

# 钝体尾流的双重小波包分解

陈文学<sup>1</sup>, 赵建福<sup>2</sup>, 李长河<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院水力学研究所,北京 100038; 2. 中国科学院力学研究所,北京 100080)

**摘要:**根据湍流相干结构和非相干结构不相关的特性,提出了一种钝体尾流双重小波包分解的新算法,将湍流的运动分解成相干分量和非相干分量.该算法以湍流相干分量和非相干分量的相关系数作为迭代的控制指标,减小了过去算法中的随意性.用该算法对大长宽比的钝体尾流三维超声波流速仪测量数据的分析表明:1)钝体间距与宽度之比大于4时,钝体间的相互影响可以忽略不计;2)流线型的钝体尾流紊动强度较小.

**关键词:**湍流;相干结构;小波包分解;尾流;钝体

钝体尾流最显著的特点是绕流体后缘旋涡的周期性脱落,形成卡门涡街.受卡门涡街的影响,绕流体表面的压力也会发生周期性变化,当绕流体表面压力变化频率与绕流体的固有频率接近时,会发生共振,从而引起绕流体的破坏,在水利工程中,常见的如电站尤其是抽水蓄能电站拦污栅的破坏.因此,研究钝体尾流的形成机理、结构特征有十分重要的工程应用价值.从流动特点来看,卡门涡街是湍流中一种典型的相干结构,对这类流动的深入分析既可深化人们对湍流的认识,又有利于湍流模型的发展.

Hussain<sup>[1-2]</sup>在20世纪80年代对湍流中的相干结构进行了全面的评述,并提出了湍流场的双重分解(即将湍流分量分解成相干分量和内禀分量)和三重分解(将湍流物理量分解成时均分量、相干分量和内禀分量).在试验研究中,过去普遍采用条件采样技术和相平均方法提取湍流中的相干结构.随着小波分析的发展,小波分析已成为湍流相干结构分析的一个极其重要的工具<sup>[3]</sup>.Siegel和Weiss<sup>[4]</sup>采用小波包算法提取和分析湍流的涡量结构和特征,Chainais等<sup>[5]</sup>根据相干结构内压力的变化特性,用小波变换研究了旋涡流动中的湍流间歇特性和相干结构,Li<sup>[6]</sup>提出了一种小波相关分析方法并用其研究了剪切湍流的相干结构,李栋等<sup>[7]</sup>用小波分析研究了平壁湍流猝发现象.

本文在文献[5]和[8]的基础上,提出了一种分析钝体尾流的双重小波分解算法,并深入分析了钝体前后缘对钝体尾迹流特性的影响.

## 1 湍流场的双重小波包分解

### 1.1 小波包分解

小波分析具有良好的时域和频域局域性,即在低频段用高的频率分辨率和低的时间

收稿日期:2003-08-01;修订日期:2003-11-17

作者简介:陈文学(1965—),男,博士,高级工程师.

分辨率,在高频段用低的频率分辨率和高的时间分辨率,具有变焦特性被称为数学上的显微镜,现已广泛应用于信号的分析处理、图象处理、语音分析、模式识别、量子物理及非线性科学等领域<sup>[9]</sup>.

小波变换用小波函数系逼近原始信号,而小波函数系是由小波函数平移、伸缩构成的,即:

$$\psi_{s,\tau} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad s, \tau \in R, s \neq 0 \quad (1)$$

$\psi(t)$  称为基本小波,  $s, \tau$  分别为尺度和平移因子. 对信号  $f(t)$ , 其小波变换为:

$$W_f(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) f(t) dt \quad (2)$$

式中,上标 \* 表示取共轭. 实际工程中常用二进小波,即  $s = 2^j$ . 将二进小波和多尺度分析结合起来即可得到信号的小波包分解. 设  $\phi(t)$  是尺度函数,  $\psi(t)$  是小波函数,  $h(n)$  和  $g(n)$  为正交镜像滤波器(分别称为低通滤波器和高通滤波器), 则信号  $f(t)$  的小波包分解为

$$\begin{cases} f_{2^m}(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n) f_m(2t - n) \\ f_{2^{m+1}}(t) = \sqrt{2} \sum_n g(n) f_m(2t - n) \end{cases} \quad (3)$$

