

城郊大气近地面层湍流特征的初步研究

王立治 章小平 王晓晔 李德新 张越

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文对北京城郊近地面层的大气湍流特征做了初步的研究。结果表明,以局地稳定度参数 z/L_0 代替通常的 Monin-Obukhov 稳定度参数,对湍流的二阶矩以及谱和协谱的惯性副区特征而言,均匀近地面层湍流的相似理论可以推广到城郊近地面层湍流的情形,但谱和协谱的低频(含能区)特征发生显著的变化:含能区谱密度往往由许多尖峰构成;在某些低频范围上,湍流运动的垂直分量可能比水平分量强得多。在城郊近地面层中,湍流动能的产生与耗散基本上是平衡的。

一、引 言

大气和地面之间的强烈相互作用,通过动量、热量和水汽的湍流输送,和大气的大尺度运动联系了起来。研究大气近地面层湍流的结构既有理论意义也有实际价值。从四十年代苏联学者提出常通量层相似理论以来,关于均匀近地面层湍流已做过大量的研究工作。近年来,也出现了一些非均匀近地面层湍流的研究工作,作为相似理论对非均匀近地面层的推广,提出“局地 Monin-Obukhov 相似”假设^[1]。

本文分析了用 FA 超声风速-温度仪在北京气象塔附近测得的非均匀近地面层湍流数据,侧重于检验局地 Monin-Obukhov 相似性,对城郊近地面层的湍流特征做了初步的分析研究。

二、观测场地和仪器

本文分析的湍流测量数据是1983年3月9日—10日在北京市北郊325米气象塔附近取得的。在实验楼顶架设了一根10米高的桅杆,桅杆顶上装有一台超声风速-温度仪。实际测量高度约为20米。

测量点周围的地形很复杂,有小河、树木、民房、厂房及其它建筑。测量点周围约1公里内没有比20米高的障碍物。

测量中使用的FA超声风速-温度仪,其测风分辨率为0.01米/秒,超声温度仪响应的是声虚温 $T_{vs} = T \left(1 + 0.32 \frac{e}{p} \right)$,式中 T 为气温($^{\circ}\text{K}$), p 和 e 分别为大气压力和水汽压

力(mb)。因为没有气温和水汽的测量,我们假定水汽脉动对温度脉动的影响可以忽略不计*。

三、数据处理方法

在湍流测量期间,我们用快速纸带穿孔机将超声风速-温度仪的数字化输出记录在纸带上,然后在 TQ-6 机上进行了数据处理和计算。

受纸带长度的限制,在选择测量方案时对取样速率和样本大小采取折衷:选择取样速率为 2 周/秒,样本大小为 2125 (测量持续时间约为 18 分钟)。

应当指出,FA 超声风速-温度仪的温度输出是“指示值”,实际上是垂直方向上相向传播的声波传播时间之和。为把指示温度转换为实际温度,并考虑温度变化对测风的影响,以及风速变化对温度的影响,数据处理过程中按下列步骤进行了订正:

1. 温度的非线性订正: 设在某一参考状况下指示温度为 T_{in}^* , 实际温度为 T^* , 则任一状况下温度

$$T = T^*(T_{in}^*/T_{in})^2, \quad (1)$$

式中 T_{in} 为指示温度。

2. 风速的温度订正: 任一状况下实际风速

$$V = V_{in}(T/T^*) = V_{in}(T_{in}^*/T_{in})^2, \quad (2)$$

式中 V_{in} 为指示风速。

3. 温度的风速订正: 设风速仪的声程长为 l (米), 填充频率为 f (周/秒), 风矢量沿声程方向的分量为 V_l (米/秒), 令 $\beta = (2lf/T_{in})^2$, 则

$$T = (2V^2 + \beta + \sqrt{4\beta V^2 + \beta^2})/805.28, \quad (3)$$

式中 V 为风矢量的大小(米/秒)。

为提高数据序列的平稳性,在数据处理过程中用二次曲线拟合法消除了数据序列中的缓变分量,并用积分对应的谱或协谱的方法计算了各有关变量的方差或协方差。谱和交叉谱的估计是用 FFT 方法进行的。只要谱的频率分辨率够用,总是在适当的对数等间隔的频率上给出谱和交叉谱的估计,以提高谱估计的稳定性。为减低折频效应对谱分析的影响,在作谱估计前用数字滤波法对数据进行了低通滤波,并对数据采用余弦窗函数消除有限取样对谱估计的影响。

