

C 型环对细长圆柱减阻抑振效果的试验研究

马文勇^{1,2}, 杜展¹, 靖洪森^{1,2}, 张晓斌¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043;
2. 河北省风工程和风能利用工程技术创新中心, 河北 石家庄 050043)

摘要:长细比较大的圆柱结构易发生涡激振动从而引发结构安全问题,而阻力小的气动抑振措施是解决该问题的理想手段之一。为此,开展了一种 C 型减阻抑振环风洞试验,研究了不同直径和圆心角的 C 型环对不同雷诺数下的圆柱气动力的影响,并通过圆柱表面的风压分布揭示了 C 型环的减阻抑振机理。研究表明,通过减弱背风面的负压 C 型环可以有效减小亚临界雷诺数区圆柱的阻力,而且通过对尾流的干扰可有效抑制旋涡脱落。

关键词:圆柱; 风洞试验; C 型环; 气动力; 旋涡脱落

中图分类号: U443.38 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)04-1094-07

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.04.023

引言

圆柱形细长结构广泛应用于土木工程领域,如桅杆、路灯、信号塔及各类索结构。当空气流经这类圆柱结构时,在其尾流区域形成较强负压并伴有周期性交替脱落的旋涡,使圆柱结构受到顺风向的阻力以及横风向周期性的升力,若该升力的频率与圆柱结构固有频率相近,便引发涡激振动。圆柱结构在发生大幅涡激振动时,易造成其功能失效,甚至破坏。

被动措施是抑制细长圆柱涡激振动问题最有效的手段之一,即改变结构表面形态或附加额外装置,特别是合理的附加装置可以有效降低旋涡脱落强度,从而抑制涡振。Zdravkovich^[1]将被动控制措施分为三类:(1)表面突起,影响分离线或分离剪切层,如螺旋线、线条、翼片和半球面等;(2)裹覆,影响卷吸层,如穿孔、丝网、控制杆和轴向板条等;(3)近尾流控制器,阻止卷吸层的相互作用,如飘带、整流罩、分离盘、导向翼和狭缝等。其中,整流罩、螺旋线和分离盘抑振效果良好且在实际工程中有较广泛的应用。

分离盘是较早被研究并进行工程应用的涡激振动抑制装置之一。Roshko^[2]提出使用分离盘阻止圆柱上下表面剪切层的相互作用并抑制旋涡脱落。Assi 等^[3-6]对分离盘进行了研究,发现固定安装在圆柱上的分离盘能够有效抑制圆柱的涡激振动并减小气动阻力,但在某些情况下会引起结构的驰振^[4]。可旋转分离盘或安装多个平行放置的分离盘能够避

免驰振的发生,研究发现影响分离盘抑振性能的参数主要有分离盘长度、分离盘与圆柱之间的距离、分离盘与来流攻角等。

Grant 等^[7]以及 Masters 等^[8]研究表明流线型的整流罩能够抑制旋涡的脱落并减小立管振幅。Lee 等^[9]基于风洞试验,研究了整流罩尺寸对其抑振效果的影响,发现弦厚比较小的整流罩具有较好的抑振性能。盛磊祥等^[10]利用数值模拟方法,研究了整流罩尾角与来流方向对其抑振效果的影响,发现尾角大的整流罩比尾角小的抑振效果更好,并发现来流方向对其抑振性能有较大影响。谷斐等^[11]采用风洞试验方法,研究了旋转整流罩对圆柱结构表面压力分布及气动力特性的影响。

分离盘与整流罩能够在一定条件下抑制圆柱结构的涡激振动,但是这两种抑振措施在使用时对覆盖率有较高要求,需要保证分离盘和整流罩沿圆柱轴向足够长。除了分离盘和整流罩,比较常用的还有螺旋线、开孔套管、轴向肋条、飘带、扰流板等抑振措施。这些抑振措施均能在一定条件下抑制细长圆柱结构的涡激振动,但也不可避免地带来一些问题,如增大结构的阻力,引起驰振,抑振装置结构复杂,对覆盖率要求较高等,因此其工程应用具有一定的局限性。

