

中低 Re 数下圆锥型 VIV 抑制罩的 水动力载荷分析

林黎明, 钟兴福, 吴应湘

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要

基于先前的引入几何扰动来干扰结构尾迹中脱落涡从而实现涡激振动抑制的研究, 本文的研究对象是带有圆锥型涡激振动抑制罩的圆柱体。通过数值模拟固定结构的绕流流场, 研究结构受到的水动力载荷变化, 并对其进行频谱分析。计算参数: Re 数为100和1000; 扰动波长为4, 6和8; 扰动强度(扰动波高与扰动波长之比)为0.0125, 0.025, 0.05, 0.1和0.2。一般地, 引入圆锥型抑制罩后, 平均阻力系数随着扰动强度增大而增大, 而脉动升力系数的变化则较复杂。多数情况下, 圆锥型柱体阻力都较直圆柱的大, 而升力则显著减小。值得注意的是, 存在升、阻力同时都减小的情况。

关 键 词: 圆锥型扰动; 涡激振动; 抑制; 水动力载荷

0 引 言

涡激振动(vortex-induced vibration, VIV)是海洋工程中钝体结构常遇到的物理现象。当具有特定速度的流体绕过钝体结构时, 其尾迹中出现交替脱落的旋涡。结构受到脉动流体的作用力, 产生特定的振动。当涡脱落频率和结构固有频率相近或相等时, 会发生共振现象, 此时, 结构振幅和相应的流体载荷都会显著增大。这种共振导致钝体结构出现疲劳损伤甚至破坏, 将直接影响海洋工程整体结构的安全性和海上石油生产。

为了最大程度降低涡激振动对钝体结构的破坏作用, 延长其实际使用寿命, 近半个世纪以来, 各国学者进行了大量试验和工程应用研究, 提出了各种 VIV 抑制装置和设计。相关研究结果可以参见 Sarpkaya & Isaacson (1981)^[1], Kumar 等(2008)^[2], 吴浩和孙大鹏 (2009)^[3]。大多数的涡激振动抑制装置采用被动控制的方式, 通过对来流、结构绕流流场及尾迹进行干扰, 使涡脱落发生变化甚至实现抑制。Owen 等(2001)^[4]提出了在柱面上螺旋型分布椭球状鼓包, 可以有效降低结构受到的升力载荷。然而这种方式在低质量阻尼比情况下失效。宋吉宁等 (2009)^[5]提出了在柱体周边设置干扰柱, 但其抑制效果易于受到海洋生物附着的影响。对于具有良好水动力学性能的整流罩^[6], 由于存在来流方向敏感性, 其应用受到一定限制, 即使安装可旋转装置, 也会造成新的结构动力稳定性问题。目前海洋工程中最常用的螺旋型列板^[7,8]及新近提出的螺旋型凹槽^[9]等, 除了海洋生物附着影响外, 仍然存在诸如安装或加工过程复杂等。这些为新型涡激振动抑制装置的研究提供了契机和发展空间。

近年来, 有学者提出, 对结构体引入具有三维特征的几何扰动, 如引入波型迎风面^[10]或整柱扭曲变形^[11-12]干扰结构绕流流场及尾迹流动, 采用这种方法实现涡动力行为的控制, 削弱甚至抑制涡脱落及相应的水动力载荷。然而, 由于这些几何扰动是在流向-展向平面内引入, 仍然具有来流方向敏感性问题的。为此 Lin 等 (2011)^[13]提出了一种基于 Bernoulli 方程和几何扰动、且与来流方向无关的新型干扰

措施。这种方式的特点是, 几何扰动是在径向-展向平面内引入, 即柱体外置的抑制装置外径沿展向非均匀变化。在这个设计概念下, 对谐波型和圆锥型扰动柱进行单摆 VIV 实验^[14-15]。结果表明, 引入特定强度的几何扰动在 VIV 出现的起始流速下确实能够降低结构振幅; 随后的数值模拟^[16]表明, 在 $Re=100$ 时水动力载荷存在局部极小值, 且升力显著下降。因而这种 VIV 抑制措施具有潜在的应用价值。

本文针对圆锥型扰动, 通过中低 Re 数 (100 和 1 000) 的数值模拟计算, 获得该结构受到的水动力载荷 (平均阻力系数和脉动升力系数), 分析其随扰动波长和扰动强度的变化规律, 并对比 Re 数增大后的影响, 为后期试验研究提供参考依据。

