

轴对称钝体前缘分离剪切层的非线性行为

董宇飞

(中国科学院力学研究所)

摘要 实验研究了锐前缘轴对称钝体前缘分离剪切层发展演化的动力学过程,以及分离剪切层与外加声激励之间的非线性作用. 研究表明,自然状态下,存在着亚谐频现象,分离剪切层的演化发展是通过涡合并方式实现的. 从分离到再附,层流分离剪切层一般经过2次涡合并过程,湍流分离剪切层一般经过5次涡合并过程. 混沌动力学分析表明,层流分离剪切层是经过Hopf分岔和周期倍分岔途径进入混沌状态的. 此外,讨论了分离剪切层对外加声激励的响应.

关键词 分离流动; 激励; 共振; 锁频

分类号 O 354.1

分离再附流动是典型的剪切流动,具有实际工程意义. 该流动具有固定的分离点或分离线,保留了许多流体运动的复杂性,得到广泛的研究. 但以往的研究多集中于二维锐前缘平板^[1~4],二维后向台阶^[5,6],T型结构^[7]及二维翼型^[8,9]等,轴对称钝体的情况研究较少^[10~12],且主要侧重于平均流场的测量,如分离泡的再附长度,压力分布及分离流场的湍流性质等,很少涉及分离剪切层演化发展的动力学过程. 本文分别研究自然状态和声激励状态下分离剪切层演化发展的动力学过程,以及分离剪切层与外加声激励的非线性作用.

1 实验装置与测量系统

实验在北京大学低湍流风洞中进行. 风洞为直流、闭口吸入式. 风速在0.05~20 m/s内连续可调. 实验段横截面积0.3 m × 0.8 m,长3.2 m,风洞来流湍流度低于0.08%.

模型为90°锐前缘轴对称钝体,长度为350 mm,直径为80 mm,有机玻璃制成. 模型在流场中与来流平行放置,如图1所示,定义模型前缘点(x, y)的坐标为(0, 0),x轴沿流向方向,y轴沿法向方向. 基于模型的阻塞比为2.1%,本文无需对实验结果进行阻塞度的修正.

激振系统由喇叭、功率放大器及信号发生器3部分组成. 喇叭直径为72 mm,功率4 W. 喇叭前面有1块厚为2.4 mm的有机玻璃档片,档片与模型主体之间有一2 mm的缝隙,扰动通过缝隙作用于外部流场. 喇叭的输出信号由XFD-7A型低频

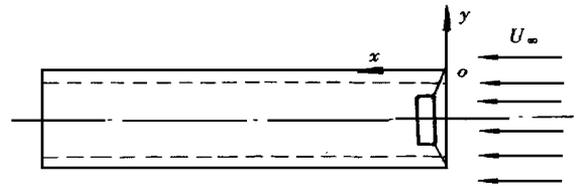


图1 流场结构及模型示意图

信号发生器控制,输出信号频率范围在20~5 000 Hz之间,一功率放大器与喇叭相连保证其有一个稳定的输出.

采用TSI公司的1050A型恒温式热线热膜风速仪和TSF1210型标准单丝对流场进行测量,信号经A/D转换器后输入计算机进行频谱分析.

2 自然状态分离剪切层发展演化

2.1 层流分离剪切层演化发展

轴对称平头钝体前缘分离剪切层在 $Re = 2.8 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^4$ 的范围内属于层流分离剪切层^[13]. 沿x方向分为3个区: 区为K-H不稳定波演化发展区,在该区域,K-H波的频率不变,但振幅随着向下游演化发展是增加的; 区为涡的演化发展及相互作用区,涡的发展主要是以涡合并的方式来实现的; 区为涡与壁面作用后流体的演化发展区,涡与壁面作用后流体运动非常混乱,其在频谱上反映为宽谱.

