

较高雷诺数圆柱尾流旋涡脱落的控制*

邵传平

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

王建明 魏庆鼎

(北京大学湍流与复杂系统研究国家实验室, 北京 100871)

摘要 本文提出一种改进的方法用以控制较高雷诺数圆柱尾流的旋涡脱落。在圆柱模型旁平行地放一薄窄条, 其长度与圆柱相同, 宽度为圆柱直径的 0.2 倍, 厚度为直径的 0.015 倍。窄条面与圆柱母线平行而与柱面垂直。为固定窄条, 引入一排小圆棒, 使其位于窄条所在平面并垂直地与柱面连接。圆棒直径为圆柱直径的 0.067 倍, 长度为圆柱直径的 1.4 倍。可变参数包括雷诺数, 窄条与圆柱之间的距离, 窄条与来流的攻角, 以及棒间距。实验结果显示, 当雷诺数 $Re=2000\sim 5500$, 或 $Re>8000$ 时, 圆柱尾流中存在一个区域, 当窄条位于此区域内时, 旋涡脱落被有效抑制。 $Re>8000$ 时, 旋涡脱落被抑制的尾流很窄; 而 $Re=2000\sim 5500$ 时, 即使旋涡脱落被抑制, 尾流也较宽。在 $Re=5500\sim 8000$ 之间有一个过渡雷诺数区, 此过渡区域内应用此方法难以抑制旋涡脱落。实验表明小圆棒对流动的影响不大, 该控制方法基本上是二维的, 窄条起决定作用。

关键词 流动控制、钝体尾流、旋涡脱落、高雷诺数、流动显示

1. 引言

在大多数雷诺数情况下, 钝体尾流后面总是存在旋涡脱落现象(Roshko, 1961)。钝体两侧的压力分布伴随旋涡脱落发生交替变化, 从而在物体上产生一个交变力。在此力作用下物体会发生振动。涡致振动不仅对物体造成疲劳损伤, 当涡脱落频率与物体固有频率相差不大时, 还可能引起共振, 直接对结构造成破坏(Govardhan & Williamson, 2000)。旋涡脱落还有增大阻力、产生噪音等危害(You et al, 1998)。当然, 它也可能有好的一面, 比如战斗机作大半径提升回转过程中分离涡可提供所需的升力。

人们出于不同的工程应用目的, 对旋涡脱落的抑制进行了很多研究, 提出了不少方法, 如, 在尾流中设隔离板(Roshko, 1954; You et al, 1998), 在柱体表面放置缆绳、板条、鳍片、网状物等(Walsh & Wootton, 1970; Hallam et al, 1978; King et al, 1977; Every et al, 1982; Jones & Lamb, 1992), 尾缘吹气或抽吸(Schumm et al, 1994), 柱体振动(Berger, 1961; Tokumaru & Dimotakis, 1991), 物体表面加热(Lecorder et al, 1991), 及声干扰(Blevins, 1985)。还有一些方法可在综述文章 Sumer & Fredsøe (1997)及 Zdravkovich (1981)中找到。尽管已经存在多种旋涡脱落控制方法, 但由于每种方法在应用方面都有局限性, 工程中仍有很多问题没有很好地解决。

尾流控制研究不仅在工程上有意义, 在旋涡形成机理研究方面, 也很重要。根据不同的理论, 有几种不同的控制观点。早期的研究者致力于控制边界层分离(Prandtl et al, 1969 流体力学概论); 后又研究发展尾流稳定装置, 来防止柱体两侧分离剪切层的相互作用(Grant & Patterson, 1977; Stansby et al, 1986; Moros & Swan, 1992)。人们(Schumm et al, 1994; Roussopoulos, 1993; 孙亮等 2002)还研究了尾流整体振动模态概念下的主动与反馈控制方法并将其应用于低雷诺数情况。近来二维钝体尾流局部稳定性方面的研究进展(Huerre & Monkewitz, 1990; Monkewitz et al, 1993; 邵传平等 1999)表明, 旋涡脱落的产生, 很可能是由于尾流中存在一个足够大的绝对不稳定性区造成的。如果

