

超声风温仪测温的误差订正^{*}

张宏升^{**} 陈家宜

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘 要 利用同步进行的风速、温度、湿度湍流观测资料, 对超声风温仪温度测量结果作了水平风速和湿度的订正。结果表明: 由于超声风温仪测温受空气湿度和水平风速的影响, 对其作相应的订正是十分必要的。 $|z/L| < 1$ 时, 湿度和风速对超声风温仪温度方差和感热通量测量值所引起的误差是不可忽视的。而在 $|z/L| > 1$ 区间, 仅计入湿度影响, 已够精确。对于温度谱密度, 当 $nS_\theta(n)/\sigma_\theta^2$ 低于 0.01 时, 有一高频的噪声频率阈值, 高于此频率, $nS_\theta(n)/\sigma_\theta^2$ 与无因次频率 f 呈+1 次幂关系。

关键词 超声风温仪 温度脉动 观测法

1 引言

在大气边界层研究中, 利用超声风温仪测量温度脉动是目前常用手段之一, 其测温原理已有很好的描述^[1~3]。尽管现代超声风温仪已可直接输出温度数值, 但由于超声风温仪测温依赖于声速, 而声速受测量路径中空气湿度以及水平风速的影响。Kaimal^[4]指出: 温度感应和垂直风速脉动的测定路径相同, 空间平均特性一致, 但测量结果受风向与探头的相对位置、湿度、大气层结的影响, 尤其是在中性和稳定层结条件下, 当温度脉动方差值较小时, 可能产生较大的误差。考虑空气湿度和水平风速对超声风温仪测温的影响, 超声风温仪温度测量值 T_{SM} 可由下式表达^[5~7]:

$$T_{SM} = T(1 + 0.51q) - \frac{V_n^2}{\gamma R} \quad (1)$$

其中, T 为空气绝对温度 (K), q 为混合比湿度 (g/g), V_n 为水平风速值 (m/s), 对于空气, $\gamma R = 403 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$ 。

实际测得混合比湿度 q 和水平风速值 V_n , 就可利用 (1) 式对超声风温仪温度测量值 T_{SM} 进行订正, 求得超声风温仪测温的计算值 T_{SC} 。为方便起见, 将 (1) 改写成

$$T_{SC} = T = \frac{T_{SM} + \frac{V_n^2}{\gamma R}}{1 + 0.51q} \quad (2)$$

按通常作法, 将 (2) 式分解成平均项和脉动项, 则

1996-05-28 收到, 1996-11-18 收到修改稿

* 本研究为国家自然科学基金委员会资助项目成果

** 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室客座研究人员

$$\sigma_{T_{SC}}^2 = \sigma_{T_{SM}}^2 - \underbrace{(1.02 \overline{T'q'})}_{\text{I}} - \underbrace{4 \frac{\overline{uu'T'}}{\gamma R}}_{\text{II}} + \underbrace{0.26 \overline{T'^2}}_{\text{III}} \sigma_q^2 - \underbrace{2.04 \frac{\overline{uT'u'q'}}{\gamma R}}_{\text{IV}} + \underbrace{\frac{4 \overline{u'^2} \sigma_u^2}{\gamma^2 R^2}}_{\text{V}}. \quad (3)$$

$$\overline{w'T'_{SC}} = \underbrace{\overline{w'T'_{SM}}}_{\text{I}} - \underbrace{(0.51 \overline{T'w'q'})}_{\text{II}} - \underbrace{2 \overline{uu'w'}}_{\text{III}} / \gamma R. \quad (4)$$

可见, 超声风温仪测定的温度脉动方差 $\sigma_{T_{SM}}$ 和感热通量 $\overline{w'T'_{SM}}$ 并非真实的温度脉动方差 σ_T 和感热通量 $\overline{w'T'}$, 应从超声风温仪温度测量值中扣除湿度和水平风速的影响因子 [方程 (3) 中 II~VI 项和方程 (4) 中 II、III 项]。Schotanus 等^[5]的研究结果表明: 当动量通量和水汽通量能够同步观测时, 超声风温仪温度统计量测量值的影响可以得到良好的修正。其中, 湿度对超声风温仪测温的影响起主要作用, 不稳定层结下的修正值可达 5%~10%, 近中性层结下可达 13%。Kaimal 和 Gaynor^[6]在对超声风温仪温度测量值进行了实时风订正后指出: 经过水平风速修正后, 超声风温仪温度测量值十分接近空气的虚温。Hignett^[7]认为: 稳定度参数 $|z/L| > 0.2$ 时, 超声风温仪温度测量值只需进行湿度修正, 水平风速的影响可以忽略; 而在靠近中性层结的 $|z/L| < 0.2$ 范围内, 因温度脉动小, 湿度和水平风速的影响都有一定比重。利用同步进行的风、温、湿湍流观测, 就日本海上电机公司产 DAT-300 型超声风温仪 (TR-61C 型探头) 测量温度脉动作了风速和湿度修正, 得到了一些有关仪器和观测法的有益结果。

