

新舟60高性能增雨飞机机载任务系统集成设计

张骁拓^{1,2} 胡颖琼³ 李宏宇^{1,2} 苏海周^{1,2} 周旭^{1,2} 高扬^{1,2} 张荣^{1,2}

(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;
3 中航西飞民用飞机有限责任公司, 西安 710089)

摘要: 西北区域人工影响天气能力建设项目设计建设的新舟60增雨飞机是集催化作业、云宏微观探测以及实时通信与综合集成显示功能于一体的国家高性能人工增雨飞机。该飞机系统建设中充分汲取了前期东北区域国家增雨飞机研制成果与经验,并在系统供电管理、催化作业能力、探测系统集成、卫星通信功能、设备系统和操作台布局等方面进行了针对性设计改进,通过便捷操作实现对任务系统供电与各分系统的集中控制、综合显示、数据存储共享,并且机载探测、催化、通信各分系统均采用双重或多重备份设计,既保证了机载任务系统先进性设计,同时保证任务系统运行稳定可靠和各项功能的完整实现。

关键词: 人工增雨, 任务系统, 集成, 新舟60

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.015

Integrated Design of the Airborne Task System Equipped for the High-Performance MA60 Seeding Aircraft

Zhang Xiaotuo^{1,2}, Hu Yingqiong³, Li Hongyu^{1,2}, Su Haizhou^{1,2}, Zhou Xu^{1,2}, Gao Yang^{1,2}, Zhang Rong^{1,2}

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081 3 AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089)

Abstract: The MA60 precipitation enhancement aircraft developed in the weather modification capability construction project in Northwest China is a national high-performance seeding aircraft integrating seeding operation, cloud physics detection, real time communication as well as comprehensive display. It fully absorbed the successful achievements and experience in the former seeding aircraft construction project in Northeast China, and further improved designs on the task systems power management, seeding capability, detection system integration, satellite communication function, layout of all outside and in cabin instruments and work consoles. Through convenient operation, it can realize power supply to the task system and each subsystem, and the functions of centralized control, comprehensive display and data storage and sharing. The advanced airborne task system was designed by double or multiple backup detecting system, seeding system and communication system, also guaranteed a stable, reliable operation and functional integrity.

Keywords: precipitation enhancement, airborne task system, integration, MA60 aircraft

0 引言

我国多年以来人工影响天气作业飞机主要以运12飞机为主,该型作业飞机作业能力有限,无法满足跨区作业和混合云作业等对飞机航程、载重、升限等要求^[1-2]。此外,人工影响天气飞机与地面空地一体化作业体系也亟待建立^[3]。2014年12月国家发展和改革委员会和中国气象局联合印发了《全国人工影响天气发展规划(2014—2020年)》,规划结合新时期人工影响天气发展的特点,明确了重点加强飞机人工影响天气

能力建设,建设系列化作业飞机和探测飞机,加快续航能力强、升限高、巡航时间长、负载大、抗结冰能力强的国家作业飞机建设,以满足大范围、跨区域、复杂天气的作业需求^[4-5]。

2012年5月国家发展改革委员会批复立项“新增千亿斤粮食工程东北区域人工影响天气能力建设工程”,新舟60高性能增雨飞机作为该工程核心建设任务,同时也是整个工程项目里最重要、最关键技术装备^[6]。2015年9月和12月东北区域人工影响天气能力建设工程建设的2架新舟60增雨飞机正式投入业务试运行服务。自运行以来,新舟60增雨飞机边运行、边改进,飞机任务系统整体运行稳定,充分发挥出其高性能、先进性和跨区域作业优势,在东北和全国其他五个区域抗旱减灾、缓解水资源紧缺、改善区域生态环

收稿日期: 2020年10月31日, 修回日期: 2020年11月30日
第一作者: 张骁拓(1990—), Email: zhangxt@cma.gov.cn
通信作者: 李宏宇(1975—), Email: hyl@cmam.gov.cn
资助信息: 国家重点研发计划课题(2019YFC1510301)

境和重大活动服务保障及国家重大灾害应急等多方面发挥出了积极作用，取得了显著的经济和社会效益。作为首批增雨专用的大中型飞机，新舟60增雨飞机具有升限高、载重大、续航时间长、抗结冰能力强等优势，机上加装的人工增雨任务系统，既可满足不同目的的作业需要，又能作为空中实验平台开展大气科学相关试验。东北区域建设运行的新舟60增雨飞机建设运行成果和经验，为后续国家增雨飞机的建设提供了很好的示范作用。

东北区域新舟60高性能增雨飞机系统虽然整体运行良好，但在任务设备系统设备舱内布局、机上卫星通信系统等方面也存在明显需改进之处。2017年西北区域人工影响天气能力建设项目立项建设，包括2架新舟60和2架空中国王350在内的国家高性能增雨飞机建设也是项目最重要建设内容。西北区域新舟60增雨飞机建设中充分汲取东北区域国家增雨飞机研制成果与经验，并对系统供电管理、催化作业能力、