* 国家自然科学基金资助项目(10172087)

设法消除或减小这个绝对不稳定性区,即可抑制旋涡脱落。Strykowski & Sreenivansan (1990)曾做过一个实验,在主圆柱旁平行地放一直径为主圆柱直径 0.05~0.125 倍的小圆柱,当小圆柱位于一定区域内时,可有效控制旋涡脱落。据信正是此小圆柱的存在破坏了主圆柱的绝对不稳定性。但是,实验表明,此方法仅在很低雷诺数范围内有效($Re \leq 79$)。为增大有效控制的雷诺数范围,邵传平等(2002)研究了沿母线垂直于圆柱面加一排小圆棒的三维控制方法。此方法在试验范围($Re=300\sim 1600$)内有效地抑制了旋涡脱落。

现在有几个问题:一是既然绝对不稳定性区随雷诺数增大而增大(Yang & Zebib,1989; Karnadakis & Triantafyllou,1989),如果再增大伴随小圆柱的直径,可否提高雷诺数的有效范围?二是如果将小圆柱截面形状改变,是否能提高雷诺数的有效控制范围?三是三维控制方法(邵传平等,2002),其有效控制的雷诺数范围到底有多大?

对于第一个问题,增大伴随物尺度会严重影响基本流,使其变得面目全非,这是稳定性理论所不希望的。同时,大的附设物对工程应用不便。对于后两个问题,我们对其进行了研究,提出一种改进的方法。下面就讨论其实验结果。

2. 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实验室低端流度风洞中进行。该风洞实验段长 3m,宽和高均为 60cm。在风速 0.6m/s~10m/s 范围内可在实验段提供均匀、稳定的来流。如图 1 所示,模型圆柱在风洞截面半高位置平行横放。圆柱直径 $D=3\text{cm}$,长度为 60cm。在圆柱旁边平行地放置一个长 60cm,宽为 0.2D,厚度为 0.015D 的窄条。窄条延伸面通过一条圆柱母线和柱轴。如图 1(b),为固定窄条,引入一排小圆棒,使其垂直地与圆柱柱面连接。窄条与小圆棒粘接起来。圆柱由有机玻璃管制成,一端插入一固定于风洞侧壁的短轴内,另一端由一根竖直细杆支撑。圆柱可绕轴旋转。在短