四、结果和讨论

表 1 中给出这次湍流观测得到的测量数据。

按照 Monin-Obukhov 相似理论,当考虑的运动尺度比耗散尺度大得多时,均匀近地面层中无因次统计特征量可表为稳定度参数 z/L 的函数,这里

$$L = u_*^2 \bar{T} / \kappa g T_*, \quad (4)$$

* 对本文所讨论的情况, $P'/\bar{P} \ll 1$, $T'/\bar{T} \ll 1$, 所以水汽脉动引起的温度脉动近似为 $0.32(e'/\bar{P})\bar{T}$, 对于 $e' \sim 0.5$ mb, 水汽脉动引起的温度脉动约为 0.05°C 。

表 1 湍流测量得到的数据

No.	日期	时间	U	ϕ	z	σ_u	σ_v	σ_w	σ_T	σ_ϕ	σ_θ	u_{*i}	T_{*i}	z/L_i
1	83.3.9	10:15	1.21	22	2.1	0.341	0.256	0.222	0.267	17.0	14.5	0.136	-0.276	-4.3
2		11:05	1.16	24	3.6	0.288	0.359	0.225	0.308	18.5	11.5	0.118	-0.204	-4.3
3		11:45	0.382	32	5.0	0.296	0.312	0.191	0.315	69.8	22.2	0.046	-0.649	-87.4
4		13:00	1.05	157	7.5	0.332	0.243	0.227	0.248	19.3	14.5	0.083	-0.362	-14.9
5		14:05	1.13	163	8.8	0.262	0.363	0.252	0.315	16.3	11.2	0.106	-0.452	-11.4
6		21:00	1.13	220	7.4	0.150	0.146	0.104	0.078	7.6	5.5	0.053	0.044	4.6
7		22:00	1.45	313	6.2	0.244	0.156	0.150	0.163	6.4	6.3	0.065	0.112	7.6
8	83.3.10	02:05	0.377	350	3.5	0.100	0.077	0.045	0.050	11.9	7.7	0.050	0.006	0.70

注: U 为平均风速, ϕ 为平均风向, σ_u , σ_v , σ_w , σ_T , σ_ϕ 和 σ_θ 分别为纵向、横向和垂直风速脉动标准差, 温度脉动标准差及水平和垂直风向脉动标准差, $u_{*i} = \sqrt{|\overline{-uw}|}$ 为局地摩擦速度, $T_{*i} = (-\overline{wT})/u_{*i}$ 为局地温度尺度, z/L_i 为局地稳定度参数; 风速单位为米/秒, 风向单位为度, 温度单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

式中 κ 为卡曼常数, L 为 Monin-Obukhov 长度。

对本文所考虑的非均匀近地面层, 直接引用常通量层的上述结果是不可能的, 但它给我们的启发是, 引进局地 Monin-Obukhov 长度^[1]

$$L_i = u_{*i}^2 \bar{T} / (\kappa g T_{*i}), \quad (4')$$

并把稳定度参数定义为 z/L_i (即局地稳定度参数), 如果运动满足局地 Monin-Obukhov 相似性, 则有关的无因次特征量可表为 z/L_i 的函数。文献[1]的作者研究了近中性层结下城市大气中湍流的局地相似性。本文试图分析非绝热条件下城郊近地面层湍流的局地相似性问题。

1. 湍流的二阶矩 首先我们就测量得到的城郊近地面层湍流二阶矩讨论局地相似性问题。我们分析了不稳定条件下无因次垂直风速脉动标准差 σ_w/u_{*i} 和温度脉动标准差 $\sigma_T/(-T_{*i})$ 与局地稳定度参数 $-z/L_i$ 的关系。按 Wyngaard 和 Coté^[2], 在不稳定条件下的均匀近地面层中有

$$\sigma_w/u_* \propto (-z/L)^{1/3}, \quad (5)$$

$$\sigma_T/(-T_*) \propto (-z/L)^{-1/3}. \quad (6)$$

对城郊近地面层情形, 以局地速度尺度 u_{*i} 代替 u_* , 以局地温度尺度 T_{*i} 代替 T_* , 并以局地稳定度参数 z/L_i 代替 z/L , 所得到的结果绘于图 1。不难看出, 均匀近地面层中的这些 $1/3$ 规律和 $-1/3$ 规律在城郊近地面层情形下也是成立的。