Ma 等^[12]根据风洞试验研究发现,对于有限长圆柱,自由端能够减小圆柱阻力并干扰尾流沿轴向的相关性,进而抑制旋涡的周期性脱落强度。而圆柱长细比至少为 30~40 时,才能使圆柱中间较短范围内的流场不受端部效应的影响。受此启发:通过一

收稿日期: 2021-12-12; 修订日期: 2022-03-30

基金项目: 河北省杰出青年科学基金资助项目(E2021210053); 河北省青年科学基金资助项目(E2021210063)。

些措施改变圆柱尾流的流动状态,减弱其背风侧负压并对尾流进行干扰,同时将这种干扰效应沿圆柱轴向扩展到足够远处,这样既抑制了尾流旋涡的周期性脱落强度,又可减小圆柱阻力系数。根据上述思路, Ma等^[13]提出了一种减阻抑振措施:在圆柱背风侧跨中位置安装一个开口圆拱形C型环装置,使尾流区形成由中间C型环向两端流动的射流,增强圆柱尾流区的轴向流动性,从而实现对流场的干扰。Ma等^[13]通过测力测压风洞试验,研究了圆柱的气动力和表面风压分布情况,证实了C型环装置减小圆柱阻力和抑制涡激振动的有效性,并对其减阻抑振机理进行了分析,提出影响C型环减阻抑振性能的主要参数有长度 d 、半径 R 、圆心角 α ,以及在多个C型环串联使用的情况下相邻两C型环的距离等。

虽然 Ma等^[13]进行了多组不同圆心角C型环的减阻抑振试验研究,并指出最佳的圆心角为 $\alpha=150^\circ$,但是其C型环的半径全为 $R=0.8D$ (D 为圆柱直径),并且目前还不清楚C型环半径 R 对其减阻抑振性能的影响。因此,本文通过刚性模型风洞试验,针对不同半径 R 和圆心角 α 的C型环减阻抑振性能进行了研究,以确定C型环的最优参数,为工程实际提供参考。

1 试验概况

试验在石家庄铁道大学STU-1风洞的高速试验段进行,试验断面宽2.2 m,高2 m,长5 m,最大风速可达80 m/s。圆柱模型直径 $D=150$ mm,长 $L=1700$ mm,采用有机玻璃制作,对应的模型长细比 λ 为11.3,试验阻塞比为7.5%,试验结果未进行阻塞比修正。为减少风洞试验的端部效应,模型两端各安装一个大约250 mm长的补偿模型和直径为 $4D$ 的圆形端板。同时为了避免端板对气动力测量的干扰,在端板和模型之间设置了一个很小的间隙(小于1 mm)。

在模型表面S1~S7每个截面上均匀布置36个测压孔,相邻截面的距离为 D 且S4截面在跨中位置。同时在背风侧中间沿圆柱轴向均匀布置106个测压孔,测量背风侧风压分布,模型安装及测点分布如图1所示。高频天平放在补偿模型内部,用于测量圆柱受到的气动力。为了研究不同型号减阻抑振C型环的作用,本文测试的15种不同型号环体如表1所示。C型环的宽度 d 均为150 mm,圆柱和C型环通过直径为3 mm的螺栓连接,且C型环内表面与圆柱外表面平行,即C型环与圆柱之间间隙各处相等。

风洞试验中采用ESP-64HD型号压力扫描阀传感器专用设备,测量精度为满量程的0.15%(满量程为10英寸水柱的压力,约为2540 Pa),以及型号为

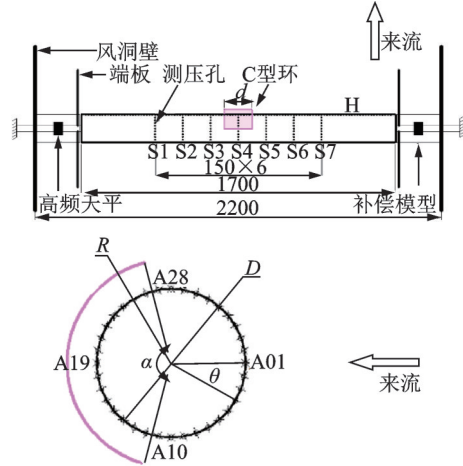


图1 试验模型安装及测点布置图(单位:mm)

