

# 中等雷诺数圆柱尾流旋涡脱落的控制<sup>1)</sup>

邵传平 鄂学全

魏庆鼎 朱凤荣

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

(北京大学湍流研究国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要** 介绍通过实验对圆柱尾流旋涡脱落进行抑制的方法及其结果. 实验模型的展径比为 38, 实验的雷诺数范围为  $3 \times 10^2 \sim 1.6 \times 10^3$ . 抑制方法是在圆柱 (直径为  $D$ ) 表面沿展向每隔一定间距伸出一直径  $0.18D$ 、长度为  $1.5D$  的小棒. 实验结果表明, 当棒间距小于  $3D$ , 棒与来流夹角在  $30^\circ \sim 90^\circ$  范围内, 可有效抑制旋涡脱落.

**关键词** 流动控制, 旋涡脱落抑制, 流致振动, 圆柱, 中等雷诺数

## 引 言

当流体以一定速度流过柱形钝物体时, 会在物体尾部形成规则的旋涡脱落. 在旋涡脱落过程中, 物面两侧的压力分布交替变化, 从而产生作用于物体的强迫交变载荷. 在这种交变载荷作用下, 物体将发生振动. 涡致振动不仅表现为对物体结构的长期疲劳损伤, 而且更为严重地是, 它还可能产生共振效应, 使结构在瞬间遭到破坏. 对于作强迫振动的圆柱体来说, 当无量纲速度  $U/fD$  (其中  $U$  为来流速度,  $D$  为圆柱直径,  $f$  为振动频率) 处于一定范围时, 将发生锁频, 旋涡脱落频率不再遵守 Strouhal 关系, 而是与圆柱振动频率保持一致. 此时不断提供流体动力, 使圆柱所承载荷大幅度提高<sup>[1]</sup>. 对于悬臂自由振动的圆柱体, 振动与旋涡脱落的耦合作用非常复杂. 当无量纲速度  $U/fD$  达到一定值  $a$  时, 振幅突然跃升;  $U/fD$  达到另一值  $b(b > a)$  时, 振幅突然减小<sup>[2]</sup>.

涡致振动使柱体或柱群遭受破坏, 在风工程中已有不少先例 (如英国渡桥电厂冷却塔群的倒塌, 美国塔克玛大桥的毁坏等). 在海洋工程中, 涡致振动造成的问题同样难以处理. 目前国际海洋石油工业的竞争正向深海 (数百米以上) 发展. 在世界许多地方 (包括中国), 深海海域环境条件均很恶劣, 海流对勘探钻井和采油造成巨大威胁<sup>[3~5]</sup>. 对钻井隔水导管 (长圆柱体) 来说, 危险来自三个方面<sup>[5]</sup>: (1) 在深海区, 海流速度一般高于浅水区. (2) 导管的加长降低了其固有频率, 从而降低了激发涡致振动所需的海流速度. (3) 深水平台通常为悬浮式, 没有可供隔水导管夹持固定的结构.

人们对涡致振动现象已有很多描述性的研究. Pesce 等<sup>[2]</sup> 实验研究了柔性柱在水中的涡致振动及振幅跳跃现象. Farnes 等<sup>[4]</sup> 在挪威某 1300 m 深海域对钻井隔水导管的振动情况进行实测, 数据分析表明, 海流可使导管以几种振型振动. Govardhan 等<sup>[6]</sup> 研究了自由振动圆柱涡的形成模式及频率响应. Newman 等<sup>[7]</sup> 数值研究了流体流过自由振动缆绳时的动力学行为. Kitagawa 等<sup>[8]</sup> 实验研究了柱形塔在高风速下的涡致振动情况.

2001-05-21 收到第一稿, 2001-11-15 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10172087) 资助项目.

涡致振动控制方法研究在工程上具有更重要的意义. 工程上解决涡致振动问题的方法可分为两类: 一类是改变结构本身的振动性质, 如增大结构刚度, 改变其固有频率以避免共振; 加配重、设摆锤系统、改变惯性矩等, 以增强阻尼; 采用主动和被动控制系统控制结构振动等. 另一类是改变结构的流体动力特性, 如流线型设计, 采用流动分离控制装置, 以及采用频率调制技术 (或称错频技术), 避免共振等.

