

波状圆柱绕流减阻的实验研究

王沅浩¹, 姜歌东², 罗昔联¹, 梅雪松²

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了寻找一种减阻、减振而又不受流动方向限制的方法,提出了一种可降低绕流阻力的波状圆柱,并对波状圆柱的平均阻力系数以及表面压力分布进行了实验研究.实验在某低速风洞进行,工作段的横截面尺寸为0.6 m × 0.6 m,湍流度小于0.2%.实验中的 Re 在 2.0×10^4 到 5.0×10^4 范围内.实验结果表明:3种不同倾斜度的波状圆柱平均阻力系数小于普通圆柱的平均阻力系数,最大减阻效果可达20%以上;流体在波状圆柱的最小横截面上分离得早,表面压力下降快;波状圆柱表面倾斜度是影响流场的重要参数,其取值大小直接影响波状圆柱的减阻效果.

关键词: 波状圆柱;分离流;减阻

中图分类号: O357.1; O357.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)01-0093-04

Experimental Investigation on Drag Reduction of Wavy Cylinder in Cross Flow

Wang Fenghao¹, Jiang Gedong², Luo Xilian¹, Mei Xuesong²

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effects of different degrees of obliqueness of wavy cylinders on drag reduction on cylindrical structures were experimentally investigated. The experiments were carried out in a low speed wind tunnel with a cross-section of 0.6 m × 0.6 m and a free-stream turbulent intensity of less than 0.2%. The Reynolds numbers, based on the free-stream velocity and the nominal cylinder diameter, vary from about 2.0×10^4 to 5.0×10^4 . Measurements on mean drag force induced by a cross flow over three wavy cylinders and the circumferential pressure distributions at various spanwise positions were conducted. The results show that the mean drag coefficients of the wavy cylinders are less than that of a corresponding circular cylinder; a drag reduction of up to 20% was obtained. Furthermore, the pressure distribution indicates that the pressure drop is more rapid and the separation is earlier at the geometric saddle than those at other spanwise locations for wavy cylinders. These effects become more evident as the degree of obliqueness increases.

Keywords: wavy cylinder; separated flow; drag reduction

圆柱绕流包含很多复杂的流动机理,在理论研究和工程实际中都有着非常重大的意义.探索其低阻运行的机制是人们长期关注的课题.工业中实际应用的圆柱绕流大多处于亚临界流动区,绕流阻力可分为摩擦阻力和压差阻力两部分,摩擦阻力源于

流体的黏性,压差阻力则归因于流动的分流.在有流动分离的钝体绕流中,压差阻力在总阻力中所占的比例超过95%,降低钝体绕流阻力的基本思路是减缓流动分离,降低压差阻力.为此,人们提出了很多减阻的方法,例如在圆柱后面设置分隔板来增加背

压,以达到降低压差阻力的目的等. 尽管这些方法均在一定程度上起到了减阻的作用,但令人遗憾的是在这些方法中减阻的效果多数受到流动方向的限制,而且有些方法在减阻的同时不能起到减振的作用. 寻找一种能同时减阻、减振而且不受流动方向限制的方法,对研究非定常流动中圆柱绕流的涡旋运动规律以及工程实际问题的应用具有重要的意义.

近年来,研究人员通过给二维柱体的表面增加三维几何扰动的方法,达到了柱体减阻和减振的目的. 例如:文献[1,2]通过引入分段后缘来研究钝后缘机翼的减阻问题,这种方法的减阻达到了64%. 文献[3,4]采用实验的手段研究了常见二维钝体尾迹中的三维特征,他们发现涡的错位常常伴随着翼展方向上涡分离频率的变化,而且不同频率的分离涡最终能融合在一起. 文献[3,4]的研究还发现,对于两维的柱体而言,涡的错位是随机的,其在翼展方向上的位置也不固定. 为了固定涡错位的位置,文献[3,4]在圆柱的翼展方向上引入了一个波浪型尾缘. 研究结果表明,在引入了这种波浪型尾缘后,钝体的背压增大. 一般来说,背压增大意味着阻力减小. 当流体分离线变为波浪形以后,从钝体表面分离的涡强度会减弱,有时候涡脱落会得到抑制^[5].

受到上述研究的启发,本文提出了一种具有三维表面特征的波状圆柱(如图1所示,图中 U 为风速). 因这种圆柱可以看成是普通圆柱的三维拓展,且沿轴向是对称的,因此如果该圆柱具有减阻、减振的作用,那么其减阻、减振作用一定不会受到流动方向的限制. 本文将通过实验来研究这种波状圆柱的流体绕流阻力.