Fig. 1 Installation of test model and layout of test points (Unit: mm)

表1 本研究所测试的不同C型环型号

Tab. 1 Different C-ring models tested in the study

型号	α	R
D180A60		0.6D
D210A60	60°	0.7D
D240A60		0.8D
D180A90		0.6D
D210A90	90°	0.7D
D240A90		0.8D
D180A120		0.6D
D210A120	120°	0.7D
D240A120		0.8D
D180A150		0.6D
D210A150	150°	0.7D
D240A150		0.8D
D180A180		0.6D
D210A180	180°	0.7D
D240A180		0.8D

ATI Delta的高频天平,精度为满量程0.125%(满量程为165 N)。采样频率分别为330 Hz和1500 Hz,采样时间均为60 s。

2 试验结果

2.1 减阻分析

图2为不同雷诺数下光滑圆柱的平均阻力系数 $C_{D,mean}$ 、平均升力系数 $C_{L,mean}$ 以及安装不同型号C型环后圆柱的阻力系数。实线为光滑圆柱的平均升、阻力系数曲线,通过与文献[12,14-15]的结果对比发现,阻力系数曲线变化趋势基本相同,随着雷诺数的增大阻力系数曲线经历了两次剧烈的下降,称为阻力危机,分别发生于单分离泡区和双分离泡区。

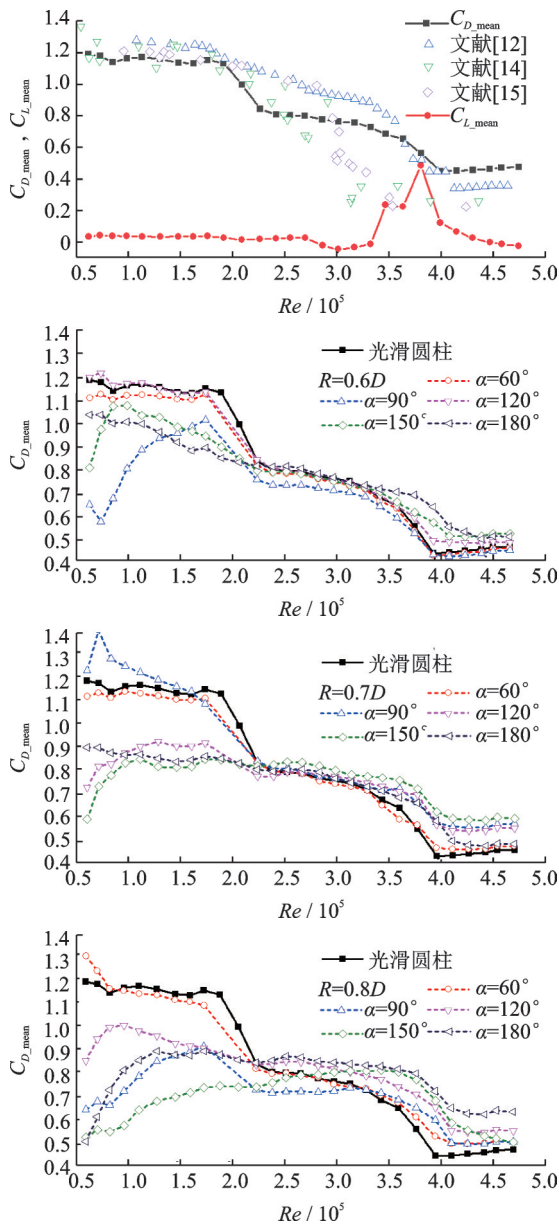


图2 光滑圆柱及安装C型环圆柱平均气动力系数随雷诺数的变化

Fig. 2 Variations of the mean aerodynamic force coefficient with Reynolds number for smooth cylinder and install C-ring cylinders

