

文章编号: 1001-4888(2020)04-0567-10

圆柱固结刚性分离盘结构振动风洞实验研究^{*}

陈雯煜, 梁盛平, 王嘉松

(上海交通大学 工程力学系, 水动力学教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 分离盘作为常用的流动控制装置之一, 对于固定圆柱旋涡脱落具有很好的抑制作用。但是, 对于结构振动, 固结刚性分离盘是否有类似的抑制作用及控制机制尚待深入研究。本文通过风洞实验, 利用非接触式激光位移传感器, 研究圆柱固结短分离盘后在“从静止开始”和“连续增加风速”这两种不同的初始条件下的结构响应。结果表明, 附加分离盘后, 与典型的涡激振动 (Vortex-induced vibration, VIV) 类似, 结构的响应虽然仍然限定在一段风速范围内, 但是其幅值比单圆柱 VIV 幅值大得多。当分离盘长度为 $0.25D$ (D 为圆柱直径) 时, 结构响应与圆柱 VIV 类似, 分为两个分支。当分离盘长度为 $0.4D$ 、 $0.5D$ 时, 结构响应存在明显的迟滞现象, 同时, 响应会在达到最大振动幅值后突然消失。连续增加风速时, 振动随约化速度增加而增强。与典型的涡激振动类似, 可以发现明显的频率锁定现象, 与典型驰振特性不同。通过 FFT 分析尾流速度频谱, 可以发现, 附加分离盘后, 频谱中出现大量的高阶谐频成分, 它们的出现可能与旋涡脱落模式有关。

关键词: 分离盘; 涡激振动; 风洞实验; 谐频

中图分类号: O353.5

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-19-072

0 引言

在实际工程中, 圆柱结构十分常见。而当流体流经钝体结构时, 在一定条件下, 在钝体后会产生周期性的旋涡脱落。周期的旋涡脱落会使结构受到周期性变化的流体力, 而当旋涡脱落的频率接近结构的固有频率时, 会发生共振现象。此时, 一方面, 周期性的流体力会使结构发生共振; 另一方面, 结构周期性振动会将旋涡脱落的频率锁定。这种旋涡脱落引起的流体与结构相互耦合的现象被称作涡激振动 (Vortex-induced vibration, VIV)^[1]。

涡激振动的存在可能引起结构破坏, 带来工程事故, 因此, 抑制涡激振动的发生尤为重要。工程上, 涡激振动的抑制策略主要有两种, 主动方式和被动方式。主动方式是引入外部能量, 如表面加热和吸吹方式; 被动方式是在圆柱表面附加各种抑制装置, 如整流罩 (fairing)、分离盘 (splitter plate)、螺旋导板 (helical strakes)^[2] 等。被动方式由于成本低廉且安装方便而得到广泛应用。Zdravkovich^[3, 4] 在总结已有的涡激振动抑制装置的基础上, 将这些装置归结为三大种类: (1) 干扰翼展相关性的装置, 例如螺旋条纹、螺旋线、突起及波浪形表面等^[5]; (2) 影响钝体表面产生剪切层的装置, 例如附属管、多孔罩^[6] 等; (3) 阻止产生的剪切层之间相互作用的装置, 例如分离盘等^[7]。近些年来对涡激振动的研究已不仅仅局限于单纯地研究其抑制机理, 越来越多的学者认为涡激振动可以为能源回收提供新思路。刘卓等^[8]、Bernitstas 等^[9] 通过实验探讨了对圆柱涡激振动能量回收机理。

^{*} 收稿日期: 2019-04-27; 修回日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11872250) 资助; 国家科技重大专项子课题 (2016ZX05028-001)

通讯作者: 王嘉松 (1967—), 男, 教授, 主要研究方向: 高精度数值计算方法; 涡激振动及其抑制。Email: jswang@sjtu.edu.cn

分离盘是一种有效改变旋涡脱落模式的装置。王嘉松等^[10]、钟庆等^[11]通过数值模拟的方式研究了隔水管附加分离盘后流动控制的效果。Unal 和 Rockwell^[12]、Texier 等^[13]、Akilli 等^[14]以及谷斐^[15]采用实验手段对圆柱后附加分离盘后流动控制进行了研究。Apelt 和 West^[16,17]的实验研究表明,阻力系数和斯特劳哈数随分离盘长度的变化而变化,尾涡形成长度大大减小,上下剪切层的卷起被分离盘部分隔绝,流体力也大大减小。Liang 等^[18,19]采用实验手段对圆柱后加有间隙的固定刚性分离盘以及圆柱后固接柔性分离盘流动形态进行了研究并发现了驰振现象。

单从流动控制的角度看,对固定圆柱研究绕流特性时,分离盘的确能很大程度上抑制旋涡脱落,减小结构所受的流体力。然而,从结构响应的角度考虑,分离盘并不一定总是能减弱结构的响应。Assi 等^[20]进行了一系列的水洞实验,结果表明,圆柱上附加分离盘不仅没能降低振动,反而使振动大大加强。早在 1990 年,Kawai^[21]通过 DVM(Discret Vortex Method)数值方法,发现分离盘的确会加剧结构的振动。Assi 和 Bearman^[22]发现,附加分离盘后,升力和位移之间相位差不会突然跳跃,进一步经由 PIV(Particle Image Velocimetry)实验发现,剪切层会附着在分离盘上。Assi 等^[20]将这种附加刚性分离盘升力与位移相位差不发生跳跃的结构响应归为驰振(galloping)。

