圆盘阻力非定常特性测量

胡 烨 王晋军

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对垂直于来流方向的圆盘进行非定常测力实验,研究上游二维干扰圆杆和圆盘绕流雷诺数(雷诺数范围为 $0.44\times10^5\sim2.74\times10^5$)对圆盘阻力及其脉动特性的影响. 实验结果表明,无论有无上游干扰,圆盘平均阻力系数均不随雷诺数改变. 上游干扰圆杆在降低圆盘阻力系数的同时,使圆盘阻力脉动量增大,而且当圆盘绕流雷诺数大于 1.84×10^5时阻力脉动量的增幅将随雷诺数的加大而迅速增加. 对圆盘阻力的频谱分析表明,在圆盘上游无干扰时,圆盘绕流形成的螺旋状涡引起的非轴对称波动频率(斯特劳哈尔数为 0.135)为阻力脉动的主频.

关 键 词: 圆盘; 阻力; 流动干扰; 减阻; 频率响应

中图分类号: O 351.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)07-0783-03

Unsteady drag measurements for flow over a circular disk

Hu Ye Wang Jinjun

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract Unsteady drag measurements were conducted in a low speed wind tunnel to investigate the drag of the circular disk which was normal to the flow. The circular disk was interfered by an upstream two-dimensional rod in the horizontal symmetry plane of the disk in the Reynolds number range from 0.44×10^5 to 2.74×10^5 based on the disk diameter. The results indicate that the mean drag coefficient of the circular disk does not depend on the Reynolds number which was tested in present study, no matter there is an interference rod upstream of the circular disk or not. Meanwhile, the interference rod leads to decrease of the mean drag coefficient and increase of the drag fluctuation of the circular disk. The increment value of the drag fluctuation increases rapidly, when the Reynolds number is beyond 1.84×10^5. By the frequency analysis, the dominate frequency of the disk drag without the interference rod corresponds to the antisymmetric fluctuation frequency induced by the helical vortex structure(the Strouhal number is 0.135).

Key words disk; drag; flow interaction; drag reduction; frequency response

钝体因其背风面存在大范围分离流动,使其前后具有较大压力差,导致阻力系数远远大于流线型物体. 钝体的绕流问题在实际生产生活中大量出现,如风工程、海岸工程、交通建设、航空航天以及体育运动等领域. 因此研究钝体绕流问题尤其是钝体减阻的方法和技术,越来越受到人们的关注. 目前,被动控制技术已被广泛应用于钝体的减阻研究,例如通过表面处理技术增加钝体表面粗糙度[1-2],在钝体表面增加细小的肋条[3],沿钝体(圆柱)轴线开缝[4],在钝体下游布置分隔板[5-6]等.

与以上提到的通过提前边界层转捩或者提高钝体背风面压力来减小钝体阻力的方法不同,在钝体上游放置干扰物可以改变钝体绕流结构进而达到减阻目的. 文献[7]在圆柱上游放置干扰圆杆,有效的减小了圆柱的阻力. 当圆杆和圆柱之间

收稿日期: 2008-06-05
基金项目: 国科学家杰出青年基金资助项目 (10425207)
作者简介: 胡 烨(1984-),女,江西九江人,博士生,32050314@ase.buaa.edu.cn.

的距离小于某一临界值时, 两者之间存在一个流动几乎静止的死水区. 在雷诺数为 6.5×10⁴的条件下, 当圆柱上游干扰圆杆直径 d 与圆柱直径 D_c 之比 d/D_c = 0.25时, 圆柱的最小阻力降至单个圆柱阻力的 27%. 文献[8-10]深入研究了干扰圆杆使下游方柱或圆柱阻力减小的流动机理. 在圆盘上游放置干扰圆杆的减阻机理不同于圆柱和方柱这类二维钝体, 文献[11-13]详细研究了上游干扰圆杆对圆盘这种三维钝体在绕流结构、压力分布、定常阻力特性等方面的影响. 实验结果表明, 上游干扰圆杆尾迹中所含的涡量在圆盘前驻点区域内积聚, 产生尺度和环量较大的一对反向旋转且周期性脱落或破裂的涡结构. 大涡结构的出现, 导致圆盘迎风面产生低压区, 改变表面压力分布, 减小圆盘的前后压差, 使圆盘阻力减小.