表1给出了典型层流分离剪切层的频谱演化情况($Re = 2.8 \times 10^3$). 该雷诺数下, 区位于 $0.0 < x/D < 1.0$ 之间,此时K-H不稳定波的频率

f_n 为 2.2 Hz. 在该区域, K-H 波的频率不变,但其振幅随分离剪切层的演化发展是增加的. 区位于 $1.0 < x/D < 2.0$ 之间,是涡与涡的相互作用区. 该区域存在的亚谐波现象表明,涡的发展主要是以涡合并的方式来实现的. 再附区向下是 区,该区域涡与壁面作用后流体运动非常混乱,其在频谱上反映为宽谱,表明流体运动处于混沌状态.

表 1 层流分离剪切层的频谱演化

($Re = 2.8 \times 10^3$)

x/D	y/D	f_n/Hz
0.5000	0.35	2.20
0.6900	0.43	2.20
0.8800	0.43	2.20
1.0600	0.43	2.20
1.1875	0.43	1.10
1.3100	0.43	1.10
1.4400	0.43	1.10
1.8850	0.43	0.55
2.1300	0.43	0.55

从分离到再附,层流分离剪切层一般经过 2 次涡合并过程.

2.2 层流分离剪切层演化发展的混沌分析

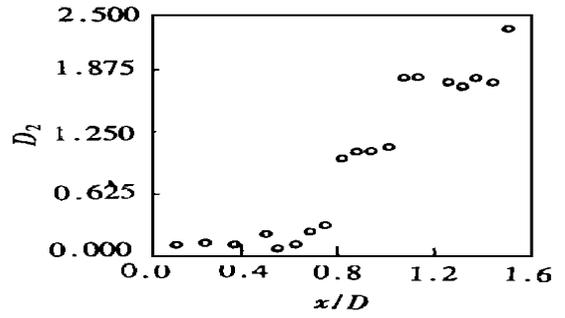
图 2a~c 为层流分离剪切层相关维数, Lyapunov 指数和相关熵沿流向的变化情况.

如图 2a 所示,当 $x/D < 0.8$ 时,考虑到外界噪音的影响,相关维数可视为 0;在 $0.8 < x/D < 1.0$ 的范围内,相关维数在 1.0 左右;在 $1.0 < x/D < 1.4$ 的范围内,相关维数在 1.80 左右. 在 $x/D = 0.8$ 处,相关维数由零剧变到 1.0. 流动显示^[13]表明此时剪切层的波动变得明显, A/D 采样信号则由近似一条直线变为周期信号,在相空间由一个不动点变成了极限环,发生了 1 次 Hopf 分岔. 在 $x/D = 1.04$ 处,相关维数由 1.0 剧变到 1.80,流体运动进入混沌状态. 结合层流分离剪切层功率谱的演化发展,可知其是通过 Hopf 分岔和周期倍分岔途径进入混沌状态的.

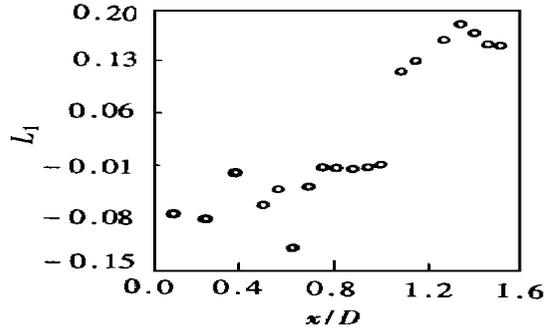
从图 2b 看出,在 $x/D < 1.0$ 时, Lyapunov (L_1) 指数是 < 0 的,当 $x/D > 1.0$ 时, Lyapunov 指数急剧地变为 > 0 ,表明流体运动进入了混沌状态. 图 2c 表明相关熵 (K_2) 沿着 x 方向是增加的,当 $x/D < 0.8$ 时,相关熵处于 10^{-3} 的量级,在 $0.8 < x/D < 1.4$ 的范围内,相关熵在 10^{-2} 的量级,增大了 1 个量级,与流场显示一致^[13].