小波包分解是将信号在全频带范围内进行正交分解,分解  $j$  层,可得到  $2^j$  个等带宽的频带,每一频段的数据长度为原数据长度的  $1/2^j$  倍,采样间隔为原信号的  $1/2^j$  倍. 如果原信号的分析频率为  $f$ , 则第  $j$  层第  $i$  个频段的频率范围是  $[2^{-j}(i-1)f, 2^{-j}if]$ .

## 1.2 相干结构的提取

小波包分解可以将不同频段的信号分开,但是我们不能仅仅根据频率的大小来提取湍流的相干结构,因为即使是各向同性均匀湍流也是由不同频率的运动组成的. Wickerhauser<sup>[8]</sup> 提出可以根据小波包系数熵的特性进行相干结构的提取和信号的去噪. 这里,系列  $\{s_i, i = 1 \sim N\}$  的熵定义为

$$E(s) = - \sum_{k=1}^N s_k^2 \ln s_k^2 \quad (4)$$

熵是系统有序度的物理量. 系统有序则熵值较低,反之,系统越无序,其熵值越高. 因此,可以根据小波包系数熵值的大小提取湍流中的相干结构.

Wickerhauser<sup>[8]</sup> 采用的是迭代方法,即不断提取小波包系数熵值较小的结构,直到满足某种条件为止,其迭代控制参数先验地确定. Siegel 和 Weiss<sup>[4]</sup> 借鉴了 Wickerhauser 的思路,提出迭代的最终控制指标为非相干结构部分小波包系数的熵大于原始信号的熵值. 但是,以原始信号作为分析的判据并不具有普适性:首先,原始信号中包含了湍流相干结构和非相干结构两个部分,其熵值是这两种运动的综合反映,经过小波包变换后,小波包系数的熵值和原信号的熵值间大小关系尚无法从理论上证明,而且,这种差异是否反映湍流相干结构和非相干结构的差别同样缺乏理论依据. 其次,采用不同的基小波进行小波包变换,小波包的系数显然不一样,因此,按 Siegel 方法提取的相干结构也会有一定的差异. 第三,按照这种准则分析非恒定流运动时,结果往往很不理想.

考虑到湍流的相干结构与非相干部分不相关<sup>[1]</sup>,可以根据相干分量和非相干分量间的相关系数作为迭代计算的判据,实现对湍流信号的双重分解.具体分解方法如下:

- 1) 对流速信号进行小波包分解,并求信号的最佳小波包树;
- 2) 计算小波包端节点小波系数及各系数的熵;
- 3) 求小波系数熵的平均值;
- 4) 对小波系数  $c(i)$  进行如下处理,

$$c(i) = \begin{cases} c(i) & |E(c(i))| < \alpha |E_{\text{mean}}| \\ 0 & |E(c(i))| > \alpha |E_{\text{mean}}| \end{cases} \quad (5)$$

然后进行逆小波包变换提取相干分量.输入信号减去相干分量即得非相干分量.上式中,  $E_{\text{mean}}$  为平均熵值,  $\alpha$  为常数.  $\alpha$  值的选取主要影响迭代计算的工作量,对计算结果没有影响.

5) 计算相干分量和非相干分量间的相关参量  $\beta$ . 设信号的相干分量和非相干分量分别为  $f_c$  和  $f_r$ , 则

$$\beta = \frac{\frac{1}{N} \sum f_{ci} f_{ri}}{\frac{1}{N} \sum f_i^2} \quad (6)$$

式中,  $f$  为原始信号,  $N$  为采样点的个数. 当  $f$  为流速(去了均值)时,上式中的分子可以认为是相干结构和湍流紊动分量间形成的应力,理想情况下,其值应为零;上式中的分母为紊动强度的平方.

