

北京市郊区及城区边缘的大气 湍流结构特征*

张靄琛 吕杰
张兵 刘树华

(北京大学地球物理系)

提 要

为了比较城市边缘地区和郊区大气边界层中湍流结构的差异,本文分析了1986年春、夏两季在北京市城市边缘地区和郊区两处大气湍流观测结果。结果表明,由于城市边缘地区的下垫表面具有较高数值的粗糙度,使其近地面层大气受到较强的动力影响,在其湍流速度分量谱曲线;无量纲化湍流速度分量标准偏差, σ_u / u_* , σ_v / u_* 和 σ_w / u_* ;以及无量纲化湍流耗散率 φ_ϵ 等湍流特征量在近中性层结条件下显示出与大气稳定度的关系比较微弱。

关键词: 大气湍流; 大气边界层; 湍流谱分析; 湍流脉动方差。

一、引 言

大气湍流结构与大气边界层的热力和动力状况有关,本文分析了北京市郊区和城市边缘地区近地面层中的湍流测量资料,其中选择了中国科学院地理研究所大屯实验站(后文简称大屯)代表郊区农田上空的例子,以及大气物理研究所德胜门外气象铁塔(后文简称铁塔)代表城区边缘地区上空的例子。

60年代以来,大量的观测结果使我们对小粗糙度平坦地区的边界层结构有了系统的了解,Panofsky 和 Dutton^[1] 的著作做了系统的介绍,本文大屯的观测结果也对一些主要结论作了对比。

下垫表面起伏较大的地区上空,例如山丘和丘陵地区,森林和防护林带,以及城市上空等情况,研究这些地区上空的大气湍流结构,近年来开始成为有兴趣的研究对象,得到一些有启发性的结果,例如 Kaimal^[2] 等人在波尔得丘陵地区,指出地形对湍流谱的低频扰动可使其峰值产生位移, Thompson^[3] 在松林上空的观测结果证实其谱曲线的峰值区比平坦下垫表面的情况要窄, McBean^[4] 在森林冠层的观测也得到类似的结论。Godowitch^[5] 在圣路易的结果恰好相反,证明城区上空的峰值谱区仅宽于附近郊区的情况。Bradley^[6] 在堪培拉黑山的结果,以及 Panofsky 等人^[7] 总结的资料则是属于另一类情况,代表气流从上游一种下垫表面进入一个新的下垫表面上空后,其湍流谱的高频段能较快地适应下游的边界条件,达到新的平衡,而其低频段则仍保留其上游谱曲线的特征。

1989年4月26日收到,11月7日收到修改稿。

* 本文为“北京市城近郊区大气污染预测预报及其应用”研究课题的成果之一。

本文主要的研究目的为: 在高粗糙度下垫表面上空, 其湍流谱的特征与大气稳定度的关系, 它们将与平坦地区上空有何不同?

二、场地和获取资料的细节

铁塔和大屯皆位于北京北郊德胜门外, 铁塔在北三环路以北 1km 处, 以铁塔为中心 1km 范围内无高度超过 20 m 的建筑物, 只在三环路以南有 50 m 以上的建筑物. 大屯位于北三环路以北 5km 外, 观测场地是一片大范围的冬小麦农田, 仪器安置在麦田的北缘, 使偏南来向的气流有足够长的距离以适应其下垫表面. 在 1km 的范围内无高度超过一层以上的建筑, 只在仪器架设处的西北方向有几间高度不超过 4 m 的观测室.

铁塔上风速和温度廓线测量仪器的安装高度为 9, 15, 32, 47, 65, 80, 103, 120, 140, 160, 180, 200, 240, 280 和 320m. 为避免塔身对测风仪器的干扰, 在同一高度上分别向 NW 和 SE 两个方向架设了风杯风速计. 视当时的风向选择其中一台迎风仪器的读数, 测量湍流的超声风速温度仪架设在 47m 高处, 为日本海上电机生产的 DAT-300 型, 在一定的风速量程中, 将输出模拟信号标准化为 $\pm 1V$ 的直流电压, 其 u_x , u_y , u_z 和 T 的输出信号连续记录在模拟磁带上, 当信号幅度明显低于 $\pm 1V$ 时, 可利用磁带机内的直流放大器对它们进行乘 2 和乘 5 倍的放大.

