

99, 10(3)

257-266

# 风杯风速仪过高效应的订正研究\* p414-73

张宏昇 陈家宜

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

朴淳雄

(汉城国立大学大气科学系, 韩国汉城 151-742)

## 提 要

该文基于对风杯风速仪动力方程的数值计算和风杯风速仪与超声风速仪平行对比的观测结果, 发现专用于近地面层精细风廓线测量的轻型低阈值风杯风速仪测风的过高效应引起的  $u$ -error 约为 1%, 因风速平均方法不同 (标量平均和矢量平均) 引起的 DP-error 是风杯风速仪测风过高的主要原因, 在小风情况下更为明显. DP-error 经修正后可获得合理的风速值.

关键词: 风杯风速仪, 过高效应, 观测法, 订正研究

## 引 言

风杯风速仪是转动式测风仪器, 存在特定的惯性力矩, 属于一级响应系统<sup>[1]</sup>. 将风杯运动方程中的转矩系数按风杯加速和减速状态分开, 风杯风速仪运动方程可表示为<sup>[2]</sup>:

$$\text{加速状态: } \frac{du_m}{dt} = C_A(u^2 - u_m^2) \quad (1)$$

$$\text{减速状态: } \frac{du_m}{dt} = C_D(u^2 - u_m^2) \quad (2)$$

式中, 系数  $C_A$  和  $C_D$  由风杯风速仪特性决定, Hayashi (1987)<sup>[2]</sup> 用实验方法确定其比值为 1.28;  $u$  为实际风速值;  $u_m$  为风杯风速仪风速测量值.

但是, 在风速脉动场中, 风杯风速仪测风存在误差<sup>[3~9]</sup>. MacCready (1966)<sup>[10]</sup> 认为: 在实际大气中旋转类风速仪过高效应误差可分为 4 类:  $w$ -error、 $v$ -error、 $u$ -error、DP-error, 即:

$$U = U_r [(w\text{-error})(v\text{-error})(u\text{-error})][DP\text{-error}] \quad (3)$$

式中,  $U$  为沿主导风向的实际水平风速值;  $U_r$  为在风洞标定时, 稳定状态下风杯风速仪风速测量值; 前面方括号表示湍流特征对风速仪测风的误差, 其误差大小随湍流特征和仪器不同而不同, 对此前人多有研究. 其中,  $u$ -error 的产生是源于风杯风速仪对风速脉动的非线性响应, 是风杯风速仪固有的特性;  $w$ -error 是由于实际气流与风杯水平面不平行造成

\* 本研究为中国国家自然科学基金委员会和韩国科学与工程基金委员会资助项目成果.

1998-03-04 收到, 1998-07-13 收到修改稿.

的,其原因是风杯转动轴和地面不垂直以及实际大气存在上升或下降气流. MacCready<sup>[10]</sup>将实际气流与风杯平面夹角 $\theta$ 看作高斯分布,给出中性层结下, $\theta=5^\circ$ 或 $z/z_0=100$ 对应的 $w$ -error不足0.5%; $v$ -error是指带有风向标的螺旋桨风速仪随风向脉动的响应,本文不作探讨.后面方括号表示流过感应探头的风向与总平均风向不一致引起的误差,是风杯风速仪测风原理决定的,也可以说是不同风速定义造成的. Frenkiel(1951)<sup>[11]</sup>曾给出均匀湍流下风速标量平均 $u_s$ 和矢量平均 $u_v$ 之间的一阶近似关系:

$$u_s \approx u_v \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_v}{u_v} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

式中, $\sigma_v$ 为水平横向风速脉动方差.可见,标量风速平均总是大于矢量风速平均.由方程(4)可推出近似的DP-error表达式:

$$\delta_{DP} = \frac{u_s - u_v}{u_v} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_v}{u_v} \right)^2 \quad (5)$$

为后文使用方便,将方程(4)视为风杯风速仪DP-error的修正公式,并改写为:

$$u_s = u_m \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_v}{u} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (6)$$

式中, $u_m$ 和 $u_s$ 分别为风杯风速仪风速测量值和订正计算值; $\sigma_v$ 为水平横向速度脉动方差; $u$ 为实际水平风速值.后文的实际观测结果将证明方程(6)是合理的.将近地面层通量-廓线关系代入上式,有

$$u_s = u_m \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_v}{u} \right)^2 \left[ \frac{\kappa}{\ln(z/z_0) - \psi_m(\zeta)} \right]^2 \right\}^{-1} \quad (7)$$

式中, $\psi_m(\zeta)$ 是风廓线的稳定度修正函数, $\psi_m(\zeta) = \int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{1 - \psi_m}{\zeta} d\zeta$ ;归一化风速标准差 $\frac{\sigma_v}{u}$ .

