

大气边界层剪切湍流统计特性的风洞 实验及其层次相似律

程雪玲^{1, 2} 胡 非¹

1 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, 北京 100029

2 北京大学力学与工程科学系湍流及复杂系统研究国家重点实验室, 北京 100871

摘 要 对风洞模拟的大气边界层的剪切湍流场的速度脉动时间序列信号以及某一高度位置上的小波变换分解重构的信号进行了系统的统计分析。结果表明, 在非均匀下垫面大气边界层的不同垂直高度上的信号, She-Leveque 湍流层次相似律都成立, 层次相似指数 β 和最高激发态的奇异标度指数 γ 随垂直高度的变化而变化, 并给出不同尺度的分解重构信号的一些层次结构特点。

关键词 标度律 层次结构 子波变换 大气边界层 风洞

文章编号 1006-9895(2005) 04-0573-08

中图分类号 P425

文献标识码 A

Dynamic Property of Atmospheric Shear Turbulent Flow and Its Self-Similarity in the Wind Tunnel Experiment

CHENG Xue-Ling^{1, 2} and HU Fei¹

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Turbulence Research, Peking University, Beijing 100871

Abstract The time series of velocity fluctuation of the atmospheric turbulent boundary layer simulated in wind tunne are measured and statistically analyzed. The result shows that the She-Leveque hierarchical similarity law always holds water at the various vertical heights of the heterogeneous surface boundary layer. The hierarchical similarity exponent β and the most intermittent scaling exponent γ vary with the vertical heights. The decomposed and recomposed series by wavelet transformation at one height is analyzed, and some hierarchical structure characters in them are presented.

Key words scaling law, hierarchical structure, wavelet transformation, atmospheric boundary layer, wind tunnel

1 引言

湍流是大气系统中复杂现象的集中体现。从 20 世纪 80 年代到目前的 20 年间, 除了数值模拟水平和观测技术等实验手段有较大提高以外, 大气边

界层领域的研究主要集中在解决大气数值模式中边界层和地表通量参数化问题上, 而在理论研究方面则显得过于平静, 研究发展处于相对比较缓慢的时期^[1, 2]。

在湍流问题艰难而漫长的探索中, 20 世纪 60

收稿日期 2004-03-23, 2004-05-24 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 40233030 和 40405004

作者简介 程雪玲, 女, 1971 年出生, 博士, 助研, 主要从事边界层湍流理论以及大气边界层内湍流扩散的数值模拟等方面的研究。
E-mail: chengxl@mail.lapc.ac.cn

年代相继发现的孤立子与混沌现象给湍流研究带来了希望。近年来,人们还发现间歇性还会导致所谓反常标度规律的出现,开始以极大的热情探讨湍流惯性区标度律的具体形式和它的适合范围,计入间歇性的一些重要模型,如 β -模型, Gledzer-Yamada-Ohkitani 壳模型(简称 GOY 模型), 对数-Poisson 模型和 She-Leveque 标度律(简称 S-L 标度律)等, 理论预测和实验结果在较高阶矩时相当一致^[3~5]。

由余振苏等^[6, 7]以湍流统计特征作为出发点提出的层次结构理论, 即 S-L 标度律认为, 湍流中存在不同尺度、不同振幅和相干度的层次结构, 任意尺度上最强的结构称为最高激发态, 只有最高激发态才是控制湍流脉动结构统计特征量的特征结构, 在充分发展湍流的惯性子区内, 各层次结构之间通过相似关系与最高激发态相联系。这些研究成果都是针对一类最简单的湍流——均匀各向同性湍流, 而大气边界层中广泛存在的是非均匀各向同性湍流——剪切湍流。关于剪切湍流中不同尺度结构的统计特性以及剪切湍流对不同尺度结构的统计特性的影响因素是理论和实验都迫切需要进一步深入研究的问题^[8, 9]。同时, 随着数学工具的发展, 人们有了更多的信号分析手段(如子波变换), 精确刻画了信号中的各种物理结构^[10~12]。本文利用风洞实验获取了非均匀下垫面的大气剪切湍流速度场的实测数据, 通过子波变换对信号进行分解重构, 利用层次结构理论对原信号、分解信号及重构信号进行分析, 深入研究它的物理图像, 确定相似律的适用范围。

2 实验设备

实验是在北京大学力学系的小风洞中进行的, 使用模型模拟大气湍流边界层。风洞的实验段长 4 m, 高 0.6 m, 宽 0.6 m。风洞可产生的最大流速为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 本底湍流度为 0.2%。实验采用粗糙元和建筑物模型模拟大气边界层中的障碍物和大气边界层的下垫面(如图 1 所示)。实验中采用热线风速计测量流速及波动, 探针固定在下流某处, 但探针的高度不同。每个热线传感器的直径为 $5 \mu\text{m}$, 长度为 1.2 mm。探头与一个 TSI 1050A 风速计相连。电压信号通过一个截止频率为 20 kHz 的模拟电路进行低通滤波, 然后以 50 kHz 的频率采样, 再经 12 位的 A/D 转换为数字量, 共记录了大约

