

# 多要素气象观测无人机系统的设计与应用

胡 鹏, 伍光胜, 孙伟忠, 张志坚

(广州市气象局, 广州 511430)

**摘要:** 针对开展城市小尺度精细化气象观测的应用需求, 通过将无人机控制技术、气象观测技术与计算机及通信技术相结合, 研制了一套多要素气象观测无人机系统, 并开发了相应的数据采集传输模块和地面监控展示软件, 实现了基于无人机平台的气温、气压、相对湿度、风速、风向、颗粒物浓度等气象要素的采集与实时传输; 经过地面和空中飞行试验数据对比验证, 该系统操控灵活、运行良好、稳定可靠, 具有良好的应用前景, 可广泛应用于城市精细化气象观测、应急救援、环境监测等领域。

**关键词:** 气象观测; 无人机; PM2.5; 气象传感器

## Design and Application of Multi Element Meteorologic Observation UAV System

Hu Peng, Wu Guangsheng, Sun Weizhong, Zhang Zhijian

(Guangzhou Meteorological Service, Guangzhou 511430, China)

**Abstract:** According to the application of the urban small-scale meteorological observation, by combining UAV technology, meteorological observation technology with the computer and communication technology, a set of multi element meteorological observation unmanned aerial vehicle (UAV) system is designed, and the corresponding data acquisition and transmission module and the ground monitoring and display software are developed. The acquisition and real-time transmission of meteorological elements such as temperature, air pressure, relative humidity, wind speed, wind direction and particle concentration based on UAV platform are realized. Through the ground and air flight test data comparison and verification, the system is flexible, good operation, stable and reliable, and has good application prospect. It can be widely used in the fields of fine meteorological observation, emergency relief, environmental monitoring and so on.

**Keywords:** meteorological observation; UAV; PM2.5; meteorological sensor

### 0 引言

我国是世界上自然灾害最为严重的国家之一, 尤其是气象灾害约占各类自然灾害的 70% 以上, 因此, 必须加强气象观测及相关灾害的预警体系建设, 尽可能获得更加全面和精确的气象资料, 为防御气象灾害和突发气象事件应急预警提供有力支持。传统的气象观测通常包括高空观测和地面观测。其中, 高空观测主要是指基于气象卫星、探空气球、气象飞机、气象火箭等平台, 利用观测仪器对大气中各个高度的气象状况进行探测; 地面观测则主要指基于地面气象观测站, 利用观测仪器, 如气温计、雨量计、风廓线雷达、微波辐射计、激光雷达等, 每日逐次不间断的收集观测资料。由于各种观测方式的观测范围、精确度、时效性、连续性等均有不同, 因此又具有不同的应用领域。

近年来, 随着计算机、无人驾驶、智能控制、传感器

和气象观测等技术的不断创新发展和国内低空空域的开放, 民用无人机在各领域的应用开始日益普及和成熟, 使利用无人机服务于气象观测成为可能。由于其具有体积小、重量轻、易拆卸、使用灵活、精度高、成本低等各种优点<sup>[1]</sup>, 如能搭载合适的气象观测设备, 则有可能为我们开展大城市小尺度精细化气象观测提供一种有效的手段和平台, 弥补卫星观测、高空观测、地面观测等传统气象观测手段通常只适用于监测较大范围时间和空间尺度天气系统的不足, 为开展低空气象探测技术研究、大城市精细化气象预报、应急救援<sup>[2-3]</sup>、大气污染研究、城市规划论证、交通旅游服务以及气象科普宣传等应用提供有效的技术支撑。

国外对于气象观测无人机的研究, 主要集中在研究探索领域, 起步较早的如澳大利亚 Aerosonde 公司在 1997 年就发布了固定翼气象无人机并在该领域一直处于领先地位, 美国、日本等国科学家先后利用该飞机成功进行过低空气象<sup>[4]</sup>和台风观测试验, 如美国海洋大气局大西洋气象实验室用该无人机对奥费利娅 (Ophelia) 飓风进行了长时间的观测飞行<sup>[5]</sup>。我国自 1997 年起, 在这方面也作了大量工作, 并取得一定成效, 如沈阳航天新光集团和装备指挥学院就共同研制了代号“TF-1”的气象探测无人机系统, 可完成预定飞行区域内的大气温度、湿度、气压、风向、风速等要素的测量任务。2008 年 7 月, 中国大陆首次利用无人机