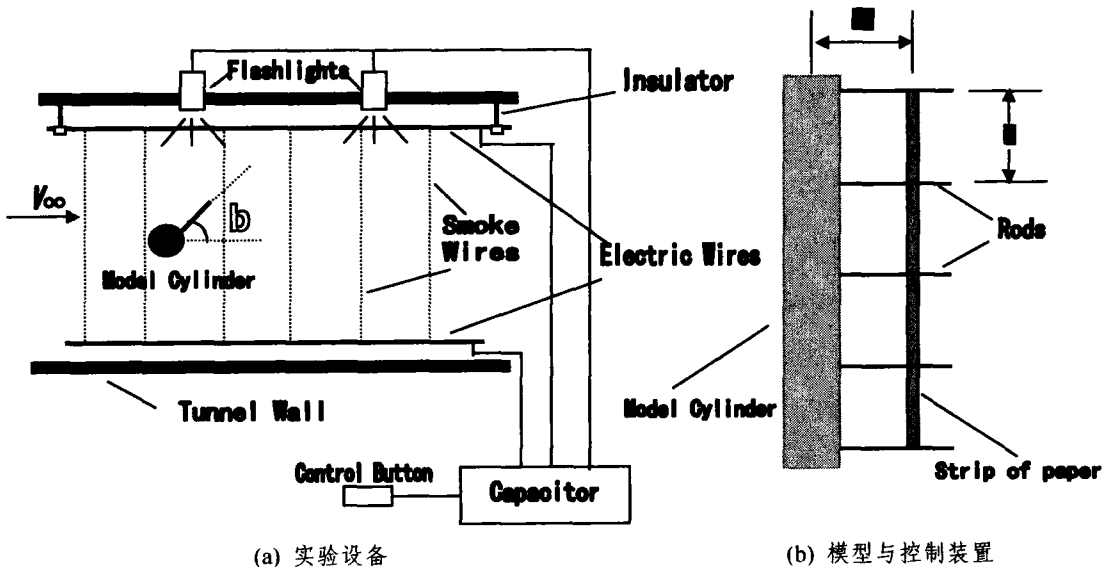


图 1 实验设备与控制方法

轴一端风洞侧壁的外侧设置角度刻度盘,以测量窄条方位。从圆柱上游 5D 到下游 15D 范围内的流场流动情况由烟线技术显示。在圆柱展向中间截面每隔一定距离布置一根竖直拉紧的细金属丝(直径 50 μm),每根细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云涂抹油脂。电容器放电时,细丝和油脂被电流加热,在风中发出一烟帘,眼帘绕过圆柱模型,将流动情况显示出来。为了取得实验照片,用闪光灯片光源从风洞顶部向下照射烟帘。发烟和闪光灯由

触发器控制。从开始发烟到闪光出现之间有一时间延迟，可在仪器上设定。照像时将相机快门在黑暗中打开等待闪光。

3. 实验结果与讨论

本问题的可变参数包括：雷诺数 Re —圆柱直径乘来流速度除以空气运动粘性系数， λ —圆柱轴线与窄条中线间的距离除以圆柱直径， l —相邻两小圆棒间的距离除以圆柱直径。 β —来流与窄条之间的夹角（见图1）。本次实验的范围是： $Re=2000\sim 12000$, $\lambda=0.6\sim 1.8$, $\beta=0^\circ\sim 180^\circ$, $l=0.67\sim 4.0$ 。

图2为窄条风向角对流动控制效果的影响， $Re=10000$, $\lambda=1.1$, $l=2.67$ 。当不加控制设施时，存在规则涡脱落（图2(a)）。当窄条风向角小于一定值 β_1 ，即 $0^\circ < \beta < \beta_1$ 时，涡脱落不能抑制，如图2(b)和2(c)所示。但当风向角再增大到一定范围，即 $\beta_1 < \beta < \beta_2$ 时，情况发生变化。在此范围内，圆柱尾流变窄，旋涡脱落得到有效控制(图2(d), 2(e))，这是本次实验所追求的理想情况。当风向角超过另一临界值 β_2 时，涡脱落又变得不可控。风向角在 0° 附近（图2(b)）和 180° 附近时，涡脱落非但不减弱，反而得到加强。风向角位于 90° 附近（图2(f), 2(g)和2(h)）时，窄条所在一侧出现小尺度旋涡，大尺度旋涡被抑制，而另一侧的大尺度旋涡仍然存在。

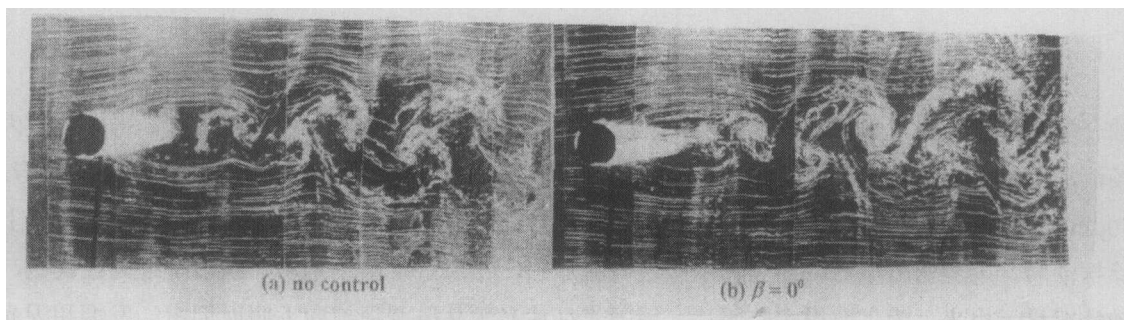
图3为窄条与圆柱之间无量纲间距对抑制效果影响的情况， $Re=3000$, $\beta=55^\circ$, $l=1.33$ 。作为比较，未加任何控制装置的情况（图3(a)）和仅有小圆棒而无窄条时的典型情况（图3(b)）也都在图中出现。与较低雷诺数情况（邵传平等，2002）不同，当 $Re > 2000$ 时，仅有一排小圆棒不能够抑制旋涡脱落。