在亚临界雷诺数区($Re \approx 0.5 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^5$), 不同学者得到的圆柱阻力系数吻合较好, 而在临界雷诺数区($Re > 1.9 \times 10^5$)则存在较大差异, 这可能是由于流动状态的敏感性导致的。在亚临界雷诺数区圆柱的阻力系数约为 1.2, 由于流场的对称性, 这时升力系数基本为零。随着雷诺数的增大, 当 $Re \approx 1.9 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^5$ 时, 在圆柱上下表面的某一侧逐渐形成分离气泡, 流动状态进入单分离泡区, 阻力系数第一次急剧下降, 这时可能出现非零的升力系数。当 $Re \approx 3.2 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^5$ 时, 在圆柱上下表面同时形成分离气泡, 流动状态由单分离泡区进入双分离泡区, 阻力系数再一次急剧下降, 升力系数剧烈上升。当 $Re \approx 4.0 \times 10^5$ 时, 阻力系数达到最小值约

0.5, 随后缓慢上升。

从图2得出, C型环对圆柱结构的阻力系数有显著的影响。在亚临界雷诺数区大多数型号的C型环均不同程度地降低了圆柱结构的阻力系数, 而在临界雷诺数区却取得了相反的效果, 使阻力系数增大。值得注意的是, 在单分离泡区, 随着雷诺数的增大光滑圆柱的阻力系数经历了剧烈的下降, 即发生了第一次阻力危机, 而C型环却能够使这一过程变得平缓, 甚至没有明显的阻力下降。

除雷诺数外, C型环自身的半径 R 和圆心角 α 也均对其减阻性能有巨大的影响。从图2中可以看出, 对于 $R=0.6D, 0.7D$ 和 $0.8D$ 三种不同的C型环, 半径 R 越大, 在亚临界雷诺数区的减阻性能基本上越好。当 $R=0.6D$ 时, $\alpha=60^\circ$ 和 120° 均对阻力系数难以产生较大的影响, 效果较好的是当 $\alpha=90^\circ$ 时, 阻力系数在 $Re \approx 0.7 \times 10^5$ 处由光滑圆柱的约 1.2 减小到约 0.6, 减阻效率约达到 50%, 而 $\alpha=150^\circ$ 和 180° 时表现一般。当 $R=0.7D$ 时效果较为理想, 但同样存在两个角度, 即 $\alpha=60^\circ$ 和 90° 时 C型环没有减阻效果, 甚至在 $\alpha=90^\circ$ 时阻力系数在亚临界雷诺数区有了明显的增大; $\alpha=120^\circ, 150^\circ$ 和 180° 时效果相仿, 均在亚临界雷诺数区使阻力系数由光滑圆柱的约 1.2 减小至约 0.8~0.9, 减阻效率约为 30%; 效果最为理想的情况出现在 $\alpha=150^\circ$ 时使阻力系数在 $Re \approx 0.5 \times 10^5$ 处由光滑圆柱的 1.2 减小为约 0.6, 减阻效率约达到 50%。在所有型号的C型环中, $R=0.8D$ 表现最好, 除了当 $\alpha=60^\circ$ 时对阻力系数的影响很小外, 其他角度下C型环均在亚临界雷诺数区显著减小了圆柱的阻力系数, 在 $\alpha=150^\circ$ 时减阻效果依旧最好, 使得阻力系数在 $Re \approx 0.5 \times 10^5 \sim 2.7 \times 10^5$ 时均低于同雷诺数下光滑圆柱的值, 尤其在 $Re \approx 0.5 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^5$ 时阻力系数下降到 0.5~0.6, 减阻效率超过 50%, 减阻效果明显。

为了研究C型环减阻机理, 在圆柱模型表面 $S1 \sim S7$ 的每个截面均匀布置了 36 个测压孔, 并在背风侧沿轴向均匀布置了一排共 106 个测压孔 H , 如图1所示。

