

# 三轴加速度传感器

## 测量空中风技术研究

**摘要：**随着微加工工艺的不断提高，加速度传感器越来越得到广泛地应用。文章首先对探空仪系统在大气流场中的受力状况进行了详细分析，在此基础上建立了利用三轴加速度传感器测量空中风的数学模型，并对空中风矢量进行了解算。通过对试验中的实测数据求解，并与目前空中风测量手段进行比较，验证了该测风方法的可行性。

**关键词：**三轴加速度传感器；探空仪系统；测风模块；风速；风向

**中图分类号：**TP212.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-883X(2009)01-0021-05

许屏 彭光平 程礼富 ◀◀

### 一 引言

目前获取空中风资料的手段有很多，其中最常用的有单（双）经纬仪测风气球、测风雷达、无线电经纬仪以及下投式探空仪<sup>[3]</sup>。前三种测量空中风的方法存在着测量精度低、手动操作时间长、战时难以测量敌占区空中风资料的缺点；下投式探空仪测风结合了 GPS 测速、定位技术，利用探空仪携带的 GPS 接收机实时跟踪采集速度、位置数据，并将数据转发到机载或地面处理设备，经下投式测风数学模型反演出空中风矢量，但目前国内对其研究还建立在降落伞系统稳定后的阶段，出仓后 800m 左右距离获得的 GPS 数据将被剔除<sup>[2]</sup>。可见，下投式探空仪测量空中风需要 GPS 卫星提供庞大的数据链作支持，数据处理、计算过程也较为繁琐，且不能够反映整个空中风情况。

随着微加工工艺的不断提高，加速度传感器在航空、汽车、电子等行业得到了广泛应用。本文提出利用三轴加速度传感器替代目前探空仪中所采用的简易 GPS 接收机，获取探空仪在空中的三轴加速度，经携带的数据处理设备解算空中风矢量的方法，减少数据传输链路，简化地面数据处理及计算过程，避免了依赖 GPS 卫星受制于人的局面，提高可测高度层。

### 二 探空仪系统空中受力分析

携带有三轴加速度传感器的探空仪系统经试验飞机从高空下投，飞行高度一般不超过 4000m。下落过程中，加速度传感器不断获得探空仪系统  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的加速度值。分析探空仪系统在大气流场中的受力情况<sup>[1,2]</sup>：

(1) 重力：系统在重力场中要受到重力的作用

$$\vec{G} = M\vec{g} \quad (1)$$

式中： $M$  - 物、伞系统总质量； $\vec{g}$  - 重力加速度。

(2) 浮力

在大气中系统要受到浮力的作用，按照阿基米德定律，浮力的大小等于系统排开同体积的大气质量。

$$\bar{F}_{浮力} = M_f \bar{g} \quad (2)$$

式中： $M_f$  - 系统排开的大气质量。

### (3) 变速运动附加力

系统在大气流场中受力不可能处于绝对平衡状态,作变速运动,周围的流体也会被带动,产生变速运动附加力:

$$\bar{F}_{附加力} = m_a \frac{d\bar{v}_r}{dt} \quad (3)$$

式中： $m_a$  - 变速运动附加质量；

$\bar{v}_r$  - 系统与大气相对速度。

对于刚性小球在大气中作不定常运动时,已经证明有  $m_a = M_f/2$ ,而对于整个探空仪系统在大气中的运动,其变速运动附加质量的解析非常困难,在实际应用中,我们在刚性小球的分析基础上通过实验数据进行修正:

$$m_{au} = m_a + k_1 \quad (4)$$

于是系统所受变速运动附加力可写成:

$$\bar{F}_{附加力} = m_{au} \frac{d\bar{v}_r}{dt} \quad (5)$$

### (4) 粘性阻力

探空仪系统在大气中运动时,由于真实流体都是有粘性的,所以系统的表面受到邻近大气的粘性切应力的作用。当大气密度近似为常量时,粘性阻力可表示为:

$$\bar{F}_{粘性阻力} = \frac{1}{2} \rho S C_d \bar{v}_r |\bar{v}_r| \quad (6)$$

式中： $\rho$  - 大气密度；

$S$  - 系统投影面积；

$C_d$  - 阻力系数。对于刚性小球,  $C_d$  是通过与雷诺数  $Re$  的函数关系<sup>[3]</sup>,经过分段拟合处理得到:

$$C_d = \begin{cases} 24/Re & Re \leq 1 \\ 24/Re^{0.646} & 1 < Re \leq 400 \\ 0.5 & 400 < Re \leq 3 \times 10^5 \\ 3.66 \times 10^{-4} \times Re^{0.4275} & 3 \times 10^5 < Re \leq 2 \times 10^6 \\ 0.18 & 2 \times 10^6 < Re \end{cases} \quad (7)$$

