

较高 Re 数圆柱尾流的控制¹⁾

邵传平^{*,2)} 王建明[†]

^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

[†](北京大学湍流与复杂系统研究国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 引入一个窄条作为控制件, 在 $Re = 3.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$ 范围内对圆柱尾流进行控制实验。窄条长度与柱体长度相同, 厚度为柱体直径的 0.015~0.025 倍, 宽度为柱体直径的 0.18 倍。窄条的两个长边与柱中心轴平行, 而且三者共面。控制参数为窄条位置, 可由间距(窄条到柱轴)比 $\lambda/(0.5D)$ 和风向角 β (窄条面与来流的夹角) 确定。采用流动显示和热线测量方法, 对控制和未控制尾流的流动状态, 平均速度分布和脉动速度情况, 以及作用于柱体和窄条的总阻力进行了研究和比较。研究结果证明, 当窄条位于柱体尾流中一定区域内时, 可有效抑制柱体两侧的旋涡脱落。有效控制后的尾流湍流度也相应减小。在不同 Re 数下, 找出了有效抑制旋涡脱落的窄条位置区域, 并用动量积分估计了作用于柱体和窄条上的总阻力与光圆柱阻力的比值及其随风向角的变化。对 $\lambda/(0.5D) = 2.9$ 情况, 得到了减阻的风向角区域 ($\beta = 0^\circ \sim 40^\circ$ 与 180° 附近) 以及最大减阻率 32%。以上事实表明, 在近尾流局部区域施加小的干扰, 可改变较高 Re 数圆柱尾流的整体性质。

关键词 流动控制, 旋涡脱落, 圆柱, 高雷诺数, 减阻

中图分类号: O357.5⁺4 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2006)02-0153-09

引 言

钝体绕流的显著特点是大范围的边界层分离、宽尾流和旋涡脱落。随着旋涡脱落的产生, 物面两侧的压力分布发生交替变化, 从而形成一个交变力, 引起物体振动。涡激振动不仅造成疲劳损伤, 当脱落频率位于结构固有频率周围一定区域时, 还会引起共振, 造成直接破坏^[1]。旋涡脱落还有增大阻力^[2]、产生噪声等危害^[3]。

尾流控制研究的重要内容是对旋涡脱落的抑制, 进而对作用于物体的平均和脉动升、阻力进行控制。人们出于不同的工程应用目的, 对尾流控制进行了很多研究, 提出了不少方法, 其中主动控制方法有: 对尾缘或边界层吹气或抽吸^[4]、柱体振动^[5,6]、物体表面或尾流加热^[7,8]及声干扰^[9]等; 被动控制方法有: 在尾流中设隔离板^[10,3], 在柱体表面放置缆绳、板条、鳍片、网状物等; 文献^[11,12]还给出了其它一些方法。尽管已经存在多种旋涡脱落抑制方法, 但由于每种方法在应用方面都有很大局限性, 很多工程问题没有很好地解决。

从控制方法方面看, Strykowski 等^[8]的方法

具有其独特性和启发性。他们在主圆柱旁平行地放一直径为主圆柱直径 0.05~0.25 倍的小圆柱, 当小圆柱位于主圆柱尾流中一定区域内时, 可有效控制主圆柱尾流的旋涡脱落。这说明, 通过对近尾流局部区域施加小的干扰, 尾流的整体性质即可得到彻底改变。但是, 实验表明, 该方法仅在很低雷诺数范围内有效 ($Re < 100$)。

本文所要讨论的问题是, 如果将作为控制装置的小圆柱的截面形状改变, 是否能提高雷诺数的有效控制范围? 为回答这个问题, 本文引入一个极薄的窄条取代小圆柱, 在风洞中进行实验。

1 模型与实验布置

实验在北京大学湍流与复杂系统研究国家重点实验室风洞中进行。风洞实验段长 2m, 宽和高均为 0.6m, 在 1~15m/s 风速范围内可在实验段提供均匀、稳定、湍流度约为 0.2% 的来流。如图 1 所示, 圆柱模型在风洞实验段垂直放置。模型长度为 0.60m, 直径 D 为 3cm 和 5cm 两种。在圆柱旁边平行地放置一个与圆柱长度相同, 宽为 $0.18D$, 厚度为

2005-06-17 收到第 1 稿, 2005-11-03 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金资助项目 (10172087, 10472124)。

2) E-mail: shaocp2005@yahoo.com.cn

0.015~0.025D 的薄窄条. 如图 1(b), 为固定窄条, 引入一排小圆棒, 使其沿圆柱的一条母线均匀布置, 每个小棒的直径为 0.065~0.08D, 均垂直于柱面并与圆柱牢固连接. 窄条由薄到厚分别由双面胶带纸、铝条和木条形成. 形成的窄条在实验风速下观察不

到振动. 圆柱由有机玻璃管制成, 一端插入一固定于风洞底壁的短轴内, 另一端顶靠在风洞顶壁上. 圆柱可绕轴旋转. 在短轴一端的风洞底壁上设置角度刻度盘, 以测量窄条风向角.

