第 32 卷 第 5 期 力 学 学 报 Vol. 32, No.5
2000 年 9 月 ACTA MECHANICA SINICA Sep., 2000

用能量最大准则确定 VITA 法的平均周期[1)]

姜 楠 舒 玮 王振东
(天津大学力学系，天津 300072)
(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室，北京 100080)

摘要 引入了子波变换的方法来确定检测壁湍流猝发事件的 VITA 法的短时间平均周期 T. 为了确定 VITA 法的短时间平均周期 T, 用子波变换对热膜测速仪测量得到的湍流边界层近壁区域的流向脉动速度的时间序列进行了分解，分解在时域和频域同时进行，根据每一个尺度的子波系数的模的平方在时域的积分得到壁湍流每一个尺度的脉动动能随尺度的分布，用能量最大准则确定与壁湍流猝发事件的时间尺度对应的能量最大的尺度，该尺度也就是 VITA 法的短时间平均周期 T.

关键词 子波分析， VITA, 猝发，能量最大准则

引 言

用变间隔时间平均法 (Varying Interval Time Average Method, 简称 VITA 法) 检测壁湍流猝发是由 Blackwelder[1] 提出并由 Johansson[2] 加以补充和完善的. 这一方法的检测函数定义如下

$$D(t)=\begin{cases}1 & \widehat{V}_{\mathrm{ar}}(u(t))\geq Ku'^2 \qquad \dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}>0\\ 0 & \end{cases} \tag{1}$$

其中 K 是门限值，一般取值 1.2~2.0, u' 是流向脉动速度的均方根值. $\widehat{V}_{\mathrm{ar}}(u(t))$ 是流向脉动速度短时间平均的方差，其定义如下

$$\widehat{V}_{\mathrm{ar}}(u(t))=\frac{1}{T}\int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}}[u(t)]^2\mathrm{d}t-\left[\frac{1}{T}\int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}}u(t)\mathrm{d}t\right]^2 \tag{2}$$

T 是短时间平均周期.

目前，对于如何确定 VITA 法的短时间平均周期 T, 尚没有确定的结论. Blackwelder[1] 指出 T^+ 应该大于 10, 舒玮等 [3] 认为 T^+ 大于 30 以后，检测结果不随 T 变化. 但是， VITA 法是短时间平均，相当于对被积函数进行截止频率为 $1/T$ 的低通滤波，其平均周期 T 也不可能任意大，因为那样会导致短时间平均变为长时间平均，低通滤波的截止频率为零. 因此，对短时间平均周期 T 的选择也应该有一定的范围和一定的客观物理依据，不能只凭经验确定. 图 1

1999-06-08 收到第一稿， 2000-02-16 收到修改稿.
1) 国家自然科学基金 (19732005) 、教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (97005612) 和国家“九五”攀登计划联合资助项目.

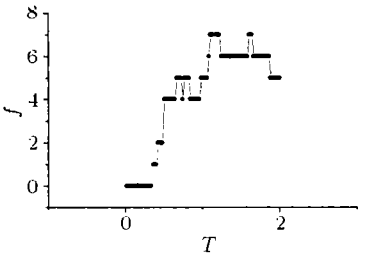

图 1 短时间周期 T 的变化与单位时间内 VITA 法检测到的猝发次数的关系

Fig.1 Number of burst events detected by VITA method as a function of the short time average interval T

为单位时间内 VITA 法检测到的猝发次数随短时间周期 T 的变化，从图 1 中可以看到，VITA 法的短时间平均周期 T 的变化对检测结果有一定的影响. 只有解决了这个问题以后，用 VITA 法检测壁湍流猝发的结果才是准确可靠的.

Bogard 和 Tiederman[4] 认为，用 VITA 法检测壁湍流猝发，是以检测壁湍流猝发中的喷射事件为代表，其物理依据是猝发中的喷射事件在短时间内对脉动动能有很大贡献，喷射发生时短时间内的平均脉动动能应该大于长时间平均脉动动能. 因此，其短时间平均周期应该等于或接近壁湍流的平均喷射时间 $\overline{T}_e$，这时短时间平均 (相当于截止频率为 $1/\overline{T}_e$ 的低通滤波) 的脉动速度信号包含了壁湍流猝发的信号，这样的检测结果才是准确的. 如果 $T < \overline{T}_e$，则低通滤波的截止频率 $1/T > 1/\overline{T}_e$，低通滤波的信号中还含有高频脉动的成分干扰，导致滤波不彻底，影响 VITA 法的检测效果和准确率；反之，如果 $T > \overline{T}_e$，则低通滤波的截止频率 $1/T < 1/\overline{T}_e$，低通滤波会将猝发的信号成分也滤掉了，用 VITA 法检测壁湍流猝发就失去了意义. 因此，VITA 法的短时间平均周期 T 客观上应该等于壁湍流的平均喷射时间 $\overline{T}_e$.

