

文章编号: 1000-8055(2009)10-2169-07

Mur level 法的湍流猝发频率检测技巧

胡海豹, 宋保维, 黄桥高, 刘占一
(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘 要: 针对 mur level 法分析结果易受试验及检测参数影响的问题, 详细探讨了该方法用于湍流猝发频率检测的适应性和提高其检测精度的技巧. 通过对不同法向检测位置、采样频率、采样时间、门限值 L 及附加判定条件下湍流猝发频率的检测和对比分析, 获取了各因素对湍流猝发频率检测的影响规律, 探讨了提高湍流猝发频率检测准确性的可行途径, 并总结了一套基于 mur level 法的湍流猝发频率四步测试方法(试采样、试分析、采样、检测分析).

关 键 词: 猝发; 条件采样技术; mur level 法; 湍流边界层; 风洞
中图分类号: O357 **文献标识码:** A

Research about the techniques of burst detection in turbulent boundary layer with the mur-level algorithm

HU Hai-bao, SONG Bao-wei, HUANG Qiao-gao, LIU Zhan-yi
(School of Marine Engineering,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to resolve the problems that the analysis results of mur-level algorithm were influenced easily by measurement and detection parameters, the adaptability of burst detection in turbulent boundary layer were researched in detail. Through contrast analysis of vertical testing position, sampling frequency, sampling time, boundary-parameter and accessional determinant condition, the influence rules of above factor on burst detection were acquired, and feasible approaches to enhance burst frequency veracity in turbulent boundary layer were discussed. Finally, a four-step method of detecting burst frequency with mur-level algorithm (for sampling, for analysis, sampling, detection analysis) was summarized.

Key words: burst; conditional sampling techniques; mur level algorithm;
turbulent boundary layer; wind tunnel

湍流是比层流更普遍的流体力学现象, 高速运动物体外部绕流及尾迹、燃气喷流、大气、海洋、江河流动等都存在湍流流动. 由于湍流运动的复杂性, 自 1883 年雷诺发现湍流流动至今, 人类一直未能完全认识湍流的物理本质, 建立一套完善的湍流数学模型. 这使得许多湍流控制技术(如湍流减阻、降噪技术等)的研究难度很大, 需要开展

大量的各类实验研究工作. 目前湍流测试手段主要包括热线/热膜试验、LDV(激光多普勒速度仪)试验、PIV(粒子成像测速仪)试验等, 这些试验手段能够获得湍流流场的两类信息: 流场内某位置处瞬时流速随时间的波动规律(如热线试验等), 流场内局部区域某瞬时质点瞬时流速的整体分布情况(如 PIV 试验等). 其中, 第二类信息主

收稿日期: 2008 10 09; 修订日期: 2008 12 09

基金项目: 国家自然科学基金(50835009, 10672136); 全国优秀博士学位论文基金(200148);

西北工业大学科技创新基金(2008KJ02012)

作者简介: 胡海豹(1979-), 男, 河南邓州人, 讲师, 博士生, 主要从事水下航行器设计及水下特种减阻技术研究.

要适用于复杂流场结构(如流场中漩涡结构及分布)的分析;而第一类信息则可以用于对湍流相关结构(如湍流猝发频率、极大湍动能、分形谱等参数分布)的分析,是深入探索湍流控制及湍流物理本质的重要测试项目之一.随着科技的飞速发展,热线、LDV 等单点测试设备的测试能力和精度不断提高,相对落后的湍流相关结构检测和分析方法已成为限制试验研究能力的瓶颈问题.急需改进和提高现有湍流相关结构检测方法的准确度.

湍流猝发频率检测是湍流相关结构检测中的难度较大的检测项目之一.目前检测湍流猝发频率的方法较多,其中条件采样技术(conditional sampling techniques)是最成熟、使用最广的测试方法^[1].条件采样技术以如下概念为基础,即认为原始湍流信号中含有湍流结构(或称为事件)运动足迹的某些特征性质,因而用某种确定的界值将这些特征信号从其他信号中区分出来,并通过条件平均或其他统计方法,得出该事件的运动和动力特征量,包括条件平均模式的形状和大小,事件发生的周期和检测率等.条件采样技术是湍流的随机数据采样技术的一种特殊形式,它是处理高频间歇或高水平湍流信号的检测方法,为识别所要认识的流动结构(如喷射、扫掠等)和给出定量数据提供了有效途径,近几十年来,人们依据自己对湍流结构特征的理解,提出了多种条件采样方法,其中应用最广泛的有第二象限法($(uv)^2$), VITA(variable interval time average, 可变时间间隔平均)法和 murlevel 方法等^[1-2].一般来说,这些方法都至少需要一个可调参数,因此这些方法的检测结果往往差别较大.文献[2]提出第二象限法和 murlevel 法中存在比 VITA 法更宽的门限无关区域,因此前者比 VITA 法优越.本文则以 murlevel 法为例,详细探讨该方法用于湍流流动猝发频率检测的适应性和提高其检测精度的技巧.