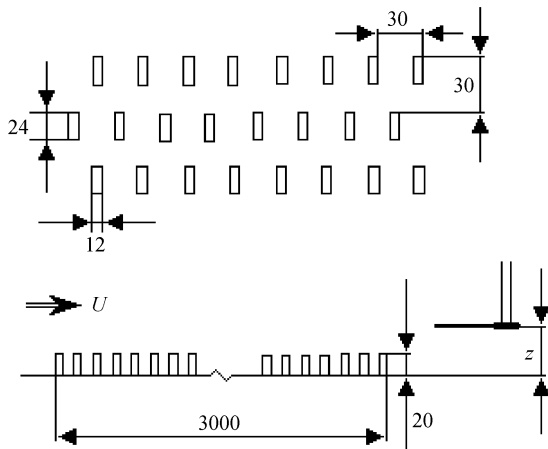


图 1 实验装置

Fig. 1 Experiment equipment

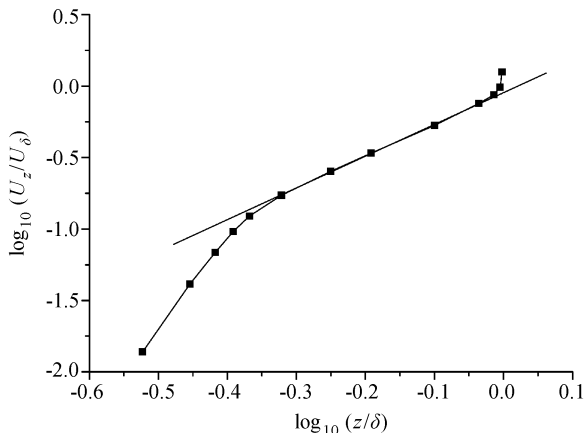


图 2 平均速度剖面

Fig. 2 The mean velocity profile

1.5×10^8 个数据。平均速度随着距壁面距离的增大而增大(如图 2 所示), 在实验中存在一段双对数区。

3 标度律分析

本文首先采用湍流层次结构理论^[3, 6, 7]分析所得实验结果。定义 p 阶速度结构函数 $S_p(\ell) = \langle |\delta v(\ell)|^p \rangle$, 其中 p 为任意正实数; ℓ 为尺度范围, 比如 $2^0 < \ell \leq 2^{11}$; $\langle \rangle$ 代表系综平均值。引入尺度 ℓ 在各振幅上的脉动量序列: $F_{p+1}(\ell) = S_{p+1}(\ell)/S_p(\ell)$, 其极限为 $F_\infty(\ell)$ 。该序列反映了湍流脉动结构在同一尺度上有强有弱(即存在着层次)。将各个层次的脉动量无量纲化: $\Pi_p(\ell) = F_p(\ell)/F_\infty(\ell)$ 。层次相似律假设强弱结构间存在相似关系: $\Pi_{p+1}(\ell) = A_p$

$[\Pi_p(\ell)]^\beta$, A_p 是不依赖于 ℓ 的系数, β 是层次相似指数, $0 \leq \beta \leq 1$. 极限 $F_\infty(\ell)$ 反映出 V_ℓ 的上界, 并且可得到 $F_\infty(\ell) \propto [S_3(\ell)]^\gamma$, $F_\infty(\ell)$ 称为最高激发态, γ 称为最高激发态的奇异标度指数. 在此基础上, 可得到标度指数 $\zeta_p = \gamma p + C(1 - \beta^p)$, 这就是 S-L 标度律.

为了验证真实的非均匀湍流的脉动信号中是否存在层次相似律, 余振苏等^[7] 提出了 β 检验和 γ 检验的概念. 记

$$H_{p+1}(\ell) = \left[\frac{F_{p+1}(\ell)}{F_2(\ell)} \right] \left[\frac{F_{p+1}(\ell_0)}{F_2(\ell_0)} \right]^{-1},$$
$$H_p(\ell) = \left[\frac{F_p(\ell)}{F_1(\ell)} \right] \left[\frac{F_p(\ell_0)}{F_1(\ell_0)} \right],$$

其中, ℓ_0 是一个特定的长度尺度, 根据层次相似律得 $H_{p+1}(\ell) = H_p(\ell)^\beta$. 因此, 如果根据实验数据作 $H_{p+1}(\ell) \sim H_p(\ell)$ 的双对数曲线, 则曲线的线性度就反映了与层次相似律符合的情况. 若线性度很好, 则其斜率即为层次相似指数 β . 这称为 β 检验.

