



CSTAM 2012-B03-0017

圆柱尾流的不稳定性与隔板被动控制

包艳，陶建军

北京大学工学院应用物理与技术研究中心

北京大学工学院力学与空天技术系

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

圆柱尾流的不稳定性与隔板被动控制¹⁾

包艳²⁾, 陶建军

(北京大学工学院应用物理与技术研究中心, 力学与空天技术系, 北京海淀区 100871)

摘要 作为一种典型的钝体构型, 如何控制和消除圆柱尾部旋涡脱落是空气动力学领域的热点研究问题之一。本文通过数值模拟深入研究了固定于圆柱尾部的平行双板对圆柱尾流的抑制效应。控制方程为二维不可压缩粘性流体运动方程, 数值求解采用 CBS (Characteristic-Based-Split) 有限元格式。基于来流速度和圆柱直径的雷诺数取值为 20-160, 属于层流流动。本文计算结果表明, 在合适的安装角度范围内, 平行双板装置可有效控制圆柱尾流, 其抑制旋涡脱落和减阻作用均明显优于传统的单隔板控制。模拟结果显示, 当板长 1.5 倍直径时, 可完全消除圆柱尾部的旋涡脱落, 同时减阻率可达 23%。进一步地, 本文系统讨论了分隔板安装角度对尾流的影响及流动控制的物理机制。

关键词 尾流抑制, 减阻, 被动控制, 分隔板

引言

在实际工程中人们经常遇到钝体绕流问题。流体绕过时钝体尾部通常产生旋涡脱落, 并受到横向力波动作用。当旋涡脱落频率与结构的自振频率接近时, 结构可能发生共振, 进而导致结构的疲劳损伤甚至破坏。与此同时, 旋涡脱落诱发结构后缘表面压力的突然下降, 引起结构阻力的显著提升。因此有效抑制结构的旋涡脱落对降低结构阻力、减小或防范结构涡激共振等具有重要的实际意义¹⁾。

作为一种典型的尾流被动控制方法, 钝体尾部安装的分隔板可延迟尾流区剪切层之间的相互作用, 改变钝体的旋涡脱落模式, 从而消弱尾流强度并减小阻力²⁻⁵⁾。然而, 分隔板的控制效果与其特征长度密切相关。研究表明只当分隔板尺寸为钝体特征尺寸的 5 倍时, 才可完全抑制结构的旋涡脱落。显然, 当分隔板装置尺寸较小则控制效果有限, 而较大会影响结构的使用功能。为了改进分隔板技术中所存在固有缺陷, 本文提出了一种基于平行双板的尾流被动控制技术。数值模拟结果表明, 在适当的安装角度下平行双板的尾流抑制效果明显高于传统的分隔板技术。

1 物理模型及数值方法

1.1 物理模型

直径为 D 的圆柱尾部放置厚度为 $0.001D$ 的平行双板装置, 其一侧固定于圆柱表面, 见图 1。在模拟中, 控制板对称布置于尾流中心线两侧。控制板安装角度以 θ 表述, 定义为安装点和圆柱中心连线与来流之间的倾斜角, 模拟中安装角度变化范围在 $\theta=0^\circ-90^\circ$, 其最小值和最大值分别对应于圆柱后驻点和两侧顶点。板长设置为 $L=0.3D$, 但在板长影响分析中使其变化在 $L=0.3D-1.5D$ 。雷诺数取值为 $Re=20-160$, 从而可认为流动为二维层流。

1.2 数值方法

流动控制方程为二维不可压缩 Navier-Stokes 方程, 可表示为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{U} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

其中, \mathbf{U} 为流动速度, P 为压力, t 为时间, Re 为雷诺数 ($Re=U_\infty D/\nu$, U_∞ 为特征速度, D 为圆柱直径, ν 为流体运动学粘性系数)。

对流体控制方程采用 Characteristic-Based-Split (CBS) 有限元方法进行离散, 其中速度和压力解耦通过 Fractional-Step 方法

1) 基金资助项目: NSFC (10972007, 10921202), 2009CB724100 and CPSFFP (2012M510003)

2) Email: ybao@pku.edu.cn;