1 湍流速度信号测试

1.1 试验设备

1) 小型专用风洞

本文所涉及的小型风洞为直流吸式低速风洞,其运行原理和基本结构与大型直流式风洞相同,主要有进口稳定段、收敛段、发展段、试验段、弯道、风机及出口段等组成(见图 1).该风洞的整体长度约 8 m,其中发展段及试验段均为矩形横截面.为了在试验段形成充分发展的湍流边界层,

在试验段和收缩段之间预留了一个活动接口,可以根据需要调整发展段的长度.该风洞所使用风机为 5 kW 离心式风机,风洞试验段中心最高流速 15 m/s,且通过调节图 1 中的流量调节阀可得到 0~15 m/s 范围内的任意中心流速.本风洞试验段为二维矩形截面,若取上下壁面之间距离 100 mm(即风洞试验段流场高度)作为特征尺度,发展段长度 2 450 mm 与该特征尺度的比值为 24.5.根据水动力学理论(对于圆形管道,长径比至少为 20~40,管道内流动才能达到充分发展的湍流流动),可认为该风洞试验段上下壁面基本达到了形成充分发展湍流边界层的条件.

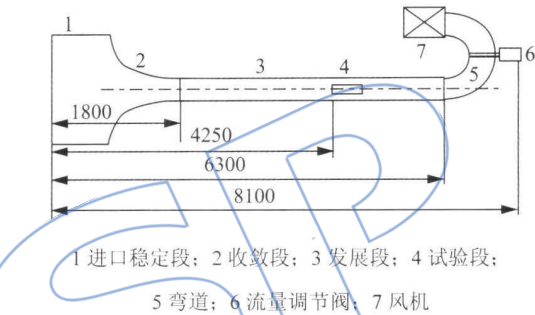


图 1 小型专用风洞示意图
Fig. 1 Sketch of the special minitype wind tunnel

2) 热线测试系统

本文选用了美国 TSI 公司的最新一代恒温式 IFA300 智能型流动分析仪,该型风速仪是一款计算机控制的具有自动频率最佳化功能的热线/热膜风速测试系统.它允许风速仪连续地感受流动速度,并自动调整风速仪电桥,能够实时地实现频率响应最佳化^[3].试验中采用单直丝探头,通过对不同工况下壁面湍流边界层的测量和分析,可获得壁面边界层流场特性.

1.2 测试方法介绍

试验中热线风速仪的具体安装关系如图 2 所示,坐标架放置于风洞试验段壳体上方,热丝探针

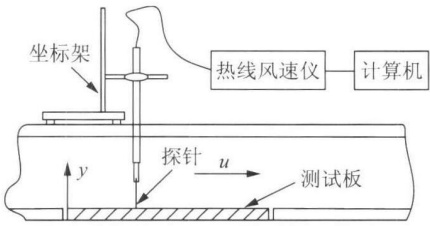


图 2 热线风速仪测试装置示意图
Fig. 2 Sketch of the testing equipment using hot wire anemometer

杆顶端固定在坐标架伸出的活动端并可随坐标架上下精确移动, 移动精度为 0.01 mm, 热丝探针杆末端通过风洞试验段壳体上方预留测试孔伸入试验段内. 测量点分布在图中所示的 y 坐标轴方向上, 跨度范围从下壁面到中心, 共 50 mm. 风洞下壁面有斜线部分试验板, 可调换. 试验中, 采样频率取 50 kHz, 采样时间 20 s, 第一个测量点距壁面 0.25 mm, 然后依次为 0.35, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 2.2, 3.0, 4.0 mm, ..., 直至边界层外, 边界层内的采样点数超过 30 个.