同样,由于探空仪系统并非规则刚性小球,因此系统阻力系数还需要在上述方程的基础上通过实验数据进行修正:

$$C_{du} = C_d + k_2 \quad (8)$$

于是系统所受粘性阻力可写成:

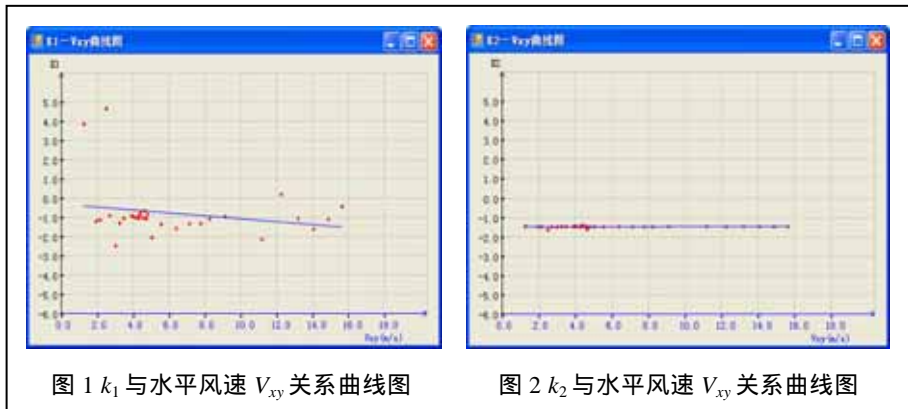


图 1  $k_1$  与水平风速  $V_{xy}$  关系曲线图

图 2  $k_2$  与水平风速  $V_{xy}$  关系曲线图

$$\bar{F}_{粘性阻力} = \frac{1}{2} \rho S C_{du} \bar{v}_r |\bar{v}_r| \quad (9)$$

根据试验数据,利用一元线性回归方法所得到的数据进行处理,可分别得到  $k_1$ 、 $k_2$  参数与降落伞水平运动速度之间的线性回归方程:

$$k_1 = -0.045749 \times v_{xy} - 0.28086 \quad (10)$$

$$k_2 = -0.00060915 \times v_{xy} - 0.1003 \quad (11)$$

### 三 加速度传感器测风模块设计

加速度传感器测风模块主要包括:数据采集模块、数据处理模块、数据存储模块及数据传输模块。数据采集模块主要完成对带有加速度传感器的探空仪系统的三轴加速度数据采集;数据处理模块中内置了加速度数据反演风场的计算模型代码,用来求解空中风矢量;数据存储模块将计算后的空中风数据存贮到 EEPROM 中;数据传输模块通过无线方式将求解出的空中风数据发送到空中或地面使用单位。其中数据采集模块的整个电路包括三轴加速度计、信号调理电路、放大电路、滤波补偿电路等,其基本结构如图 3 所示。

在探空仪系统下落过程中,随着时间累积、环境温度发生变化等因素影响,传感器的灵敏度及零点温度漂移等性能参数也随之发生变化,影响了数据采集的准确性。因此,模块中即设计了硬件滤波补偿电路,同时,

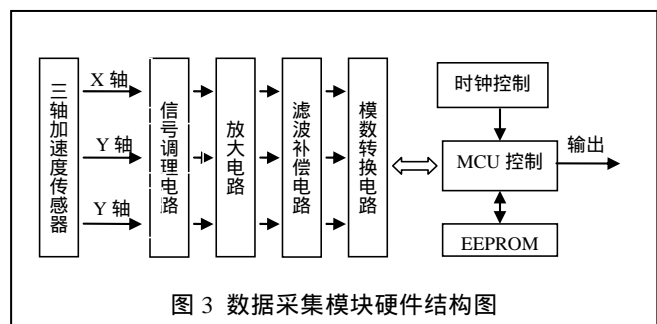


图 3 数据采集模块硬件结构图

还采用了软件补偿的方法对接收到的三维加速度数据进行优化,以提高测量精度。

#### 四 加速度传感器测量空中风矢量

在对下投式探空仪研究的基础上,我们将其中的GPS测风模块更换为加速度传感器测风模块,由降落伞携带,经试验飞机从高空下投,飞行高度一般不大于4000m。试验中我们采用美国KIONIX公司生产的KXP84型三轴加速度传感器,它具有响应速度快、低成本和低功耗等优点。

