

盆地中近山平原近地层风速谱特征

姚增权 刘思湄 邱欣

(水利电力部大气环境测试研究中心)

提 要

通过对山西神头地区近地层风速谱分析发现,在盆地中存在山谷风时,风速谱的高频段仍遵循 $-5/3$ 次幂的Kolmogorov相似律,但在不稳定条件下低频端风速的垂直分量谱密度大于平原地区的谱密度,湍流在水平方向基本保持各向同性,但各向同性在垂直方向受到了破坏,在稳定条件下,风速谱在低频端出现另一极大、极小值,其对应频率分别在 10^{-1}Hz 和 10^{-2}Hz 附近,湍流各向同性在垂直和水平方向均受到破坏。

一、引 言

各种污染源向大气中排放的污染物在大气中的扩散实质上是一种湍流扩散,湍流能谱可近似地给出起扩散作用的湍涡尺度范围,由于许多扩散特性都与湍流谱的某些特征值紧密相关,因此从研究湍流谱入手来研究扩散已成为重要手段之一^[1]。

平原地区的湍流结构特征, Kaimal, Caughey 及 Hojstrup 等人已进行了详细研究^[5-9], Kaimal 等人^[10], Zhou 和 Panofsky^[11] 以及 Panofsky 等人^[12] 研究了起伏地形及复杂地形上空的湍流谱特征,王立治等研究了城郊近地层湍流特征^[13],然而,对盆地中山谷风盛行时的湍流谱特征则了解甚少。

1984年9月和1985年7月,在山西神头电厂环境评价现场测试中,除了用系留气艇、声雷达和无线电探空等手段对大气边界层的平均风温特性进行了测试外,为了解该地区的湍流结构特征,还在气象塔上20m高度处安装了一套Gill-UVW风速计及一只铂电阻温度计,测量了风速和温度脉动值,本文试图通过风速谱的分析,初步探讨该地区的湍流结构特征。

二、地形特点及气象特征

电厂位于雁北盆地北部,海拔1060m,北面3Km处为相对高差400m的洪涛山,南面30Km处为相对高差800m的紫金山,西面20Km处为相对高差800m的管涔山,东面45Km以外为恒山山脉,盆地在南北方向没有坡度,东西向坡度在千分之五以下,高150m的气象塔立在厂址附近,Gill-UVW风速计就安装于塔的20m高度处,塔的周

围为十分平坦的农田, 农作物的高度为 2m.

该地区的气象特征明显地表现出受周围山脉影响的特点. 局地环流——山谷风出现频率很高, 全年平均超过 50%, 尤以夏秋两季最为明显. 八月份出现山谷风的频率达 86%. 由谷风转换为山风的时间常发生于傍晚 17:00 — 21:00, 由山风转换为谷风则常发生于上午 07:00 — 10:00. 山风的风速比谷风大, 通常 10m 高度上测量的山风为 2 — 4m/s, 而谷风多在 1 — 2m/s. 山谷风的厚度 (指下层和上层发生风向转折的高度) 大约为 300 — 600m. 夏天, 厂区受距其最近的洪涛山影响较大, 这时的局地环流基本上为西南 - 东北向. 秋季, 管涔山的影响相对增大, 这时的山谷风多为东 - 西向.

三、数据采集与处理

Gill-UVW 风速计可直接将 U, V, W 三个瞬时风速值转换成电压信号. 该模拟信号以及铂电阻温度计的信号经放大后送入数据采集器, 以每秒一次的频率采样, 并把数据记录到磁带上. 磁带上的数据可转换到 IBM 微机软盘上以供进一步分析处理.

数据分析的第一步是对数据进行筛选. 白天不稳定条件下的数据, 先分成许多长 51 分钟的数据块, 凡不足 51 分钟的数据块均舍弃. 由于山谷风转换期间风向变化不定, 故该期间的数据块也舍弃. 稳定条件下所取的数据块长度为 34 分钟.

