

# 海上结构物流致振动控制方法研究

邵传平 鄂学全

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

魏庆鼎 朱凤荣

(北京大学湍流研究国家重点实验室)

**摘要** 海洋石油平台是典型的大型海上结构物,其隔水导管在海流作用下的涡致振动控制问题可简化为对圆柱尾流旋涡脱落的抑制。本文给出了展径比为 38,雷诺数为  $10^2 \sim 10^3$  的圆柱尾流旋涡脱落抑制的一些实验结果。

**关键词** 旋涡脱落, 振动控制, 隔水导管

## 1 前言

当流体以一定速度流过柱形钝物体时,会在物体尾部形成规则的旋涡脱落。在旋涡脱落过程中,物面两侧的压力分布交替变化,从而产生作用于物体的强迫交变载荷。在这种交变载荷作用下,物体将发生振动。涡致振动不仅表现为对物体结构的疲劳损坏。对于作强迫振动的圆柱体来说,当无量纲速度  $U/fD$  (其中  $U$  为来流速度,  $D$  为圆柱直径,  $f$  为振动频率) 处于一定范围时,将发生锁频,旋涡脱落频率不再遵守 Strouhal 关系,而是与圆柱振动频率保持一致。此时不断提供流体动力,使圆柱振动幅值和所受载荷大幅度提高<sup>[1][2]</sup>。对于悬臂自由振动的圆柱体,振动与旋涡脱落的耦合作用非常复杂。当无量纲速度  $U/fD$  达到一定值  $a$  时,振幅突然跃升;  $U/fD$  达到另一值  $b$  ( $b > a$ ) 时,振幅突然减小<sup>[5]</sup>。对于柱群,流动与旋涡脱落的相互干扰可使柱体载荷发生双稳态切换<sup>[30][31]</sup>。

涡致振动使柱体或柱群遭受破坏,在风工程中已有不少先例(如英国渡桥电厂冷却塔群的倒塌,美国塔克玛大桥的毁坏等)。在海洋工程中,涡致振动造成的问题同样难以处理。目前国际海洋石油工业的竞争正向深海(数百米以上)发展。在世界许多地方(包括中国),深海海域环境条件均很恶劣,海流对勘探钻井和采油造成巨大威胁<sup>[2][3][4]</sup>。对钻井隔水导管(长圆柱体)来说,危险来自三个方面<sup>[4]</sup>:①在深海区,海流速度一般高于浅水区。②导管的加长降低了其固有频率,从而降低了激发涡致振动所需的海流速度。③深水平台通常为悬浮式,没有可供隔水导管夹持固定的结构。

目前涡致振动的研究,多为对现象的描述。Pesce & Fajra (2000)<sup>[5]</sup>实验研究了柔性柱在水中的涡致振动及振幅跳跃现象。Farnes et al. (1998)<sup>[3]</sup>在挪威某 1300m 深海域对钻井隔水导管的振动情况进行实测,数据分析表明,海流可使导管以几种波型振动。Govardhan & Williamson (2000)<sup>[7]</sup>研究了自由振动圆柱涡的形成模式及频率响应。Newman & Karniadakis (1997)<sup>[8]</sup>数值研究了流体流过自由振动缆绳时的动力学行为。Kitagawa et al. (1997)<sup>[9]</sup>实验研究了柱形塔在高速下的涡致振动情况。

对于很多柱形结构,涡致振动一般难以避免。解决涡致振动问题的根本方法,还在于设法抑制旋涡脱落的产生。目前抑制旋涡脱落的方法很多,如在尾流中加隔离板<sup>[15]</sup>,尾部喷射<sup>[16]</sup>,物体振动<sup>[14][19]</sup>,声激励<sup>[17]</sup>,物体加热<sup>[22]</sup>等,但均难以应用于解决如上所述的工程实际问题。80年代末至90年代初兴起的主动反馈控制方法<sup>[23]</sup>,由于在较高 $Re$ 数下不能很好地解决对一个频率进行控制的同时,可能造成其他频率的激发问题,而逐渐冷却下来。最近我们发展了一种基于绝对不稳定性理论<sup>[24][25]</sup>的旋涡脱落抑制方法。该理论认为,在钝体近尾流中存在一个绝对不稳定性区,该区内的任意扰动,将最终发展为周期性的旋涡脱落。如果设法消除或减小物体尾部的绝对不稳定性区,则旋涡脱落,从而涡致振动可消除或减弱。本文将介绍旋涡脱落抑制实验的一些结果。

