

微型探空飞机解析测风方法^{*}

马舒庆 汪 改 潘 毅

(江西省气象科学研究所, 南昌 330046)

王 令

(江西省气象台, 南昌 330046)

摘 要 介绍一种利用微型无人驾驶飞机为探测平台, GPS 接收机为测量装置的解析测风方法。它基于飞机盘旋飞行与大气运动有十分显著的差别, 建立运动方程组, 用解析的方法求算大气运动。理论分析和与小球及雷达测风的比较都表明, 解析测风方法是一种精度较高的测风方法。

关键词 微型飞机 探空 测风

1 引言

微型无人驾驶飞机由于它重量轻、造价低、灵活方便, 一直受到大气探测方面专业技术人员的青睐, 为了解决海洋和人烟稀少地区探空和大气科学试验的需要, 在 WMO 大气探测委员会和国际科学联盟理事会支持下, 美、澳等国提出了微型无人探空飞机发展计划。根据我国的实际情况和发展趋势, 中国气象局将微型无人驾驶探空飞机的前期研究列入“八五”重点科研项目。微型无人驾驶探空飞机测风方法研究是其中一项重要工作。

在微型无人驾驶探空飞机上加装电子探空装置, 就可进行温压湿廓线的探测。而要测得风向风速, 就有一些新的问题需要探讨。在这里提出了一种解析测风的方法, 并进行了实测试验, 结果表明此方法可行, 测风精度较高。

2 飞机概况

微型无人驾驶飞机是由江西省气象科学研究所研制的, 具有自动导航、自动驾驶功能。它采用 GPS 导航, 在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其他资料传送到地面。地面接收系统的微机显示飞机的经纬度和高度等数据。飞机的有关技术参数如下:

翼展为 3.0 m, 机翼面积为 0.62 m^2 , 螺旋桨直径为 0.46 m, 起飞总重为 12 kg, 最大速度为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大爬升速度为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 升限为 5 km。

1998-01-13 收到, 1998-03-09 收到修改稿

^{*} 中国气象局“八五”重点科研项目, 并得到中国科学院大气物理研究所中层大气与地球环境探测开放实验室开放课题资助

3 解析测风方法

微型无人驾驶探空飞机可以以 100 m 左右的半径盘旋飞行。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如下:

$$\left. \begin{aligned} X &= V_{fx}t + r\cos(\omega t + \alpha) + C_x, \\ Y &= V_{fy}t + r\sin(\omega t + \alpha) + C_y, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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, α 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

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{dX}{dt} = V_{fx} - r\omega\sin(\omega t + \alpha), \\ V_y &= \frac{dY}{dt} = V_{fy} + r\omega\cos(\omega t + \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(2) 式是非线性方程式。为了能解析计算, 对 (2) 式作泰勒级数展开, 并略去一阶以上的项, 得

$$\left. \begin{aligned} V_x &= (V_x) + \frac{\partial V_x}{\partial V_{fx}} \Delta V_{fx} + \frac{\partial V_x}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial V_x}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial V_x}{\partial \alpha} \Delta \alpha, \\ V_y &= (V_y) + \frac{\partial V_y}{\partial V_{fy}} \Delta V_{fy} + \frac{\partial V_y}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial V_y}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial V_y}{\partial \alpha} \Delta \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(V_x) 、 (V_y) 为将初始值 V_{fx0} 、 V_{fy0} 、 r_0 、 ω_0 、 α_0 代入 (2) 式所得到的值。 $\Delta V_{fx} = V_{fx} - V_{fx0}$, $\Delta V_{fy} = V_{fy} - V_{fy0}$, $\Delta r = r - r_0$, $\Delta \omega = \omega - \omega_0$, $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_0$ 。在 (3) 式中的未知数为 ΔV_{fx} 、 ΔV_{fy} 、 Δr 、 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \alpha$, 共 5 个。当测得 N 组 $(V_{xi}$ 、 $V_{yi})$ 值时, 可建立 $2N$ 个五元一次方程组。 $(V_{xi}$ 、 $V_{yi})$ 由微型飞机上的 GPS 接收机测得, 并实时发回地面, 由地面接收系统接收。方程组中有五个变量, 只要五个方程便可求解, 但为了采用最小二乘法, 减小测量中的随机误差, 取 $2N > 5$ 。求解 ΔV_{fx} 、 ΔV_{fy} 、 Δr 、 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \alpha$, 并将它们分别与 V_{fx0} 、 V_{fy0} 、 r_0 、 ω_0 、 α_0 相加, 再次代入 (3) 式, 建立方程组并求解, 直至 ΔV_{fx} 、 ΔV_{fy} 、 Δr 、 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \alpha$ 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。