1 数学模型及计算方法

带有圆锥型涡激振动抑制罩的圆柱体如图 1 所示, 其中 x 向是与来流方向一致, z 向是柱体展向/轴向, y 向是横向, D 为直圆柱直径, W 为无量纲的圆锥型扰动波高, λ 为无量纲的扰动波长。并定义柱体直径最大处为波峰 (峰值= $D+2W$); 直径最小处为波谷 (谷值= D)。

对于不可压缩流体, 无量纲化的质量连续性方程和动量守恒方程分别为:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{u} = (u, v, w)$ 为速度矢量, t 为时间, p 为静态压力, Re 为 Reynolds 数 ($=U_\infty D/\nu$), U_∞ 为无穷远处自由来流速度, ν 为流体运动粘性系数。

计算采用 Fluent 软件。当 $Re=100$ 时采用层流模型进行计算; 而当 $Re=1\ 000$ 时则采用大涡模拟进行计算。边界条件分别为: 计算域入口为自由来流速度, 横向侧边界为自由滑移边界条件, 计算域出口为简单无反射边界条件, 展向模拟无限长柱体而采用周期性边界条件, 柱体表面为无滑移边界条件。 x - y 平面上计算域及网格划分如图 2 所示, 考虑到计算域对柱体绕流的影响, 设置入口 $L_I=10D$, 出口 $L_O=30D$, 两侧 $L_H=10D$ 。展向长度选取一个扰动波长进行计算。在柱面及尾迹中心平面附近网络划分较密, 远离这一区域则变疏。

对基本算例 $Re=100$ 和 1 000 的直圆柱绕流进行了模拟计算。得到的水动力学参数, 如 Strouhal 数 (St)、平均阻力系数 (C_{D_M}) 和脉动升力系数 (C_{L_RMS}), 将它们和前人试验及数值模拟计算结果进行对比, 如表 1 所示, 表明当前计算和前人的结果是比较接近的。

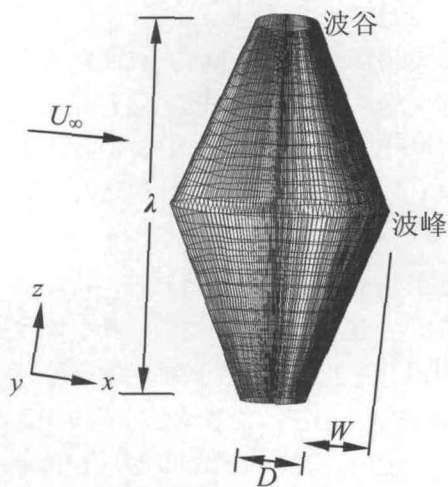


图 1 圆锥型柱体及其网格划分

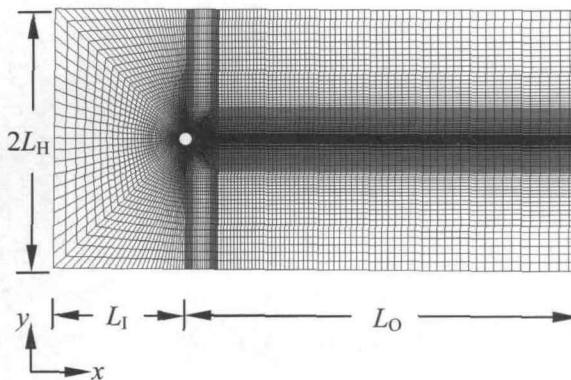


图 2 x - y 平面内计算区域及网格划分

表1 本文计算的 St , $C_{D,M}$ 和 $C_{L,RMS}$ 同试验结果和前人结果的对比

Re 数		St			$C_{D,M}$			$C_{L,RMS}$		
		$\lambda=4$	$\lambda=6$	$\lambda=8$	$\lambda=4$	$\lambda=6$	$\lambda=8$	$\lambda=4$	$\lambda=6$	$\lambda=8$
$Re=100$	本文计算		0.165			1.39			0.256	
	詹昊 ^[17]		0.17			1.5			—	
	试验 ^[18]		0.164			1.8			—	
$Re=1000$	本文计算	0.201	0.197	0.197	1.31	1.27	1.27	0.63	0.56	0.54
	Henderson ^[19]		0.21			1.22			$\approx 0.57 (\lambda=2\pi)$	
	试验 ^[19]		0.21			1			—	