同时, 由 $S_p(\ell) \sim S_3(\ell)$ 的双对数曲线, 可以得到标度指数 ζ_p . 如果 S-L 标度律成立, 可以推得 $\zeta_p - \chi(p; \beta) = \gamma[p - 3\chi(p; \beta)]$, 这里 $\chi(p; \beta) = (1 - \beta^p)/(1 - \beta^3)$. 在实验数据通过了 β 检验之后, 作 $[\zeta_p - \chi(p; \beta)] \sim [p - 3\chi(p; \beta)]$ 的曲线, 若该曲线近似为直线, 则其斜率即为最高激发态的奇异标度指数 γ . 这称为 γ 检验.

对距壁面不同径向距离的测点的速度数据信号

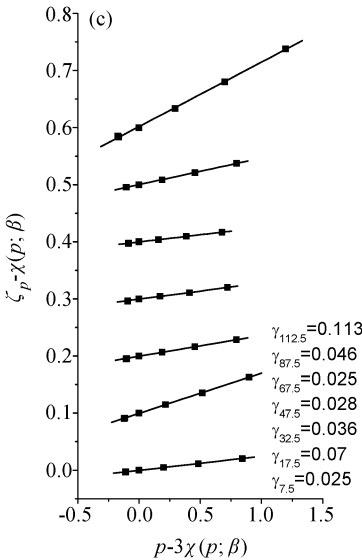
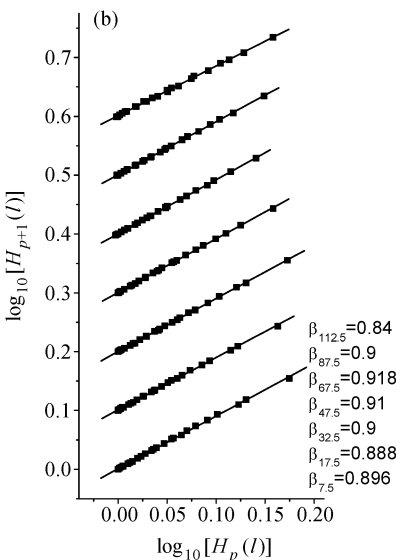
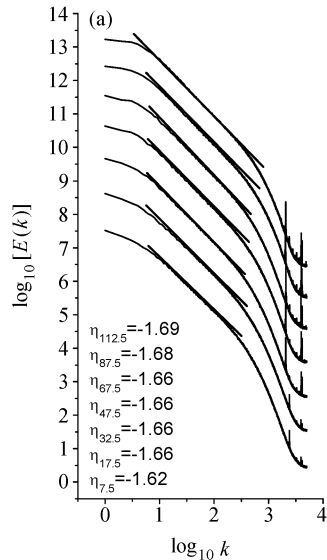


图 3 各测点数据分析: (a)能谱; (b) β 检验; (c) γ 检验
Fig. 3 Data analysis: (a)Energy spectrum; (b) β test; (c) γ test

进行分析, 发现每一测点的 β 检验和 γ 检验都有很好的线性度(如图 3), 其中参量的下标表示测点距壁面的径向距离(单位: mm). 说明 S-L 标度律在非均匀的各向异性的湍流中仍然成立.

对实验中不同测点得到的能谱斜率 η 、标度指数(这里用六阶标度指数 ζ_6 作为代表)、层次相似指数 β 和奇异标度指数 γ 进行比较(见表 1). 表 1 中 U 为平均速度, U_{rms} 表示速度均方差.

表 1 实验各测点数据

Table 1 Experiment data at the various vertical heights							
测点位置 y	U/	U _{rms} /	η	ζ_6	β	γ	
Measure sites	m · s ⁻¹	m · s ⁻¹					
y/mm							
112.5	13.89	1.8	-1.69	1.74	0.84	0.113	
87.5	12.34	2.14	-1.68	1.77	0.9	0.046	
67.5	11.29	2.28	-1.66	1.79	0.92	0.025	
47.5	9.26	2.43	-1.66	1.78	0.91	0.028	
32.5	7.94	2.44	-1.66	1.76	0.9	0.036	
17.5	7.29	2.33	-1.66	1.76	0.89	0.07	
7.5	6.27	2	-1.62	1.74	0.9	0.025	

从表 1 可以看到能谱的斜率基本相同, 与理论值接近, 说明在测量截面处湍流已得到充分发展, 但不同垂直高度上的标度指数、 β 和 γ 不同, 说明充分发展湍流中结构的层次关系有所不同.