##### 1、加速度传感器模块的安装位置及其影响

因为加速度测量的方向性,加速度传感器模块应固定在探空仪系统的近似中轴线上。传感器芯片X轴分量测量探空仪运动时正东方向的加速度,Y轴分量测量探空仪运动时正北方向的加速度,Z轴与X、Y轴构成右手坐标系,测量垂直方向上的加速度。

加速度传感器模块的安装位置决定了它的工作温度为环境温度,传感器的灵敏度、0g偏移电压等性能参数均易受环境温度影响。

##### 2、加速度数据求解探空仪系统的速度和位移

反演大气风场不可避免的需要对高度进行分层,以此来确定各个高度层中的矢量风,这就需要对试验中探空仪的速度和位移信息进行解算。由于加速度传感器输出的加速度值不可能绝对精确,事实上,在静止测量中发现传感器测量值的输出大概有1%的浮动,这些浮动值不仅破坏了测量精度也加大了芯片的计算量。为了消除

这些浮动值,可以将相邻两次测量值小于1%的浮动值处理为数据未发生变化。同时,加速度传感器采样时间间隔为0.2s,可将五次数据做一次均值处理,再将均值带入速度和位移计算。

假设测量轴是X轴,加速

度计采样间隔为 $\Delta T=0.2s$ ,五次测量数据分别为 $a_{x1}, a_{x2}, a_{x3}, a_{x4}, a_{x5}$ ,测量前X轴方向速度为 $v_x$ ,位移为 $\Delta S_x$ (初始设定 $v_x=0m/s, \Delta S_x=0m$ ),测量后 $v_x$ 和 $\Delta S_x$ 更新公式如下:

$$a_x=(a_{x1}+a_{x2}+a_{x3}+a_{x4}+a_{x5})/5 \quad (12)$$

$$v_x=v_x+a_x \cdot (5 \cdot \Delta T) \quad (13)$$

$$\Delta S_x=v_x \cdot (4 \cdot \Delta T)-0.5a(5\Delta T)^2 \quad (14)$$

将 $v_x$ 和 $\Delta S_x$ 保留至下一次数据更新。三维速度和位移值分别统计,得到 $v_x, v_y, v_z, \Delta S_x, \Delta S_y, \Delta S_z$ :

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (15)$$

$$\Delta S = \sqrt{\Delta S_x^2 + \Delta S_y^2 + \Delta S_z^2} \quad (16)$$

计算出总的速度 $v$ 和位移大小 $\Delta S$ 进行空投试验,三维加速度值积分后得到探空仪系统在空中各个时间段内的运动速度和轨迹分别见表1和表2。

##### 3、加速度数据计算标量风

根据上述对探空仪系统在大气流场中受力状态的分析,我们可写出探空仪系统运动方程:

$$M \frac{d\vec{v}_u}{dt} = M\vec{g} - M_f\vec{g} - m_{au} \frac{d\vec{v}_r}{dt} - \frac{\rho SC_{du}}{2} |\vec{v}_r| \vec{v}_r \quad (17)$$

式中: $\vec{v}_u$  - 探空仪系统的速度,且 $\vec{v}_r = \vec{v}_u - \vec{v}_f$  (18)

$\vec{v}_f$  - 所求取的空中风矢量。

由基本力学方程: $\vec{a} = \frac{d\vec{v}_u}{dt}$  (19)

