

小波变换在建筑环境 气流湍动特性研究中的应用^{*}

清华大学 陈晓春[☆] 李宏军 欧阳沁 朱颖心

摘要 介绍了小波变换的原理,通过对建筑周边自然风和轴流风机自由射流的小波分析研究,表明这种方法在分析气流湍动特性时具有优越性。小波分析方法与基于傅里叶变换的频谱分析方法结合使用可以形成互补。

关键词 小波变换 湍流特性 建筑环境 傅里叶变换

Application of wavelet transform to turbulence characteristic study of airflow in building environment

By Chen Xiaochun[★], Li Hongjun, Ouyang Qin and Zhu Yingxin

Abstract Presents the theory of wavelet transform. Based on this method, studies natural wind and mechanical wind from free jet of axial fan. The results show that this method is ascendant in analysing turbulence characteristics of airflow. Wavelet transform associated with frequency spectrum analysis based on Fourier transform may facilitate each other.

Keywords wavelet transform, turbulence characteristic, building environment, Fourier transform

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

虽然目前研究建筑环境气流脉动所采用的傅里叶变换一直是信号处理领域中应用最广泛的一种分析手段,但也有不足之处:它是一种纯频域分析方法,在频域里的定位完全准确(即频域分辨率最高),而在时域无任何定位性(或无分辨能力)^[1]。

小波分析是当前应用数学中一个迅速发展的新领域,经过近 10 年的探索研究,重要的数学形式化体系已经建立,理论基础更加坚实。与傅里叶变换、窗口傅里叶变换(Gabor 变换)相比,小波变换是空间(时间)和频率的局部变换,因而能有效地从信号中提取信息,通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度的细化分析,解决了傅里叶分析所不能解决的问题。本研究提出在建筑环境气流流动特性的分析中引入小波分析法,希望能够从不同于傅里叶变换法的角度来研究这一问题,以获得新的工具、思路和信息。

1 小波变换原理

1.1 一维连续小波变换

设 $f(t)$, $\varphi(t)$ 是平方可积函数,且 $\varphi(t)$ 的傅里叶变换 $\Psi(\omega)$ 满足条件

$$\int_{\mathbf{R}} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad a > 0 \quad (2)$$

为 $f(t)$ 的连续小波变换,记为 $W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbf{R}} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$, 其中 $\bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的共轭函数, $W_f(a, b)$ 为小波变换系数,称 $\varphi(t)$ 为小波

①☆ 陈晓春,男,1974 年 1 月生,工学博士,博士后,助理研究员
100084 清华大学建筑技术科学系
(0) 13811834126

E-mail: chen_hvac@yahoo.com.cn

收稿日期:2005-06-09

修回日期:2005-12-08

函数或者小波母函数, a 为尺度因子, b 为平移因子。

从定义可看出, 小波变换也是一种积分变换, 是将一个时间函数变换到时间-尺度相平面上, 从而能够提取函数的某些特征。而上述两参数 a, b 是连续变化的, 故称上述变换为连续小波变换。

1.2 一维正交离散小波变换

在连续小波变换中, 当 a, b 连续取值时变换系数 $W_f(a, b)$ 对应于不同 a, b 的值并不是相互独立的, 它们中有一定的重复信息。在处理实际的离散信号时, 可以通过取特定的 a 和 b 来构造离散的完备正交小波函数序列。通常取 $a = a_0^j, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 取 $b = a_0^j b_0$, 一般 $a_0 = 2, b_0 = 1$ 。离散化后且不会损失信息的小波函数为

$$a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi(a_0^{-j}(t - ka_0^j b_0)) = a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi(a_0^{-j}t - kb_0) \quad j, k \in \mathbf{Z} \quad (3)$$

离散化后的小波函数为

$$\varphi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi(a_0^{-j}t - k) \quad (4)$$

这样, 离散小波可以定义为: 若 $\varphi(t)$ 是平方可积函数, $a_0 > 0$ 是常数, $\varphi_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi(a_0^{-j}t - k), j, k \in \mathbf{Z}$, 则称

$$W_f(j, k) = \int_{\mathbf{R}} f(t) \overline{\varphi_{j,k}(t)} dt \quad (5)$$

为 $f(t)$ 的离散小波变换。

1.3 正交离散小波变换的多尺度分析

对于大多数湍流随机信号来说, 低频部分往往是最重要的, 它会给出信号的特征。而高频部分则与噪声和扰动联系在一起。将信号的高频部分去除, 信号的基本特征仍然可以保留。正因为这个原因, 在信号的分析中, 经常会提到信号的近似和细节, 近似主要是系统大的、低频成分, 而细节往往是信号局部的、高频成分, 它可以用图 1 表示, 图中 A 表示信号 S 的低频部分, D 表示信号的高频部分。