2 观测和资料获取

湍流观测实验于 1994 年 9 月在北京房山区境内进行, 观测塔高度为 102 m, 北部及东部偏北方向有不超过 15 m 的建筑物, 其他方向为农业区, 地势平坦, 西面距燕山山脉 10 km。超声风温仪测温及风速测量采用日本海上电机公司产 DAT-300 型超声风温仪, 探头为 TR-61C 型, 三方向探头路径均为 20 cm。温度涨落采用自制的钨铼丝温度仪, 钨铼丝直径为 20 μm , 电阻值为 150 Ω 左右, 分辨率为 0.002 $^{\circ}\text{C}$, 线性度为 0.9999, 静风中的滞后系数低于 0.02 s。同时, 钨铼丝温度仪还有范围为 0~50 $^{\circ}\text{C}$ 的温度输出。湿度涨落采用美国 AIR 公司制造的 AIR-LA-1 型 Lyman-alpha 湿度仪。超声风温仪垂直探头中点距地面 75.0 m, 面向正南。钨铼丝温度仪探头和 Lyman-alpha 湿度仪探头分别置于超声风温仪垂直探头的左、右后侧方, 钨铼丝探头和湿度探头与垂直探头中心点相距为 10 cm。这种安装方法较好地保证了垂直风速 W 、超声风温仪温度测量值 T_s 、钨铼丝温度仪温度测量值 T_p 及湿度测量值 q 之间的相关性, 但当风向位于超声风温仪垂直探头侧向时, 风速的垂直分量会发生畸变, 影响观测结果的准确性。所有测量仪器在野外观测前后均进行了严格的实验室标定。风、温、湿湍流测量共用一套采集系统, 采样频率为 16 Hz, 采样长度为 55 min, 但只截取前 45 min 进行处理分析。因为本文侧重于超声风温仪测温的订正研究, 针对仪器的特点、安装情况及实验环境状况, 分析中只选取平均风向与垂直探头夹角不超过 60 $^{\circ}$, 即风向为 120~240 $^{\circ}$ 的数据。同时剔除取样时段内干扰信号多、风向变化大、平均风速小于 1 m/s、风向与水平方向夹角大于 5 $^{\circ}$ 以及明显不合理的数据组^[8]。

3 结果分析

3.1 超声风温仪测温原始资料的逐点订正

图1以一组实测数据清晰地说明了比湿和水平风速对超声风温仪测温引起的误差和方程(1)的合理性。图中给出了超声风温仪温度测量值 T_{SM} 、由方程(2)给出的计算值 T_{SC} 、钨铼丝温度仪温度测量值 T 、 $T - T_{SC}$ 、湿度订正因子 $0.51qT$ 和风速订正因子 $V_n^2/\gamma R$ 以及相应的水平风速 V_n 和混合比湿度 q 的5s平均的时间序列曲线。可见, 经过湿度和风速修正后的超声风温仪测温结果 T_{SC} 更接近钨铼丝温度仪温度测量值 T , T 与 T_{SC} 之间的偏差可根据所用观测仪器的观测精度^[8]和对 T_{SC} 的误差分析说明其合理性。图1还表明: 湿度增大, 超声风温仪温度测量值随之增大, 这符合超声风温仪测温原理^[3]以及声速与湿度的关系^[9]。风速同样有类似关系, 仅是由于 V_n 对 T_{SM} 的贡献为负, V_n 与 T_{SM} 的变化关系相反。

3.2 超声风温仪测量温度脉动方差的订正

由图2a可见: 在不稳定条件下, 温度方差的超声风温仪测量值平均偏高约10%左右; 稳定条件下, 平均偏低5%左右。对比图2b可以看到: 经过湿度和风速修正后的超声风温仪温度方差测量值更接近钨铼丝温度仪测量值。