解析测风方法与文献[1]中采用的方法比较, 飞机飞行方式相同, 即都采用了小半径盘旋爬升。不同点在于省去了方向传感器, 探测设备更加简单。同时也减少了误差来源。解析测风方法运算量比较大, 一定要借助计算机, 这在计算机技术飞速发展, 已不成为问题。

4 测风试验

为了验证这一测风方法的可行性, 进行了多次飞行测风试验, 并且与小球测风和

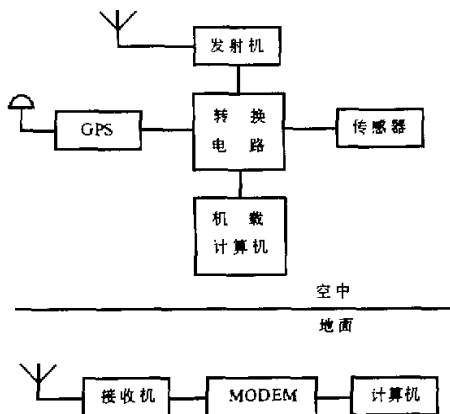


图1 微型飞机探空试验硬件框图

100 m。气球升速 $100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ，飞机升速约 $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。飞机升空后，调整好动力和飞机爬升角，在约 100 m 的高度开始以固定的方向舵盘旋爬升并测风。从图 2 可以看出，两种测风方法得到的风速廓线，走势相似，风速值随高度增加有所增大，两条曲线相接近。小球测风得到的风速廓线与解析测风法得到的风速廓线有交叉。

在 120~600 m 高度，风速变化比较小，这一气层的平均风速为

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i, \quad (4)$$

根据 (4) 式计算，小球测风法得到的平均风速 $V_s = 6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，解析测风法的平均风速为 $V_a = 5.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，两者相差 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风速的标准差分别为 $\sigma_s = 1.1$ ， $\sigma_a = 0.4$ （这里下标 s 代表小球测风， a 代表解析测风）。 $\sigma_s > \sigma_a$ ，说明小球测风所得的风速波动大于解析测风所得的风速波动。图 2 显示两种测风方法所得到的风向廓线走势更为一致。在低层，风向值先减小，然后增加，两条曲线相邻，并有一个交点。平均风向为

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i. \quad (5)$$

根据 (5) 式，分别计算得小球测风的平均风向 $D_s = 32.7^\circ$ ，解析测风的平均风向为 $D_a = 33.5^\circ$ ，两者仅相差 1.2° 。微型飞机解析测风和小球测风存在明显的平均风速偏差 ($0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)，但平均风向偏差很小。文献[3]指出，小球升速的误差会引起风速的误

701 雷达测风进行了对比。图 1 是微型无人驾驶飞机探空试验硬件框图。机载计算机是微型无人驾驶飞机的核心，除完成对飞机的控制外，还将 GPS 信号和探空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。

4.1 与小球测风对比试验

在进行飞机测风试验的同时，进行小球测风。图 2 是 1995 年 10 月 16 日 8 时 40 分（世界时），在南昌青云谱机场小球测风与解析测风所得廓线。小球释放点离飞机起飞点约