2 数值计算及结果分析

在本文计算中,对于带有圆锥型 VIV 抑制罩的圆柱体,分别选取了两组不同的波长 λ 和扰动强度 W/λ ,其中 $\lambda=4, 6$ 和 8 ,而 $W/\lambda=0.0125, 0.025, 0.05, 0.1$ 和 0.2 。

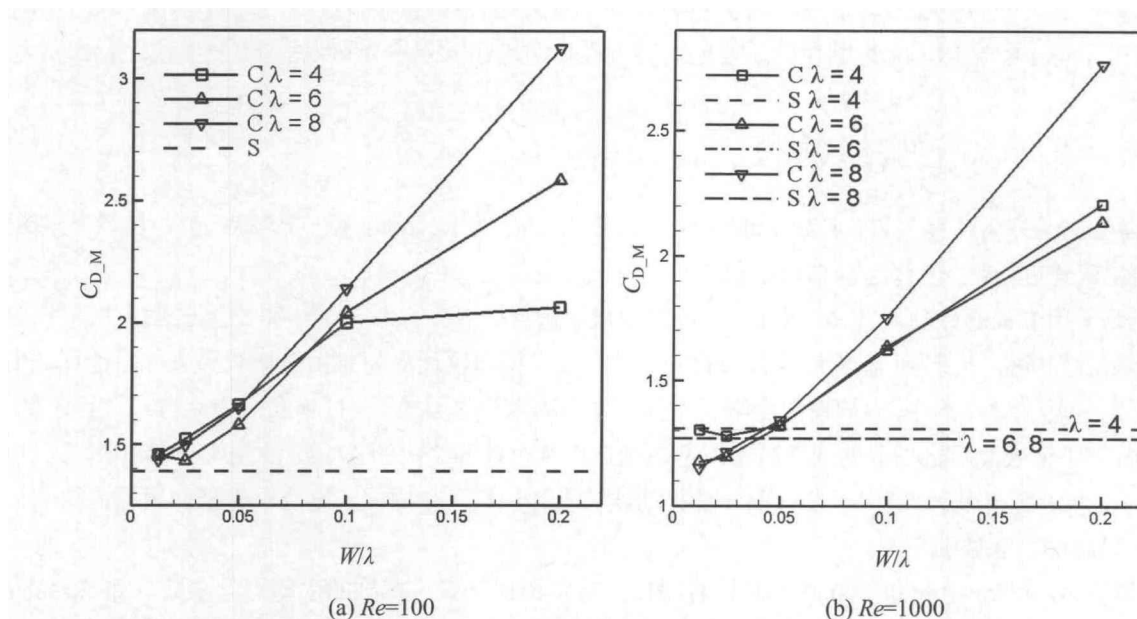


图3 圆锥型柱体 (C) 和直圆柱 (S) 的 $C_{D,M}$ 随 W/λ 的变化

首先来看结构受到平均阻力的变化情况,如图3所示。无论是 $Re=100$ 还是 1000 ,一般来说,随扰动强度逐渐增大,阻力也同样逐渐增大。对于完全是层流流动的情况 ($Re=100$),圆锥型柱体的阻力都大于直圆柱,且当 $\lambda=6$ 时存在局部极小值区域。而对于尾迹中涡脱落呈三维特征的情况 ($Re=1000$),在当前扰动波长范围内,只有 $\lambda=4$ 时存在阻力极小值现象(此时 $W/\lambda=0.025$),而其他情况下都是单调增大的;特别地,当 $W/\lambda < 0.05$ 时,出现了引入扰动后阻力略小于直圆柱的情况,如 $\lambda=6$ 和 8 且 $W/\lambda=0.0125$ 时,减阻率分别达到 7% 和 9% 。

脉动升力系数的变化如图4所示。在大多数情况下,圆锥柱的升力显著小于直圆柱。特别地,对于 $Re=100, \lambda=4$ 且 $W/\lambda < 0.15$,圆锥柱的升力系数显著大于直圆柱;而在其它扰动波长下则不仅比直圆柱小,而且存在局部极小值区域;并且在 $\lambda=4$ 和 $W/\lambda=0.2$ 时,存在脱落涡完全被抑制的现象。对于 $Re=1000$,在 $W/\lambda=0.05$ 附近存在局部极小值现象。在大多数情况下,当引入的扰动强度从 0.0125 增大到 0.025 时,脉动升力下降较快。而当扰动强度从 0.1 增大到 0.2 时,在 $Re=1000$ 时只有当 $\lambda=4$ 和 8 时升力系数是增加的,其他情况均减小。