子波分析检测壁湍流猝发事件的能量最大准则 [5] 是采用子波分析的方法，通过对壁湍流流向脉动速度信号进行子波变换，根据子波系数的模的平方研究脉动速度信号的动能随尺度参数 a 的分布，按照能量最大准则选取能量最大的尺度参数 a^*，将该尺度参数 a^* 进行有量纲化得到 VITA 法的短时间平均周期 T

$$T = a^* \Delta_\psi \tag{3}$$

其中 Δ_ψ 是基本子波函数时间窗的半径

$$\Delta_\psi = \frac{1}{\|\psi\|_2}\left\{\int_{-\infty}^{+\infty}(x-t^*)^2|\psi(x)|^2\mathrm{d}x\right\}^{1/2} \tag{4}$$

而 t^* 是基本子波函数 $\psi(t)$ 时间窗的中心

$$t^* = \frac{1}{\|\psi\|_2^2}\int_{-\infty}^{+\infty} x|\psi(x)|^2\mathrm{d}x \tag{5}$$

在这一方法中，VITA 法的短时间平均周期 T 根据能量最大准则确定，没有任何经验门限值，排除了由于人为确定门限值造成的主观随意性，因而是一种比较客观的方法.

1 实验结果

图 2 是在水槽中用热膜测速仪测量得到的平板湍流边界层近壁区域 ($y^+ = 16$) 的流向脉动速度分量的时间序列信号 $u(t)$，采样频率 512 Hz，采样时间 10 s.

图 3 是根据子波系数的模的平方计算脉动速度信号的动能随尺度参数 a 的分布，从图 3 中可以看到，壁湍流流向脉动速度信号的动能随尺度参数 a 的分布是不均匀的，存在着能量最大

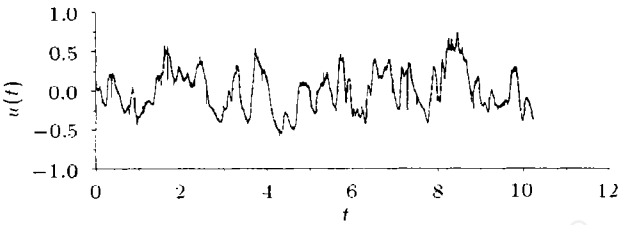

图 2　湍流边界层近壁区域 ($y^+ = 16$) 的流向脉动速度分量的时间序列信号 $u(t)$

Fig.2　Longitudinal fluctuating velocity in the near wall region of a turbulent boundary layer ($y^+ = 16$)

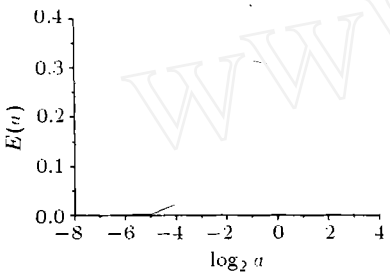

图 3　壁湍流流向脉动速度动能随尺度参数的分布

Fig.3　Contribution evolution of each scale kinetic energy to turbulence across scales

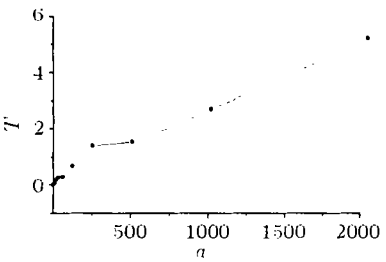

图 4　子波分析的尺度参数 a 与猝发的时间尺度的对应关系

Fig.4　Scale parameter a of wavelet transform as a function of burst event time scale T

的尺度 a^*, 文献 [5] 指出，这种能量最大的尺度的运动正是壁湍流中的猝发过程. 将该尺度参数 a^* 按照 (3) 式进行有量纲化作为 VITA 法的短时间平均周期 T, 就可以客观准确地检测壁湍流在猝发过程中的猝发事件.

图 4 为子波分析的尺度参数 a 与有量纲化的壁湍流中涡的流向时间尺度的对应关系. 从图 4 中可以看到，子波分析的尺度参数 a 与有量纲化的壁湍流中涡的流向时间尺度成线性关系. 其中 a^* 对应的有量纲时间尺度 $T = a^*\Delta_\psi = 2^*\Delta_\psi = 0.68\,\mathrm{s}$.