**收稿日期:** 2018-09-29; **修回日期:** 2018-11-09。

**基金项目:** 广东省科技厅科技计划项目 (2017ZC0403); 广东省气象局科技项目 (2016B34)。

**作者简介:** 胡 鹏 (1979-), 男, 湖南津市人, 硕士, 工程师, 主要从事气象信息网络、气象观测方向的研究。

**通讯作者:** 伍光胜 (1966-), 男, 广东普宁人, 学士, 高级工程师, 主要从事气象观测技术方向的研究。

探测方式对台风“海鸥”进行了探测，飞行时间 3 小时，高度 500 m，距风眼最小距离 100 km，获取了 90% 以上气象要素资料。但是，目前已有的气象观测无人机研究主要集中在于固定翼、长航时、远距离中小型无人机平台，这类无人机平台在沙漠、高山、海洋、冰川等人员难以到达的偏远和危险地区适用性较好，特别适用于台风、洪涝等突发性自然灾害的特殊环境中，但也存在着起降条件要求高、操控专业性强、难以进行垂直观测等不利因素，影响了其适用范围。而近年来，随着微小型无人机技术的发展和成熟，特别是多旋翼无人机技术的迅速发展，为我们开展气象观测无人机技术研究开辟了一条新的途径，利用搭载各类气象载荷的多旋翼无人机起降灵活、操控简单、自由悬停、成本较低等特点，可为我们开展大城市小尺度精细化垂直气象观测及其时空演变研究，建立城市冠层气象观测体系，提供一种全新高效的平台<sup>[6-7]</sup>。

### 1 系统结构及原理

基于多旋翼无人机的多要素气象观测系统与其他类型的无人机系统相比，其外观结构、应用领域、性能指标均有所不同，但从系统原理和系统结构上讲，它同时也符合一个典型的无人机系统组成结构，如图 1，主要包括无人机平台、气象观测载荷、地空通信模块、地面站系统部分<sup>[8]</sup>。

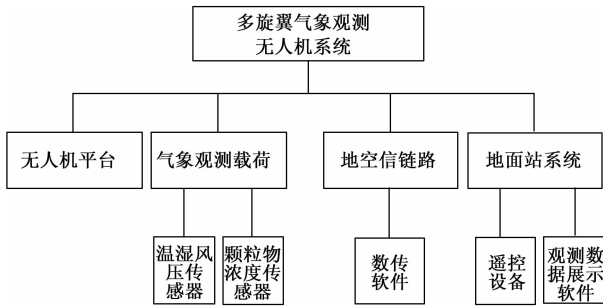


图 1 多要素气象观测无人机系统组成

其中，无人机平台是整个气象探测系统的工作平台，采用 GPS+惯性导航系统，具有自动导航、自动/手动驾驶功能，能在飞控系统控制下完成预定航线飞行，并实时传送飞参和探测数据。气象观测载荷由各类气象探测传感器及定制开发的数据采集模块组成，用于气温、相对湿度、风速风向、气压、颗粒物浓度等气象要素数据的收集和解析。地空通信模块主要负责通过 2.4 GHz 无线信道上传地面控制指令和下传飞机飞行状态参数及气象探测数据。地面站主要包括遥控设备、平板和状态监控软件、观测数据展示系统。

### 2 系统硬件设计

#### 2.1 无人机平台

考虑到城市精细化小尺度气象观测的使用需求，多要素气象观测无人机系统选用可折叠六旋翼无人机平台（图 2），该平台是一种十分成熟的机型，机械结构简单、负载

能力强、可靠性高、噪音小，具备一定抗风和抗恶劣环境能力，最大有效载荷可达 16 kg，由 6 组电机提供动力冗余，在单个电机或旋翼故障时，飞控仍然可以通过调整各电机输出维持飞机的平衡和控制。

其机身部分采用碳纤维材料，电机座连接件采用铝合金制作，配合防滑螺帽锁定，从而在降低机体重量的前提下，取得了较高的机械强度。动力系统则使用 2 组 12 V 锂电池（16000 mah）并联进行供电，通过六组外转子无刷直流电机驱动螺旋桨获得足够升力。飞控系统则由飞行控制器、姿态传感器和 GPS 定位系统组成，可支持预定航线自动飞行和完全手动控制飞行。



图 2 六旋翼无人机平台

无人机平台主要性能指标如表 1 所示。

表 1 无人机主要技术指标

参数	指标
重量/kg	10
轴距/mm	1634
航速/(km/h)	36
最大升速/(m/s)	上升 5 下降 4
续航时间/min	26
最大高度/m	500
有效载荷/kg	16
最远控制距离/m	5000(无干扰、无遮挡,FCC 模式) 3500(无干扰、无遮挡,CE 模式)
控制方式	遥控

