

山谷城市的近地层大气湍流谱特征^{*}

王 介 民

(中国科学院兰州高原大气物理研究所)

提 要

山谷城市地区的大气湍流结构研究至今报道很少。本文根据兰州市一次观测实验, 对各风速分量谱、温度谱以及动量和感热通量的协谱进行了分析。结果表明, 尽管仪器的安装高度较低(6.45 m), 湍谱特征仍与平坦均匀下垫面得到的一些典型结果基本一致, 从而认为, 在类似地区进行湍流量等的直接观测时, 对观测高度和地点的选择, 可以不必象一些文献要求的那样高。

关键词: 大气湍流; 湍谱结构; 山谷城市。

一、引 言

平坦均匀下垫面的大气湍流结构, 已经有许多实验和较为清楚的理论分析(如 Kaimal 等^[1, 2])。以速度谱为例, 一般认为, 垂直风速分量的谱遵从 Monin-Obukhov 相似理论, 只是在最低频部分可能显示逆温层高度 Z_i 的微弱影响。水平速度谱的含能区却受 Z_i 影响较大, 仅其高频部分适合 Monin-Obukhov 尺度化规律。Højstrup^[3] 据此提出的中性和不稳定层结下的湍流谱分布模式, 形式较为简单, 已经得到广泛的应用。复杂地形条件下的湍流结构, 近十年来也做过不少观测研究, 虽然随地形条件的不同谱的分布特征互有差异, 但仍有如下主要结论^[4]:

1. 较高频率的湍涡可以迅速适应局地条件而实现平衡; 均匀地形下谱的惯性副区的有关研究结果, 在此仍然适用。垂直速度谱的主要能量集中在较高频部分, 故其基本形状仍大致保持不变。

2. 水平速度分量谱, 其低频部分受上游地形特征的影响较大。稳定层结下, 由于重力波等因素的附加影响, 低频涡旋占有的能量有较明显的增加。

城市下垫面与低层大气间的动量、能量和水汽的交换, 城市大气污染物的输送与扩散, 显然都与边界层的湍流结构特征有密切关系, 可惜我们至今对此仍然了解很少。在一些大中城市(包括某些山区城市)尽管也做过一些大气边界层探测研究, 但城市建筑物对这些观测的影响, 适当的观测地点和高度的选择, 都还很不清楚; 也缺乏公认的理论或方法对有关观测数据的分析进行有力的指导。随着城市经济和人口发展的加快, 以及相应的大气环境问题的加剧, 城市大气湍流结构的研究, 自然更加引起微气

1990年2月13日收到, 4月18日收到修改稿。

^{*} 国家自然科学基金资助项目。

象学工作者的注意。最近, Roth 等^[5]根据温哥华的一次边界层实验, 研究了城市近郊区的风温谱。本文则是根据兰州这样一个典型的山谷城市中所进行的一次大气湍流观测实验, 通过有关风速分量谱、温度谱以及动量和感热通量协谱的特征研究, 了解 Monin-Obukhov 相似理论以及平坦均匀下垫面得到的湍谱研究结果在山区城市的适用性。

二、实验概况

有关实验观测, 作为“复杂地形条件下大气边界层和大气扩散试验和模式研究”计划的一个方面, 1989 年 1 月 10 日至 19 日在兰州市城区进行。这是一个宽度仅数公里, 建筑物和人口都相当密集的山谷城市, 实验场地选在市区中心一块约 $100\text{m} \times 150\text{m}$ 的平坦空地上。主要湍流探测仪器为一台超声风速温度计(海上电机 DAT-300 型), 并附有 $12\mu\text{m}$ 钨丝快速电阻温度计。安装高度为 6.45m。观测场及其附近还装有各种辐射仪以及一个系留气球探空系统。距超声风温计安装杆南边约 100 m 处有高约 18 m 的五层楼房; 东边(主导风向)约 42 m 处为高约 2.5 m 的围墙, 墙外近百米内以高度较低的平房为主, 更远处及观测点的其它方向都有平房或三至五层的建筑物分布。