在 1986 年 7 月进行了 20 天的观测工作, 由于当时研究的主要目标是大气混合层发展模式, 因而所取的资料多集中于晴天中、小风速的天气条件.

大屯的仪器安装高度较低, 风速廓线测量的风杯风速计架设在 1.1, 1.3, 1.5, 1.9, 2.3 和 2.8 m 高处, 测量仪器则设置在 0.5, 0.73, 0.88, 1.32, 1.48 和 2.2m 高处. 观测时期小麦植株高度为 0.7 至 0.9m. 经推算, 其空气动力学零值位移 d^0 平均可取作 0.67m, 观测工作从 1986 年 5 月 8 日开始到 6 月 4 日结束.

三、大气湍流观测资料的处理

根据当时资料的采样长度, 大屯和铁塔分别采取了两种读数格式.

铁塔的湍流资料每 0.048s 分别对 u_x , u_y , u_z 和 T 进行一次采样, 连续读 10 个读数后进行平均, 作为一次读数存入计算机, 每个要素各取 4096 个读数, 采样总长 32min 46s.

大屯的资料每 0.08s 采样一次, 10 次连续采样平均后存入计算机作为一次读数, 每个要素各取 8192 个读数, 采样总长 109min 13.6s.

原始资料依下列步骤进行处理:

1. 由每对 u_x 和 u_y 计算出瞬时风速模值和瞬时风向.
2. 对风速模值和风向时间变化序列用二次曲线拟合出其平均的时间变化趋势, 从二次曲线上各时刻的读数与实测瞬时值比较, 得到水平风速和风向的脉动值.
3. 将坐标系 x 轴调整到水平风速模值方向, 计算出气流的纵向和横向脉动量 u' 和 v' , 垂直风速脉动值 w' 则直接从 u_z 的读数序列中得到, 温度脉动值 T' 同样需要先拟合出平均温度的趋势变化, 再从趋势变化曲线上各时刻的读数与瞬时值比较后得到.
4. 计算 u' , v' , w' 和 T' 的均方根值, 摩擦速度 $u_*^2 = -\overline{u'w'}$, 特征温度 θ^*

以及莫宁-奥布霍夫长度 L 等湍流统计特征量。

5. 根据上述结果,对资料进行筛选(其标准将在后文中讨论),然后对各湍流量的时间序列进行谱分析,资料清单如表 1。

6. 对数据序列进行野点和数字滤波的预处理后,用 FFT 计算出各湍流脉动量的能谱曲线。

7. 在对能谱曲线的坐标进行无量纲化归一时,涉及到无量纲湍能耗散率 φ_ϵ 和无量纲温度脉动耗散率 φ_N 两个重要的参数。

$$\varphi_\epsilon = \kappa z \epsilon / u^3,$$

$$\varphi_N = \kappa z N_\theta / u^3,$$

其中 $\kappa=0.40$ 为卡曼常数, ϵ 为湍能耗散率, N_θ 为温度脉动耗散率。当湍流脉动分量适合局地各向同性规律时,在湍谱的惯性区间下述关系成立。

$$n S_u(n) / u^2 = \alpha_1 / (2\pi\kappa)^{\frac{2}{3}} \cdot \varphi_\epsilon^{2/3} f^{-2/3}, \quad (1)$$

$$n S_\theta(n) / \theta^2 = \beta_1 / (2\pi\kappa)^{\frac{2}{3}} \cdot \varphi_N \cdot \varphi_\epsilon^{-1/3} f^{-2/3}, \quad (2)$$

其中 α_1 取值 0.50, β_1 取值 0.80^[8]。因而只需将能谱曲线纵坐标取作 $n S(n)$, 横坐标取作无量纲频率 $f = nz / \bar{u}$, 则可在谱曲线的惯性区间拟合出 φ_ϵ 和 φ_N 的数值。公式(1)和(2)中的 $S(n)$ 为湍流能谱密度, n 为频率, $\bar{u}$ 为平均风速以及 z 为高度。

四、结果分析

首先,对表 1 的资料进行选择,剔除一些可靠性较差的数据组,标准如下:

