

海洋立管涡激振动抑制的新方法

何 杨¹, 孙国民¹, 钟兴福², 林黎明²

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 本文结合当前理论研究和工程界中使用过的 VIV 抑制设计, 在讨论其优缺点的基础之上, 提出了一套新的立管 VIV 抑制装置。数值模拟结果表明, 新装置不仅可以减阻, 也可以减轻旋涡脱落引起的振动。通过涡激振动的实验, 结果表明, 在结构固有频率和静止柱体下涡脱落频率相同时, 新装置确实能有效降低结构涡激振动振幅。

关键词: 海洋立管; 涡激振动; 抑制方法

立管是用于深海油气钻采的关键设备。当海流绕过立管结构时, 由于产生交替脱落的旋涡, 结构受到脉动的流体作用力, 从而产生特定的振动, 称为涡激振动; 特别是当涡脱落频率和结构固有频率相近或相等时发生共振, 结构振幅显著增大, 受到的流体作用力也会增大。这种共振复杂性会导致立管结构出现潜在的疲劳破坏, 以及运动传导至海面采油平台, 将直接影响采油作业、生产及人员安全等, 不但造成经济损失, 甚至因原油泄漏将导致附近海域的环境污染, 因而深海立管的安全性问题受到了各国海洋工程界研究人员的广泛关注^{[1][2][3]}。

为了最大程度降低涡激振动对立管等结构的破坏作用, 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的试验和工程应用研究, 提出了各种 VIV 抑制装置和设计^[4-7]。从控制论角度出发, 各种 VIV 抑制装置可以分为主动控制和被动控制两类。主动控制需要消耗额外的能源来使得抑制措施/办法得以实施, 在工程应用中, 特别是海洋立管情况下, 还未得到广泛的应用。被动控制则根据涡激振动的实测结果, 通过对产生涡激振动的物理机理分析设计出相应的干扰装置, 从而建立干扰效果与抑制装置的控制参数间的先后关系, 从而实现抑制 VIV 的目标, 如在立管外部添加导向翼、整流罩等方法已被工程界广泛的采用。

现阶段应用的立管涡激振动抑制装置存在不同的缺点, 例如导向翼可以很好的抑制旋涡的脱落, 但却额外的增加了来流方向的阻力; 虽然整流罩既能抑制旋涡脱落又能减阻, 可在实际应用过程中, 会存在结构的整体稳定性方面的问题。因此, 探讨一种全新的海洋立管涡激振动抑制方法, 是本文的主要目标。

1 海洋立管 VIV 抑制装置需满足的设计条件

通过对 VIV 抑制机理的分析和典型 VIV 抑制装置的分析, 认为当前设计或应用 VIV 抑制装置要求考虑如下几个方面:

1) 来流方向无关性: 适应深海复杂海流(包括内波的出现), 以及波浪、洋流等来流方向会发生变化的情况;

2) VIV 抑制机理的选择: 由于(1)的限制, 因此不考虑对来流方向性敏感的来流、自由剪切层或尾迹扰动作为 VIV 抑制机理; 虽然设计成可旋转式或多柱环绕式, 然而增加了分段动态稳定性和水下清理等问题, 因此 VIV 抑制物理机制主要选择在对柱体表面附近的绕流(如流动分离和边界层)和柱体展向相干性进行干扰, 并且结合考虑;

3) 设计经济性: 装置设计简单, 成本低, 且易于建造、安装和维修; 且避免对柱体表面做再加工而改变原有立管的设计;

4) VIV 抑制效果: 减振减阻, 甚至实现涡脱落受到抑制;