按一般估算(如 Panofsky 和 Dutton^[6]), 实验点的动力粗糙度 Z_0 约为 0.6 m; 零平面位移高度 d 对零散分布的粗糙元近似取为与 Z_0 同高(皆指主导风向)。根据复杂地形下的某些观测和 Raupach 等^[7]的风洞试验结果, 这种情况下, 测量风温方差和协方差的最低高度 $Z \approx h + 1.5D$ (h 为粗糙元高度, D 为其平均间距)约为 30—50 m。显然本实验中超声等探测器的安装高度仍在近地层的粗糙子层以内, 气流受粗糙元尾流影响, 难以采用 Monin-Obukhov 相似理论进行近地层有关湍流通量的估算。这次实验的目的之一便是利用湍谱特征分析结果, 对这一结论试行验证。

实验期处于一个雪后的晴稳天气过程, 风速较小, 多为 1 m/s 上下。风温脉动量的采样频率为 10 Hz, 每次观测持续 60 分钟。超声风温计安装时注意对准主风向, 并仔细做了垂直度调整。有关湍流数据用一台 IBM PC 机采样和处理, 并将原始数据存在数据流磁带上。超声风速温度计测得的风脉动数据预先进行了探头阴影效应的修正, 再经过去趋势(最小二乘法)、坐标旋转等处理, 用涡旋相关方法计算各功率谱和协谱。后者的基本计算点数为 1024, 并分高频和低频两段分别进行; 合成所得谱的同频段部分重合很好^[8]。

本文分析时对各时次数据按风向在主导风向 $E \pm 45^\circ$ 以内和风速较大等条件进行了选择, 共得约 40 个时次, 实际上包括了昼夜各小时及各种稳定度情况。实验期近地层的大气稳定度绝大多数在 $-1.0 < Z/L < 0.1$ 范围内, 其算术平均值约为 -0.18 (L 为 Monin-Obukhov 长度)。由系留探空测得的大气边界层的第一层逆温高度 Z_i , 白天大多在 400 m 以下, 昼夜平均值约为 200 m。后者将应用在以后的模式计算中。

三、结果分析

1. 速度谱与温度谱

如上所述, 这次实验期的大气稳定度变化范围很窄。白天太阳辐射较弱(包括兰州

市上空大气中严重的烟尘等污染物的衰减作用), 层结多处于弱不稳定状态. 夜间则因城市地面和建筑物热源的作用, 也大部分处于近中性层结. 如将各时次的有关谱按稳定度 (Z/L) 分类, 也可看出一些依赖关系, 但这个关系很易被低频部分的离散性所掩盖, 在稳定度变化不大时变得较为模糊. 图 1 和图 2 给出本次实验中昼夜六个不同时刻的垂直速度谱和纵向速度谱. 其高频部分都有明显的惯性副区出现 (斜率 $-2/3$), 低频部分则在较宽的范围内离散混淆. 图中的纵坐标为 $nS(n)/\sigma^2$, 即将谱 $S(n)$ (n 为自然频率 Hz) 用相应的方差 σ^2 标准化; 横坐标 $f=nz/U$ 为习惯采用的无量纲频率.

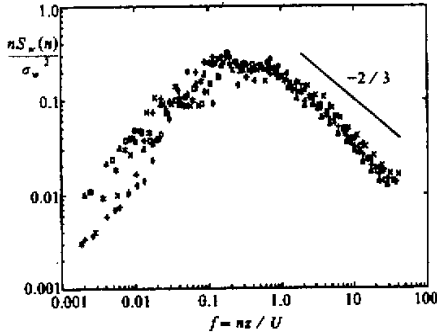


图 1 几个时次的垂直速度谱分布

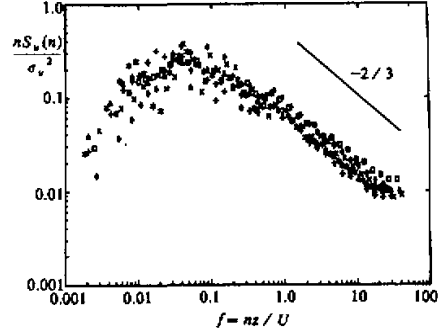


图 2 与图 1 同时次的纵向速度谱分布

为了更清楚地了解有关规律, 以下将求得的各种谱分别进行多时次的平均处理, 然后作图分析. 图 3 至图 5 即为这样得到的速度分量谱分布. 为便于与 Hojstrup 的谱模式比较, 这里的几个谱改用摩擦速度平方 (u_*^2) 标准化.