为获得整个流场的流动情况, 采用烟线技术对

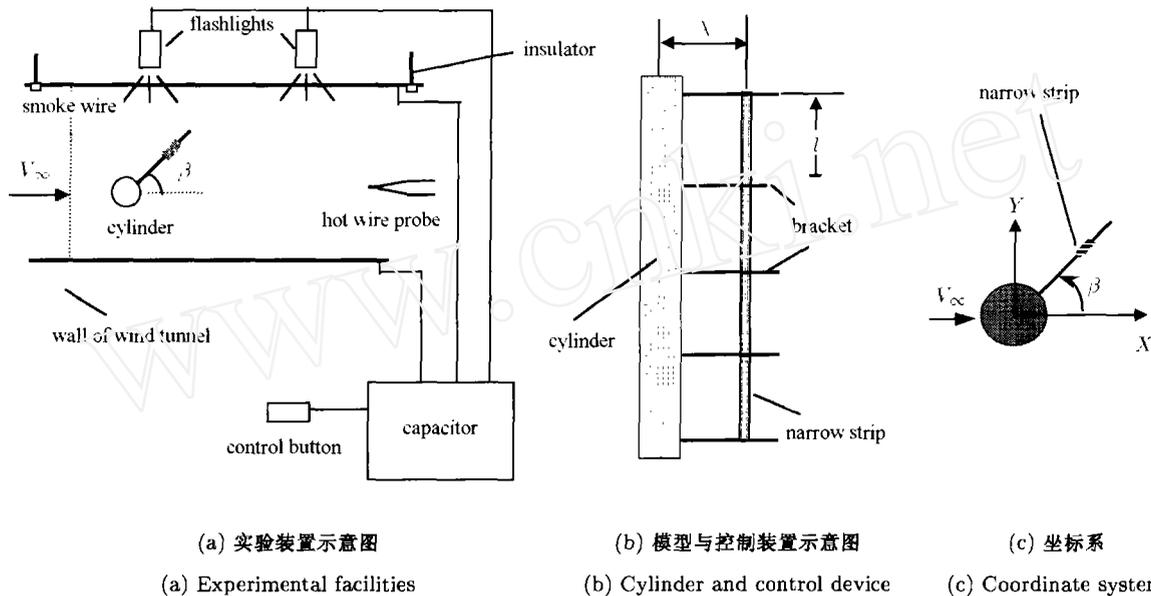


图 1 实验装置与控制方法

Fig.1 Control method and experimental apparatus

圆柱上游 3D 到下游 15D 范围进行流动显示. 在柱前方布置一根拉紧的细金属丝 (直径 50 μ m), 使其位于展向中间截面. 金属丝的两端与导线连接, 导线与一自动充电电容器相连. 每次实验时在细金属丝上均匀涂抹油脂. 电容器放电时, 细丝和油脂被电流加热, 在风中发出一烟帘, 烟帘绕过圆柱模型, 将流动情况显示出来. 为取得实验照片, 用闪光灯片光源从风洞侧壁照射烟帘. 发烟和闪光灯由触发器控制. 从开始发烟到闪光出现有一时间延迟, 可在仪器上设定. 照像时将相机 B 门在黑暗中打开待闪光.

为了获得流动的定量结果, 在圆柱下游 12.5D 的截面上用 Dantec 热线风速仪对每种流动状况进行整个剖面的测量, 以得到平均与脉动速度随控制参数的变化情况. 采样频率取为 400 Hz 和 1024 Hz 两种, 采样时间 40~100 s.

2 实验结果

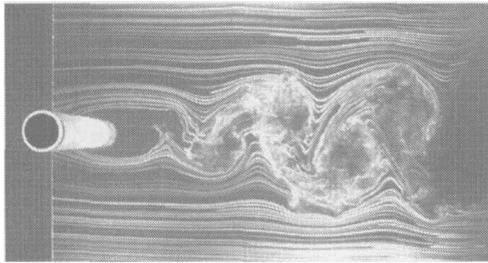
实验的参数范围是: $Re = 3.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$, 窄条间距 $\lambda/(0.5D) = 1.1 \sim 3.8$, 窄条风向角 $\beta =$

$0^\circ \sim 180^\circ$, 小棒间距 $l/D = 0.67 \sim 4.0$.

首先对支架的影响进行了研究. 圆柱直径为 3 cm 时, 支架小棒直径 0.25 cm, 小棒在圆柱外面的长度 4.5 cm; 圆柱直径为 5 cm 时, 支架小棒直径 0.4 cm, 小棒在圆柱外面的长度 7.5 cm. 对 5 个不同雷诺数、 $l/D = 0.67 \sim 4.0$ 的 4 个小棒间距, 进行了流动显示和热线测量实验. 风向角在 $\beta = 0^\circ \sim 180^\circ$ 范围每隔 10° , 关键位置每隔 5° 进行一次实验. 通过与光圆柱的流场照片比较, 下游 $X/D = 5.0 \sim 12.5$ 的尾流速度剖面、脉动速度及其功率谱、湍流度分布的比较, 及对各点测量的脉动速度大小进行统计得到的概率密度分布的比较, 证明各种工况下支架本身对下游流场的影响很小, 可以忽略. 这与较低雷诺数和小棒直径较大的实验结果^[19]不同. 为节省篇幅, 这里仅在图 2(b) 给出一种支架工况与光圆柱 (图 2(a), 无控制装置) 情况的流场比较. 以下内容仅考虑窄条的作用.

