

微型无人驾驶飞机气象探空系统

马舒庆 汪 改 潘 毅 刘祖仑

(江西省气象科学研究所, 南昌 330046)

摘 要 微型无人驾驶飞机气象探空系统由微型无人驾驶飞机、数字化探空仪和地面接收控制处理系统组成。微型无人驾驶飞机采用 GPS 导航, 具有自动导航、自动驾驶功能, 它能在机载自动控制系统控制下完成预定航线的飞行, 并实时地将飞机的飞行轨迹和探测数据传送到地面。地面接收控制处理系统显示飞机所在位置的经纬度、高度和探测资料, 并可发出控制指令。数字化探空仪采集温、压、湿资料。利用 GPS 信息进行测风处理, 获得风向风速。

关键词 微型飞机, 无人驾驶飞机, 探空, 气象要素采集

分类号 TH 765. 1, TP 274. 2

无线电遥控航空模型出现后, 气象工作人员就开始用它探测大气。由于无线电遥控航空模型飞机依赖目视和遥控进行飞行, 探测只能在目视范围内(1 km 左右)进行。此外, 航空模型飞机自身没有定位系统, 不能进行定位和测风。倘若配备地面跟踪系统, 又显得庞大, 失去方便灵活的优势。GPS 的出现为研制微型无人驾驶飞机探空系统提供了条件。在 WMO 大气探测委员会和国际科学联盟理事会支持下, 国外提出了微型无人驾驶探空飞机发展计划^[1]。根据我国的实际需要, 中国气象局也将微型无人驾驶飞机探空的研究工作列入“八五”计划。现已研制成微型无人驾驶飞机气象探空系统。

1 微型无人驾驶飞机气象探空系统概况

微型无人驾驶飞机气象探空系统由微型无人驾驶飞机、数字化探空仪和地面接收控制处理系统组成。

1.1 微型无人驾驶飞机

微型无人驾驶飞机具有自动导航、自动驾驶功能。它采用 GPS 导航, 在机载自动控制系统下完成预定航线的飞行, 并实时地将飞机的飞行轨迹和其他资料传送到地面。在气动上采用常规布局与鸭式布局相结合的形式^[2], 飞机动力后置, 起飞重量 12 kg 左右。为了验证飞机的性能, 4 次在地面风力达到 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风天气中试飞, 飞机安定性和可操作性良好。1997 年 12 月 18 日, 在中国气象局科教司组织的测试中, 在高空风速达 $18 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下正常飞行。飞机离起飞点(地面系统)最远距离达 40 km。

中国气象局“八五”重点课题

收稿日期: 1998-01-13; 改回日期: 1998-05-15

第一作者简介: 马舒庆, 男, 1956 年 8 月生, 学士, 高级工程师

飞机有关技术参数为:翼展:3.0 m;机翼面积:0.62 m²;螺旋桨直径:0.46 m;起飞总重:12 kg;最大速度:30 m·s⁻¹;最大爬升速度:3 m·s⁻¹;升限:5 km;续航时间:2~4 h。

1.2 控制系统结构

控制系统以机载计算机为核心,以GPS接收机为主要信息源。机载计算机的可靠性是第一位的。选用单片机80C198作为机载计算机CPU,它有丰富的I/O功能。外围电路采用可编程通用外围电路芯片。机载计算机具有集成度高,体积小,功耗低的特点。控制系统包括机载和地面设备。图1为微型无人驾驶飞机气象探空系统框图。

机载设备有(1)机载计算机;(2)转换电路;(3)GPS接收机,可同时跟踪8颗卫星,定位误差100 m,速度误差0.1 m·s⁻¹,提供经纬度、高度、速度等信息;(4)通信收发机,采用通用的VHF、UHF或其他通信设备,将调制解调器输出的信息发送到地面;(5)调制解调器,半双工方式,最高波特率为1200;(6)陀螺仪,是一种速率陀螺,用于增加飞机的稳定性;(7)遥控接收机,接收地面遥控发射机指令。

地面设备有(1)通信收发机,与机载通讯收发机配套;(2)调制解调器,与机载调制解调器配套;(3)微型计算机,其作用有三,一是接收处理显示飞机上发回的信息,二是在飞机起飞前向机载计算机输入航线和其他初始数据,三是向机载控制系统发送指令。

