

旗面周期摆动的实验研究

白夜 贾永霞 李存标 朱一丁

Experimental Study of a Periodical Flapping Flag

Bai Ye Jia Yong-Xia Li Cun-Biao Zhu Yi-Ding

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 124701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.124701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Ka 波段带状注相对论扩展互作用速调管放大器的分析与设计

[Analysis and design of a Ka-band sheet beam relativistic extended interaction klystron amplifier](#)

物理学报.2015, 64(10): 108404 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108404>

长脉冲 X 波段多注相对论速调管放大器的初步实验研究

[Experimental study on a long pulse X-band coaxial multi-beam](#)

物理学报.2015, 64(1): 018401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018401>

相对论返波管超辐射产生与辐射的数值模拟研究

[Numerical simulation of generation and radiation of super-radiation from relativistic backward wave oscillators](#)

物理学报.2014, 63(3): 038402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.038402>

带状注速调管多间隙扩展互作用输出腔等效电路的研究

[Research on equivalent circuit of multi-gap output cavity for sheet beam extended-interaction klystron](#)

物理学报.2014, 63(2): 028402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.028402>

S 波段四腔强流相对论速调管的设计和实验研究

[Experimental researches of a four-cavity intense relativistic klystron amplifier](#)

物理学报.2014, 63(1): 018402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.018402>

旗面周期摆动的实验研究*

白夜 贾永霞† 李存标 朱一丁

(北京大学工学院, 湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871)

(2015年12月31日收到; 2016年2月26日收到修改稿)

用实验方法研究了旗面周期摆动的运动过程, 采用改进的算法优化了粒子图像测速仪测量结果, 定量获得了水洞中摆动旗面的近壁流场信息. 通过选定旗面包络上的一个拐点, 将其振幅作为特征长度重新计算了旗面运动的 Strouhal 数. 多组实验结果中, 新的 Strouhal 数均为 0.21 左右, 这与相同 Reynolds 数下圆柱绕流的 Strouhal 数结果相近.

关键词: 摆动旗面, Strouhal 数, 粒子图像测速仪

PACS: 47.20.Bp, 47.20.Gv, 47.20.Ib, 47.54.De

DOI: 10.7498/aps.65.124701

1 引言

一端固定的柔性旗面会在轴向力的作用下形成大幅的摆动, 由周期到混沌. 这一现象可以归结为流体与弹性结构间的相互作用. 本文通过实验研究了水洞中周期摆动的柔性旗面, 并以此为基础对流动的动力学进行了分析. 研究这一流体与弹性体耦合问题将对诸多工业方面产生重要影响, 如自发推进^[1-3]、能量获取^[4-8]、人类打鼾^[9-11]等.

2000年, Zhang等^[12]对这一耦合问题进行了实验研究, 他们将一根细丝置于均匀流动的肥皂膜中来模拟二维情况下的旗面摆动. 实验发现细丝呈现的周期摆动模态与细丝长度和肥皂膜的流动速度相关. Watanabe等^[13]实验研究了纸片在低速风洞中的动力学问题, 发现影响摆动的两个关键因素是无量纲的纸片弯曲刚度、流体与固体的质量比. 2005年, Shelley等^[14]在水洞中对旗面摆动进一步研究, 发现旗面与流体的质量比也会对旗面的稳定性产生影响, 并发现弹性旗面摆动频率对应的 Strouhal 数 (St 数) 与游行动物相一致. 他们在考虑旗面的质量、长度、弯曲系数和流体的密度、速度的情况下进行了线性不稳定性分析, 采用无量纲的密

度和无量纲速度作为控制变量, 进行了线性稳定性分析, 预测临界流速.