#### 2.2 气象载荷

气象载荷是无人机上用来完成气象观测任务使用的各种设备，是整个气象观测无人机系统最核心的组成部分。主要由温度、湿度、气压、风速、风向、颗粒物浓度传感器和数据采集模块构成，其工作原理如图 3，数据采集模块采集到气象传感器数据后，通过飞控数据传输接口使用 2.4 GHz 无线信道回传到地面遥控器中，经过初步处理后再通过 Google 的 AOA 技术，将数据字节传输到地面站 APP 软件进行解析处理、校正纠偏并封装成 Json 指定格式的字符串通过 Http 协议以 Post 形式提交到数据库服务器，最终通过观测数据展示平台实时显示。

由于气象传感器性能好坏直接关系到观测任务完成质量，通过调研论证，温度、湿度、气压、风速、风向测量选用德国 Lufft 公司的 WS800 一体化气象站完成，该组件

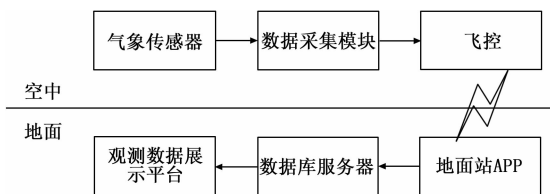


图 3 数据流图

结构轻巧紧凑, 集成多种气象要素传感器, 尤其是使用超声波测风技术、MEMS 电容测压技术、NTC 热敏电阻测温技术、电容式测湿技术, 仅重 1.5 kg, 适于通过固定支架安装于无人机上。通过基于 Spalart-Allmaras 模型对多旋翼无人机的流场仿真计算可得出, 在无人机中心轴上气流流动较为平缓, 且上方气流强度要远小于下方, 对传感器测量干扰最小。因此, 在保证无人机结构稳定性的前提下, 将气象传感器安装于旋翼无人机安装于中心轴上方更适合传感器测量, 使其尽可能不会受到无人机飞行时螺旋桨扰动气流影响<sup>[9]</sup>。颗粒物浓度测量则选用德国 Grimm 公司的 11-E 迷你激光粒径谱仪完成, 其基于散射光测量技术, 可获得空气中粒径 0.25 μm 到 32 μm 的颗粒物分布数据, 仅重 1.7 kg, 适于安装于所选无人机机身内部, 并且为保证仪器测量准确性, 将探头引出至中心轴上部支架以采集空气样本。

整个气象载荷主要技术指标见表 2。

表 2 气象载荷主要技术指标

要素	测量范围	精度
气温/℃	-50~60	±0.2
风向/(°)	0~359.9	±3
风速/(m/s)	0~75	±0.3
相对湿度/%	0~100	±2
气压/hPa	300~1200	±0.5
辐射/(W/m <sup>2</sup> )	0~1400	<5%
颗粒物浓度/(μg/m <sup>3</sup> )	0.1~100000	
颗粒物数浓度/(个/L)	1~2000000	
颗粒物粒径范围/μm	0.25~32	

### 2.3 数据采集模块

数据采集模块是整个气象观测无人机的重要模块, 负责完成读取、解析、回传机载气象传感设备和颗粒物浓度传感设备的探测数据, 同时还要为各传感设备和其他器件供电, 以及检测实时电压。因此, 其主要由数据处理芯片、数据回传接口、数据读取接口、电源模块和电压检测模块几个部分组成。由于气象传感器采集数据的读取与解析需要进行大量的运算, 故数据处理芯片选用了运算性能较强的意法半导体公司生产的 STM32F103RCT6 低功耗嵌入式微控制器开发<sup>[10]</sup>, 该处理器是针对低功耗和低成本应用而设计的高集成度 32 位嵌入式微控制器, 采用了当前最为流行 ARM Cortex-M3 内核, 最高工作频率在 72 MHz, 内部 4 个 16 位定时器, 最多可产生 16 路独立的 PWM、2 个 12