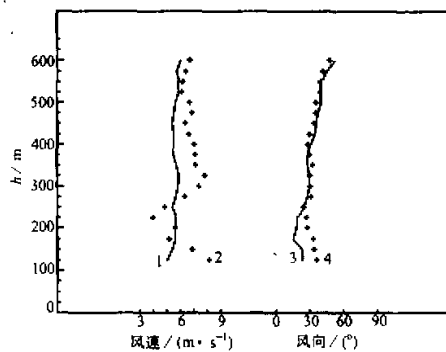


图2 1995年10月16日8时40分（世界时）小球测风与解析测风廓线

- (1) 解析测风风速廓线；(2) 小球测风风速廓线；
(3) 解析测风风向廓线；(4) 小球测风风向廓线

差, 而不影响风向。因此, 平均风速偏差很可能主要是由于小球的升速偏小造成小球测风风速偏大形成的^[3]。

4.2 与 701 雷达测风对比试验

微型无人驾驶飞机起飞点在南昌市北郊南昌新机场工地, 经度为 $115^{\circ}53.4'E$, 纬度为 $28^{\circ}50.3'N$ 。飞机平均升速约 $150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。图 3 中较连续的曲线是 1997 年 10 月 29 日 2 时 5 分 (世界时) 微型飞机解析测风廓线, 左边是风速廓线, 右边是风向廓线; 图 3 中离散点是 1997 年 10 月 28 日 23 时 45 分 (世界时) 南昌探空站 701 雷达测得的风向风速值。南昌探空站离微型飞机起飞点约 28 km。从图 3 可以看出, 300 m 至 1 400 m 风速约 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 1 400 m 至 1 900 m 风速有一个由升转降的过程, 以后风速逐渐增大; 300 m 至 1 400 m 风向在零度左右, 1 400 m 至 1 800 m 风向有一个转东的过程, 以后风向逐渐转为西风。虽然微型无人驾驶飞机起飞点与南昌探空站相距有一定距离, 探测时间也相差两个多小时, 但两种测风方法得到的风向风速走势相似。图 4 中较连续的曲线是 1997 年 10 月 20 日 2 时 0 分 (世界时) 微型飞机解析测风廓线, 左边是风速廓线, 右边是风向廓线; 图 4 中离散点是 1997 年 10 月 19 日 23 时 45 分 (世界时) 南昌探空站 701 雷达测得的风向风速值。由图可见, 两种测风技术所得的结果是很接近的。

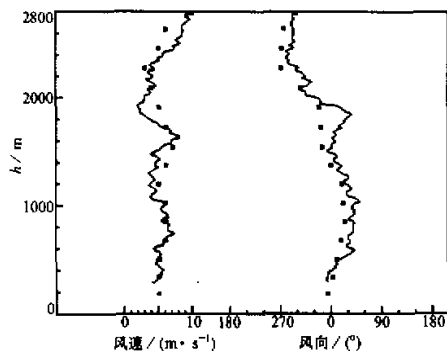


图 3 1997 年 10 月 29 日 2 时 5 分 (世界时)
微型飞机解析测风廓线
方点是 1997 年 10 月 28 日 23 时 45 分 (世界时)
南昌探空站 701 雷达测得的风向风速值

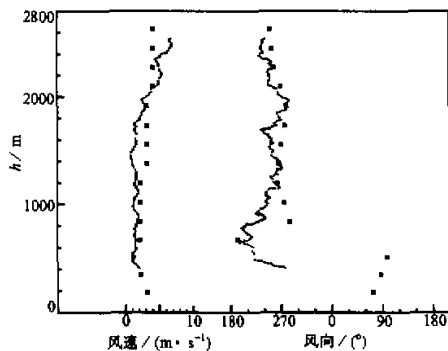


图 4 1997 年 10 月 20 日 2 时 0 分 (世界时)
微型飞机解析测风廓线
方点是 1997 年 10 月 19 日 23 时 45 分 (世界时)
南昌探空站 701 雷达测得的风向风速值

5 误差估计

与经纬仪、雷达测风不同, 微型飞机测风有其特殊的运动方式——盘旋爬升。用对比法, 即不同探测工具同时探测, 分析微型飞机的测风精度, 存在探测资料空间上不一致的问题。下面采用数学方法分析微型飞机解析测风的误差。

由 (2) 式得

$$\left. \begin{aligned} V_{fx} &= V_x + r \omega \sin(\omega t + \alpha), \\ V_{fy} &= V_y - r \omega \cos(\omega t + \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对 (6) 式求微分, 得

$$\left. \begin{aligned} dV_{fx} &= \frac{\partial V_{fx}}{\partial V_x} dV_x + \frac{\partial V_{fx}}{\partial r} dr + \frac{\partial V_{fx}}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial V_{fx}}{\partial \alpha} d\alpha, \\ dV_{fy} &= \frac{\partial V_{fy}}{\partial V_y} dV_y + \frac{\partial V_{fy}}{\partial r} dr + \frac{\partial V_{fy}}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial V_{fy}}{\partial \alpha} d\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