本文的目的, 是在不改变结构基本形状的前提下, 从抑制旋涡脱落的角度研究涡致振动控制. 目前抑制涡脱落的方法很多, 如在尾流中加隔离板<sup>[9]</sup>, 尾部喷射<sup>[10,11]</sup>, 物体振动<sup>[12,13]</sup>, 物体加热<sup>[14]</sup>以及声干扰<sup>[15]</sup>等, 但这些方法均难以应用于解决如上所述的工程实际问题. Strykowski 等<sup>[16]</sup>在主圆柱旁边平行地放一个细丝线的方法, 抑制旋涡脱落, 但其方法只在很低雷诺数下有效. Walshe 等<sup>[17]</sup>提出在圆柱面上设螺旋结构可抑制旋涡脱落. Blevins<sup>[1]</sup>描述了在海底电缆上设飘带, 可减少振动、提高电缆寿命的方法. 80 年代末以来人们对流动的主动反馈控制方法<sup>[18]</sup>做了不少研究. 这种方法较复杂, 目前只在低雷诺数下取得成功. 最近, 我们发展了一种简单方法<sup>[19]</sup>, 可有效抑制旋涡脱落. 本文将介绍我们的抑制方法及实验结果.

## 1 实验方法

实验在北京大学湍流研究国家重点实验室低湍流度水槽 (water channel) 中进行. 水槽实验段宽度 40 cm, 高度 80 cm, 长度 3 m, 图 1(a) 为其俯视图. 水槽常用流速为  $0.1 \sim 1 \text{ m s}^{-1}$ . 模型圆柱 (cylinder) 直径为 1 cm, 横放于水槽半高位置. 圆柱长度为 38 cm, 两端分别固定于厚度为 1 cm 的端板 (end plate) 上, 如图 1(b) 所示. 端板高度为 20 cm, 圆柱位于半高处. 端板总长度 35 cm, 其中在圆柱前方部分 20 cm, 在圆柱后方部分 15 cm. 端板前后方分别呈光滑过渡的尖劈型, 以利于减小水槽壁面边界层的影响. 对于光滑圆柱来说, 当  $Re$  数大于 45 时, 将在柱后产生旋涡脱落. 为了抑制旋涡脱落的产生, 在圆柱表面沿展向布置一排小的圆形抑制棒 (suppression rod), 如图 1(b) 和图 1(c) 所示. 在本实验中, 小棒直径固定为 0.18 cm, 小棒长度固定为 1.5 cm. 小棒间距及与来流夹角  $\beta$  可调. 模型圆柱、端板和抑制棒均由有机玻璃制成, 实验时相互之间紧密固结, 形成一个整体, 然后固定于两壁上. 圆柱尾流速度脉动情况由激光多普勒流速仪测量.