5) 外界影响: 如海洋生物附着对抑制效果的影响小等。

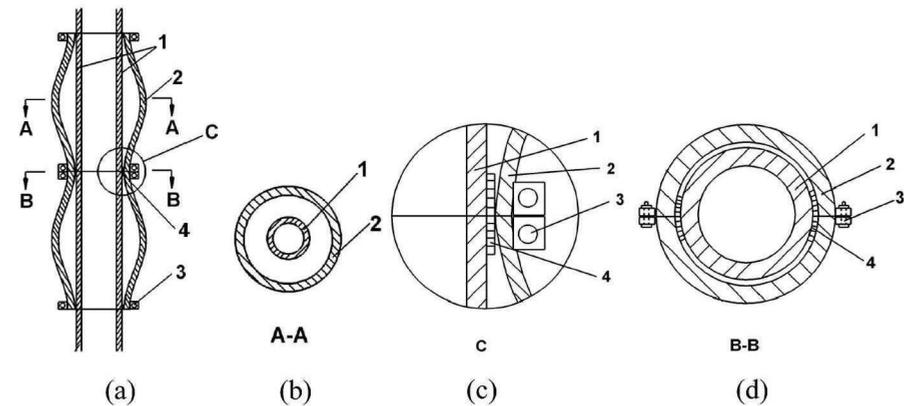


图1 “豆荚”型 VIV 抑制装置，其中 1 为立管，2 为抑制罩，3 为锁定装置，4 为隔垫

1.1 VIV 抑制装置设计原理

依据海洋立管 VIV 抑制装置需满足的设计条件，我们提出了“豆荚”型 VIV 抑制装置，如图 1 所示谐波型抑制鼓包装置，其依据的物理机理是：(1) 由于几何扰动不仅能改变流动分离沿展向的均匀性，而且这种扰动将导致物面不再只有单一表面涡量的出现，而是“人为”引入附加涡量，并且具有特定分布特征，因而进一步干扰了物面附近的边界层流动及涡脱落的展向相关性。(2) 为了消除来流攻角对设计装置的影响，截面仍然设计成圆形——将原有平面内(流向—展向)扰动以柱体轴心周向旋转 360°，从而导致结构有效绕流柱体直径发生非线性变化，无论是均匀来流还是剪切流，都能在很大程度上“扰动”沿展向涡脱落频率(静止柱体下)的一致性。此外其他类型的几何扰动型式，如圆球形，椭球型及圆锥型扰动，具有相似的物理干扰机制，因此若要获得最佳的减阻减振效果，甚至是涡脱落受到抑制，须对上述各种扰动形式进行试验研究和分析。

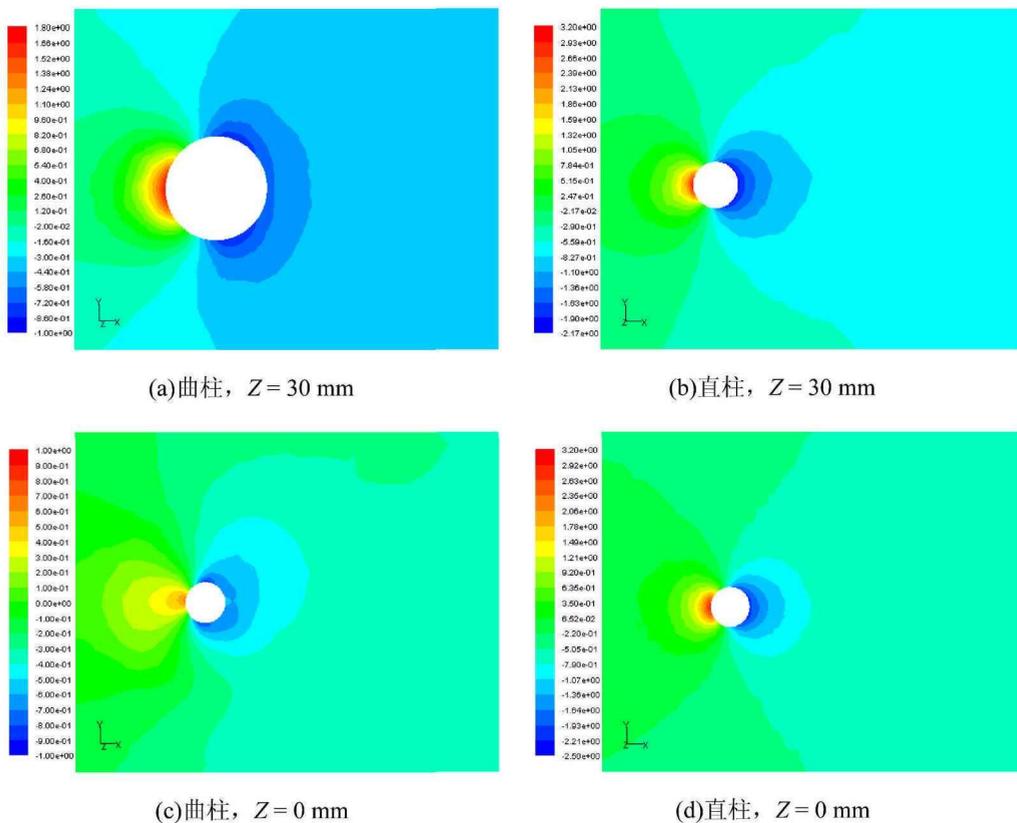


图 2 不同位置处曲柱和直柱压力系数分布对比图 (v = 0.5 m/s)