图3为亚临界雷诺数区($Re \approx 1.7 \times 10^5$)光滑圆柱及安装不同C型环时, 圆柱背风侧平均风压系数 $C_{p,mean}$ 的分布情况。图中下横坐标为测压孔距中心截面距离 x 与圆柱模型直径 D 的比值, 即 x/D ; 上横坐标为测压孔距中心截面距离 x 与圆柱模型长度 L 的比值, 即 x/L ; 两虚线中间范围为C型环安装位置 ($-0.05 < x/L < 0.05$)。图3所示黑色实线为光滑圆柱在 $Re \approx 1.7 \times 10^5$ 时背风侧轴向风压系数分布曲线, 由于模型两侧安装了端板, 两端板之间各截面处的流场具有较高的相似性, 各位置的风压系数均相同, 约为 -1.3。从图3中可以看出, C型环对圆柱背

风侧风压系数分布有较大的影响,大多数型号的 C 型环都使整个圆柱长度范围内的背风侧风压系数增大,从而使圆柱前后表面压差减小,进而减小阻力。综合来看,对于任意半径的 C 型环,圆心角 α 越大,风压系数升高越明显,当 $\alpha=60^\circ$ 和 90° 时,风压系数没有明显的变化;而当 $\alpha=150^\circ$ 和 180° 时,整个长度范围内风压系数均有不同程度的增大。当 $R=0.7D$ 时, $\alpha=180^\circ$ 为最优圆心角,当 $R=0.8D$ 时,最优圆心角是 $\alpha=150^\circ$,这与图 2 所示整体阻力系数结果吻合。值得注意的是, C 型环对圆柱背风侧风压系数的影响在长度方向上并不均匀:呈现中间大,向两端先逐渐减小后增大的趋势,并在 C 型环覆盖范围内出现极大值。这与 C 型环特殊的形状有关,如图 1 所示, C 型环开口正对来流方向并与圆柱模型同轴且利用螺栓连接。当来流流经圆柱前表面并绕其向

后运动时,由于 C 型环的阻挡及引导作用,气流到达圆柱上下表面后会沿 C 型环与圆柱表面之间的缝隙向下流动并汇聚于圆柱后表面,并在此汇聚而形成较大的压强,甚至产生正压(如图 3 所示)。在压力梯度的作用下,会产生由 C 型环向两端流动的射流,进而扰乱圆柱原有的尾流状态。射流流速在 C 型环边缘(图 3 虚线位置)处最大,随着向两端距离的增加,流速逐渐降低,这表明安装 C 型环后背风侧风压系数在中间截面处有极大值,在 C 型环边缘处减小,而随着距离的增大,风压系数又逐渐上升随后趋于平稳。由于圆柱模型长度有限(长细比约为 11.3),未获得 C 型环对圆柱尾流的极限影响距离,但根据试验数据的变化趋势,随着圆柱长度的继续增大, C 型环对圆柱背风侧风压系数的影响将逐渐减小直至消失,该影响距离预计不超过 $20D$ 。