1. 平均风速低于 1.5m/s 者;
2. 野点数目超过数据组样本总数 0.5% 以上者;
3. 垂直平均风速偏离零值达到水平风速 0.5% 以上者;
4. 日出和日落时段非正常条件下的资料;
5. 某些湍流特征量明显不合理的资料,例如其中的 u^2 得出负值。

资料中的温度脉动谱一般不太理想,超声风速温度仪的测温灵敏度为 0.2V/℃,对于绝大多数的情况,温度脉动的标准差低于 ± 0.2 ℃,因而其谱曲线的计算误差较大,本文中因此没能给出它的一些结果。经过筛选后的结果讨论如下:

大屯资料的采样总长较长,其能谱曲线覆盖的频率范围超过了 3 个数量级,其 u' , v' 和 w' 的湍流能谱如图 1 所示。

图中的坐标采用了其他作者常用的形式,纵坐标为 $n \cdot S(n) / \varphi_\epsilon^{2/3} \cdot u^2$, 横坐标为 $f = nz / \bar{u}$ 。两个坐标轴均取作对数尺度。

对于满足局地各向同性的湍流谱其惯性区间应满足 $S(n) \sim f^{-5/3}$ 的规律,相当于在上述坐标系中满足 $n \cdot S(n) \sim f^{-2/3}$ 的规律。综观图 1 各曲线的高频段,这一点得到了证实,随着稳定度的增加,谱曲线适合惯性区间的范围逐渐减小,当 $\zeta = +1.48$ ($\zeta = z/L$) 时, f 达到 4 之前的 v' 和 w' 谱曲线斜率仍然大于 $-2/3$,而当 f 超过 6.3 之后,由于仪器和计算误差而在作图时截去。因而,在极端稳定条件下,谱曲线适合惯

表 1 实验资料清单

大气所气象铁塔						
组 号	日 期	时 间	$\bar{u}$	ζ	u_*^2	θ_*
As 01	1986 / 07 / 09	09:15	2.05	-0.1784×10^1	0.1023×10^0	-0.2373×10^0
As 02	1986 / 07 / 09	10:15	1.72	-0.1794×10^1	0.9174×10^{-1}	-0.2654×10^0
As 03	1986 / 07 / 09	11:00	2.18	-0.2394×10^1	0.8786×10^{-1}	-0.3400×10^0
As 04	1986 / 07 / 09	12:30	2.48	-0.9975×10^0	0.8597×10^{-1}	-0.1389×10^0
As 08	1986 / 07 / 11	09:00	3.13	-0.6832×10^0	0.9564×10^{-1}	-0.1058×10^0
As 09	1986 / 07 / 11	11:00	2.74	-0.9366×10^1	0.3299×10^{-1}	-0.5054×10^0
As 10	1986 / 07 / 11	12:00	2.07	-0.1012×10^2	0.3689×10^{-1}	-0.6119×10^0
As 11	1986 / 07 / 11	12:50	2.25	-0.2058×10^1	0.1244×10^0	-0.4210×10^0
As 15	1986 / 07 / 12	07:55	2.69	-0.3216×10^0	0.1037×10^{-1}	-0.5118×10^{-2}
As 16	1986 / 07 / 12	10:00	1.72	-0.3367×10^1	0.1954×10^{-1}	-0.1065×10^0
As 24	1986 / 07 / 15	07:50	2.18	-0.3761×10^0	0.5999×10^{-1}	-0.3637×10^{-1}
As 26	1986 / 07 / 15	10:00	2.11	-0.2395×10	0.7425×10^{-1}	-0.2899×10^0
As 27	1986 / 07 / 15	11:00	2.09	-0.1696×10^2	0.2522×10^{-1}	-0.6933×10^0
As 29	1986 / 07 / 17	08:00	1.56	-0.8318×10^0	0.3759×10^{-1}	-0.5029×10^{-1}
As 32	1986 / 07 / 17	15:30	1.54	-0.1867×10^2	0.2153×10^{-1}	-0.6646×10^0

