三角翼前缘涡破裂点脉动的实验分析

张明禄 祝立国 吕志咏

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在水槽中和风洞中分别进行了流动显示和动态测压实验,目的是研究三角翼前缘涡破裂点的脉动现象. 对流动显示图片中涡的破裂点位置进行统计和频谱分析,表明破裂点振荡存在双主频特征,位于 0.07 位置的主频对应着螺旋—泡—螺旋的转化过程,位于 0.2 ~ 0.4 之间的主频对应着螺旋形态破裂本身的小幅振动. 对统计的破裂点位置数据做低通滤波后进行相关性分析,还表明了三角翼左右 2 个前缘涡的破裂点位置信号具有负相关性. 进行三角翼表面动态压力测量,对压力数据低通滤波后做相关性分析,发现相同的一条前缘涡的动态压力信号在整个翼面上都具有高度的相关性.

关 键 词: 三角翼; 前缘涡; 破裂点; 脉动; 相关性

中图分类号: V 211.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0635-04

Experimental analysis on oscillations of vortex breakdown location over delta wing

Zhang Minglu Zhu Liguo Lü Zhiyong

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Experiments of flow visualization and dynamic pressure measurement were carried out in a water channel and a wind tunnel respectively to research oscillations of the vortex breakdown location over delta wings. Based on statistics and spectral analysis location of vortex breakdown on video picture of flow visualization , result shows that there are two nondimensional primary frequencies. One of them is equal to 0.07 which is a transition frequency of spiral-bubble-spiral form of vortex breakdown, the other primary frequency is at 0.2 ~ 0.4 which is the oscillation frequency of spiral breakdown location with smaller amplitude. By correlation analysis of statistical breakdown location data it indicates that there is a negative correlation between signals of left and right vortex breakdown location after low pass filter. Based on dynamic pressure measurement of different station along wing surface under the identical vortex, it is found that there is a strong positive correlation between oscillation signals of pressure by low pass filter.

Key words: delta wing; vortex; breakdown location; oscillations; correlation

当三角翼工作在中等迎角以上时,背风面上方形成的一对前缘涡就会发生破裂. 大量的流动显示实验表明[1-7],前缘涡的破裂点会沿涡轴方向前后振动. 这种振动所引发的翼面压力的脉动频率可能会同飞行器的机动频率相耦合[1],引起翼面上非定常气动载荷变化,从而加深了对飞行器稳定性的影响,甚至引起严重的机翼、尾翼抖振. 本文将在流态显示和动态压力测量等实验的基础上,利用信号分析技术,对破裂涡引起的低频振荡信号进行分析,从而确定振荡信号的主要成分和导致它们产生的物理原因.

1 实验设备及模型

流动显示实验是在北航 400 mm×400 mm 水槽中进行的,水流速度在 4 ~ 12 cm/s 之间. 基于

收稿日期: 2005-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10272014);航空科学基金资助项目(01A51041)

作者简介: 张明禄(1979-),男,四川峨眉山人,博士生, zhangminglu@ase.buaa.edu.cn.

机翼根弦长试验雷诺数在 5×10^3 ~ 1×10^4 之间. 流动显示实验使用荧光素钠及墨水作为显示剂,使用 CCD 摄像头获得涡核破裂连续变化的图像. 动态压力测量实验是在北航 D1 风洞内进行. 基于根弦长的实验雷诺数约 3×10^5. 动态压力测量使用商用 NS-B 的小型动态压力传感器,传感器具有 20 ~ 20 000 Hz 频响范围,实验中涉及的所有准周期脉动频率都位于传感器动态频响范围之内,实验中以 10 000 Hz 的频率采集数据.

选用了前缘后掠角分别为 50°,65°,70°,75° 的 4 个三角翼模型,为了避免对涡流场的影响,流动显示模型采用了下表面支撑方式,模型外形示意图见图 1.

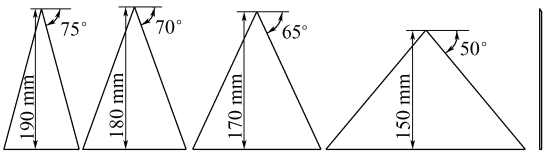


图 1 实验模型图

2 实验结果及讨论

2.1 流动显示实验的研究讨论

染色液显示实验中,观察到通常情况下一对前缘涡的破裂点位置并不对称,而且存在交替的上下振动[2],如图 2 所示为左右破裂点在某一时刻相距约 5% 根弦长. 研究中对 75°后掠三角翼的 3 个迎角状态统计了破裂点的位置,采样时间约为 $50C/U_\infty$ (C,U_∞ 分别为根弦长和来流速度),采样点约 400 个. 在采集到的图像上读取破裂点的像素值,读取误差值约为 $0.01C$. 图 3 给出了统计得到的原始破裂点位置的时间历程. 比较 45°迎角和 49°迎角的统计结果,可以发现,随着迎角的增大,破裂点沿涡轴方向振动的振幅也随之增大.