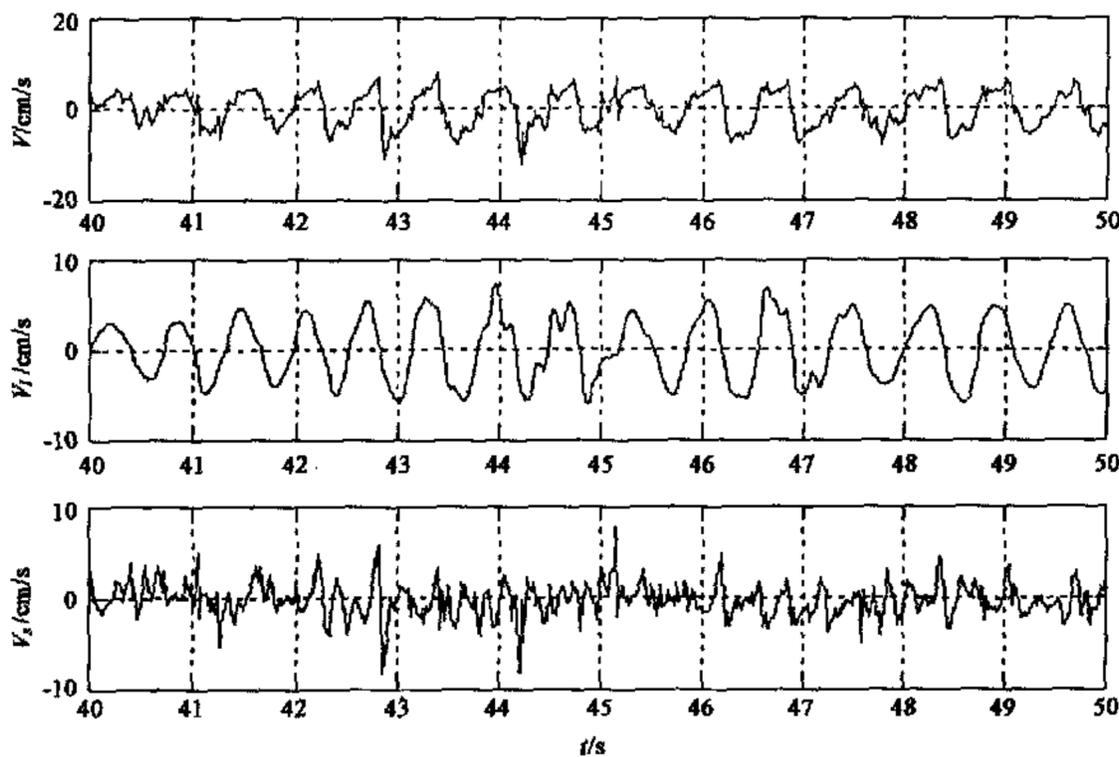


图1 典型流速信号的双重分解( $V$ 、 $V_c$ 和 $V_r$ 分别是垂向流速、垂向流速相干分量和非相干分量)

Fig. 1 Dual decomposition of a typical velocity signal ( $V$ ,  $V_c$  and  $V_r$  denote respectively original signal, coherent part and non-coherent part of transverse velocity)

6) 方法1: 当 $\beta > \varepsilon$ 时( $\varepsilon$ 为小量), 表明信号分解后剩余部分中仍含有相干分量, 将分解后的剩余部分作为输入, 返回1) 进行迭代计算, 直到 $\beta < \varepsilon$ .

方法2: 考虑到相干分量提取较少及提取的信号中包含较多非相干分量时,  $\beta$ 均较大, 因此, 可以根据迭代次数与 $\beta$ 的关系, 求 $\beta$ 极值, 当 $\beta$ 极小时, 提取的相干分量即是真实的相干分量.