将式(17)、式(18)带入式(19),并作进一步简化可

序号	时间(s)	$V_x$ (m/s)	$V_y$ (m/s)	$V_z$ (m/s)	$V_{总}$ (m/s)	$V_{DC}$ (m/s)
0	0	11.7	-27.6	-0.1	29.977	29.978
1	1	10.924	-21.42	-0.784	24.045	24.058
2	2	10.504	-19.08	-2.044	21.78	21.876
3	3	10.284	-17.44	-3.204	20.246	20.498
4	4	10.184	-16.664	-4.272	19.53	19.991
5	5	10.076	-16.252	-5.176	19.122	19.81
6	6	10.008	-16	-5.96	18.872	19.791
7	7	9.944	-15.784	-6.72	18.655	19.829
8	8	9.948	-15.68	-7.404	18.569	19.991
9	9	10.032	-15.696	-7.868	18.628	20.222
10	10	10.08	-15.744	-8.492	18.694	20.533
11	11	10.188	-15.844	-9.26	18.837	20.99
12	12	10.256	-15.944	-9.688	18.958	21.29
13	13	10.352	-15.996	-10.04	19.054	21.537
14	14	10.56	-15.996	-10.34	19.167	21.778
15	15	10.728	-15.996	-10.64	19.26	22.004
16	16	10.876	-15.884	-10.948	19.251	22.146
17	17	11.084	-15.796	-11.192	19.297	22.308
18	18	11.252	-15.748	-11.416	19.355	22.471
19	19	11.408	-15.596	-11.612	19.323	22.544
20	20	11.568	-15.488	-11.768	19.331	22.631
21	21	11.628	-15.42	-11.944	19.313	22.708
22	22	11.676	-15.372	-12.044	19.304	22.753
23	23	11.792	-15.28	-12.136	19.301	22.799
24	24	11.828	-15.148	-12.268	19.219	22.801
25	25	11.736	-14.988	-12.42	19.036	22.73
26	26	11.58	-14.952	-12.52	18.912	22.681

表1 处理后的探空仪速度数据

序号	时间(s)	$S_x$ (m)	$S_y$ (m)	$S_z$ (m)	X轴总位移(m)	Y轴总位移(m)	Z轴总位移(m)
0	1	12.088	-30.69	0.242	12.088	30.69	0.242
1	2	11.134	-22.59	-0.154	23.222	53.28	0.396
2	3	10.614	-19.9	-1.464	33.836	73.18	1.86
3	4	10.334	-17.828	-2.67	44.17	91.008	4.53
4	5	10.238	-16.87	-3.82	54.408	107.878	8.35
5	6	10.11	-16.378	-4.784	64.518	124.256	13.134
6	7	10.04	-16.108	-5.58	74.558	140.364	18.714
7	8	9.942	-15.836	-6.378	84.5	156.2	25.092
8	9	9.906	-15.672	-7.172	94.406	171.872	32.264
9	10	10.008	-15.672	-7.556	104.414	187.544	39.82
10	11	10.026	-15.694	-8.108	114.44	203.238	47.928
11	12	10.154	-15.794	-9.046	124.594	219.032	56.974
12	13	10.208	-15.918	-9.512	134.802	234.95	66.486
13	14	10.248	-15.996	-9.89	145.05	250.946	76.376
14	15	10.476	-15.996	-10.19	155.226	266.942	86.566
15	16	10.654	-16.052	-10.486	166.18	282.994	97.052
16	17	10.772	-15.928	-10.826	176.952	298.922	107.878
17	18	11	-15.82	-11.08	187.952	314.742	118.958
18	19	11.174	-15.824	-11.318	199.126	330.566	130.276
19	20	11.328	-15.65	-11.534	210.454	346.216	141.81
20	21	11.538	-15.522	-11.68	221.992	361.738	153.49
21	22	11.604	-15.444	-11.894	233.596	377.182	165.384
22	23	11.618	-15.418	-11.998	245.214	392.6	177.382
23	24	11.774	-15.346	-12.07	256.988	407.946	189.452
24	25	11.874	-15.228	-12.192	268.862	423.174	201.644
25	26	11.814	-15.006	-12.37	280.676	438.18	214.014
26	27	11.668	-14.98	-12.47	292.344	453.16	226.484

表2 处理后的探空仪位移数据

得：

$$(M + m_{au})a_u = (M - m_f)\bar{g} + m_{au} \frac{d\bar{v}_f}{dt} - \frac{\rho S C_{du} |\bar{v}_u - \bar{v}_f| (\bar{v}_u - \bar{v}_f)}{2} \quad (20)$$

在三维直角坐标系中分解如下：

$$\begin{cases} (M + m_{au})a_x = m_{au} \frac{dv_{fx}}{dt} - \frac{\rho S C_{du} v_x \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}{2} \\ (M + m_{au})a_y = m_{au} \frac{dv_{fy}}{dt} - \frac{\rho S C_{du} v_y \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}{2} \\ (M + m_{au})a_z = (M - m_f)g + m_{au} \frac{dv_{fz}}{dt} - \frac{\rho S C_{du} v_z \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}{2} \end{cases} \quad (21)$$