采用Panofsky和Dutton(1984)<sup>[12]</sup>推荐的拟合关系: $\frac{\sigma_v}{u} = (12 - 0.5 \frac{z}{L})^{1/3}$ , $z$ 为混合层高度.因此,由水平横向速度归一化标准差 $\sigma_v/u$ .随稳定度参数 $z/L$ 的变化关系以及通量-廓线关系,就可对单一风杯风速仪测风结果进行DP-error的订正.

本文针对美国Teledyne公司专为近地面层精细风廓线测量而设计生产的M50.1B型轻型低阈值风杯风速仪的特性,利用风杯风速仪动力响应方程对风杯风速仪过高误差作了数值模拟研究,并结合风杯风速仪和超声风速仪水平比较实验结果进行对比,给出高质量风杯风速仪测风误差的主要来源及其订正的可能性和合理性.有关观测资料获取情况和M50.1B型风杯风速仪特性可参见文献[13],其中方程(1)和(2)中的系数 $C_A=0.598$ 、 $C_B=0.467$ .

## 1 $u$ -error的数值模拟研究

沿用方程(1)、(2),假设实际水平横向风速 $U_y=0$ ,水平纵向风速呈正弦变化,其变化关系如下:

$$U = \bar{U} \left[ 1 + S \sin \left( \frac{2\pi t}{T} \right) \right] \quad (8)$$