驰振是另一种流致振动(flow-induced vibration),与涡激振动不同,结构的响应只在一段共振区内,驰振在流速超过临界值后就一直存在,且驰振响应的幅值往往要比涡激振动的幅值大得多。驰振在空气中的钝体结构中常见,如高压输电线,大跨度桥梁,方形建筑等,它是一种结构的不稳定响应。驰振最早发现是在低温结冰的电缆上,附着的冰块破坏了电缆的对称性,在风力作用下,会发生剧烈的振动^[23]。当结构发生微小的扰动时,剪切层的附着会使结构受到一个与振动方向同向的流体力,从而振动越来越强^[1]。

为了探究固结刚性短分离盘对圆柱结构响应的影响,本文利用风洞实验,研究圆柱固结刚性短分离盘的结构响应,同时利用热线风速仪测试得到涡脱频率,并利用 FFT(Fast Fourier transform)分析其频谱。

1 实验设置

实验所用风洞是上海交通大学动力机械及工程教育部实验室低速直流式风洞,风洞依次分为稳定段、收缩段、实验段、扩散段及消声段等部分。稳定段进口处通过安装一层蜂窝器和三层阻尼网以确保良好的整流效果;收缩段长 1200mm,收缩比为 9,可保证实验段有良好的气流品质;实验段尺寸为 600mm×600mm×2000mm,风速范围 0m/s~20m/s,湍流度小于 0.2%。本实验风洞在以往梁盛平等^[18,19]和睢娟等^[24]的涡激振动实验中均得到应用。

实验所用的圆柱为有机玻璃管,外径 50mm,壁厚 3mm,对应的长径比和阻塞比分别为 9.88 和 8.33%。分离盘使用 0.4mm 厚度铝板制成,囿于实验条件和固结手段的限制,分离盘长度选取了 0.25D、0.4D、0.5D。单圆柱和带分离盘模型的质量比分别约为 360、365、368、370。由于所加分离盘质量相对圆柱很轻,系统模型的质量变化很小,且实验过程中使用的是同一组弹簧,故阻尼系数变化很小,这里忽略其对实验结果的影响。

图 1 为模型的安装示意图,模型两端分别使用 4 根弹簧悬挂,弹簧能拉伸足够长度,以保证模型在振动时弹簧始终保持拉伸状态,两端使用弹簧垫片和螺母约束其旋转自由度。

模型只能在横流向方向振动,振动位移使用非接触式激光位移传感器(Keyence IL-300)测得,传感器的量程为 140mm。利用自建的采集系统采集实验数据,位移信号的采集频率为 1024Hz。采集程序利用 Labview8.1 编写,每个流速下,当振动幅值稳定后,采集 60s,取 10%的位移幅值的平均值为相应的位移幅值。

模型尾流布置热线探针(Dantec 5511p)测得(6D~0.75D)位置顺流向流速,以分析流场涡脱频率,如图 1,采集频率为 1000Hz。

为验证实验方法,将本文所用实验方法测得的单圆柱 VIV 和前人的结果^[25-28]进行比较。系统的固有频率和阻尼通过自由衰减实验测得。图 2 为实验测得的单圆柱 VIV 结果的对比,由图可以看到本

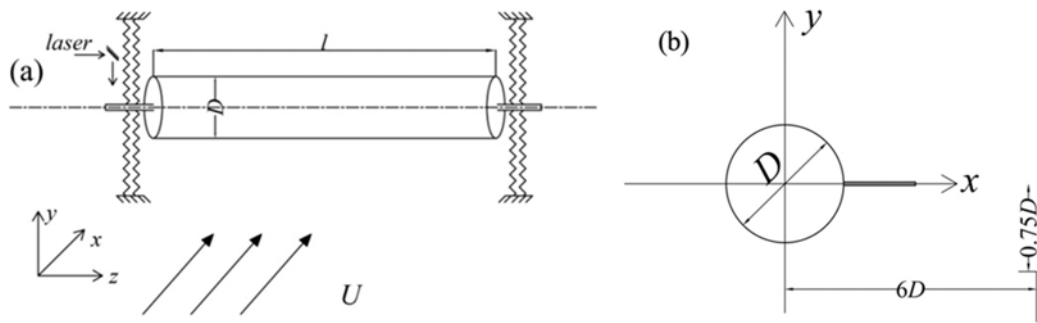


图1 模型安装示意图

Fig. 1 The installation of model

文验证的单圆柱振动特性呈现典型的涡激振动响应,Feng^[28]和本文是风洞实验,都出现初始分支(initial branch)和下端分支(lower branch),本文的质量阻尼比略小,因此最大幅值略大;Zhou^[26]和Govardhan与Williamson^[25]是水洞实验,呈现初始分支,上端分支(upper branch)和下端分支。本文实验测得最大无量次 A/D (振幅比直径) 为 0.62, 该条件下的经验预测值为 0.68, 锁定区间 5.0~8.5, 符合经典涡激振动锁定规律。图3为涡脱频率随约化速度的变化曲线, 其中斯特劳哈数 ($St = f_s \cdot D/U$) 是涡脱频率的无量纲参数; f_s 是涡脱频率(Hz); D 为圆柱直径(m); U 为来流速度(m/s)。由图3可以看到明显的频率锁定现象(在 $U_r = 5 \sim 8.5$, 振动频率等于固有频率)。因此, 本实验方法是合理且可靠的。