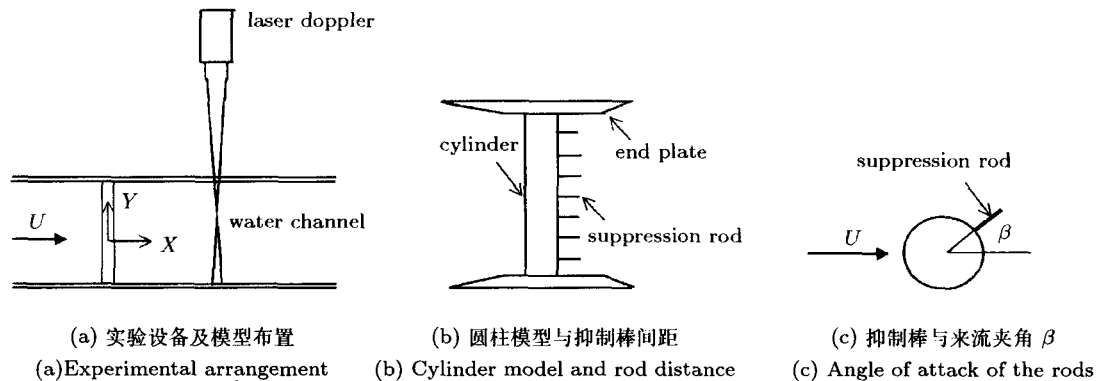


图 1 模型与实验设备

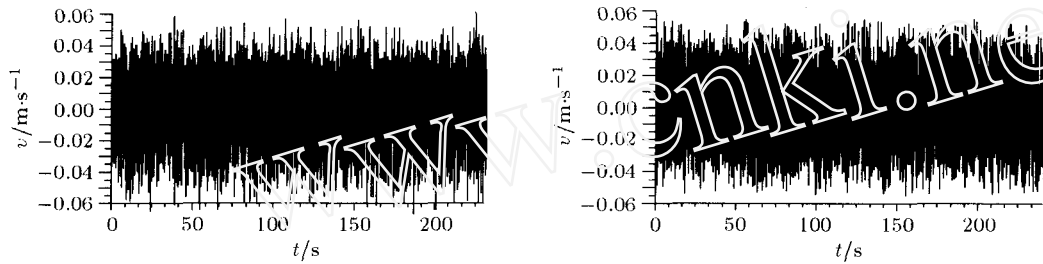
Fig.1 Test model and experimental equipment

## 2 实验结果

为了检验旋涡脱落抑制效果, 每次实验时, 先将未加抑制棒的光滑圆柱模型在水槽中安放好, 并将水洞流动速度调整导致定值后保持不变, 稳定一段时间后, 用激光流速仪在柱下游一定位置处测量尾流速度脉动情况. 然后在圆柱模型上加抑制棒, 调整好棒间距及与来流的夹角. 使水流稳定一段时间后, 继续在相同位置测量尾流速度脉动情况.

图 2 为  $Re = 1600$  时的典型测量结果. 图 2(a) 和图 2(b) 分别为光滑圆柱下游  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = 1.0$  处和  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = -1.0$  处测量的尾流速度脉动. 其脉动速度功率谱分别为图 2(e) 和图 2(e). 图 2(c) 和图 2(d) 为抑制棒间距  $l/D = 1.0$ , 棒与来流夹角为  $60^\circ$  时的测量结果. 其中, 图 2(c) 的测量位置为  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = 1.0$ , 图 2(d) 的测量位置为  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = -1.0$ . 图 2(c) 和图 2(d) 所示的脉动速度, 其功率谱分别为图 2(g) 和图 2(h).

图 2(e) 和图 2(f) 为光滑圆柱尾流速度脉动功率谱, 它们具有明显的峰值. 峰值频率即为旋涡脱落频率, 其所对应的 Strouhal 数约为 0.21, 与其他作者的实验结果相近. 图 2(g) 和图 2(h) 为加抑制棒后尾流速度脉动功率谱. 比较相同测量位置的速度脉动可知, 光滑圆柱尾流脉动幅

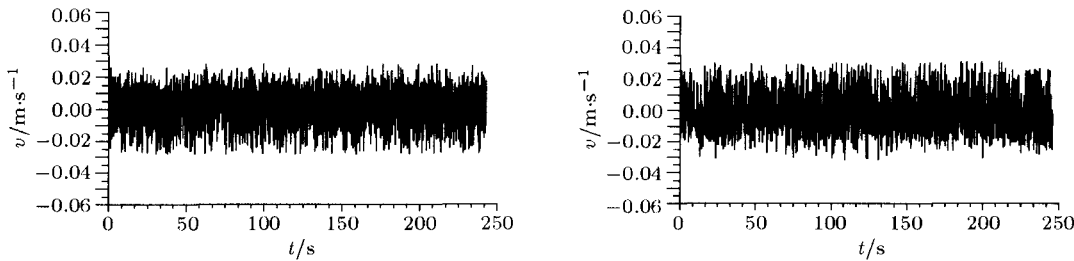


(a) 在  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = 1.0$  处测量的光滑圆柱尾流脉动速度

