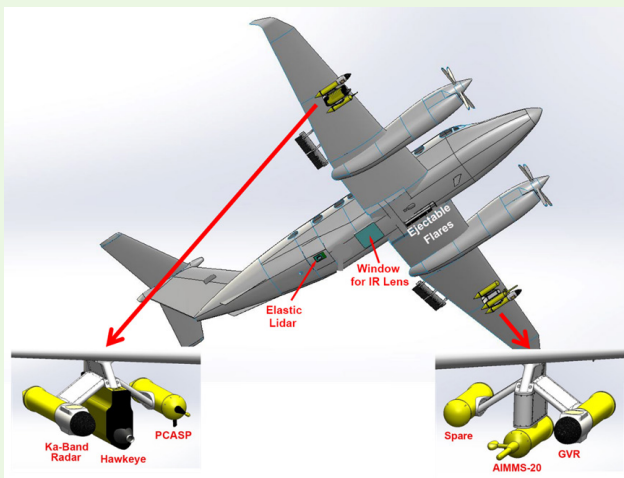


图5 西北人影飞机 (B-10E6)

Fig. 5 King Air 350 in the project of weather modification capability building in Northwest China (B-10E6)

雷达 (AECL) 预留了的观测窗口和电源, 通过这些设备, 可以有效的针对气溶胶、水汽、云和降水垂直结构进行遥感探测 (设备列表如表2所示)。

两架西北空中国王飞机探测性能互补, 在开展人工影响天气作业时, 以遥感探测功能为主的西北空中国王飞机 (B-10E6) 可以作为人影作业指挥飞机, 在

能够在云内和云外为舱内气溶胶采样设备 (例如: SMPS, SP2和AMS等) 提供样气的采样的系统, 主要针对气溶胶理化特性、云降水微物理特性进行原位探测 (设备列表如表1所示)。

另外一架西北空中国王飞机 (编号: B-10E6, 图5) 搭载了云降水粒子组合探头 (Hawkeye)、机载Ka波段云雷达 (KPR)、飞机综合气象测量系统 (AIMMS-30)、气溶胶粒子谱仪探头 (PCASP)、总水/液水探头 (Nevzorov Probe), 并且在机翼下方为机载微波辐射计 (GVR) 预留了安装套筒, 在机舱尾部为大型的主被动遥感探测设备和机载弹性云激光

云顶通过机载Ka波段云雷达 (KPR)、机载微波辐射计 (GVR)、机载弹性云激光雷达 (AECL) 等机载仪器开展针对云体结构和云中液态水层结位置的探测, 并指挥以原位探测功能为主的西北空中国王飞机 (B-10E5) 作为作业效果探测飞机在指定液水层进针对云降水微物理结构和云中气溶胶理化特性的探测, 并在探测后开展人影作业, 同时人影作业指挥飞机在云顶继续针对作业区域和对比区域云体结构进行连续探测, 以验证飞机作业效果 (图6)。通过加装和研发先进的机载大气探测系统、空地通信系统、催化作业系统和任务集成系统, 在空中云水资源监测、作业条件捕捉、作业方案设计和作业指挥通信等方面提升明显, 该项工作可以有效的为气溶胶活化能力及其对云降水的影响以及人工影响天气工作中作业效果评估提供客观有效的基础资料, 为西北区域人工影响天气业务和科研的发展提供了有力支撑。

### 3 西北空中国王飞机机载任务系统的集成

任务系统集成的核心设备是显控计算机设备, 显控计算机设备软件为任务系统集成软件。该软件接收或采集气象探测数据、作业播撒数据、空地通信

表2 西北空中国王飞机 (编号: B-10E6) 探测设备配置情况  
Table 2 Detection equipment for King Air 350 in Northwest China (B-10E6)

类别	简称	制造商	中文名称	测量范围
飞行参数及环境要素	AIMMS-20/30	加拿大 Aventech	飞机综合气象测量系统	温度: -40~50 °C; 相对湿度: 0~100%
气溶胶	PCASP-SPP+200	美国DMT	被动腔式气溶胶粒子谱探头	气溶胶数谱: 0.1~3 μm
云降水	Hawkeye	美国SPEC	云降水粒子组合探头	云滴谱图像: 1~50 μm; 云、降水滴谱、二维粒子图像: 10~6500 μm; 云降水粒子照片: 5~2300 μm
	TWC/LWC		总水/液水含量仪	0~3 g/m <sup>3</sup>
	KPR	美国 ProSensing	机载Ka波段云雷达	发射和接收频率: 35.6 GHz; 垂直分辨率: 30、75、100、150 m (可调)
	GVR (预装套筒)	美国 ProSensing	机载微波辐射计	接收微波频率: 183.31 ±1、±3、±7、±14 GHz
	AECL (预留观测窗和电源)	美国 Alpenglow	机载弹性云激光雷达	发射和接收波长: 355 nm; 最大探测距离: 8 km; 距离分辨率: 1.5、3.0、6.0、12 m