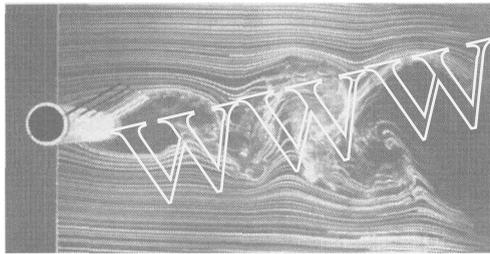
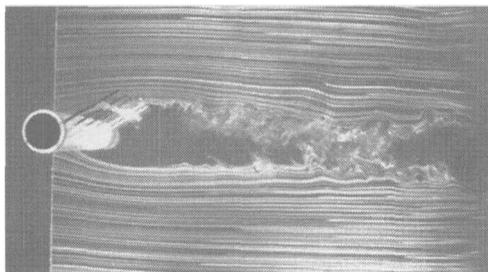
2.1 流动显示

在实验的 Re 范围内, 对不同间距 $\lambda/(0.5D)$,



(a) 圆柱无控制装置

(a) Cylinder without control device

(b) 圆柱与支架 (无窄条) (棒间距 $l/D = 1.8$, 风向角 $\beta = 30^\circ$)(b) Cylinder with bracket (without strip) (distance between neighboring rods $l/D = 1.8$, angle of attack $\beta = 30^\circ$)(c) 棒间距 $l/D = 1.8$, 窄条间距 $\lambda/(0.5D) = 2.7$, 风向角 $\beta = 30^\circ$, 窄条宽度比 $b/D = 0.18$ (c) Distance between neighboring rods $l/D = 1.8$, distance between lengthwise-centerline of strip and cylinder axis $\lambda/(0.5D) = 2.7$, angle of attack $\beta = 30^\circ$ 图 2 控制与未控制流场的比较 (雷诺数 $Re = 5.25 \times 10^3$)Fig.2 Comparisons among the wakes of bare cylinder, cylinder with a bracket and cylinder with a strip ($Re = 5.25 \times 10^3$)

不同风向角 β 和不同窄条宽度比的工况进行了流动显示。图 2(c) 为窄条控制以后的典型流场。光圆柱和圆柱加支架的尾流均存在旋涡脱落现象。而加窄条控制后, 旋涡脱落被抑制, 尾流明显变窄。在风向

角不变的情况下, 对不同窄条间距进行实验, 得到一个有效抑制旋涡脱落的间距范围。同样, 在固定间距下, 对不同风向角进行实验, 可得到一个有效抑制旋涡脱落的风向角范围。

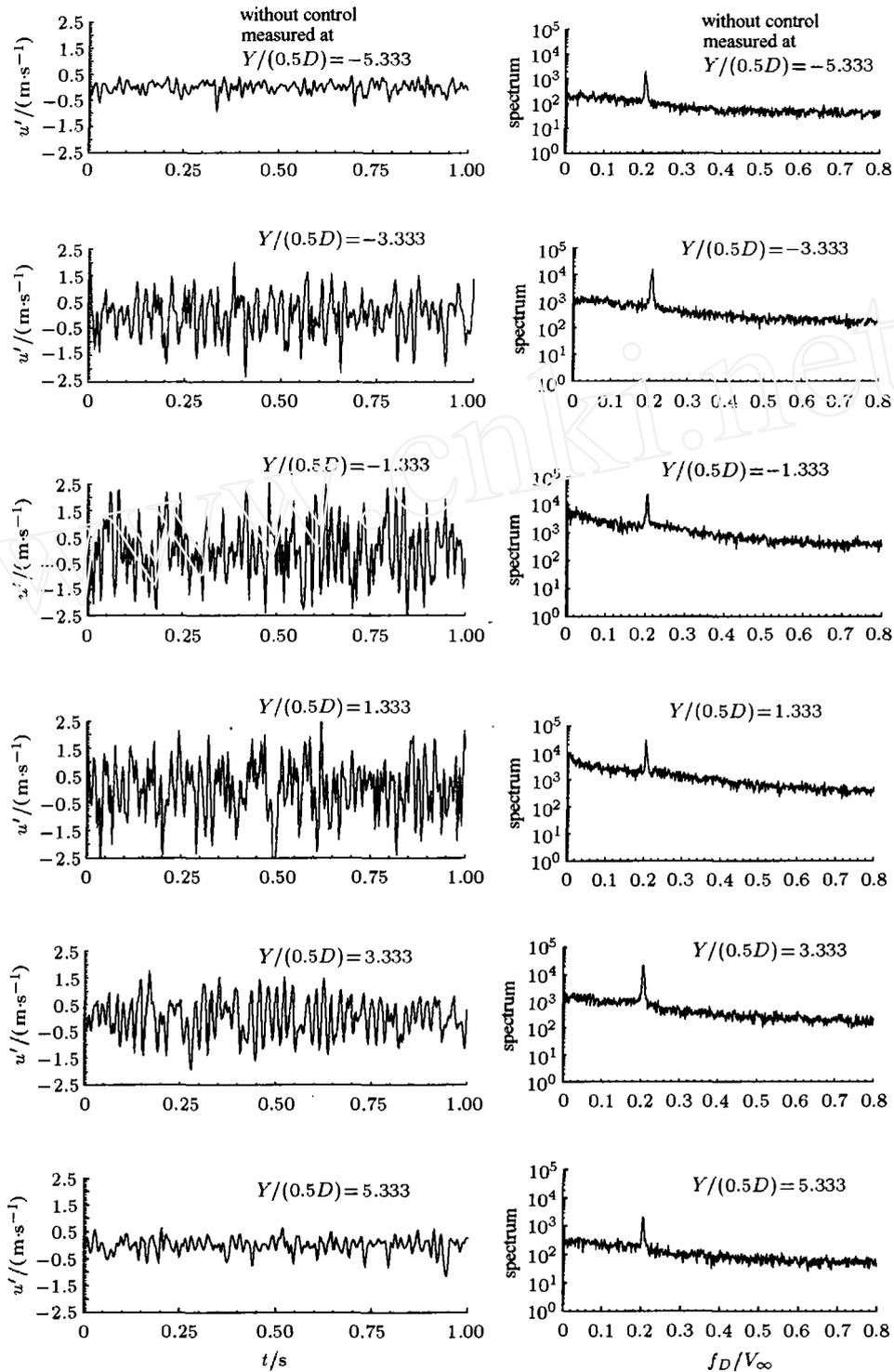
2.2 热线测量

为了对窄条控制效果进行定量评估, 在圆柱下游 $X/D = 12.5$ 处沿 Y 轴方向对尾流整个剖面进行逐点的测量。为考察每个控制状态的稳定性, 在典型位置进行若干次采样比较。采样频率取 1024 Hz (本实验的圆柱尾流旋涡脱落频率均在 50 Hz 以下), 采样时间 40 s 。对控制后的重要工况进行多次重复测量, 结果证明各次采样得到的脉动速度, 其功率谱、脉动幅值概率密度分布和湍流度分布等都基本相同, 实验结果具有重复性。