地理所大屯实验站

G 01	1986 / 05 / 09	08:00	4.29	-0.5161×10^{-1}	0.1144×10^0	-0.2190×10^0
G 02	1986 / 05 / 09	10:00	3.91	-0.3012×10^{-1}	0.2277×10^0	-0.2507×10^0
G 03	1986 / 05 / 09	12:00	3.84	-0.2426×10^{-1}	0.1554×10^0	-0.1404×10^0
G 04	1986 / 05 / 09	14:00	3.58	-0.4826×10^{-1}	0.1251×10^0	-0.2264×10^0
G 05	1986 / 05 / 09	16:00	4.21	-0.1499×10^{-1}	0.2313×10^0	-0.1299×10^0
G 08	1986 / 05 / 11	12:00	1.09	-0.5520×10^0	0.2337×10^{-1}	-0.4760×10^0
G 09	1986 / 05 / 11	14:30	1.96	-0.4614×10^{-1}	0.9504×10^{-1}	-0.1630×10^0
G 11	1986 / 05 / 11	20:00	1.76	$+0.6663 \times 10^{-1}$	0.4663×10^{-1}	$+0.1152 \times 10^0$
G 12	1986 / 05 / 11	22:00	1.07	$+0.4547 \times 10^0$	0.1142×10^{-1}	$+0.1915 \times 10^0$
G 13	1986 / 05 / 11	24:00	0.94	$+0.1382 \times 10^0$	0.1215×10^{-1}	$+0.8222 \times 10^{-1}$
G 15	1986 / 05 / 22	11:00	1.20	-0.2136×10^0	0.2715×10^{-1}	-0.2201×10^0
G 16	1986 / 05 / 22	14:00	1.43	-0.8997×10^{-1}	0.2616×10^{-1}	-0.9060×10^{-1}
G 18	1986 / 05 / 22	20:00	1.03	$+0.1479 \times 10$	0.9091×10^{-2}	$+0.1479 \times 10$

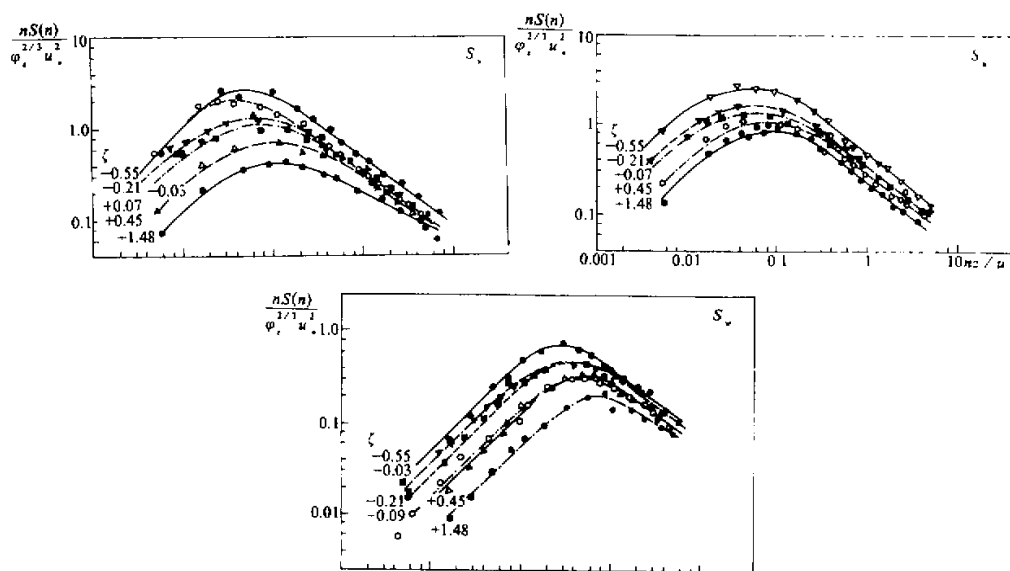


图1 大尺度湍流速度分量能谱曲线

性区间的范围难以确定。

谱曲线的低频段适合一般含能涡区的分布规律, $n \cdot S(n) \sim f$, 在图1的坐标系中谱曲线的峰值频率 f_m 与稳定度有明显的关系, 在 u' 和 v' 两个方向, ζ 从 +1.48 变化到 -0.55 时, f_m 值从 0.1 减小到 0.05, 相当于湍流积分尺度增大一倍。由于下垫表面的限制, w' 方向的湍流尺度小于其水平方向, 在 ζ 从 +1.48 变化到 -0.55 时, f_m 从 0.758 变化到 0.288 分别是水平方向的 $1/7.58$ 和 $1/5.76$, 而其湍流积分尺度则增长了 1.32 倍, 因而稳定度对湍流尺度的影响, 垂直方向略大于水平方向。