本文在以往研究圆盘定常阻力特性的基础之上, 对圆盘非定常阻力进行了测量, 分析了上游干扰对圆盘阻力脉动的影响.

1 实验设备、实验模型及方法

实验在北京航空航天大学 D1风洞实验室进行, 该风洞是开口回流式低速风洞, 实验段全长 1.45m, 截面形状为椭圆, 进口尺寸为 1.02m × 0.76m, 出口尺寸为 1.07m × 0.8m. 风洞的流场品质良好, 湍流度小于 0.3%, 最大可用风速为 40m/s.

圆盘模型是直径 D = 200mm、厚度为 5mm 的圆形有机玻璃板. 实验首先测量圆盘未受干扰时在各个风速下的受力情况 (圆盘平面垂直于来流方向), 自由来流速度变化范围为 U = 3.2 ~ 20.0m/s, 基于圆盘直径的雷诺数变化范围为 Re = 0.44×10⁵ ~ 2.74×10⁵. 在圆盘上游放置二维干扰圆杆 (如图 1), 圆杆与圆盘直径比为 d/D = 0.030、0.050. 干扰圆杆垂直于来流放置在圆盘的水平对称面内, 圆杆轴线到圆盘迎风面的距离为 L, 其与圆盘直径之比为 L/D = 1.0. 通过在圆盘上游放置二维干扰圆杆的方式, 研究加入不同直径的干扰圆杆后圆盘阻力及其脉动特性的变化.

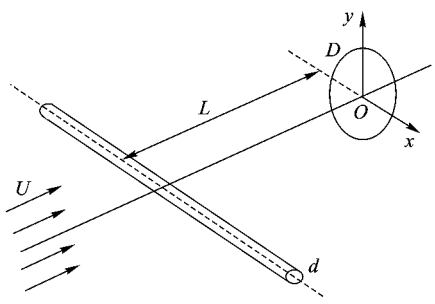

图 1 风洞实验模型的布置[11]

实验模型的阻力由 BK-3型一维测力传感器测量, 该传感器的量程为 20N, 测量精度为满量程的 0.1%, 灵敏度为 1mV/V, 响应频率最高可达到 5kHz.

2 实验结果和讨论

2.1 圆盘阻力

1) 圆盘平均阻力系数

由图 2可知, 在本实验中, 圆盘的阻力系数与 Re 几乎无关, 这与文献[14]指出的当 Re 大于 10^3 时单独圆盘的阻力系数几乎与 Re 无关的结论相一致. 在无干扰的情况下 (d/D = 0), 本文测得的圆盘平均阻力系数为 1.12, 而文献[13]测得 Re = 1.37×10⁵和 Re = 2.74×10⁵时的单独圆盘阻力系数分别为 1.19和 1.22, 与本实验结果基本一致.

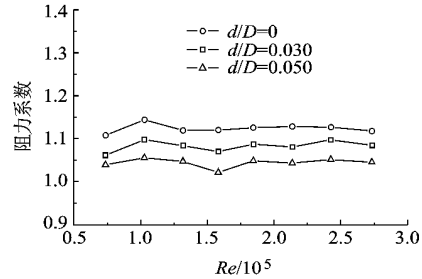

图 2 干扰前后阻力系数的变化

在圆盘上游 L/D = 1.0处放置不同直径的圆杆, 研究干扰圆杆直径对圆盘平均阻力系数的影响. 如图 2所示, 加入干扰圆杆, 圆盘平均阻力系数仍与 Re 的变化无关. 但是, 当干扰圆杆 d/D = 0.030和 0.050时, 圆盘平均阻力系数分别减小 4% 和 7%, 这与文献[11-13]在类似实验中的结论完全一致, 说明本实验结果可靠. 实验结果进一步表明, 随着圆盘上游干扰圆杆直径的增加, 圆盘的平均阻力系数不断减小. 同时, 阻力系数的减小量随干扰圆杆直径的增加而加大.