2. 湍流谱 现在我们讨论城郊近地面层风速、风向和温度谱的某些特征。对应的谱的定义是

$$\int_0^\infty F_\alpha(n) dn = \sigma_\alpha^2, \quad (7)$$

这里 $\alpha = u, v, w, T, \phi$ 和 θ (分别表示纵向、横

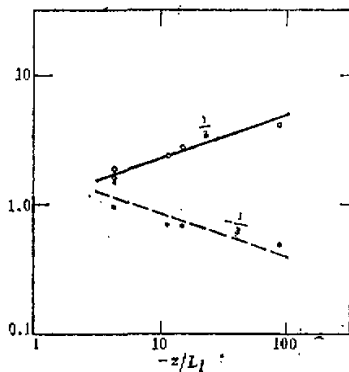


图 1 不稳定条件下垂直风速和温度脉动的无因次标准差与局地稳定度参数的关系。

实线: $\sigma_w/u_{*i} \approx 1.05(-z/L_i)^{1/3}$

虚线: $\sigma_T/(-T_{*i}) \approx 1.86(-z/L_i)^{-1/3}$

向和垂直风速分量、温度、水平风向和垂直风向), n 为频率(周/秒).

按 Kolmogorov 相似理论, 风速(以纵向风速为例)和温度谱的惯性副区形式为

$$nF_u(n) = \alpha_1 \varepsilon^{2/3} (U/2\pi)^{2/3} n^{-2/3}, \quad (8)$$

$$nF_T(n) = \beta_1 N \varepsilon^{-1/3} (U/2\pi)^{1/3} n^{-2/3}, \quad (9)$$

其中 α_1 和 β_1 分别是风速和温度谱的 Kolmogorov 常数, ε 是湍流动能耗散率, N 是温度方差的耗散率. 作为例子, 图 2 给出由第五次测量得到的纵向风速、垂直风速、温度和水平风向的谱. 不难看出, 在城郊近地面层情形下, 惯性副区谱的 $-\frac{2}{3}$ 次方规律是存在的, 即 Kolmogorov 相似理论是适用的.

对于各向同性湍流, 垂直风速谱与水平风速谱之比为 4/3, 图 3 给出的是由第二次测量得到的结果. 由图可见在高频区上, 上述比值接近 4/3. 这表明对城郊近地面层来说, Kolmogorov 局地各向同性湍流基本上是存在的.

按均匀近地面层研究的惯例, 我们引进无因次频率 $f = n\pi/U$, 无因次动能耗散率 $\phi_\varepsilon = \kappa z \varepsilon / u_*^3$ 和无因次温度方差耗散率 $\phi_N = \kappa z N / (u_* T_*^2)$, 由(8)和(9)得到

$$\frac{nF_u(n)}{u_*^3 \phi_\varepsilon^{2/3}} = \frac{\alpha_1}{(2\pi\kappa)^{2/3}} f^{-2/3}, \quad (10)$$

$$\frac{nF_T(n)}{T_*^2 \phi_\varepsilon^{-1/3} \phi_N} = \frac{\beta_1}{(2\pi\kappa)^{2/3}} f^{-2/3}. \quad (11)$$

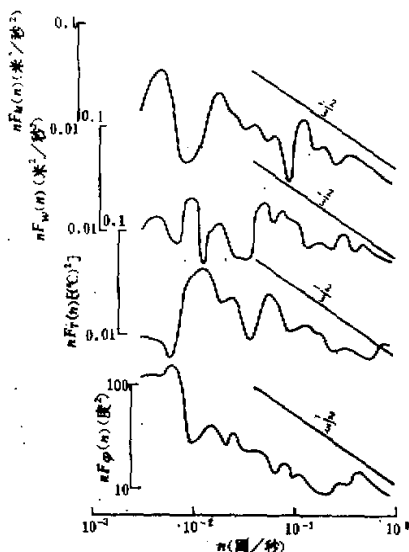


图 2 纵向风速谱、垂直风速谱、温度谱和水平风向谱(第五次测量: 1983年3月9日14:05)