探测系统集成、卫星通信功能、舱内设备系统和操作台布局等方面进行了针对性设计改进。本文介绍了西北区域国家新舟60高性能增雨飞机任务系统的基本组成、功能、布局以及集成技术设计^[6-7]，同时为国家和地方高性能人工增雨飞机建设提供技术指导。

1 系统组成及功能

西北区域人工影响天气能力建设项目2架国家新舟60增雨飞机的设计状态完全相同，以新舟60飞机平台为基础，加改装的机上任务系统均由催化作业、大气探测、空地通信、任务集成几个分系统综合组成（图1）。

1.1 大气探测系统

西北新舟60搭载的大气探测系统由大气环境探测设备、气溶胶粒子探测设备、云凝结核探测设备、云和降水粒子探测设备、云宏观影像分析设备等组成。其中粒子测量系统能够实时连续采集探测云微物理特征参量，实时采样分析大气气溶胶、云和降水粒子谱

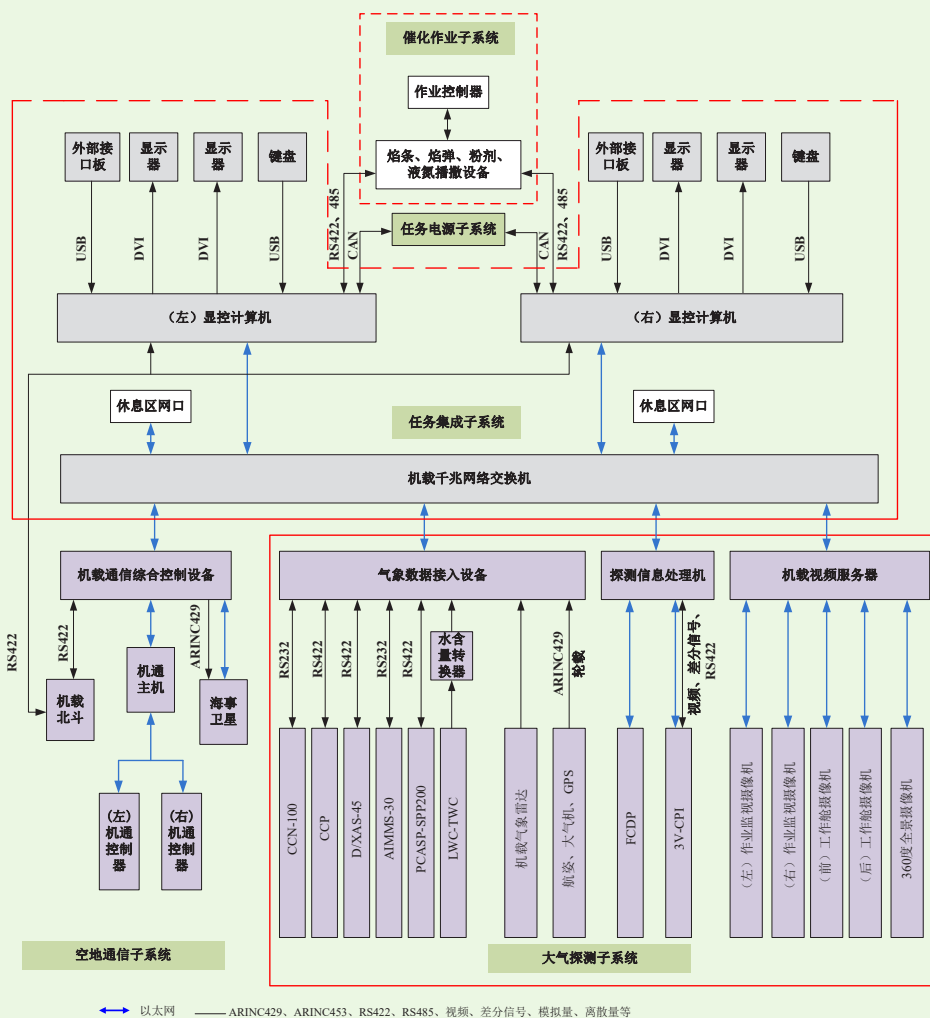


图1 新舟60增雨飞机任务系统和各分系统结构图
Fig. 1 Diagram of mission system and subsystems structure of MA60