实现。由于本文所用的 CBS 格式中，将压力项保留在动量方程右侧，因此为了抑制压力场的数值振荡，采用了基于压力梯度投影

(Stabilized pressure gradient projection method; SPGP) 的稳定化策略。该格式的详细推导和算例验证可参看 Bao 等⁶。数值计算中采用 C 型流场计算域，上游入口边界设在距圆心 $30D$ 半径的圆弧处，下游出口边界设在距圆心 $50D$ 处，上下侧边界距圆心各 $30D$ 。边界条件如下：在入口处指定特征速度为 $U_\infty=1$ 和 $V=0$ ；出口为 Neumann 边界，即 $\partial U/\partial x=0$ 和 $\partial V/\partial x=0$ ；上下边界处给定滑移边界条件 $\partial U/\partial y=0$ 和 $V=0$ ；圆柱和控制板表面设置为无滑移边界，即 $U=V=0$ 。本文计算中所采用的网格密度基于网格收敛性分析。圆柱和控制板表面最小网格尺寸为 $0.005D$ ，在结构尾流适当加密网格密度，从而精确跟踪尾涡演化。无量纲化时间步长设定为 $\Delta t U_\infty/D=0.002$ 。

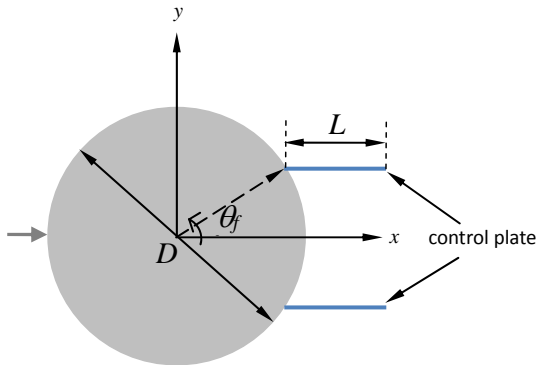


图 1. 平行双板尾流抑制装置示意图

2 数值结果分析

2.1 对气动力特征参数的影响

图 2 所示为不同雷诺数下的圆柱-平行双板系统所受阻力平均值 (\bar{C}_D) 和圆柱升力标准差 (C_L') 随安装角的变化曲线，图中同时给出了无控圆柱的相应计算值。阻力系数和升力系数定义亦给出：

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U_\infty^2 D} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U_\infty^2 D} \quad (4)$$

由图 2 (a) 可知，平均阻力随着安装角度增加而下降；当安装角超某一值后平均阻

力改变变化趋势，即随安装角增大而增大。定常流动条件下 ($Re=20$ 和 40)，由于粘性力的比重较大，甚至超过无控圆柱的平均阻力。与安装单独分隔板时的平均阻力相比可知，在一定安装角度下，平行双板的减阻效果明显优于单隔板。同时可看出随着雷诺数增大而控制效果愈加明显。如当 $Re=160$ 时，最大减阻效率（相对于无控圆柱）增至 13.4%，而传统分隔板装置的相应值为仅 7.16%。图 2 (b) 显示，圆柱升力波动值（标准差）亦随安装角度增大而先减小后增大。出现最低升力波动的安装位置基本与最大减阻位置一致，即 $\theta_f=40^\circ-50^\circ$ 。以 $Re=160$ 为例，当 $\theta_f=40^\circ$ 时升力标准差减小将近 60.1%。这表明尾流振荡得到了显著抑制。