进一步对所得到的破裂点位置的时间历程进行傅里叶变换,转换时域信号为频域信号,进而对其中的频率成分进行分析. 图 4 是傅里叶变换得到的 2 个迎角下的频率谱.

2 个频谱中都存在 2 个主频,分别约为 0.07 和 0.17. 相比起来,位于 0.07 位置的主频具有较

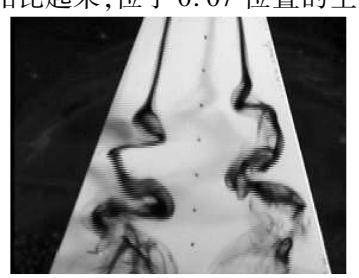


图 2 75°后掠,45°迎角下前缘涡破裂点的不对称流态

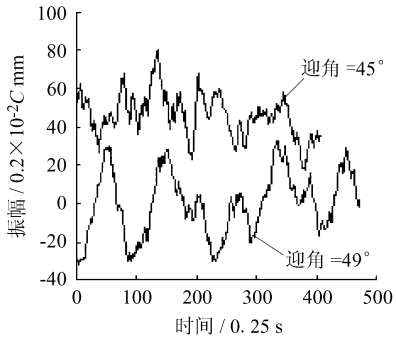
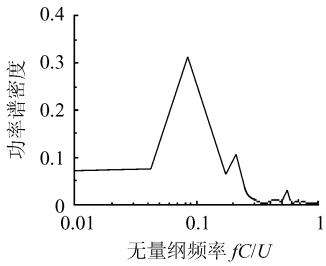
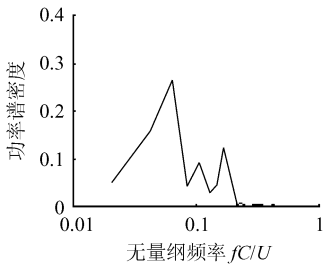


图 3 不同迎角下 75°后掠三角翼破裂点位置的时间历程



a 45°迎角



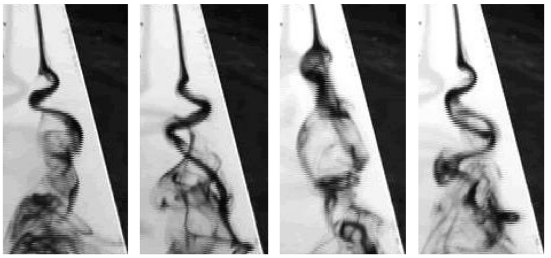
b 49°迎角

图 4 75°后掠三角翼各迎角下的频谱图

高的能量密度和较大的带宽,所以破裂点振动的能量主要集中在 0.07 位置的主频上. 从图中还可以发现,随着迎角增大,主频的能量密度突出,说明破裂点振动的周期性在增强.

为了分析破裂点振动的双主频特性,对所有实验状态下的图像进行分析后发现,破裂点位置的大幅度上移,通常是对应泡状的破裂状态. 破裂位置小振幅的波动,通常是对应螺旋破裂状态. 图 5 给出了 75°后掠三角翼 45°迎角的几个典型的流动显示图片,可以看到,第 2 幅虽然保持了 4 s 前的螺旋状态,但是破裂点位置已经下移,但是幅度不大. 到了 12 s 时候,出现泡状破裂形态,破裂点大幅上移约 6% (相对于第 1 幅). 到了 16 s 时候,重新回复螺旋破裂状态,并且破裂点回复到第 1 张图片的位置.