机载计算机软件功能块分为8个模块。(1)参数设置和诊断模块;(2)GPS信息接收模块;(3)信息处理模块;(4)数学运算模块;(5)航线管理模块;(6)伺服管理模块;(7)传感信息采集模块;(8)无线通信模块。

机载计算机各软件模块并不是顺序运行,而是通过中断进行调度,交叉运行。机载计算机软件系统是一个多任务系统。虽然增加了软件系统的复杂程度,但是提高了硬件集成度和可靠性,降低了成本。图2是自动控制流程图。将地面系统的计算机串行口插头插入机载计算机插座中,开启机载计算机,将航线资料写入机载计算机,机载计算机进行自检,若有异常,通过地面系统的计算机报警。完成检测后,可拔去插头。机载计算机设置初值,采集传感器数据,当收

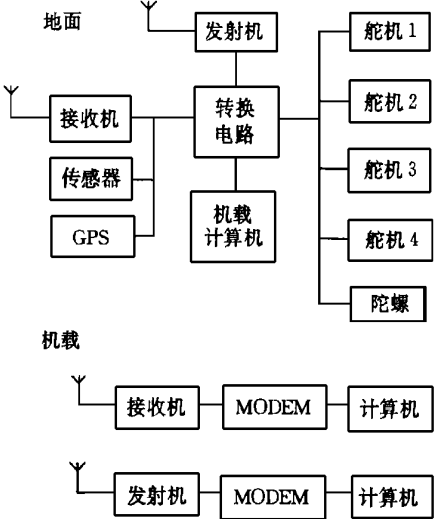


图1 微型无人驾驶飞机气象探空系统框图

Fig. 1 Schematic of the meteorological sounding system by a miniature UAV

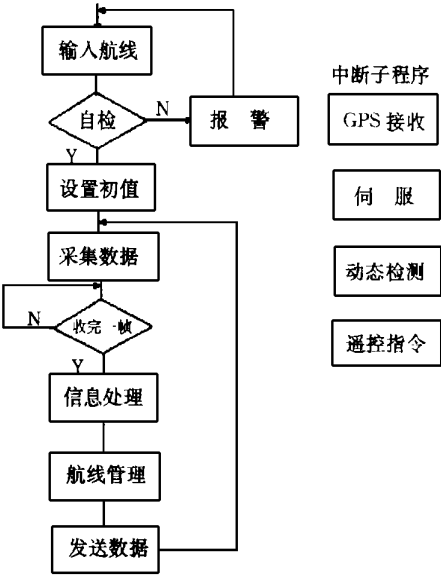


图2 自动控制流程图

Fig. 2 Flowchart for auto-control unit

到完整一帧(每秒一帧)GPS 数据后,进行信息处理和航线管理,最后发送经纬度、高度和飞机状态信息。从采集传感器数到此是一个控制循环。接收GPS 信息中断子程序、伺服中断子程序、动态诊断中断子程序和读取遥控指令中断子程序在控制循环过程中通过中断不断调用。

2 探空测风

飞机测风通常测量空速、地速,然后求算风速^[3],微型无人驾驶飞机气象探空系统测风基于微型无人飞机盘旋飞行,利用水平空速归零^[4]或解析方法1求得风向风速。

2.1 水平空速归零测风方法

利用微型无人飞机可以在很小的半径范围盘旋飞行的特点,设计了水平空速归零测风方式。测风误差小于1 m。水平空速归零测风方式就是使飞机在水平面上盘旋飞行,盘旋飞行一圈,相对空气而言,飞机回到了同一点,水平空速矢量之和为零,平均水平风速等于飞机平均水平地速。判断飞机盘旋飞行一圈的标志是航向传感器输出值相等。飞机在空中飞行时,相对地面的运动称为地速,相对空气的运动称为空速。空速(V_a)、地速(V_g)和风速(V)的关系为

$$V = V_g - V_a \quad (1)$$

假定微型飞机以恒定空速 V_a 在水平面上盘旋飞行, V_a 的经向和纬向分量可以表示为

$$V_{ax} = A \cos t; \quad V_{ay} = A \sin t \quad (2)$$

是飞机盘旋飞行的角速度; A 是 V_a 的模。对(2)式两边积分得

$$\int_0^T V_{ax} dt = \int_0^T A \cos t dt = 0; \quad \int_0^T V_{ay} dt = \int_0^T A \sin t dt = 0$$