表 1 列出了部分分析实例中的湍流特征数据. 其中 U_* 为摩擦速度 (m/s), σ_u, σ_v 和 σ_w 分别为纵向、横向和垂直风速分量的标准差 (m/s), L 为 Monin-Obukhov 长度, z 为测量高度, 本例中 $z = 20\text{m}$.

表 1 神头地区主要湍流特征数据

组别	时 间	风速 (m/s)	风向 (度)	u^*	σ_u	σ_v	σ_w	z/L
R1	7 月 29 日 20:40	2.57	81	0.22	0.62	0.41	0.26	0.10
R2	21:14	2.85	88	0.13	0.58	0.28	0.26	0.08
R3	21:48	3.04	81	0.10	0.49	0.24	0.15	0.21
R4	22:22	2.82	84	0.12	0.54	0.28	0.14	0.19
R5	7 月 30 日 09:40	1.31	236	0.24	0.56	0.54	0.49	-0.10
R6	10:30	1.09	186	0.23	0.59	0.54	0.52	-0.12
R7	11:20	1.06	175	0.18	0.58	0.72	0.57	-1.54
R8	12:10	1.44	199	0.25	0.73	0.70	0.55	-0.62
R9	13:00	1.05	193	0.18	0.59	0.70	0.52	-1.51

根据 Horst 的研究, Gill-UVW 风速计的主要误差是余弦误差. 他将 Gill-UVW 风速计测量的能谱与超声风速仪测量的能谱进行比较发现, 0.3Hz 以下频段的误差主要

来源于余弦误差, Horst 提出了一种卓有成效的修正方法给出了异常满意的结果^[2]. 我们应用 Horst 方法对原始数据和各种统计量进行了修正.

由于 Gill-UVW 风速计固定在塔上, 其 U_0 , V_0 轴分别指向东方和北方, W_0 轴指向上方, 测量的 U_0 , V_0 , W_0 的正信号分别是东风分量, 北风分量和垂直上升速度分量. 这种坐标系和大气扩散研究中习惯采用的坐标系不符, 不便于和其它研究结果比较, 因此要把风矢量按 Kaimal 等人介绍的方法转换到自然坐标系中, 即 U 沿水平风向, V 轴与 U 轴垂直且处于同一水平面内, W 轴仍铅直向上, 且与 U , V 轴形成右手坐标系^[3].

经过修正和坐标变换的数据用曲线拟合去除缓变分量即得到脉动值数据块, 进行快速傅立叶变换以得到能谱. 不稳定条件下的谱分析分两个频段进行. 低频段为 $0.0003 - 0.01\text{Hz}$, 高频段为 $0.004 - 0.3\text{Hz}$. 在进行高频段的谱分析时, 先将长 51 分钟的数据块分成相连的六个子段, 每段单独进行 1024 点快速傅立叶变换. 变换后的数据应用 Goodman-Enchson-Otnes (GEO) 窗函数进行处理以消除终端效应. 而后求平方和以得到能谱. 不过这样计算的谱需乘一个因子, 以消除应用 GEO 窗函数时所引起的方差改变^[4]. 如此得到的谱脉动仍较大, 为得到比较光滑的谱, 还要进行多点平均. 这样, 在高频段共得到每组六个谱, 进行六点同频率平均得到最终的高频段谱. 在进行低频段的傅氏变换时, 先要将 51 分钟数据块中每相邻六个数据取平均得到一个数据, 这样得到的数据叙列进行 1024 点快速傅氏变换. 稳定条件下的谱分析过程与此相似. 分析结果表明, 低频段和高频段的衔接是满意的. 此外, 由于铂电阻温度计的响应频率不够高, Obukhov 长度采用低频段的计算值.

四、结果分析

把所得到的谱按稳定度分成两大类, 发现同一类中的谱曲线表现出许多共同特点. 这里仅取出其中几组加以说明.