## 2 实验方法

实验在北京大学湍流研究国家重点实验室低湍流度水槽(Water Channel)中进行。水槽实验段宽度40cm,高度80cm,长度3m,图1(A)为其俯视图。水槽常用流速为0.1~1m/s。模型圆柱(Cylinder)直径为1cm,横放于水槽半高位置。圆柱长度为38cm,两端分别固定于厚度为1cm的端板(End plate)上,如图1(B)所示。端板高度为20cm,圆柱位于半高处。端板总长度35cm,其中在圆柱前方部分20cm,在圆柱后方部分15cm。端板前后方分别呈光滑过渡的尖劈型,以利于减小水槽壁面边界层的影响。对于光滑圆柱来说,当 $Re$ 数大于45时,将在柱后产生旋涡脱落。为了抑制旋涡脱落的产生,在圆柱表面沿展向布置一排小的圆形抑制棒(Suppression rod),如图1(B)和(C)所示。在本实验中,小棒直径固定为0.18cm,小棒长度固定为1.5cm。小棒间距 $t$ 及与来流夹角 $\beta$ 可调。模型圆柱、端板和抑制棒均由有机玻璃制成,实验时相互之间紧密固结,形成一个整体,然后固定于两壁上。圆柱尾流速度脉动情况由激光多普勒流速仪测量。

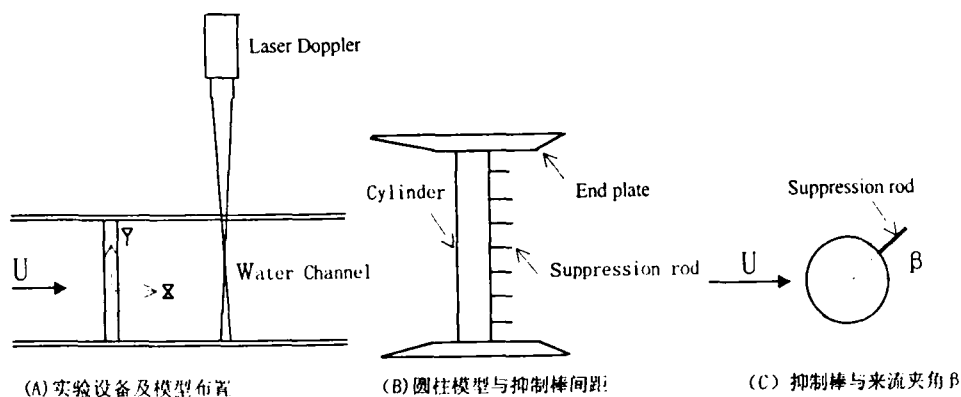


图1 模型与实验设备

### 3 实验结果

为了检验旋涡脱落抑制效果,每次实验时,先将未加抑制棒的光滑圆柱模型在水槽中安放好,并将水洞流动速度调整导致定值后保持不变,稳定一段时间后,用激光流速仪在柱下游一定位置处测量尾流速度脉动情况,然后在圆柱模型上加抑制棒,调整好棒间距及与来流的夹角,使水流稳定一段时间后,继续在相同位置测量尾流速度脉动情况。

图 2 为  $Re = 1600$  时的典型测量结果。图 2(A) 和 2(B) 分别为光滑圆柱下游  $X/D = 18.5, Y/d = 0, Z/D = 1.0$  处和  $X/D = 18.5, Y/d = 0, Z/D = -1.0$  处测量的尾流速度脉动。其脉动速度功率谱分别为图 2(E) 和图 2(F)。图 2(C) 和图 2(D) 为抑制棒间距  $l/D = 1.0$ , 棒与来流夹角为  $60^\circ$  时的测量结果。其中,图 2(C) 的测量位置为  $X/D = 18.5, Y/d = 0, Z/D = 1.0$ , 图 2(D) 的测量位置为  $X/D = 18.5, Y/d = 0, Z/D = -1.0$ 。图 2(C) 和图 2(D) 所示的脉动速度,其功率谱分别为图 2(G) 和图 2(H)。

由图 2(E) 和图 2(F) 可知,光滑圆柱尾流速度脉动功率谱具有明显的峰值,峰值频率即为旋涡脱落频率,其所对应的 Strouhal 数为 0.13,与其他作者的实验结果相近,比较相同测量位置的速度脉动可知,光滑圆柱尾流脉动幅值较大,加抑制棒后,无论在圆柱上侧还是下侧,脉动幅值均远低于光滑圆柱情况,且速度脉动功率谱为宽谱,没有明显峰值,说明旋涡脱落已经被抑制。