将方程(3)中II~VI项用 σ_T^2 作归一化, 其数值与 z/L 的关系绘于图3。在很宽的稳定度范围内, 方程(3)的II项始终起较大作用, 当

$|z/L| < 1$ 时, III~VI项对 $\sigma_{T_{SC}}$ 有一定的贡献; 而在 $|z/L| > 1$ 区间, III~VI项与II项相比很小, 可以忽略, 这与Schotanus等^[5]和Hignett^[7]的结论略有差异, Schotanus从Cabauw观测资料发现方程(2)右边III~VI各项相对于II够小, 实际上只需作第

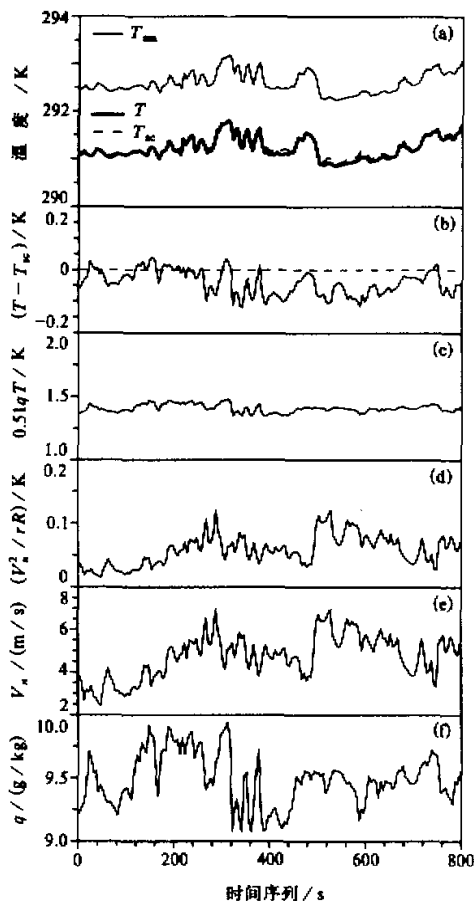


图1 5s平均时间序列曲线

- (a) 细实线为超声风温仪温度测量值 T_{SM} 、虚线为订正值 T_{SC} 、粗实线为钨铼丝温度仪温度测量值 T ;
(b) $T - T_{SC}$; (c) 湿度订正因子 $0.51qT$; (d) 风速订正因子 $V_n^2/\gamma R$; (e) 水平风速 V_n (m/s);
(f) 混合比湿度 q (g/Kg)

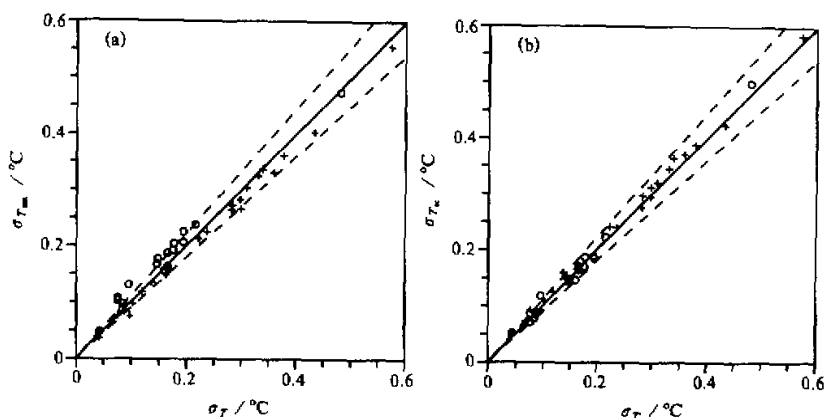


图2 温度方差

(a) 超声风温仪测量值; (b) 方程(3)计算值与钨铼丝温度仪测量值对比关系

“+”: 稳定层结, “o”: 不稳定层结, 对角线斜率为 1:1, 两条虚线斜率分别为 1.1 和 0.9

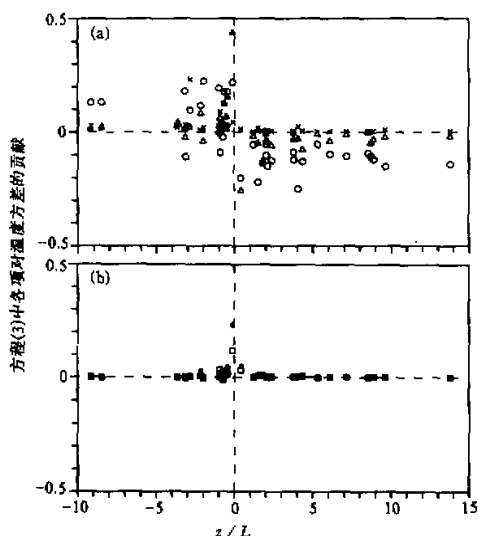


图3 方程(3)中II~VI项用 σ_T^2 作归一化后与 z/L 的关系

(a) II项(o); III项(Δ); IV项($\times$);