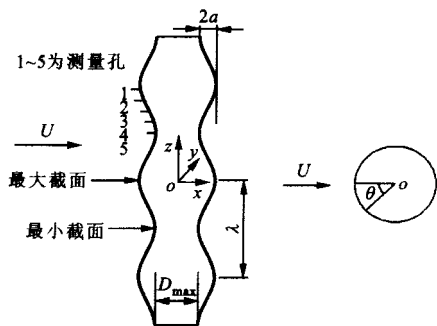


图1 波状圆柱的外形及坐标

1 实验系统

1.1 风洞实验台

实验是在封闭循环式风洞实验台上进行的,其

工作段长2 m,截面为0.6 m×0.6 m. 风速 U 可在0~40 m/s范围内连续变化. 在实验风速范围内,壁面的边界层厚度约为20 mm. 风洞工作段的湍流度在0.2%以内,最大堵塞度为4%.

1.2 模型的几何尺寸

波状圆柱模型的外形如图1所示,几何特征可由如下方程式表达

$$D_z = D_m + 2a\cos(2\pi z/\lambda)$$

式中: D_z 为 z 截面的直径; D_m 为波状圆柱的平均直径; a 为表面正弦曲线的振幅; λ 为波长. 3个波状圆柱模型的材料是铜,几何特征尺寸如表1所示. 表中参数 $a^2/(\lambda D_{\min})$ 表示波状圆柱的表面倾斜度. 模型以悬臂梁方式垂直安装在风洞的顶板上,模型的自由端距风洞底板1.5 mm. 为了比较波状圆柱和普通圆柱的受力情况,本文还测试了一个直径为18 mm、长为590 mm的普通圆柱.

表1 实验模型的几何特征尺寸

参数	模型1	模型2	模型3
$D_{\min}$	18	18	18
$D_{\max}$	26	26	30
a	2	2	3
λ	32	50	50
L	598.5	598.5	598.5
$a^2/(\lambda D_{\min})$	0.006 94	0.004 44	0.010 02

1.3 测力传感器

本文所采用的传感器(Kistler Model 9251A)是一种石英晶体压电传感器,可同时测量三维方向的力,具有分辨率高、刚度系数高及体积小等优点. 在实验中将传感器安装在所测试的圆柱模型顶端,通过计算传感器2个轴向(x , y)输出的电荷大小,就可以测量来流方向和升力方向上圆柱所受到的流体力. 由于 x 和 y 向的力只能通过摩擦产生的张应力来测量,因此在传感器的 z 轴上预加载了100 kN的压力. 为了保证实验的准确性,预载力和测量力的比值应大于6^[6]. 在本实验中,测量的最大力约为10 N,因此完全满足这一要求. 在实验的测量范围内(-10~10 N),传感器的分辨率约为2 mN.

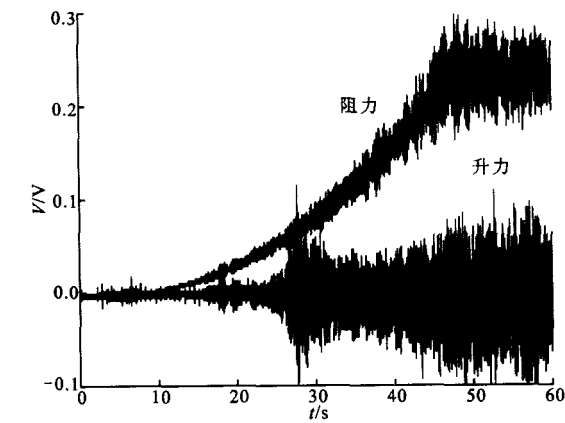
1.4 表面压力测量孔

波状圆柱的表面压力分布是由其翼展方向排列的5个测量孔测量的,孔径为0.5 mm,孔间距为0.125 λ ,从最大截面排列到最小截面,如图1所示.