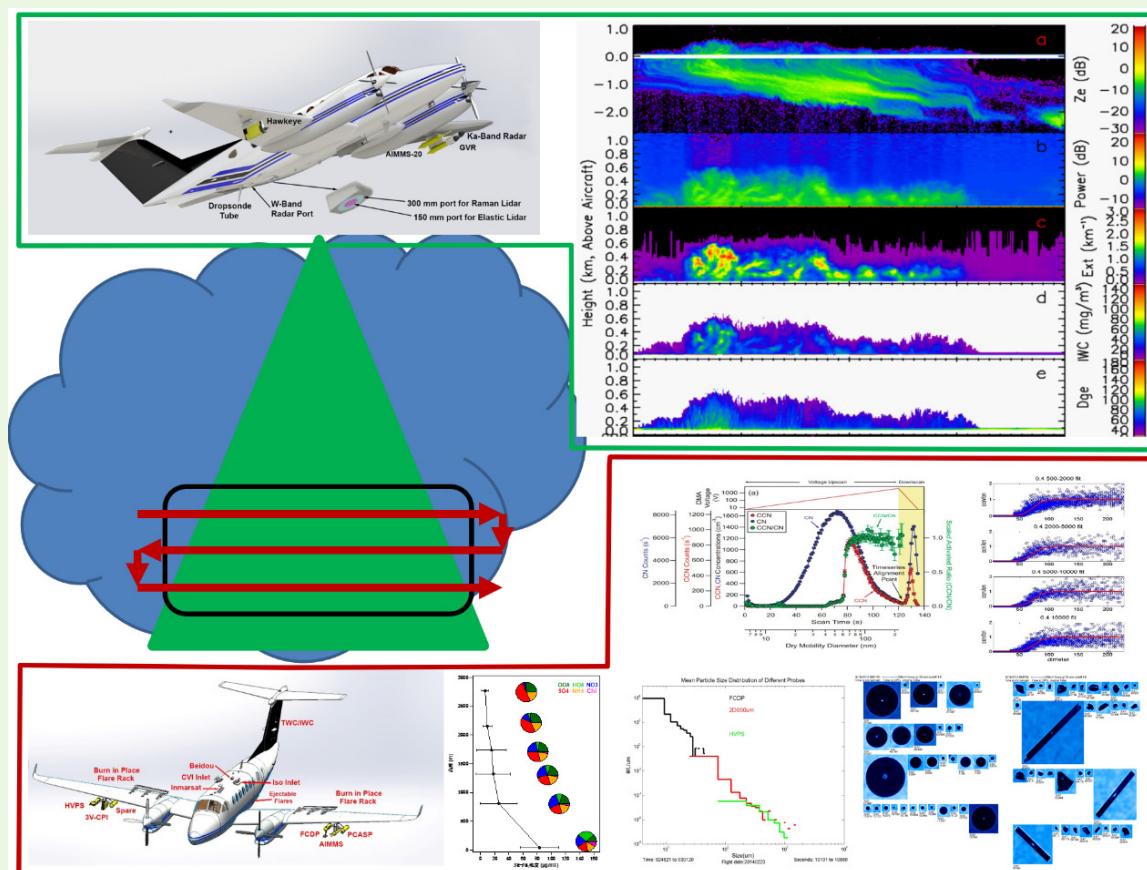


图6 两架西北空中国王飞机的差异化设计的以及工作协同工作示意图

Fig. 6 The differentiation and generalization of the two King Air 350 in the project of weather modification capability building in Northwest China and the way they cooperate

数据、视频监控数据、电源状态数据、设备状态数据等, 进行相应的分析计算, 完成数据判断、显示、存储等功能; 接受用户操作指令, 实现对外部设备的控制; 为了提高系统运行的可靠性, 采用双余度备份设置。2台显控计算机设备及软件完全一致, 可互换, 通过网络连接和数据交互确定主从关系, 相互配合完

成系统功能。

任务系统因其数据处理类型多、数据量大, 实时性、可靠性要求高, 不能采用单一主机或服务器形式综合完成全部系统功能, 而是应采用分布式体系架构, 将不同系统功能分配到不同的高性能计算机上, 组合完成各种系统功能, 以保证系统的实时性与可靠