Abderrahmane等^[15]实验研究了旗面在相对较高的湍流场中的摆动动力学, 观察到周期、准周期和混沌摆动现象. Eloy等^[16]的实验论证了旗面的自身形状引起摆动的滞后现象, 从实验和理论方面研究了旗面形状的影响^[16,17], 认为该影响是由于存在重力和三维效应. 最近, Huang等^[18]和 Yu等^[19]对柔性旗面与黏性流相互作用系统进行了三维模拟. 与二维情形不同, 通过改变雷诺数和旗面的纵横比, 由于展向弯曲度的引入形成不对称模态. 随着展向宽度的增加, 旗面开始摆动时呈现出不稳定现象. 当流体流速高于摆动临界速度时, 旗面与流体耦合系统产生响应, 相关方面的研究包括摆动的双稳态现象、多稳态现象、摆动振幅的预测、滞后环的捕捉^[6,20-23]. 滞后环属于一种非线性现象, 表征系统对过去状态的响应. 对于摆动旗面, 滞后环出现在一定速度范围内, 在此范围内其系统可能是稳定的, 也可能是不稳定的.

诸多研究者通过构造非线性模型对耦合系统进行了研究^[6,20,24-26]. 目前, 摆动旗面的非线性理论模型主要聚焦于结构动力学的非线性效应, 而

* 国家自然科学基金 (批准号: 109103, 010062)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB724100)、群体项目 (批准号: 10921202, 11221062, 11521091) 和国家杰出青年科学基金 (批准号: 10921202) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yongxiajia@pku.edu.cn

事实上考虑结构非线性效应的空气弹性变形模型还不能准确预测旗面摆动振幅. 对于旗面摆动系统, 通常采用基于线性或者非线性结构的空气弹性变形模型与势流空气动力学模型相结合的方法进行研究. 随着计算机能力的显著提高, 最近一些研究采用计算流体动力学技术, 求解 Navier-Stokes 方程时考虑了黏性效应 [9,13,18,27,28]. 然而, 即使如此, 对于三维模拟和参数变化的研究, 计算工具不是很有效. 2014 年, Gibbs 等 [29] 利用粒子图像测速仪 (PIV) 对风洞中的平板的中部截面进行测量. 不过, PIV 计算摆动旗面近壁流场时未考虑固壁边界条件, 忽略了其黏性效应. 总体来说, 针对摆动旗面周围流场的实验研究比较少, 由于旗面摆动系统包括流固耦合、运动不稳定及旗面存在较大位移和较大变形问题, 实验研究具有一定的挑战性. 曹洪才等 [30] 针对涡诱导的柔性薄膜振动提出一种有效的算法追踪薄膜的运动位置, 这一算法在对待较大位移和较大变形的边界问题时具有一定的可行性, 值得借鉴.

对于旗面摆动系统, 诸多学者从理论、实验、数值模拟的角度对这个典型而普遍的物理问题进行了深入的研究, 得到一些可喜的成果. 对于周期摆动模态下的旗面与流体耦合系统, 希望寻找到一个统一的无量纲数描述旗面摆动的物理特征. 在考虑具有特征频率的周期运动或流动时, 通常采用 St 数作为描述流动振动机制的参数. 有趣的是, Taylor 等 [31] 计算了不同种类的鸟类、蝙蝠、昆虫自由飞行时的 St 数, 发现 $0.2 < St < 0.4$. 关于旗面摆动的文献中的 St 数存在着较大的差异性, 这是由于选择不同的特征长度对 St 数的数值产生影响. 比如, Shelley 等 [32] 的实验研究中选择旗面的长度作为特征长度, 发现 St 数在 1.2 左右; Connell 和 Yue [33] 的数值模拟研究选择旗面的振幅作为特征长度, 发现 St 数在 0.20 至 0.30 范围内. 不同特征长度的选取可能引起旗面摆动 St 数的一致, 通过合理选取表征旗面摆动机理的特征长度得到一个普适的 St 数有待于进一步研究.

本文的研究延续了 Zhang 等 [12] 的工作, 着重于水流中周期摆动旗面运动的研究. 利用高时间分辨率的 PIV 技术, 得到了周期摆动旗面在一个周期内的流场信息, 并通过改进的 PIV 算法, 定量获得旗面近壁速度场. 这些高分辨率的流场信息为进一步分析旗面和流动间的相互作用打下了基础. 在对大量实验结果进行分析后, 本文用旗面摆动包络线

上拐点的振幅定义了一个特征长度, 并重新计算 St 数. 新的 St 数在大量不同实验条件的结果是相近的, 同时也与相同 Re 数范围下的圆柱绕流 St 数结果一致.