1.3 湍流速度场特性分析

图 3 给出了试验段中心处 5 m/s 风速下流场

测试结果, 其中(a)为流向时均流速沿壁面法向方向的分布曲线, (b)为湍流度沿壁面法向方向的分布曲线, (c)为雷诺正应力沿壁面法向方向的分布曲线. 从图 3(a)中可见, 试验段中心处流向时均流速沿壁面法向分布曲线与典型湍流边界层时均流速分布曲线相一致, 在该曲线上能清晰的分辨出黏性底层、过渡层、对数律层及尾流律层的经典分层结构, 且各层位置和厚度也与已公布的典型湍流边界层时均流速分布曲线基本一致^[4]; 从图 3(b)和(c)中可以看出, 试验段中心处流场的湍流度和雷诺正应力分布曲线沿壁面外法线方向均呈现先上升后下降的趋势, 在距壁面无量纲距离 16.7 处湍流度最大, 最大值约 18.15%, 而最大雷诺正应力约 0.193 Pa, 出现在距壁面无量纲距离 18.8 处. 可见, 最大湍流度和最大雷诺正应力出现位置基本相同, 均位于湍流边界层的过渡层, 这与国内外学者普遍认同的湍流猝发过程主要集中在过渡区的观点相一致^[4]. 由此说明该试验条件下的流场为典型的充分发展湍流流动, 满足本文研究中对湍流流场的要求.

2 Mur level 法的原理及步骤

2.1 Mur level 法的原理

Lu 等人^[5]在测量近壁湍流的雷诺应力时发现, 当流向的脉动速度与其均方根值的比值为-1 时, 瞬时雷诺应力具有最大值, 也就是说, 在此情况下, 湍流对雷诺应力的贡献最大. 据此, Bogard 等人^[6]和 Luchik 等人^[7]便归结出检测相干结构的 mur level 法. Mur level 法的检测函数 $D(t)$ 定义为

$$D(t)=\begin{cases} 1, & \dot{u}' \leqslant -Lu_r \\ 0, & \dot{u}' \geqslant 0.25u_r \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\dot{u}'$ 为脉动速度; L 为门限值, 一般取值 0.5~1.3; u_r 为参考速度.

假定所研究的充分发展湍流边界层符合各态遍历、定常及泰勒假设条件, 则时均流速是指湍流流场中瞬时速度 $u(t)$ 的数学期望, 可通过式(2)所给出的统计平均方法计算

$$\bar{u} = \int_{-\infty}^{\infty} up(u)du = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i = E(u_i) \quad (2)$$

其中 $\bar{u}$ 为湍流边界层内被测点时均流速; $p(u)$ 为瞬时速度 $u(t)$ 的概率密度; u_i 为被采样的瞬时速度序列, $i=1, 2, 3, \dots, N$.

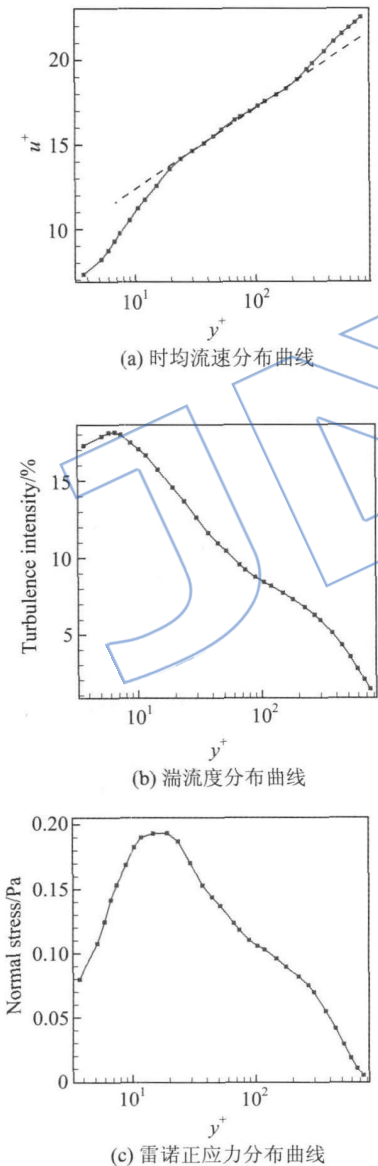


图 3 5 m/s 风速下试验段流场特性

Fig. 3 Profiles of flow parameters of working part in 5 m/s

脉动速度是指湍流流场中瞬时速度与其时均流速的差,脉动速度可采用下式计算

$$u_i' = u_i - \bar{u}$$

(3)

其中 u_i' 为湍流边界层内被测点瞬时的脉动速度.