式中, $\bar{U}$ 为风速平均值, $S$ 为水平纵向风速脉动的无因次幅值, $T$ 为风速脉动的周期.为计

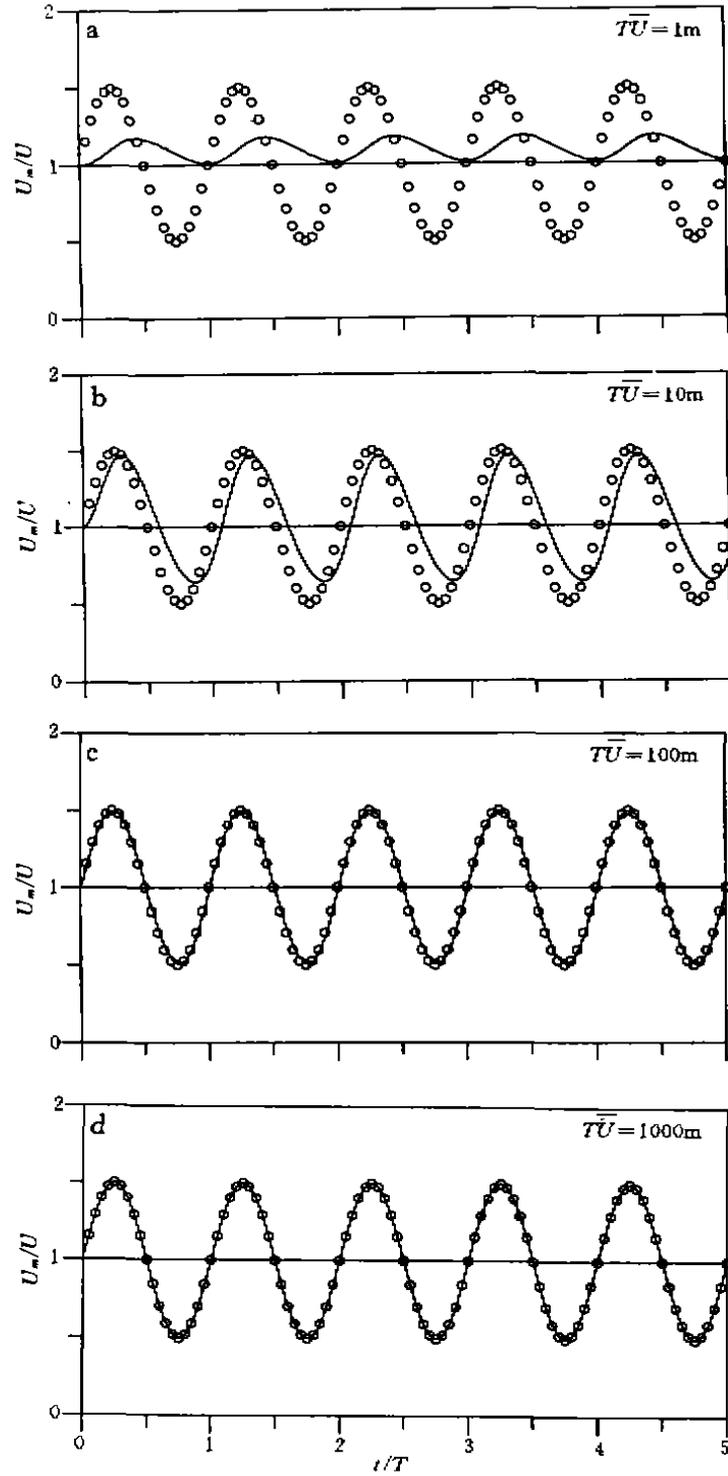


图 1 风杯风速仪测风的响应曲线( $S=0.5$ ) (符号“○”为风速脉动幅值变化  $(1 + S\sin 2\pi t^N)$ , 实线为风杯风速仪测风的响应)

算方便, 设  $U^N = U/\bar{U}$  和  $t^N = t/T$ , 代入方程(1)和方程(2), 有

$$\frac{dU^N}{dt^N} = CT\bar{U}[(1 + S\sin 2\pi t^N)^2 - U^{N^2}] \quad (9)$$

求解方程(9), 风杯风速仪处于加速状态时,  $C$  取  $C_A$ , 减速状态时,  $C$  取  $C_D$ . 以  $S=0.5$  为例, 图 1(a), 1(b), 1(c), 1(d) 分别给出了  $T\bar{U}=1, 10, 100, 1000$  m 时的风杯风速仪风速测量值随时间的响应变化. 图中实线为风杯风速仪测风的响应, 符号“○”为实际风速脉动幅值变化  $(1 + S\sin 2\pi t^N)$ . 显然, 风杯风速仪风速测量值追随风速脉动的幅值随  $T\bar{U}$  的增加而变大.  $T\bar{U}=1$  m, 亦即风杯风速仪采样频率较高时, 风杯风速仪幅度测量值对实际纵向风速脉动滞后约  $1/4$  个相位;  $T\bar{U}=100$  m, 风杯风速仪测量值已经很好地反映实际风速的变化. 图 2 给出风杯风速仪风速幅值贡献与  $T\bar{U}$  的关系, 图 3 给出风杯风速仪测风系统相对偏高值随  $T\bar{U}$  的变化关系.