分布、云粒子和降水粒子相态、云液水含量、温压湿
风环境气象要素和飞行高度、经纬度、空速、航向等

位置参数信息（表1）。

在西北区域人工影响天气能力建设项目中，新

表1 西北新舟60增雨飞机机载探测仪器配置

Table 1 The detection equipment information on Northwest MA60

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-30	加拿大 Aventech	飞机综合气象测量系统	T: 40~50 °C RH: 0~100%
	D/XAS-45	中国TAICO	综合大气参数采集处理系统	T: 55~70 °C RH: 0~100% LWC: 0~10 g/m ³
水含量仪	LWC-200/300		热线液水含量仪	0~3 g/m ³
	TWC/LWC		总水/液水含量仪	0~3 g/m ³
气溶胶粒子探头	PCASP-SPP+200	美国DMT	被动腔式气溶胶粒子谱探头	0.1~3 μm
云凝结核计数器	CCN-100	美国DMT	云凝结核计数器	0.75~10 μm
云粒子谱探头	FCDP	美国SPEC	快速云滴探头	1~50 μm
组合式探头	CCP	美国DMT	云粒子组合探头	2~50 μm 25~1550 μm
	3V-CPI	美国SPEC	云粒子成像组合探头	2~2300 μm 10~1280 μm 50~6400 μm

舟60国家增雨飞机首次采用国产设备替代进口大气探
测数据处理设备（如DMT公司主机和PADS、SPEC
公司M300），自主研发了基于进口各类机载探测设
备底层数据的国产化机载探测集成、处理和显示系统

（图2、图3），并与进口设备自带的处理分析系统输
出显示的数据进行比对，验证了国产探测集成系统功
能完整性、数据一致性。大气探测设备采集数据呈现
较为直观，输出的原始格式便于应用分析。

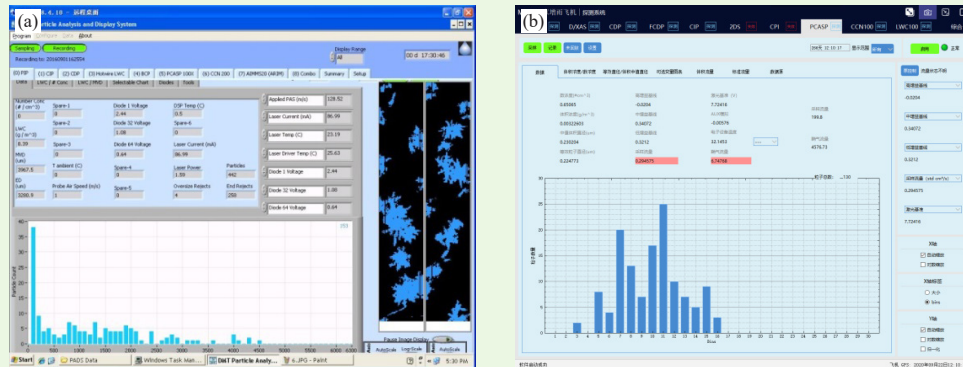


图2 美国DMT公司PADS粒子分析显示系统 (a)、新研新舟60增雨飞机探测集成显示部分 (b)

Fig. 2 Particle analyze system of PADS from DMT company (a), new developed aircraft integrated detection displays system (b)

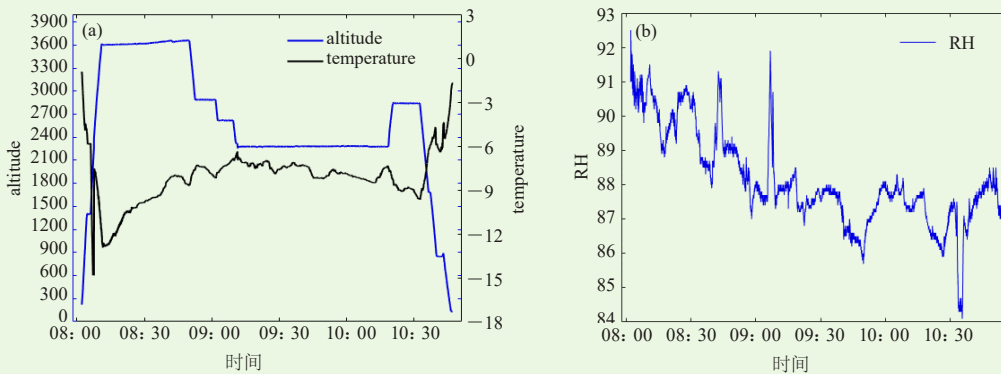


图3 大气探测设备采集的飞行中高度、温度 (a)、相对湿度 (b) 等原始数据处理显示

Fig. 3 Observed altitude, temperature (a), relative humidity (b) collected by the airborne detection equipment

此外，新舟60增雨飞机上加装了5套云宏观成像设备，包括机身左右播撒作业监视、舱内前后工作环境监视以及置于机腹下方的环境全景监视，可实现飞行中对舱外云体宏观特征、降水现象和舱内工作状态的实时监视与拍摄，通过飞机与地面交互，可为飞行安全、科学指挥作业以及催化效果监测评估提供重要观测基础。