当窄条与圆柱相接触（图3(c)，此时与柱体表面加板条的方法相似）时，旋涡脱落不能被有效抑制。窄条与圆柱之间缝隙很小时，旋涡脱落减弱（图3(d)），缝隙进一步加大时，旋涡脱落被抑制（图3(e), 3(f)）。

图4是能够有效抑制旋涡脱落的窄条位置区域，或称可控区。图4(a)为雷诺数 $Re=3000$ 的情况，而图4(b)为 $Re=10000$ 的情况。实验表明，当 $2000 < Re < 5500$ 时，或 $Re > 8000$ 时，旋涡脱落可得到有效控制。对于较高雷诺数（ $Re > 8000$ ）情况，当窄条位置由可控区边界一侧移动到另一侧时，流动发生突变。窄条在可控区内侧时，尾流狭窄，旋涡脱落被抑制，而在另一侧时，尾流很宽，旋涡脱落很强。对于较低雷诺数（ $2000 < Re < 5500$ ）情况，当窄条位置由可控区边界内侧移动到外侧时，旋涡脱落由可控逐渐过渡到不可控。此时可控区边界定义为过渡区中间线。与较高雷诺数情况不同的是，即使是旋涡脱落被抑制时，尾流也较宽。

在 $Re = 5500\sim 8000$ 之间存在一个 Re 数过渡区间，在此区间内旋涡脱落难以抑制。此时尾流中存在一个边界不易确定的很小区域，窄条位于该小区域时流动具有“双稳态”特性，即在不改变任何条件的情况下，一次实验得到旋涡脱落被抑制的结果，而另一次则得到不能抑制的结果。

对不同雷诺数和不同窄条位置的实验表明，小圆棒间距在实验范围 $l=0.67\sim 4.0$ 内对控制效果影响不大。结合图3(b)所示的情况可知，该控制方法基本上是二维的。