从 (7) 式可见, 风速 (V_{fx} 、 V_{fy}) 的误差由 V_x 、 V_y 、 r 、 ω 、 α 的误差决定, dr 、 $d\omega$ 、 $d\alpha$ 相当于 (3) 式中的 Δr 、 $\Delta\omega$ 、 $\Delta\alpha$ 它们的大小可以人为设定, 当将 Δr 、 $\Delta\omega$ 、 $\Delta\alpha$ 的判定值设定在使 Δr 、 $\Delta\omega$ 、 $\Delta\alpha$ 产生的误差比 V_x 、 V_y 的误差小一个量级时, V_{fx} 、 V_{fy} 的误差就由 V_x 、 V_y 的误差决定。故下面仅讨论 V_x 、 V_y 的误差。

如果 V_x 、 V_y 、 r 、 ω 、 α 已知, 由 (2) 式可以算出不同时刻的一系列 V_{xi} 、 V_{yi} 。将这些 V_{xi} 、 V_{yi} 分别加上 ΔV_{xi} 、 ΔV_{yi} , ΔV_{xi} 、 ΔV_{yi} 是随机值, 那么 $V_{xi}' = V_{xi} + \Delta V_{xi}$ 、 $V_{yi}' = V_{yi} + \Delta V_{yi}$ 可看成是包含随机误差的测量值。将 V_{xi}' 、 V_{yi}' 代入 (3) 式, 建立方程组, 可解得 V_{xf}' 、 V_{yf}' , $V_{xf}' = V_{xf} + \Delta V_{xf}$ 、 $V_{yf}' = V_{yf} + \Delta V_{yf}$, ΔV_{xf} 、 ΔV_{yf} 就是由于 ΔV_{xi} 、 ΔV_{yi} 引起的计算结果的误差。通过研究 ΔV_{xi} 、 ΔV_{yi} 与 ΔV_{xf} 、 ΔV_{yf} 的关系, 就可以了解微型飞机解析测风的误差范围。

计算机语言中有 RND 函数, 可以产生随机值, 利用这个函数产生 ΔV_{xi} 、 ΔV_{yi} 。表 1 给出了 ΔV_{xi} 、 ΔV_{yi} 的标准差 $\sigma_{\Delta V_x}$ 、 $\sigma_{\Delta V_y}$ 和通过 (3) 式求得 V_{xf}' 、 V_{yf}' , 并计算得到 V_{xf}' 、 V_{yf}' 的标准差 $\sigma_{\Delta V_{xf}}$ 、 $\sigma_{\Delta V_{yf}}$, N 为建立方程组所用 V_{xf}' 、 V_{yf}' 的组数。从表 1 可以看出: (1) 随着 $\sigma_{\Delta V_x}$ 、 $\sigma_{\Delta V_y}$ 的增大 $\sigma_{\Delta V_{xf}}$ 、 $\sigma_{\Delta V_{yf}}$ 增大; (2) $\sigma_{\Delta V_x}$ 、 $\sigma_{\Delta V_y}$ 大于 $\sigma_{\Delta V_{xf}}$ 、 $\sigma_{\Delta V_{yf}}$, 即通过计算提高了精度, 其原因是这种算法具有滤波特性, 可以减小随机误差。

解析测风方法所用资料来自于微型无人驾驶探空飞机上的 GPS 接收机, 因此测风作为测量过程, 其测量误差就是 GPS 接收机的定位误差。GPS 接收机的定位误差来源有三类: (1) 与 GPS 卫星有关的误差 X_s 和 Y_s , 包括卫星时钟偏差和轨道偏差; (2) 卫星信号的传播误差 X_p 和 Y_p , 包括电离层折射、对流层折射和多路径效应形成的误差; (3) 与接收机有关的误差 X_R 和 Y_R 。假设 GPS 接收机给出 X 、 Y , 它们可表示为

$$\left. \begin{aligned} X &= X_a + X_s + X_p + X_R, \\ Y &= Y_a + Y_s + Y_p + Y_R, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

X_a 、 Y_a 分别为 X 和 Y 方向的平均值。那么点 (X_1, Y_1) 与点 (X_2, Y_2) 在 X 、 Y 方向的差为

$$\left. \begin{aligned} X_1 - X_2 &= X_{a1} + X_{s1} + X_{p1} + X_{R1} - (X_{a2} + X_{s2} + X_{p2} + X_{R2}), \\ Y_1 - Y_2 &= Y_{a1} + Y_{s1} + Y_{p1} + Y_{R1} - (Y_{a2} + Y_{s2} + Y_{p2} + Y_{R2}), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