实验中粗糙元是影响下游湍流发展的主要原因, 在垂直高度上远离壁面处($y=112.5$ mm)有层流和湍流交替出现的外间歇, 这里湍流的结构非常

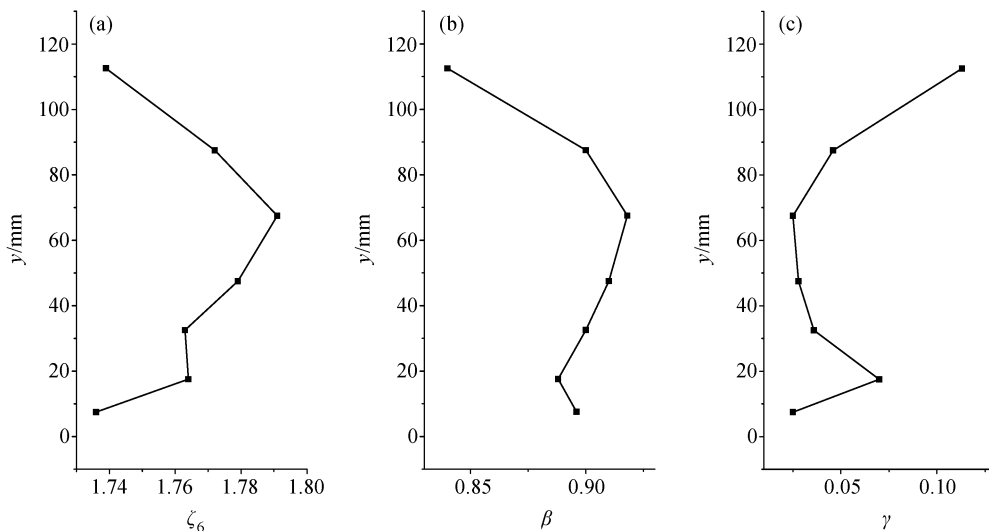


图4 各标度指数的径向变化

Fig. 4 Changes of scale exponents

不均匀,说明各层次间的差别大,因此,层次间的相似指数 β 减小;而由于最高激发态含有的能量增大,使得奇异标度指数 γ 增大,标度指数变小。而近壁面处由于壁面的影响,同样会产生间歇,因此 β 减小, γ 增大,标度指数减小(如图4所示)。

4 信号的小波变换处理

小波变换的含义是:把某一被称为基本小波(也叫母小波)的函数 $\Psi(t)$ 作位移 τ 后,再在不同尺度 α 下与待分析信号 $x(t)$ 作内积,

$$W_x(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-\tau}{\alpha} \right) dt, \alpha > 0,$$

其中, $W_x(\alpha, \tau)$ 为小波变换系数, α 为伸缩因子, τ 为平移因子, $x(t)$ 为待分析的信号, $\Psi(t)$ 为小波序列。

当信号的采样率满足 Nyquist (Nyquist 频率的定义是传感器能够忠实记录图像细节的最高空间频率。超过了 Nyquist 频率会出现混淆现象) 要求时,信号的真实频率从 $-\pi/T_s \sim \pi/T_s$ (T_s 是信号的采样间隔), 归一频率(=真实频率 $\times$ 采样间隔)必将限制在 $-\pi \sim +\pi$ 之间。此时,可分别用理想低通滤波器 H_0 与理想高通滤波器 H_1 将它分解成(对正频率部分而言)频率在 $0 \sim \pi/2$ 的低频部分和频率在 $\pi/2 \sim \pi$ 的高频部分,分别反映信号的概貌与细节。类似的过程对每次分解后的低频部分可再重复进行下去,即:每一层分解把该层输入信号分

解成一个低频的粗略逼近(概貌)和一个高频的细节部分。这样就将原始信号 $x(t)$ 进行了多分辨率分解。

图5是以实验中 $y=47.5$ mm 处为例的分析,进行了高低频分解及单支重构。通过 Daubechies (db3) 基本小波生成各层分解低通滤波器和分解高通滤波器,以及重构低通滤波器和重构高通滤波器。这里将原信号分解成 11 层,即小波分解尺度从 2^1 到 2^{11} , 然后对分解后高低频信号进行了单支重构。

图5中分图 a 表示该信号为原始信号,分图 d1~d11 表示依次分解重构得到的高频信号,分图 a1~a11 表示分解重构得到的低频信号。

在重构信号的概率密度分布函数(PDF)的分布中,可以看到:对于高频重构信号,由于信号中其他的频率缺乏,所以只能得到其所含尺度的 PDF,如对于 3 层高频信号(d3),只有尺度为 $2^1 \sim 2^3$ 的 PDF,而其余尺度的 PDF 则分辨不出来。相应的低频重构信号可得到尺度 $2^1 \sim 2^{11}$ 的全部 PDF 分布(图 6b 中由内向外依次为尺度 1 到尺度 11 的 PDF)。

当分解层数增加到一定层数时,高频重构信号在很窄的尺度范围内存在扩展的自相似性(ESS),即任意阶次为 p 的速度结构函数对 q 阶(通常取为 3 阶)结构函数的依赖关系,呈很好的幂次函数关系。如图 7 所示, d7 在尺度 $2^1 \sim 2^6$ 间具有 ESS, d9