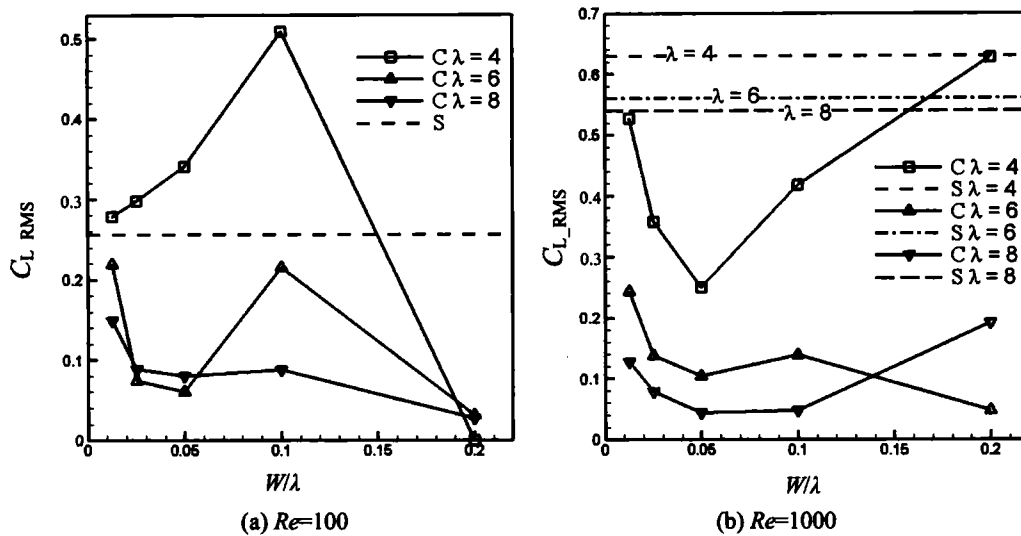


图4 圆锥型柱体(C)和直圆柱(S)的 C_{L_RMS} 随 W/λ 的变化

3 结 论

本文通过数值模拟, 获得了 Re 数为 100 和 1 000 时带有圆锥型 VIV 抑制罩的圆柱体水动力载荷随扰动波长和扰动强度的变化规律。结果表明:

(1) 引入圆锥型扰动后, 平均阻力一般均比直圆柱大, 且随着扰动强度增大而增大。而在 $Re=1000$ 时, 在弱扰动强度下 (小于 0.05) 出现阻力比直圆柱还小的情况。

(2) 引入圆锥扰动后, 相比直圆柱时, 脉动升力在多数情况下显著减小, 甚至出现涡脱落抑制的现象。

(3) 随着扰动强度的变化, 存在特定的区域, 在该区域中, 水动力载荷 (特别是升力系数) 出现局部极小值; 从而为优化设计提供参考依据。

(4) 综合目前获得的研究结果, 当 $Re=100$ 时, $\lambda=6$ 和 $W/\lambda=0.025$, 以及 $Re=1\ 000$ 时, $\lambda=6$ 或 8 和 $W/\lambda=0.025$ 或 0.05 时, 均可以实现阻力增加较小或几乎未增加, 而升力却显著下降。

参 考 文 献

- [1] SARPKEYA T, ISAACSON M. Mechanics of wave forces on offshore structures[M]. Van Nostrand Reinhold Company, New York, U.S., 1981.
- [2] KUMAR R A, SOHN C H, GOWDA B H L. Passive control of vortex-induced vibrations: an overview[S]. Recent Patents on Mechanical Eng., 2008 (1): 1-11.
- [3] 吴浩, 孙大鹏. 深海立管涡激振动被动抑制措施的研究[J]. 中国海洋平台, 2009, 24(4): 1-8.
- [4] OWEN J C, BEARMAN P W, SZEWCZYK A A. Passive control of VIV with drag reduction[J]. J. Fluids Struct. 2001, 15: 597-605.
- [5] 宋吉宁, 等. 三根附属控制杆对海洋立管涡激振动抑制作用实验研究[J]. 海洋工程, 2009, 27(3): 23-29.
- [6] LEE L, ALLEN D W. The dynamic stability of short fairings[C]// Offshore Tech. Conf. Houston, Texas, USA, 2-5 May 2005, OTC 17125.
- [7] TRIM A D, BRAATEN H, LIE H, TOGNARELLI M A. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long