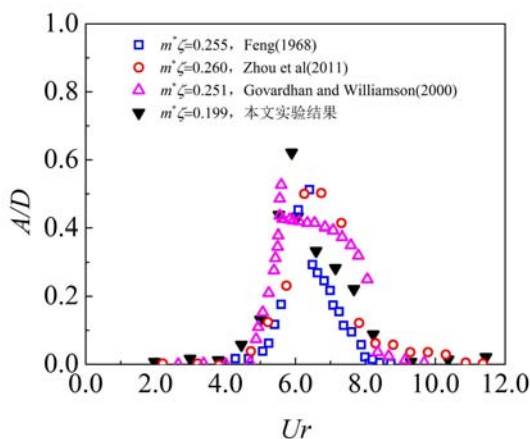


图2 单圆柱 VIV

Fig. 2 VIV of bare cylinders

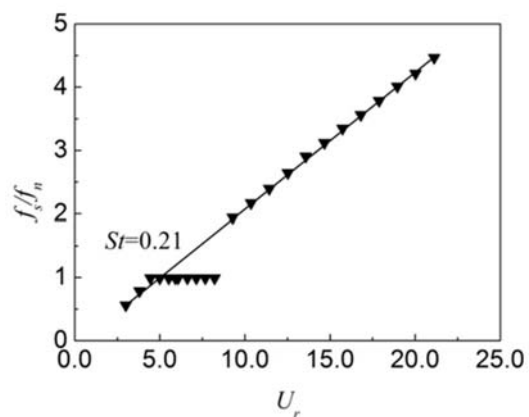


图3 单圆柱涡脱频率

Fig. 3 Vortex shedding frequency for the bare cylinder

2 实验结果及讨论

2.1 幅值响应

图4为约化速度为5附近的振动响应横向位移历时曲线,属于上端分支区间,实验中,为了探究迟滞现象(两种方法促使振动骤停的约化速度不同)是否存在,采用了两种不同的初始条件。分别选取了0.25D、0.4D、0.5D长的分离盘在静止开始(from rest)和连续增加风速(increaseing velocity)两种不同初始条件下在约化速度等于5附近的振动响应来分析幅值响应。“静止开始”是指在每一个测试风速点,先将模型静止,调节风机频率到相应风速,待振动完全稳定再开始测试,而“连续增加风速”是指直接增加风速,等待新的振动稳定,不需要将模型静止。

图4表明在 $U_r = 5$ 时单圆柱振动幅值均比固结刚性分离盘的振动要强,各横向位移响应相位是一致的。此时分离盘表现为抑制振动,随着长度增大抑制效果越明显,对于同样长度的分离盘固结于圆柱的情况下,“连续增加风速”的振动响应略强于“静止开始”。

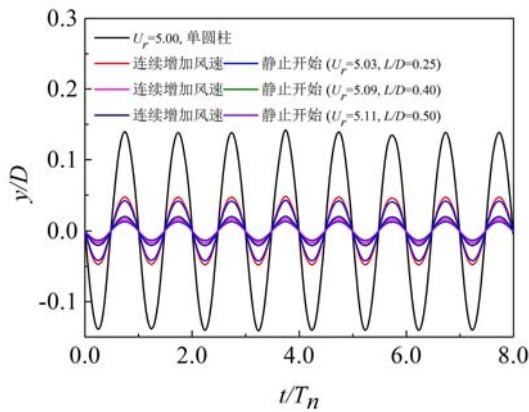


图 4 横向位移振动响应历时曲线

Fig. 4 The time histories of the cross-flow direction response

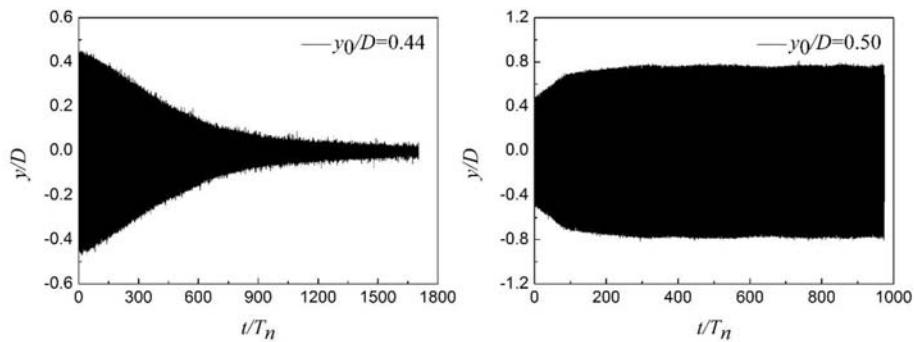
图 5 圆柱附加有间隙固定分离盘激励测试^[16]

Fig. 5 Excitation test for cylinder gapped fixed rigid detached splitter^[16]