图1的纵坐标轴取 $\phi_e^{2/3} \cdot u_*^2$ 进行无量纲化, 其中 u_*^2 由原始资料直接计算, 而 $\phi_e^{2/3}$ 则由各个谱曲线的惯性区间按公式(1)拟合得到。从图1可见, 除 $\zeta = +1.48$ 和 -0.55 的两组曲线外, 无量纲化后的能谱曲线在高频段叠合较好。 $\zeta = +1.48$ 谱曲线偏离的原因是其高频段仍然没能达到惯性区间所要求的频率范围所致, 至于 $\zeta = -0.55$ 的一组, 其偏离原因值得进一步探讨。

除个别的谱曲线, $\zeta = -0.03$ 的 ω' 谱外, 无量纲化的谱曲线在含能涡区, 随不稳定程度的增加, 其谱能量有系统增强的趋势。

铁塔上的湍流一维能谱的无量纲化后的曲线如图2所示。

铁塔的资料中可用的组数较多, 但全部集中于不稳定层结, 作图时按稳定度分成三组, 即 $\zeta = -0.16 \sim -0.68$, $-1.0 \sim -3.4$ 和 $-9.1 \sim -24.0$ 三组。取各组的几何平均曲线给在图2中, 其无量纲化的谱曲线有如下的特点:

1. 在 u' , v' 和 w' 三个方向上, 稳定度对含能涡区谱能量影响程度有所不同, 对 u' 方向几乎没有影响, 即含能涡区的谱能量随不稳定程度的增长没有任何增长的趋势; 而在 w' 方向含能涡区的谱能随不稳定程度的增长, 其增长趋势最为明显; v' 方向则介

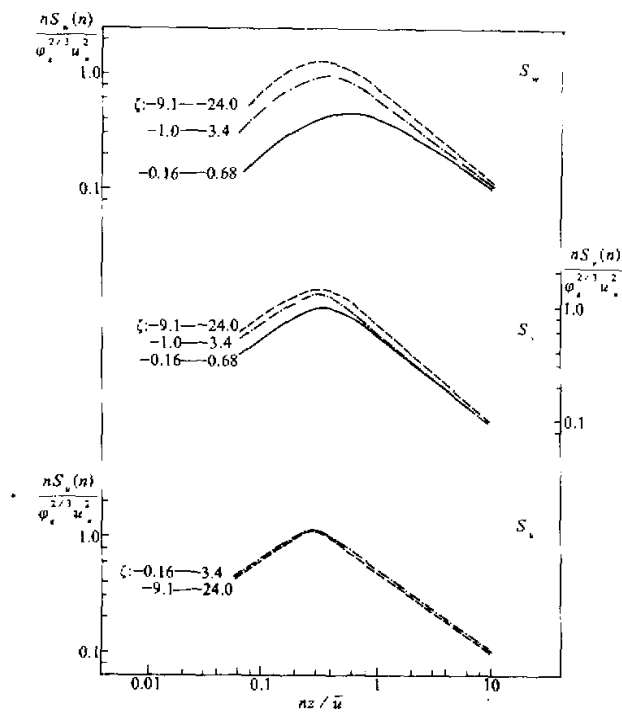


图2 铁塔上湍流速度分量能谱曲线

于两者之间。

2. 铁塔在三个方向的 f_m 值如表 2 所示,其值在各个方向比较接近,相差最大的是 $\zeta = -0.13 - -0.68$ 一组的 f_{mw} / f_{mu} , 其比值仅为 2.04, 说明城市建筑对湍流尺度有较强的限制作用。与大屯的资料对比, 铁塔的 f_m 值在各方向均高于大屯, 表中最后一行给出 ζ 在 $-9.1 - -23.5$ 铁塔的 f_m 值 (f_{mA}) 与大屯 $\zeta = -0.55$ 一组的 f_m 值 (f_{mG}) 的比值。由于铁塔仪器所在位置的空气动力学高度 ($z-d$, 其中 d 为零值位移高度) 是大屯的 30 倍, 这两组资料具有对比价值。表 2 中的结果说明, 铁塔资料在 u' 和 v' 两个方向的 f_m 值明显高于大屯, 即铁塔的水平方向的湍流尺度仅为开阔农田上的 $1/6 - 1/5$ 。