2 实验方法

实验在北京大学低湍流度水洞中进行. 水洞的长方形实验区域尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 2\text{ m}$, 最大稳定流速为 1 m/s . 之前的研究 [16,33] 表明旗面和流体的密度比、 Re 数和旗面的刚度需要满足特定的条件. 针对水洞, 综合考虑水的密度、旗面密度和旗面刚度, 以及鸟类飞行时的雷诺数范围, 实验选取 Re 数约在 10^5 量级. 为了实验条件更充分, 作者在水洞中加入了一个宽度为水洞一半的收缩段来提高流动速度.

实验选择的旗面由有机硅 (PDMS) 制成, 长 90 mm 、宽 180 mm 、厚 1.2 mm . 同时在 PDMS 薄膜中以等间距 2 mm 并排嵌入九根细长的薄铜片. 这些铜片的长度与旗面宽度相同, 均为 180 mm , 但是更薄, 厚度仅为 0.9 mm . 这样一来, 旗面在其弹性轴的刚度非常低, 而其他轴向的刚度非常高, 而且两侧的表面均很光滑. 与大多数文献相同, 本文选择三个无量纲系数来描述旗面的特征, 分别代表密度、弹性和流体的黏性.

$$R_1 = \frac{\rho_s}{\rho_f L}, \quad R_2 = \frac{E}{\rho_f U^2 L^3}, \quad Re = \frac{\rho_f U L}{\mu}, \quad (1)$$

式中, ρ_s 代表旗面单位长度的质量, ρ_f 为流体的密度, L 和 E 是旗面的长度和刚度, U 和 μ 是来流的速度和黏性. 为了全面研究旗面的运动, 我们重现了旗面摆动的三个模态: 平直模态、周期摆动模态和混沌模态. 在所有的实验中, 三个无量纲数的范围列于表 1, 这些范围涵盖了之前研究 [22,33] 中给出的三个模态所对应的无量纲数范围. 本文着重研究周期摆动模态下旗面摆动情况.

表 1 实验中三个无量纲系数的范围

Table 1. The range of three non-dimensional coefficients in the experiments.

无量纲系数	范围
R_1	$3.0 \times 10^{-2} - 7.0 \times 10^{-2}$
R_2	$1.0 \times 10^{-2} - 1.0 \times 10^{-5}$
Re	$5.0 \times 10^4 - 1.8 \times 10^5$

实验的PIV装置如图1所示. 水流从左至右, 实验旗面悬挂在位于水洞之间的旗杆上, 图像采集使用的是像素为 1280×1280 , 50 mm镜头的12位双快门CCD摄像机. 激光装置为200 mJ输出功率、532 nm波长的双脉冲Nd:YAG激光器, 激光面保持水平, 并通过旗面的中部. $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子在水洞上游均匀地加入. 图像的后处理使用LaVison软件.

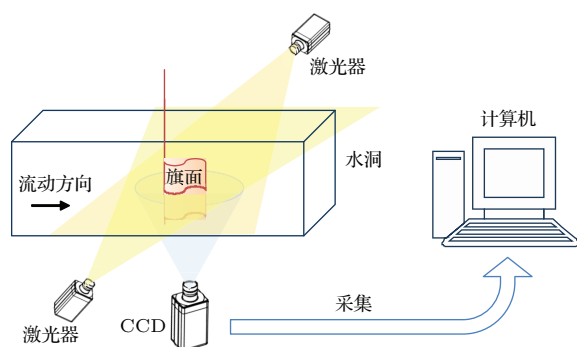


图1 实验PIV系统示意图

Fig. 1. The setup of the experiment and PIV system.

3 流动显示

利用高速相机对周期摆动形态下的旗面进行多次曝光, 记录一个周期内旗面的摆动形态, 如图2所示. 图2中的旗面对应的实验参数为 $Re = 1.2 \times 10^5$, $R_1 = 4.4 \times 10^{-2}$, $R_2 = 1.3 \times 10^{-4}$, 曝光间隔约为0.008 s. 可以看到PDMS 旗面展示了经典的周期摆动模态, 与其他实验研究中的结果相似. 旗面摆动形成的包络基本上为一个狭长的扇形. 为了证明实验中摆动的周期性, 我们对10个周期内的图像进行观察, 发现流动的形态是完全一样的. 同时, 跟踪旗面上部分质点的位置随时间的变化(如图3所示), 其良好的周期性也进一步验证了周期性结论. 在图3中, A, B, ..., F六个点分别代表旗面的两个端点和四个五等分点, 如图3上方的示意图所示, 其中A和F分别代表旗杆和旗尾位置.