1. 不稳定条件下的风速谱特征

图 1 绘出了 R6, R7, R8 的三个风速分量频率加权能谱曲线. 从图中可以看出, 三个风速分量频率加权谱的高频段斜率都符合惯性副区 $-2/3$ 次幂的 Kolmogorov 相似律. 不同 z/L 值所对应的能谱密度在高频端差别不明显. 水平速度谱的峰值大约发生于频率 $n_{hm} = 0.005\text{Hz}$ 附近. Kaimal 从 Kansas 不稳定条件下的 u, v 谱发现, 最大峰值频率 n_{hm} 始终落在 $0.003 - 0.005\text{Hz}$ 之间, 这相当于 3 — 5 分钟, 大约相应于近地层中大的对流系统的平均间隔^[9]. 神头地区不稳定条件下水平速度谱峰值对应的 $n_{hm} = 0.003 - 0.006\text{Hz}$ 之间 (见图 1), 与 Kansas 结果基本一致. v 谱峰值对应的频率略低于 u 谱峰值频率, 与 Kaimal 等人在具有起伏地形的 Boulder 观测到的结果一致^[10].

神头地区不稳定条件下垂直风速谱峰值对应的频率 $n_{wm} = 0.006 - 0.002\text{Hz}$. 随 z/L 值增加, 谱的峰值频率向低频端移动, 但不十分明显. 这些结果和 Kaimal 等人在 Boulder 气象塔上测量的不稳定条件下速度谱结果一致^[10].

从图 1 还可看到, u, v 谱在峰值和惯性副区之间 (大约位于 $n = 0.01 - 0.07\text{Hz}$ 之

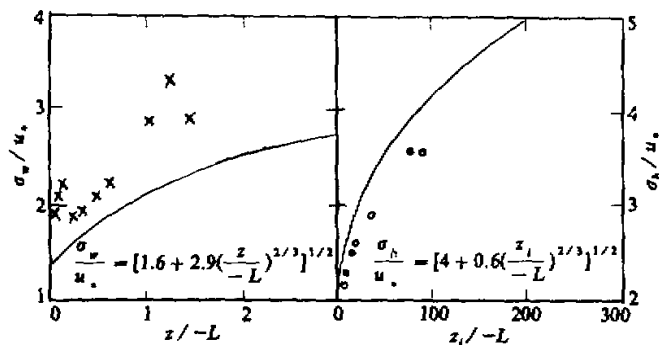


图3 不稳定条件下风速标准差

曲线为 Panofsky 模式, 叉和圆圈分别为神头地区垂直和水平风速标准差

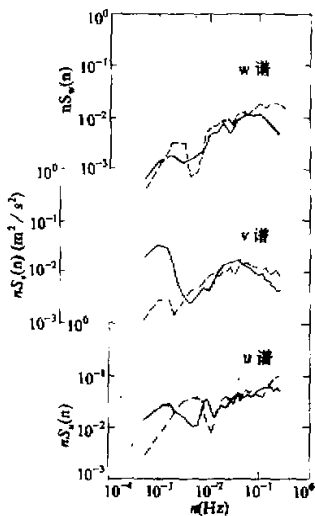


图4 稳定条件下的风速谱其中实线
对应于 $z/L=0.10$, 虚线对应于
 $z/L=0.08$

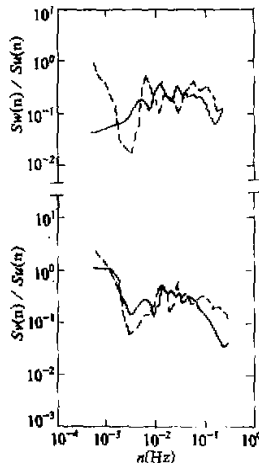


图5 稳定条件下的 $S_v(n)/S_w(n)$ 和 $S_u(n)/S_w(n)$
其中实线对应于 $z/L=0.10$, 虚线对应于
 $z/L=0.08$

Kolmogorov 相似律。谱高频端峰值对应频率 n_{vm} 在 0.05Hz 附近, n_{wm} 在 0.1Hz 附近, 与 Caughey 给出的结果基本一致^[7], 和 Kaimal 给出的 $n_{wm} \approx 2n_{vm}$ 的结果也是吻合的^[9]。但神头地区稳定条件下的 u 谱峰值频率似乎比 v 谱的高, 这与 Kansas 结果相反, 对此有待进一步研究。