(a) Fluctuating velocity of smooth cylinder wake (measured at  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = 1.0$ )

(b) 在  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = -1.0$  处测量的光滑圆柱尾流脉动速度

(b) Fluctuating velocity of smooth cylinder wake (measured at  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = -1.0$ )



(c) 在  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = 1.0$  处测量的被抑制尾流脉动速度. 抑制棒间距  $l/D = 1.0$ , 攻角  $\beta = 60^\circ$

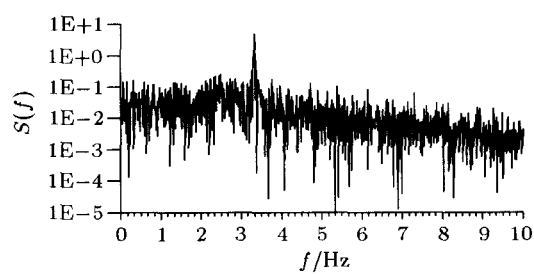
(c) Suppressed wake signal measured at  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = 1.0$  rod distance  $l/D = 1.0$ , angle of attack  $\beta = 60^\circ$

(d) 在  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = -1.0$  处测量的被抑制尾流脉动速度. 抑制棒间距  $l/D = 1.0$ , 攻角  $\beta = 60^\circ$

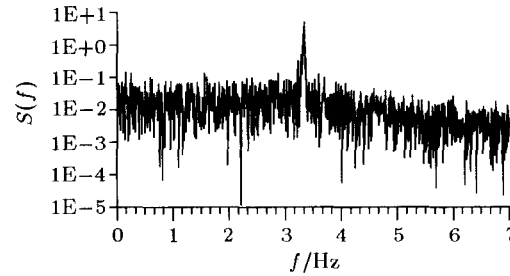
(d) Suppressed wake signal measured at  $X/D = 18.5$ ,  $Y/D = 0$ ,  $Z/D = -1.0$  rod distance  $l/D = 1.0$ , angle of attack  $\beta = 60^\circ$

图 2 加抑制棒前后尾流脉动速度及其功率谱比较 (实验雷诺数为  $Re = 1600$ )

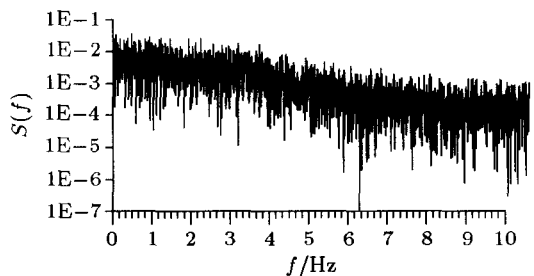
Fig.2 Comparison of fluctuating velocities and power spectra of the wake before and after suppression (test Reynolds number  $Re = 1600$ )



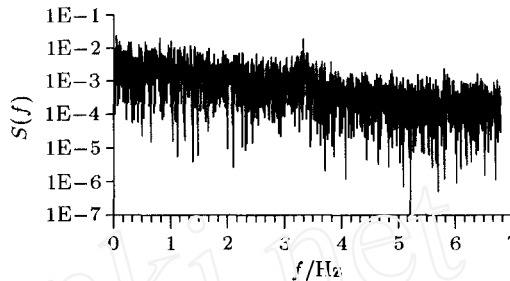
(e) 光滑圆柱尾流脉动速度 (测量位置同图 (a)) 的功率谱  
(e) Power spectrum of the fluctuating velocity shown in (a) (smooth cylinder wake)



(f) 光滑圆柱尾流脉动速度 (测量位置同图 (b)) 的功率谱  
(f) Power spectra of the fluctuating velocity shown in (b) (smooth cylinder wake)



(g) 被抑制尾流脉动速度 (抑制棒布置及测点同图 (c)) 功率谱  
(g) Power spectrum of the fluctuating velocity shown in (c) (suppressed wake)



(h) 被抑制尾流脉动速度 (抑制棒布置及测点同图 (d)) 功率谱  
(h) Power spectra of the fluctuating velocity shown in (d) (suppressed wake)