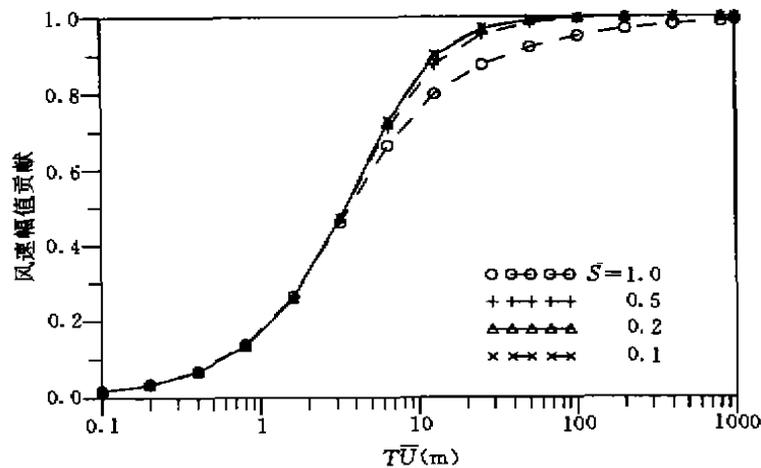


图 2 风杯风速仪风速幅值贡献与  $T\bar{U}$  的关系

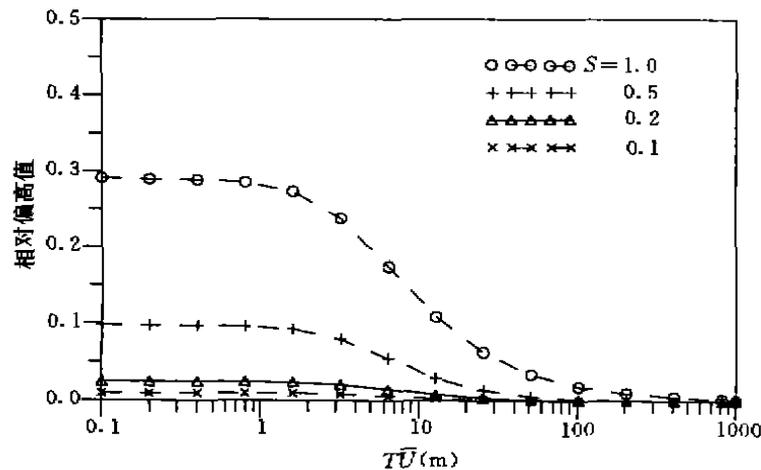


图 3 风杯风速仪测风的系统相对偏高值随  $T\bar{U}$  的变化

由图 2 和图 3 可看出,风杯风速仪测风的幅值贡献和系统相对偏高值与  $T\bar{U}$  关系明显,随着水平纵向风速脉动无因次幅值  $S$  的增大,幅值贡献和系统相对偏高值分别快速地增大或减小.当  $T\bar{U}$  较大时,幅值贡献趋近于 1,系统相对偏高趋于很小的数值.例如, $S=0.5$  时, $T\bar{U}=1, 10, 100\text{ m}$  对应的幅值响应约为 16%、82%、99%,并同时具有约为 9%、5%、0.5% 的系统偏高.这就是说,假定风速值只有 1 m/s,采样时间只要 2 min, M50.1B 型风杯风速仪测风的系统相对偏高范围可以控制在 0.5%.对比 Hayashi<sup>[2]</sup> 的结果, M50.1B 型风杯风速仪系统相对偏高的数值确实比 Hayashi 所使用的风杯风速仪小 1 个数量级以上,与两个风杯风速仪的距离常数分别为 1.22 m 和 16.9 m 相吻合.

## 2 DP-error 的数值模拟研究

假设水平纵向风速不变  $U_x = \bar{U}$ , 水平横向风速  $\bar{U}_y = 0$ , 呈正弦变化, 其变化关系:

$$U_y = \bar{U} \left[ S \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] \quad (10)$$

式中,  $\bar{U}$  为纵向水平风速平均值,  $S$  为水平横向风速脉动的无因次幅值,  $T$  为风速脉动的周期. 为计算方便, 同样设  $U^N = U/\bar{U}$  和  $t^N = t/T$ , 代入方程(1)和(2):

$$\frac{dU^N}{dt^N} = CT\bar{U} \left[ (1 + S^2 \sin^2 2\pi t^N) - U^{N^2} \right] \quad (11)$$