为了更精确地获得流场信息, 我们参考了多种算法, 包括新近发表的一些算法^[30,34–36]. 首先, 采用曹洪才等^[30]的算法(改进的Radon 算法)对摆动旗面边界进行准确识别, 然后计算旗面边界各个质点的运动速度, 将其边界条件通过施加人工粒子的方法引入所拍摄粒子图片中的旗面区域(详见朱一丁等^[34]的近壁PIV图像预处理方法), 从而考虑

了黏性流体的无滑移边界条件, 准确地获得摆动旗面近壁流场信息. 在经过了上述数据处理后, 全流场的流动显示就可以清晰地展示出来. 考虑到旗面摆动过程的周期性, 图4和图5分别给出了半个周期内, 相隔1/8周期的速度矢量图和涡量场. 图中旗尾在上端, 旗杆在下端, 水洞流动速度由下向上, 旗尾的摆动方向为从左向右.

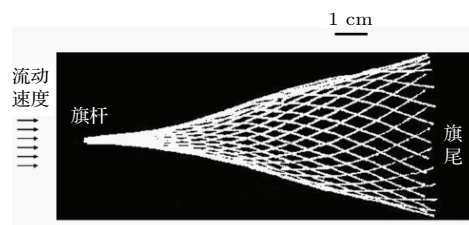


图2 一个周期内旗面摆动的多次曝光图像

Fig. 2. A series of snapshots of the flag during a period.

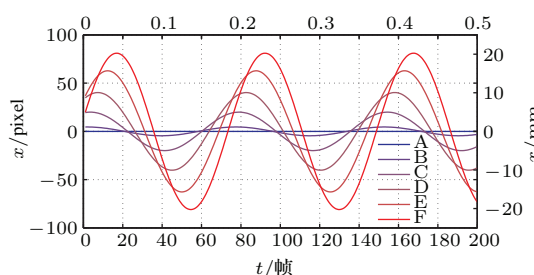
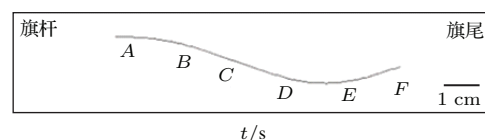


图3 旗面上一些点的法向位移随时间的变化

Fig. 3. The vertical displacements of several points on the flag.

观察图4的速度场, 可以看到本文研究的周期摆动旗面在靠近旗杆的部分, 振幅较小; 在靠近旗尾的部分, 振幅大幅度增长. 旗面的近壁位置由于黏性作用, 在法向出现明显的速度梯度, 形成了类似于平板边界层的结构. 但是在旗面的两侧, 流动结构并不是对称的, 这与旗面的运动方向相关. 在图4(a)和图4(b)中, 旗尾由左向右摆动, 有较大的法向速度, 旗面右侧的流场由于受到旗面的挤压, 速度梯度更大. 在图4(c)和图4(d)中, 旗面中后部向左摆动, 则左侧出现更大的速度梯度. 图5中的涡量场也显示了同样的结果. 与固定平板的边界层发展过程相比, 旗面近壁边界层的发展更为缓慢, 在周期条件下, 直到旗尾都没有发生流动分离.

周期摆动旗面的涡量场特征也很明显. 流场在旗面的两侧形成了两条相反方向的涡片, 两者与旗面的距离略有不同, 但区别较小. 在靠近旗杆的部分, 旗面的摆动速度很小, 两侧的涡片与旗面的距离基本保持一致. 随着旗面振幅增大, 摆动方向一侧的涡片会远离旗面, 但幅度并不大. 如图 5(a) 和图 5(b) 中的旗尾部分, 右侧的涡量场与旗面的

距离比旗杆部分大, 也比左侧的大, 涡量也有明显增大, 这与速度场中的结果一致. 图 5(c) 和图 5(d) 中部弯曲变形部分也有相似的现象. 两个涡片在旗尾位置逐渐靠近, 交汇形成尾流. 整个流场中, 涡量主要存在于两条涡片处, 外场的涡量很快趋于零. 这说明旗面与流场的相互作用区域集中在涡片附近. 并没有影响到外场.