参考速度定义为测试点处脉动速度的均方根,其统计平均公式如下:

$$u_r = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i'^2 \right]^{\frac{1}{2}} = E^{\frac{1}{2}}[u'^2(t)]$$

(4)

Mur level 法物理意义表示,当相干结构经过测量点时,流向瞬时速度远远小于时均流速,从而出现流速的亏损,这说明底层靠近壁面的低速流体从壁面向外喷射到达测点,使测点当地的流速降低.因此, mur level 法检测的是相干结构中的低速流体从近壁区向外喷射的阶段.

2.2 基于 mur level 法的湍流猝发频率四步测试方法

由于不同流动条件下湍流猝发的频率等流场特性均不相同,试验前难以确定合适的湍流流动采样频率、采样时间等试验参数.因此,采用条件采样技术检测湍流猝发频率是一项反复的试验研究工作.经过一系列的风洞湍流相关结构试验测试研究,这里总结了一套基于 mur level 法的湍流猝发频率四步测试方法.该实施方法主要包括试采样、试分析、采样、检测分析四个步骤(图 4 所示).其中,试分析是最重要的环节,在该环节内通过对试采样阶段获得的湍流流场瞬时速度的深入分析,不仅优化法向检测位置、采样频率、采样时间等测试试验条件,而且确定检测门限值及附加判定条件等以便于后续工作中准确地检测所研究湍流的猝发频率.同样,该实施步骤还可以应用于其他检测湍流猝发频率的条件采样方法.

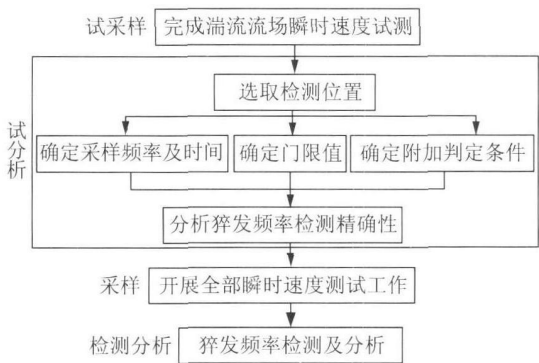


图 4 Mur level 法实施步骤

Fig. 4 Approaches to mur level

3 基于 mur level 法的湍流猝发频率检测技巧

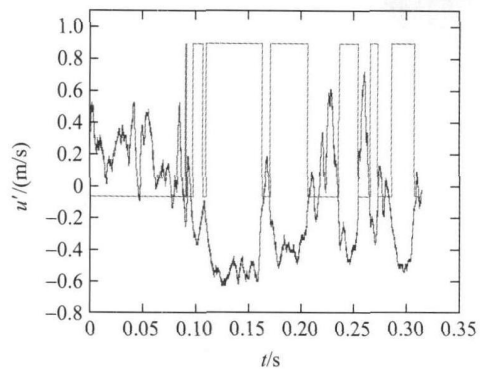
3.1 法向检测位置对检测结果的影响

目前国内外学者普遍认为湍流猝发过程从黏性底层内形成低速条带开始,然后随着低速条带的上升其速度进一步降低,进而逐渐失稳而发生振荡,直至破裂,以一种更为紊乱的形式结束有秩序的振荡,最后被从上游流入的高速流体高速扫掠,带走残余的低速条带^[4].可见,湍流猝发过程波及到边界层内的大片区域.