性。对于单个显控计算机而言，其与外部接口的连接关系如图7所示。

任务系统集成软件部署在显控计算机（采用Win 7/10操作系统）上，完成系统人机交互及各种系统功能。通过以太网以及串口采集或接收数据，数据采集或接收后进行解析处理，用于气象潜力计算、软件界面参数显示、视频显示以及数据保存；此外，软件系

统包括电子地图、系统维护功能模块，用于辅助显示和系统设置（图8）。

为了保证软件运行的实时性与可靠性，显控计算机软件采用多线程架构，设计时确保线程之间没有资源冲突，不涉及交叉控制，各个线程之间通过数据队列或全局变量缓冲区进行数据交互，确保系统运行的可靠性。

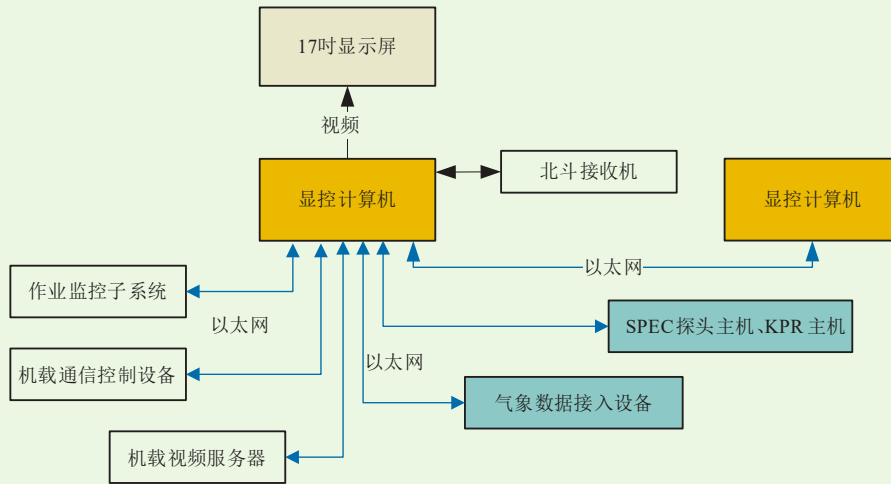


图7 显控计算机与外部设备的链接关系

Fig. 7 The relationship between the center computer and instruments

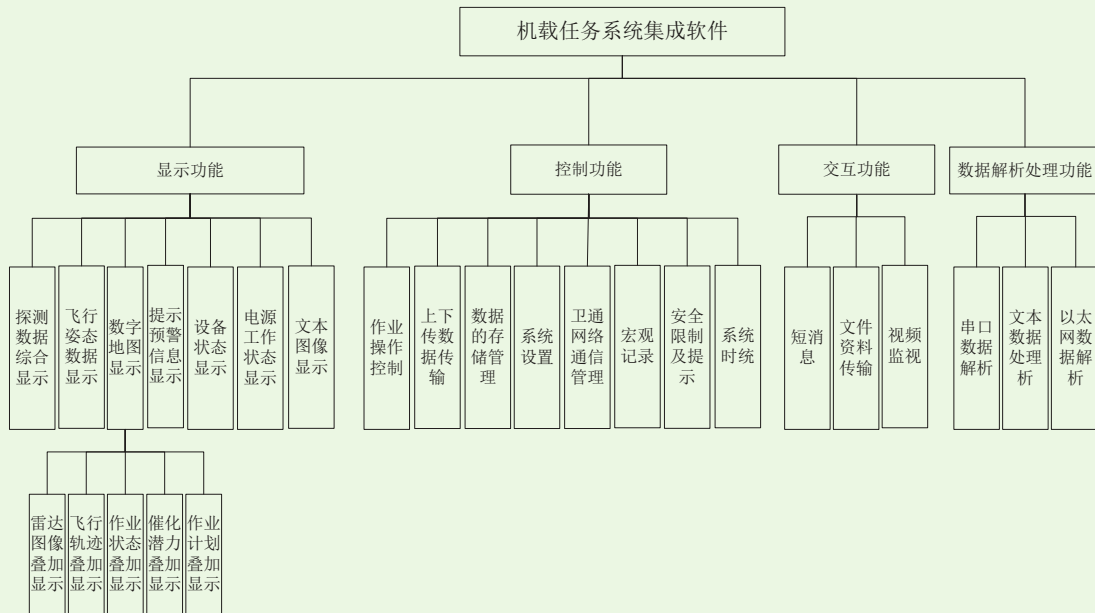


图8 任务系统集成软件的功能架构

Fig. 8 The scheme of the integration system

数据采集或接收模块包含串口数据和以太网数据采集等多个线程；数据采集后在数据解析模块内进行解析，转换成有逻辑意义的数字，再发送到显示模块和数据记录模块进行数据显示与数据记录。操作控制模块是接收到用户操作控制指令后，执行相应的操作