当 (X_1, Y_1) 与 (X_2, Y_2) 相距很近, 测量间隔时间很小时, 两点的 X_s 、 Y_s 及 X_p 、 Y_p 分别相近似。因此 (9) 式可改为

$$\left. \begin{aligned} X_1 - X_2 &= X_{a1} + X_{R1} - (X_{a2} + X_{R2}), \\ Y_1 - Y_2 &= Y_{a1} + Y_{R1} - (Y_{a2} + Y_{R2}), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(10) 式表示两点的相对误差主要是与接收机有关的误差 X_R 、 Y_R ，为了确定两点间相对误差的大小，1996 年 2 月 12 日 09 时 02 分 42 秒（世界时）开始用古野 74 型 GPS 接收机定点测量，取得经、纬度样本 1 201 组。

纬向速度标准差

$$\sigma_{\text{lat}} = \left[\frac{1}{1200} \sum_{i=1}^{1200} (V_{\text{lat}i} - V_{\text{lat}(i-1)})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

为 0.000 22，约 $0.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

经向速度标准差

$$\sigma_{\text{lon}} = \left[\frac{1}{1200} \sum_{i=1}^{1200} (V_{\text{lon}i} - V_{\text{lon}(i-1)})^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

为 0.000 30，约 $0.48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

假定 GPS 接收机的随机测量误差分布与 RND 函数产生的随机值分布相同，并且静止与运动时 GPS 接收机引起的速度误差相同，那么，由于 $\sigma_{\Delta V_x} = \sigma_{\text{lon}} = 0.48$ 、 $\sigma_{\Delta V_y} = \sigma_{\text{lat}} = 0.41$ ，从表 1 可以看出，当 $N=14$ 、19、24 时，经向速度标准差 $\sigma_{\Delta V_{xf}}$ 分别等于 0.27、0.11、0.05 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)，纬向速度标准差 $\sigma_{\Delta V_{yf}}$ 分别等于 0.24、0.10、0.04 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。在实测时，根据实际需要选取 N ，当要求精度高时 N 取得大些，当要求空间分辨率高时 N 取得小些，一般取 $N=14$ 。

表 1 测量值标准差和计算结果标准差的关系

$\sigma_{\Delta V_x}$	$\sigma_{\Delta V_y}$	$N=14$		$N=19$		$N=24$	
		$\sigma_{\Delta V_{xf}}$	$\sigma_{\Delta V_{yf}}$	$\sigma_{\Delta V_{xf}}$	$\sigma_{\Delta V_{yf}}$	$\sigma_{\Delta V_{xf}}$	$\sigma_{\Delta V_{yf}}$
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	0.20	0.11	0.11	0.05	0.04	0.02	0.02
0.40	0.39	0.23	0.23	0.09	0.09	0.04	0.04
0.79	0.78	0.45	0.46	0.18	0.17	0.09	0.09
1.19	1.16	0.68	0.70	0.28	0.26	0.13	0.14
1.58	1.55	0.92	0.94	0.37	0.35	0.17	0.18
1.98	1.94	1.15	1.21	0.46	0.44	0.21	0.23
2.37	2.33	1.40	1.48	0.56	0.53	0.26	0.27

6 讨论与结语

微型无人驾驶飞机解析测风方法，探测平台和方法都与其他探测系统有所不同。因此有其自身的特点：

(1) 探空过程是确定的飞机的圆周运动与大气运动的合运动，并且这两种运动有显著的差异，为后续数学处理提供了方便。气球探空过程中，也包含两种主要运动：一种是大气运动，另一种是探空仪的摆动，芬兰 VAISALA 公司的技术报告中指出这种摆动的速度的幅度达到 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于大气扰动的不断作用，这种摆动的幅度在不断的变化，也就是说这种运动具有随机性，因此从原理上来看，微型飞机解析测风较气球