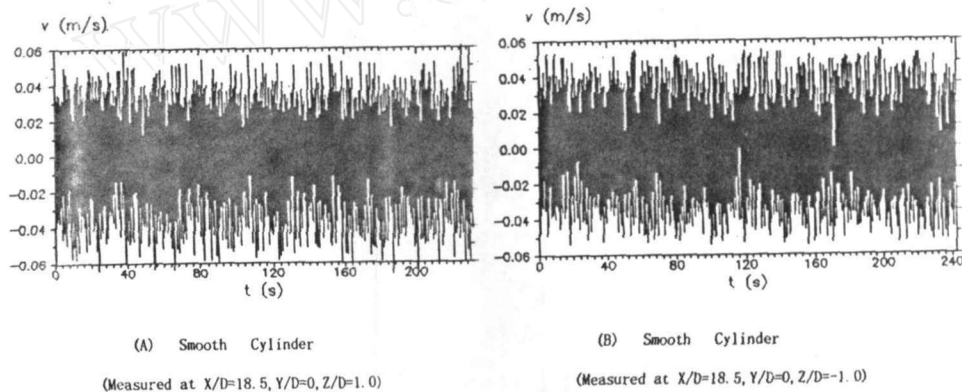


图 3 为棒与来流夹角  $\beta$  对旋涡脱落抑制效果的影响,抑制棒间距  $l/D = 1.0$ , 实验雷诺数  $Re = 1600$ , 测量位置在  $X/D = 18.5, Y/D = 0, Z/D = 0$ 。光滑圆柱速度脉动如图 3(A) 所示,其脉动幅值较大。抑制棒夹角  $\beta$  为  $0^\circ$  时图 3(B), 脉动幅值比光滑柱稍有减小,  $\beta$  增至  $30^\circ$  图 3(C) 和  $45^\circ$  图 3(D) 时,幅值进一步减小,当  $\beta$  达到  $60^\circ$  图 3(E) 时,脉动幅值更小。但当  $\beta$  增大到  $90^\circ$  图 3(F) 时,脉动幅值又有所增大。

图 4 为抑制棒间距对旋涡脱落抑制效果的影响 ( $Re = 350, \beta = 45^\circ$ , 测量位置在  $X/D = 16, Y/D = 0, Z/D = 0.4$ )。各种棒间距下脉动速度幅值均比光滑柱小,且随着棒间距的减小,抑制效果更好。