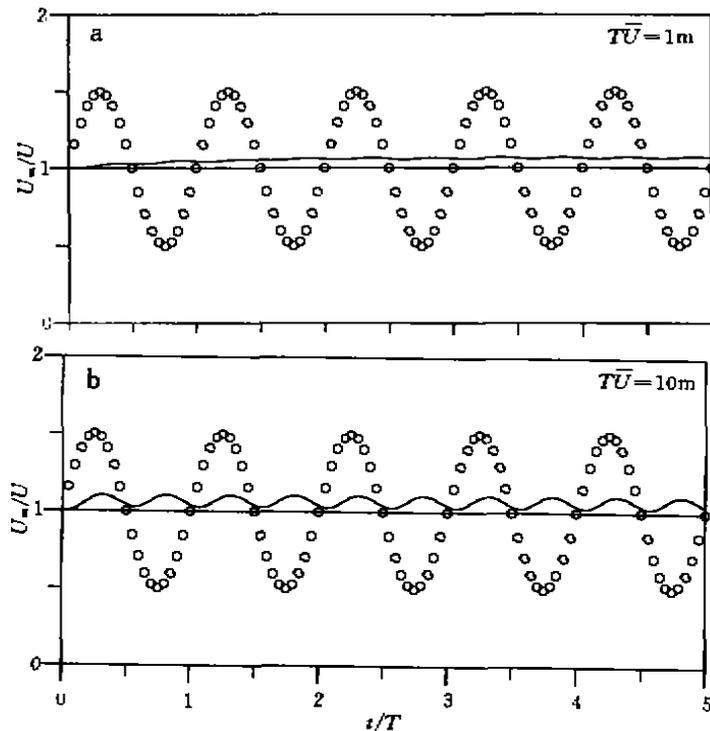
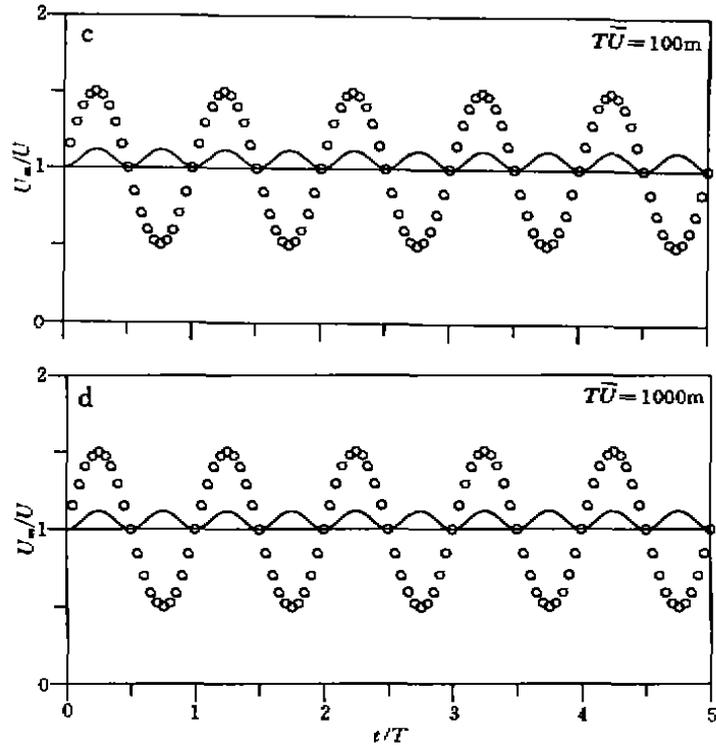


图 4 风杯风速仪对横向风速脉动的响应曲线( $S=0.5$ ) (说明同图 1)



(续图4)

同样,求解方程(11),风杯风速仪处于加速状态时, $C$ 取 $C_A$ ;减速状态时, $C$ 取 $C_D$ .仍以 $S = 0.5$ 为例,图4(a),4(b),4(c),4(d)分别给出了 $T\bar{U} = 1, 10, 100, 1000\text{m}$ 时的风杯风速仪风速测量值随时间的响应变化.由图可见,风杯风速仪风速测量值追随水平横向风速脉动的幅值随 $T\bar{U}$ 的增加而变化不大, $T\bar{U} = 1\text{m}$ ,亦即风杯风速仪采样频率较高时,风杯风速仪幅度测量值对实际横向水平风速脉动响应较差.图5给出风杯风速仪风速幅值贡献