### 1.3 算例

按上述方法对某钝体尾流三维超声波流速仪的测量结果进行了分解, 典型分解结果见图1, 其对应能谱见图2. 由图2可知, 在湍流运动中相干结构占有绝大部分能量, 对整个流动起主导作用; 非相干分量能量谱基本符合 $-5/3$ 次律, 这与湍流奇异标度现象的最新研究成果<sup>[10]</sup>相一致, 即相干结构引起湍流的奇异标度现象, 从而导致能谱对 $-5/3$ 次律的偏离. 由此可见, 本文提出的双重分解方法能够将原始流速信号中的相干分量与非相干分量合理分开.

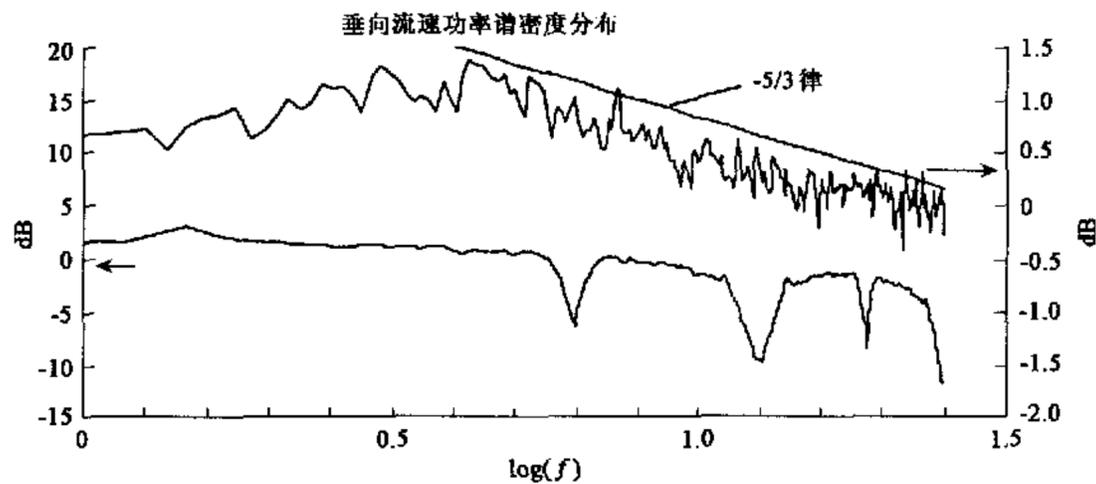


图2 流速的功率谱密度分布(左边为相干分量的功率谱, 右边为非相干的功率谱)

Fig. 2 Power spectral density of transverse velocity (Left: coherent part. Right: non-coherent part)

## 2 大长宽比柱体尾流特性分析

### 2.1 体型尺寸

水电站拦污栅断面的长宽比一般在4~12之间, 属大长宽比柱体绕流. 结合拦污栅流

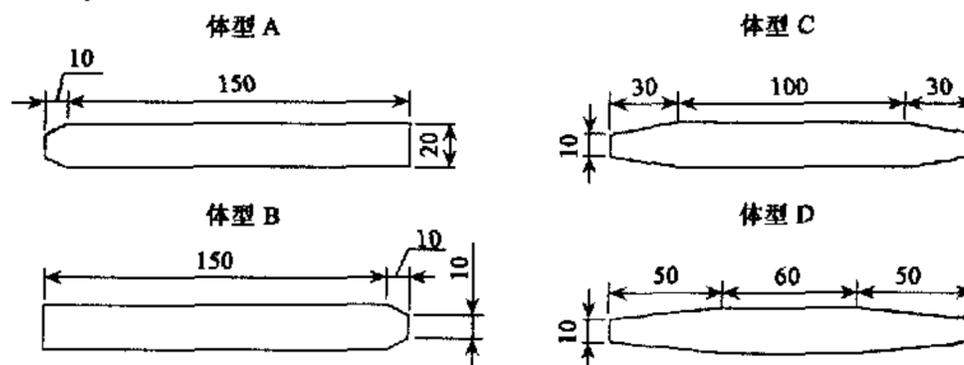


图3 拦污栅栅叶的断面尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Trashrack profiles (Unit: mm)

激振动的研究<sup>[11]</sup>,我们用 SonTek 公司生产的三维超声波流速仪,测量了长宽比为 8、间距与栅叶宽度之比为 10 的 5 种柱体尾流特性.明渠槽道宽 1m,水深 60mm,测量截面距水面约 30mm.栅叶宽度为 20mm,除前、后缘为方形的栅叶外,其它四种栅叶的结构尺寸见图 3.