为了进一步研究大、小振幅振荡所对应的频率特性,对 75°后掠三角翼 40°迎角下取得的破裂点时间历程进行了滤波-傅里叶变换分析,进行滤



a　t=4 s　　b　t=8 s　　c　t=12 s　　d　t=16 s

图 5　75°后掠,45°迎角不同时刻的流动显示图片

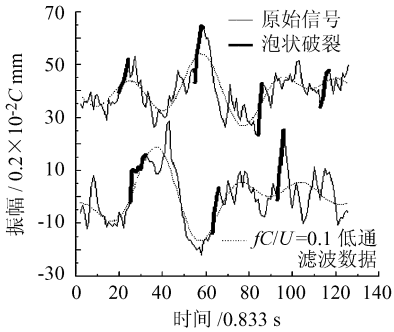
波的门槛值频率为 fC/U=0.1(f 为频率). 经过低通滤波以后,得到如图 6a 中间断线所示的低频波形,具有良好周期性,振幅较大. 图 6a 中粗线段代表泡状破裂的状态,图中可以看到,泡状破裂对应着破裂点的大幅度上移,也正好对应着低频波形的上升的一边. 对左侧低通滤波之后的信号进行傅里叶变换,如图 6c 所示,0.074 位置具有主频. 这说明,螺旋—泡—螺旋的转换过程伴随着破裂点的大幅振动,而且这个大幅度的破裂点位置振动是准周期的,无量纲频率约为 0.08.

原始信号经过高通滤波之后,呈现为较高频的、振幅较小的振动信号,如图 6b 所示,从流动显示可知,这些较高频率的振动是发生在螺旋形态破裂状态下. 对高通滤波之后的信号进行傅里叶变换之后,在无量纲频率 0.1 ~0.3 之间具有能量的峰值,如图 6d 所示. 这说明,当前缘涡破裂保持螺旋形态,破裂点还是存在振荡,只是这种振动幅度较小,频率较高. 还要提及的是,在图 6d 中,在无量纲频率高于 1 的频率上还存在小的能量密度,相信是由于获得原始数据的读图误差造成的.

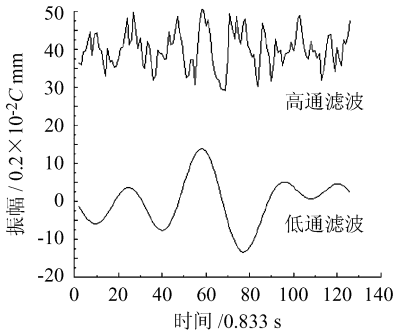
还要提及的是,一对前缘涡的破裂点的位置的时间历程是负相关的,如图 7 所示的左右破裂点位置时间历程类似镜像分布,左右破裂点位置的相关系数为-0.36. 对破裂点位置时间历程以 fC/U=0.1 为门槛值进行滤波后发现,低通滤波之后形成的低频波动信号,左右相关系数为-0.59,其绝对值远大于原始信号的相关值. 而经过高通滤波之后的信号,左右相关值只有 0.021. 这个分析说明,左右破裂点位置的负相关性来源于低频的波动,也就是来源于螺旋—泡—螺旋的交替引发的大幅度振荡. 而螺旋破裂状态下破裂点小幅度的振动,左右没有任何相关性. 下文对动态压力信号的分析将表明,同侧不同弦向位置,即使是螺旋破裂状态下的小幅度振动,也有很强的正相关性.

2.2　动态压力测量的分析讨论

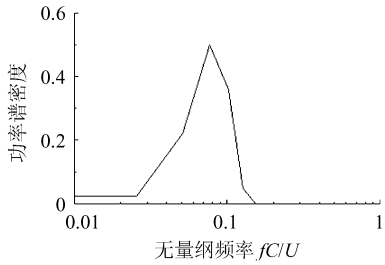
为了研究破裂点脉动的产生机理,对 65°后



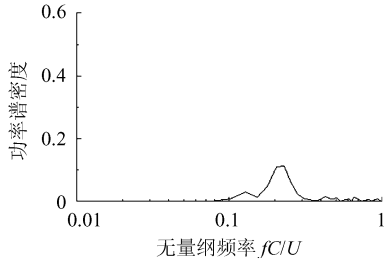
a　两侧原始信号低通滤波



b　左侧信号高通与低通滤波



c　左侧信号低通滤波后频谱图



d　左侧信号高通滤波后频谱图

图 6　破裂点振动位置信号的滤波-傅里叶变换分析

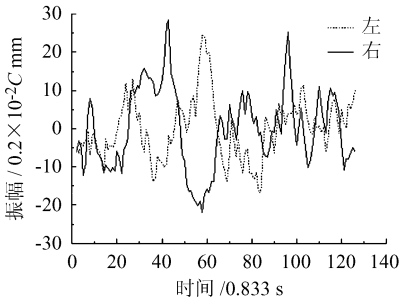
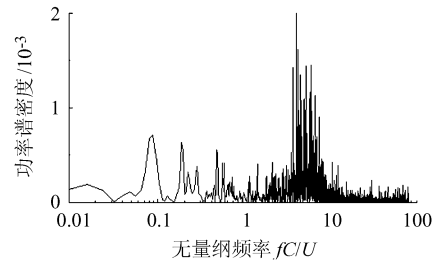
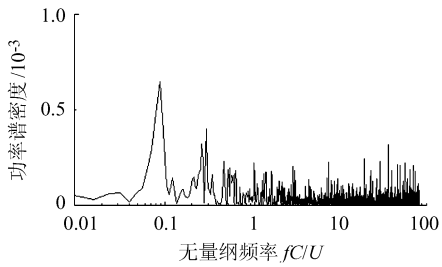