为了检验加抑制棒后流动的展向均匀度,我们在展向不同位置测量平均和脉动速度分

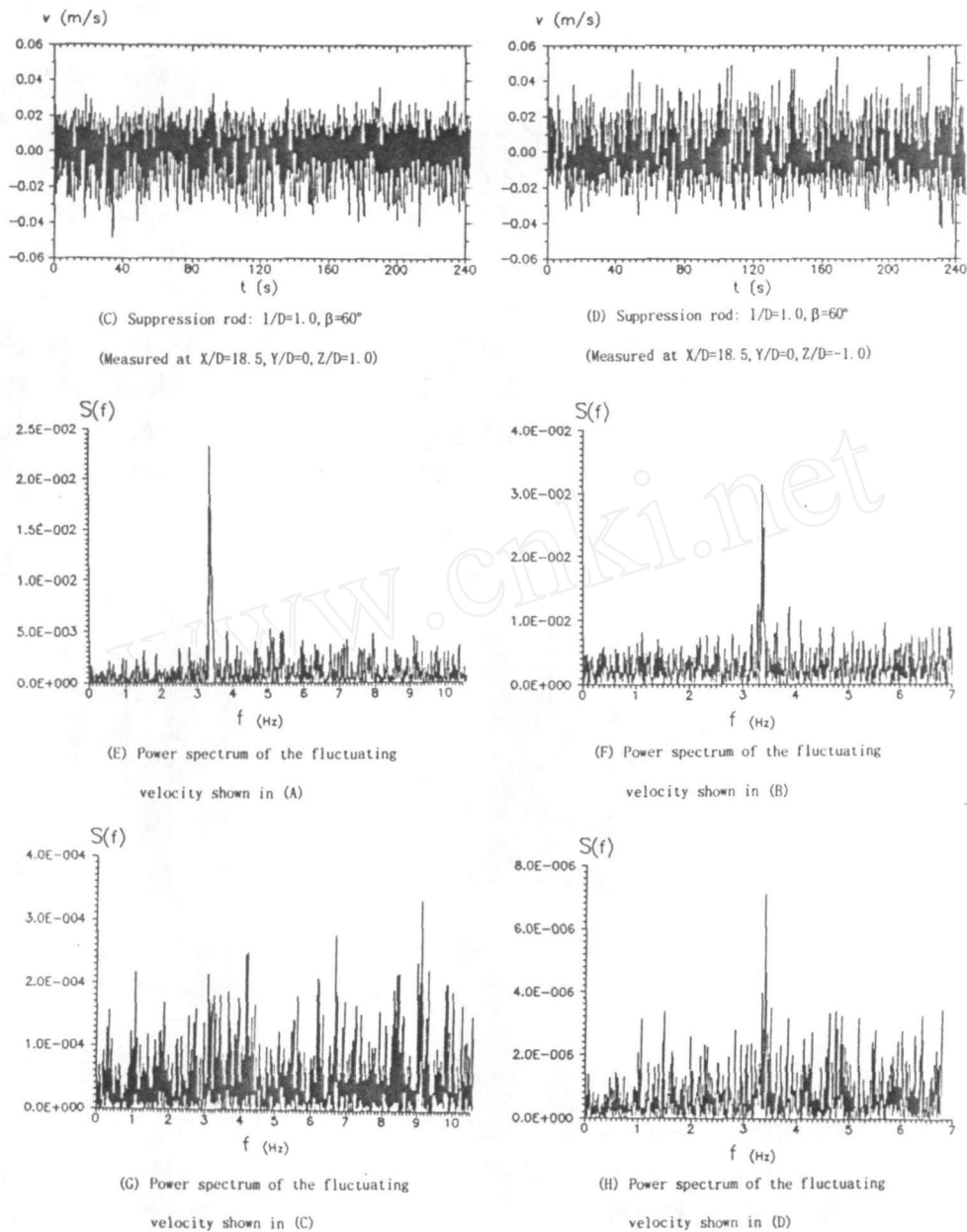


图2 加抑制棒前后尾流脉动速度及其功率谱比较 (实验的雷诺数  $Re = 1600$ )