T 是盘旋飞行一圈的时间。也就是说相对空气而言,盘旋飞行一圈后,飞机回到同一点。因此盘旋飞行时在 T 时段对(1)式两边积分,并除以 T 得

$$\frac{1}{T} \int_0^T V dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_g dt = V \quad (3)$$

V 即 T 时段飞机所在气层的平均水平风速,仅与 V_g 有关。 V_g 可由GPS接收机得到。由于GPS接收机每秒钟更新一次数据,因此

$$V = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T V_{gi}, \quad (i = 1, 2, \dots, T) \quad (4)$$

V_{gi} 是第 i 秒由GPS接收机得到的水平地速。设由第 i 秒GPS经纬度算出的座标值为 X_i, Y_i ,第 i 秒 V_g 的 x, y 方向分量为

$$V_{gxi} = (X_i - X_{i-1}); \quad V_{gyi} = (Y_i - Y_{i-1}) \quad (i = 1, 2, \dots, T) \quad (5)$$

那么水平风速 V 的 x, y 方向分量为

$$V_{xi} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T V_{gxi} = (X_T - X_0)/T$$

$$(i = 1, 2, \dots, T) \quad (6)$$

$$V_{yi} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T V_{gyi} = (Y_T - Y_0)/T$$

由此可以看出这种方式得出的风速与日常探空测风的物理意义完全一致。图3是1995年10月10日微型飞机探空时,在地面坐标系中的水平飞行轨迹,飞行轨迹呈螺线,横轴是经度,纵轴是纬度,单位都是 10^{-3} min。如果以空气为座标,飞行轨迹将呈一个圆。探空试验研究^[4]显示这种探空具有良好的精度。

2.2 解析测风方法

当飞机在空气中作匀速圆周运动时,在地面坐标系中飞机的运动轨迹可表示为

$$\left. \begin{aligned} X &= V_{fx}t + r \cos (t +) + C_x \\ Y &= V_{fy}t + r \sin (t +) + C_y \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

X 、 Y 为飞机在地面坐标系中的位置, V_{fx} 、 V_{fy} 分别为水平风速在 x 、 y 方向的分量, r 、 ω 为飞机圆周运动的半径、角速度, ϕ_0 为初始相位, C_x 、 C_y 为圆心的初始座标。 X 、 Y 分别对时间 t 求导, 得

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{dX}{dt} = V_{fx} - r \sin (t +) \\ V_y &= \frac{dY}{dt} = V_{fy} + r \cos (t +) \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

(8) 式是非线性函数式。为了计算, 对(8)式作泰勒级数展开, 并略去一阶以上的项, 得

$$\left. \begin{aligned} V_x &= (V_x) + \frac{V_x}{V_{fx}} V_{fx} + \frac{V_x}{r} r + \frac{V_x}{\omega} \omega + \frac{V_x}{\phi_0} \phi_0 \\ V_y &= (V_y) + \frac{V_y}{V_{fy}} V_{fy} + \frac{V_y}{r} r + \frac{V_y}{\omega} \omega + \frac{V_y}{\phi_0} \phi_0 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

V_x 、 V_y 为将初始值 V_{fx0} 、 V_{fy0} 、 r_0 、 ω_0 、 ϕ_0 代入 (8) 式所得到的值。 $V_{fx} = V_{fx} - V_{fx0}$, $V_{fy} = V_{fy} - V_{fy0}$, $r = r - r_0$, $\omega = \omega - \omega_0$, $\phi = \phi - \phi_0$ 。在(9)式中的未知数为 V_{fx} 、 V_{fy} 、 r 、 ω 、 ϕ , 共 5 个。当测得连续 N 组 (V_{xi}, V_{yi}) 值时, 可建立 $2N$ 个五元一次方程。 (V_{xi}, V_{yi}) 由微型飞机上的 GPS 接收机测得。为了消除测量中的随机误差, 取 $2N > 5$, 采用最小二乘法求解 V_{fx} 、 V_{fy} 、 r 、 ω 、 ϕ , 并将它们分别与 V_{fx0} 、 V_{fy0} 、 r_0 、 ω_0 、 ϕ_0 相加, 再次代入(9)式, 建立方程并求解, 直至 V_{fx} 、 V_{fy} 、 r 、 ω 、 ϕ 小于判定值, 便得到了所需精度的风速 V_{fx} 、 V_{fy} 。由于上述求算 V_{fx} 、 V_{fy} 过程采用了数学的解析方法, 因此称这种测风方法为解析测风方法。