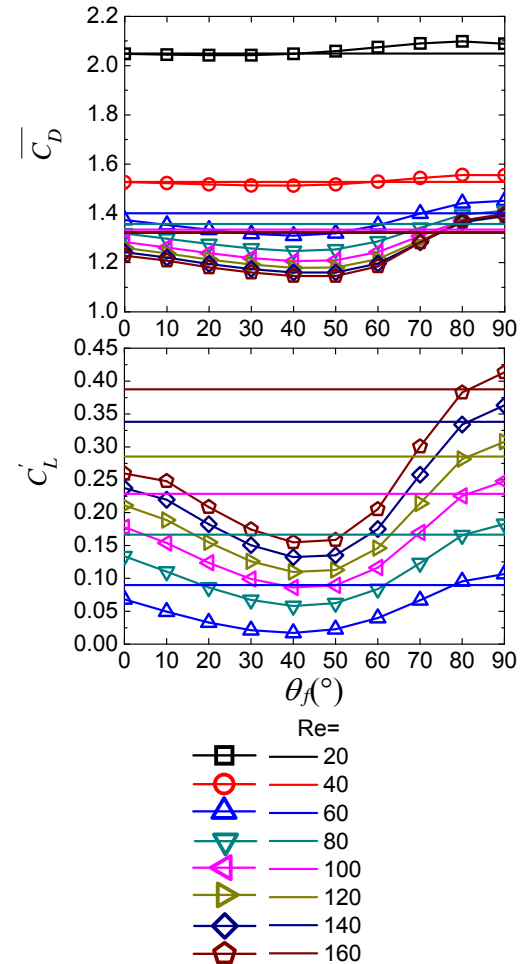


图 2. 不同 Re 下阻升力系数随安装角度的变化曲线

数值模拟结果显示，不同雷诺数下的圆柱表面压力分布方式基本相同，因此本文只

给出 $Re=100$ 时的计算结果, 见图 3。由图可知, 虽然分布值不同, 但无控圆柱和安装传统分隔板时圆柱表面压力有相同形式的分布。显然, 分隔板控制下的圆柱表面压力明显上升。由平行双板控制下的圆柱表面压力分布可知, 分隔板将无控圆柱的连续性表面压力分布断开为不连续的内外两部分。显然, 平行板内侧的压力分布受安装角度影响较大。当安装角度较小 ($\theta \leq 20^\circ$) 时, 板内侧圆柱表面压力呈水平分布, 且取值较小; 当 $30^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ 时压力分布仍基本保持水平, 但取值略有下降; 当 $50^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ 时, 压力在后驻点周围变化较大, 而当大于 80° 时, 其趋势与无控或传统分隔板控制下的圆柱较接近, 同时取值小于无控圆柱下的相应值。由上述分析可知, 圆柱表面压力分布计算结果与圆柱阻力变化趋势一致。

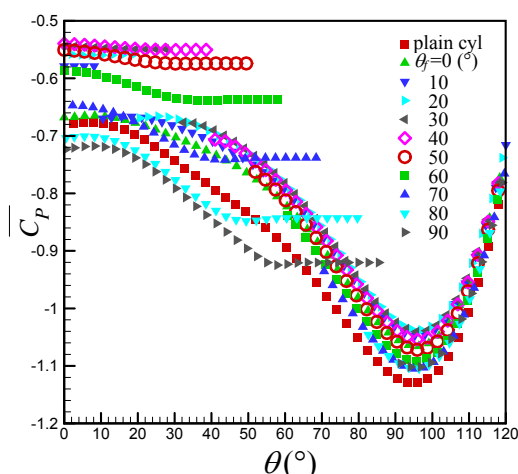


图 3. 圆柱表面压力分布随安装角度的变化

2.2 对流态特征的影响

本文中, 由于安装隔板装置而引起的流态特征的改变可通过流线和涡量场进行可视化显示, 见图 4。当 $\theta=0^\circ$ 时 (安装单板装置) 的尾流结构显示圆柱尾流中出现尺寸较大的回流区域, 其流动特征与无控圆柱尾流结构基本一致。根据安装角的变化, 对平行双板控制下的尾流结构可大致归为如下三种区域。当流动属于 I 区 ($\theta \leq 30^\circ$), 尾流的主回流在双板之间诱发次生回流; 该回流区对称分布于尾流中心线两侧。当流动属于 II 区 ($40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$) 时, 流动的主要特征表现为主回

流在控制板壁面作用下分裂为前后两个子回流区并分别绕各自的中心旋转。其中, 新生成的子回流附着在控制板的外壁面。当流动属于 III 区 ($\theta \geq 60^\circ$) 时, 流动分离点从圆柱表面移至控制板后缘点。图 4 (b) 中可清晰看到相应的非定常尾流中的旋涡生成和脱落过程。涡量云图中同时显示了流动的非定常流线, 反映了尾部流动的非定常特性。由流线图也可看出回流流动在近尾流区的演化过程。