2) 圆盘阻力脉动量随 Re 的变化

对实验数据进行统计分析, 得到各种状态下的圆盘阻力脉动量 (如图 3). 通过对 3条曲线变化趋势的分析可知, 阻力的脉动量基本上都随着 Re 的增加而增大. 而且, 在相同 Re 下, 脉动量随着干扰圆杆直径的加大而增大. 另外, 当 Re < 1.84×10⁵时, 3种干扰状态下的阻力脉动量不仅变化趋势相同, 而且它们之间的差值也相对较小, 3条曲线基本上完全重合. 这说明当 Re < 1.84×10⁵时, 上游干扰圆杆对圆盘阻力脉动量的影响较小.

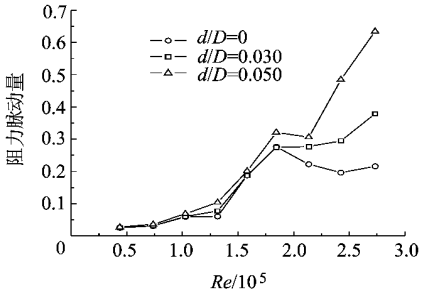

图 3　不同干扰条件下圆盘阻力脉动量随 Re的变化曲线

当 Re增大到 1.84×10^{5}之后, 没有干扰圆杆时, 圆盘阻力脉动量随 Re的增加而略有减小. 然而, 在圆盘上游放置干扰圆杆之后, 脉动量随 Re的增加而大幅度的提高, 其增幅也随干扰圆杆直径的增加在不断加大. 可见, 上游干扰的加入在降低圆盘阻力的同时, 使圆盘阻力脉动量增大. 这是由于加入干扰后, 干扰圆杆的尾迹周期性作用在圆盘的迎风面, 使圆盘迎风面压力的非定常性和脉动增大, 进而导致圆盘阻力脉动量的增大, 这一点在 Re> 1.84×10^{5}时更明显.

3) 圆盘阻力脉动强度随 Re的变化

图 4所示为在圆盘上游放入干扰圆杆前后, 圆盘阻力脉动强度 (圆盘阻力脉动量与圆盘平均阻力之比)随干扰圆杆直径和 Re的变化情况. 从阻力脉动强度随 Re变化的角度上分析, 3种干扰情况下的脉动强度曲线变化趋势基本一致, 并且都在 Re= 1.84×10^{5}时出现峰值. 另外, 随着圆盘上游干扰圆杆直径的增加, 圆盘阻力脉动强度都有明显的提高, 这一点与图 3中阻力脉动量随干扰圆杆直径的变化趋势一致.