位精度 A/D 转换器, 集成有各种通信接口 (UART, SPI, I2C, SDIO), 完全能够满足本设计的基本要求。数据回传接口即使用该处理器自带 USART 异步串口开发, 配合外围通讯接口芯片 SP3485 和 MAX3232, 通过 RS-485 接口和 RS-232 接口每隔 6 s 分别采集、解析一次 WS800 和 11-E 的传感器数据。电源模块使用 TPS54560、TPS54260、AMS1117-3.3 作为电源芯片, 其中 TPS54560 电源芯片为气象传感设备和颗粒物浓度传感设备提供 12V 直流电源, TPS54260 电源芯片向 LM358 等 IC 提供 5 V 电源, 而 AMS1117-3.3 为 STM32F103RCT6 处理器提供 3.3 V 电源。电压检测模块则使用 LM358 运放芯片对电池电压进行采样, 使处理器能够实时读取电池电压。

由于处理器运行的是微型操作系统 μC/OS-III, 同时启动了两个任务分别处理气象传感器数据和颗粒物浓度仪数据, 每个任务的处理类似且相对独立, 其整个采集程序流程如图 4 所示。

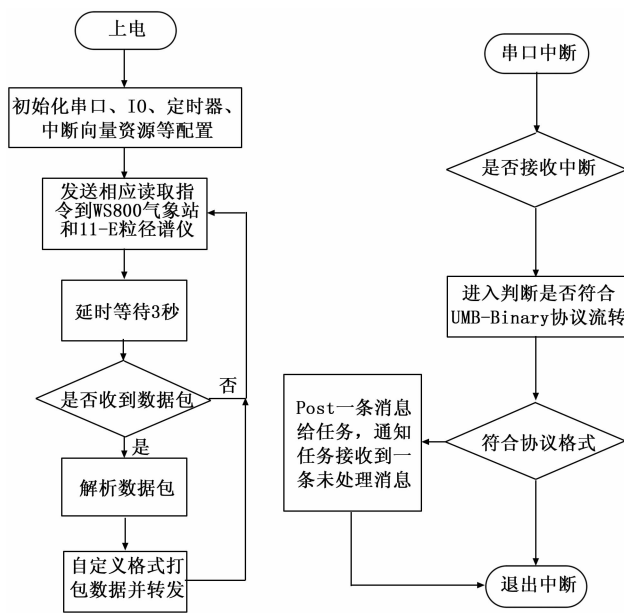


图 4 数据传输模块流程图

## 3 系统软件设计

### 3.1 地面站控制软件

地面站是整个气象观测无人机系统的控制中心, 由遥控设备、计算机、显示设备、通信设备等组成。主要功能包括控制无人机飞行姿态、无人机状态参数显示、任务规划、气象载荷数据显示及推送等<sup>[11]</sup>, 如图 5 所示。

运行于 Android 平台的地面站控制软件基于高德 SDK 和 DJI SDK 开发, 其中高德 SDK 用于卫星地图显示和无人机的实时位置标记, DJI SDK 则用于向遥控器发送飞行控制指令, 接收处理飞控回传的飞机参数数据和气象传感设备数据。

当气象数据通过遥控设备回传到地面站 Android 设备之后, 将按照不同的测量数据种类进行相应的解析 (每种测



图 5 地面站控制软件界面

量的数据均为 4 个字节单精度浮点数)，最终得到具体的数据，显示到 Android 设备的屏幕上，并实时自动保存到本地目录下的 csv 文件中，此外，还需将数据封装成 Json 指定格式的字符串，通过 Http 协议将数据以 Post 形式推送到远端数据库服务器中供观测数据实时监控软件读取显示。

### 3.2 观测数据实时监控软件

无人机观测数据实时监控软件（图 6）是整个气象观测无人机系统的最终用户界面<sup>[12]</sup>。其主要功能一方面是实时接收并以时间轴和仪表盘两种方式动态显示当前由地面站传回的温度、湿度、气压、风速、风向、全辐射、PM1、PM2.5、PM10、TSP 等气象观测数据，同时在卫星地图上给出无人机当前位置和飞行状态参数，如高度、速度、俯仰角、航偏角；另一方面，软件还可支持读取后台数据库中存储的飞行历史数据，根据选择的日期按时间序列进行完整的动态数据回放和历史重演。