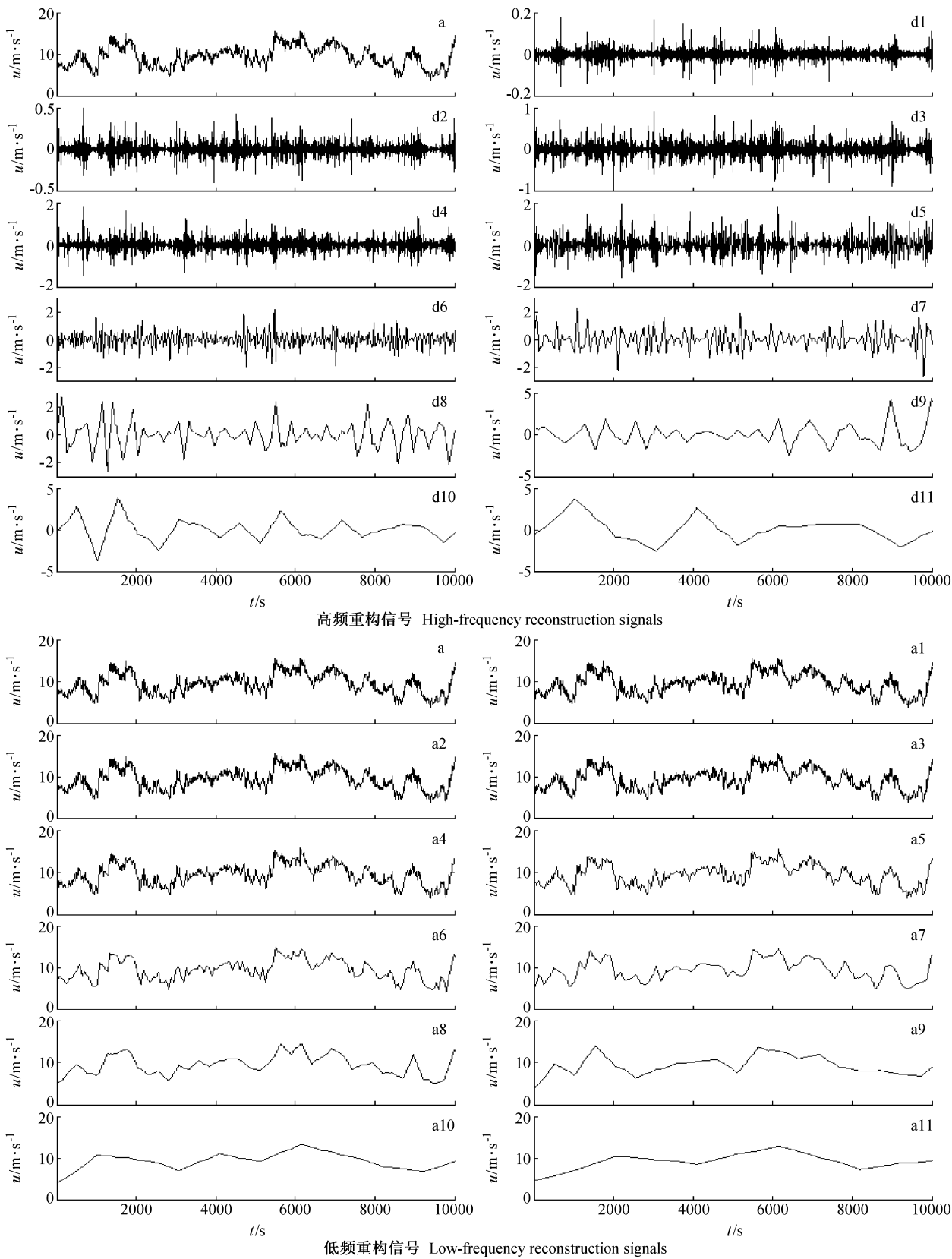


图 5 $y=47.5$ mm 处信号的分解重构

Fig. 5 Signal decomposition and reconstruction at $y=47.5$ mm

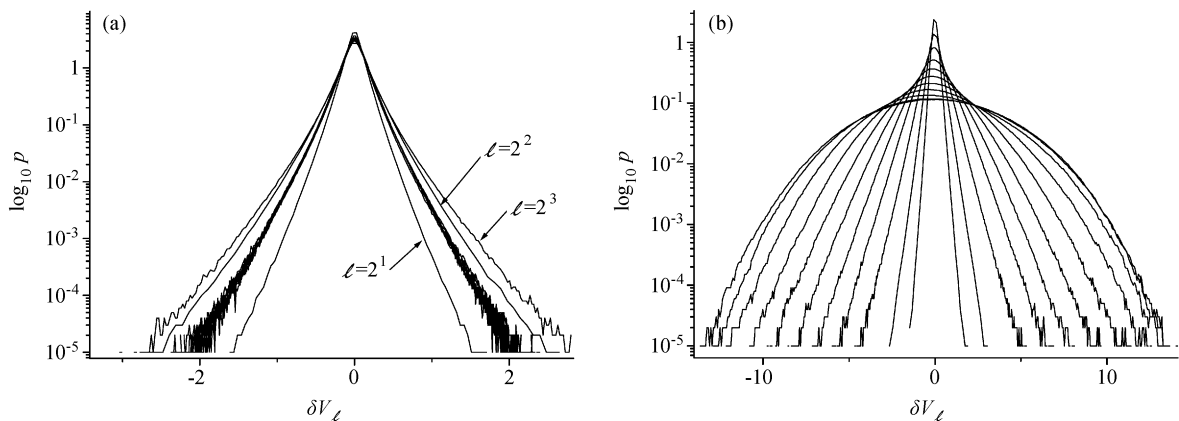


图 6 重构信号的 PDF: (a)三层高频重构信号(d3)的 PDF; (b) 三层低频重构信号(a3)的 PDF

Fig. 6 The PDF of reconstruction signals: (a) The PDF of the third level high-frequency reconstruction signal; (b) the PDF of the third level low-frequency reconstruction signal