2.3 湍流分离剪切层的演化发展

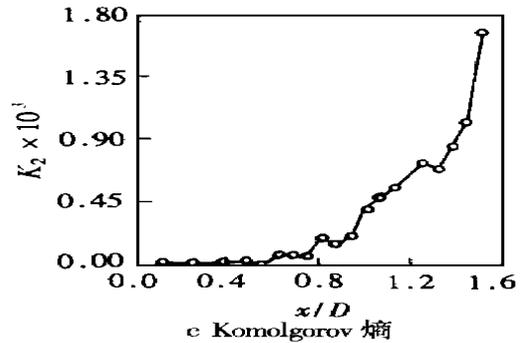
锐缘轴对称钝体分离剪切层在 $Re = 3.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ 的范围内属于湍流分离剪切层^[13]. 表 2 是典型湍流分离剪切层的频谱演化情况.



a 相关维数



b Lyapunov 指数



c Komolgorov 熵

图 2 动力学指标沿分离剪切层的变化, $Re = 2.8 \times 10^3$

表 2 湍流分离剪切层的频谱演化

($Re = 3.2 \times 10^4$)

x/D	y/D	f_n/Hz
0.0125	0.0688	1080
0.7500	0.2000	540
0.2000	0.2500	270
0.6000	0.3500	135
0.8750	0.4000	65
1.4380	0.4000	30
1.5630	0.4000	30
2.5000	0.4000	30
4.3750	0.4000	30

湍流分离剪切层的频谱演化同样存在着亚谐波——周期倍分岔现象(表 2). 从前缘分离点开始,一直到再附点附近,分离剪切层中心峰值频率沿着流向逐渐减半,最终达到分离泡再附区大尺度旋涡脱落频率. 频谱测量表明,湍流分离剪切层

的演化发展同样是通过涡合并方式实现的,从分离到再附一般经过5次涡合并过程.

3 外加声激励与分离剪切层的非线性作用

分离剪切层对外加声激励的响应是十分复杂的问题.大量数据分析表明,许多情况下,分离剪切层的响应频率尽可能接近分离剪切层特征频率.如图3所示,该位置自然状态下的特征频率大约为640 Hz(图3a),当外加声激励频率 $f_e = 250$ Hz时,由于外加激励频率的二倍谐波更接近分离剪切层的特征频率,响应频率选择了外加声激励频率二倍谐波500 Hz(图3b);同理,当外加声激励频率 $f_e = 600$ Hz时,分离剪切层的响应频率选择了外加声激励的基频600 Hz(图3c);当外加激励频率 $f_e = 1400$ Hz时,因其亚谐波更接近分离剪切层的特征频率,故功率谱中亚谐波占优(图