通过式(21)可解算出空中风速  $v_f$ ，其中  $v_x = v_{ux} - v_{fx}$ ， $v_y = v_{uy} - v_{fy}$ ， $v_z = v_{uz} - v_{fz}$ ； $a_x$ ， $a_y$ ， $a_z$ 可由三轴加速度传感器直接测得； $M$ 、 $g$ 、 $\rho$ 、 $S$ 可当作已知量； $m_f$ 为附加空气质量，伞衣完全充满后，伞衣容积为球形，因此

$$m_f = \frac{4}{3} \rho \pi r_m^3, \quad r_m \text{ 为伞衣充满后的投影半径；} m_{au}, C_{du}$$

可通过经验公式及  $k_1, k_2$  进行参数修正得到。

#### 4、加速度数据计算风向

设经坐标转换后 A、B 分别为空间直角坐标系中  $n, n+1$  时刻对应点，其三维加速度分别为  $(a_{1x}, a_{1y}, a_{1z})$ 、 $(a_{2x}, a_{2y}, a_{2z})$ 。则有：

$$\Delta \bar{a}_x = \frac{\bar{a}_{1x} + \bar{a}_{2y}}{2}, \quad \Delta \bar{a}_y = \frac{\bar{a}_{1y} + \bar{a}_{2y}}{2} \quad (22)$$

由(22)求解水平方向为：

$$|a| = \sqrt{|\Delta \bar{a}_x|^2 + |\Delta \bar{a}_y|^2} \quad (23)$$

以正北(N)方向为  $0^\circ$  顺时针角度增加，设  $\beta$  为风向与正

北方向形成的角度，有：

$$\theta = \arcsin \frac{|\Delta \bar{a}_x|}{|a|} \quad (24)$$

则风向的判别条件如下：

$$\begin{cases} \Delta \bar{a}_x > 0 \\ \Delta \bar{a}_y > 0 \end{cases} \text{ 时 } \beta = \theta + 180^\circ \quad \begin{cases} \Delta \bar{a}_x < 0 \\ \Delta \bar{a}_y > 0 \end{cases} \text{ 时 } \beta = 360^\circ - \theta$$

$$\begin{cases} \Delta \bar{a}_x < 0 \\ \Delta \bar{a}_y < 0 \end{cases} \text{ 时 } \beta = \theta \quad \begin{cases} \Delta \bar{a}_x > 0 \\ \Delta \bar{a}_y < 0 \end{cases} \text{ 时 } \beta = 180^\circ - \theta$$

$$\Delta \bar{a}_x = 0 \begin{cases} \Delta \bar{a}_y < 0 \text{ 时 } \beta = 270^\circ \\ \Delta \bar{a}_y > 0 \text{ 时 } \beta = 90^\circ \end{cases} \quad \Delta \bar{a}_y = 0 \begin{cases} \Delta \bar{a}_x < 0 \text{ 时 } \beta = 0^\circ \\ \Delta \bar{a}_x > 0 \text{ 时 } \beta = 180^\circ \end{cases}$$

#### 五 数值模拟与结果分析

根据得到的探空仪系统位移数据，在三维直角坐标系中重构，得到系统在空中的运动轨迹如图4。

根据实际计算需要，将三轴加速度传感器的采样值处理成以 1s 为时间间隔，并将处理后的三维加速度值带入模型进行空中风速计算，按 100m 高度分层得出的空中风速结果与实际探测风及下投式 GPS 探测风比较如图5，风向结果如表3，以实际探测风作参照求均差，得出风速均差为 0.905m/s，风向均差为 1.25°。

从数值计算结果可以看出，利用三轴加速度传感器实时获取探空仪系统的加速度，再经加速度测风数学模型计算出的空中风速可以较准确地反映实际空中风情况，尤其在较高高度层时具有较好的精度。低高度层中由于随时间累积的系统误差逐渐加大，影响了测风精度。总的来说，利用三轴加速度传感器测量空中风矢量有其可行性，文章中建立的加速度测风数学模型准确可靠。

#### 六 结论

文章中提出的利用三轴加速度传感器测量空中风的方法在高空风测量技术上是一个新的尝试，克服了传统空中风测量方法中的不足。但是，由于加速度传感器存在零位误差和随机漂移误差，在进行速度、位移、风速、风向参数解算时，势必会因积分而造成随时间累积很快的系统误差。目前，国内还未有解决加速度传感器误差的实质性方案。在以后的工作中，还需要对数学模型中的  $k_1, k_2$  参数修正、数据滤波等方面做进一步探讨，以期获得更高的测量精度。