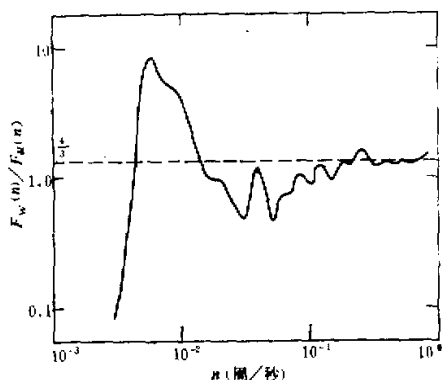


图 3 垂直风速谱与水平风速谱之比(第二次测量: 1983年3月9日11:05)

(10)式和(11)式表明, 无因次风速和温度谱在惯性副区范围内和稳定度参数 z/L_t 无关. 为了求无因次谱, 我们先用风速和温度谱在惯性区上的估计值按下列公式求湍流动能和温度方差的耗散率:

$$\varepsilon = (2\pi/U) [n^{5/3} F_u(n) / \alpha_1]^{3/2}, \quad (12)$$

$$N = (2\pi/U)^{2/3} \varepsilon^{1/3} [n^{5/3} F_T(n) / \beta_1]. \quad (13)$$

在这里, 我们取 $\alpha_1 = 0.59$, $\beta_1 = 0.68^{[3]}$. 然后求出相应的无因次耗散率 ϕ_ε 和 ϕ_N (表 2). 分析表明, 按(10)式和(11)式得到的无因次化风速和温度谱在惯性副区上基本各自归并

表 2 湍流动能耗散率和温度方差耗散率 [ϵ : 米²/秒³, N : (°K)²/秒]

No.	ϵ	N	ϕ_ϵ	ϕ_N	z/L_t
1	6.82×10^{-4}	6.69×10^{-4}	2.2	0.53	-4.3
2	1.59×10^{-3}	3.27×10^{-3}	7.9	5.5	-4.3
3	1.60×10^{-3}	4.42×10^{-3}	135	1.9	-87.4
4	8.86×10^{-4}	1.91×10^{-3}	12.8	1.4	-14.9
5	1.58×10^{-3}	1.88×10^{-3}	10.9	0.71	-11.4
6	2.45×10^{-4}	1.58×10^{-4}	13.5	12.6	4.6
7	1.05×10^{-3}	4.90×10^{-4}	31.4	4.9	7.6
8	2.35×10^{-3}	3.80×10^{-3}	1.5	173	0.70

为一条曲线。因此,在城郊近地面层情况下,对湍流谱的惯性副区特性来说,局地 Monin-Obukhov 相似性是成立的。

但是,城郊近地面层湍流谱的低频(含能区)行为和均匀近地面层情形很不相同。由图 2 可见,含能区谱密度变化很显著,或者说含能区谱密度往往由许多尖峰构成。图 3 显示了湍流低频分量的另一个特点,即在某些低频范围上,垂直风速脉动比水平风速脉动强得多,显然,这是由下垫面的非均匀性造成的。在均匀近地面层情形下,由于地面限制了垂直湍流大涡旋的发展,垂直风速脉动的低频分量比水平风速脉动的低频分量小得多。

现在简单讨论一下城郊近地面层中湍流的产生和耗散的关系。在均匀近地面层中,湍流动能的产生与耗散基本上是平衡的。对城郊近地面层情形,如果假定产生与耗散也是平衡的,则在局地相似性的前提下,我们有

$$\phi_m - z/L_t - \phi_\epsilon = 0 \quad (14)$$

这里 ϕ_m 是局地无因次风切变

$$\phi_m = \frac{\kappa z}{u_*^2} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)_t \quad (15)$$