图 3(a) 列为未加控制时剖面上各处的相对速度脉动 (瞬时脉动速度除以当地平均流速) 情况, 可以看到, 未控制时靠近尾流中心线的点脉动速度较大, 而越远离中心线, 脉动速度越小。图 3(b) 为未加控制时各处脉动速度的功率谱, 各谱在无量纲频率约为 0.2 处均有一尖峰, 这是两侧旋涡脱落造成的结果。图 3(c) 为加窄条后的速度脉动情况, 各点处速度脉动幅值均比未控制时有所减小。图 3(d) 为加窄条后的脉动速度功率谱情况, 谱上的尖峰均已消失, 说明旋涡脱落得到有效抑制。

图 4 为剖面上各点测量统计得到的脉动速度相对幅值 (瞬时脉动速度大小除以当地平均流速) 概率分布密度的比较, $Re = 1.64 \times 10^4$ 。未控制时概率密度分布 (有方块的曲线) 较平坦, 控制后 (有三角形的曲线) 较大幅值处的概率密度减小, 而较小幅值处的概率密度增大。说明控制后总体上尾流速度脉动被减弱。

尾流湍流度分布在一定程度上代表尾流脉动的整体情况。图 5 为不同的窄条风向角下尾流湍流度分布与未控制尾流湍流度分布的比较, $Re = 1.64 \times 10^4$, 窄条间距 $\lambda/(0.5D) = 2.9$ 。窄条风向角在 $\beta = 25^\circ \sim 45^\circ$ 之间时, 湍流度比未控制时有明显减小。而在 $\beta = 60^\circ \sim 150^\circ$ 之间, 窄条存在的一侧, 局部湍流度增大, 这是窄条本身尾迹影响的结果。值得注意的是, 在 $\beta = 180^\circ$ 附近, 即窄条位于圆柱正前方附近时, 湍流度也有所减小。



(a) 未控制尾流脉动速度
(a) Fluctuating velocities in the wake without control

(b) 未控制尾流脉动速度谱
(b) Spectra of fluctuating velocities in the wake without control

图 3 控制前、后圆柱尾流剖面 $X/D = 12.5$ 上各点脉动速度及其功率谱的比较 ($Re = 1.64 \times 10^4$, 窄条宽 $b/D = 0.18$, $\lambda/(0.5D) = 2.9$, $\beta = 45^\circ$)

Fig.3 Comparisons of fluctuating velocities and their power spectra measured at the section $X/D = 12.5$ in a controlled wake (strip width $b/D = 0.18$, $\lambda/(0.5D) = 2.9$, $\beta = 45^\circ$) with those in the wake without control. ($Re = 1.64 \times 10^4$)