当 $N = 14$ 、 19 、 24 时, 经向速度标准差 v_{fx} 分别等于 0.27 、 0.11 、 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 纬向速度标准差 v_{fy} 分别等于 0.24 、 0.10 、 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

解析测风方法与水平空速归零方法比较, 飞机飞行方式相同, 即都采用了小半径盘旋飞行。不同之处在于水平空速归零方法取飞机飞行一圈的始末点计算风速, 而解析测风方法取连续 N 个点计算风速。因而解析测风方法不用方向传感器, 探测设备更加简单。同时也减少了误差来源。但解析测风方法运算量比较大, 目前尚不能实时给出风向风速。两种测风方法各有所长, 可根据具体情况选用。

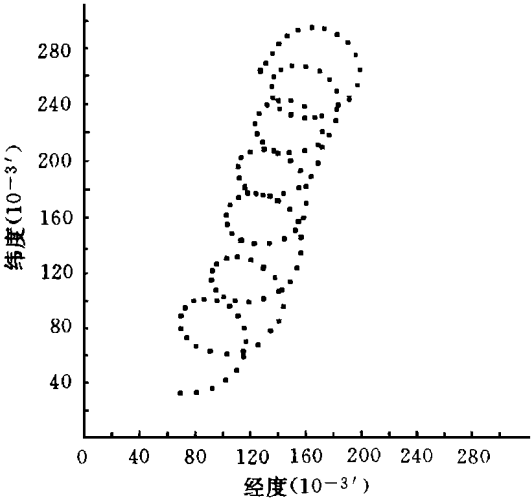


图3 1995年10月10日微型飞机探空在地面座标中的水平飞行轨迹

Fig. 3 Flight track of mini-aircraft in geographic coordinate, 10 Oct 1995

3 数字电子探空仪

数字电子探空仪由温、压、湿传感器, 数据处理单元和发送接口组成。数据处理单元是探空仪的核心, 它由单片机和测量电路构成, 完成数据采集、处理、发送。采用热敏电阻测温, 湿敏电容(霍尼韦尔) 测湿, 硅气压传感器(摩托罗拉) 测量气压。数据信号采用侦听方式汇入机载控制系统数据流发送给地面接收系统。地面接收处理系统实时显示温压湿数据。探空仪的特点:

1) 采用了较先进的传感器; 2) 对采样数据进行了处理; 3) 采用侦听方式将数据信号汇入机载控制系统数据流。

数字电子探空仪主要设计指标如下: 温度测量范围为 $-90 \sim 50$; 测量精度为 0.3 ; 湿度测量范围为 $0 \sim 100\%$; 测量精度为 5% ; 气压测量范围为 $5 \sim 1\,050$ hPa ; 测量精度为 0.5 hPa。

1997 年 12 月由江西省气象仪器鉴定所对机载数字电子探空仪进行了鉴定。在 $852.7 \sim 1\,052.5$ hPa 范围内, 取 10 个点对气压测量精度进行了鉴定, 最大偏差 0.6 hPa, 标准差为 0.3 hPa。在 $12 \sim 30$ 范围内, 取 6 个点对温度测量精度进行了鉴定, 最大偏差 0.5 , 标准差为 0.16 。在 $30\% \sim 98\%$ 范围内, 取 5 个点对湿度测量精度进行了鉴定, 最大偏差 5% , 标准差为 2.7% 。温度、气压和湿度测量精度都达到设计指标。