图 5 为以 $T = a^*\Delta_\psi = 2^8\Delta_\psi = 0.68\,\mathrm{s}$ 作为 VITA 法的短时间平均周期 T 检测壁湍流的猝发过程中的喷射事件的检测结果. 从图 5 中可以看到，以 $T = a^*\Delta_\psi = 2^8\Delta_\psi = 0.68\,\mathrm{s}$ 作为 VITA 法的短时间平均周期，可以将每一次猝发事件准确客观地检测出来，排除了由于人为确定 VITA 法的短时间平均周期造成的检测结果主观任意性.

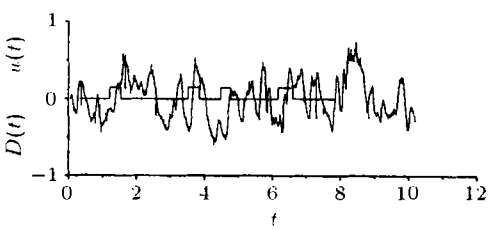

图 5　VITA 法检测壁湍流的猝发事件

Fig.5　Detection results by VITA method

2 主要结论

在各种条件采样方法中，VITA 法是一种重要的条件采样方法，在相干结构的检测中得到了广泛的使用. 但是，和其它条件采样方法一样，单独使用 VITA 法也存在着一定的局限性，通过研究我们发现，用 VITA 法检测壁湍流相干结构目前存在如下几个有待解决的问题:

(1) 如何客观地确定条件采样的门限 和其它条件采样方法一样，VITA 法也需要 1 个门限值才能得出确定的结论，门限的选取对检测结果有很大影响. 门限值较小时，会增加相干结构的误判; 门限值较大时，会增加相干结构的漏判. 现在对门限的选取主要依靠以往的经验积累，导致实验结果的差异较大.

(2) VITA 法的归组问题 用 VITA 法检测壁湍流相干结构是以相干结构的喷射事件为典型特征，而根据 VITA 法的检测结果与流动显示的录像对比，在同一个相干结构发展的过程中可以有不止一次的喷射发生，特别是在加热的壁面上这种现象尤为突出. 目前解决这一问题的方法是基于人为的经验，缺乏客观性. 对于不同的实验条件，不能普遍适用.

(3) 如何确定 VITA 法的短时间平均周期 T Blackwelder[1] 指出 T^+ 应该大于 10, 舒玮等 [5] 认为 T^+ 大于 30 以后，检测结果不随 T 变化. 但是，VITA 法是短时间平均，其平均周期 T 也不可能任意大. 因此，对短时间平均周期 T 的选择也应该有一定的范围和一定的客观物理依据，不能只凭经验确定.

根据以上分析，现有的 VITA 法本身具有一定的局限性，单用 VITA 方法不能解决客观识别壁湍流相干结构的问题.

检测壁湍流相干结构的另一类方法是相关分析技术 [6]、如子波分析技术 [5] 、自相关技术 [7] 、数字滤波技术 [8] 等. 检测壁湍流猝发平均周期 $\overline{T}_B$ 的自相关法 [7] 是根据统计平均的理论客观地检测壁湍流猝发平均周期的方法. 它根据湍流近壁区流向脉动速度的自相关函数达到第一个极大值对应的延迟时间为壁湍流猝发的平均猝发周期 $\overline{T}_B$. 在这一方法中，平均猝发周期 $\overline{T}_B$ 是根据信号的自相关函数计算确定，没有任何经验门限值，排除了由于人为确定门限值造成的主观随意性，因而是一种比较客观的方法. 因此，将自相关法和 VITA 法结合起来，客观确定 VITA 法的门限值，使其既具有自相关法的客观性，克服 VITA 法由于人为确定门限 K 造成的主观性，又能实时检测壁湍流的猝发过程 [9].