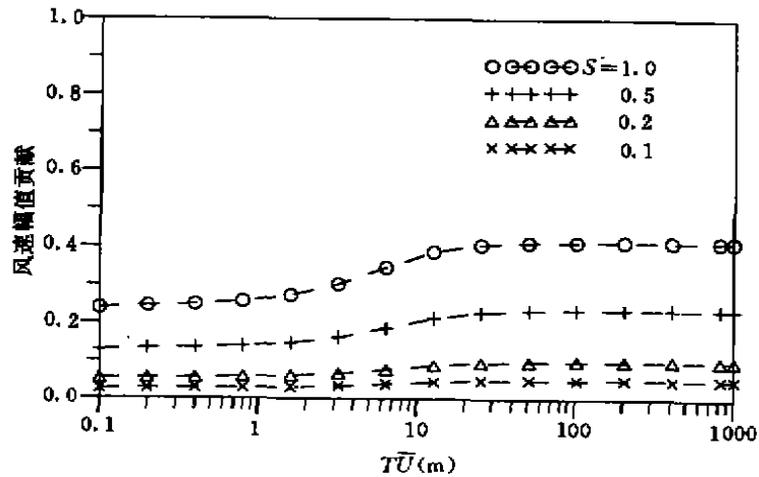


图5 横向风速脉动场中的风杯风速仪风速幅值贡献与 $T\bar{U}$ 的关系

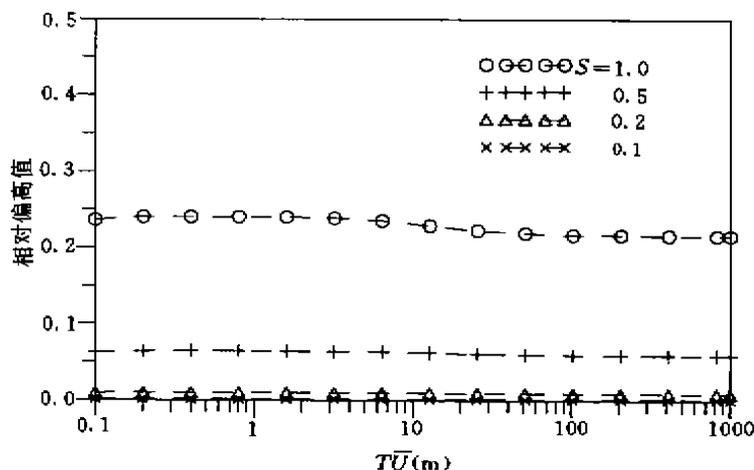


图6 横向风速脉动场中的风杯风速仪测风的系统相对偏高值随  $T\bar{U}$  的变化关系

与  $T\bar{U}$  的关系,图6给出风杯风速仪测风的系统相对偏高值随  $T\bar{U}$  的变化关系.由图可见,风杯风速仪测风的幅值贡献和系统相对偏高的大小不随  $T\bar{U}$  的变化而存在较明显的变化,但随着水平横向风速脉动无因次幅值  $S$  的增加而迅速增大.即水平横向风速脉动幅度的大小决定了 DP-error 的大小,与风杯风速仪本身无关,这一结果也验证了方程(5)的合理性.

### 3 风杯风速计过高误差的实例分析

1993年8月13~19日在中国科学院内蒙古草原生态系统定位站进行观测实验,该站位于内蒙古自治区锡林郭勒盟阿巴哈纳尔旗白音锡勒牧场境内,观测场地平坦均匀;超声风速仪为日产 DAT-300 型(探头为 TR-61C 型),其风速测量范围为  $\pm 30$  m/s,分辨率为 0.005 m/s;风杯风速仪 M50.1B 型;两测风仪器分别架设在各自独立的观测杆顶部;两仪器架设高度为 3.45 m<sup>[13~14]</sup>,采样长度为 10 min.尽管所获取资料的风速值多集中在 4 m/s 以下,仅有 6 m/s 资料一组(图7),但小风速多对应较大的风向和风速变化,有利于风杯风速仪测风误差的研究.

根据前人的研究结论<sup>[4,9]</sup>,计算 M50.1B 型风杯风速仪过高效应引起的误差  $u$ -error 和 DP-error,并给出  $u$ -error ( $\delta_u$ ) 和 DP-error ( $\delta_{DP}$ ) 随水平纵向风速  $U$  的变化关系(图7).由图7可见:较大风速时,风杯风速仪的  $u$ -error 和 DP-error 都较小,不足 3%;较小风速时, $u$ -error 明显增大;风速  $U > 1$  m/s,  $u$ -error 一般小于 1%,较低风速时,个别情况下可达 5%;随着风速值的降低,DP-error 迅速增加,风速  $U = 6$  m/s,对应  $\delta_{DP}$  约为 3%, $U = 2$  m/s,对应  $\delta_{DP}$  约为 10%,而  $U < 1$  m/s,  $\delta_{DP}$  可达 15%,这与较小的风速与较大的风向变化相对应;一般地,有  $u$ -error  $<$  DP-error.