1.2 催化作业系统

西北新舟60的催化作业系统由焰条播撒设备、焰弹播撒设备、致冷剂播撒设备、粉剂播撒装置共四

种播撒装备和手动作业控制器组成，兼备手动和自动控制催化剂播撒作业。其中，焰条播撒器（焰弹发射器）还能够实现冷云、暖云焰条（焰弹）的单类作业和双类混合作业；粉剂播撒装置为增雨飞机首次设计应用，专为人工消云减雨作业服务，同时兼顾暖云增雨作业，其装载量达1000 kg。飞机整套播撒系统能够满足冷云、暖云不同作业对象以及云层不同部位催化作业需要，并且实现对目标云的定时、定点和定量播撒作业。在表2中给出不同机型系统能力的对比。

当关闭显控计算机自动控制播撒功能或自动播

表2 不同机型飞机冷云碘化银催化能力比较
Table 2 Comparisons of the catalytic capacity among different aircrafts

机型	焰条			焰弹			最大作业距离/km	直接影响面积/km ²
	满载数量/支	Agl含量 / (g/支)	燃烧时间 / (min/支)	满载数量/枚	Agl含量 / (g/枚)	Agl总量/g		
新舟60	40	125	5	220	3.6	5792	1616.8	9700.8
空中国王350ER	36	27	5	102	1.0	1074	660.0	3960.0
空中国王350HW	36	27	25			972	660.0	3960.0
运12	10	100	25			1000	486.7	2920.0
	16	12	8			192	249.2	1495.0
运7	20	100	25			2000	1184.4	7106.4
运8	20	125	25	400	3.0	3700	1833.3	11000.0

注：1) 最大作业距离，取作业飞行速度与作业时间的乘积，其中作业飞行速度取飞机巡航速度0.8倍；催化剂水平扩散宽度参考《飞机人工增雨（雪）作业业务规范》按6 km计算；2) 作业时间取焰条满载一次同时播撒2支的总用时与飞机续航时间减除起飞降落预留1 h后二者的最小值。

撒控制失效时，西北新舟60使用作业控制器执行手动播撒控制，作业控制器安装于右操作台上，可完成焰条、焰弹、粉剂和液氮致冷剂的播撒控制和状态显示，包括焰条装填状态、预选数量、播撒状态、余

量；焰弹装填状态、预选数量、余量；粉剂播撒状态和余量；液氮致冷剂播撒状态、压力、温度、余量。作业控制器界面布局及其与东北区域新舟60增雨飞机对比如图4所示。



图4 作业控制器界面布局对比
(a) 东北新舟60增雨飞机；(b) 西北新舟60增雨飞机
Fig. 4 Comparisons of seeding control interface
(a) MA60 of Northeast project, (b) MA60 of Northwest project

1.3 卫星通信系统

新舟60的卫星通信系统由机载通信综合控制设备、机载海事卫星通信系统、机载北斗卫星通信系统和综合机内通话系统等组成。其中，海事卫星通信设备主要完成飞机平台与地面指挥中心的实时语音通信、数据文件传输以及低码率视频的上传下达；北斗短报文通信主要完成飞机位置参数和简短指令的传输。具备作业飞机与地面人影业务平台之间文字、数据、语音及低码率视频信息的互传与共享能力。双卫星通信系统对飞行参数、作业信息等关键数据信息互为备份，实现空地协同指挥调度。

海事卫星通信系统由卫星数据单元、双工低噪功放单元、高增益机载天线和辅助话机组成。能够在全国范围内使作业飞机与地面指挥中心之间利用通信卫星进行实时语音通信、数据文件传输以及低码率的视频图像的传输。空地上下传信息详见表3。

表3 卫星通信系统上下传信息

Table 3 The upload and download information of satellite communication system

序号	传输内容	发送间隔	备注
1	载机平台及作业信息	默认1 s	下传
2	设备状态信息	默认10 s	下传
3	短报文	手动	下传
4	FCDP粒子谱信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
5	3V-CPI粒子谱信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
6	CIP粒子谱信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
7	CDP粒子谱信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
8	LWC/TWC信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
9	AIMMS-30信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
10	D/XAS-45A信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
11	PCASP粒子谱信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
12	CCN粒子谱信息	默认10 s, 可根据需要配置	下传
13	宏观记录/日志信息	手动	下传
14	截屏图像	手动	下传
15	文本文件	手动	下传
16	视频通信	视频通话时, 连续发送	下传
17	语音通信	通话时, 连续发送	下传
18	短报文	事件性	上传
19	图片(云降水观测等)	事件性	上传
20	文本文件	事件性	上传
21	视频通信	视频通话时, 连续发送	上传
22	语音通信	通话时, 连续发送	上传

作为空地通信系统不可或缺的组成部分，按统一的空地通信标准接口，在地面指挥中心同时建设与机上卫星通信系统相配套的空地通信软硬件，完成对飞行动态、机载探测和播撒信息实时监控、音视频通信指挥和各种数据信息的交互及共享服务。