Hojstrup 模式将谱分为低频和高频两部分之和

$$S(n) = S_L(n) + S_H(n). \quad (1)$$

低频部分 S_L 对水平速度谱依赖于 $f_i = nz_i/U$ 和 z_i/L , 对垂直速度谱依赖于 $f = nz/U$ 和 z/L ; 高频部分 S_H 则只与 f 有关, 即

$$\frac{nSu(n)}{u_*^2} = \frac{0.5f_i}{1+2.2f_i^{5/3}} \left(\frac{z_i}{-L} \right)^{2/3} + \frac{105f}{(1+33f)^{5/3}}, \quad (2)$$

$$\frac{nSv(n)}{u_*^2} = \frac{0.32f_i}{1+1.1f_i^{5/3}} \left(\frac{z_i}{-L} \right)^{2/3} + \frac{17f}{(1+9.5f)^{5/3}}, \quad (3)$$

$$\frac{nSw(n)}{u_*^2} = \frac{32f}{(1+17f)^{5/3}} \left(\frac{z}{-L} \right)^{2/3} + \frac{2f}{1+5.3f^{5/3}}. \quad (4)$$

各图中分别画出了按以上模式算得的谱曲线 (实线). 计算时取平均值 $z/L = -0.18$, $z_i = 200$ m. 图 3 所示的 w 谱, 具有典型的分布形状, 与模式相比, 一致性很好. 但测量谱的峰值区域较为平坦, 大约在 $0.1 < f < 0.8$ 的范围内; 峰值频率 f_m 较难确定. 如取 $f_m = 0.2$, 则峰值波长即垂直方向的主导涡旋尺度 l_m 约为 30 m ($l_m = U/n_m = z/f_m$). 与模式相比, 图中的测量谱在 $f > 10$ 一段衰落加快, 至于 $f > 20$ 部分的上

翘则是由测量噪声造成的。

图 4 给出平均的纵向速度谱分布，与模式曲线相比，趋势基本符合，但含能最大一段出现了几个不大的下凹 ($f \approx 0.02, 0.4, 0.1$ 和 0.2)，峰值频率也较难确定。 u 谱的这一特性在相对平坦表面的近地层弱不稳定谱中也经常出现。Kaimal 等^[1]的谱图中不稳定部分相互混淆，近中性处甚至出现所谓的“排除区(excluded region)”，Højstrup 模式显示，由中性向不稳定的很小偏斜，便会引起低频能量的显著增大。本次实验资料多数处于这一稳定度区域，其平均结果会产生如图所示的谱的含能区的起伏形状。Panofsky 等^[4]曾指出，不稳定条件下，地形特征对纵向速度谱的形状的影响，相对来说并不重要。图 4 所示的测量谱与模式谱的一致性，说明这一结论对城市地区也是正确的。此外，由图 4 可见，如将这次实验的 u 谱的峰值频率取为峰值段的中间值约 0.03，则其主导涡旋尺度 l_m 约为 200 m，即约与逆温层厚度同大小。

横向速度谱分布绘在图 5 中。测量谱与模式谱比较，较低频部分的涡旋能量增加较多，且有明显的双峰出现。这一特征在其它一些研究中也多有报道。实验表明，不同时刻的 v 谱往往变化很大，特别是，本次测量中 z/z_i 较小，涡旋的切变生成和浮力生成在湍谱频率上的相互远离会更加明显。Højstrup 模式还未能体现 v 谱的这些特征。