已有研究表明, 当采用单隔板时, 其尾流抑制作用受长度影响较大; 为了完全抑制旋涡脱落, 需要较长的隔板装置。为了检验板长对平行双板控制作用的影响, 本文也模拟了不同长度下的圆柱-隔板系统。计算结果显示, 当板长为 1.5 倍的圆柱直径时, 平行双板可完全抑制圆柱的旋涡脱落 ($Re=100$)。图 5 所示为, 该长度时的平行双板和单隔板装置对尾流抑制作用的对比结果。显然, 单隔板尾部仍有旋涡脱落, 而平行双板控制下尾流不再振荡, 变成定常流动。

2.3 减阻及尾流抑制机制分析

由上述分析可知, 平行双板的尾流控制作用明显优于传统分隔板。对传统分隔板而言, 其控制机制主要是抑制上下剪切层的动力相互作用。然而, 平均和瞬态流动结构反映出平行双板尾流控制明显不同的流动机制。实际上, 与其他安装角相比当 $40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ 时, 平板对自由剪切层的壁面效应最强, 所以从圆柱两侧分流的剪切层振荡明显变弱。为了验证这种机制, 图 6 中给出了 $\theta=40^\circ$ 时的旋涡脱落周期内分别对应于升力正负峰值时刻 $U=U_\infty$ 等势线。图中同时包括无控圆柱, 安装单隔板以及其他两种控制装置时的 $U=U_\infty$ 等势线。这两种尾流控制装置分别为对称布置的双小圆柱 (直径为 $0.3D$) 和平行双板 (长度为 $0.3D$), 其与被控圆柱间的距离均为 $0.3D$ 。剪切层的振荡以等势线 $U=U_\infty$ 振幅值 A/D 量化。计算结果分别如下: $A/D=1.053$ (无控圆柱), 1.045 (单隔板), 0.717 (与圆柱连接平行双板), 0.885 (与圆柱断开的平行双板) 和 0.934 (双小圆柱)。对比数据结果后可见, 无控圆柱剪切