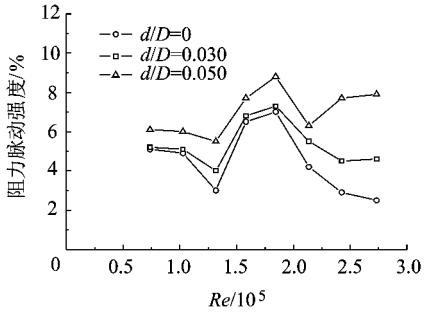

图 4　不同干扰条件下阻力脉动强度随 Re的变化曲线

2.2　圆盘阻力脉动频率的变化

将圆盘阻力瞬时值进行傅里叶变换, 得到阻力脉动的功率谱密度函数. 首先, 将圆盘上游无干扰时各雷诺数下的频谱图重叠 (由 Re= 1.58×10^{5}变化到 Re= 2.43×10^5), 当斯特劳哈尔数 Sr= fD/U≥0.3时, 功率值均趋于 0. 因此, 将频谱图的横坐标固定在 0≤Sr≤0.3范围内, 得到的频谱图如图 5所示. 单独圆盘阻力频谱图中只有 1个频率信号是稳定的, 对应的 Sr= 0.13~ 0.18. 文献 [15]利用热线和烟线流动显示的方法研究了单独圆盘的尾迹特征. 他们指出当 1.5×10^4≤Re≤3×10^{5}时, 圆盘尾迹中存在 3种不稳定因素影响流动结构, 分别为低频的圆盘背风区轴对称分离气泡的前后脉动 (Sr_1≈ 0.05), 高频的分离剪切层的不稳定性 (Sr_3≈ 1.62)以及由螺旋状涡引起的非轴对称波动 (Sr_n≈ 0.135). 其中, 圆盘阻力频谱图中稳定频率 Sr与螺旋状涡引起的非轴对称波动频率 Sr_n接近, 说明无干扰时螺旋状涡引起的非轴对称波动对圆盘阻力脉动量影响最大, 它对应的频率是圆盘阻力脉动的主频.

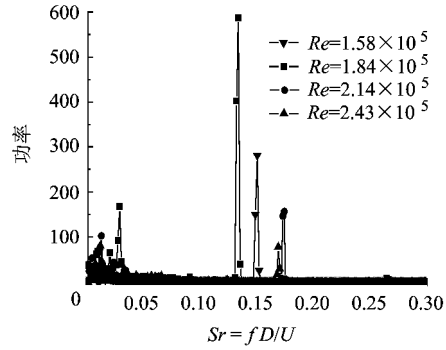

图 5　无干扰时不同 Re下的阻力频谱图

3　结　论

本文分析了圆盘模型上游干扰圆杆直径和圆盘绕流雷诺数对圆盘阻力的影响. 主要结论如下:

在本实验条件下, 无论有无上游干扰, 圆盘阻力系数均不随雷诺数改变. 另外, 圆盘阻力系数随着圆盘上游干扰圆杆直径的增加而减小, 上游干扰的加入达到了使圆盘减阻的目的.

在圆盘阻力脉动量随雷诺数的变化过程中, 存在着一个临界雷诺数. 在此雷诺数之前, 阻力脉动量随着圆盘绕流雷诺数的增加而增大, 但圆盘上游干扰圆杆直径的改变对脉动量的增加影响不大. 当雷诺数大于此临界值后, 加入干扰圆杆使得圆盘阻力脉动量的增幅随着圆盘绕流雷诺数的增加而迅速变大.

通过频谱分析可知, 在圆盘上游无干扰时, 圆盘绕流形成的螺旋状涡引起的非轴对称波动频率 (Sr_n≈ 0.135)为阻力脉动的主频.

参考文献 (**References**)

[1] Achenbach E. Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 46: 321-335

(下转第 **832**页)

由图 3可见, 相比传统的两种方法而言, 小波方法在统计平均的仿真结果中仍然具有最小的误差包络, 在当多径分量与直达分量距离十分相近时也有很好的性能.

5 结 论

针对卫星导航定位中的多径误差问题, 本文通过分析多径信号的特征, 提出了一种基于小波分析的多径抑制算法. 全文针对 BOC(1, 1)信号进行了仿真, 并与两种传统的方法进行了对比, 证明了小波方法的有效性. 小波方法不仅能提供更好的性能, 同时具有很低的算法复杂度. 特别是当应用 Harr小波的时候, 与传统的相关器方法相比复杂度相近, 在极限情况下与相关器方法是等价的. 小波相位估计方法通过与波形压缩技术联合使用能更加降低计算复杂度, 与 MMT技术相比更有优势.