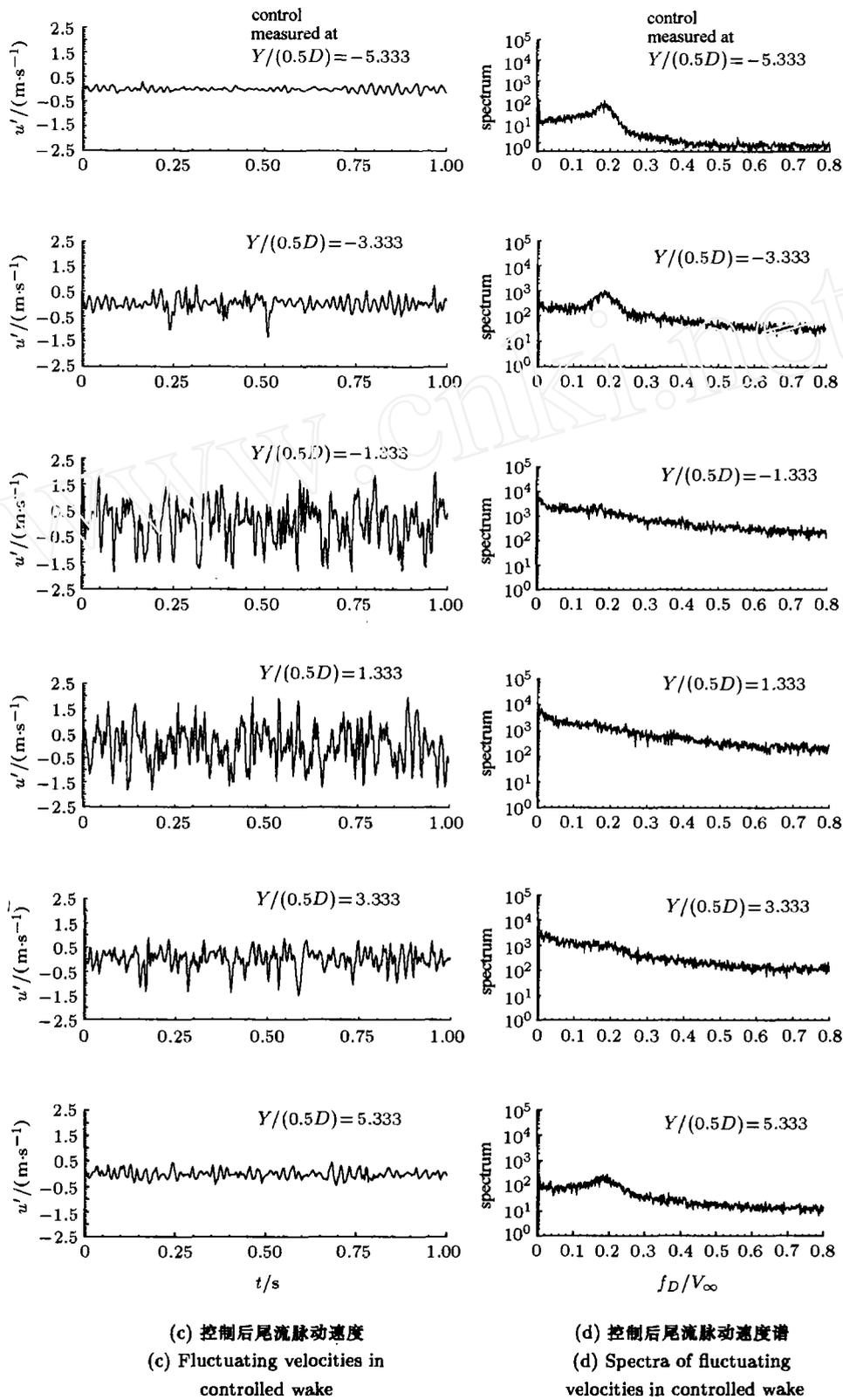


图 3 控制前、后圆柱尾流剖面 $X/D = 12.5$ 上各点脉动速度及其功率谱的比较. ($Re = 1.64 \times 10^4$, 窄条宽 $b/D = 0.18$, $\lambda/(0.5D) = 2.9$, $\beta = 45^\circ$) (续)

Fig.3 Comparisons of fluctuating velocities and their power spectra measured at the section $X/D = 12.5$ in a controlled wake (strip width $b/D = 0.18$, $\lambda/(0.5D) = 2.9$, $\beta = 45^\circ$) with those in the wake without control. ($Re = 1.64 \times 10^4$) (continued)

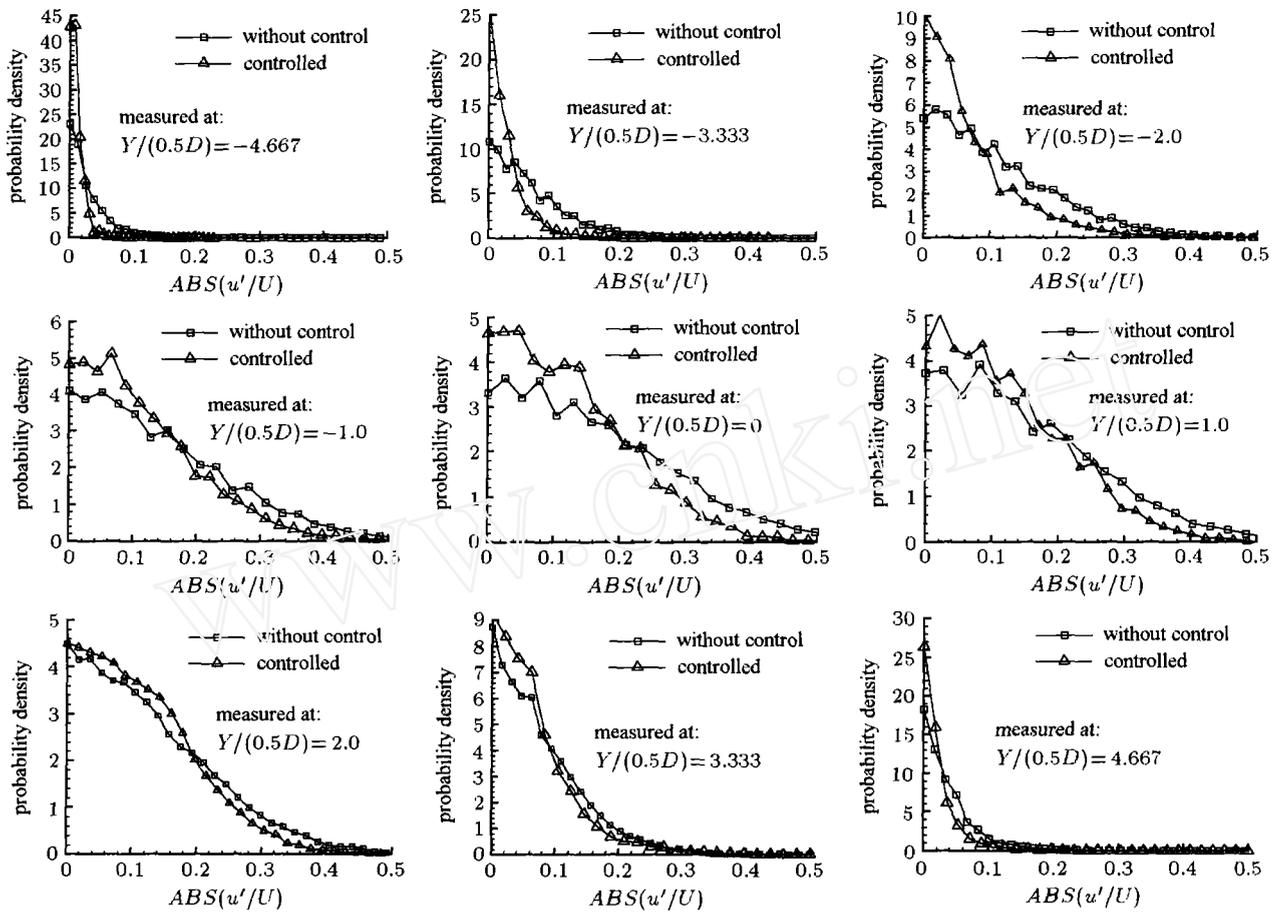


图 4 圆柱尾流剖面 $X/D = 12.5$ 上各点脉动速度相对幅值的概率密度比较 (控制窄条宽度 $b/D = 0.18$, 间距 $\lambda/(0.5D) = 2.90$, 风向角 $\beta = 45^\circ$, $Re = 1.64 \times 10^4$)