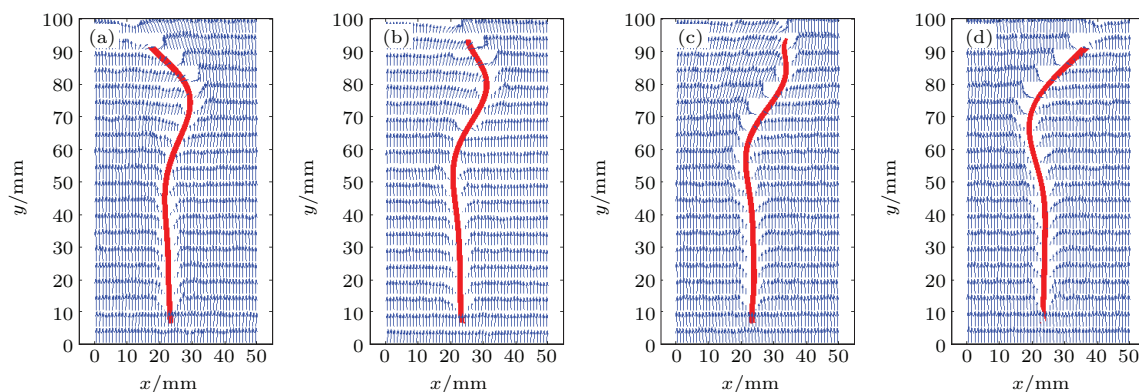


图 4 半个周期内的旗面摆动速度矢量场

Fig. 4. The velocity vector pictures in half period.

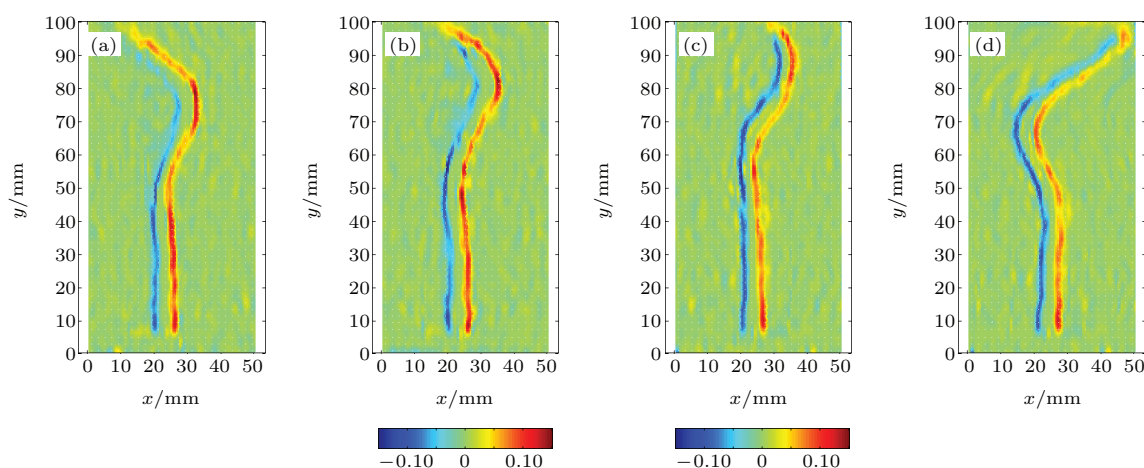


图 5 半个周期内的旗面摆动涡量场

Fig. 5. The vorticity fields in half period.

4 实验结果与讨论

利用流动显示中给出的一系列图像, 就可以简洁地描述旗面摆动过程中旗面和流体的运动过程. 对于实验旗面, 摆动的形态可以看作一个振幅逐渐变大的行波从旗杆向旗尾运动. 流体响应旗面的摆动也跟随着旗面形状运动. 随着旗尾从一侧向另一侧(从左向右)运动在旗面的左侧的流向速度就会逐渐增加, 同时展向速度逐渐减小. 展向速度在旗

面的两侧是近似连续的, 而流向速度则更类似于平板的边界层.