图 7　75°后掠,40°迎角破裂点位置时间历程

掠三角翼绕流进行了动态压力相关测量. 在涡轴通过的轨迹上,在 0.64C ~0.92C 之间每间隔 4% 布置一个压力测量点,分别进行 0.64 对应 0.68, 0.64对应 0.72,0.64 对应 0.76,0.64 对应 0.8, 0.64对应 0.84,0.64 对应 0.88,0.64 对应 0.92 一系列的相关测量. 选取 24°迎角状态进行分析. 65°后掠三角翼,24°迎角下,0.64C ~0.92C 之间包含了前缘涡破裂过程. 图 8 是 65°后掠三角翼, 24°迎角下,0.64C ~0.92C 之间的几个频谱,0.84 弦向位置的频谱中,约 3 的位置存在主频,这个主频是前缘涡破裂后形成的螺旋波的主频[7],说明这个位置涡已经破裂. 而 0.64 位置的频谱图中, 没有发现螺旋波主频的存在,说明涡未破. 在这个三角翼状态下,可以全面分析涡破裂点位置振动频率在破裂点前后的特性和关系.



a $x/C=0.84$



b $x/C=0.64$

图 8 65°后掠,24°迎角,不同弦向位置压力频谱图

为了分析破裂点位置振动的低频信号,对所有动态压力数据以无量纲频率 0.4 为门槛值进行了低通滤波,所得到的滤波信号及相关系数如表 1 所示. 虽然因为螺旋波存在的影响,使得原始信号的相关值普遍低于 0.2,但是经过低通滤波,将螺旋波的影响消除以后可以发现,低频信号具有几乎一致的波形起伏,具有很高的相关性. 这说明,破裂点位置振动的频率在三角翼面绕流中具有全局性、同时性. 全局性是指无论破裂点前后, 都存在这个主频;同时性是指破裂点前后低频波形起伏一致,相位差接近 0. $x/C=0.64$ 和 $x/C=0.88$ 及 0.92 的相关值比其他的稍低,是因为螺旋尾流快速湍流化造成的.

表 1 65°后掠,22°迎角各弦向位置与 $x/C=0.64$ 的相关系数

弦向位置	0.68	0.72	0.76	0.8	0.84	0.88	0.92
相关系数	0.71	0.84	0.72	0.92	0.79	0.68	0.68

图 9 是 $x/C=0.64$ 位置滤波后信号的频谱,其他的弦向位置也有类似的分布,从频谱中可以看到约 0.07 位置有能量密度的峰值,在 0.1 ~0.4 位置上有小的峰值存在,这个分布和上面流动显示统计分析的结果一致.

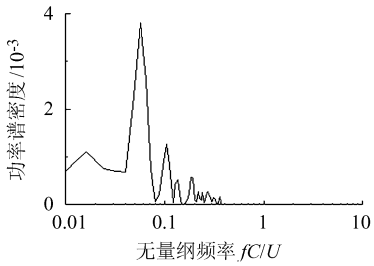


图 9 $x/C=0.64$ 位置的频谱图

进一步对$fC/U=0.4$ 低通滤波之后的信号进行$fC/U=0.1$ 滤波分析后发现,低于$fC/U=0.1$的低频波动相关值达到 0.9 左右,高于$fC/U=0.1$ 的信号相关值也在 0.6 左右.

3 结 论

1) 利用流动显示的实验手段,配合统计学和信号分析的方法,对破裂点振动现象进行了研究. 分析认为,破裂点振荡存在双主频特征,位于0.07 位置的主频对应着螺旋—泡—螺旋的转化过程, 位于 0.2 ~0.4 之间的主频对应着螺旋形态破裂本身的小幅振动.

2) 和螺旋—泡—螺旋转化相关的破裂点大幅度振荡对三角翼绕流的影响是全局的,前后具有高度的统一性. 这种破裂点大幅度振动,三角翼左右 2 个前缘涡具有负相关性,说明 2 个前缘涡互相影响可能是破裂点大幅度振动的原因. 对应于螺旋破裂状态下破裂点小幅度振动的$fC/U>0.1$ 的高通信号,左右没有任何相关性,说明这种小幅度振动可能是由于一个独立涡的某些机理引发.

(下转第 679 页)