4 探空试验

1995 年 10 月在 $1\,000$ m 高度以下进行了探空试验, 1997 年 8 月在河北省怀来县进行了野外探测试验, 1997 年 10 月又进行了高度 $3\,000$ m 左右的探测试验。1997 年 10 月 29 日在南昌北郊南昌新机场工地进行了目视范围外飞行和探空试验。飞机起飞点位置为($115\,53.463$ E, $28\,50.310$ N), 周围地形为丘陵地形, 无高大建筑物和其他遮挡物, 地面平坦, 土质较硬。天气多云。最大飞行高度为 $2\,800$ m, 离起飞点最远距离为 12 km。温度、湿度传感器安装在机身外, 离机体约 5 cm, 带有保护外壳, 气压传感器安装在机身内。采用弹射助力滑跑方式起飞, 起飞后滑跑小车与飞机分离, 飞机上只剩下滑橇, 供着陆使用。飞机起飞后, 调整好动力和飞机爬升角, 以固定的方向舵舵量盘旋爬升。对一个较小的高度层而言, 飞机相对空气在水平方向上呈匀速圆周运动。最大探测高度 $2\,800$ m。探测完成后飞机自动返回起飞点上空。探空时飞机将探测资料通过发射机实时发回地面。地面接收机接收到信号后, 经调制解调器解调后, 送入计算机。温压湿可以从显示器上直接看到。风向风速需探测完后, 进一步处理得到。图 4 是 1997 年 10 月 29 日 2 时 5 分(世界时) 微型飞机解析测风廓线, $300 \sim 1\,400$ m 风速约 $5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $1\,400 \sim 1\,900$ m 风速有一个由大转小的过程, 接着风速逐渐增大; $300 \sim 1\,400$ m 风向在 0 左右, $1\,400 \sim 1\,800$ m 风向有一个转东的过程, 接着风向逐渐转为西风。图 4 中的方点是南昌探空站 1997 年 10 月 28 日 23 时 45 分(世界时) 701 雷达测风数据资料。可以看出两者的走势相似。由于微型飞机每秒钟给出一组数据, (701 雷达每 60 s 给出一组数据), 更精细地描述了大气风向风速。图 5 是 1997 的 10 月 29 日(世界时), 微型飞机探测得到的温、压、湿廓线。图 5 中方点为 1997 年 10 月 28 日 23 时 45 分(世界时) 59 探空仪探测数据。最左边一条是湿度廓线, 从 $300 \sim 1\,400$ m, 湿度变化不大, 保持在 40% 左右, 59 探空仪探测的湿度为 50% 左在, 略大于飞机探测数据。从 $1\,400 \sim 2\,300$ m 有一个明显的低湿气层, 飞机探测廓线有一个向左的凹槽, 在 $1\,700 \sim 2\,050$ m 飞机探测的湿度为 10% 。59 探空仪的资料也显示了有一个低湿气层, 也有一个凹槽, 只是凹槽深度较浅。也就是说最低湿度大于

飞机的湿度。这可能是由于 59 探空仪湿度传感器对低湿不敏感所致。在 2 400 m 以上,湿度达到 70 % 左右,飞机与 59 探空仪的数据比较一致。对比飞机与 59 探空仪的湿度资料,可归纳得到三个特点:(1) 两者的走势一致;(2) 在高层两者结果比较一致;(3) 飞机探测能较好反映低湿气层的湿度。图 5 中间的廓线是温度廓线,从 300 ~ 1 400 m 温度递减,1 400 ~ 1 600 m,有一个较小的逆温,1 600 m 以上温度又恢复递减。飞机探测资料与 59 探空仪测温数据吻合较好。图 5 最左边的曲线是气压曲线,飞机探测资料与 59 探空仪测气压值具有较好的一致性。从探空廓线可看出:与 59-701 探测资料比较,两者的走势一致;探测资料时间间隔小,每秒钟一组数据,有利于揭示大气的微结构;数字化探空仪测湿响应范围更大。

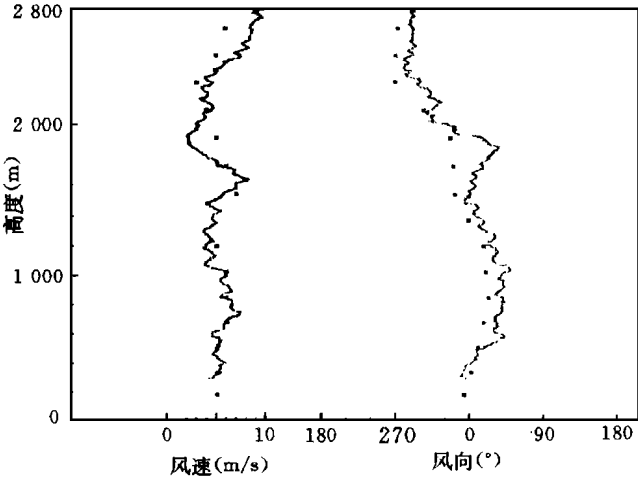


图 4 1997 年 10 月 29 日 2 时 5 分(世界时)微型飞机解析测风廓线及 28 日 23 时 45 分雷达测值(图中小方块)