表2 不同稳定度下铁塔能谱曲线的 f_m 值

ζ	f_{mu}	f_{mv}	f_{mw}
-0.13 — -0.68	0.275	0.339	0.562
-1.0 — -3.4	0.275	0.324	0.380
-9.1 — -23.9	0.275	0.309	0.324
f_{mA} / f_{mG}	5.50	6.18	1.13

前人在分析不稳定层结能谱时曾指出,其低谱段的谱值与 ζ 之间关系没有很好的规律性,在只在一个高于稳定层结谱值的数值范围内起伏。Kaimal^[9] 和 Højstrup^[10] 认为,在对流边界层中, z_i/L 可能是另一个重要的稳定度参数,它与 z/L 一起决定 ζ 低频段谱值的大小,其中 z_i 是对流边界层厚度。大屯的情况可能是由于仪器安装高度距地面较近(2.2 m),下垫表面的影响大于边界层顶的影响。

至于铁塔的情况,在夏令时 9 时之后,于 80m 高处经常出现一个稳定少变的浅薄逆温,并在对应的风速廓线上有所反应,同时出现一个转折层,其上、下层的风速廓线各自保持一定的规律。本文作者认为,这是城市内边界层存在的表现。而铁塔的仪器恰好位于内边界层中部,地表面和内边界层顶的影响都比较稳定。

为了进一步研究大气稳定度对湍流结构的影响,下文将讨论一些宏观特征量的变化规律。

首先考察以 u_* 对湍流速度分量均方根值无量纲化后,以及以 θ_* 对温度脉动均方根值无量纲化后,它们与稳定度参数 ζ 的关系。图 3 给出 σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* 以及 σ_T/θ_* 与 ζ 的关系曲线。铁塔的观测数据在图中一律使用实心点,而大屯的数据则一律使用空心点来标帜,同时分别用实线和虚线给出其最佳拟合曲线。

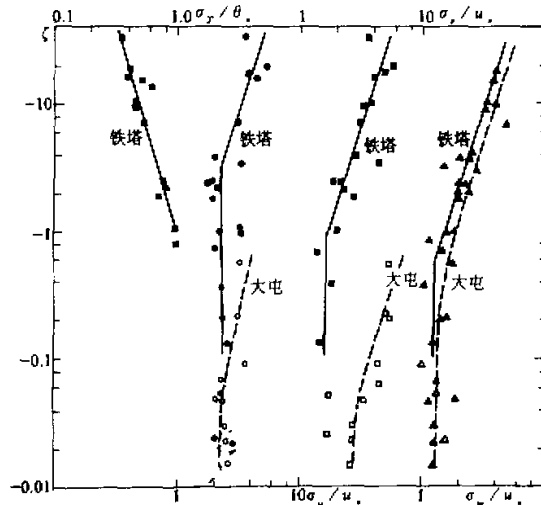


图 3 铁塔和大屯两处的 $\frac{\sigma_u}{u_*}$, $\frac{\sigma_v}{u_*}$, $\frac{\sigma_w}{u_*}$ 和 $\frac{\sigma_T}{\theta_*}$ 与 ζ 的关系

在中性层结时,铁塔的 σ_u/u_* , σ_v/u_* 和 σ_w/u_* 值分别等于 2.30, 1.62 和 1.23, 与 Panofsky 和 Dutton^[11] 归纳的数值 2.39, 1.92 和 1.25 相近。Panofsky 等人^[11] 推荐了上述三个无量纲特征量在不稳定层结下与稳定度的关系式

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1.25 \left(1 - 3 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_u}{u_*} \sim \frac{\sigma_v}{u_*} = 2.30 \left(1 - 0.22 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

公式(3)说明在不稳定条件下, 当 $-3\zeta \ll 1$ 时, 湍流脉动能量主要由动力因子控制, 而当 $-3\zeta \gg 1$ 时, 其湍流脉动能量主要来自热浮力. 从图 3 σ_w/u_* 随 ζ 的变化曲线来看, 大屯的资料在 $\zeta = -0.1$ 之后热力影响已开始起主导作用, 铁塔资料则在 $\zeta = -0.6$ 之后方才显示出来. 同样, u' 和 v' 两个量也有类似的特点. 作者认为, 城市内边界层中下垫表面的高粗糙度的影响, 使其动力影响强于平坦的城郊上空. 更值得提出的是, 这种影响在 u' 方向最为突出, 依次为 v' 和 w' 方向. 这与图 2 中谱曲线与稳定度关系的结论可以相互验证.