响应会持续增大到 1.69D,而后骤停。

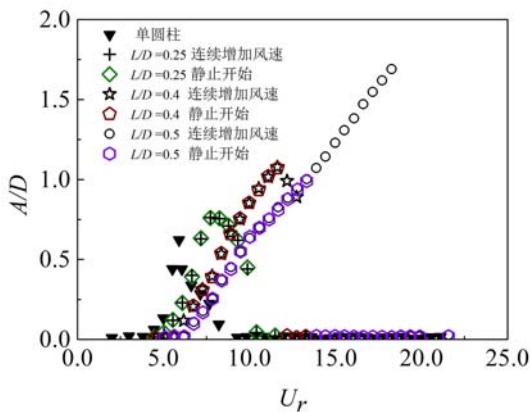


图 6 圆柱附加分离盘结构振动响应

Fig. 6 The response of a circular cylinder with splitter plat

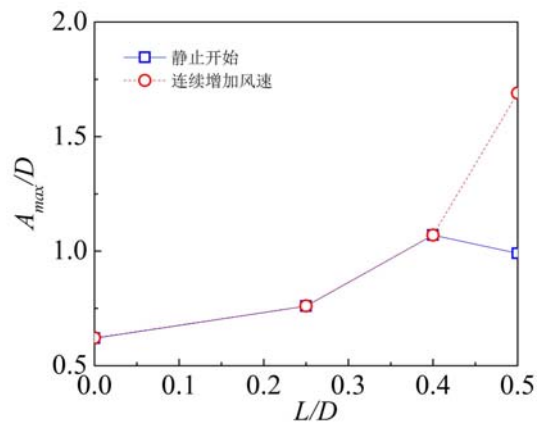


图 7 不同长度分离盘响应的最大幅值

Fig. 7 The peak response amplitude at different length of splitter plates

总体上,圆柱固结 0.25D 和 0.4D 分离盘后,结构的幅值响应曲线与单圆柱 VIV 类似,结构只在一段风速范围内发生振动响应,呈现经典涡激振动,但幅值大小和响应的区间有较大差别。

由图 6 可以看出当约化速度小于 7 时,单圆柱的振动幅值要大于固结刚性分离盘的振动幅值,这与图 4 的结论一致。随着约化速度的增加,固结刚性分离盘的振动响应各自达到峰值,峰值都大于单圆

Liang^[19]在研究圆柱后加有间隙的固定分离盘的振动特性时,为了探究迟滞现象,对间隙为 0.2D 的、分离盘长为 0.5D 的圆柱后加有间隙的固定刚性分离盘($L=0.5D$)分别施加两个不同的初始位移,得到的结果如图 5,左边初始位移为 0.44D,右边为 0.5D,得到的振动位移历时曲线呈现迥然不同的物理规律。由此可见初始条件对于流致振动结果影响很大,体现了明显的迟滞现象。

图 6 对比了两种测试方法得到的响应幅值随约化速度变化($U_r=2\sim 22$),显然,在分离盘长度为 0.25D 时,迟滞现象很弱,两种测试方法得到的结果基本吻合。但当分离盘长度达到 0.4D 时,迟滞现象明显,“连续增加风速”得到的响应区间更宽,当分离盘长度为 0.5D 时,“连续增加风速”方法测得的

柱。很明显,当圆柱固结刚性分离盘时,振动响应强于单圆柱,呈现分离盘越长振动响应越强的规律。值得注意的是,当分离盘长度达到 $0.5D$ 时,结构振动响应幅值在约化速度从 5 到 19 区间一直呈现线性增长,与驰振响应的幅值响应类似,但幅值在达到峰值之后又突降为零,振动响应出现骤停。为了探究这一现象是否符合驰振振动特性,后文将利用 FFT 结合频域对其进行分析。

图 7 为幅值峰值随分离盘长度的变化特征,附加分离盘会使其增大,这与 Assi 等^[22]的结果类似,本文中,“静止开始”初始条件下,在附加 $0.4D$ 的分离盘时,幅值最大可以到达 $1.07D$,且响应在 $U_r = 11.62$ 时骤停。“连续增加风速”初始条件下,最大幅值随着分离盘长度增加而增加。

此外对比响应区间,附加分离盘之后,响应区间变宽,而且,在分离盘长度达到 $0.4D$ 时,响应曲线只存在初始支。

2.2 速度频谱

图 8 为各个分离盘长度下的斯特劳哈数,当附加分离盘后,涡脱频率略有减小。图 9 为涡脱频率随约化速度的变化曲线,可以看到,附加分离盘之后,频率锁定的现象与单圆柱 VIV 时类似。这也解释了附加分离盘后,响应起始点后移的现象。综上,附加分离盘($0.25D, 0.4D, 0.5D$)后,结构的响应还是表现出典型的 VIV 响应的特征。