图 2 加抑制棒前后尾流脉动速度及其功率谱比较 (实验雷诺数为  $Re = 1600$ ) (续)

Fig.2 Comparison of fluctuating velocities and power spectra of the wake before and after suppression (test Reynolds number  $Re = 1600$ ) (continued)

值较大, 加抑制棒后, 无论在圆柱上侧还是下侧, 脉动幅值均远低于光滑圆柱情况, 且速度脉动功率谱为宽谱, 没有明显峰值, 说明旋涡脱落已经被抑制。

为了检验加抑制棒后流动的展向均匀度, 我们在柱后  $X/D = 18.5$  处平行于展向每隔 0.5 cm 取点测量平均和脉动速度情况。测量结果表明, 除靠近壁面的小区域外, 平均速度和脉动速度均方根值  $V_{r.m.s.}$  沿展向的波动较小, 说明流动沿展向基本均匀。

为了加强对圆柱尾流整体脉动情况的了解, 在图 3 中画出了抑制棒间距  $l/D$  固定时,  $\beta$  角变化对脉动速度均方根值  $V_{r.m.s.}$  在剖面  $X/D = 18.5, Y/D = 0$  上分布的影响。实验的雷诺数  $Re = 1600$ 。作为对比, 光滑圆柱的情况也画在图中。可以看出, 加抑制棒后尾流的整体脉动水平平均比光滑圆柱时小。  $\beta = 0^\circ$  (即棒与来流平行) 时抑制效果最差,  $V_{r.m.s.}$  峰值是光滑柱时的 77%。  $\beta = 90^\circ$  (即棒与来流垂直) 时抑制效果稍好,  $V_{r.m.s.}$  峰值是光滑柱时的 61%。  $\beta$  为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  时抑制效果均很好,  $V_{r.m.s.}$  峰值分别是光滑柱时的 54%, 51% 和 48%。 Strykowsky 等<sup>[16]</sup> 在主圆柱旁边平行地放一个直径很小的圆柱, 对主圆柱尾流旋涡脱落进行抑制时也有类似情况, 两圆柱间距及圆心连线与来流夹角处于一定范围时, 才有效果。但 Strykowsky 等的方法, 只有当  $Re < 79$  时有效, 超过这个范围, 旋涡脱落无法抑制。而本文的抑制方法, 在实验的雷诺数  $Re = 300 \sim 1600$  范围内, 均能够很好地抑制旋涡脱落。

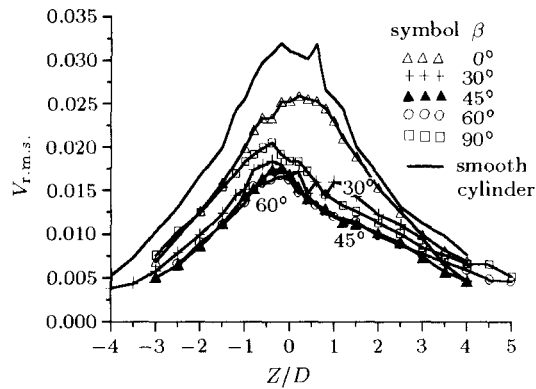


图 3 夹角  $\beta$  对尾流脉动速度均方根分布的影响  
( $Re = 1600$ , 棒间距  $l/D = 1.0$ , 测量剖面:  
 $X/D = 18.5, Y/D = 0$ )

Fig.3 The influence of  $\beta$  on the distribution of root-mean-square value of fluctuating velocity ( $Re = 1600, l/D = 1.0$ , measured at the section:  $X/D = 18.5, Y/D = 0$ )