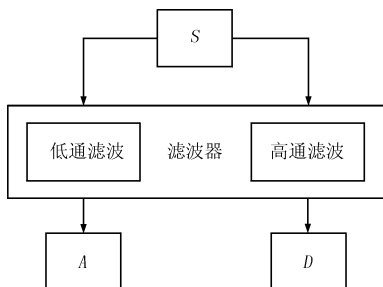


图 1 信号的滤波过程

上述分解过程可以反复进行, 信号的低频部分

还可以被继续分解, 这样就可以得到如图 2 所示的

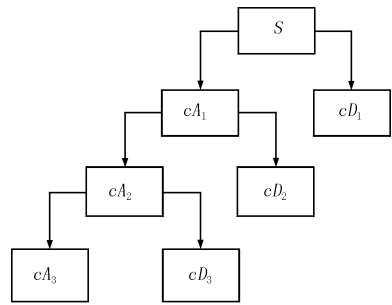


图 2 信号的多尺度分解

离散小波多尺度分解树, 其中 cA (coefficient of A) 为低频信号的小波变换系数, cD (coefficient of D) 为高频信号的小波变换系数。信号分解的层数不是任意的, 例如长度为 N 的信号最多能分解成 $\log_2 N$ 层。在实际分析中, 可选择合适的分解层数。

2 小波变换在建筑环境气流分析中的应用

2.1 小波变换在湍流中应用的原理

小波变换被形象地看成是数学显微镜, 其光学性质取决于母函数 $\varphi(t)$ 。小波变换可以根据实测信号 $f(t)$ 中不同尺度的成分自动变焦, 调整分辨率。文献[2]指出, 对于湍流信号而言, 小波函数具有明确的物理意义: 如果 b 是空间参数, 则 φ_{ab} 表示物理空间中 b 处的一个空间尺度为 a 的湍涡结构; 如果 b 是时间参数, 则 φ_{ab} 表示时刻 b 发生了一个时间尺度为 a 的事件, 图 3 表示了湍流中涡与小波

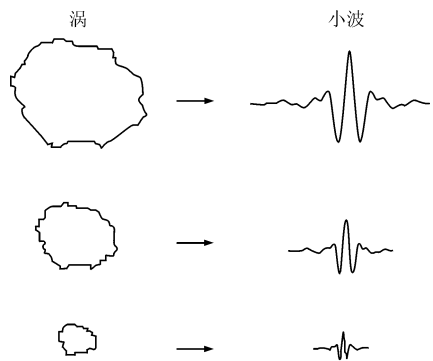


图 3 涡与小波函数关系示意图

的相互对应关系。小波变换相当于将信号与小波函数在某一位置 b 作局部相关分析, 如果其相关性高, 则表明信号在该处含有该小波成分, 使得信号在该处与该小波具有良好的一致性。

2.2 自然风的一维连续小波变换

实验是 2004 年 7 月由清华大学动态热舒适研究小组完成的, 测量的对象为建筑周边自然风, 采

用的主要测速仪器是北京大学大气物理实验室制造的热线风速仪。热线风速仪的探头热丝采用直径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的钨铼丝, 标定结果表明, 风速在 $0.2\sim 9\text{ m/s}$ 范围内时风速测量误差为 5% 。热丝的时间常数为 70 ms , 因此采样间隔 Δt 必须大于 70 ms , 实测时设定的采样间隔 $\Delta t=0.1\text{ s}$, 采样频率为 10 Hz , 满足要求。共测量了 1 h , 取其中的 409.6 s 进行分析, 共计有 $4\text{ }096$ 个数据。图 4 为测量所得的瞬态速度的时间序列。