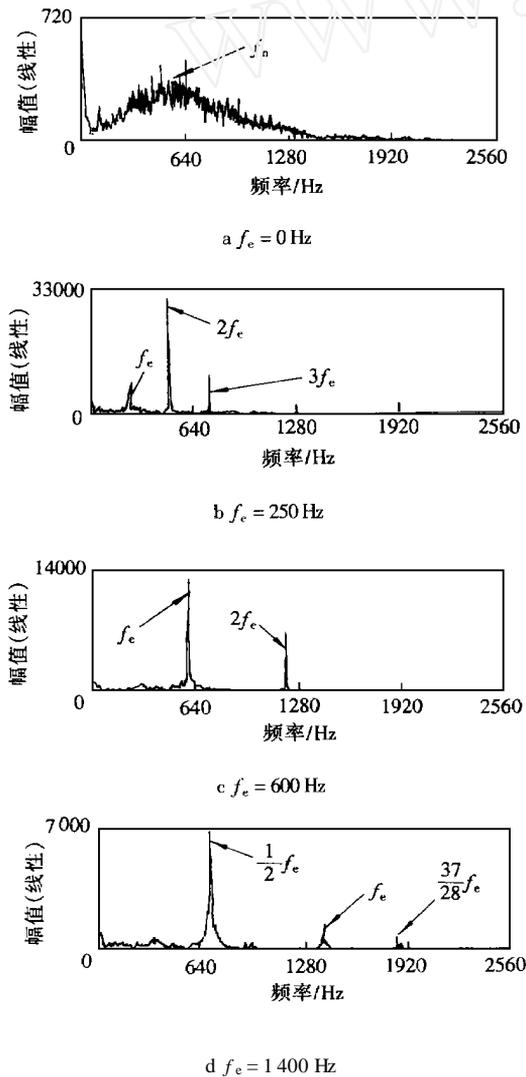


图3 分离剪切层对外加声激励的响应

$e = 6.4 \times 10^4$, 测量位置 ($x/D = 0.0875, y/D = 0.125$)

3d).

值得注意的是,当声激励频率高于自然频率的4倍时,占优的仍为外加声激励频率的亚谐波,而不是1/4谐波,这可能与扬声器的功率有关(图4a~b).

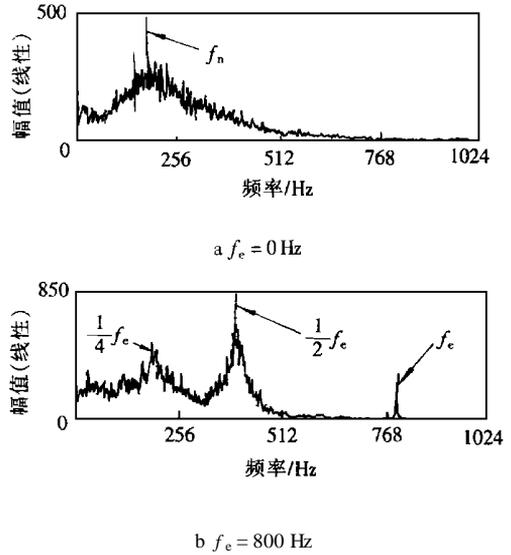


图4 分离剪切层对外加声激励的响应

$e = 6.4 \times 10^4$, 测量位置 ($x/D = 0.375, y/D = 0.318$)

分离剪切层对外加声激励的响应并不完全遵循这个规律,如图5所示.但其中是否包含有声激励与风洞共振模式成分仍需进一步研究.其中可能蕴含着 Devil's Staircase 现象.图中 $S_t = (f_e \cdot D) / U$.

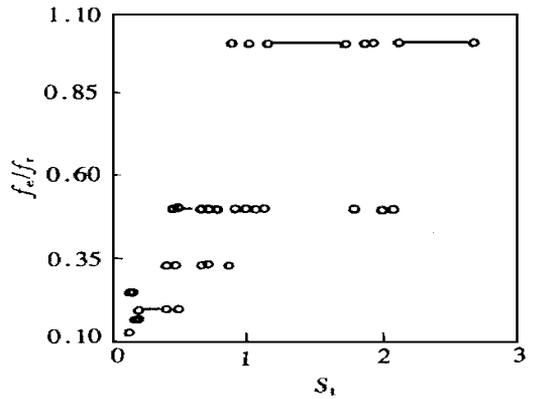


图5 分离剪切层与外加声激励之间的非线性作用

$Re = 6.4 \times 10^4$, 测量位置 ($x/D = 0.375, y/D = 0.318$)

虽然分离剪切层对外加声激励的响应很复杂,但响应频率 f_r 与激励频率 f_e 之间的关系主要有3种模式:(1) f_r 选择 f_e 的基频, $f_r = f_e$; (2) f_r 选择 f_e 的高次谐波, $f_r = m f_e$; (3) f_r 选择 f_e 的亚谐波, $f_r = \frac{1}{2} f_e$, m 为正整数.

声激励状态下,分离剪切层的频谱演化发生了很大的改变.从分离点到再附区上游是外加声激励频率占优,它表明外加声激励频率沿流向的影响范围与分离剪切层的尺度相当.由此可以推断,在声激励控制分离流动的过程中,分离剪切层起着至关重要的作用.声激励状态下分离泡再附长度减小,大尺度旋涡脱落频率提高,表明分离泡大尺度旋涡脱落频率与分离泡再附长度成反比,Cherry^[3]在研究矩形柱体产生的分离流动时发现过类似的现象.