1.4 任务集成系统

新舟60的任务集成系统由显控计算机、综合控制板、信号切换设备、机载千兆网交换机、操作台和任务设备机柜等硬件和集成应用软件组成。该系统采用功能集成、网络集成、软件界面集成等多种集成技术，将机载大气探测、催化播撒、卫星通信各类系统分离的设备、功能和信息等集成到相互关联的、统一和协调的集成系统之中，对供电管理、数据集成、语音集成、设备综合控制与显示、系统操作等进行一体化综合集成设计，通过便捷操作实现对任务系统供电与各分系统的集中控制、综合显示、数据存储共享(图5)。

另外，新舟60增雨飞机任务系统电源由变压整流器、变频器、电源显控器、智能配电箱等组成。通过将飞机平台的三相变频交流电源转换成28.5 V稳压直流电源和115 V/60 Hz单相交流电源来给任务系统各用电设备配电，对每一路用电线路进行保护；实现供电的集中控制以及供电电路状态参数的综合显示。电源显控器向任务系统各设备加电，各分系统可成组加电，也可对单独设备加电。

2 任务系统布局

2.1 外挂设备布局

新舟60增雨飞机改装必须严格遵循中国民航相关适航性标准和规范。包括改装布局、飞机称重、气密性、电磁兼容性与飞机任务系统的加改装，必须确保整个飞机系统安全运行，同时保证任务系统能够正常运行、探测数据真实可信，播撒作业稳定可靠、空地通信便捷畅通以及集成操作高效便捷。

飞机任务系统外挂设备主要包括探测、播撒、作业监视、卫星通信天线等各类设备。飞机中机身顶部前后分别加装北斗天线、海事卫星天线。飞机机翼左挂架以进口SPEC探测设备为主，包括加装云粒子成像组合探头(3V-CPI)、快速云滴探头(FCDP)、综合气象测量系统(AIMMS-30)，机翼右挂架以进口DMT探测设备和国产探测设备为主，包括加装气溶胶粒子谱仪(PCASP-100X+SPP200)、云粒子组合探头(CCP)和人影大气参数综合采集系统(D/XAS-45)；在左右机翼的翼尖各加装1套AIMMS设备所需GPS天线；飞机垂尾左侧加装总水/液水含量仪(TWC/LWC)；机身左右两侧各加装1个焰条播撒器、焰弹发射器、作业监控摄像头，后机身左侧加装液氮播撒口；机身腹部加装粉剂播撒口、1个全景摄像头、光学照相窗口及保护舱门，同时为光学照相窗口预留航摄设备安装接口。西北新舟60增雨飞机外挂设备布局图见图6所示。

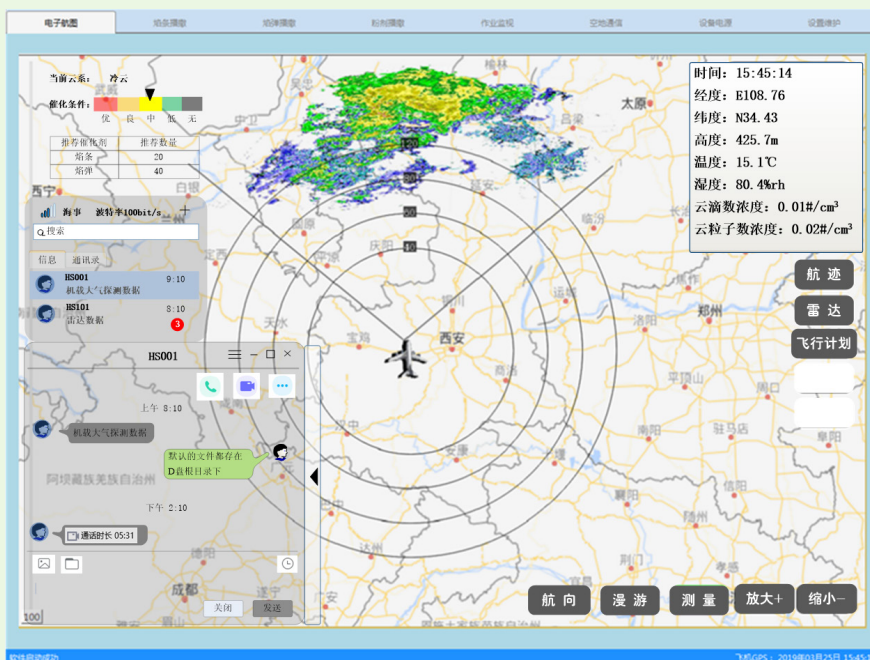


图5 新舟60增雨飞机任务集成系统应用软件电子航图显示界面
Fig. 5 Electronic aviation map in mission integration system of MA60 aircraft