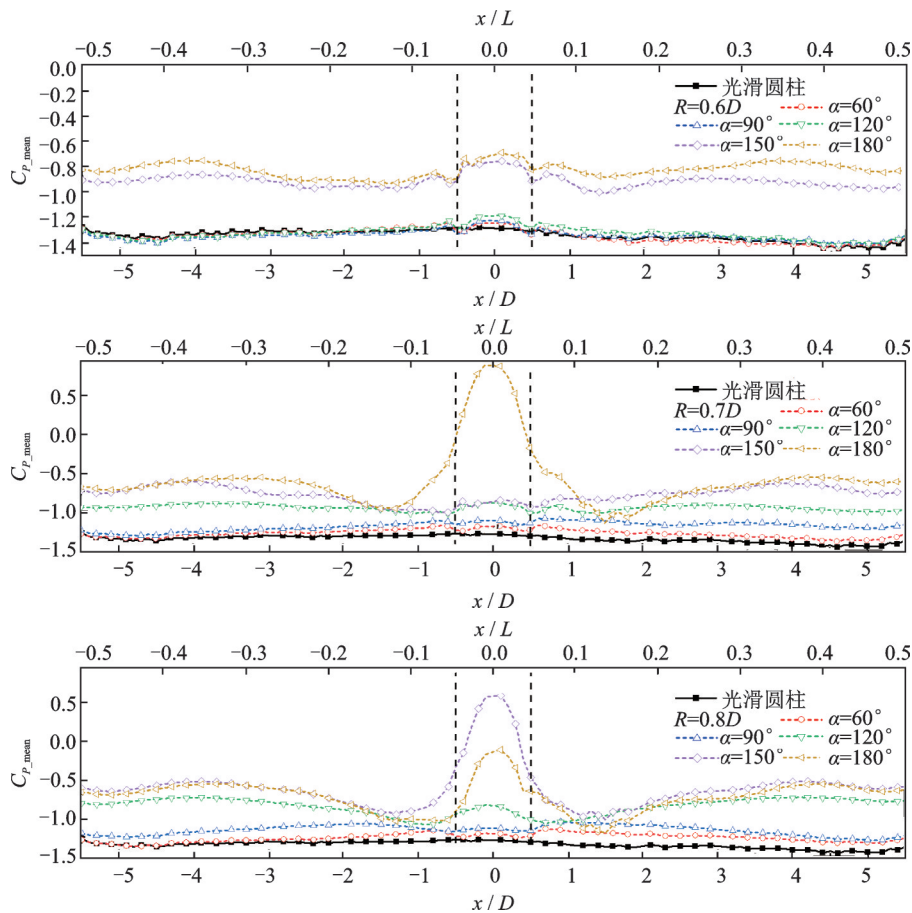
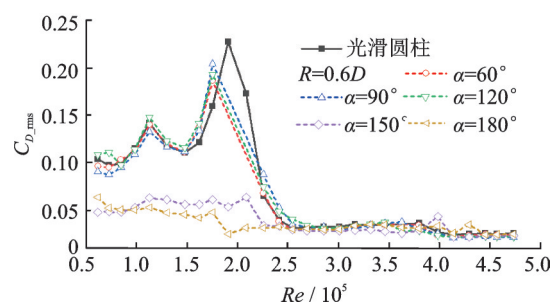


图 3 $Re \approx 1.7 \times 10^5$ 时沿圆柱长度方向背风侧风压系数分布

Fig. 3 Coefficient distribution of leeward wind pressure along the length direction of the cylinder at $Re \approx 1.7 \times 10^5$

2.2 抑振分析

由于旋涡的周期性脱落,圆柱会受到周期性的涡激力,当旋涡脱落的频率与结构自振频率接近时会引发结构的涡激振动。光滑圆柱及安装不同 C 型环圆柱的阻力系数均方根 $C_{D,rms}$ 和升力系数均方根 $C_{L,rms}$ 分别如图 4 和 5 所示,其中黑色实线为光滑圆柱的脉动升、阻力系数。从图中可以得出,在亚临界雷



雷诺数区光滑圆柱的脉动升、阻力系数均比临界雷诺数区大,尤其在 $Re \approx 1.9 \times 10^5$ 时,光滑圆柱脉动阻力系数和脉动升力系数最大值分别约为 0.23 和 1.5。此时亚临界雷诺数区向单分离泡区状态转变,而在