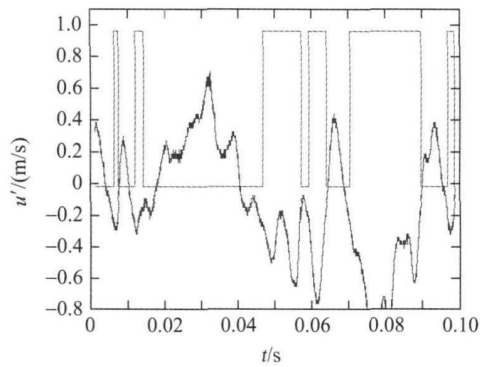
图 5 为不同法向检测位置处基于 mur level 法的湍流猝发检测结果(门限值 L 均取 0.6),从中可以看出,与外层区域相比,黏性底层、过渡层及对数律层内湍流脉动速度波动周期性明显,更便于湍流猝发频率的检测;而由于黏性底层内脉动速度波动周期不稳定,使得在黏性底层内检测到的猝发频率精度较低.图 6 为检测到的猝发频率 f 随法向高度 y^+ 的变化曲线(门限值 L 均取 0.6),从中可见,检测到的猝发频率在黏性底层较小,在过渡层和对数律层基本保持在 50 Hz 左右,而在外层则猛增至超过 300 Hz.经初步分析,作者认为黏性底层内检测到的猝发频率较低的原因,可能在于该区域内一部分低速条带上升至检测点时流速降低程度不足以引起检测函数的反应,而边界层外层区域内低速条带破裂后生成的大量残余低速流可能是造成湍流猝发误判的原因.因此,边界层湍流猝发频率的最佳检测位置位于边界层的过渡层和对数律层.

3.2 采样频率、采样时间对检测结果的影响

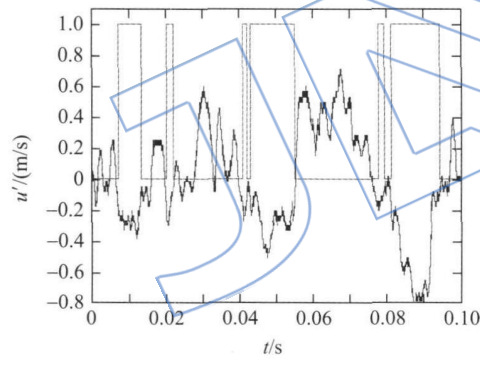
不同的湍流流动具有不同的猝发频率,为准确检测其猝发频率应对应选择合适的采样频率和采样时间.图 7 为检测到的 $y^+ = 14.9$ 处猝发频率 f 随采样频率 f_0 的变化曲线(门限值 L 均取 0.6),从中可以看出,当采样频率 f_0 小于 500 Hz 时,检测到的猝发频率 f 受采样频率 f_0 的影响显著,而当采样频率大于 500 Hz 时检测到的猝发频率基本维持不变.可见,利于湍流猝发准确检测的采样频率应超过 10 倍的湍流猝发频率,大大超出了采样定理(又称 Shannon 定理)中对采样频率的要求(依据采样定理,当采样频率 f_0 大于信号中最高频率 $f_{\max}$ 的 2 倍时,则采样之后的数字信号即可完整地保留了原始信号中的信息,工程上一般取 2.56~4 倍的信号最大频率)^[8],作者认为



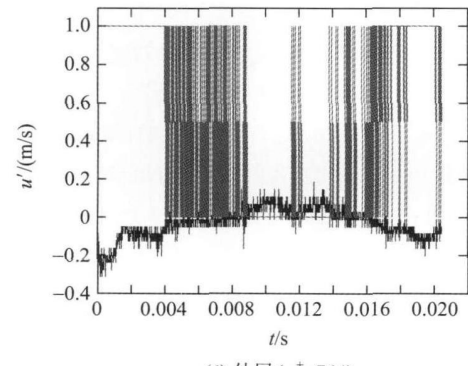
(a) 黏性底层 ($y^+=3.72$)



(b) 过渡层 ($y^+=14.9$)



(c) 对数律层 ($y^+=104.2$)



(d) 外层 ($y^+=744$)

图 5 不同法向位置处湍流猝发检测结果
Fig.5 Measure results of burst detection in variant positions