Fig. 4 Wind profile derived analytically from mini-aircraft measurements at 0205U TC on 29 Oct 1997
Square dots are observations with the 701-type radar at Nanchang at 2345(UTC) on 28 Oct 1997

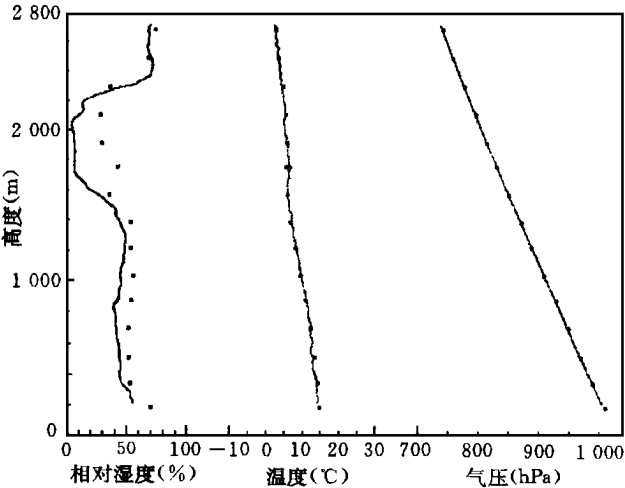


图 5 1997 年 10 月 29 日 2 时 5 分(世界时)微型飞机测得温度、气压和湿度廓线
及 28 日 23 时 45 分 59 探空仪测值(图中小方块)

Fig. 5 Temperature, pressure and humidity profiles observed by mini-aircraft sonde unit at 0205UTC
on 29 Oct 1997 Square dots are observations with a 59-type sonde at Nanchang at 2345(UTC) on 28 Oct 1997

5 结 语

国外^[1]提出的微型无人驾驶探空飞机发展计划, 其最终目标是用于人烟稀少地区的常规探空。因此要解决的问题有: 1) 长续航时间和大飞行高度的问题; 2) 抵御或避让雷电、冰冻、狂风等气象现象的威胁。如果以用于科学试验为目标, 离实用的距离就比较近, 就国内的研制工作而言, 主要是对飞行器进行气动和结构优化。

微型无人驾驶飞机气象探空系统具有: 1) 体积小, 重量轻, 可拆卸, 携带方便; 2) 探测方式灵活; 3) 可远距离探空; 4) 探测精度高等优点。因此微型无人驾驶飞机气象探空系统在大气科学试验研究以及人烟稀少地区探空方面具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Holland G J. Autonomous Aerosondes for Economical Atmospheric soundings Anywhere on the Globe. *Bulletin American Meteorological Society*, 1992, 73(12): 1987 ~ 1998
- 2 胡继忠. 超轻型飞机. 北京: 国防工业出版社, 1988. 151 ~ 170
- 3 Stan G S, Paul B T, Chan R. The meteorological measure system of NASA ER-2 aircraft. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1990, 7(4): 525 ~ 540
- 4 马舒庆, 汪改, 潘毅. 微型无人驾驶飞机探空初步试验研究. *南京气象学院学报*, 1997, 20(2): 171 ~ 177

A ROBOT PLANE METEOROLOGICAL SOUND SYSTEM

Ma Shuqin Wang Gai Pan Yi Liu Zhulun

(Institute of Meteorological Sciences of Jiangxi Province, Nanchang 330046)

Abstract A meteorological sounding system, consisting of a miniature robot plane, an aircraft-borne digital sonde unit, and a ground-based subsystem. The flight of mini-aircraft is controlled by an onboard auto-control system according to a pre-designed navigation line under the guidance of Global Position System (GPS) data. Flight tracking and air sounding data can be transmitted in real time to ground receiver. The ground-based subsystem would process the received data with a computer and display the geographic position and height of the aircraft and meteorological parameters observed. The ground-based subsystem can also send command to the aircraft to manipulate its flight in a remote-control manner. The sonde unit measures temperature, pressure and humidity. Wind speed and direction are derived from GPS data.

Keywords miniature unmanned aircraft, meteorological sounding, meteorological variable