图8给出风杯风速仪风速实测值和订正值与超声风速仪风速测量值的对比结果,图

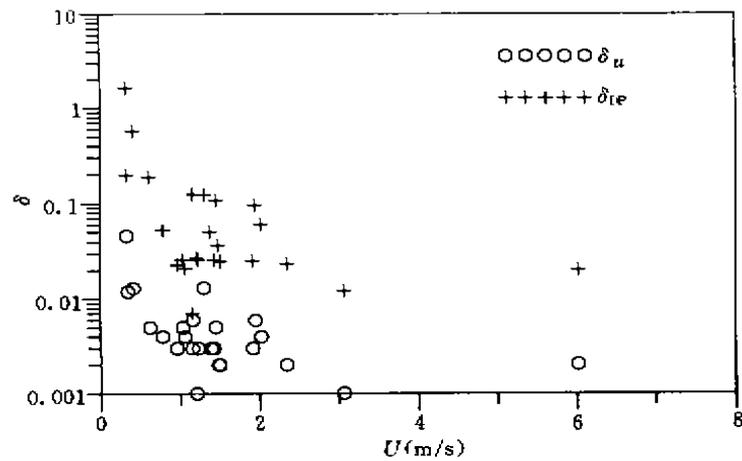


图7 风杯风速仪过高效应  $u$ -error( $\delta_u$ )和 DP-error( $\delta_{DP}$ ) 随水平纵向风速  $U$  的变化关系

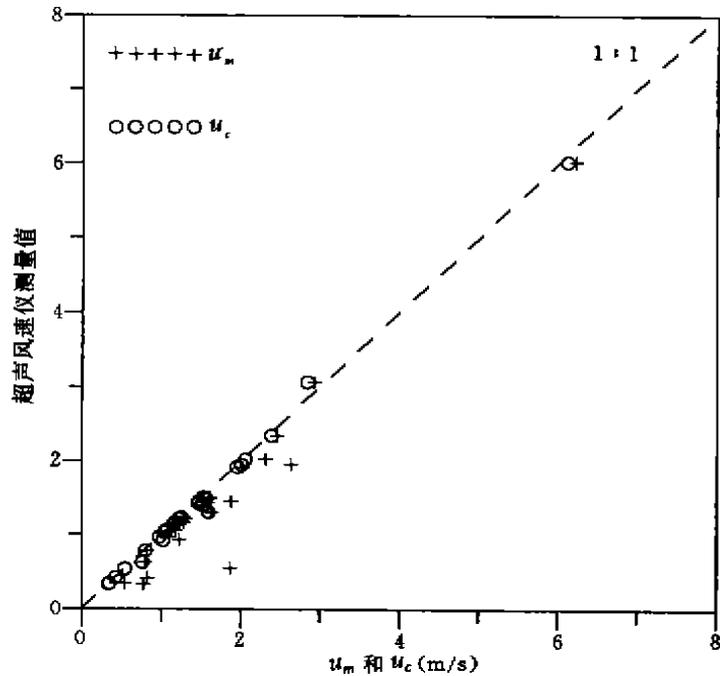


图8 风杯风速仪实测值  $u_m$  和订正值  $u_c$  与超声风速仪风速测量值的对比关系

中符号“+”和“○”分别代表风杯风速仪风速测量值  $u_m$  和方程(6)计算值  $u_c$ 。可见,风杯风速仪风速测量值相对超声风速仪测量值存在较明显的偏差,尤其是在小风情况下,当风杯风速仪风速测量值经过方程(6)订正后,其数值较好地符合超声风速仪测量值。图8还表明,DP-error 是近年来专用于精细风廓线观测的轻型低阈值风杯风速仪过高响应的主要

原因,使用方程(6)进行相应的订正是合理的.同时,图8也证明了前面数值模拟结果的正确性.

#### 4 结 论

本文通过求解风杯风速仪动力响应方程和风杯风速仪与超声风速仪水平比较实验的观测资料,研究了专用于大气边界层微气象学精细风廓线测量的轻型低阈值风杯风速仪测风误差,得到:风杯风速仪测风的  $u$ -error 在 1% 以内,小风速 ( $<1 \text{ m/s}$ ) 情况下,个别可达 5%;因风速平均方法不同(标量平均和矢量平均)引起的 DP-error 是风杯风速仪测风过高的主要原因,在小风情况下更为明显;DP-error 可利用水平横向速度归一化标准差  $\sigma_v/u$  随稳定度参数  $z/L$  的变化关系和通量-廓线关系进行修正并获得合理的风速值;由于  $\text{DP-error} \gg u\text{-error}$ ,对轻型低阈值风杯风速仪测风误差的订正变得较为简单.