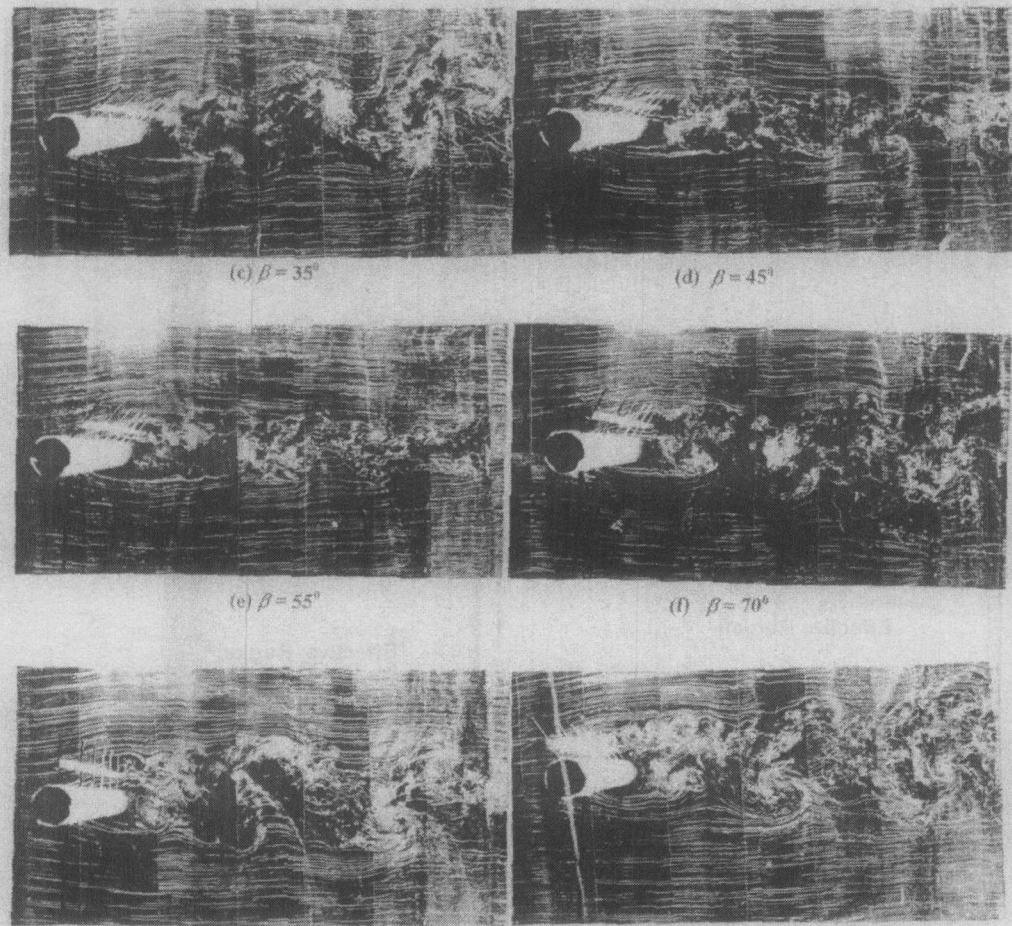
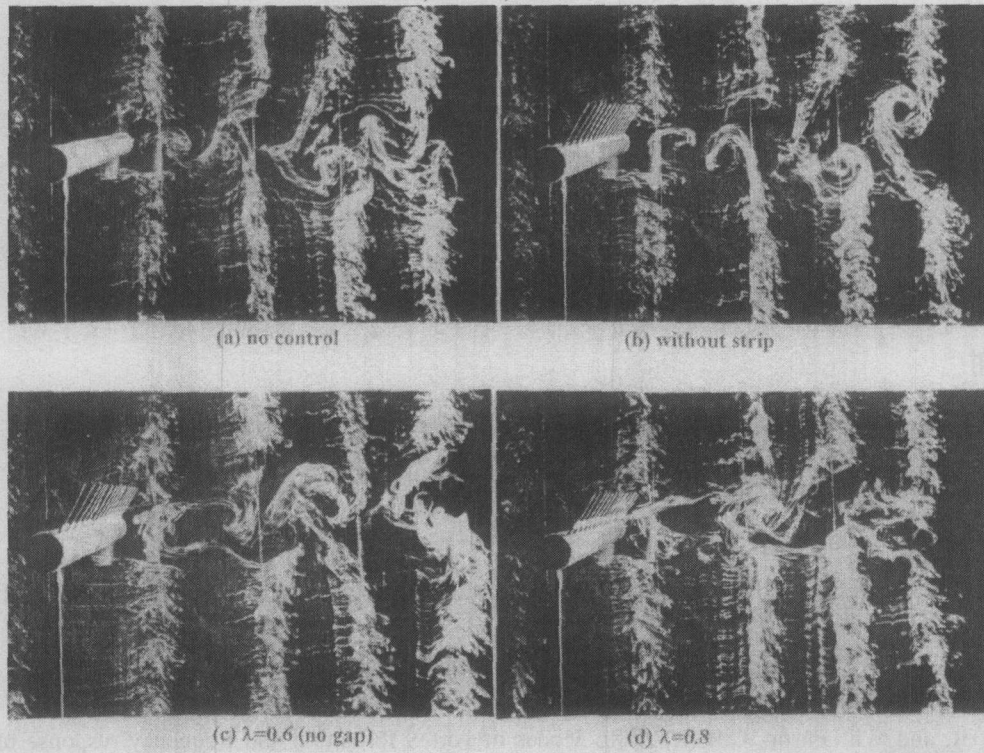