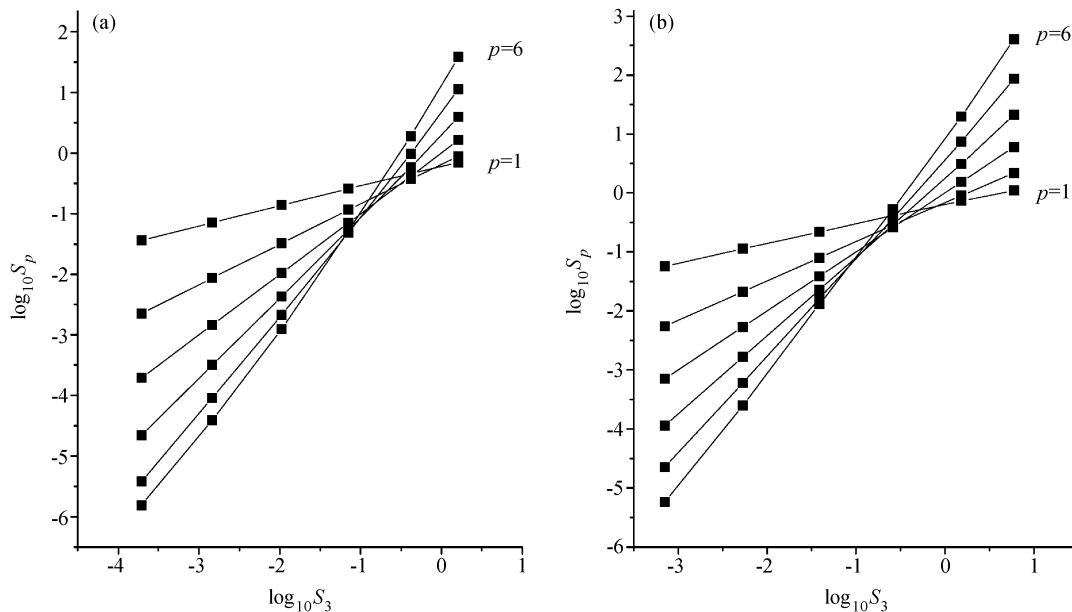


图 7 重构信号的 ESS: (a) 七层高频重构信号(d7)的 ESS (尺度 $l=2^1 \sim 2^6$); (b) 九层高频重构信号(d9)的 ESS (尺度 $l=2^3 \sim 2^8$)

Fig. 7 ESS of reconstruction signals: (a) ESS of the seventh high-frequency reconstruction signal (Scale $l=2^1 \sim 2^6$); (b) ESS of the ninth high-frequency reconstruction signal (Scale $l=2^3 \sim 2^8$)

在 $2^3 \sim 2^8$ 间具有 ESS。但 β 检验表明高频重构信号的层次相似性不好, 得不到层次相似指数 β , 低频分解信号存在 β 的尺度范围随分解层数的增加而减少(如图 8)。其中, 阶矩 p 从 1 到 6。

从能谱图(图 9)中可以看到, 从原信号中除去高频信号后, 重构的低频信号的能谱图中, 高频部分比原信号的能量减小, 且出现脉动, 随着去掉的高频信号越多, 频谱中高频部分损失越大; 而重构的高频信号的频谱则相反, 在低频部分能量远远低