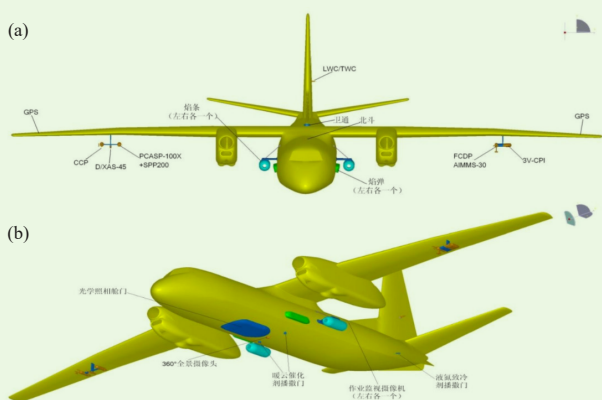


图6 西北新舟60增雨飞机外挂设备布局
(a) 西北新舟60增雨飞机外挂设备正视图; (b) 西北新舟60增雨飞机外挂设备仰视图
Fig. 6 External equipment layout of MA60 in Northwest project
(a) front view of external equipment, (b) bottom view of external equipment

2.2 机舱内设备布局

新舟-60增雨飞机舱内加装的系统设备主要包括: 部分探测设备和播撒装置、卫星通信设备、系统集成设备、供电管理设备以及设备放置所需机柜、操作台等。按从前向后顺序, 加装机载设备为: 客舱前部左侧加装云凝结核计数器 (CCN-100)、右侧加装任务设备机柜 (其上放置通信控制设备、电源、探测信息处理); 客舱中部靠前加装光学照相舱门; 客舱中部加装粉剂播撒装置; 客舱中部靠后加装2个任务

系统操作台 (放置显控计算机与机内通话设备、气象数据接入设备、视频服务器等设备); 休息区左右侧各加装1个网线口和1个交流115 V/60 Hz电源插座。卫星通信电话; 后货仓加装液氮播撒装置、总水/液水含量仪TWC/LWC控制盒、水含量转换器。另外在客舱顶部前后各安装1个工作舱摄像头。新舟60增雨飞机舱内设备布局见图7所示。

3 任务系统集成设计

3.1 架构设计

为提高新舟60增雨飞机系统任务可靠度, 避免单点故障对任务完成的影响, 保证任一设备功能失效不影响或只影响任务系统的部分功能, 任务系统集成采用冗余设计, 包括两套功能完全备份的显控计算机, 在探测信息处理机、视频服务器和显控计算机上进行数据备份存储等。

通过交换机组成机载信息局域网, 分别与机载气象数据接入设备、探测信息处理机、机载通讯综合控制设备、机载视频服务器、显控计算机 (左)、显控计算机 (右) 等网线连接, 组成局域网, 网内数据互通, 实现信息互传共享。显控计算机可存储任务系统各设备数据, 指挥调度通讯控制设备和北斗计算机打包下发数据, 与地面指挥中心实现空地通讯 (图8)。