推广均匀近地面层无因次风切变的形式。我们取^[2]

$$\phi_m = \begin{cases} (1 - 16z/L_t)^{-1/4}, & z/L_t \leq 0, \\ 1 + 5z/L_t, & z/L_t \geq 0. \end{cases} \quad (16)$$

于是,按上述假定我们得到

$$\phi_\epsilon = \begin{cases} (1 - 16z/L_t)^{-1/4} - z/L_t, & z/L_t \leq 0, \\ 1 + 4z/L_t, & z/L_t \geq 0. \end{cases} \quad (17)$$

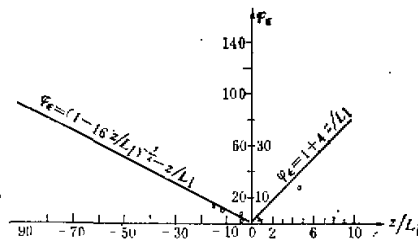


图 4 无因次湍流动能耗散率与局地稳定度参数的关系。

我们在图 4 中给出 ϕ_s 的测量值和按 (17) 式得到的理论值的比较。由图 4 可见测量值和理论值符合相当好。因此, 可以认为, 在城郊近地面层中湍流动能的产生与耗散基本上也是平衡的。同时, 上述分析本身也反映了局地相似性是成立的。

3. 湍流的协谱和相干 这里我们主要讨论城郊近地面层局地动量通量 $(-\overline{uw})_l$ 和局地热通量 $(\overline{wT})_l$ 的协谱特征。协谱的定义是:

$$\int_0^\infty F_{-uw}(n)dn = (-\overline{uw})_l, \quad (18)$$

$$\int_0^\infty F_{wT}(n)dn = (\overline{wT})_l. \quad (19)$$

分析表明, 在测量的频率范围内, 一般包括了对协谱有主要贡献的含能区。协谱的含能区是由若干尖峰组成的, 这和均匀近地面层的情形显著不同。

相干的定义是:

$$\text{Coh}_{\alpha\beta}(n) = \frac{F_{\alpha\beta}^2(n) + Q_{\alpha\beta}^2(n)}{F_\alpha(n)F_\beta(n)}, \quad (20)$$

其中 $Q_{\alpha\beta}(n)$ 是正交谱。我们主要分析纵向和垂直风速分量的相干以及垂直速度和温度的相干, 即 $\alpha\beta = uw, wT$ 。按 Wyngaard 等人的分析^[4], 对于均匀近地面层的惯性副区, 有:

$$\text{Coh}_{uw}(f) = \zeta_1^2 \phi_m^2 \phi_s^{-2/3} f^{-4/3}, \quad (21)$$

$$\text{Coh}_{wT}(f) = 0.7 \gamma_1^2 \phi_s^{1/3} \phi_h f^{-4/3}, \quad (22)$$

式中 ζ_1 和 γ_1 分别为协谱常数, $\phi_h = \frac{\kappa z}{T_*} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$ 为无因次温度梯度。对于极稳定的情况, $\zeta_1 \approx 0.12, \gamma_1 \approx 0.20$ 。

我们在图 5 中给出测量得到的相干的实例。由图可见, 对城郊近地面层大气, 惯性副区上相干性的一 4/3 次方律基本上是存在的。为检验惯性副区上相干的局地相似性, 我们推广 Dyer^[12] 推荐的下述公式:

$$\phi_h = \phi_m = 1 + 5z/L, \quad z/L > 0, \quad (23)$$

把局地无因次风速和温度梯度取为

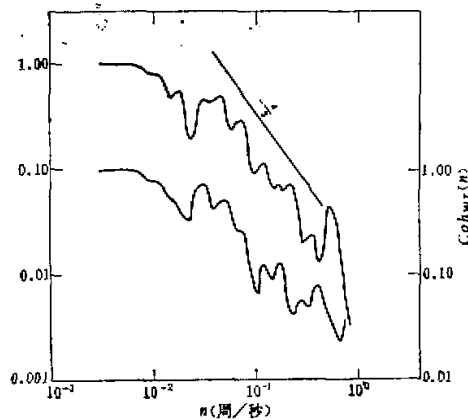


图 5 uw 相干和 wT 相干(第六次测量, 1983 年 3 月 9 日, 21:00)

$$\phi_m = \phi_h = \frac{\pi z}{T_{*i}} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)_i = 1 + 5z/L_i. \quad (24)$$