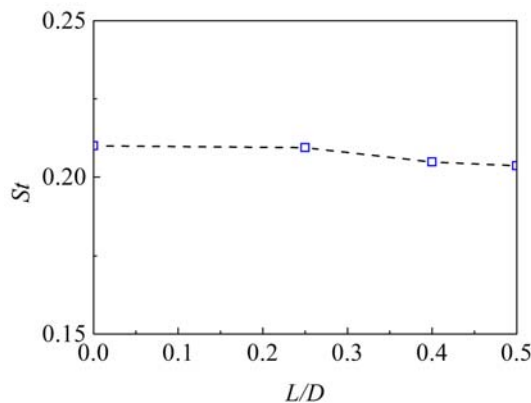


图 8 斯特劳哈数

Fig. 8 St number

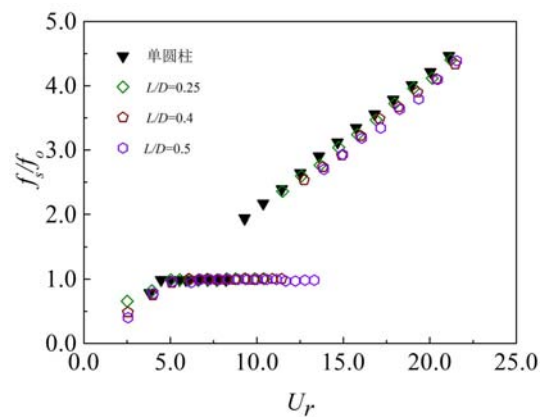


图 9 圆柱附加分离盘涡脱频率

Fig. 9 Vortex shedding frequency for the circular cylinder with splitter plates

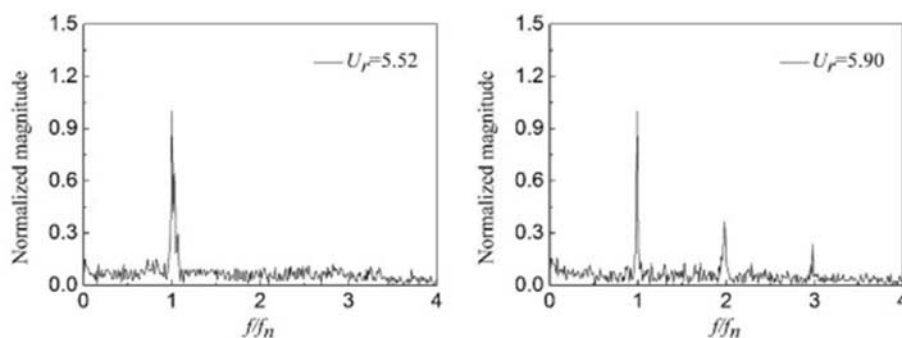


图 10 单圆柱速度频谱

Fig. 10 Frequency spectrums of velocity during the response for the bare circular cylinder

为了分析响应的机理,使用 FFT 对尾流速度进行频谱分析。对于单圆柱而言,如图 10 所示,在初始支,频率成分单一,只存在结构固有频率成分($1f$),而当 $U_r = 5.90$ 时,响应幅值达到最大,频谱中存在 $2f$ 和 $3f$ 的谐频成分。

有关圆柱涡激振动,升力或者尾流速度的频谱中存在谐频成分,以往的研究^[29-32]把其归因为不同涡脱模式,在初始支,旋涡的脱落模式为 2S 模式,而在下支,涡脱模式向 2P 模式转换,相应地,频谱中

就会出现谐频成分。

当圆柱附加附属装置,即圆柱截面变成非圆形截面时,涡脱模式更加复杂。图 11~13 为圆柱附加刚性分离盘后的速度频谱,由图可以看出出现了更多的谐频成分。

如图 11,对于分离盘长度为 $0.25D$ 的情况,当 $U_r=7.18$ 时,频谱中开始出现 $2f$ 成分,继续增大风速,在下一个测点 $U_r=7.73$ 幅值达到最大,而且,频谱中, $2f$ 成分占主导地位,随着风速的增大, $3f$ 谐频成分开始显现, $1f$ 仍然占主导地位。

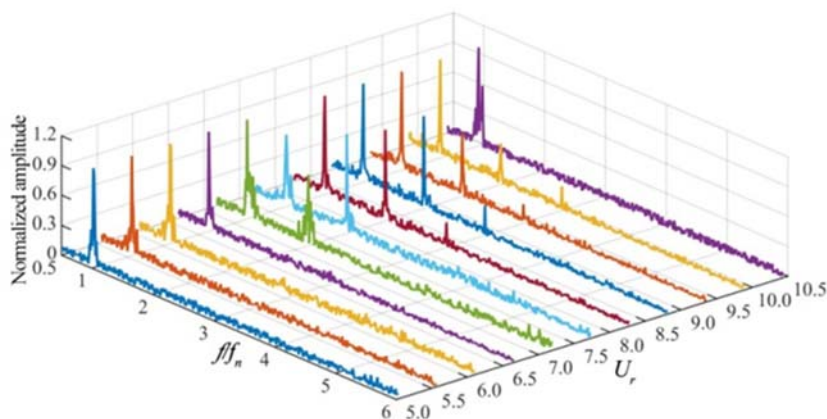


图 11 圆柱附加分离盘($L/D=0.25$)速度频谱

Fig. 11 Frequency spectrums of velocity during the response for the circular cylinder with the splitter plate($L/D=0.25$)