3.2 硬件设计

任务系统集成设备主要包含显控计算机、气象

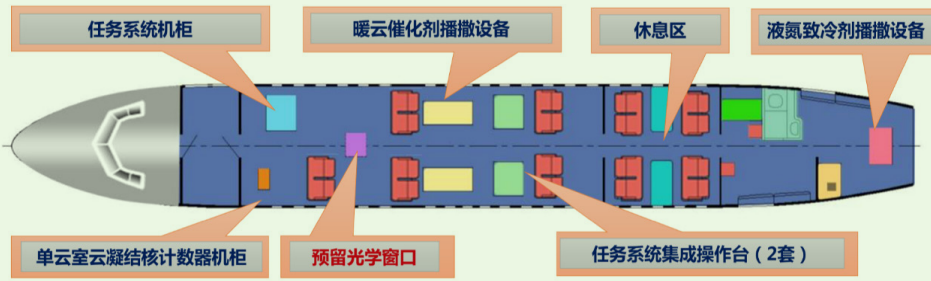


图7 西北新舟60增雨飞机机舱内布局示意图
Fig. 7 Internal cabin layout of MA60 in Northwest project

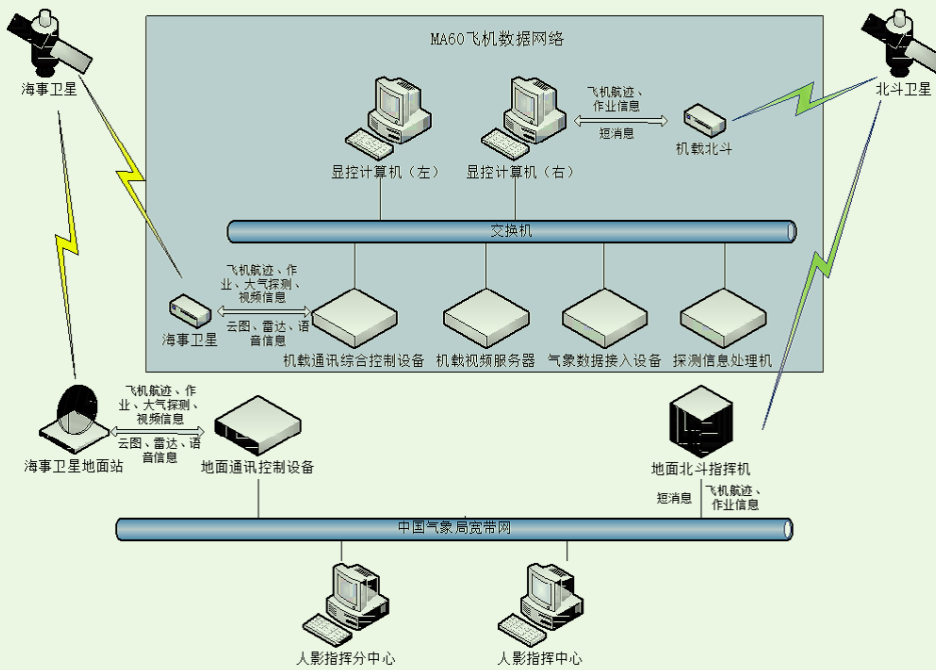


图8 新舟60增雨飞机任务系统网络架构
Fig. 8 Network structure of MA60 in Northwest project

数据接入设备、探测信息处理机、机载视频服务器、机载通信综合控制设备。其中，显控计算机由显控处理模块、电源模块、接口模块、电子盘和机箱五部分组成，为热备份工作模式，可存储任务系统各设备数据，指挥调度通信控制设备和北斗计算机打包下发数据，与地面指挥中心实现空地通信；气象数据接入设备由数据处理模块、接口模块、电源模块和机箱四部分组成。主要完成对包括DMT设备、TWC/LWC和国产设备D/XAS -45、机载气象雷达等数据的采集与处理；探测信息处理机由数据处理模块、接口模块、电源模块、电子盘和机箱五部分组成，负责完成美国SPEC公司3V-CPI和FCDP探头的数据采集、解析处理、数据存储，并打包通过以太网发送到显控计算机；机载视频服务器主要完成作业监控摄像机的数据采集、打包、压缩，并将数据发至显控计算机显示，

同时提供与地面指挥中心视频通信画面。作业监控设备视频服务器主要由电源模块、X86计算机模块、交换机模块、CPLD模块、主板加温模块、电源模块、硬盘和箱体组成；机载通信综合控制设备主要负责管理海事卫星链路，对上下传数据进行综合管理，监控海事卫星设备运行状态；控制海事卫星设备建/拆链；使用调度、延伸话实现语音通话；本地数据库管理及维护。

3.3 应用软件设计

任务系统集成应用软件根据系统功能及业务逻辑，将其分为数据链路层、数据层、业务层以及用户界面层四个层次结构，分别完成原始链路数据采集、数据处理、业务逻辑处理、气象数据综合集成、空地数据综合集成、系统状态监控与模式控制、人机交互界面显示与控制等系统功能。

数据链路层完成以太网收发，RS422收发、RS429收发、A485收发以及CAN总线接收五个软件模块，完成原始数据在总线接口处的采集功能。数据通过与各个传感器之间的接口采集后，气象数据、播撒控制数据采用关系数据库进行管理；图像数据采用数据文件的方式进行保存，通过文件读写的方式使用。数据层包括数据读取、数据保存、数据解析与数据打包四个软件模块，实现各种类型数据的分类解析；作为数据支持模块，发送到对应的软件模块，实现业务层的逻辑功能；数据层不需要用户交互，自动完成气象数据与播撒控制作业的数据记录功能。业务层包括系统状态监控、系统故障模式处理、播撒状态监控、气象数据的综合与集成、空地数据的综合与集成等五个软件模块；其中，气象数据与空地数据的综合与集成需要做成可动态加载模块，以保证增雨飞机任务系统软件的开放性，便于用

户加载第三方软件模块，实现系统功能的扩展与升级。用户界面层完成系统状态、气象信息、空地通信、视频监控显示功能，电子地图与机载气象雷达、飞行航迹叠加显示功能；探测设备设置、播撒控制、空地通信控制、视频监控控制、系统校时等以及整个人机交互界面的操作功能；分为显示软件模块与操作控制模块两个软件模块。

依据系统硬件架构设计，应用软件按照模块功能加载到相应硬件设备上。其中，任务集成系统软件主要软件模块加载在显控计算机上，通过显控计算机完成系统功能实现。显控计算机与探测信息处理机软件采用Windows操作系统，与进口设备数据处理计算机兼容，作为备份方案可直接加装国外原厂探测数据分析软件，保证机载探测功能实现。气象接入设备采用QNX嵌入式实时操作系统，该系统是当前M300软件使用的操作系统，运行实时、稳定、可靠，速度极快，适用于DMT等设备接口数据采集。