于原信号, 而随着提取的高频信号的尺度不同, 则在能谱中相应波数的位置上的能量就会与原信号相同, 这表明已将具有该波数的信号提取了出来。

5 结论

本文通过对风洞实验数据的分析, 研究了模拟的非均匀下垫面大气边界层湍流场的速度脉动的特点。

首先, 在实验中采集了边界层不同高度位置处

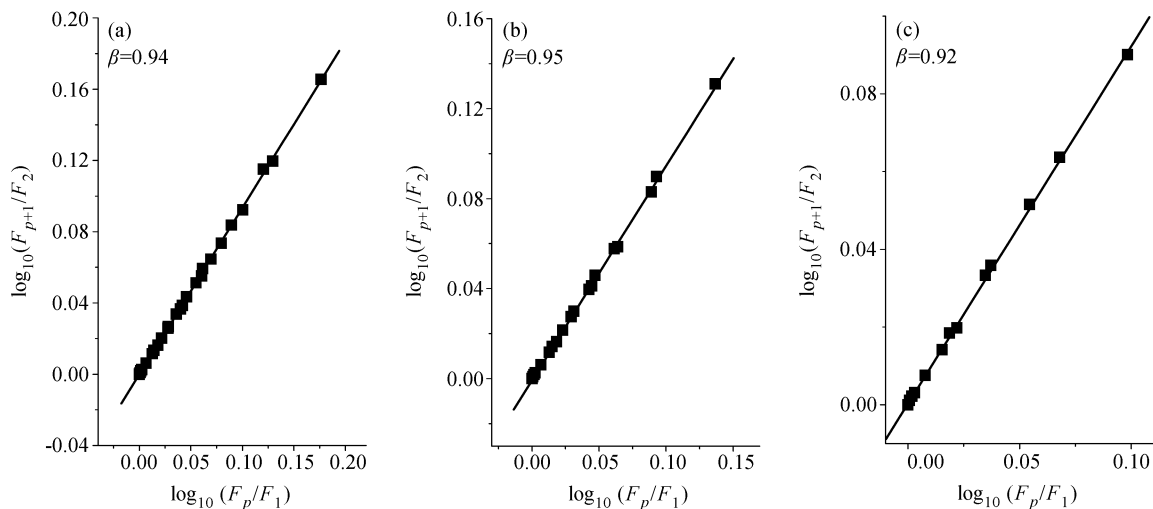


图 8 重构信号的 β : (a) 三层低频重构信号(a3)的 β (尺度 $l=2^3 \sim 2^{11}$); (b) 五层低频重构信号(a5)的 β (尺度 $l=2^5 \sim 2^{11}$); (c) 七层低频重构信号(a7)的 β (尺度 $l=2^7 \sim 2^{11}$)
Fig. 8 β of reconstruction signals: (a) β of the third low-frequency reconstruction signal (Scale $l=2^3 \sim 2^{11}$); (b) β of the fifth low-frequency reconstruction signal (Scale $l=2^5 \sim 2^{11}$); (c) β of the seventh low-frequency reconstruction signal (Scale $l=2^7 \sim 2^{11}$)

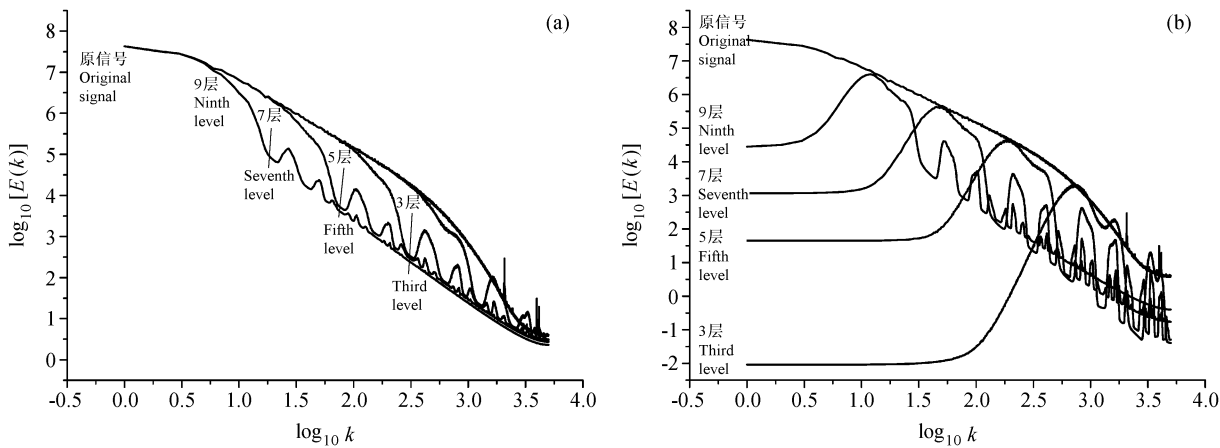


图 9 重构信号的能谱: (a) 低频重构信号的能谱; (b) 高频重构信号的能谱
Fig. 9 Energy spectrum of reconstruction signals: (a) Energy spectrum of low-frequency reconstruction signals; (b) energy spectrum of high-frequency reconstruction signals

的速度时间序列信号，利用层次结构理论对其进行标度律分析。结果表明在大气边界层的各个测点上，SL 湍流层次相似律都成立，层次相似指数 β 和最高激发态的奇异标度指数 γ 随垂直高度的变化而变化。

此外，还采用数学上较成熟的子波变换方法对信号进行分解重构，再利用层次结构理论对分解重构信号进行分析，得到不同尺度的分解信号的层次结构特点。

致谢 本文采用了北京大学力学与工程科学系的小风洞数据，实验由毕卫涛提供，在此深表谢意。

参考文献 (References)

[1] 胡非. 湍流、间歇性与大气边界层. 北京: 科学出版社, 1995. 1~21
Hu Fei. *Turbulence, Intermittence and Atmosphere Boundary Layer* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1995. 1~21