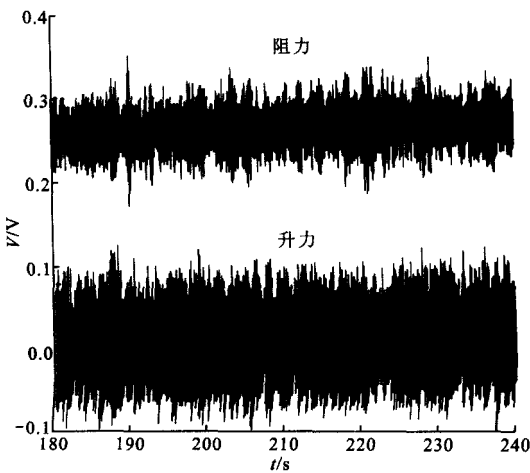
实验中每旋转 10 进行一次压力测量,测量仪器是 Furrss Control 公司生产的微压计。

2 阻力测量结果与分析

实验中采用了电荷放大器 (Kistler Type 5011) 将传感器输出的电荷转换成电压信号。由于电荷放大器的输出电压与传感器连续 2 次输出的电荷差成正比,因此阻力的测量只能通过 Re 从 0 增加到规定值时电荷放大器输出的连续电压变化曲线计算得出。图 2 为数据采集系统记录的阻力和升力信号 (图中竖坐标为电压),采集时间为 4 min, $Re = 2.3 \times 10^4$ 。从图 2a 可以看出,风洞启动后约 50 s 后风速达到了设定值。因此,将图 2b 的数据进行线性拟合并去掉零飘后,即可得到该雷诺数下对应的阻力系数。



(a) 风洞启动后 1 min 内



(b) 风洞启动后第 4 min

$Re = 2.3 \times 10^4$

图 2 圆柱的阻力和升力信号

为了验证上述数据处理方法的正确性,本文测得的普通圆柱平均阻力系数与被广泛引用的标准值^[7]进行了对比,结果如图 3 所示。图中的平均阻力系数 $\overline{C_D} = 2 F_D / \rho U^2 L D$ 。其中: F_D 为圆柱受到的总阻力; D 为圆柱的直径; L 为圆柱的长度; ρ, U 为流体的密度和速度。从图中可以看出两组数据吻合得非常好,平均阻力系数在此 Re 范围内约等于 1.2,说明本文所采用的实验方法和数据处理是可靠的。

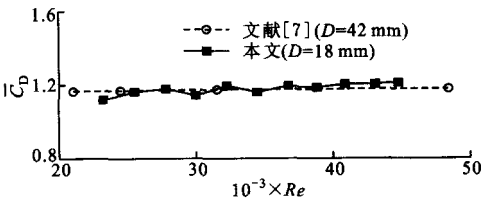


图 3 圆柱平均阻力系数测试结果比较

从图 4 可以看出,所测试的 3 个波状圆柱模型的平均阻力系数均小于普通圆柱。例如在 $Re = 4.0 \times 10^4$ 时,普通圆柱的平均阻力系数为 1.198 9,而模型 1、模型 2、模型 3 的平均阻力系数分别为 0.964 4、1.028 0 和 0.966 4。普通圆柱分别比 3 个波状圆柱的平均阻力系数大了 19.6%、14.3% 和 19.4%。在其他 Re 时的阻力系数与 $Re = 4.0 \times 10^4$ 时的类似。因此,可以得出波状圆柱在亚临界区具有减阻作用的结论。在所测试的波状圆柱模型中,模型 2 的平均阻力系数大于模型 1 和模型 3。为了进一步研究波状圆柱的减阻作用与其几何特征的关系,本文还对模型的表面压力分布进行了测试。

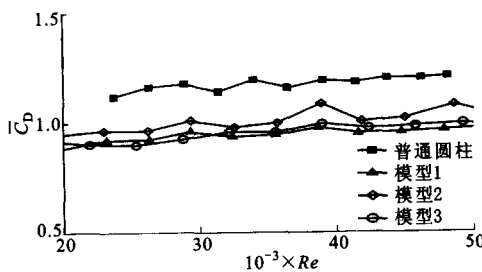
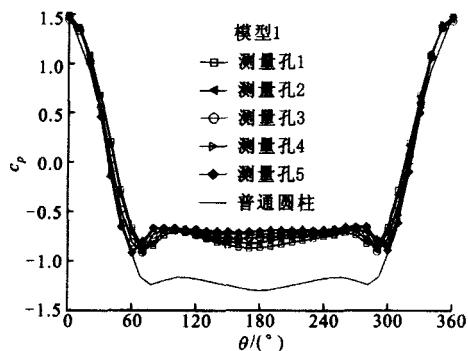