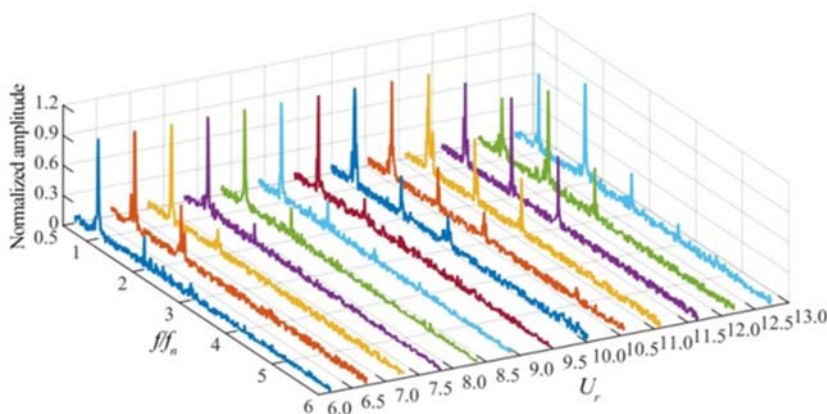


图 12 圆柱附加分离盘($L/D=0.4$)速度频谱

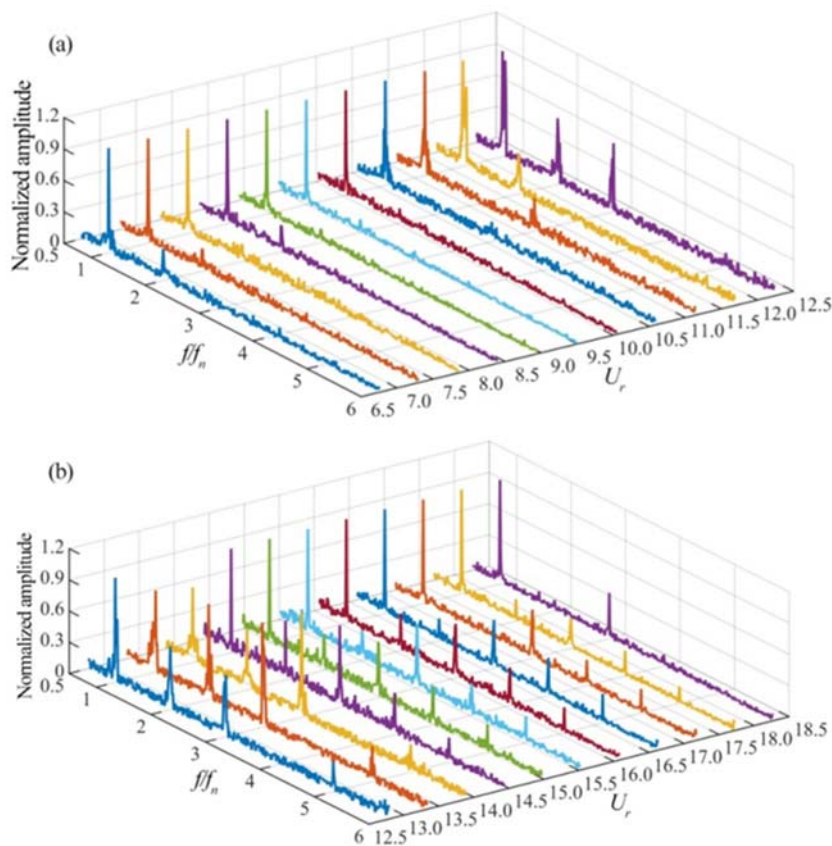
Fig. 12 Frequency spectrums of velocity during the response for the circular cylinder with the splitter plate($L/D=0.4$)

当分离盘长度为 $0.4D$ 时,如图 12, $2f$ 谐频成分在响应开始时就存在,随着风速的增大,在 $U_r=9.98$ 时, $3f$ 成分开始显现, $2f$ 和 $3f$ 成分的幅值增大,在 $U_r=11.62$,即响应幅值最大处, $2f$ 开始占主导地位。

如图 13,分离盘长度为 $0.5D$ 时,响应的初始阶段,即约化速度较小时,谐频成分很弱,随着风速的增大,谐频成分开始显现,在 $U_r=12.23$ 时,频谱中存在明显的 $2f$ 和 $3f$ 成分,继续增大风速,更多的成分开始出现,在 $U_r=14.42$ 时,除了固有频率成分,还存在 $2f$ 、 $3f$ 、 $4f$ 、 $5f$ 。

综上,圆柱附加分离盘后,频谱中谐频成分出现得更多且更加频繁,甚至可能出现谐频成分占主导的情况。根据前人^[33]有关非圆形截面振动响应的研究可以发现,非圆形截面柱体振动时,尾涡的脱落模式更加复杂,从而可能导致更多的谐频成分产生。

有关圆柱附加短的分离盘(小于 $0.5D$)的响应机理,Assi 等^[20]和 Stappenbelt^[34]在水中的实验都将其归为驰振。但是,需要注意的是,此时振动的响应并没有像经典驰振那样,超过临界风速后一直存在,

图13 圆柱附加分离盘($L/D=0.5$)速度频谱Fig. 13 Frequency spectrums of velocity during the response for the circular cylinder with the splitter plate($L/D=0.5$)

而是像典型 VIV 一样,限定在一段流速范围内,本文中的结果也是这样。Assi 和 Bearman^[22]提出,之所以响应被归为驰振,是因为其测得的位移与升力的相位角并没有像单圆柱涡激振动时出现突然的跳跃,相位一直在 0 左右。然而,Stappenbelt^[34]的研究表明,柱体 VIV 的特征与柱体的截面形状有关,如图 14,可以看到非圆形截面的柱体在 VIV 时,相位角并不一定会突然跳跃。通过强迫振动实验发现^[35],当钝体截面较长时,相位的突然跳跃并不会发生,因此,不能根据相位跳跃的消失而把振动归为驰振,本文中得到的涡脱频率很明显地表现出 VIV 频率锁定的特征。