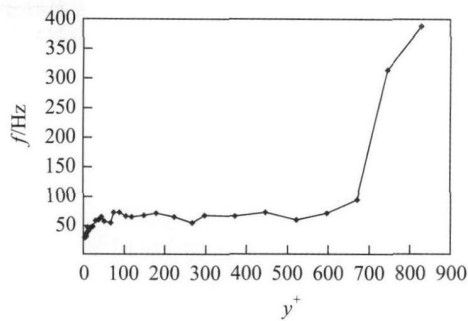


图 6 猝发频率随法向高度的变化曲线

Fig.6 Burst frequency profiles in variant positions

其原因可能在于 mur level 法检测湍流猝发时须同时对比前后多个瞬时速度之间的关系. 图 8 为检测到的 $y^+ = 14.9$ 处猝发频率 f 随采样时间 t 的变化曲线(门限值 L 均取 0.6), 从中可见, 随采样时间的增加, 检测到的猝发频率收敛至约 46 Hz, 当采样时间超过 10 s 后猝发频率受采样时间影响很小. 另外, 随采样频率和采样时间的增长也使得数据处理量相应增加(当采样频率取 50 kHz、采样时间取 20 s 时, 使用 AMD2800+ 处理器、512 M 内存的微机处理采样数据的时间超过 10 h), 因此, 应根据试验精度要求和硬件实际条件, 合理确定采样频率和采样时间.

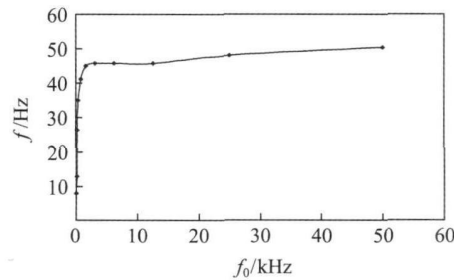


图 7 猝发频率随采样频率的变化曲线

Fig.7 Burst frequency profiles at variant sampling frequencies

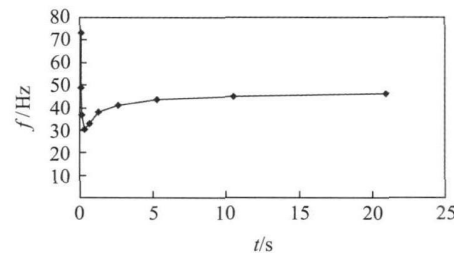


图 8 猝发频率随采样时间的变化曲线

Fig.8 Burst frequency profiles at variant sampling time

3.3 检测门限值及附加判定条件对检测结果的影响

从mur level 法的检测原理可知, mur level 法检测函数 $D(t)$ 中门限值 L 是判定猝发是否发生的关键参数. 图 9 为检测到的 $y^+ = 14.9$ 处猝发频率随门限值 L 的变化曲线, 从中可以看出, 猝发频率 f 随门限值 L 的增大而逐渐变小, 且变化幅度明显. 可见, 门限值 L 是决定是否将速度波动视为湍流猝发的检测标准, 采样不同的检测门限值必然获得不同的检测结果. 因此, 对于某一具体的湍流流动, 可根据速度脉动的具体情况设定不同的检测门限值, 但在相同试验条件下检测门限值应取相同值, 如开展随行波与平板表面相同流速下湍流流场猝发频率的对比试验.

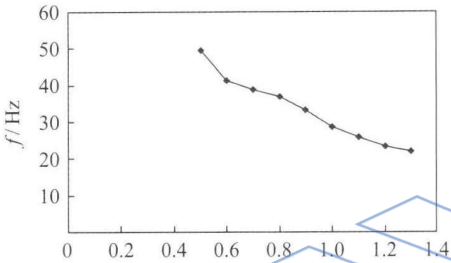
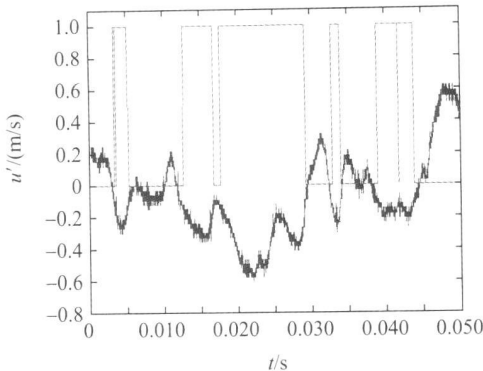
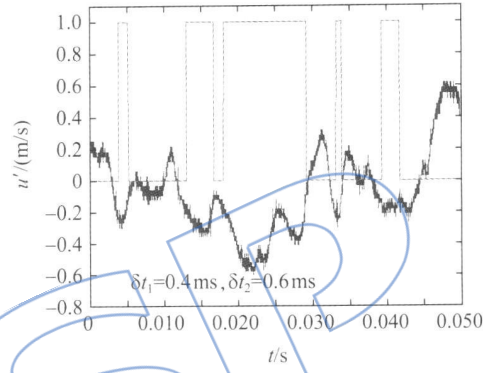