层振荡最激烈，而连接双板控制下的剪切层振荡受到最有效抑制。这进一步验证了与圆

柱连接的平行双板对自由剪切层的抑制效应及作用机制。

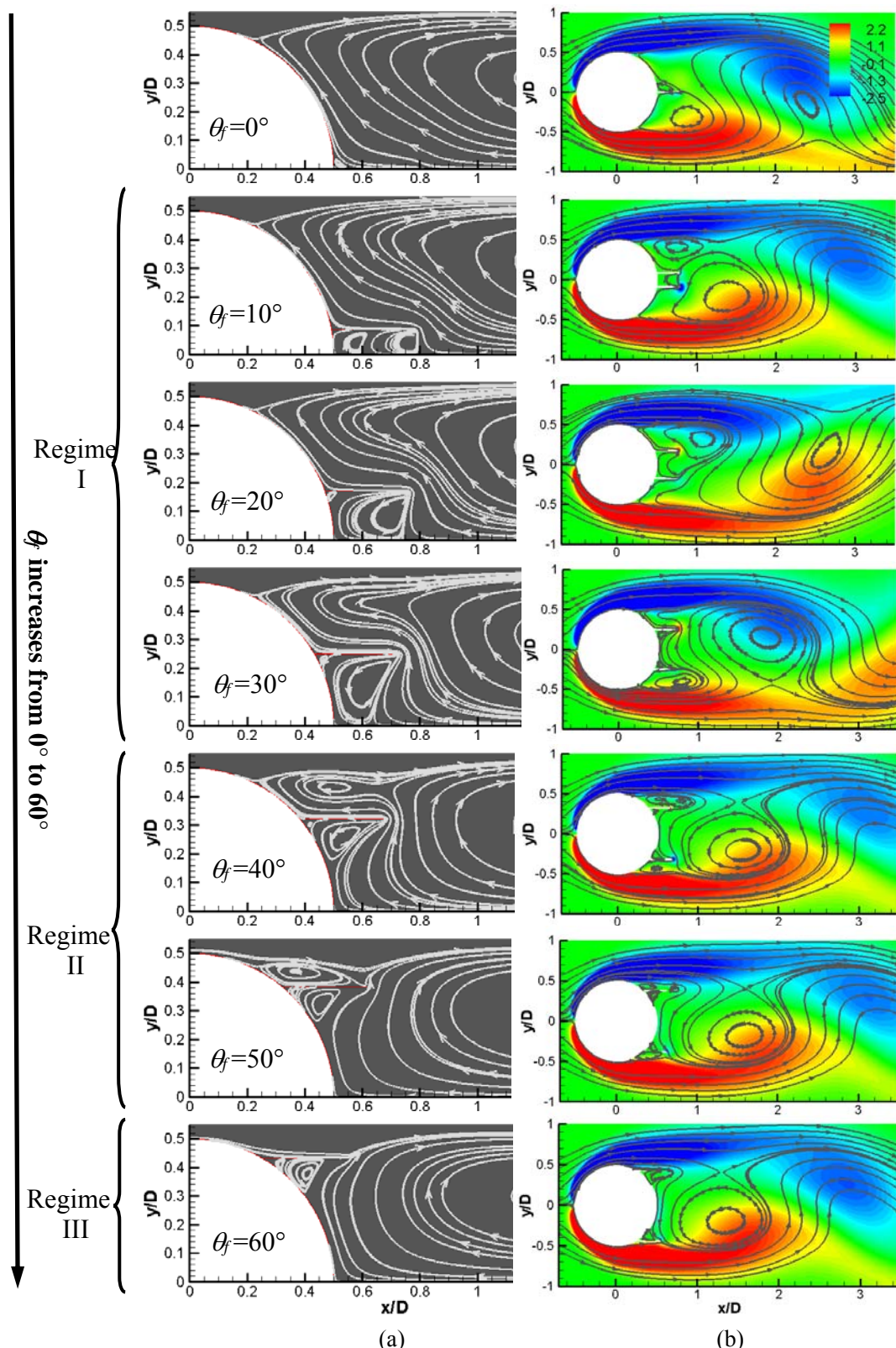


图 4. 平行双板控制下的圆柱平均和瞬态流场分区：(a) 平均流场流线图；(b) 瞬态流场涡量云图和流线图

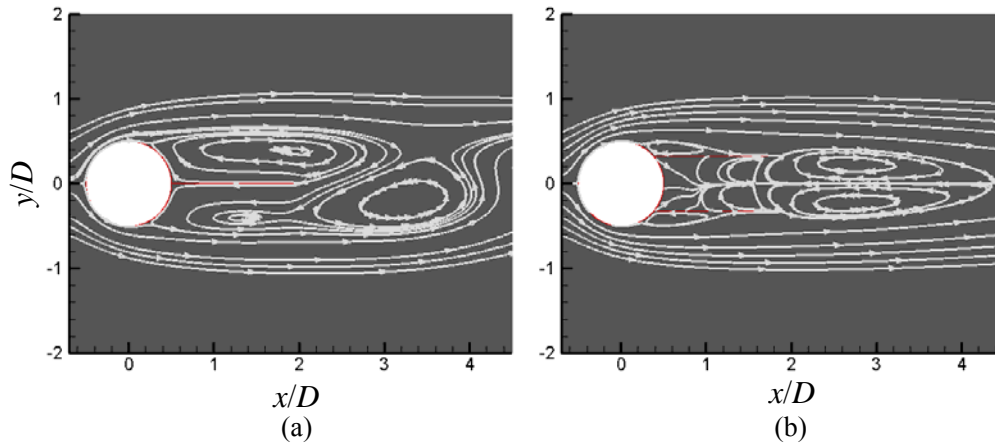


图 5. $L=1.5D$ 时(a)平行双板和(b)单隔板装置控制效果对比

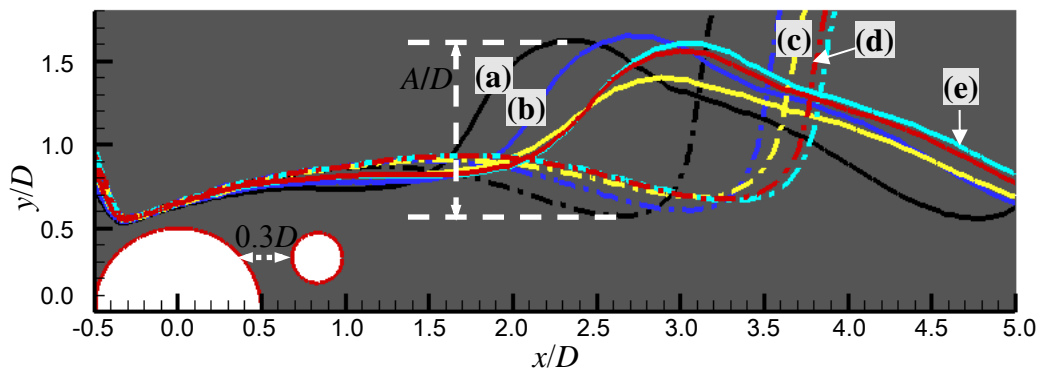


图 6. 无控和有控下圆柱尾流流向速度 $U=U_\infty$ 等势线: (a)无控圆柱; (b) 单隔板; (c)连接的平行双板; (d) 断开的平行双板; (e)双小圆柱。 A/D 为无量纲化的等势线振荡振幅。

3 结论

本文通过二维数值模拟研究了基于平行双板装置的圆柱尾流被动控制方法。计算结果表明,适当放置的平行双板对尾流的抑制作用明显优于传统的分隔板。基于安装角度变化,把流动模态归为三种区域。当位于 I 区时平行双板之间形成对称的回流流动(平均意义上);该区域内双板的尾流抑制和减阻作用随安装角度增大而增大。当位于 II 区时主回流流动分裂为两个子回流流动,且上游子回流结构附着于控制板外壁面;此时双板的尾流抑制和减阻作用达到最高峰。当流动位于 III 区时,流动分离点移至控制板后缘;此时双板的控制作用急剧下降,甚至强化尾流振荡。对圆柱自由剪切层振荡量化分

析后发现,平行双板对剪切层的壁面作用是尾流抑制和减阻的主要流动机制。

参考文献

- 1 Choi, H, Jeon, W-P, Kim, J. Control of flow over a bluff body. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, 40:113~139
- 2 Roshko, A. On the wake and drag of bluff bodies. Journal of Aeronautical Sciences, 1955, 22:124~132
- 3 Bearman, PW. Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates. Journal of Fluid Mechanics, 1965, 21:241~255
- 4 Apelt, CJ, West, GS. The effects of wake splitter plates on bluff body flow in the range $104 < R < 5 \times 10^4$: Part 2. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 71:145~160
- 5 Kwon, K, Choi, H. Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates. Physics of Fluids, 1996, 8:479~486