(b) V项($\square$); VI项($*$)

量测量值与钨铼丝温度仪测量值更为接近。

同样, 将方程(4)中II、III项用 $w'\theta'$ 作归一化, 其数值与 z/L 的关系绘于图5。在很宽的稳定度范围内, 方程(4)的II项始终起较大作用, 当 $|z/L| < 1$ 时, III项对 $w'\theta'_{SM}$ 有一定的贡献; 而在 $|z/L| > 1$ 区间, III项与II项相比很小, 可以忽略。也就

II项修正即够精确; 而 Hignett 认为: 在稳定度参数 $|z/L| > 0.2$ 时, 只有反映湿度温度相关项II和水平热通量项III有作用, 其他项可以忽略。在靠近中性的 $|z/L| < 0.2$ 范围内, 因温度脉动小, II~VI各项都有一定比重。由于方程(3)中的温度湿度相关项II和水平热通量项III分别为湿度和水平风速对超声风温仪测量温度的主要影响因子。综合考虑, 作者认为: 在对超声风温仪温度测量值作订正时, $|z/L| > 1$ 区间, 湿度起主要作用, 风速影响可以忽略; $|z/L| < 1$ 区间, 湿度和风速的影响都要考虑。

3.3 超声风温仪测量感热通量的订正

由图4a可见, 在不稳定条件下, 感热通量的超声风温仪测量值平均偏高约10%左右; 稳定条件下, 尽管感热通量数值较小, 但仍可以看出超声风温仪测量值有偏低趋势。对比图4b可以看到: 经过湿度和风速修正后的超声风温仪感热通

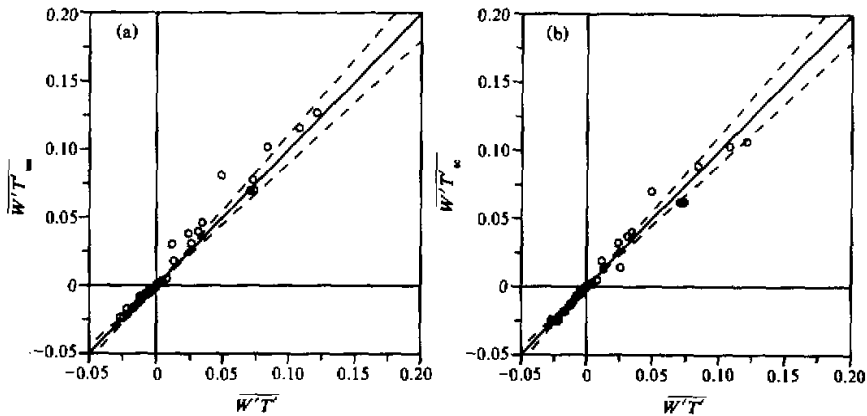


图4 感热通量

(a) 超声风温仪测量值; (b) 方程(4)计算值与铂丝温度仪测量值对比关系
 对角线斜率为 1:1; 两条虚线斜率分别为 1.1 和 0.9

是说: 在稳定度参数 $|z/L| > 1$ 时, 只有水汽通量项 II 有作用, 风速剪切项 III 可以忽略。在靠近中性的 $|z/L| < 1$ 范围内, II、III 两项都有一定比重。

3.4 温度谱的讨论

对于超声风温仪温度谱测量值, Kaimal^[6]曾有这样的报道: 22 m 高度, 不稳定层结 (风速为 2.5~4 m/s), 超声风温仪温度谱测量值与铂丝温度仪测量值在整个频率区间内