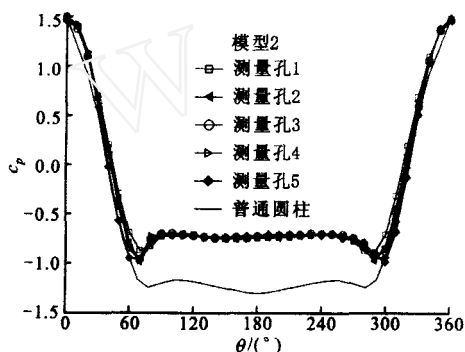
图 4 波状圆柱和普通圆柱的平均阻力系数

3 平均表面压力分布结果与分析

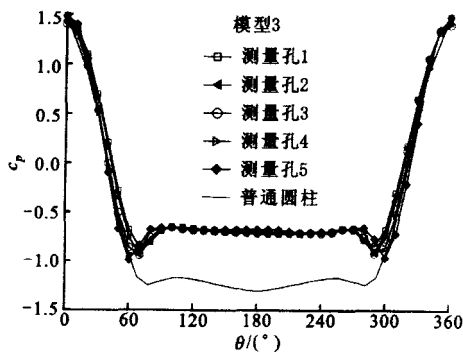
从图 5 可以看出,波状圆柱的背压在最小截面上(测量孔 5)略高于最大截面(测量孔 1),而测量孔 1~5 测得的背压值均高于普通圆柱。由于平均阻力系数正比于圆柱迎流面和背流面的压力差,而在亚



(a) 波状圆柱模型 1 的表面压力系数分布



(b) 波状圆柱模型 2 的表面压力系数分布



(c) 波状圆柱模型 3 的表面压力系数分布

 $Re = 3.6 \times 10^4$

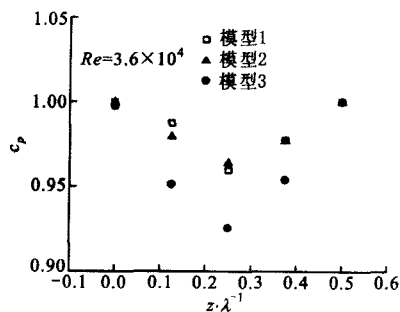
图 5 波状圆柱与普通圆柱的表面压力对比

临界区圆柱迎流面的压力系数基本不变,因此背流面的压力系数 c_{pb} 越大,圆柱的平均阻力系数就越小.从上面的分析以及表面压力分布结果可以得出,波状圆柱和普通圆柱相比具有减阻作用,这一结果和传感器阻力测量结果是一致的.

另外,图 5 还表明,表面压力系数的最小值 ($c_{p, \min}$) 在波状圆柱的不同横截面上出现的角度是不同的.在最小横截面上(测量孔 5), $c_{p, \min}$ 出现在 θ

约等于 60° 处,而在最大横截面上(测量孔 1), $c_{p, \min}$ 出现在 θ 约等于 70° 处.在相同 Re 下,普通圆柱的 $c_{p, \min}$ 出现在 θ 略大于 70° 时.这说明波状圆柱的压力分布在翼展方向是不同的,在最小横截面上流体分离比最大横截面早,表面压力下降快.压力分布结果说明,在 $\theta = 60^\circ \sim 90^\circ$ 范围内存在强烈的三维非稳态流动现象.

从图 6 中也可以看出, c_p 在驻点处(测量孔 1、测量孔 5)约等于 1,而在其他位置小于 1. $\theta = 0^\circ$ 时最小的 c_p 值出现在测量孔 3 上,即在最大和最小截面的中间位置.本文在表 1 中提出波状圆柱表面倾斜度为 $a^2/(\lambda D_{\min})$,对所测试的 3 个波状圆柱模型来说,模型 3 的倾斜度最大,模型 2 的倾斜度最小.从图 5 和图 6 中均能看出,波状圆柱模型 3 不管是沿圆周方向还是沿翼展方向的压力分布变化都是最大的,相反模型 2 的变化是最小的.这个趋势和波状圆柱表面倾斜度是一致的,说明波状圆柱表面倾斜度是影响波状圆柱绕流流场的重要参数,其取值大小直接影响波状圆柱的减阻效果.

图 6 $\theta = 0^\circ$ 时表面压力系数在轴线上的变化

4 结 论

(1) 当 Re 在 $2.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$ 范围内时,波状圆柱的平均阻力系数小于普通圆柱,在不同表面倾斜度下,其最大减阻效果可达 20% 以上.