此外,Stappenbelt^[34]发现,当圆柱附加短分离盘($0.5D$)时,其振动响应在某个约化速度下骤停。本文中的实验也发现了骤停的现象,这种响应的骤停并不会出现在圆柱 VIV 响应中,而在非圆形截面的 VIV 响应中却可能发生,图 14 为矩形截面、三角形截面、D 型截面的 VIV 响应,可以看到同样的骤停现象。

综上,圆柱附加短分离盘的响应还是典型的 VIV 响应,而且其表现的特征与其他非圆形截面柱体 VIV 类似,而与单圆柱 VIV 的特点迥异。

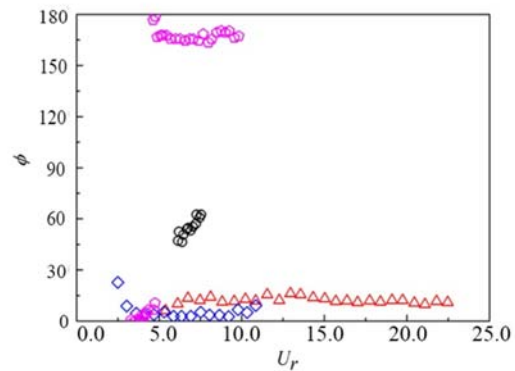


图14 振动响应位移与升力相位差

(五边形:圆柱;圆形:D形截面;钻石形:圆柱附加分离盘;三角形:三角形截面)

Fig. 14 The phase lag between displacement and lift
(pentagon: circular cylinder; circle: D-section cylinder;
diamond: circular cylinder with splitter plates;
triangular: triangular cylinder)

3 结 论

(1) 本文利用风洞实验,研究了圆柱固结短分离盘的位移响应,以及涡脱频率及相应的频谱特征;

(2) 当分离盘长度为 $0.25D$ 时,结构响应与圆柱 VIV 类似。当分离盘长度为 $0.4D$ 、 $0.5D$ 时,结构响应存在明显的迟滞现象,同时,响应会在达到最大振动幅值后突然消失。在连续增加风速初始条件下,振动随分离盘长度增长而增强。固结分离盘后结构的 VIV 响应更加剧烈,响应范围更广,说明附加固结的短分离盘 VIV 抑制无效。

(3) 圆柱固结分离盘后,其尾流速度的频谱中存在更多的谐频成分,这可能与涡脱模式有关。

(4) 圆柱固结短分离盘的 VIV 响应与非圆形截面 VIV 类似,响应会出现骤停,位移与升力的相位差突然跳跃消失。

参考文献:

- [1] Blevins R D. Flow-induced vibration(2nd ed)[M]. New York: Van Nostrand, 1990.
- [2] Lee K Q, Abu A, Muhamad P, et al. Prediction of vortex-induced vibration of bare cylinder and cylinder fitted with helical strakes[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 95:04001.
- [3] Zdravkovich M. Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1981, 7(2):145—189.
- [4] Zdravkovich M M. Flow around circular cylinders; vol. i fundamentals[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 350(1):377—378.
- [5] Assi G R S, Bearman P W. Vortex-induced vibration of a wavy elliptic cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 80:1—21.
- [6] Huera-Huarte F. Suppression of vortex-induced vibration in low mass-damping circular cylinders using wire meshes[J]. Marine Structures, 2017, 55:200—213.
- [7] Law Y Z, Jaiman R K. Wake stabilization mechanism of low-drag suppression devices for vortex-induced vibration[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 70:428—449.
- [8] 刘卓, 刘昉, 燕翔, 等. 高阻尼比低质量比圆柱涡激振动试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(6):737—743 (LIU Zhuo, LIU Fang, YAN Xiang, et al. Experimental study of study of cylinder vortex induced vibration under high damping ratio and low mass ratio conditions[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(6):737—743 (in Chinese))
- [9] Bernitsas M M, Ben-Simon Y, Raghavan K, et al. The VIVACE converter: model tests at high damping and Reynolds number around 10^5 [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2009, 130(1):1—12.
- [10] 王嘉松. 附加分离盘控制隔水管涡激振动的高分辨率数值模拟研究[C]. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会论文集, 2009 (WANG Jiasong. High-resolution numerical simulation of vortex-induced vibration of the riser with attached splitter plate[C]. Proceedings of the Ninth National Conference on Hydrodynamics and the 22nd National Hydrodynamics Symposium, 2009 (in Chinese))
- [11] 钟庆, 王嘉松, 谷斐, 等. 附加分离盘控制隔水管涡激振动的研究[J]. 煤炭技术, 2010, 29(9):177—179 (ZHONG Qing, WANG Jiasong, GU Fei, et al. Study on the control of vortex-induced vibration of riser by additional separation disc[J]. Journal of Coal Technology, 2010, 29(9):177—179 (in Chinese))
- [12] Unal M F, Rockwell D. On vortex formation from a cylinder. Part 2. Control by splitter-plate interference[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 190:513—529.
- [13] Texier A, Bustamante A S C, David L. Contribution of a short separating plate on the control of the swirling process downstream a half-cylinder[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2002, 26(5):565—572.
- [14] Akilli H, Sahin B, Tumen N F. Suppression of vortex shedding of circular cylinder in shallow water by a splitter plate[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(4):211—219.
- [15] 谷斐, 王嘉松, 钟庆, 等. 利用分离盘抑制隔水管涡激振动的风洞实验研究[C]. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会论文集, 2009 (GU Fei, WANG Jiasong, ZHONG Qing, et al. Wind tunnel experimental study on suppression of vortex-induced vibration of riser by using separation disc[C]. The Ninth