Fig.4 Probability density of magnitude of relative fluctuating velocity at section $X/D = 12.5$: Comparison between controlled wake (strip width $b/D = 0.18$, $\lambda/(0.5D) = 2.90$, $\beta = 45^\circ$) with the wake without control. ($Re = 1.64 \times 10^4$)

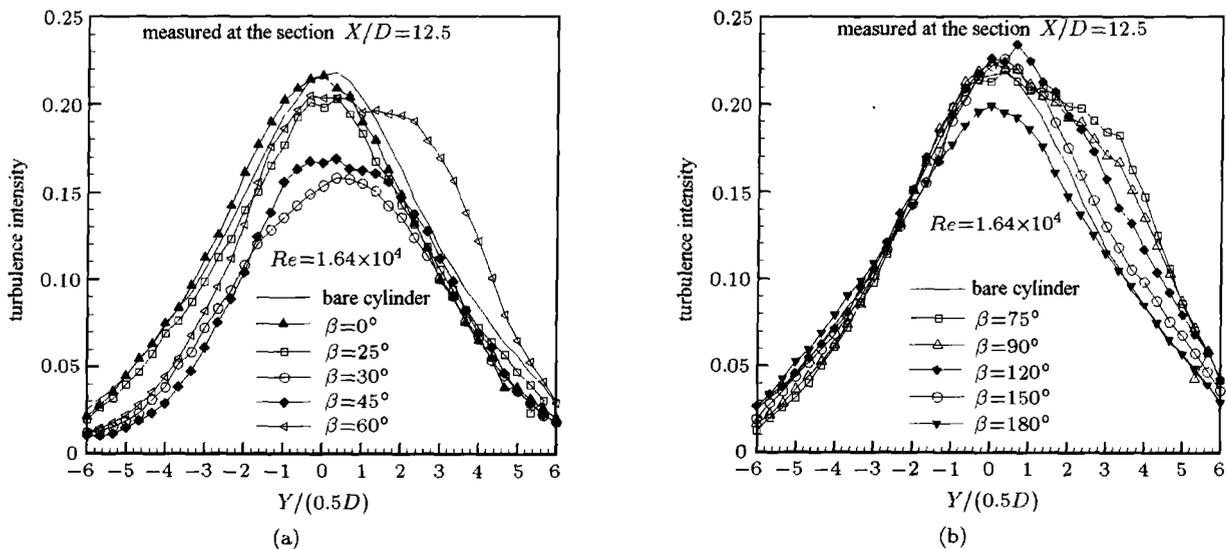


图 5 窄条风向角对圆柱尾流湍流度的影响, 图中单实线为未控制尾流情况. ($Re = 1.64 \times 10^4$, 窄条宽 $b/D = 0.18$, 窄条间距 $\lambda/(0.5D) = 2.9$, 测量剖面 $X/D = 12.5$)

Fig.5 Influence of angle of attack of the strip β on the distribution of turbulence intensity of the wake. $Re = 1.64 \times 10^4$, width of the strip $b/D = 0.18$, distance between the strip and the cylinder $\lambda/(0.5D) = 2.9$, measured at section $X/D = 12.5$

涡脱落得到有效抑制的定义可表示为：尾流剖面上各点的脉动速度功率谱上均无明显尖峰。图 6 为有效控制旋涡脱落的窄条位置区域随 Re 数的变化。可以看出，在一定范围内有效区域随 Re 数增大而有稍微扩张的趋势。

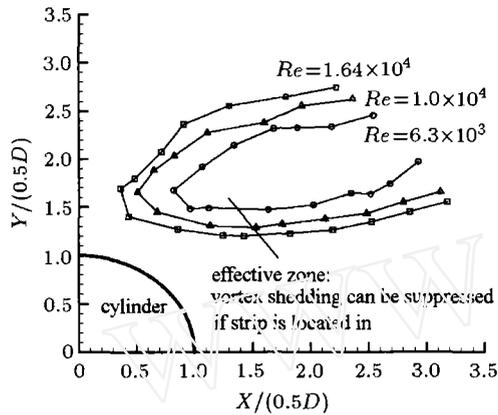
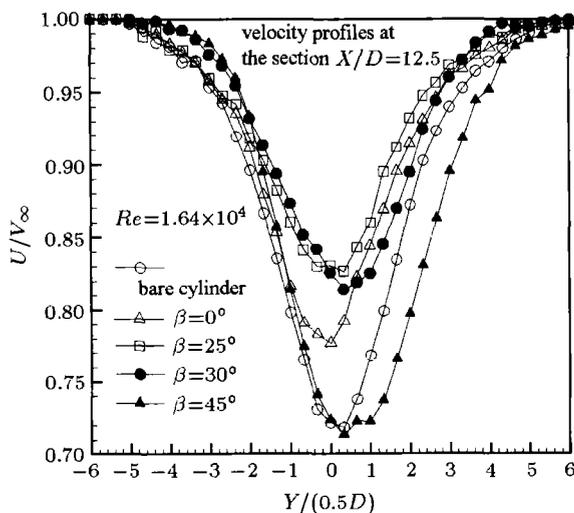