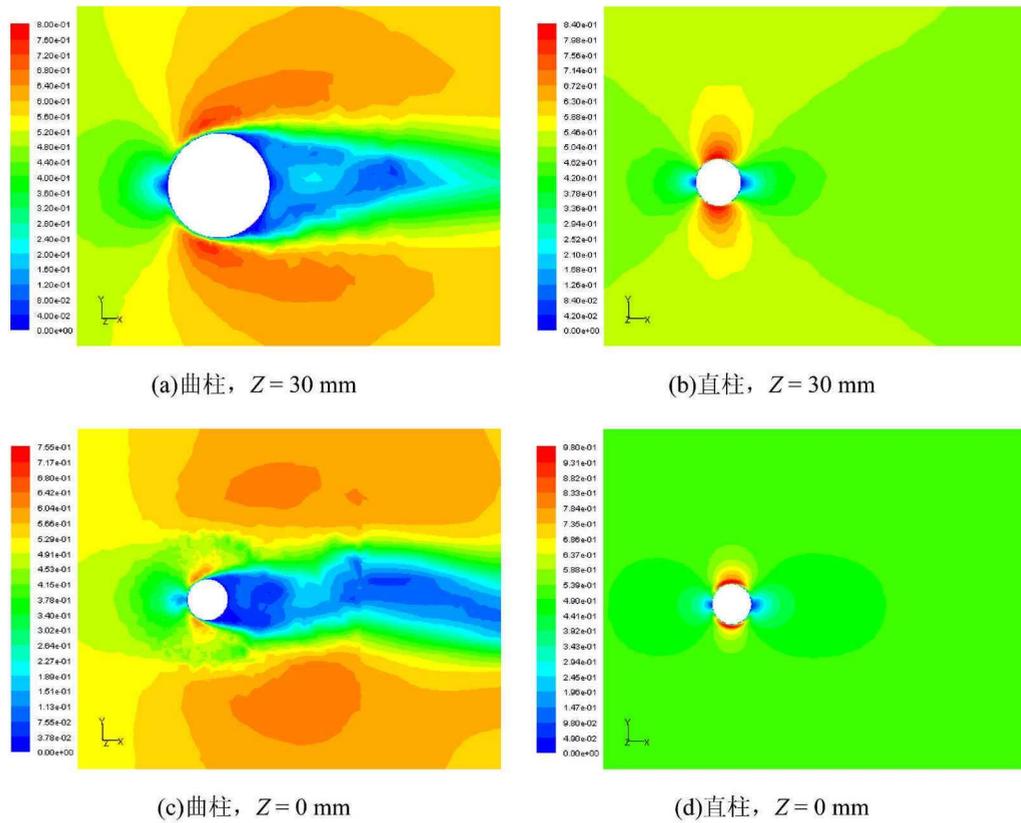


图3 不同位置处曲柱和直柱流向速度分布对比图 ($v = 0.5 \text{ m/s}$)

1.2 抑制装置的减阻效果计算

对设计的抑制装置进行了数值模拟计算(柱体直径为 10 mm),为了简化计算过程,图中给出了两种位置 $Z = 30 \text{ mm}$ 、 0 mm 处曲柱和直柱压力系数分布和流向速度等值线对比图, $Z = 30 \text{ mm}$ 、 0 mm 分别代表曲柱直径中间和最小处位置,并给出了背压系数对照表。

从表 1、图 2 和图 3 的结果可以看出,曲柱的背压系数要比直柱的大,数值显著增高,说明曲柱的减阻效果明显,从而成为结构阻力下降的主要因素;而且曲柱尾迹横向和流向范围扩大,涡形成长度也将明显增加,恰好对应着背压系数的增大;尾迹长度的增加有利于削弱脱落涡对结构的交替脉动作用,从而削弱结构受到的流体的载荷,这对于削弱立管涡激振动十分重要。

表 1 计算的直柱和曲柱上在不同位置处后驻点的背压系数

Z (mm)	来流速度 0.5 m/s		来流速度 1 m/s	
	直柱	曲柱	直柱	曲柱
0	-2.5	-0.6	-2.4	-1.75
15	-2.17	-0.5	-1.6	-1.34
30	-2.17	-0.6	-2.6	-1.6

1.3 带有抑制装置的柱体涡激振动实验及结果

在柱体结构涡激振动试验中,将结构受到的流体的载荷转化为结构受力发生运动的强弱,这种运动不是通过平动来表现,而是通过摆动来实现。其方法是将流体的载荷的强弱转化为结构受到流体的载荷后发生运动的幅度,通过测量不同柱体在来流作用下出现横向涡激振动的摆动幅值,得到运动强弱,当涡脱离频率和单摆固有频率相接近时,发生共振,摆动幅度达到最大值,以此来找出何种流工况下发生共振,由此可确定不同柱体结构发生 VIV 时的流工况。

实验是在中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室的循环水槽中完成的,如图 4 所示。

该水槽设计水深最大达到 1 m，最大流速为 1 m/s，实验段宽 1 m，长 6 m，本次实验水深保持在 0.65 m 到 0.7 m 之间。结构振荡位移测量装置为激光位移传感器。来流速度则通过超声波多普勒测速仪来校准不同的实验来流速度。