符合很好; 稳定层结 (风速为 1.5~2.5 m/s), 超声风温仪温度谱测量值的惯性区存在高频阈值这一现象, 低于此阈值频率, 温度谱 $nS_\theta(n)$ 与频率 f 呈-2/3 次幂关系, 高于此值 $nS_\theta(n)$ 与 f 却呈+1 次幂关系, 并且发现, 当 $nS_\theta(n)$ 大约在 $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^2$ 时开始上翘, 由-2/3 次幂转向+1 次幂关系。他认为这一异常通常来自白噪声的干扰。

图 6 给出了 9 月 14 日 11 时不稳定层结($\bar{U}=5.85 \text{ m/s}$, $q=9.22 \text{ g/kg}$, $z/L=-0.53$, $\sigma_\theta=0.22^\circ\text{C}$) 和 9 月 13 日 19 时稳定层结($\bar{U}=3.04 \text{ m/s}$, $q=9.45 \text{ g/kg}$, $z/L=1.54$, $\sigma_\theta=0.067^\circ\text{C}$) 的温度谱曲线实测个例。图中横轴 $f=nz/\bar{U}$ 为无因次归一化频率, 纵轴 $nS_\theta(n)/\sigma_\theta^2$ 为用温度脉动方差作归一化的温度谱密度。其中, 较粗实线为超声风温仪测量值, 较细点线为铂丝温度仪测量值。当温度谱密度 $nS_\theta(n)/\sigma_\theta^2$ 在高频端降至 0.01 左右时, 两种稳定条件下, 超声风温仪测量值都开始有上翘现象, 对应归一化无因次频率在 10 Hz 附近, 与 Kaimal 给出仅在稳定条件下出现不同。用 σ_θ^2 对 Kaimal 的温度谱曲线作归一化, 发现其温度谱在高频端出现上翘现象时对应的

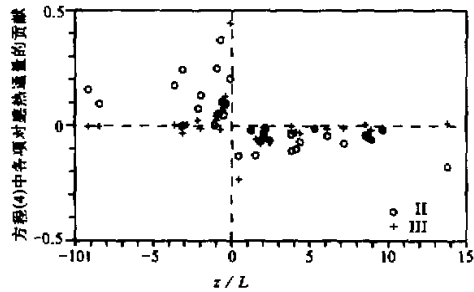


图5 方程(4)中 II、III 项用 $\overline{w'\theta'}$ 作归一化后
 与 z/L 的关系

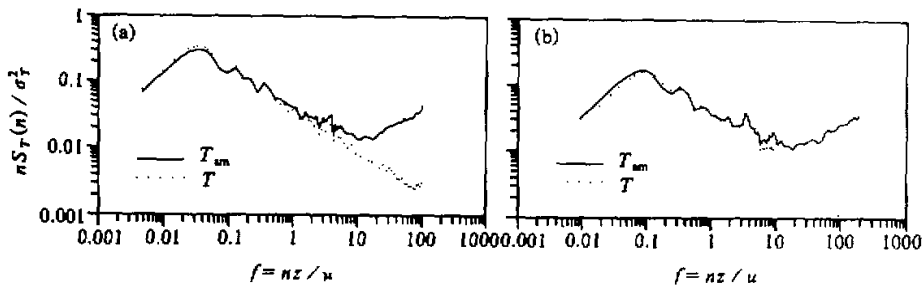


图 6 温度谱曲线

(a) 不稳定层结; (b) 稳定层结

较粗实线为超声风温仪测量值, 较细点线为钨铼丝温度仪测量值

$nS_\theta(n)/\sigma_\theta^2$ 也在 0.01 附近, 与本文结果相符。由于本文所有湍流仪器共用一个采集系统, 数据的高低频切断误差对两种测温探头的影响一样, 温度谱的上述现象, 作者同意 Kaimal 关于白噪声干扰所致的观点, 而且, 稳定层结与不稳定层结相比, 由于温度涨落较小, 白噪声的干扰更为明显。由图 6 可见, 两种测温元件的温度谱在高频段都存在谱曲线上翘的频率阈值, 只是钨铼丝温度仪阈值频率值大于超声风温仪, 两者大约有 10 倍左右的差别。这个差异的原因可以认为是两种仪器性能指标的不同: 超声风温仪测温分辨率为 0.025°C , 而钨铼丝温度仪测温分辨率为 0.002°C , 两者之差也是 10 倍左右。因此, 对于超声风温仪温度谱曲线测量值出现上翘现象, 是由于超声风温仪测温分辨率较低所致, 数值实验也证明了这一点。