图 6 有效抑制圆柱尾流旋涡脱落的窄条位置区域随雷诺数的变化 (窄条宽度 $b/D = 0.18$)

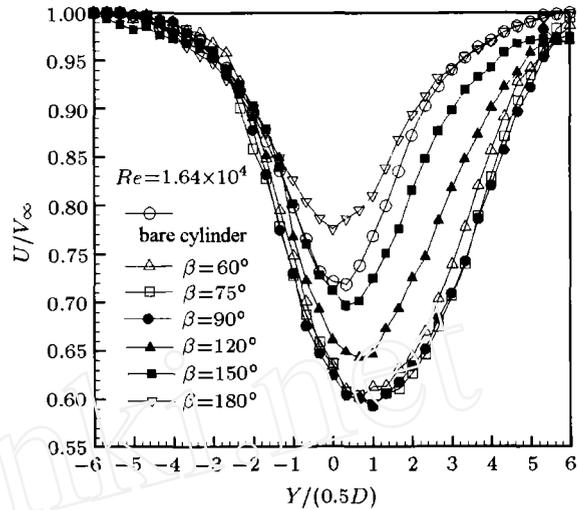
Fig.6 Zone of strip position in which vortex shedding behind circular cylinder can be effectively suppressed: Influence of Re number. The width of strip used here is $b/D = 0.18$

需要指出的是，在有效区域的外侧附近，旋涡脱落虽然未被完全抑制，其强度（谱上尖峰高度）明显减弱。

各种窄条风向角下圆柱尾流的速度亏损情况及其与未控制尾流速度亏损的比较如图 7 所示。可知窄条风向角 β 在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 附近，尾流速度亏损量比未控制时少；而 $\beta > 45^\circ$ 时速度亏损量则大于未控制时，特别在 $\beta = 60^\circ \sim 90^\circ$ 附近，速度亏损最大。



(a) $\beta = 0^\circ \sim 45^\circ$



(b) $\beta = 60^\circ \sim 180^\circ$

图 7 窄条风向角 β 对圆柱尾流速度亏损的影响。空心圆线为未控制情况。 ($Re = 1.64 \times 10^4$, 窄条宽 $b/D = 0.18$, 间距 $\lambda/(0.5D) = 2.9$, 测量剖面 $X/D = 12.5$)

Fig.7 Influence of angle of attack of the strip on velocity loss curve with empty circle is without control. $Re = 1.64 \times 10^4$, $\lambda/(0.5D) = 2.9$, measured at the section $X/D = 12.5$

但是，随着风向角由 90° 进一步增大时，速度亏损又逐渐减小。到 $\beta = 180^\circ$ 附近，速度亏损量再次低于未控制时。

根据在 $X/D = 12.5$ 处测得的速度剖面，可以根据动量损失公式粗略估算作用在圆柱和控制装置上的总的流体阻力 R

$$R = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 D C_D$$

$$C_D = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U}{V_\infty} \left(1 - \frac{U}{V_\infty}\right) dy'$$

$$y' = Y/(0.5D)$$

图 8 为得到的相对阻力 C_D/C_{D_0} 。随窄条风向角的变化。其中 C_D 为有窄条时的总阻力系数， C_{D_0} 为没有控制装置时圆柱的阻力系数。可以看出在 $0^\circ < \beta < 45^\circ$ ，以及 $\beta = 180^\circ$ 附近，窄条具有减阻效果。在 $\beta = 25^\circ \sim 30^\circ$ 附近，最高可减阻 32%。

对比图 6 和图 8 可知，减阻区与旋涡脱落有效抑制区并不完全相同，这可能是作用于控制装置本身阻力的影响造成的。

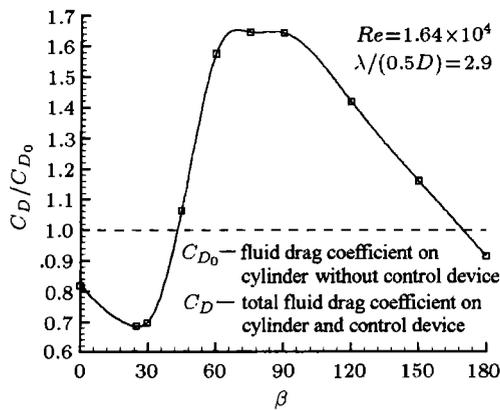


图 8 窄条风向角对减阻效果的影响。 ($Re = 1.64 \times 10^4$, 窄条宽度 $b/D = 0.18$, 窄条间距 $\lambda/(0.5D) = 2.9$)

Fig.8 Influence of angle of attack β on the effect of drag reduction. $Re = 1.64 \times 10^4$, strip width $b/D = 0.18$, strip distance $\lambda/(0.5D) = 2.9$

3 结 论

本文在圆柱尾流中引入一个长度与圆柱模型相同, 宽度为 $0.18D$, 厚度很小的窄条, 以研究它对尾流的控制效果。在 $Re = 3 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$ 范围内的实验表明, 当窄条处于近尾流中一定区域内时, 圆柱尾流的旋涡脱落可得到有效抑制。抑制后尾流湍流度明显减小。这证明在较高 Re 数下, 圆柱尾流的整体性质也可通过对局部区域施加小的干扰加以彻底改变。