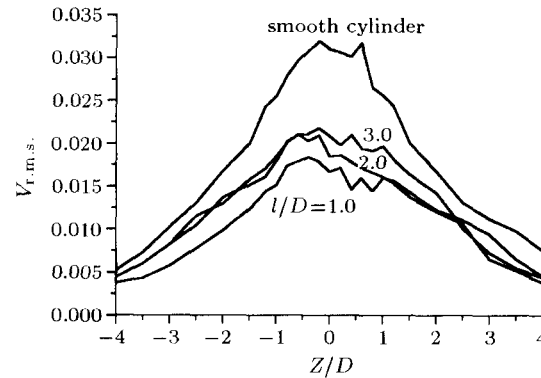


图 4 间距对尾流脉动速度均方根分布的影响 ( $Re = 1600$ , 攻角  $\beta = 30^\circ$ , 测量剖面:  $X/D = 18.5, Y/D = 0$ )

Fig.4 The influence of  $l/D$  on the distribution of root-mean-square value of fluctuating velocity ( $Re = 1600, \beta = 30^\circ$ , measured at the section:  $X/D = 18.5, Y/D = 0$ )

抑制棒间距  $l/D$  对尾流整体抑制效果的影响如图 4 所示。实验的雷诺数  $Re = 1600$ , 抑制棒与来流夹角固定为  $\beta = 30^\circ$ , 测量的剖面为:  $X/D = 18.5, Y/D = 0$ 。各棒间距下  $V_{r.m.s.}$  在尾流剖面的分布均比光滑圆柱时小, 且间距越小,  $V_{r.m.s.}$  越小。棒间距  $l/D$  为 1, 2, 3 时  $V_{r.m.s.}$  峰值分别是光滑柱时的 55%, 61% 和 64%。

### 3 结 论

通过圆柱绕流模型实验, 研究了抑制尾流旋涡脱落的方法及其效果。研究的雷诺数范围为  $Re = 300 \sim 1600$ , 圆柱模型的展径比为  $L/D = 38$ 。采用在圆柱表面伸出一排小棒的方法, 对整个圆柱的旋涡脱落进行抑制。此处所用抑制棒几何尺寸固定为直径  $0.18D$ , 长度  $1.5D$ 。实验结果表明, 通过适当调整抑制棒间距, 特别是棒与来流夹角, 可以抑制旋涡脱落的产生。当抑制棒间距比  $l/D < 3$ , 棒与来流夹角在  $30^\circ \leq \beta < 90^\circ$  范围内时, 抑制效果很好, 可基本消除旋涡脱落。

### 参 考 文 献

- 1 Blevins RD. Flow Induced Vibration, Van Nostrand Reinhold, 1977
- 2 Pesce CP, Fujarra ALC. Vortex induced vibrations and jump phenomenon: Experiments with a clamped flexible cylinder in water. *Int J Offshore & Polar Eng*, 2000, 10(1): 26~33
- 3 Vandiver JK. Research challenges in the vortex induced vibration prediction of marine riser: OTC 8698, 30th Ann. In: SPE Offshore Tech Conf, Vol 2, Houston, 1998. 155~163
- 4 Farnes GK. A field study of flow induced vibration on a deep water drilling riser: OTC 8702, 30th Ann. SPE Offshore Tech. Conf, Vol 2, Houston, 1998. 199~208
- 5 Allen DW. Vortex induced vibration of deep water risers: OTC 8703, 30th Ann. In: SPE Offshore Tech Conf, Vol 2, Houston, 1998. 209~215
- 6 Govardhan R, Williamson CHK. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. *J Fluid Mech*, 2000, 420: 85~130