图2 窄条的风向角对控制效果的影响
 $Re = 1.0 \times 10^4, \lambda = 1.10, \tau = 2.67$



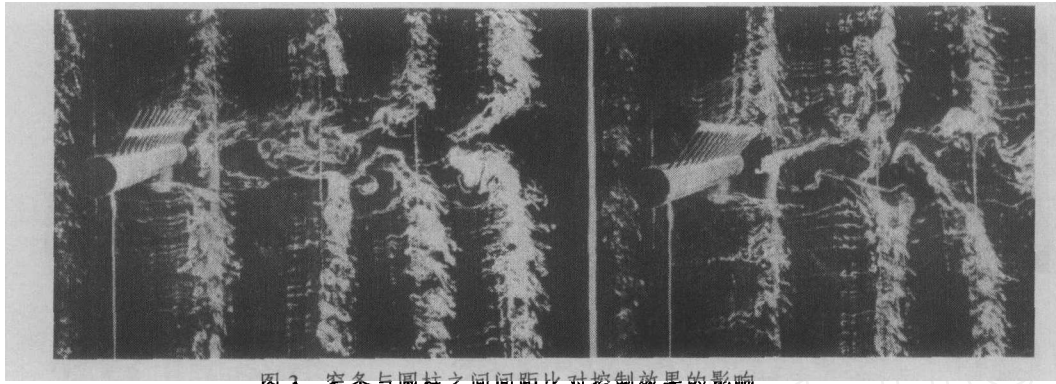


图3 窄条与圆柱之间间距比对控制效果的影响

$Re = 3.0 \times 10^3$, $\beta = 55^\circ$, $\nu = 1.33$

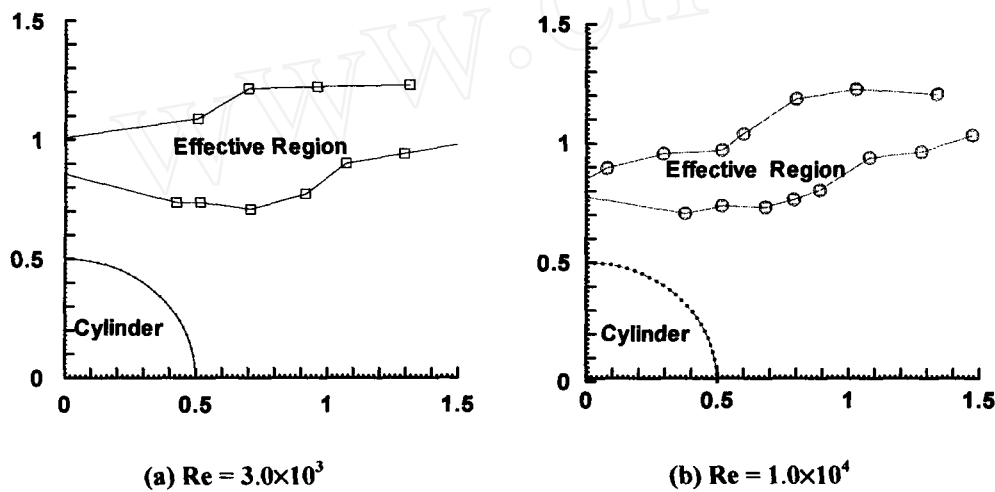


图4 有效控制旋涡脱落的窄条位置区域

4. 结 论

本文提出一种修正的旋涡脱落控制方法并将其应用于圆柱尾流中，以提高可控的雷诺数范围。该控制装置由一个平行于圆柱轴线的窄条和一排起固定窄条作用的小圆棒组成。流动的可变参数包括雷诺数 Re ，窄条位置和小棒间距。实验证明，在 $Re = 2000 < Re < 5500$ ，和 $Re > 8000$ 范围，当窄条位于尾流中一定区域时，旋涡脱落可得到有效控制。小圆棒对控制效果的影响很小，该方法属于二维控制，窄条起决定作用。

5. 致 谢

在实验准备过程中，得到北京大学湍流和复杂系统研究国家重点实验室李长岭教授、陈军教授、王亚利老师、王建明博士的热情帮助和指导，在此表示衷心感谢。

参考文献

- Berger, E., 1967. Suppression of vortex shedding and turbulence behind oscillating cylinders, *Phys Fluids* 10, s191~s193.
- Every, M.J., King, R. and Weaver, D.S., 1982. Vortex-excited vibrations of cylinders and cables and their suppression, *Ocean Engineering*, 9(2), 135-157.
- Govardhan, R. and Williamson, C.H.K., 2000. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder, *J. Fluid Mech.*, 420, 85~130.