为了解决 VITA 法的归组问题, 姜楠等 [10] 提出了用子波分析的变间隔时间平均法 (Wavelet Varying Interval Time Average Method, 简称 WVITA 法) 检测壁湍流猝发的方法. 其基本思想是直接用子波变换代替 VITA 法中的短时间平均

$$W[u(b)] = \frac{1}{a}\int_{-\infty}^{+\infty} u^2(t)\overline{\psi}\Big(\frac{t-b}{a}\Big)\mathrm{d}t - \left[\frac{1}{a}\int_{-\infty}^{+\infty} u(t)\overline{\psi}\Big(\frac{t-b}{a}\Big)\mathrm{d}t\right]^2 \tag{6}$$

用 (6) 式代替 (2) 式中的 $\widehat{V}_{\mathrm{ar}}(u(t))$. 其中尺度参数 a 是根据子波系数计算能量随尺度分布时能量最大对应的尺度 [6], 它代替 VITA 法中的短时间平均周期 T. 结果表明，WVITA 法可以很好地解决 VITA 法的归组问题，欲知细节的读者可以查阅力学学报英文版 (参考文献 [10]).

总之，将自相关法、子波分析法等方法与 VITA 法结合起来，可以对 VITA 法进行改进，克服 VITA 法自身的不足，客观地检测壁湍流猝发事件.

参 考 文 献

1 Blackwelder RF, Kaplan RE. On the wall structure of the turbulent boundary layers. *J Fluid Mech*, 1976, 76: 89~112

2 Johansson AV, Alfredsson PH. On the structure of turbulent channel flow. *J Fluid Mech*, 1982, 122: 295~314
3 Shu W, Tang N. Burst frequency in turbulent boundary layers. *Acta Mechanica Sinica*, 1988, 4(4): 291~303
4 Bogard DG, Tiederman WG. Burst detection with single-point velocity measurements. *J Fluid Mech*, 1986, 162: 389~413
5 姜楠，舒玮. 壁湍流相干结构的辨识. 实验力学，1996, 11(4): 494~500 (Jiang Nan, Shu Wei. The identification of coherent structure in wall turbulence. *Journal of Experimental Mechanics*, 1996, 11(4): 494~500 (in Chinese))
6 姜楠，王振东，舒玮. 子波分析辨识壁湍流猝发事件的能量最大准则. 力学学报，1997, 29(4): 406~412 (Jiang Nan, Wang Zhendong, Shu Wei. The maximum energy criterion for identifying burst events in wall turbulence using wavelet analysis. *Acta Mechanica Sinica*, 1997, 29(4): 406~412 (in Chinese))
7 姜楠，王振东. 用自相关法检测壁湍流平均猝发周期. 实验力学，1995, 10(4): 343~348 (Jiang Nan, Wang Zhendong. Detection of average burst period in wall turbulence by means of auto-correlation. *Journal of Experimental Mechanics*, 1995, 10(4): 343~348 (in Chinese))
8 汪健生，张金钟，舒玮. 提取壁湍流相干结构的数字滤波法. 力学学报，1995, 27(4): 398~405 (Wang Jiansheng, Zhang Jinzhong, Shu Wei. The digital filter method of extracting the coherent structure in wall turbulence. *Acta Mechanica Sinica*. 1995, 27(4): 398~405 (in Chinese))
9 姜楠，王立坤，李士心等. 用自相关法确定壁湍流相干结构条件采样门限值. 实验力学，1999, 14(2): 165~169 (Jiang Nan, Wang Likun, Li Shixin. Determination of threshold for conditional sampling by auto-correlation method. *Journal of Experimental Mechanics*, 1999, 14(2): 165~169 (in Chinese))
10 Jiang N, Shu W, Wang ZD. Burst event detection in wall turbulence by WVITA method. *Acta Mechanica Sinica*, 2000, 16(1): 29~34

DETERMINATION OF THE SHORT TIME AVERAGE INTERVAL IN VITA METHOD BY MAXIMUM ENERGY CRITERION[1)]

Jiang Nan　　Shu Wei　　Wang Zhendong
(*Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin* 30072, *China*)
(*Chinese Academy of Sciences, Institute of Mechanics LNM, Beijing* 100080, *China*)

Abstract　Wavelet transform is introduced to determine the short time average interval T of VITA incorporating burst event detection in wall turbulence. To determine the short time average interval T of VITA, Wavelet transform is performed to unfold the longitudinal fluctuating velocity time series measured in the near wall region of a turbulent boundary layer using hot-film anemometer. This unfolding is carried out both in time space and in scale space simultaneously. The splitting of kinetic of the longitudinal fluctuating velocity time series among different scales is obtained by integrating the square of wavelet coefficient modulus in temporal space. The time scale that corresponds to burst events and so is nothing but the short time average interval T of VITA is ascertained by maximum criterion of the kinetic energy evolution across scales.

Key words　wavelet analysis, VITA, burst, energy criterion

Received 8 June 1999, revised 14 February 2000
1) Project supported by National Natural Science Foundation of China (19732005) and National Climbing Project of China.