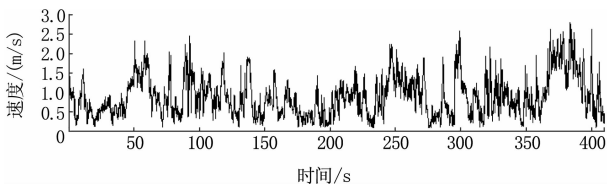


图 4 自然风瞬态速度的时间序列

采用 mex hat 小波母函数(众多小波母函数中的一种, 又被称为墨西哥帽小波母函数)进行分析, 图 5 为小波变换系数的相位图。颜色越深表示小

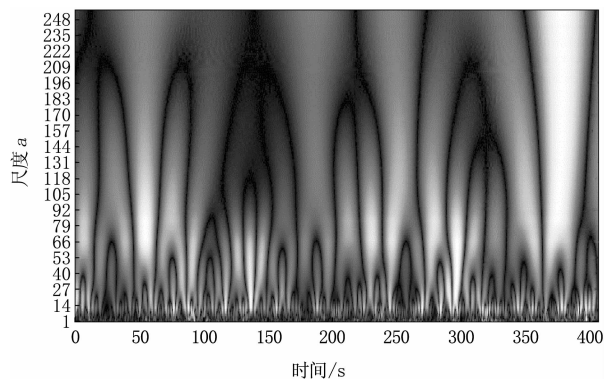


图 5 小波变换系数相位图

波变换系数越小; 颜色越浅表示小波变换系数越大。颜色的深浅变化表示了湍流中涡的尺度结构。从图中可以看出, 当尺度 a 较大时, 小波变换系数变换很慢, 相间条带结构数目很少, 反映出实际湍流中大尺度涡所对应的低频成分; 随着尺度 a 变小, 小波系数变换加快, 相间条带结构数增加, 显示出了湍流中大尺度涡分裂为小尺度涡的串级过程, 并且这一过程随着尺度的变小, 会被不断地重演下去, 直到被小尺度涡的黏性作用所耗散掉。从湍流结构来看, 各种不同尺度的湍流结构具有较为一致的自相似特性。以上分析说明了小波分析不同于傅里叶分析之处, 它能够直观地反映出湍流中能量串级过程和自相似特性。

2.3 机械风的正交离散小波变换

机械风取自轴流风机的自由射流, 实验在一个封闭的大空间中进行, 风机距地面高约 1.6 m , 测点距管道出口 1.0 m , 风机转速由变频器控制, 取风机出口约 2.0 m 位置进行测量。同样取其中 409.6 s 的数据进行分析, 图 6 为测量所得瞬态速度的时间序列。

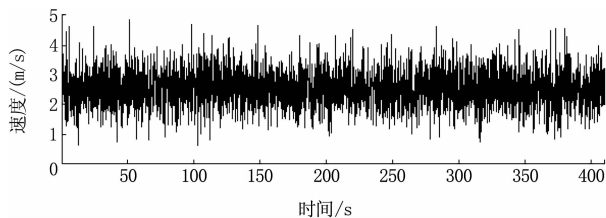


图 6 机械风瞬态速度的时间序列

利用正交离散小波变换对信号进行多尺度分析, 结果如图 7 所示。小波母函数为 db4, 共进行 6 层离散小波变换, 可表示为 $s=a_6+d_6+d_5+d_4+d_3+d_2+d_1$ 。在小波分解中, 不同尺度具有不同的

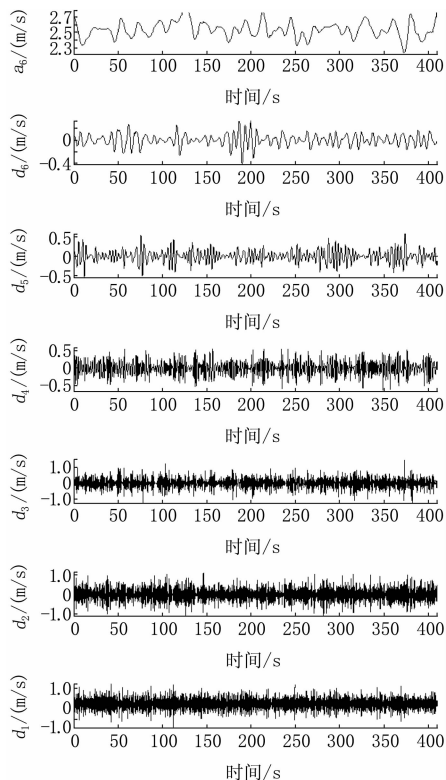


图 7 机械风的正交离散小波变换

时间分辨率和频率分辨率, 因而小波分解能将信号的不同频率成分分解开。图中 a_6 代表最低频率部分, d_6 到 d_1 代表信号分解由低到高频部分。从图中可以看出, 高频处湍流脉动信号基本属于没有