用热线测量得到了不同 Re 数下有效抑制旋涡脱落的窄条位置区域。实验范围内这个有效区随 Re 数的增大而稍微增大。根据速度剖面测量结果, 运用动量积分估计了作用于圆柱和控制件上的总阻力, 并在窄条间距 $\lambda/(0.5D) = 2.9$ 下, 求出了总阻力随风向角的变化, 得到了减阻的风向角范围 $\beta = 0^\circ \sim 40^\circ$ 及 180° 附近, 和最大减阻率 32%。

致谢 实验研究过程中, 得到北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室魏庆鼎教授的热心指导,

并得到该实验室陈凯博士、梁彬高工、朱凤荣工程师、李长岭工程师、孟宪忠工程师及于永生、王亚利等同志的热情帮助, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- Govardhan R, Williamson CHK. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. *J Fluid Mech*, 2000, 420: 85~130
- Roshko A. Perspectives on bluff body aerodynamics. *J Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 49: 79~100
- You D, et al. Control of flow induced noise behind a circular cylinder using splitter plates. *AIAA J*, 1998, 36(11): 1961~1967
- Schumm M, Berger E, Monkewitz P. Self-excited oscillations in the wake of two-dimensional bluff bodies and their control. *J Fluid Mech*, 1994, 271: 17~53
- Berger E. Suppression of vortex shedding and turbulence behind oscillating cylinders. *Physics Fluids*, 1967, 10: s191~s193
- Tokumaru DT, Dimotakis PE. Rotary oscillating control of a cylinder wake. *J Fluid Mech*, 1991, 224: 77~90
- Lecordier JC, Hamma L, Parantjeon P. The control of vortex shedding behind heated cylinder at low Reynolds numbers. *Exps Fluids*, 1991, 10: 224~229
- Strykowski PJ, Sreenivasan KR. On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds numbers. *J Fluid Mech*, 1990, 218: 71~83
- Blewins RD. The effect of sound on vortex shedding from cylinders. *J Fluid Mech*, 1986, 161: 217~237
- Roshko A. On the wake and drag of bluff bodies. *J Aeronaut Sci*, 1955, 22: 124~132
- Zdravkovich MM. Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. *J Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981, 7: 145~189
- Sumer BM, Fredsøe J. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. World Scientific, 1997
- 邵传平, 鄂学全, 魏庆鼎等. 中等雷诺数圆柱尾流旋涡脱落的控制. *力学学报*, 2002, 34(4): 609~615 (Shao Chuanping, E Xuequan, Wei Qingding, et al. Control of vortex shedding behind a circular cylinder at moderate Reynolds numbers. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34(4), 609~615 (in Chinese))

CONTROL OF CIRCULAR CYLINDER WAKES AT RELATIVELY HIGH REYNOLDS NUMBERS¹⁾

Shao Chuanping^{*,2)} Wang Jianming[†]

^{*}(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

[†](*State Key Lab for Turbulence and Complex Systems, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract A narrow strip has been introduced as an element to control circular cylinder wakes at Reynolds numbers $Re = 3.0 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^4$. The strip is $0.18D$ (D is diameter of the cylinder) wide, $0.015D \sim 0.025D$ thick and as long as the cylinder. The long margins of the strip are parallel to and coplanar with the cylinder axis. The strip is fixed by a row of small rods distributed along a meridian and perpendicularly connected to the surface of the cylinder. The rods have been proven to have negligible influence on the flow. The control parameter is strip position, which can be determined by $\lambda/(0.5D)$ - (unified) distance between the cylinder axis and the length-wise centerline of the strip, and β -angle of attack of the strip.

The experiment was conducted in a low turbulence wind tunnel of test section 2 m long, 60 cm wide and 60 cm high. Two circular cylinders of diameter $D = 3$ cm and 5 cm were tested respectively in the range of $\beta = 0^\circ \sim 180^\circ$ and $\lambda/(0.5D) = 1.1 \sim 3.8$. The overall information of the cylinder wake was visualized by smoke-wire technique and the detailed local information of fluctuating velocity was detected by a hot-wire anemometry at various points from $Y/(0.5D) = -6.0$ to 6.0 at a stream-wise station $X/D = 12.5$.

Visualization pictures and power spectra of fluctuating velocities show that vortex shedding on both sides of the cylinder can be effectively suppressed if the strip is located in a certain zone in the near wake. The effective zones at $Re = 6.3 \times 10^3$, 1.0×10^4 and 1.64×10^4 have been found out with accuracy 0.1 of $\lambda/0.5D$ and 2.5° of β . The zone enlarges slightly with the increase of Re in the range tested.

Distributions of turbulence intensity for various β from 0° to 180° at $\lambda/(0.5D) = 2.9$ and $Re = 1.64 \times 10^4$ have been measured. Compare with the case without control, the turbulence intensity on both sides of the wake is reduced when β is in the range of $0^\circ \sim 50^\circ$ or in the vicinity of 180° . However, in the range $\beta = 60^\circ \sim 120^\circ$, an increase appears on the side where the strip resides, while no increase presents on the opposite side.

Total resistance on cylinder and control element for various β from 0° to 180° at $\lambda/(0.5D) = 2.9$ and $Re = 1.64 \times 10^4$ has been evaluated by momentum integration using measured velocity profiles. It shows that the total resistance in the range of $\beta = 0^\circ \sim 40^\circ$ and in the vicinity of $\beta = 180^\circ$ is obviously smaller than the resistance on bare cylinder. The maximum reduction of resistance is about 32%, which happens at $\beta = 25^\circ \sim 30^\circ$.

All the results mean, local passive interference of the strip can induce global changes of the wake at high Reynolds numbers.

Key words control, vortex shedding, circular cylinder, high Re number, resistance reduction

Received 17 June 2005, revised 3 November 2005.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10172087, 10472124).

2) E-mail: shaocp2005@yahoo.com.cn