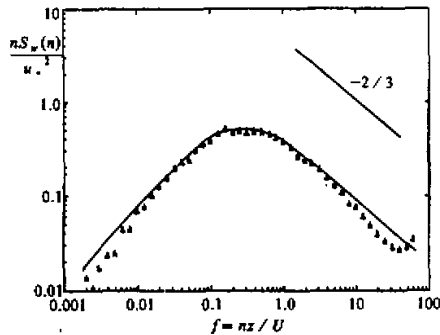


图 3 多次观测的平均垂直速度谱分布，实线为 Højstrup 模式

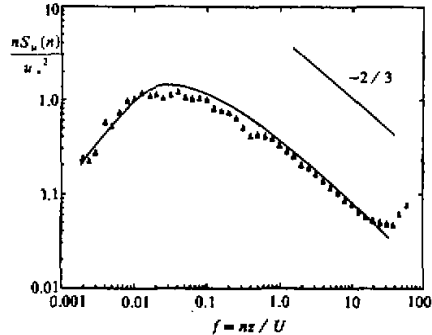


图 4 多次观测的平均纵向速度谱分布，实线为 Højstrup 模式

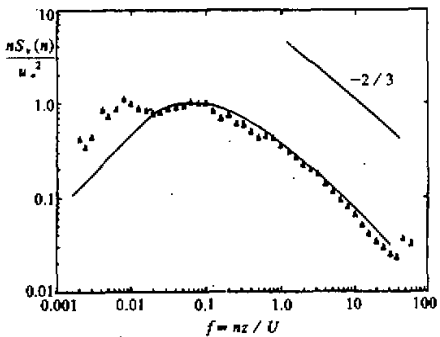


图 5 多次观测的平均横向速度谱分布，实线为 Højstrup 模式

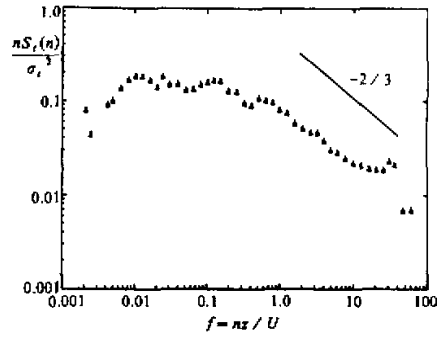


图 6 多次平均的温度谱分布

图 6 为多次观测平均的温度谱分布(用温度方差标准化), 其惯性副区仍有较明显的 $-2/3$ 斜率. 低频特性与 v 谱有些类似: 峰值较宽, 低频末端衰落很慢. 两个较明显的峰值分别出现在 $f=0.01$ 和 0.1 附近. 这些特征都和 Kaimal 等人的大致相同. Roth 等^[5] 的与图 6 相应的温度谱图在 $0.01 < f < 0.06$ 一段很平坦, 其它部分亦非常相似.

2. 动量与感热通量协谱

近地层的动量、感热和水汽等的垂直通量, 是研究城市微气象及建立城市边界层模式的重要参数. 风速的垂直分量 w 与水平分量以及温度湿度等变量的协谱特征研究, 有助于了解有关输送的涡旋尺度分配情况, 进而有助于确定这些通量的测量中所需要的频率响应和平均时间.

图 7 和图 8 分别表示本次实验中得到的 $\overline{u'w'}$ 和 $\overline{w'T'}$ 协谱. 与前述单个参量的功率谱相比, 其高频和低频两端的衰落都明显加快. 高频端(对 $\overline{u'w'}$ 当 $f > 0.2$ 时, 对 $\overline{w'T'}$ 当 $f > 0.7$ 时)呈现明显的惯性副区特征, 斜率很接近理论值 $(-4/3)$. 与动量通量的协谱相比, 感热通量协谱的峰值部分略宽些. 但两者的峰值频率皆约为 $f=0.1$, 与 Kaimal 等的结果一致. Panofsky 等^[6] 认为, 垂直速度与各种标量(包括 u)之间的协谱不应有明显差异. 这一结论对复杂地形城市地区似乎也是适用的. 图 7 和图 8 与 Roth 等^[5] 在温哥华得到的协谱分布非常相似. 根据后者的分析, 在进行动量和感热通量测量时, 平均时间取 30—40 分钟(相当于截止频率 $f_c=0.004-0.003$, 如图示, 此处谱已有较大的衰落)已经足够了, 而不必象以往认为的需要大约 60 分钟. 这一结果具有一定的实际意义.

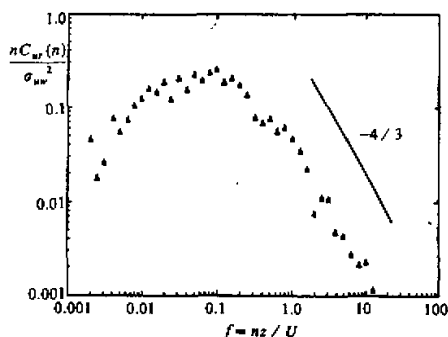


图 7 多次测量的平均动量通量协谱(用协方差标准化)