4 结 论

1) 从分离到再附,层流分离剪切层一般经过 2 次涡合并过程,而湍流分离剪切层一般要经过 5 次涡合并过程.

2) 层流分离剪切层是通过 Hopf 分岔和周期倍分岔途径进入混沌状态的.

3) 分离剪切层与外加声激励相互作用会产生锁频现象,从而改变分离剪切层的演化发展.分离剪切层对外加激振频率的响应情况比较复杂,但归纳起来主要有 3 种模式(响应频率可能选择):(1) 外加激振频率的基频;(2) 外加激振频率的高倍谐波;(3) 外加激振频率的亚谐波.

上述锁频现象中可能蕴含着魔鬼台阶现象.

4) 分离泡大尺度旋涡脱落频率与再附长度成反比.在声激励对分离流动的控制过程中,分离剪切层起着重要的作用.

参 考 文 献

- Ota T, Itasaka M. Separated and reattached flow on a blunt flat plate. *ASME J Fluids Engng*, 1976, 98:79 ~ 86
- Kiya M, Sasaki K. Structure of a turbulent separation bubble. *J Fluid Mech*, 1983, 137:83 ~ 113
- Cherry N J, Hillier R, Latour M E M P. Unsteady measurements in a separated and reattaching flow. *J Fluid Mech*, 1984, 144:13 ~ 46
- Sasaki K, Kiya M. Three-dimensional vortex structure in a leading-edge separation bubble at moderate Reynolds number. *J Fluids Engng*, 1991, 113:405 ~ 410
- Bradshaw P, Wong F Y F. The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer. *J Fluid Mech*, 1972, 52:113 ~ 135
- Eaton J K, Johnston J P. Research on subsonic turbulent flow reattachment. *AIAA J*, 1981, 19(9):1093 ~ 1100
- Ruderich R, Fernholz H H. An experimental investigation of a turbulent shear flow with separation, reverse flow, and reattachment. *J Fluid Mech*, 1986, 163:283 ~ 322
- Gad-el-hak M, Blackwelder R F. On the discrete vortices from a delta wing. *AIAA J*, 1985, 23:961 ~ 962
- Gad-el-hak M, Ho C M. Unsteady vortical flow around three dimensional lifting surfaces. *AIAA J*, 1986, 24(5):713 ~ 721
- Ota T. An axisymmetric separated and reattached flow on a longitudinal blunt circular cylinder. *ASME J Appl Mech*, 1975, 42:311 ~ 315
- Ota T, Motegi H. Turbulence measurements in an axisymmetric separated and reattached flow over a longitudinal blunt circular cylinder. *ASME J Appl Mech*, 1980, 47:1 ~ 6
- Kiya M, Mochizuki O, Tamura H, *et al.* Turbulence properties of an axisymmetric separation and reattaching flow. *AIAA J*, 1991, 29:936 ~ 941
- 董宇飞.轴对称钝体分离流动及其控制:[学位论文].北京:北京大学力学系,1996

Nonlinear Behavior of Separated Shear Layer of a Blunt Circular Cylinder

Dong Yufei

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract Dynamical evolution process of separated shear layer of a blunt circular cylinder, and nonlinear interaction between separated shear layer and acoustic forcing have been experimentally investigated. The researches demonstrate, in unexcited state, there exists the subharmonic phenomenon, which implies the evolution of separated shear layer is mainly through vortices merging process. From separation to reattachment, laminar separated shear layer will take 2 times vortices merging processes, and turbulence separated shear layer will experience 5 times vortices merging. From the point of view of nonlinear dynamical system, transition of separated shear layer from order to chaos is through Hopf bifurcation and periodical bifurcation. In addition, response of separated shear layer to acoustic forcing was discussed.

Key words separated flow; excitation; resonance; lock-in