[2] 张强, 胡隐樵. 大气边界层物理学的研究进展和面临的科学问题. 地球科学进展, 2001, 16(4): 526~532
Zhang Qiang, Hu Yinqiao. Scientific problems and advance of atmospheric boundary layer physics. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2001, 16(4): 526~532

[3] Nelkin M. Universality and scaling in fully developed turbu-

- lence. *Advances in Physics*, 1994, **43**(2): 143~181
- [4] 赵松年. 大气非线性与湍流过程中动力学复杂性的研究与进展. *力学进展*, 1995, **25**(4): 471~500
Zhao Songnian. The study and development on the atmosphere nonlinear and turbulent dynamical complexity. *Advances in Mechanics* (in Chinese), 1995, **25**(4): 471~500
- [5] Frisch U. *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov*. Cambridge University Press, 1995. 135~174
- [6] She Zhenyu, Leveque E. Universal scaling laws in fully developed turbulence. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**: 336~339
- [7] 余振苏, 苏卫东. 湍流中的层次结构和标度律. *力学进展*, 1999, **29**(3): 289~303
She Zhenyu, Su Weidong. The turbulence hierarchical structure and scale law. *Advances in Mechanics* (in Chinese), 1999, **29**(3): 289~303
- [8] 付遵涛, 李昕, 刘式达, 等. 大气边界层湍流速度场的层次结构分析. *地球物理学报*, 2002, **45**(增刊): 30~36
Fu Zuntao, Li Xin, Liu Shida, et al. The hierarchical structure analysis on the turbulent velocity of atmosphere boundary layer. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2002, **45** (Suppl.): 30~36
- [9] 姜楠, 王玉春. 壁湍流扩展的自相似标度律的实验研究. *实验力学*, 2002, **17**(1): 28~34
Jiang Nan, Wang Yuchun. An experimental research on the extended self-similarity in wall turbulence. *Journal of Experimental Mechanics* (in Chinese), 2002, **17**(1): 28~34
- [10] Smith S A, Jonas P R. Wavelet analysis of turbulence in cirrus clouds. *Ann. Geophysicae*, 1997, **15**: 1447~1456
- [11] Mouri H, Takaoka M, Kubotani H. Wavelet identification of vortex tubes in a turbulence velocity field. *Physic. Lett. A*, 1999, **261**: 82~88
- [12] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 2000. 217~244
Yang Fusheng. *The Engineering Analysis and Application on the Wavelet Transfer* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000. 217~244

新书推荐:

《中国山地环境气象学》

(高登义著; 河南科学技术出版社近期出版)

(字数: 约 60 万字; 开本: 大 16 开; 定价: 48.00 元)

《中国山地环境气象学》是中国科学院大气物理研究所高登义研究员撰写的科学专著, “是高登义研究员数十年来从事山地科学考察研究的成果, 是多次参加我国山地综合科学考察研究的多学科交叉、渗透的新成果”。我国地学界前辈叶笃正、刘东生和陶诗言院士分别为本书题写了序。

叶笃正院士在序中说: “本书的创新之处在于开创了研究山地、大气与自然环境之间相互作用的领域, 并取得了一些有意义的结果。” “在本书的第二篇中, 揭示了大气环流变化对于山地与大气之间相互作用的影响, 指出了山地对于天气、气候和自然环境的影响。” “值得提出的是, 本书第三篇研究了人类对于山地环境气象条件的适应问题, 这是一个好的开端。” 陶诗言院士在序中指出: “这是一本理论与实践紧密结合的科学专著”, “在第三篇中, 概括了他关于影响喜马拉雅山脉地区登山活动的大气环流和天气系统的分析研究成果, 提出了宜于登山时段的短期气候预测的理论根据和方法, 提出了登顶天气的中期、短期天气预报的理论根据和方法” “他把气象学家在大气环流研究方面的理论与喜马拉雅山脉地区的局地天气、气候特点结合起来, 并把他在山地环境气象学研究中发现的一些山地天气、气候规律用于登山天气预报和短期气候预测之中, 逐渐提高了预报准确率。” 刘东生院士在序中说: “《中国山地环境气象学》是地学、生物学和人文科学相互渗透的新的学科, 是多年来在山地科学研究方面难得的一本好的多学科相互渗透的科学专著。” “不仅揭示了我国山地与大气、大气环流、自然环境之间的相互作用, 而且还研究揭示了雅鲁藏布江水汽通道对于西藏文明发展的影响, 这是自然科学与人文科学之间相互渗透的新成果。”

内容简介 内容包括三部分: (1) 山地对于大气的作用; (2) 山地、大气与自然环境之间的相互作用; (3) 人类对于山地环境气象条件的认识和适应。

读者对象 本书特别适合于大气科学、环境科学专业的大学生和研究生, 以及从事与山地气象、环境科学有关工作的科研人员。

联系地址: 北京德胜门外中国科学院大气物理研究所周立波同志 邮编: 100029

电话: 82013684-2 传真: 62025883 E-mail: zhoulibo@mail.iap.ac.cn

(周立波供稿)