4 结论

本文利用同步观测的风、温、湿湍流资料, 说明了空气湿度和水平风速对超声风温仪温度测量的影响以及进行相应的误差订正是十分必要的, 尤其是在近中性层结下。分析结果表明:

(1) 当 $|z/L| < 1$ 时, 对超声风温仪温度测量值以及相应的温度方差和感热通量作湿度和风速订正是必要和必须的。

(2) 在 $|z/L| > 1$ 区间, 对于温度方差或感热通量, 只作温度湿度相关项 [方程 (3) 中的 II 项] 或水汽通量项 [方程 (4) 中的 II 项] 的订正, 其结果已显精确。

(3) 一般情况下, 不稳定层结, 对于超声风温仪测温偏差起主要作用的温度湿度相关项和水汽通量项为正值, 因此, 空气湿度和水平风速使得超声风温仪温度测量值有偏高趋势; 温度层结正好相反, 温度湿度相关项和水汽通量项一般为负值, 超声风温仪温度测量值略有偏低。

(4) 由于白噪声干扰, 尤其在稳定层结, 超声风温仪温度谱测量值在高频端, $nS_\theta(n)/\sigma_\theta^2$ 约为 0.01 时, 有一频率阈值, 低于此值时, 温度谱密度 $nS_\theta(n)/\sigma_\theta^2$ 与归一化无因次频率 $f = nz/\bar{u}$ 的关系呈 $-2/3$ 次幂, 与公认的结论^[10~12]相同; 高于此值时呈 $+1$ 次幂关系, 而此现象因分辨率低而更严重。

致谢: 本文在完成过程中曾得到北京大学地球物理系张骥琛教授和杜金林高级工程师的指教和热情帮助, 特在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 Mitsuta, Y., 1996, Sonic anemometer-thermometer for general use, *J. Meteorol. Soc. Japan*, **44**, 12~24.
- 2 Kaimal, J. C. and J. E. Gaynor, 1983, The boulder atmospheric observatory, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, **22**, 853~880.
- 3 Hanafusa, T., T. Fujitani, Y. Kobori and Y. Mitsuta, 1982, A new type sonic anemometer-thermometer for field operation, *Pap. Meteorol. Geophys.*, **33**, 1~19.
- 4 Kaimal, J. C., 1969, Measurement of momentum and heat flux variances in the surface boundary layer, *Radio Sci.*, **4**, 1147~1153.
- 5 Schotanus, P., F. T. M. Nienstadt and H. A. R. De Bruin, 1983, Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes, *Boundary-Layer Meteorol.*, **26**, 81~93.
- 6 Kaimal, J. C. and J. E. Gaynor, 1991, Another look at sonic thermometer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **56**, 401~410.
- 7 Hignett, P., 1992, Corrections to temperature measurements with a sonic anemometer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **55**, 175~187.
- 8 张宏升, 1995, 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学位论文, 48~56.
- 9 赵柏林、张骥琛, 1987, 大气探测原理, 北京: 气象出版社, 119~120.
- 10 Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Cote, 1972, Spectral characteristics of surface-layer turbulence, *Quart J. R. Meteor. Soc.*, **98**, 563~589.
- 11 Roth, M., T. R. Oke and D. G. Steyn, 1989, Velocity and temperature spectra and cospectra in an unstable sub-urban atmosphere, *Boundary-Layer Meteorol.*, **47**, 309~320.
- 12 Zbigniew Sorbian, 1989, On the temperature spectrum in the convective boundary layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **47**, 195~203.

Correction of Temperature Measurement with Sonic Anemometer-Thermometer

Zhang Hongsheng and Chen Jiayi

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract Turbulence variance and flux of temperature fluctuation derived by simultaneous measurements with sonic anemometer-thermometer and fine wire thermometer have been compared for re-evaluating the contamination of humidity and horizontal wind in sonic temperature. Good agreement between two measurements is obtained if proper correction is applied to the statistics of sonic temperature. In the near neutral stratification the correction for both humidity and horizontal velocity must be considered when using sonic temperature, but in other stability ranges it is precise enough to correct the data with humidity only. Our results show the sonic temperature spectrum levels increase at high frequency end as in the previous study. However, the increase is less significant in fine wire temperature spectrum. This is caused by noise aliasing and it becomes severe due to lower temperature resolution in the sonic measurement.

Key words sonic anemometer-thermometer temperature fluctuation observation method