依据涡激振动抑制设计原理获得的柱体外形图，如图 5 所示，0#为直圆柱，其他为扰动柱，其中 1#、2#、3#为表面呈谐波型的柱体，而 4#、5#、6#为表面呈类圆锥型的柱体。实验柱体为铝制材料。直圆柱直径为 20 mm，扰动柱最大直径分别为 26 mm，32 mm 和 44 mm，扰动波型的波长为 120 mm。扰动强度分别为（扰动波高与扰动波长之比）0.025，0.05 和 0.1。

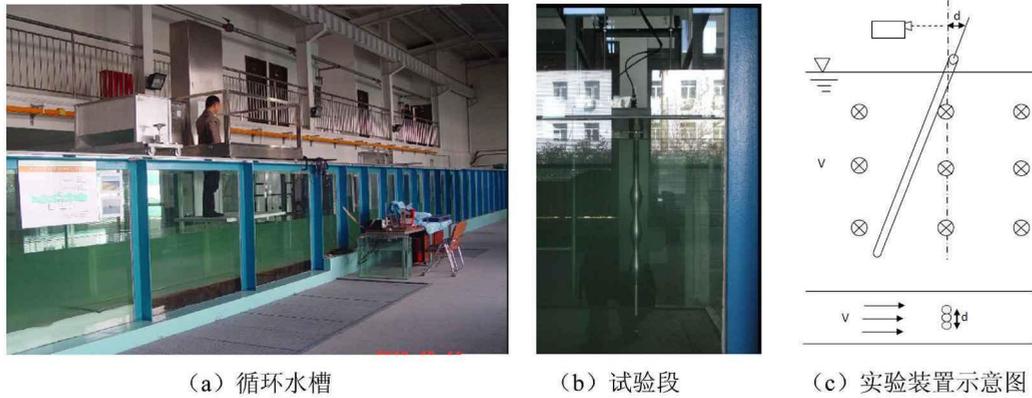


图 4 中国科学院力学研究所水动力学和海洋工程重点实验室装置

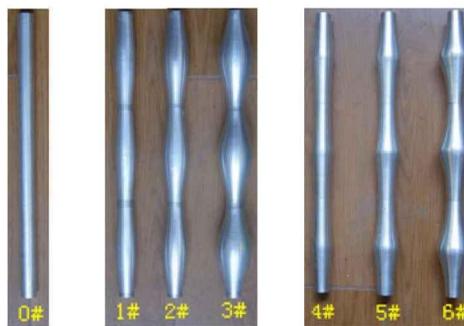


图 5 不同类型柱体结构 (0#直圆柱, 1#、2#、3#谐波型柱, 4#、5#、6#圆锥型柱)

通过结构固有频率测量实验，得到所有柱体的固有频率分别为：直柱体和谐波型柱体为 0.56 Hz，圆锥型柱体则为 0.55 Hz。通过估算可以获知当自由来流速度为 5 cm/s 时，静止柱体下的涡脱落频率也恰好为 0.55 Hz。因此可以判断，在该流速下，直柱体开始发生涡激共振；在此实验流速下，测量结构涡激振动幅值的 RMS 值如表 2 所示。结果表明，当扰动强度超过 0.05 时，带有抑制装置的结构确实在该流速下有效降低了原有结构的振荡幅值。

表 2 当来流速度为 5 cm/s 时各柱体的无量纲振幅 RMS 值及其减小率

柱体编号	0	2	3	5	6
振幅 RMS 值 ($\times 10^3$)	119.4	76.9	61.5	78.9	55.9
振幅减小率	0	35.6%	48.5%	33.9%	53.2%

2 结论

通过数值模拟的结果得出如下的结论：

(1) 首次提出的“豆荚”型 VIV 抑制装置不仅可以减阻，而且很好的抑制立管的旋涡脱落。

(2) 该装置不仅设计，生产，安装方便，而且还会克服导向翼，整流罩等的缺点，预期在海洋工程领域有很广阔的应用前景。

参考文献:

- 1 Sarpkaya, T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *J. Fluids Struct.* 2004, 19: 389-447.
- 2 Gabbai, RD and Benaroya, H. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders. *J. Sound Vib.* 2005, 282: 575-616.
- 3 Williamson, CHK and Govardhan, R. A brief review of recent results in vortex-induced vibrations. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2008, 96: 713-735.
- 4 Kumar, RA, Sohn, CH and Gowda, BHL. Passive control of vortex-induced vibrations: an overview. *Recent Patents on Mechanical Eng.* 2008, 1: 1-11.
- 5 Choi, H, Jeon, W-P and Kim, J. Control of flow over a bluff body. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2008, 40: 113-139.
- 6 吴浩, 孙大鹏. 深海立管涡激振动被动抑制措施的研究. *中国海洋平台*. 2009, 24(4): 1-8.
- 7 鞠少栋, 陈国明, 孙友义等. 深水隔水管短减振器涡激抑制性能分析. *中国造船*, 2010, 51(A02). 45-50.