(2) 波状圆柱的背压高于普通圆柱,进一步证明了波状圆柱具有减阻效果的结论.

(3) 流体在波状圆柱的最小横截面上分离得早,表面压力下降快.

(4) 波状圆柱的表面倾斜度是影响波状圆柱绕流流场的重要参数.波状圆柱表面的倾斜度大,其表面压力分布的变化就大.

(下转第 124 页)

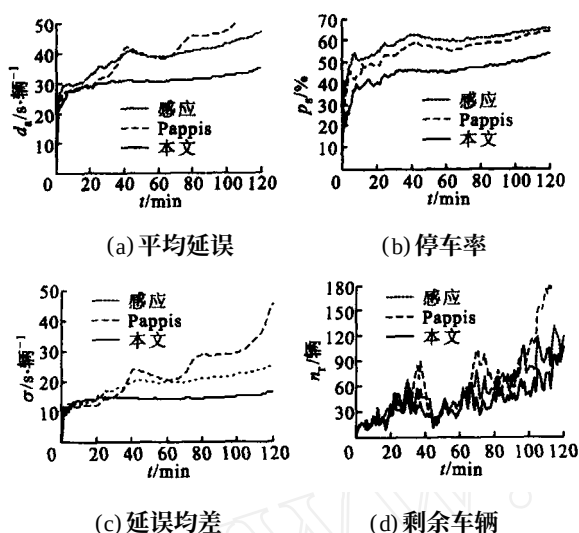


图7 平均车速为30 km/h时的仿真结果

取相位构成固定,根据各入口车道的车辆数、平均等待时间和车辆到达率的变化情况,采用2个控制器分别控制相序和信号配时的设计思路是合理和有效的.在保证交通安全的同时,本文模型不仅提高了交通效率,而且增强了交通公平.

参考文献:

- [1] Pappis C P, Mamdani E H. A fuzzy logic controller for a traffic junction[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1977, 7(10): 707-717.

- [2] Favilla J, Machion A, Gomide F. Fuzzy traffic control: adaptive strategies[A]. Proceedings of the Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems [C]. San Francisco, USA: IEEE, 1993. 506-511.
- [3] Hoyer R, Jumar U. Fuzzy control of traffic lights [A]. Proceedings of the Third IEEE International Conference on Fuzzy Systems [C]. Orlando, USA: IEEE, 1994. 1526-1531.
- [4] Trabia M B, Kaseko M S, Ande M. A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals[J]. Transportation Research: Part C, 1999, 7(6): 353-367.
- [5] Niittymäki J, Pursula M. Signal control using fuzzy logic[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116(1): 11-22.
- [6] Chou C H, Teng J C. A fuzzy controller for traffic junction signals[J]. Information Sciences, 2002, 143(1-4): 73-97.
- [7] Murat Y S, Gedizlioglu E. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions[J]. Transportation Research: Part C, 2005, 13(1): 19-36.
- [8] 张曾科. 模糊数学在自动化技术中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 159-168.
- [9] 刘运通, 石建军, 熊 辉. 交通系统仿真技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. 86-87.

(编辑 管咏梅)

(上接第96页)

参考文献:

- [1] Rodriguez O. Base drag reduction by control of the three-dimensional unsteady vortical structures[J]. Experiments in Fluids, 1991, 11(4): 218-226.
- [2] Petrusma M S, Gai S L. The effect of geometry on the base pressure recovery of segmented blunt trailing edges[J]. Aeronautical Journal, 1994, 98(977): 267-274.
- [3] Tombazis N, Bearman P W. A study of three-dimensional aspects of vortex shedding from a bluff body with a mild geometric disturbance[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 1997, 330(Jan): 85-112.
- [4] Bearman P W, Owen J C. Suppressing vortex shedding from bluff bodies by the introduction of wavy separation lines[A]. Proceedings of the 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting[C]. Washington, DC: Pinehurst Technologies Inc, 1998. 21-23.

- [5] Owen J C, Bearman P W. Passive control of VIV with drag reduction[J]. Journal of Fluids and Structures, 2001, 15(3-4): 597-605.
- [6] So R M C, Savkar S D. Buffeting forces on rigid circular cylinders in cross flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 105(Apr): 397-425.
- [7] Wieselsberger C. Neuere feststellungen ber die Gesetze des Flssigkeits und Luftwiderstandes [J]. Physikalische Zeitschrift, 1921, 22(3): 321-328.

(编辑 王焕雪)