- marine risers[J]. *J. Fluids Struct.* 2005, 21: 335-361.
- [8] KORKISCHKO I, MENEGHINI J R. Experimental investigation of flow-induced vibration on isolated and tandem circular cylinders fitted with strakes[J]. *J. Fluids Struct.* 2010, 26: 611-625.
- [9] HUANG S. VIV suppression of a two-degree-of-freedom circular cylinder and drag reduction of a fixed circular cylinder by the use of helical grooves[J]. *J. Fluids Struct.* 2011, 27:1124-1133.
- [10] BEARMAN P W, OWEN J C. Reduction of bluff-body drag and suppression of vortex shedding by the introduction of wavy separation lines[J]. *J. Fluids Struct.* 1998, 12: 123-130.
- [11] OWEN J C, SZEWCZYK A A, BEARMAN P W. Suppressing Kármán vortex shedding by use of sinuous circular cylinders[J]. *Bulletin of the American Physical Society*, 1999, 44: 124.
- [12] LIN L M, LING G C, WU Y X. Mechanism responsible for the complete suppression of Karman vortex in flows past a wavy square-section cylinder[J]. *Chin Phys Lett*, 2010, 27(3): 034702.
- [13] LIN L M, ZHONG X F, WU Y X. Experimental investigation of a new device in suppressing vortex-induced vibrations of a circular cylinder[C]// *Proc 21st Int Offshore and Polar Eng Conf, ISOPE, Maui*, 2011: 1283-1288.
- [14] ZHONG Xingfu, LIN Liming, WU Yingxiang. New method in suppressing vortex-induced vibration of marine riser[J]. *Applied Mechanics and Materials*. 2012, 226-228: 9-12.
- [15] ZHONG Xingfu, LIN Liming, WU Yingxiang. The VIV detection based on Poincare surface of sections[C]// *The International Workshop on Physics and Mathematics*, 2012: 2752-2755.
- [16] 林黎明, 钟兴福, 吴应湘. 低 Re 数下具有几何扰动的圆柱水动力载荷特性研究[J]. *中国造船*, 2012, 53(2): 205-210.
- [17] 詹昊, 等. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(12): 129-132.
- [18] WILLIAMSON C H K. Vortex dynamics in the cylinder wake[J]. *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, 1996, 28: 477-539.
- [19] HENDERSON R D. Nonlinear dynamics and pattern formation in turbulent wake transition[J]. *J. Fluid Mech.* 1997, 352: 65-112.

Analysis of Hydrodynamic Load on a Conic Shroud Applied in Suppressing VIV at Low and Moderate Reynolds Numbers

LIN Liming, ZHONG Xingfu, WU Yingxiang
(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract

Based on previous works, in which geometric disturbance was introduced to interrupt vortex shedding in structural wake and suppression of vortex-induced vibration could be realized, the object of present paper is circular cylinder with conic shroud for VIV suppression. Through numerical simulation of fluid flow past a fixed structure, variation of hydrodynamic load and frequency spectrum are studied. Computational parameters are: Re of 100 and 1000, disturbed wavelength of 4, 6 and 8, and the wavy steepness, defined by the ratio of the wave height to the wavelength, of 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1 and 0.2. Generally, the introduction of conic shroud leads to the increase of mean drag coefficient with the increase of wavy steepness, while RMS lift coefficient varies complicated. In most cases, drag of conic cylinder is greater than that of straight cylinder, while lift is significantly reduced. It is noticed that there is a situation where both

drag and lift are reduced at the same time.

Key words: conic disturbance; vortex-induced vibration; suppression; hydrodynamic load

作者简介

林黎明 男, 1977 年生, 助理研究员。从事流体力学研究。

钟兴福 男, 1967 年生, 副研究员。主要从事多相流体力学应用及海洋工程研究。

吴应湘 男, 1956 年生, 研究员。主要从事海洋工程相关力学问题研究。