- 6 Bao, Y, Zhou, D, Huang, C. Numerical simulation of flow over three circular cylinders in equilateral arrangements at low Reynolds number by a second-order characteristic-based split finite element method. Computers and Fluids, 2010, 39:882~899

PASSIVE CONTROL OF WAKE FLOW BEHIND A CIRCULAR CYLINDER BY PARALLEL DUAL PLATES

BAO Yan TAO Jianjun

(CAPT & SKLTCS, Department of Mechanics and Aerospace Engineering, College of Engineering, Peking University,
Beijing 100871, China)

Abstract In this paper wake control of a circular cylinder by dual plates symmetrically attached at the rear surface are numerically investigated within laminar flow regime. The two flat plates were arranged in parallel form and the attached angle was varied in the range $\theta_f = 0^\circ - 90^\circ$. Comparing to a single splitter plate, dual plates cause higher drag reduction and stronger wake suppression at relatively shorter plate. It is shown that the attached angle has crucial effect on the control efficiency, and the most effective range associated to the maximum drag reduction is between $40^\circ \leq \theta_f \leq 50^\circ$, within this regime the free shear layers reattach on the outside surface of the control plates. The potential mechanism responsible for the wake control is suggested based on the comparison with other passive control configurations.

Key words drag reduction, wake suppression, splitter plate