为了更好地研究摆动的形态, 我们提取了一个周期内高时间分辨率的图像以获得摆动的包络图像, 如图 6 所示. 实验条件为 $Re = 1.2 \times 10^5$, $R_1 = 4.4 \times 10^{-2}$, $R_2 = 1.3 \times 10^{-4}$. 观察该图可以发现, 摆动的包络线并不是一条均匀增加的直线, 其增长率从旗杆到旗尾先增长再降低, 然后再增长. 这个现象同时也在一些计算研究中发现, 比如 Connell 等^[33]的结果. 这里把增长率最小的位置定

义为“拐点”，也即图6中的点“N”。从数学上来说，就是凹函数 $f(x)$ 上最大 $f''(x)$ 处的点。

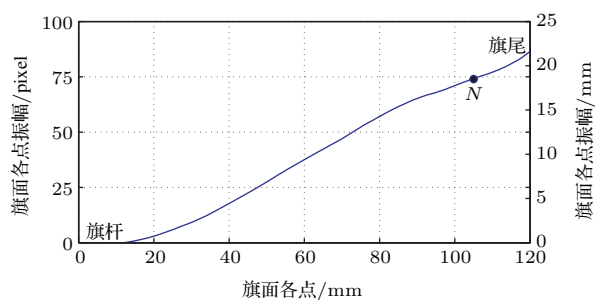


图6 旗面的包络图像

Fig. 6. The envelope of the flag.

通过反复实验、计算、统计，我们尝试利用拐点位置处的振幅 A_n 作为 St 数的特征长度。这里，分别用 St_L , St_A 和 St_n 代表以旗面长度 L , 旗尾振幅 A 和 A_n 作为特征长度得到的 St 数：

$$St_L = \frac{Lf}{U}, \quad St_A = \frac{Af}{U}, \quad St_n = \frac{A_nf}{U}. \quad (2)$$

计算全部实验结果中三个不同 St 数的结果，列于表2，表中的 Re 数分别对应不同的实验组别。

表2 利用不同特征长度计算的 St 数

Table 2. The St numbers using different characteristic length in all the experiments.

Re	St_L	St_A	St_n
85000	0.43	0.22	0.20
85000	0.51	0.23	0.20
85000	0.60	0.23	0.21
85000	0.68	0.22	0.20
85000	0.77	0.24	0.21
85000	0.85	0.25	0.22
96000	0.75	0.23	0.21
108000	0.67	0.24	0.21
120000	0.61	0.22	0.21
132000	0.55	0.23	0.20
144000	0.50	0.24	0.21
156000	0.46	0.23	0.20

表2的数据充分反映了 St_n 的统一性，新 St 数的数值非常近似于0.21。那么其他学者的研究是否也有类似的结果呢？根据一些文献中给出的数据，我们再次计算了 St_n ，并发现很多结果都与本文实验结果相似，也在0.21附近。比如 Shelley等[37]给

出的实验结果中(图7)，就可以明显看到包络中的拐点。在他们的实验中，将丝线的一端固定在肥皂膜中来模拟二维的旗面摆动现象。由图7可见，旗面看上去有两个拐点，这里选择更靠近旗尾的拐点作为特征长度，结果约为0.20。不仅是被动的旗面有这样的结果，对于一些主动的摆动，比如鱼类的游动行为，也有相似的发现。参考 Rohr等[38]的工作可以知道很大一部分鱼类游动的 St_A 数值都在0.20和0.30之间，同时，鱼类的摆动形态中也存在拐点，那么，极有可能部分鱼游的 St_n 会在0.21附近。表3列出了部分文献中的 St_n 结果。

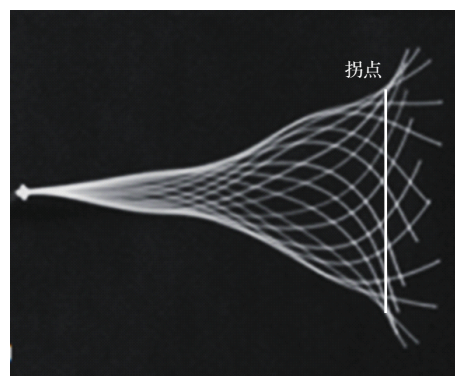


图7 Shelley和Zhang的实验结果[37]

Fig. 7. The experimental result by Shelley and Zhang [37].