规律的噪声信号,而在低频部分则主要反映了大尺度的脉动和流动的非定常信息,它决定了流动的主要特性。

3 机械风和自然风的能谱分析

文献[3-4]在研究机械风和自然风的湍流特性时,将湍流信号进行傅里叶变换并作谱分析,根据人体在 0.3~1 Hz 频率段较为敏感的特点,提取这一区间功率谱的负指数斜率 β 作为评价各种不同风源的主要特性指标。

为了对自然风和机械风进行更加细致深入的分析,对以上两种湍流信号进行多尺度离散小波变换,其中自然风的离散小波变换如图 8 所示。分别提取不同尺度下脉动强度(方差)进行比较分析。

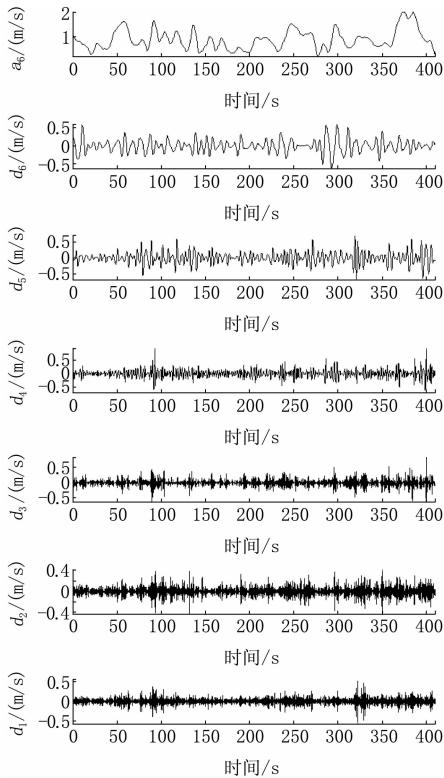


图 8 自然风的正交离散小波变换

图 9 是分析结果,从图中可以看出,自然风随着尺度的增加,湍流脉动强度增加;而机械风则恰恰相反。自然风在高频部分具有的能量与机械风相比要小很多,而机械风在低频部分的能量较自然风要低很多。从两种风的谱特征图图 10,11 中,也能发现上述特征,但是在利用小波变换后,可以更加细致地对其湍流特性进行分析。

4 结语

通过分析自然风的一维连续小波变换和机械

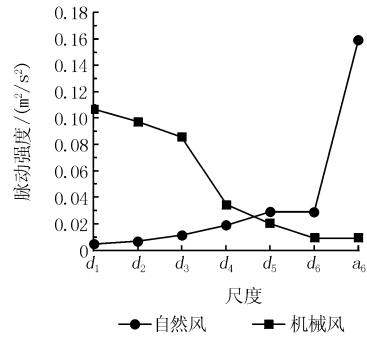


图 9 不同尺度下的湍流脉动强度比较

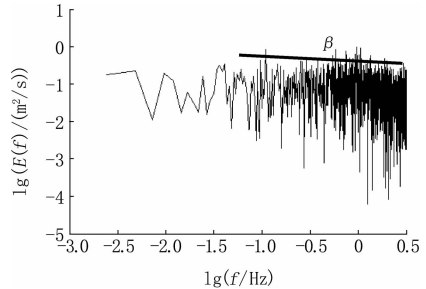


图 10 机械风的谱特征

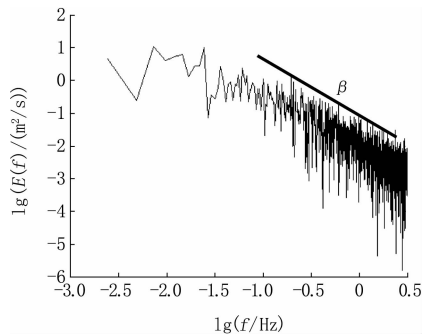


图 11 自然风的谱特征

风的离散小波变换可知,将小波变换应用于建筑环境气流湍动特性的研究中会有良好的前景。利用小波变换对建筑周边自然风和轴流风机自由射流进行分析,结果表明这种方法与传统的基于傅里叶变换的频谱分析方法相比,能够更加细致地分析气流湍动特性。小波分析方法与基于傅里叶变换方法联合使用可以形成互补。

参考文献

- [1] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1997
- [2] Kitagawa T, Nomura T. A wavelet-based method to generate artificial wind fluctuation data [J]. J of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003 (91): 943-964
- [3] 夏一哉. 气流脉动强度和频率对人体热感觉的影响研究[D]. 北京:清华大学, 2000
- [4] 贾庆贤. 送风末端装置的动态化研究[D]. 北京:清华大学, 2000