图 9 猝发频率随门限值 L 的变化曲线
Fig.9 Burst frequency profiles at variant boundary parameters

另外, 实验研究中发现, 在源于同一低速条带的湍流猝发过程中, 可能包含一次或多次的湍流喷发事件, 而 mur level 法等传统条件采样方法则可能将同一猝发过程检测为两次或多次猝发. 因此, 须引入一些湍流猝发的附加判定条件, 将传统条件采样方法检测到的喷发事件进行组合与分离. 考虑到实际湍流猝发过程中喷射事件的发生会持续一定的时间, 且两次喷射事件间会存在一定的时间间隔, 本文尝试将湍流猝发过程的这一延时特性作为附加判定条件来消除上述原因引起的误判(即猝发检测函数 $D(t)$ 由 0 变为 1, 且连续维持 δt_1 秒, 记为一次猝发; 同时 $D(t)$ 由 1 变为 0, 且维持不变 δt_2 秒后开始新一轮检测). 本文试验中, 湍流猝发周期 T 约为 25 ms, 经反复试探发现, δt_1 取 0.01T ~ 0.03T, δt_2 取 0.02T ~ 0.05T 即可有效消除同一猝发过程中对多次湍流喷发事件的重复检测(图 10 所示为有无附加判定条件下分析相同采样数据所获得的不同湍流猝发检测结果).



(a) 无附加判定条件



(b) 有附加判定条件

图 10 附加判定条件对湍流猝发检测的影响
Fig.10 Influence of an accessional determinant condition to burst detection

4 结 论

论文基于 mur level 法, 提出一种改进的能准确地检测湍流猝发频率的方法. 该方法由四个步骤组成, 即: 试采样、试分析、采样、检测分析. 通过试采样和试分析可以优化检测位置、采样频率、采样时间等测试试验条件, 以及确定门限值及附加判定条件. 在试验及检测参数的选取过程中, 可应用以下方法提高检测精度的技巧:

- 1) 湍流边界层内过渡层和对数律层是猝发频率的最佳检测位置;
- 2) 与 Shannon 定理中对采样频率的要求不同, 基于 mur level 法准确检测湍流猝发的试验采样频率应不低于湍流猝发频率的 10 倍;
- 3) 门限值 L 是决定是否将速度波动视为湍流猝发的检测标准, 随门限值 L 的增大, 检测到的猝发频率 f 逐渐变小, 且变化幅度明显;
- 4) 将湍流猝发过程的延时特性作为附加判定条件, 可以消除“同一猝发过程检测为两次或多次猝发”的误判.

参考文献:

[1] 孙葵花, 舒玮. 湍流猝发的检测方法[J]. 力学学报, 1994, 26(4): 488-493.

SUN Kuihua, SHU Wei. On the burst detection techniques in wall turbulence[J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 26(4): 488-493. (in Chinese)

[2] 张强, 周济福, 李家春. 基于槽道流 LES 数据库的湍流猝发检测[J]. 中国科学(G 辑), 2005, 35(3): 292-307.

ZHANG Qiang, ZHOU Jifu, LI Jiachun. Turbulent burst detection based on the database of LES results of channel flow[J]. Science in China(Series G), 2005, 35(3): 292-307. (in Chinese)

[3] 盛森芝. 流速测量技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 1987.

SHENG Senzhi. Technology on flow velocity measurement [M]. Beijing: Peking University Press, 1987. (in Chinese)

[4] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 走近湍流[J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 1-8.

ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Chunxiao. Approach to turbulence [J]. Mechanics in Engineering, 2002, 24(1): 1-8. (in Chinese)

[5] Lu S S, Willmarth W W. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1973, 60: 481-511.

[6] Bogard D G, Tiederman W G. Burst detection with single point velocity measurement[J]. J. Fluid Mech., 1986, 162: 389-413.

[7] Luchik T S, Tiederman W G. Timescale and the structure of ejections and bursts in turbulent channel flows[J]. J. Fluid Mech., 1987, 174: 529-552.

[8] 郝建民. 采样定理的内在不自洽性和工程应用的局限性[J]. 导弹与航天运载技术, 1997, (2): 51-57.

HAO Jianmin. The inner self inconsistency and confinement in engineering practice for the sampling theorem[J]. Missiles and Space Vehicles, 1997, (2): 51-57. (in Chinese)