参考文献 (References)

[1] Van Dierendonck A J, Fenton P, Ford T. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1992, 39(3): 34-41

[2] Garin L, Van Diggelen F, Rousseau J. Strobe and edge correlator multipath mitigation for code[C]//Proceedings of ION GPS-96. Kansas City: Institute of Navigation, 1996: 657-664

[3] Weill L R. GPS multipath mitigation by means of correlator reference waveform design[C]//Proceedings of the ION 1997 National Technical Meeting. Santa Monica, CA: Institute of Navigation, 1997: 197-206

[4] Weill L. Multipath mitigation using modernized GPS signals: how good can it get[C]//ION GPS 2002. Portland, Oregon: Institute of Navigation, 2002: 24-27

[5] Weill L R. Application of super resolution concepts to the GPS receiver of multipath mitigation problem[C]//Proceedings of the ION 1998 National Technical Meeting. Long Beach, CA: Institute of Navigation, 1998: 673-682

[6] Irsigler M, Avila-Rodriguez J-A, Hein G. Criteria for GNSS multipath performance assessment[C]//Proceedings of ION GNSS 2005. Long Beach, CA: Institute of Navigation, 2005: 104-108

[7] Jones J, Fenton P, Smith B. Theory and performance of the pulse aperture correlator[EB/OL]. Calgary, Alberta, Canada: NovAtel Technical Report, NovAtel, Inc, 2004[2008-06-17]. www.novatel.com/Documents/Papers/PAC.pdf

(责任编辑: 张 嵘)

(上接第 785页)

[2] Achenbach E, Heinecke E. Vortex shedding from smooth and rough cylinders in range of Reynolds numbers of $6\times10^3\leqslant Re\leqslant5\times10^6$[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 109: 239-251

[3] Lazos B S, Wilkinson S P. Turbulent viscous drag reduction with thin-element riblets[J]. AIAA Journal, 1988, 26(4): 496-498

[4] 谭广琨, 王晋军, 李秋胜. 圆柱体减租技术及其机理初步研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(6): 658-661
Tan Guangkun, Wang Jinjun, Li Qiusheng. Drag reduction technique of cylinder and mechanism research[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(6): 658-661(in Chinese)

[5] Ozono S. Flow control of vortex shedding by a short splitter plate asymmetrically arranged downstream of a cylinder[J]. Physics of Fluids, 1999, 11(10): 2928-2934

[6] Mittal S. Effect of a "slip" splitter plant in vortex shedding from a cylinder[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(3): 817-820

[7] Lesage F, Gartshore I S. A method of reducing drag and fluctuating side force on bluff bodies[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1987, 25(2): 229-245

[8] Sakamoto H, Tan K, Takeuchi N, et al. Suppression of fluid forces acting on a square prism by passive control[J]. Journal of Fluid Engineering, 1997, 119(3): 506-511

[9] Wang Jinjun, Zhang Panfeng, Lu Sufen, et al. Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2006, 76(1): 83-101

[10] Zhang Panfeng, Wang Jinjun, Lu Sufen, et al. Aerodynamic characteristics of a square cylinder with a rod in staggered arrangemen[J]. Experiments in Fluids, 2005, 38(4): 494-502

[11] Zhang Panfeng, Gao Lei, Wang Jinjun. Drag reduction of a disk with an upstream rod[J]. Wind and Structures, 2006, 9(3): 245-254

[12] 王晋军, 高磊, 潘翀. 来流扰动对圆盘绕流结构影响的实验研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 4: 440-445
Wang Jinjun, Gao Lei, Pan Chong. Experimental study on effects of upstream interference on the flow structure around a disk[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 4: 440-445(in Chinese)

[13] 高磊, 王晋军, 张攀峰. 二维扰动对圆盘绕流压力分布影响的实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4): 383-387
Gao Lei, Wang Jinjun, Zhang Panfeng. Experimental study on the effects of two-dimensional on the interference pressure distribution of a circular disk[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(4): 383-387(in Chinese)

[14] Hoerner S F. Fluid-dynamic drag[M]. Brick Town, NJ: Horner Fluid Mech, 1965

[15] Berger E, Scholz D, Schumm M. Coherent vortex structures in the wake of a sphere and a circular disk at rest and under forced vibration[J]. Journal of Fluids and Structures, 1990, 4(3): 231-257

(责任编辑: 刘登敏)