## 2.2 尾流的脉动流速分布

拦污栅尾流的典型断面紊动强度分布如图 4 所示,紊动强度最大值位于栅叶中心线附近,距栅叶中心线 2 倍的宽度处,紊动强度已基本没有受到栅叶的影响,说明间距与栅叶宽度之比大于 4 时,单栅叶周围的流动与多栅叶周围的流动基本相同.从图 4 中可见,对尾流脉动强度影响最大的是相干脱落涡运动,受脱落涡运动的影响,非相干流体运动的紊动强度也显著增加.

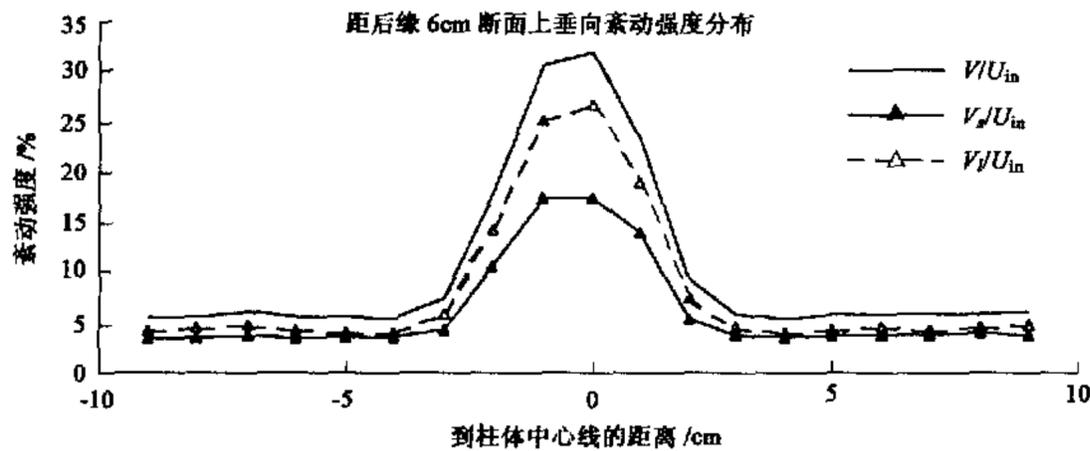


图 4 距栅叶后缘 6cm 断面上垂向紊动强度分布 ( $U_{in}$  为来流平均流速)

Fig. 4 Turbulent intensity distribution at the section 6cm away from the trailing edge of the trashrack ( $U_{in}$  denotes the mean velocity of the incoming flow)

各体型距栅叶后缘 6cm 处断面上最大紊动强度值见表 1. 由表中可见,影响大常宽比钝体尾流强度的最主要因素是前缘形状,体型 B 前缘为方形,相干旋涡引起的紊动强度与矩形栅叶基本相同,体型 A 尾流的紊动强度最大,表明卡门涡比较强烈,当钝体前缘渐趋流线形时,脱离涡的强度逐渐减弱,在这 5 种体型中,紊动强度最小的是体型 D,即接近流线型体型.这与文献[11]的流激振动试验结果是一致的,后者表明接近流线型绕流体的振动响应特性最好.因此,在设计拦污栅等绕流体体型时,应尽可能采用流线型体型(但是不能采用半圆型前后缘体型,详见文献[11]).