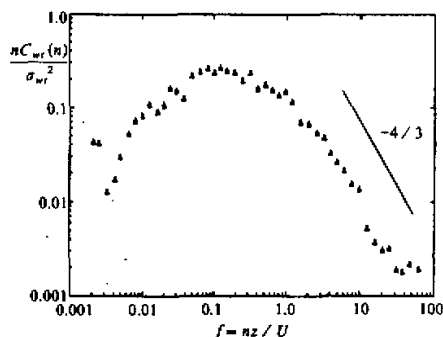


图 8 多次测量的平均感热通量协谱

四、结 论

山谷城市地区的大气湍流结构研究, 国内外至今报道较少. 本文试图通过兰州市冬季的一次近地层大气湍流观测, 分析风速分量谱、温度谱以及动量和感热通量的协谱, 以检验文献中平坦均匀或略有起伏地形上所得到的的一些结果在复杂地形城市地区的适用性. 观测中仪器的安装高度甚低于一些研究认可的高度, 即测量是在所谓的近地层

内的粗糙子层进行的。然而图 1 至图 8 所示的谱分析结果，却与以往文献报道的大多数结果相一致。Højstrup 关于中性和不稳定下的速度谱模式对复杂地形城区是基本适用的；动量和感热通量的协谱与 Panofsky 等的研究结果也很接近。本文以及 Roth 等关于城市郊区不稳定层结大气的有关结果，说明复杂地形城市地区的湍流谱结构与平坦地区相比并没有实质性的差异，对各有关通量的直接测量的地点和高度的要求，也不一定要象 Raupach 等的结论要求的那样高。本次观测位于大城市中心的一个略为空旷的地点，很可能周围离散的建筑物（或粗糙元，尽管有的比观测杆高很多）并不足以对湍流谱结构带来明显的影响。当然，实验谱和模式谱或较公认的参考谱之间还存在某些差异，如 v 谱的低频部分能量偏高，有些谱在高频端衰落偏快等，都还需要进一步研究。此外，这次实验期的大气稳定度变化范围甚窄，全面的比较和分析，还需要其它季节和天气情况下的更多观测实验结果；这是作者正准备加以实施的。

致谢：本所刘晓虎、邱 琪、贾 立、祁永强等同志参加了观测和资料处理，特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Cote, O.R., 1972, Spectral Characteristics of surface layer turbulence, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **98**, 563—589.
- [2] Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Haugen, D.A., Cote, O.R., Izumi, Y., Caughey, S.J. and Readings, C.J., 1976, Turbulence structure in the convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2152—2169.
- [3] Højstrup, J., 1981, A simple model for the adjustment of velocity spectra in unstable conditions downstream of an abrupt change in roughness and heat flux, *Boundary-Layer Meteor.*, **21**, 341—356.
- [4] Panofsky, H.A., Larko, D., Lipschutz, R., Stone, G., Bradley, E.F., Bowen, A.J. and Højstrup, J., 1982, Spectra of velocity components over complex terrain, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 215—230.
- [5] Roth, M., Oke, T.R. and Steyn, D.G., 1989, Velocity and temperature spectra in an unstable suburban atmosphere, *Boundary-Layer Meteor.*, **47**, 309—320.
- [6] Panofsky, H.A. and Dutton, J.A., 1984, *Atmospheric Turbulence*, John Wiley & Sons, New York.
- [7] Raupach, M.R., Thom, A.S. and Edward, I., 1980, A wind tunnel study of turbulence flow close to regularly arrayed rough surface, *Boundary-Layer Meteor.*, **16**, 467—486.
- [8] 王介民、刘晓虎、祁永强, 1990, 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究, *高原气象*, 第9卷, 第2期, 120—129.

The Spectral Characteristics of Atmospheric Turbulence in an Urban Area of Complex Terrain

Wang Jiemin

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

There are very few reports on the spectral characteristics of atmospheric turbulence in an urban area of complex terrain. This paper presents an observational study in Lanzhou City, analyses the spectra of velocity and temperature and the cospectra of momentum and heat flux. It is shown that even though the mounting height of the sensors was rather low (6.45 meters), the turbulence spectral characteristics still agree well with the results obtained under flat and uniform conditions. It concludes that the requirements for the site and height selection in the direct measurements of turbulence fluxes might not be so stringent as some authors mentioned.

Key words: Atmospheric turbulence; Turbulence spectral structure; Valley city.