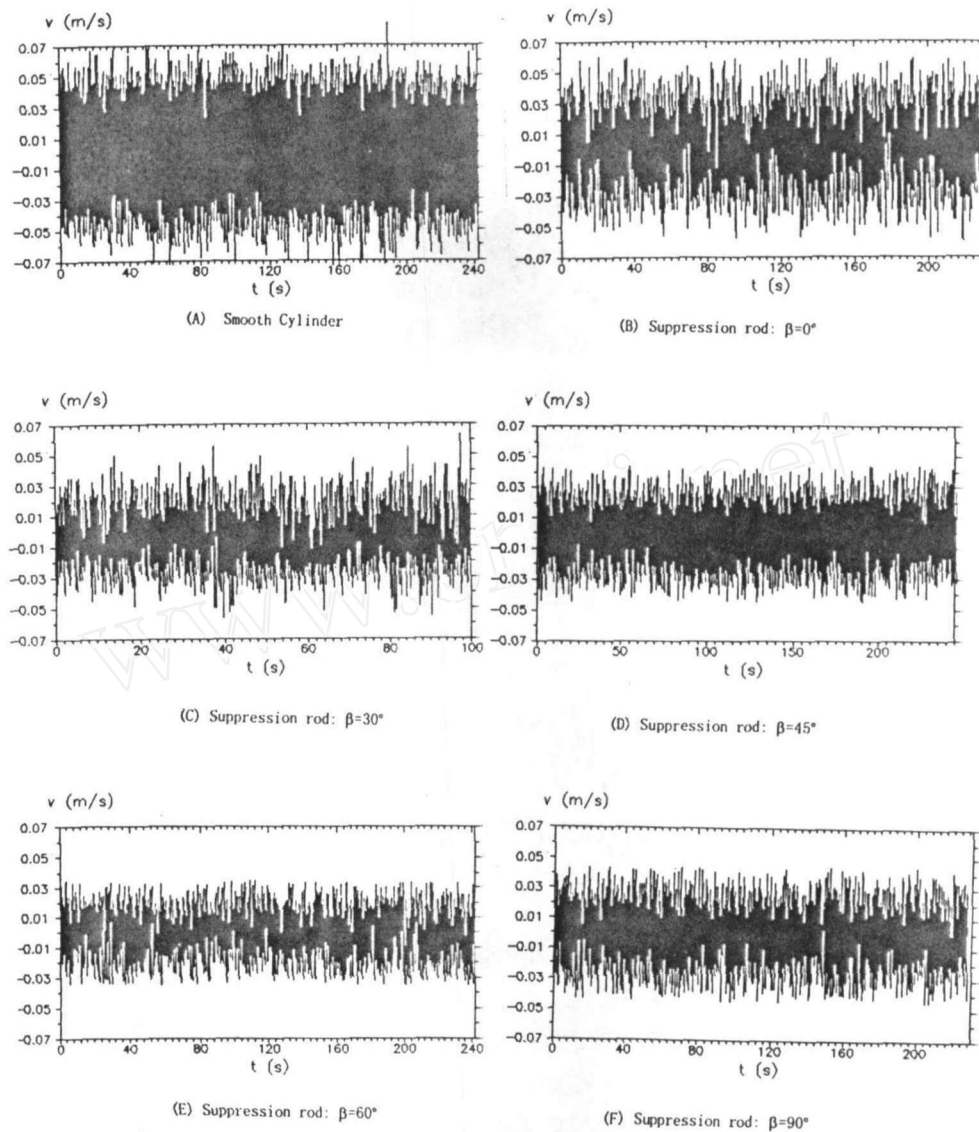


图3 抑制棒与来流夹角对抑制效果的影响  
 $(Re = 1600, l/D = 1.0, \text{测点: } X/D = 18.5, Y/D = 0, Z/D = 0)$

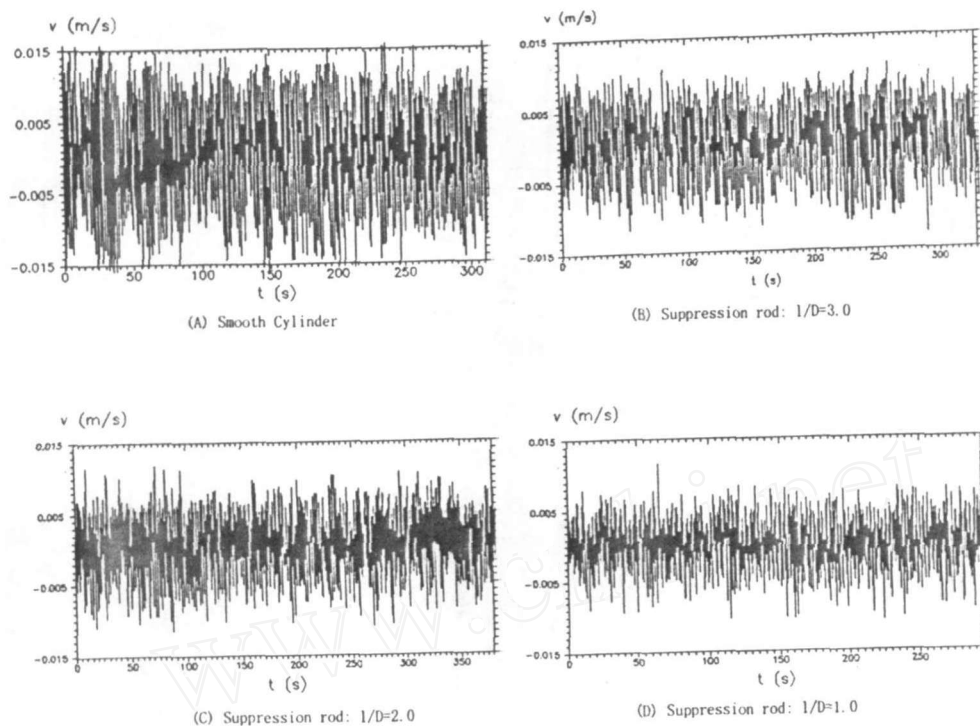


图 4 抑制棒间距对抑制效果的影响

$Re = 350, \beta = 45^\circ$ , 测点:  $X/D = 18.5, Y/D = 0, Z/D = 0.4$

布情况。平均速度和脉动速度均方根值  $V_r.m.s$  沿圆柱展向  $Y/D$  的分布情况表明,除靠近壁面的小区域外,平均速度和脉动速度均方根值沿展向的波动较小,说明流动沿展向基本均匀。