图 4 给出两个观测点计算的 $\varphi_e^{2/3}$ 与 ζ 的关系曲线, 图中心三角点为大屯的结果, 而实心圆点为铁塔的结果, 图中的曲线是 Kaimal 等人^[8] 的实验结果. 大屯的结果与 Kaimal 等人的结果比较相近, 而铁塔的数值有进一步探讨的价值. 粗略看来, 在不稳定气层中, 其变化趋势接近 Kaimal 等人的实验曲线; 而在稳定气层中, 本文的结果系统偏低, 其原因部分是由于强稳定层结下惯性区间的谱分布, 在我们计算的 $\varphi_e^{2/3}$ 的频段内, $nS(n)$ 与 f 的关系尚未精确到 $f^{2/3}$ 的关系所致, 一般情况其幂次律 $P > -2/3$. 因而采用公式(1)拟合的 $\varphi_e^{2/3}$ 值, 将系统偏低.

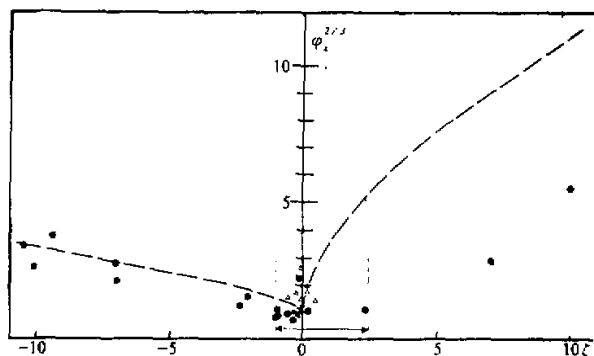


图 4 $\varphi_e^{2/3}$ 与 ζ 的关系曲线

图 4 中另一值得注意的现象是: 在 ζ 等于 -1.0 到 $+2.5$ 的范围内, 除个别点外, 铁塔的 $\varphi_e^{2/3}$ 值很接近于 1, 即中性层结条件下的数值(图中箭头标出的范围). 对比上文图 2 和图 3 的结果, 该现象同样反应了城市边缘地区, 在其内边界中, 其动力影响强于相同稳定度参数“ ζ ”下大屯的情况.

由于计算 φ_e 的数值对惯性副区湍流谱计算精度要求较高, 例如 Kaimal 等人^[8] 的结果是由热线风速计原始观测数据计算出来的, 因而上述现象值得进一步研究.

由于仪器观测精度, 本文无法给出 T' 的自谱、 $u'w'$ 和 $w'T'$ 互谱的结果.

在研究大气混合层发展预测模式时, 湍流感热通量 $\rho c_p \overline{w'T'}$ 是一个重要的湍流特征量. 图 5 给出两个观测点感热通量与稳定度参数之间的关系.

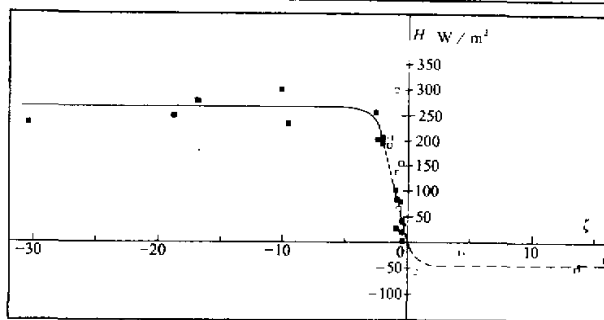


图5 铁塔和大屯两处感热通量 H 和 ζ 的关系曲线

根据两地仪器所在位置的流体动力学高度 $z-d$ 的不同,并假设在近地层中感热通量随高度不变的规律,图中将大屯资料的 ζ 值乘以30(空心点)与铁塔的资料(实心点)点绘在同一张图纸上,证明两组资料很好地相互重叠,说明北京郊区和城区边缘处的感热通量与 ζ 的关系非常密切,与下垫表面的性质关系微弱,这的确是一个非常有趣的事实。