#### 参考文献

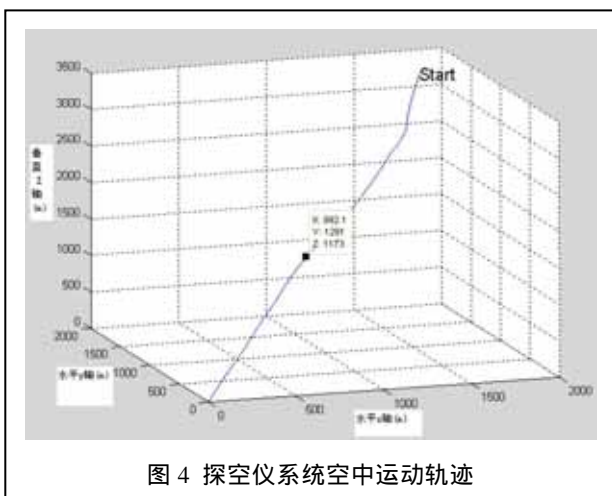


图4 探空仪系统空中运动轨迹

[1] 许屏, 彭杨华. 下投式探空仪非稳定状态 GPS 数据处理 [J], 南京: 气象水文装备, 2008.(7): 35 ~ 42

[2] 徐四林. 以降落伞为示踪物测风数学模型设计 [D], 南京: 气象学院, 2003, 15 ~ 17

[3] 张霭琛. 现代气象观测, 北京大学出版社 [M], 2000: 325 ~ 326

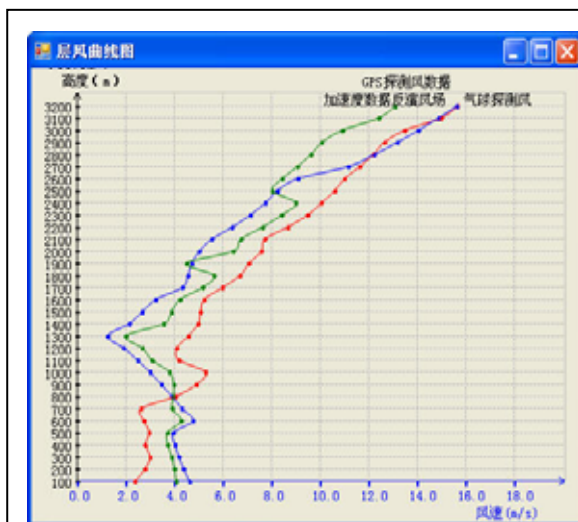
**The technology research on three-axis accelerometer applied in upper wind measurement**

XU Ping, PENG Guang-ping, CHENG Li-fu

(PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China)

**Abstract:** With the continuous improvement of micro-machine technique, the accelerometers have been applied more and more widely. Firstly, the stress analysis of sounding instrument in atmosphere hydro-field is supplied detailedly in this paper. Then, the mathematical model for measuring upper wind based on acceleration data is established, and the vectors of upper wind are calculated. After calculating the data from experiment, and comparing this method with the other actual measuring techniques of upper wind, the conclusion is given that the method is feasible.

**Keywords:** three-axis accelerometer; sounding instrument



序号	风向(°)	垂直高度层(m)
0	355.977	100
1	232.292	200
2	316.48	300
3	327.265	400
4	313.591	500
5	182.755	600
6	355.285	700
7	273.857	800
8	326.611	900
9	183.621	1000
10	182.062	1100
11	341.617	1200
12	340.103	1300
13	201.829	1400
14	297.665	1500
15	281.445	1600
16	81.989	1700
17	308.607	1800
18	159.37	1900
19	304.592	2000
20	302.755	2100
21	308.517	2200
22	353.734	2300
23	329.616	2400
24	63.964	2500
25	39.174	2600
26	65.915	2700
...	...	...

图 5 加速度值求解层风曲线图(100m 分层) 表 3 加速度值求解风向(100m 分层)

system; wind measuring model; wind speed; wind orientation

**作者简介:**

许屏, 解放军理工大学气象学院军事气象系副教授, 硕士生导师, 从事 GPS 应用与研究

彭光平, 解放军理工大学气象学院硕士研究生, 主要研究方向数据采集与处理

通信地址: 南京市中华门外双龙街 60 号解放军理工大学气象学院研究生一队 邮编: 211101

电话: 13776557197 电邮: stonepgp@163.com

程礼富, 中国人民解放军理工大学气象学院硕士研究生, 研究方向为数据采集与处理

读者服务卡编号 004