为了加强对圆柱尾流整体脉动情况的了解,在图 5 中画出了抑制棒间距  $l/D$  固定时,  $\beta$  角变化对脉动速度均方根值  $V_r.m.s$  在剖面  $X/D = 18.5, Y/D = 0$  上分布的影响。实验的雷诺数  $Re = 1600$ , 作为对比,光滑圆柱的情况也画在图中。可以看出,加抑制棒后尾流的整体脉动水平平均比光滑圆柱时有减小。 $\beta = 0^\circ$  (即棒与来流平行) 时抑制效果最差,  $\beta = 90^\circ$  (即棒与来流垂直) 时抑制效果比  $\beta = 0^\circ$  时稍好,  $\beta = 30^\circ \sim 60^\circ$  时抑制效果均很好,脉动速度均方根值  $V_r.m.s$  比光滑柱时有明显减小。Strykowsky & Sreenivansan(1990)<sup>[32]</sup> 在主圆柱旁边平行地放一个直径很小的圆柱,对主圆柱尾流旋涡脱落进行抑制时也有类似情况,两圆柱间距及圆心连线与来流夹角处于一定范围时,才有效果。所不同的是, Strykowsky & Sreenivansan 的结果,只有当  $Re < 100$  时有效,超过这个范围,旋涡脱落无法抑制。而本文的抑制方法,在实验的雷诺数范围  $Re = 300 \sim 1600$  内,均能够很好地抑制旋涡脱落。

抑制棒间距  $l/D$  对尾流整体抑制效果的影响如图 6 所示。实验的雷诺数  $Re = 1600$ , 抑

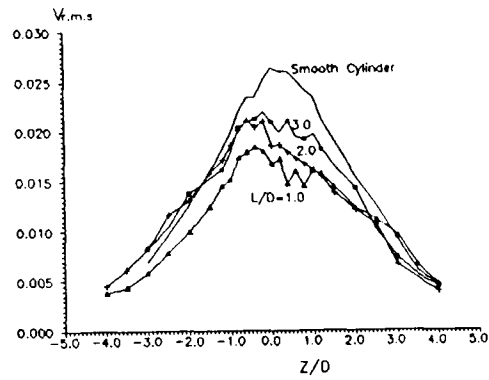
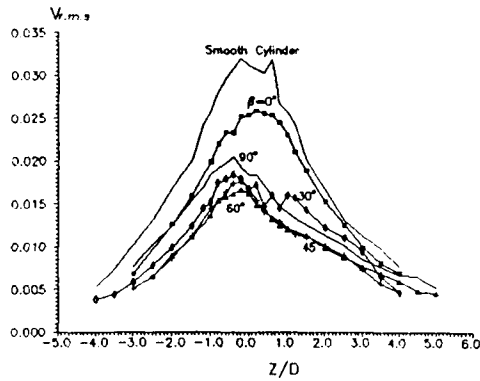


图5 夹角  $\beta$  对尾流脉动速度均方根分布的影响  
( $Re = 1600, l/D = 1.0$ )

图6 间距对尾流脉动速度均方根分布的影响  
( $Re = 1600, \beta = 30^\circ$ )

制棒与来流夹角固定为  $\beta = 30^\circ$ , 测量的剖面为:  $X/D = 16, Y/D = 0$ 。图中各抑制棒间距下脉动速度均方根在尾流剖面的分布均比光滑圆柱时小。

#### 4 结论

当海流流过海上结构物时,尾流旋涡脱落将引起结构物振动。本文以海上石油钻井平台圆形隔水导管为简化对象,通过圆柱绕流模型实验,研究了抑制尾流旋涡脱落,从而消除涡致振动的方法及其效果。研究的雷诺数范围为  $Re = 300 \sim 1600$ ,圆柱模型的展径比为 38。本文采用在圆柱表面每隔一定距离伸出一个小的抑制棒的方法,对整个圆柱的旋涡脱落进行抑制。此处所用抑制棒几何尺寸固定为直径 0.18cm,长度 1.5cm。实验结果表明,通过适当调整抑制棒间距,特别是棒与来流夹角,可以抑制旋涡脱落的产生。当抑制棒间距比小于 3,棒与来流夹角在  $30^\circ \sim 60^\circ$  范围内时,抑制效果最好,可基本消除旋涡脱落。