3.4 部分设计改进

前期东北区域人工影响天气能力建设工程建设的国家新舟60增雨飞机自2015年投入业务运行服务以来，边运行、边改进，飞机任务系统整体运行良好，但在设备系统舱内布局、机上卫星通信系统设计等方面也存在明显需要改进之处。西北区域人工影响天气能力建设项目国家新舟60增雨飞机充分汲取了东北区域国家增雨飞机研制成果与经验，并在以下几方面进行了针对性设计改进，详见表4。

表4 新舟60增雨飞机任务系统一些设计改进

Table 4 The enhancement in Northwest MA60 compared with Northeast MA60

内容	东北区域新舟60增雨飞机	西北区域新舟60增雨飞机
系统供电管理	采用断路器和开关，设备多、体积大，操作不便，且不能监测电源相关参数	采用智能配电箱，供电控制和参数显示在电源显控器上完成，电源参数能够在显控计算机上显示，操作便捷，并能实时监控设备供电状态
探测系统集成	使用美国DMT公司自带操作台、主机和PADS软件，独立集成，独立显示，并需独立操作	国产化设计，新研集成软硬件替代原厂主机和PADS软件，同时能够实现与其他分系统集中显示与控制
催化作业能力	含焰条、焰弹和液态二氧化碳致冷剂共3类播撒装置，用以手动播撒的作业控制器不具备显示功能	含焰条、焰弹、液氮致冷剂和暖云粉剂共4类播撒装置。作业控制器增加液晶显示，具备播撒设备状态、作业方式及参数显示功能
卫星通信功能	海事和北斗卫星通信均交联在同一台机载通信综合控制设备，发生单点故障后，飞机与地面指挥中心无法通信	海事和北斗卫星通信系统独立运行。北斗卫星RS422接口由原交联的机载通信综合控制设备改为显控计算机，提高空地通信任务可靠度
操作台分布	位于客舱前部，邻近发动机位置，噪音较大。前后分布共3个操作台，各操作台功能独立，集成度不高	位于客舱后部，噪音低。左右分布共2个操作台，其上显控计算机显示内容可左右相互切换，功能相互备份，集成度高

4 结语

西北区域人工影响天气能力建设项目设计建设的新舟60增雨飞机是集催化作业、云宏微观探测以及实时通信与综合集成显示功能于一体的国家高性能人工增雨飞机，该飞机系统建设中充分汲取了东北区域国家增雨飞机研制的成果与经验，对系统供电管理、催化作业能力、探测系统集成、卫星通信功能、舱内设备系统和操作台布局等方面进行了针对性设计改进，飞机任务系统各分系统均采用双重或多重备份设计，既保证机载任务系统先进性设计，同时保证任务系统运行稳定、可靠和实现功能完整。先进性设计主要体现在如下方面：

1) 设计加装了焰条、焰弹、液氮和粉剂共四类机载播撒装置，能够满足人工增雨（雪）或消云减雨不同目的、冷暖云不同对象或云层不同部位的精准催化需要，可实现对冷云、暖云以及混合云的定时、定点和定量播撒作业。

2) 飞机加装国际先进的云粒子测量系统，并首次自主研发基于进口探测设备底层数据的国产化探测集成与处理显示系统，可实时连续采集飞行中云微物理特征参量与云体宏观特征参量，通过与地面指挥中心实时交互，为科学指挥作业和催化效果监测评估提供重要观测手段。

3) 设计应用兼含海事与北斗的双套卫星通信系统，能够实现飞机与地面之间数据、文本、图像、语音和低码率视频等各类信息实时互传及共享、空地一体化指挥，提高了飞机指挥作业的时效性和科学性，同时空地实时监控也为飞行与安全作业提供了重要保障。

4) 设计应用多种集成技术，对供电管理、数据集成、语音集成、设备综合控制与显示、系统操作等进行综合设计和高度集成，可实现对机载任务系统中、高效、便捷管理，机载任务系统的自动化水平、整体应用效率和安全可靠性大为提升。

参考文献

- [1] 范蕙君, 马培民. 云的卫星探测和飞机探测. 气象, 1981, 7(7): 42-44.
- [2] 胡志晋, 王广河, 王雨增. 人工影响天气工程系统. 中国工程科学, 2000, 2(7): 87-91.
- [3] 李德泉, 李抗抗, 李宏宇, 等. 飞机作业监测移动应用系统的设计与实现. 应用气象学报, 2019, 30(6): 715-758.
- [4] 王广河, 姚展予. 人工增雨综合技术研究. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 1-10.
- [5] 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). 大气科学, 2013, 37(2): 351-363.
- [6] 李宏宇, 周旭, 张荣, 等. 不同机载设备观测的气象要素与飞行参数对比分析. 气象, 2020, 46(9): 1143-1152.
- [7] 魏强, 高建春, 钱越英. 机载粒子测量系统及资料处理. 气象, 1997, 23(5): 37-40.