表3 其他文献中 St_A 与 St_n 的结果

Table 3. The re-calculated St_n from other researchers compared with the St_A .

St_A	St_n	文献
0.27	0.21	[12]
0.22—0.31	0.20—0.23	[14]
0.21—0.28	0.19—0.21	[33]
0.20—0.30	0.19—0.22	[38]
0.26—0.46	0.19—0.23	[39]

综上，我们认为大部分条件下，旗面周期摆动的 St 数可以通过拐点作为特征长度统一到一个较为一致的结果：0.21。同时，这个结果与圆柱绕流在 Reynolds 数为 10^5 范围时的 St 数是相等的。

5 结 论

本文通过在水洞中的实验研究了考虑黏性条件下，柔性旗面的摆动机制。针对周期摆动模态，在确认旗面摆动周期性的基础上，通过改进的 PIV 算法准确获得了旗面近壁的流场信息。给出了详细

的速度场和涡量场以研究旗面和流场的运动过程. 该结果为获得如旗面受力等关键运动信息打下了基础, 这将在以后的文章中讨论. 进一步针对混沌模态的实验研究也在同步开展.

分析多个周期摆动形态, 可以发现旗面的摆动包络存在一个拐点. 利用数学方法对这一拐点进行定义, 并以该点的振幅作为 St 数的折合长度, 就可以得到一个普适的 St 数, 0.21. 对其他文献中的结果做相似计算也可以得到类似结果, 同时, 这个结果与相同 Reynolds 数范围下圆柱绕流的结果相近.

感谢纽约大学张骏教授的指导, 感谢北京大学工学院吴介之教授、袁辉靖工程师的讨论以及贾力超、苏桩和陈曦给予的帮助.

参考文献

- [1] Eloy C, Schouveiler L 2011 *J. Non-Linear Mech.* **46** 568
- [2] Hellum A, Mukherjee R, Hull A 2011 *J. Fluid. Struct.* **27** 1086
- [3] Jafferis N T, Sturm J C 2013 *J. Microelectromech. S.* **22** 495
- [4] Akcabay D T, Young Y L 2012 *Phys. Fluids* **24** 054106
- [5] Doaré O, Michelin S 2011 *J. Fluid. Struct.* **27** 1357
- [6] Dunnmon J, Stanton S, Mann B, Dowell E 2011 *J. Fluid. Struct.* **27** 1182
- [7] Giacomello A, Porfiri M 2011 *Proceedings of SPIE* **7976** 797608
- [8] Michelin S, Doaré O 2013 *J. Fluid Mech.* **714** 489
- [9] Balint T, Lucey A 2005 *J. Fluid. Struct.* **20** 893
- [10] Huang L 1995 *J. Fluid. Struct.* **9** 127
- [11] Howell R, Lucey A, Carpenter P, Pitman M 2009 *J. Fluid. Struct.* **25** 544
- [12] Zhang J, Childress S, Libchaber A, Shelley M 2000 *Nature* **408** 835
- [13] Watanabe Y, Suzuki S, Sugihara M, Sueoka Y 2002 *J. Fluid. Struct.* **16** 529
- [14] Shelley M, Vandenberghe N, Zhang J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 302
- [15] Abderrahmane H A, Païdoussis M P, Fayed M, Ng H D 2012 *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* **107–108** 225
- [16] Eloy C, Lagrange R, Souilliez C, Schouveiler L 2008 *J. Fluid Mech.* **611** 97
- [17] Eloy C, Souilliez C, Schouveiler L 2007 *J. Fluid. Struct.* **23** 904
- [18] Huang W X, Sung H J 2010 *J. Fluid Mech.* **653** 301
- [19] Yu Z, Wang Y, Shao X 2012 *J. Sound Vib.* **331** 4448
- [20] Eloy C, Kofman N, Schouveiler L 2012 *J. Fluid Mech.* **691** 583
- [21] Gibbs S C, Wang I, Dowell E 2012 *J. Fluid. Struct.* **34** 68
- [22] Tang D, Yamamoto H, Dowell E 2003 *J. Fluid. Struct.* **17** 225
- [23] Gao T G, Qin F H, Huang W X, Sun D J 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 094702
- [24] Michelin S, Smith S L, Glover B 2008 *J. Fluid Mech.* **617** 1
- [25] Tang L, Païdoussis M 2007 *J. Sound Vib.* **305** 97
- [26] Tang L, Païdoussis M 2008 *J. Sound Vib.* **310** 512
- [27] Gordnier R E, Visbal M R 2002 *J. Fluid. Struct.* **16** 497
- [28] Banerjee S, Connell B S H, Yue D K P 2015 *J. Fluid Mech.* **783** 103
- [29] Gibbs S C, Fichera S, Zanotti A, Ricci S, Dowell E H 2014 *J. Fluid. Struct.* **48** 507
- [30] Cao H C, Shi S X, Liu Y Z 2013 *J. Exp. Fluid Mech.* **27** 58 (in Chinese) [曹洪才, 施圣贤, 刘应征 2013 实验流体力学 **27** 58]
- [31] Taylor G K, Nudds R L, Thomas A L R 2003 *Nature* **425** 707
- [32] Shelley M J, Zhang J 2011 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **43** 449
- [33] Connell B S H, Yue D K P 2007 *J. Fluid Mech.* **581** 33
- [34] Zhu Y D, Yuan H J, Zhang C H, Lee C B 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 125302
- [35] Lee C B, Su Z, Zhong H J, Chen S Y, Zhou M D, Wu J Z 2013 *J. Fluid Mech.* **732** 77
- [36] Zhong H J, Lee C B, Su Z, Chen S Y, Zhou M D, Wu J Z 2013 *J. Fluid Mech.* **716** 228
- [37] Shelley M J, Zhang J 2011 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **43** 449
- [38] Rohr J J, Fish F E 2007 *J. Exp. Biol.* **207** 1633
- [39] Viot E, Amandolese X, Hémon P 2013 *J. Fluid. Struct.* **43** 385