致谢:本文在完成过程中曾得到北京大学地球物理系张霭琛教授和杜金林高级工程师的耐心指教和热情帮助以及大气探测经验的无保留传授,郭镇海博士对本文的数值计算工作给予了大力协助,特此表示衷心的感谢和崇高的敬意.

#### 参 考 文 献

- 1 赵柏林,张霭琛. 大气探测原理. 北京:气象出版社,1987. 107~113.
- 2 Hayashi T. Dynamic response of a cup anemometer. *J. Atmos. Ocean Technol.*, 1987, 4: 281~287.
- 3 Chang S and Frenzen P. Further consideration of hayashi's "Dynamic response of a cup anemometer". *J. Atmos. Ocean Technol.*, 1990, 7: 184~186.
- 4 Kaganov E I and Yaglom A M. Errors in wind-speed measurements by rotation anemometers. *Bound.-Layer Meteor.*, 1976, 10: 15~34.
- 5 Izumi Y and Barad M L. Wind speeds as measured by cup and sonic anemometers and influenced by tower structure. *J. Appl. Meteor.*, 1970, 9: 851~856.
- 6 Hyson P. Cup anemometer response to fluctuation wind speeds. *J. Appl. Meteor.*, 1972, 11: 843~848.
- 7 Kondo J, Naito G and Fujinawa Y. Response of cup anemometer in turbulence. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1971, 49: 63~74.
- 8 Busch N E and Kristensen L. Cup anemometer overspeeding. *J. Appl. Meteor.*, 1976, 15: 1328~1332.
- 9 Kaimal J C, Wyngaard J C, Izumi Y and Cote O R. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1972, 98: 563~589.
- 10 P B MacCready JR. Mean wind speed measurements in turbulence. *J. Appl. Meteor.*, 1964, 5: 219~225.
- 11 Frenkiel F N. Frequency distributions of velocities in turbulent flow. *J. Meteor.*, 1951, 8: 316~320.
- 12 Panofsky H A and Dutton J A. Atmospheric turbulence. New York: A Wiley-Interscience Pub., 1984. 156~173.
- 13 张宏昇. 近地面层湍流输送观测仪器和方法研究. 北京大学博士研究生论文. 1995. 14~31.
- 14 Pan L L, Chen J Y, Zhang H S and Zhang A C. A one-dimensional model of land surface, canopy and atmosphere system and its using in research of interaction between grassland and atmosphere. *Atmos. Sci. Sinica*, 1996, 20: 195~206.

## REDUCTION FOR THE OVERSPEED OF CUP ANEMOMETER

Zhang Hongsheng Chen Jiayi

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Park Soon-Ung

(Department of Atmospheric Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

### Abstract

Based on an equation of the dynamic response of cup anemometer and the contrast observations between cup anemometer and sonic anemometer, it is shown that  $u$ -error caused by the overspeed of cup anemometer is about 1% and data processing error (DP-error) associated with cup anemometer is the most important one because of distinct calculated methods (vector mean and scalar mean). After the reduction for DP-error, the rational wind speed values could be obtained.

**Key words:** Cup anemometer Overspeed Observational method

---

### 《应用气象学报》1999 年增刊征订通知

国家科委“九五”攻关重中之重点项目“短期气候预测系统”01 课题 01 专题,关于我国夏季降水的诊断分析和预测方法,登陆台风变化特征、台风成因及其与海温的关系,夏季降水与全球温度变化,夏季风气候变化及全球背景,近百年我国气候变化的特征、气候年代际变化的大气环流对比以及雪盖对中国气候的影响,近百年我国重大气候灾害、气候研究若干问题的进展等方面的近 20 篇论文,将于 1999 年 8 月在《应用气象学报》增刊发表.欢迎广大读者订阅,定价 15 元.欲订者请汇款至中国气象科学研究院气象科技信息中心或《应用气象学报》编辑部.地址:北京白石桥路 46 号,邮编 100081.