- 7 Newman DJ, Karniadakis GE. A direct numerical simulation study of flow past a freely vibrating cable. *J Fluid Mech*, 1997, 334: 95~135
- 8 Kitagawa T, et al. An experimental study on vortex-induced vibration of a circular cylinder tower at a high wind speed. *J Wind Eng & Indus Aerodyn*, 1997, (69~71): 731~744
- 9 You D, et al. Control of flow induced noise behind a circular cylinder using splitter plates. *AIAA J*, 1998, 36(11): 1961~1967
- 10 Schumm et al. Self-excited oscillations in the wake of two-dimensional bluff bodies and their control. *J Fluid Mech*, 1994, 271: 17~53
- 11 Wood CJ. The effect of base bleed on a periodic wake. *J R Aeronaut Soc*, 1964, 68: 477~482
- 12 Berger E. Suppression of vortex shedding and turbulence behind oscillating cylinders. *Phys Fluids*, 1967, 10: s191~s193
- 13 Tokumaru DT, Dimotakis PE. Rotary oscillating control of a cylinder wake. *J Fluid Mech*, 1991, 224: 77~90
- 14 Lecordier JC, Hanmma L, Paranthoen P. The control of vortex shedding behind heated cylinders at low Reynolds numbers. *Exps Fluids*, 1991, 10: 224~229
- 15 Blevins RD. The effect of sound on vortex shedding from cylinders. *J Fluid Mech*, 1985, 161: 217~237
- 16 Strykowski PJ, Sreenivansan KR. On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds numbers. *J Fluid Mech*, 1990, 218: 71~83
- 17 Walshe DE, Woolton LR. Preventing wind induced oscillations of structures of circular sections. *Proc Inst Civil Engrs* (London), 1970, 47: 1~24
- 18 Roussopoulos K. Feedback control of vortex shedding at low Reynolds numbers. *J Fluid Mech*, 1993, 248: 267~296
- 19 邵传平, 鄂学全, 王薇. 尾流控制与低频不稳定性. 第五届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集, 1998.9, 湖南, 1998. 281~286 (Shao Chuanping, E Xuequan, Wang Wei. Low frequency instability and control of wake flow. In: Proceedings of 5th China National Conference on Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998.9, Hunan, 1998. 281~286 (in Chinese))

## CONTROL OF VORTEX SHEDDING AT MODERATE REYNOLDS NUMBERS<sup>1)</sup>

Shao Chuanping E Xuequan

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Wei Qingding Zhu Fengrong

(State Key Laboratory for Turbulence Study, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The suppression of vortex shedding from a circular cylinder has been studied experimentally in the Reynolds number range from 300 to 1600. The test was carried out in a water channel. The model cylinder was 1 cm in diameter, 38 cm in length. It was made of plexiglas and had a smooth surface. The cylinder was mounted on endplates at both ends and placed horizontally across the channel. Vortex shedding occurred to the cylinder in the  $Re$  number range tested. In order to suppress vortex shedding, a row of small rods of diameter 0.18 cm and length 1.5 cm were placed along the meridian of the cylinder. One end of each rod was perpendicularly connected

Received 21 May 2001, revised 15 November 2001.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10172087).

to the surface of the cylinder, and the other end exposed to the fluid. The rod distance and the angle of attack of the rods could be changed in order to adjust the suppression effect. The rod distance range tested was  $l/D = 1.0 \sim 3.0$ , and the range of angle of attack was  $\beta = 0^\circ \sim 90^\circ$ . The fluctuating velocities of the wake before and after suppression were measured by a Laser-Doppler Velometer at places 15~20 cm from the cylinder.

Some typical fluctuating velocities in suppressed and unsuppressed wake and their power spectra have been given in the paper. The distributions of the root-mean-square (r.m.s.) value of fluctuating velocities across the wake have also been given.

To a fixed rod distance  $l/D = 1.0$  and Reynolds number  $Re = 1600$ , when the angle of attack is in the zone  $30^\circ \leq \beta < 90^\circ$ , the method is very effective, vortex shedding is totally suppressed. When  $\beta$  is small, say,  $\beta = 0^\circ$ , the method is less effective, vortex shedding can not be suppressed. Compare to the maximum r.m.s. value of fluctuating velocity in unsuppressed wake, the values in the wakes when angle of attack  $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  and  $90^\circ$  can be reduced to 77%, 55%, 51%, 48% and 61% respectively. The rod distance also influences the suppression effect. To a fixed angle of attack  $\beta = 30^\circ$  and Reynolds number  $Re = 1600$ , the maximum r.m.s. value of fluctuating velocity in rod distance  $l/D = 1, 2, 3$  are respectively 55%, 61% and 64% the value of that in unsuppressed wake.

**Key words** flow control, suppression of vortex shedding, flow-induced vibration, circular cylinder, moderate Reynolds numbers