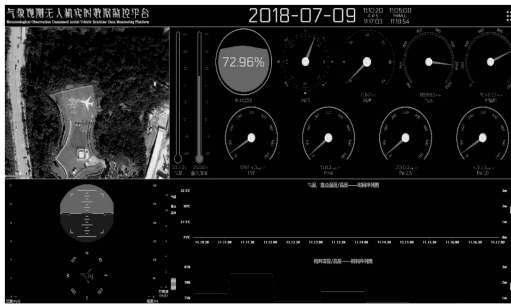


图 6 无人机观测数据实时监控软件

软件采用 WEB 开发标准，基于 B/S 结构，使用 EC-MA Script 6.0、Html5、CSS3.0、Javascript 等技术开发，其中，页面采用前端 MVC 框架设计，通过合理优化页面数据与视图的加载流程，可使用户轻松实现对无人机实时数据的滚动查看与监控，对于气象探测要素仪表盘和无人机飞行状态的展示则采用了 SVG 矢量图形技术+卫星地图的方式进行直观的可视化呈现，达到无变形任意缩放效果，实时数据通信方面则采用了 WebSocket 技术。

### 2.4 实验结果与分析

2016 年 9 月~2018 年 7 月，气象观测无人机系统进行了多次原理验证飞行实验及校对飞行实验，不仅测试了无人机系统与气象载荷设备的兼容性，还区分不同时间段不同高度层上进行了气象要素数据采集、传输以及与实验区

域标准气象自动站数据的比对测试，通过试验验证了无人机观测数据的可信性和可靠性，获得了较满意的效果。图 7 为 2018 年 7 月 9 日在广州市黄埔区 59287 国家基本气象站观测场飞行试验所获取的气象要素数据，试验共分别飞行两架次，每架次分别在地面、相对高度 75 m 和相对高度 150 m 悬停采集数据，共获取数据 738 组；图 8 为 2016 年 9 月 28 日在广州市番禺区 G1000 区域气象自动站观测场飞行试验所获取的气象要素数据，实验飞行一架次，在地面、相对高度 15 m、相对高度 50 m 和相对高度 150 m 共获取数据 68 组。通过将以上实验数据与相同时刻实验场地中气象观测场自动站的观测数据对比可得出：

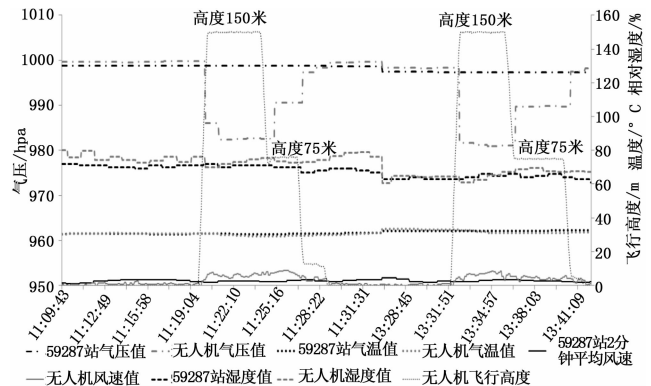


图 7 2018 年 7 月 9 日飞行试验数据

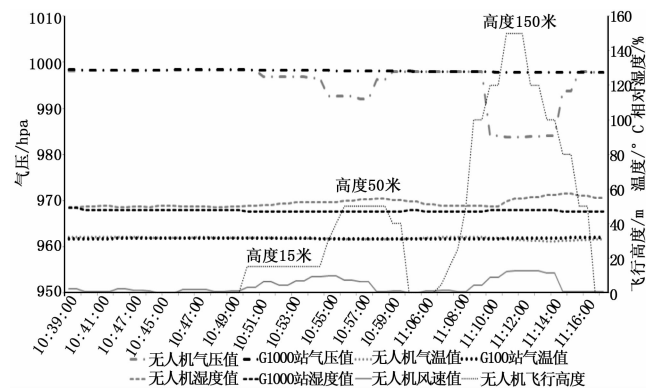


图 8 2016 年 9 月 28 日飞行试验数据

从多次实验数据的气温曲线上对比看，无人机在近地面（即相对高度为 0 m）时，获取的气温值与地面气象自动站观测数据基本一致，偏差不超过 0.2 °C，随着无人机相对高度增加，气温呈略微下降趋势，符合气温垂直递减率，即标准大气压下，每上升 100 m，气温下降 0.6 °C，体现出气温与高度变化的反相关性；从气压曲线的对比上看，无人机在近地面获取的气压值同样与地面气象自动站观测数据基本一致，偏差不得超过 1 hPa，随着无人机高度的上升，气压出现了显著的线性反相关性，相关系数达到了 0.95，体现出了气压随高度增加的递减趋势；从相对湿度曲线对比上看，无人机在近地面所获取相对湿度值与地面气象自动站观测值基本一致，略微偏高 5%，判断为传感器差异引

（下转第 148 页）