- National Conference on Hydrodynamics and the 22nd National Hydrodynamics Symposium Proceedings, 2009 (in Chinese))
- [16] Apelt C J, West G S. The effects of wake splitter plates on bluff-body flow in the range $10^4 < Re < 5 \times 10^4$. Part 2[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 71(1):145.
- [17] Apelt C J, West G S, Szewczyk A A. The effects of wake splitter plates on the flow past a circular cylinder in the range $10^4 < Re < 5 \times 10^4$ [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1973, 61(1):187.
- [18] Shengping L, Jiasong W, Zhongming H. VIV and galloping response of a circular cylinder with rigid detached splitter plates[J]. Ocean Engineering, 2018, 162:176—186.
- [19] Liang S, Wang J, Xu B, et al. Vortex-induced vibration and structure instability for a circular cylinder with flexible splitter plates[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 174:200—209.
- [20] Assi G R S, Bearman P W, Kitney N. Low drag solutions for suppressing vortex-induced vibration of circular cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2009, 25(4):666—675.
- [21] Kawai H. A discrete vortex analysis of flow around a vibrating cylinder with a splitter plate[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 35:259—273.
- [22] Assi G R S, Bearman P W. Transverse galloping of circular cylinders fitted with solid and slotted splitter plates[J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 54:263—280.
- [23] Corless R M, Parkinson G V. A model of the combined effects of vortex-induced oscillation and galloping[J]. Journal of Fluids and Structures, 1988, 2(3):203—220.
- [24] 睢娟, 王嘉松, 田启龙, 等. 绒毛控制圆柱涡激振动的风洞试验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(3):393—398 (SUI Juan, WANG Jiasong, TIAN Qilong, et al. On the wind tunnel experiment of cylinder vortex induced vibration by fluff controlling[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3):393—398 (in Chinese))
- [25] Govardhan R, Williamson C H K. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 420:85—130.
- [26] Zhou T, Razali S F M, Hao Z, et al. On the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27(7):903—917.
- [27] Lee K Q, Abu A, Muhamad P, et al. Prediction of vortex-induced vibration of bare cylinder and cylinder fitted with helical strakes[C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017, 95:04001.
- [28] Feng C C. The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders[D]. University of British Columbia, 1968.
- [29] Belloli M, Giappino S, Muggiasca S, et al. Force and wake analysis on a single circular cylinder subjected to vortex induced vibrations at high mass ratio and high Reynolds number[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012, 103:96—106.
- [30] Morse T L, Williamson C H K. Fluid forcing, wake modes, and transitions for a cylinder undergoing controlled oscillations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2009, 25(4):697—712.
- [31] Lucor D, Foo J, Karniadakis G E. Vortex mode selection of a rigid cylinder subject to VIV at low mass-damping[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(4):483—503.
- [32] Simon Gsell, Rémi Bourguet, Marianna Braza. Two-degree-of-freedom vortex-induced vibrations of a circular cylinder at $Re=3900$ [J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 67:156—172.
- [33] Seyed-Aghazadeh B, Carlson D W, Modarres-Sadeghi Y. Vortex-induced vibration and galloping of prisms with triangular cross-sections[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 817:590—618.
- [34] Stappenbelt B. Splitter-plate wake stabilisation and low aspect ratio cylinder flow-induced vibration mitigation[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2010, 20(3):1—6.
- [35] Ongoren A, Rockwell D. Flow structure from an oscillating cylinder Part 1. Mechanisms of phase shift and recovery in the near wake[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 191:197—223.

Wind tunnel experiments of the vibration response for the circular cylinder fixed connection with rigid splitter plates

CHEN Wen-yu, LIANG Sheng-ping, WANG Jia-song

(MOE Key Laboratory of Hydrodynamics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Splitter plates, serving as one of the most commonly used devices for flow control, can tremendously suppress the vortex shedding of fixed cylinder. However, whether splitter plates have the similar vibration suppressive effect on free oscillating cylinder needs further research and the control mechanisms are still unclear. In the present study, the vibration response for the cylinder fixed with short splitter plates is studied using the non-contact laser displacement sensor through wind tunnel experiment under two different initial conditions of “from rest” and “by increasing wind velocity continuously”, respectively. The results indicate that when the splitter plates are attached, the vibration response is limited in a range of wind velocities, similar to the typical VIV (Vortex-induced vibration) of bare cylinders, but the amplitude is much higher than that of typical VIV for the single cylinder. For the case of $L/D=0.25$ with L the length of splitter plates and the diameter of cylinders, the vibration response has two branches. For the cases of $L/D=0.4$ and 0.5 , the vibration response would abruptly halt after reaching the peak, with the presence of the hysteretic loop. As the wind velocity increases continuously, the vibration can be enhanced. Similar to the typical VIV, the frequency locking phenomenon can be found, which shows different performance with the classical galloping. Besides, multiple harmonics can be found in the frequency spectrums of the wake velocity by the FFT analysis, and their appearance may be related to the vortex shedding modes.

Keywords: splitter plates; Vortex-induced vibration(VIV); wind tunnel experiments; harmonics