五、结 论

通过本文的分析,对北京市郊区农田和城市边缘地区的近地面层湍流结构有了比较新的认识。

1. 在郊区农田的近地面层上空,其大气湍流结构的基本特点与前人所得的结论极为相近。

2. 由于城市建筑群的存在,其下垫表面具有较高的粗糙度和摩擦阻力,使其近地面层动力影响显著加强,导致统计特征量 σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* 和 σ_T/θ_* ; φ_u 以及湍流能谱曲线与稳定度的关系在近中性层结下极不灵敏,并对顺风、横风以及垂直方向的影响程度有所不同,其中以顺风方向(u' 方向)关系最弱,横风方向(v' 方向)次之,至于垂直方向(w' 方向)则关系最为密切,其原因是由于浮力作用方向与其方向一致有关。

3. 铁塔的湍流能谱在高频段适合局地各向同性湍流惯性区的分布规律,低频段也较好地满足含能涡区所要求的分布规律,即在 $n \cdot S(n)$ 与 f 的坐标系上满足 f^{+1} 的分布,说明在该处其湍流机制已完全适应了其下垫表面。本文所引证的Panofsky等人^[7]的结果,属于另一种情况,为气流从上游低粗糙地面过渡到下游相对的高粗糙地面不久,其湍流结构仍然没有完全适应新的下垫表面,因而其谱的低频段往往出现异常。

致谢: 本文作者在实验过程中,得到中国科学院大气物理研究所周乐义同志和地理研究所于沪宁同志的大力协助,仅此致谢。

参 考 文 献

- [1] Panofsky H. A. and J. A. Dutton. 1984. *Atmospheric Turbulence*, John Wiley & Sons, 156-226.
- [2] Kaimal J. C. et al. 1982. Spectral characteristic of the convective boundary layer over uneven terrain. *J. Atmos.*

- Sci., **39** 1098-1114.
- [3] Thompson, N., 1979, Turbulence measurements above a pine forest, *Boundary Layer Meteorol.*, **16**, 293-310.
 - [4] McBean, G. A., 1968, An investigation of turbulence within the forest, *J. Appl. Meteorol.*, **7**, 410-416.
 - [5] Godowitch, J. M., 1986, Characteristics of vertical turbulent velocities in the urban convective boundary layer, *Boundary layer Meteorol.*, **35** 387-407.
 - [6] Bradley, E. F., 1980, An experiments study of the profiles of wind speed, shearing stress and turbulence at the crest of a large hill, *Quart. J. R. Met. Soc.*, **106**, 101-123.
 - [7] Panořky H. A. et al., 1982, Spectral of velocity components over complex terrain, *Quart. J. Meteor. Soc.*, **108**, 215-230.
 - [8] Kaimal J. C., 1972, Spectral characteristics of surface layer turbulence, *Quart. J. Meteor. Soc.*, **98**, 563-589.
 - [9] Kaimal J. C., 1978, Horizontal velocity spectral in an unstable surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 18-24.
 - [10] Højstrup Jørgen, 1982, Velocity spectral in the unstable boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2239-2248.
 - [11] Panořky H. A. et al., 1977, The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions, *Boundary Layer Meteorol.*, **11**, 355-361.

THE TURBULENCE CHARACTERISTICS IN THE BOUNDARY LAYER OF THE RURAL AREA AND BORDER OF URBAN AREA OF BEIJING

Zhang Aichen, Lu Jie, Zhang Bing and Liu Shuhua

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

For purpose to compare the differences of the atmospheric turbulence characteristics between the surface layers of the rural and the border of urban areas, the atmospheric turbulence data collected from the Beijing District in 1986 have been analyzed in the paper. The results demonstrate that : the lower boundary layer in the border of urban area is subjected to a stronger dynamic influences due to the higher surface roughness, some of turbulence characteristics including the spectrum of wind components, normalized variances of wind components and temperature and dimensionless dissipation display weak relationships with the atmospheric stability under the near neutral stratification condition.

Key words: Atmospheric turbulence; Atmospheric boundary layer; Turbulent spectrum analysis; Turbulent fluctuation variance.