我们从图 5 可以看到, 对这次测量的相干, 在惯性副区上 $\text{Coh}_{uw}(n) \simeq \text{Coh}_{wT}(n)$ 。所以, 为满足局地相似, 应要求(21)和(22)式右端的系数彼此相等。用 ϕ_s 和 z/L_i 的实测值以及(24)式给出的 ϕ_m 和 ϕ_h , 得到这两个系数分别为 1.5 和 1.6。所以对惯性副区上的相干性来说, 局地 Monin-Obukhov 相似性也是存在的。

五、结 论

至少在不稳定条件下, 城郊近地面层湍流的二阶矩, 在用局地速度尺度 u_{*i} 和局地温度尺度 T_{*i} 进行适当的无因次化后, 能够满足局地 Monin-Obukhov 相似性, 垂直风速和温度脉动的无因次标准差 σ_w/u_{*i} 和 $\sigma_T/(-T_{*i})$ 满足与均匀近地面层情形相同的 $1/3$ 和 $-1/3$ 次方律。

城郊近地面层湍流的谱和协谱基本上满足 Kolmogorov 相似理论: 存在惯性副区以及能谱的 $-2/3$ 次方律和相干的 $-4/3$ 次方律; 湍流接近于局地各向同性。惯性副区上的谱和协谱, 当以 u_{*i} 和 T_{*i} 进行适当的无因次化后, 满足局地 Monin-Obukhov 相似性。

总之, 以局地稳定度参数 z/L_i 代替通常的 Monin-Obukhov 参数 z/L , 均匀近地面层的相似理论可以推广到城郊非均匀近地面层的情形。

在城郊近地面层中, 湍流动能的产生和耗散接近于平衡。谱和协谱的低频(含能区)特征和均匀近地面层情形大不相同: 含能区的谱密度由许多尖峰构成, 垂直湍流的某些低频成分比水平湍流的低频成分大得多。

在湍流测量期间, 国营向东机械厂吴国庆、刘明义、熊瑞来和张玉如等同志曾给我们大力协助, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] Högström, U., Bergström, H. and Alexanderson, H., Turbulence Characteristics in a Near Neutral-ly Stratified Urban Atmosphere, *Boundary-Layer Meteorology*, **23**, 449—472, 1982.
- [2] Wyngaard, J. C., and Coté, O. R., Local Free Convection, Similarity, and The Budgets of Shear Stress and Heat Flux, *J. A. S.*, **28**, 1171—1182, 1971.
- [3] Dyer, A. J., and Hicks, B. B., Kolmogoroff Constants at The 1976 ITCE, *Boundary-Layer Meteorology*, **22**, 137—150, 1982.
- [4] Wyngaard, J. C. and Coté, O. R., Cospectra Similarity in The Atmospheric Surface Layer, *Q. J. R. M. S.*, **98**, 590—603, 1972.
- [5] Dyer, A. J., A Review of Flux-Profile Relationship, *Boundary-Layer Meteorology*, **7**, 363—372, 1974.

A PRELIMINARY STUDY OF THE TURBULENT CHARACTERISTICS IN A SUBURBAN ATMOSPHERIC SURFACE LAYER

Wang Lizhi Zhang Xiaoping Wang Xiaoxi Li Dexin Zhang Yue

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

The turbulent characteristics in the atmospheric surface layer over Beijing suburb are preliminarily studied in this paper. The results show that similarity theory of the atmospheric surface layer over a horizontally uniform site can be extended to the case of the suburban atmospheric surface layer through replacing the normal Monin-Obukhov stability parameter by a local stability parameter z/L_1 , as far as second moments and inertial subrange spectra and cospectra of turbulence are concerned. However, it would lead to remarkable changes occurring in the characteristics of spectra and cospectra over the low-frequency (energy-containing) range, i.e. spectral densities tend to be composed of several peaks, and vertical components of turbulent motion may be much more vigorous than horizontal ones. In the suburban surface layer, the production rate of turbulent kinetic energy is essentially balanced by the dissipation rate.