函数，发送相应的控制命令，以实现对整个任务系统的操作与控制。

#### 4 结论

西北人影项目是继东北人影项目之后第二个区域人工影响天气工程项目，西北空中国王飞机继承了东

北人影项目空中国王350国家级增雨飞机的优点，并根据空中国王350自身的特点，提出了差异化改装的设计思路，同时，在飞机平台接口上采用了通用化设计，可以与东北人影工程建设的空中国王350国家级增雨飞机上搭载的大气探测设备通用，并且还可以搭载痕量气体、气溶胶、云和降水等原位和遥感探测设备，拓展了2架西北空中国王飞机的使用场景，实现了可执行多任务的能力。

对于后续区域人工影响天气工程项目中的空中国王350飞机改装和集成工作，将继续延续差异化和通用化设计。同时，在兼容性方面，将兼容更多东北和北人影项目中所采购的探测设备，后续将加强硬件设备的通用化设计，实现接口的统一，为未来所有国家级人工影响天气飞机的通用化保障提供支撑。在自主可控方面，此次改装集成将兼容国产云微物理探测设备，并在后续工程中采用更多的国产气溶胶和云微物理设备；在任务集成工作中，将继续对国产的任务集成系统的算法进行进一步优化，加入具备自主知识产权的通用质控算法，以提高决策指挥水平，提高人影作业水平。

#### 参考文献

- [1] 郭学良, 方春刚, 卢广献, 等. 2008—2018年我国人工影响天气技术及应用进展. *应用气象学报*, 2019, 30(6): 641-650.
- [2] Zhang Q, Ma X C, Tie X, et al. Vertical distributions of aerosols under different weather conditions: Analysis of in-situ aircraft measurements in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(34): 5526-5535.
- [3] Qiang Z, Quan J, Tie X, et al. Impact of aerosol particles on cloud formation: Aircraft measurements in China. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(3): 665-672.
- [4] Quan J, Jia X. Review of aircraft measurements over China: aerosol, atmospheric photochemistry, and cloud. *Atmospheric Research*, 2020, 243: 104972.
- [5] Liu P, Zhao C, Zhang Q, et al. Aircraft study of aerosol vertical distributions over Beijing and their optical properties. *Tellus B*, 2009, 61: 756-767.
- [6] 段婧, 楼小凤, 卢广献, 等. 国际人工影响天气技术新进展. *气象*, 2017, 43(12): 112-121.
- [7] Gentry, R. C. History of hurricane research in the United States with special emphasis on the National Hurricane Research Laboratory and associated groups. 13th Technical Conf on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami Meteorol Soc, 1981: 6-16.
- [8] Laursen K K, Jorgensen D P, Brasseur G P, et al. Hiaper: The next generation NSF/NCAR research aircraft. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2006, 87(7): 897-909.
- [9] Wang Z E, Wechsler P, Kuestner W. Wyoming Cloud Lidar: instrument description and applications. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13576-13587.
- [10] Wang Z E, French J, Vali G, et al. Single aircraft integration of remote sensing and in situ sampling for the study of cloud microphysics and dynamics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93: 653-668.
- [11] French J R, Friedrich K, Tessorodorf S A, et al. Precipitation formation from orographic cloud seeding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(6): 1168-1173.
- [12] Pokharel B, Geerts B. A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part I: Project description. *Atmospheric Research*, 2016, 182: 269-281.
- [13] Liu Q, Quan J N, Jia X C, et al. Vertical profiles of aerosol composition over Beijing, China: analysis of in situ aircraft measurements. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 76(1): 231-245.
- [14] Liu Q, Ding D P, Huang M Y, et al. A study of elevated pollution layer over the North China Plain using aircraft measurements. *Atmospheric environment*, 2018, 190: 188-194.
- [15] Zhao C F, Qiu Y M, Dong X B. Negative aerosol-cloud relationship from aircraft observations over Hebei, China. *Earth and Space Science*, 2018, 5(1): 19-29.
- [16] Yang J M, Li J X, Zhou Z M, et al. Spatial distribution and impacts of aerosols on clouds under Meiyu frontal weather background over central China based on aircraft observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2020, DOI: 10.1029/2019JD031915.