稳定条件下风速谱的最大特点是低频端出现极大值和极小值。这和 Caughey, Olesen 等人的观测是一致的^[7-8], Olesen 等人指出, 水平风速谱的低频峰值在 10^{-1}Hz 附近, 极小值出现在 10^{-2}Hz 附近^[8]。Zhou 和 Panofsky 在分析 Boulder 气象塔上测量数据时发现,

在稳定条件下的风速谱极小值频率并不随 L 、风速和高度呈系统变化, 水平速度谱的间隙出现在 $3 \times 10^{-1} - 1.5 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ 之间^[11]. 神头地区测量结果与此基本一致 (见图 4).

图 5 给出了 v 谱, w 谱与 u 谱的比值, 可以看到, 和不稳定条件下的结果有一明显差别, 各向同性不仅在垂直方向上遭到了破坏, 而且在水平方向上也遭到了破坏.

五、结 论

通过对神头地区风速谱分析发现, 有山谷风存在时, 盆地中近山平原近地层中湍流谱有如下一些特点:

1. 不稳定条件下风速谱在惯性副区符合 $-5/3$ 次幂相似律, 垂直分量谱密度在 $n < 0.1 \text{ Hz}$ 以下都高于一般平原地区或稍有起伏地形的谱密度, 湍流在水平方向接近各向同性, 在垂直方向各向同性遭到了破坏, 水平风速标准差略低于平原模式, 而垂直风速标准差比平原模式预测值大.

2. 稳定条件下风速谱在高频端基本符合 $-5/3$ 次幂相似律. 在低频端 $n_1 = 0.001 \text{ Hz}$ 附近出现另一峰值, 在 $n_2 = 0.01 \text{ Hz}$ 附近出现极小值. 湍流各向同性在水平方向和垂直方向均遭到了破坏.

由于仪器响应频率以及样本数的限制, 有许多特征还未能深入研究, 比如谱特性与山谷风厚度、逆温层高度的定性和定量关系, 不同高度上谱的差异, 以及温度谱、协谱的特征等, 这些都有待进一步研究.

参 考 文 献

- [1] Weber, A. H., et al., 1982, Spectral scales in the atmospheric boundary layer, *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1622 — 1632.
- [2] Horst, T. W., 1973, Corrections for response errors in a three-component propeller anemometer, *J. Appl. Meteor.*, **12**, 716 — 725.
- [3] Kaimal, J. C. and Touart, C. N., 1967, Critical examination of a transformation to vector mean coordinates, *J. Appl. Meteor.*, **6**, 583 — 587.
- [4] Otnes, R. K., et al., 1972, Digital Time Series Analysis, John Wiley & Sons, 297 — 305.
- [5] Kaimal, J. C., 1978, Horizontal velocity spectra in an unstable surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 18 — 24.
- [6] Hojstrup, 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.
- [7] Caughey, S. J., 1977, Boundary layer turbulence spectra in stable conditions, *Boundary Layer Meteor.*, **11**, 3 — 14.
- [8] Olesen, H. R., et al., 1984, Modelling velocity spectra in the lower part of the planetary boundary layer, *Boundary Layer Meteor.*, **29**, 285 — 312.
- [9] Kaimal, J. C., et al., 1972, Spectral characteristics of surface layer turbulence, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **98**, 563 — 589.
- [10] Kaimal, J. C., et al., 1982, Spectral characteristics of the convective boundary layer over uneven terrain, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1098 — 1114.
- [11] Zhou, L. Y. and Panofsky, H. A., 1983, Wind fluctuation in stable air at the Boulder tower, *Boundary Layer Meteor.*, **25**, 353 — 362.
- [12] Panofsky, H. A., et al., 1982, Spectra of velocity components over complex terrain, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 215 — 230.
- [13] 王立治等, 1985, 城郊大气近地面层湍流特征的初步研究, 大气科学, 第 9 卷, 第 1 期, 11 — 17.