Experimental Study of a Periodical Flapping Flag*

Bai Ye Jia Yong-Xia[†] Li Cun-Biao Zhu Yi-Ding

(State Key Laboratory for Turbulence and Complex Systems, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 31 December 2015; revised manuscript received 26 February 2016)

Abstract

A flag flapping in the wind is a classical fluid-structure interaction problem that concerns the interaction of elastic bodies with ambient fluid. The fluid-flag interaction can give rise to three self-sustained oscillation states under certain conditions, i.e., stretched-straight state, periodic state, and chaotic state. This paper reports an experimental study of a cantilevered polydimethylsiloxane (PDMS) flag flapping in a uniform flow at a periodic state. A heavy flag is well designed, with metal strips imbedded in the PDMS sheet. Immersing the elastic but self-sustaining flag into the water flow, we use the time-resolved particle image velocimetry (PIV) and visualization techniques to obtain the whole flow field around the midspan of the flapping flag. A unique PIV image processing method is used to measure the near-wall flow velocities around the flap-ping elastic flag at the periodic state. The image processing technique adopts a radon transform technology to determine the moving interface in the particle images. The interface velocity distribution is subsequently calculated. Artificial particles of uniform size with the interface velocity are added into the flag region. Therefore, the whole velocity field over a flapping period is accurately obtained, giving the basic data to analyze the flag flapping. It is found that there exists an “inflection” point in the envelope curve of the flag flapping. Based on the analyses of the flapping states and velocity fields, a unified flapping Strouhal number ($St = 2Af/U$) is proposed by choosing the amplitude of the “inflection” point as the characteristic length, which is similar to the Strouhal number of the flow around a circular cylinder over the same range of Reynolds number.

Keywords: flapping flag, strouhal number, particle image velocimetry

PACS: 47.20.Bp, 47.20.Gv, 47.20.Ib, 47.54.De

DOI: 10.7498/aps.65.124701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 109103, 010062), the National Clim-B Plan, China (Grant No. 2009CB724100), the Group Project (Grant Nos. 10921202, 11221062, 11521091), and the National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar Group, China (Grant No. 10921202).

[†] Corresponding author. E-mail: yongxiajia@pku.edu.cn