表 1 距栅叶后缘 6cm 断面上最大垂向紊动强度

Table 1 The maximum turbulent intensity at the section 6cm away from the trailing edge of the trashrack

体型	$U_{in}/\text{cm/s}$	$V/U_{in}/\%$	$V_1/U_{in}/\%$	$V_2/U_{in}/\%$
矩形栅叶	17.15	22.33	17.57	13.72
A	18.22	31.84	26.70	17.30
B	15.81	20.62	16.64	12.14
C	15.17	24.99	20.10	14.84
D	16.62	16.95	13.55	10.16

### 3 结论

本文提出了一种提取钝体尾流相干运动的小波包分解迭代算法,并引入一无量纲参数,即湍流相干分量与非相干分量间的相关参数,作为迭代的控制指标,从而减小了解算算法的随意性.该方法可以推广应用于其它类型湍流的多尺度分析及湍流特性分析.

针对电站拦污栅尾流特性,用该算法分析了5种柱体尾流实验数据,结果表明:1)当栅叶间距与栅叶宽度之比大于4时,栅叶间的相互影响可以忽略不计;2)流线型栅叶尾流的紊动强度很小,在拦污栅设计时应优先采用.

### 参考文献

- [1] Hussain A K M F. Coherent structures-reality and myth[J]. *Phys Fluids*, 1983, 26:2816-2850
- [2] Hussain A K M F. Coherent structures and turbulence[J]. *J Fluid Mech*, 1986, 173: 303-356
- [3] Farge M, Kevlahan N, Perrier V, et al. Wavelets and turbulence[J]. *Proc IEEE*, 1996, 84: 639-669
- [4] Siegel A, Weiss J B. A wavelet-packet census algorithm for calculating vortex statistics[J]. *Phys Fluids*, 1997, 9: 1988-1999
- [5] Chainais P, Abry P, Pinton J F. Intermittency and coherent structures in a swirling flow: A wavelet analysis of joint pressure and velocity measurements[J]. *Phys Fluids*, 1999, 11: 3524-3539
- [6] Li H. Identification of coherent structure in turbulent shear flow with wavelet correlation analysis[J]. *Trans ASME*, 1998, 120: 778-785
- [7] 李 栋,许春晓,张兆顺. 利用子波分析对平壁湍流猝发现象的研究[J]. *力学学报*, 2001, 33:153-162  
Li Li, Xu Chunxiao, Zhang Zhaoshun. Study of burst phenomena in wall turbulence by wavelet analysis[J]. *Acta Mech Sinica*, 2001, 33(2): 153-162
- [8] Wickerhauser M V. Adapted wavelet analysis from theory to software(Chapter 11)[M]. Peters, Wellesley, MA, 1994
- [9] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1999  
Yang Fusheng. Engineering analysis and application of wavelet transformation[M]. Beijing: Science Press, 1999
- [10] 余振苏,苏卫东. 湍流中的层次结构和标度律[J]. *力学进展*, 1999, 29:289-303  
She Zhensu, Su Weidong. Hierarchical structures and scaling in turbulence[J]. *Adv Mech*, 1999, 29: 289-303
- [11] 陈文学,吴一红. 抽水蓄能电站拦污栅流激振动试验研究(专题三)[M]. 北京:中国水利水电科学研究院,2003  
Chen Wenxue, Wu Yihong. Experimental study on flow-induced vibration of trashracks of pumped storage stations-Part 3 [M]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003

## A Dual Decomposition Algorithm for Turbulent Wake Flows After Blunt Bodies Using the Wavelet Packet Method

CHEN Wenxue<sup>1</sup>, ZHAO Jianfu<sup>2</sup>, LI Changhe<sup>1</sup>

(1. China institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

### Abstract

Based on the wavelet packet method, a dual decomposition algorithm for extracting coherent structures from turbulent wake flows after blunt bodies is presented. The correlation between coherent and incoherent motions is used as iteration criterion since the coherent and incoherent motions are uncorrelated. Thus, a priori knowledge about the flows is no necessary in turbulent wake flow decomposition by means of this method. This method is used for decomposing the velocity data measured by ADV in the wake flows of trashrack with large length-to-width ratio. The results show that: 1) trashracks do not interfere with one another when the trashrack spacing-to-width ratio is not small than 4, 2) turbulent intensity of the wake flow for the trashrack with streamlined profiles is much small.

**Keywords:** turbulence; coherent structures; wavelet packet; wake flows; blunt bodies