探空测风具有更高的精度。

(2) 微型飞机相对地面的速度 V_G , 简称地速, 相对空气的速度 V_A , 简称空速, 地速、空速和风速 V_W 的关系为

$$V_W = V_G - V_A, \quad (13)$$

当测量出 V_G 、 V_A 就可得到风速 V_W 。有人驾驶飞机测风常常采用测定空速、地速, 求算风速。文献[2]中的探空飞机也采用这种方式。这种方式的误差来自测定空速和地速两方面, 也就是说有两个误差源。文献[1]中的水平空速归零方法, 只测定地速, 但仍使用了方向传感器, 方向传感器的误差也是测风误差源。解析测风方法, 测量仪器是 GPS 接收机, 仅测量地速, 因此测量误差源仅仅是 GPS 接收机测量误差。故较上述两种方法测量精度更高。

(3) GPS 接收机每秒钟给出一组数据(位置和速度), 由位置数据求算得到的速度, 或通过多普勒频移测得的速度, 不随微型无人驾驶飞机离地面接收系统的距离远近而变化。因此, 微型无人驾驶飞机探空测风的精度不随微型飞机离地面接收系统的距离远近变化而变化。这一点与雷达测风、经纬仪测风不同。

(4) 微型无人驾驶飞机探空测风时, 飞机在水平面上的运动是圆周运动, 当垂直方向速度不为零时, 探测就是垂直探测; 当垂直方向速度为零或近似为零时, 所完成的探测就是水平探测。因此微型无人驾驶飞机是一种既可以垂直探测又可以水平探测的具有灵活性的大气探测工具。

(5) 气球探空只能探测一个点, 即气球的释放点。微型无人驾驶飞机可远离起飞点进行探测。因此可以在一个起飞点起飞多驾飞机进行多点同时探测。

微型无人驾驶飞机探空在我国刚起步, 解析测风研究也刚开始。1997 年 8 月在河北省怀来县官厅水库, 江西省气象科学研究所与中国科学院大气物理研究所中层大气与地球环境探测开放实验室共同进行了微型无人驾驶飞机探空试验, 试验了微型无人驾驶飞机野外作业的能力, 也检验了解析测风方法, 证明了解析测风是一种有效的测风方法, 同时也为这种方法实用化提出了诸如资料预处理方面的问题, 改善预处理方法将进一步加快解析测风方法的求解过程。

致谢: 中国科学院大气物理研究所吕达仁研究员和陈洪滨博士对本文提出了宝贵修改意见, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 马舒庆、汪改、潘毅, 1997, 微型无人驾驶飞机探空初步试验研究, 南京气象学院学报, 20(2), 171~177.
- 2 Greg, J. Holland, 1992, Autonomous aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73(12), 1987~1998.
- 3 林晔, 1995, 大气探测学教程, 北京: 气象出版社, 488pp.

An Analytical Method for Wind Measurements by a Mini-Aircraft

Ma Shuqing, Wang Gai and Pan Yi

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

Wang Ling

(*Meteorological Observatory of Jiangxi Province, Nanchang 330046*)

Abstract An analytical method for wind measurements by an atmospheric sounding mini-aircraft is presented. The method is based on the fact that the spiral movement of mini-aircraft is controlled by the automatic navigation system. The synthetic movement (i.e., ground velocity) is determined by a GPS receiver onboard the mini-aircraft. Based on the general motion equations, the analytical formulae are obtained to calculate the horizontal components of the wind speed. Both theoretical error analysis and experimental measurements in comparison with balloon and radar techniques show that the proposed analytical method can provide accurate and high resolution profiles of wind velocity.

Key words mini-aircraft atmospheric sounding wind measurement

中国科技期刊被引频次及影响因子排行表

(地球科学类)

名次	期 刊 名 称	被引频次	名次	期 刊 名 称	影响因子
1	地球物理学报	932	1	岩石学报	0.6634
2	海洋与湖沼	359	2	地质学报	0.6286
3	大气科学	355	3	地学前缘	0.5570
4	地震学报	345	4	第四纪研究	0.5476
5	海洋学报	334	5	地球物理学报	0.5233
6	气象学报	323	6	地球化学	0.4407
7	地质学报	305	7	大气科学	0.3699
8	地球科学	298	8	测绘学报	0.3673
9	地质科学	280	9	矿床地质	0.3580
10	地质论评	262	10	地质科学	0.3516

(数据来源: 中国科学院文献情报中心中国科学引文数据库 1997 年统计结果)