- Grant, R. and Patterson, D., 1977. Riser fairing for reduced drag and vortex suppression. Proceedings of 9th Annual Offshore Technology Conf., OTC paper No.2921, 343~352.
- Hallam, H.G., Heaf, H.J. and Wootton, L.R., 1978. Dynamics of marine structures, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) report, UR8, London.
- Huerre, P. and Monkewitz, P.A., 1990. Local and global instabilities in spatially developing flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 22, 473-537.
- Jones, G.S. and Lamb, W.S., 1992. The use of helical strakes to suppress vortex induced vibration. *BOSS'92*, 2, 804-835.
- Lecordier, J.C., Hamma, L. and Paranthéon, P., 1991. The control of vortex shedding behind heated cylinder at low Reynolds numbers. *Exps Fluids*, 10, 224~229.
- Monkewitz, P.A., 1988. The absolute and convective nature of instability in two-dimensional wakes at low Reynolds numbers, *Phys. Fluids*, 31, 999~1006.
- Monkewitz, P.A., Huerre, P. and Chomaz, J.M., 1993. Global linear stability analysis of weakly non-parallel shear flows, *J. Fluid Mech.*, 251, 1~20.
- Moros, A. and Swan, C., 1992. The introduction of a second phase as a mean of reducing vortex induced vibrations, *BOSS'92*, 2, 791~803.
- Prandtl, L., Oswatitsch, K. and Wieghardt, K. 1969. *Führer Durch Die Strömungslehre*, Friedr. Vieweg+Soehn, Braunschweig.
- Roshko, A. 1954. On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff-bodies. NACA Tech. Note 3169.
- Roshko, A. 1961. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.*, 10, 345~365.
- Roussopoulos, K. 1993. Feedback control of vortex shedding at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, 248, 267~296.
- Schumm et al, 1994. Self-excited oscillations in the wake of two-dimensional bluff bodies and their control, *J. Fluid Mech.*, 271, 17~53.
- 邵传平、鄂学全、王薇, 1999. 圆柱尾流的绝对不稳定性. *力学学报*第 31 卷, 第 1 期, 1~9.
- 邵传平、鄂学全、魏庆鼎等, 2002. 中等雷诺数圆柱尾流旋涡脱落的控制. *力学学报*第 34 卷, 第 4 期, 609~615.
- Stansby, P.K., Pinchbeck, J.N. and Henderson, T., 1986. Spoilers for the suppression of vortex-induced oscillations (Technical Note), *Applied Ocean Research*, 8(3), 169~173.
- Sumer, B.M. and Fredsø, J., 1997. *Hydrodynamics around cylindrical structures*, World Scientific.
- 孙亮等, 2002. 激励 Stuart—Landau 方程的研究——周期解、稳定性及流动控制. *力学学报*, 第 34 卷, 第四期, 519~526.
- Strykowski, P.J. and Sreenivasan, K.R., 1990. On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, 218, 71~83.
- Tokumar, D.T. and Dimotakis, P.E., 1991. Rotary oscillating control of a cylinder wake, *J. Fluid Mech.*, 224, 77~90.
- Walshe, D.E. and Wootton, L.R., 1970. Preventing wind induced oscillations of structures of circular sections, *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, London, 47, 1~24.
- Wood, C.J., 1964. The effect of base bleed on a periodic wake, *J. R. Aeronaut Soc.*, 68, 477~482.
- Yang, X. and Zebib, A., 1989. Absolute and convective instability of a cylinder wake, *Phys. Fluids A*, 1, 689~696.
- You, D et al. 1998. Control of flow induced noise behind a circular cylinder using splitter plates. *AIAA J.* 36(11), 1961~1967.
- Zdravkovich, M.M., 1981. Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7, 145~189.

附录:

第一作者: 邵传平, 男, 1961 年 12 月生, 博士, 副研究员。