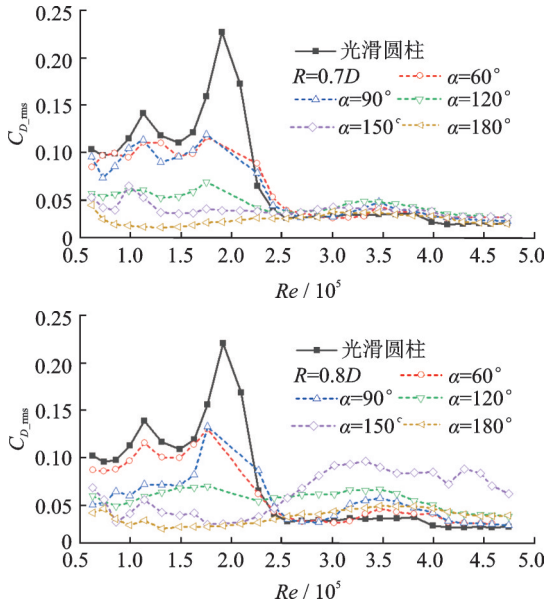


图 4 脉动阻力系数随雷诺数的变化

Fig. 4 Variations of the pulsation resistance coefficient with Reynolds number

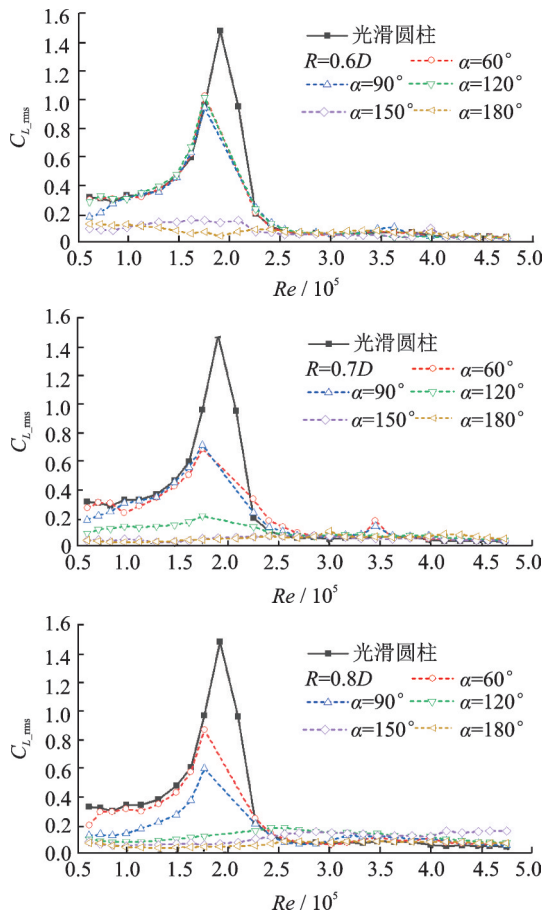


图 5 脉动升力系数随雷诺数的变化

Fig. 5 Variations of the pulsation lift coefficient with Reynolds number

临界雷诺数区,脉动升、阻力系数较小,均小于 0.1。

多数型号的 C 型环均能不同程度地减小亚临界雷诺数区的脉动升、阻力系数。圆心角较小的 C 型环对脉动升、阻力系数的影响较小,而当 $\alpha = 150^\circ$ 和 180° 时,圆柱的脉动阻力系数和脉动升力系数均显著减小,脉动阻力系数减小到约 0.05,脉动升力系数减小到约 0.1,且随着雷诺数的增大其值基本不变。这表明在亚临界雷诺数区 C 型环可以抑制旋涡的周期性脱落。

功率谱密度表征了不同频率成分所占能量的大小,通过分析升力系数功率谱密度,进一步研究不同 C 型环圆柱的旋涡脱落。图 6 为亚临界雷诺数区 ($Re \approx 1.7 \times 10^5$) 光滑圆柱及安装不同 C 型环圆柱的升力系数功率谱密度,横坐标为无量纲频率 fD/U ,其中 f 为旋涡脱落频率, D 为圆柱直径, U 为来流风速;纵坐标为功率谱密度 PSD。结果表明光滑圆柱的功率谱密度有一个明显的主频,对应的无量纲频率约为 0.19,即圆柱的斯特劳哈尔数 St 。对于所有的 C 型环,当 $\alpha = 60^\circ$ 和 90° 时,圆柱的升力系数功率谱与光滑圆柱相似;当 $\alpha = 150^\circ$ 和 180° 时,其功率谱峰值有 2~3 个数量级的减小,甚至不再具有明显的主频,表明当 $\alpha = 150^\circ$ 和 180° 时, C 型环能够有效抑制旋涡脱落的发生,进而可能抑制圆柱的涡激振动。

图 7 为亚临界雷诺数区 ($Re \approx 1.7 \times 10^5$) 时,光滑

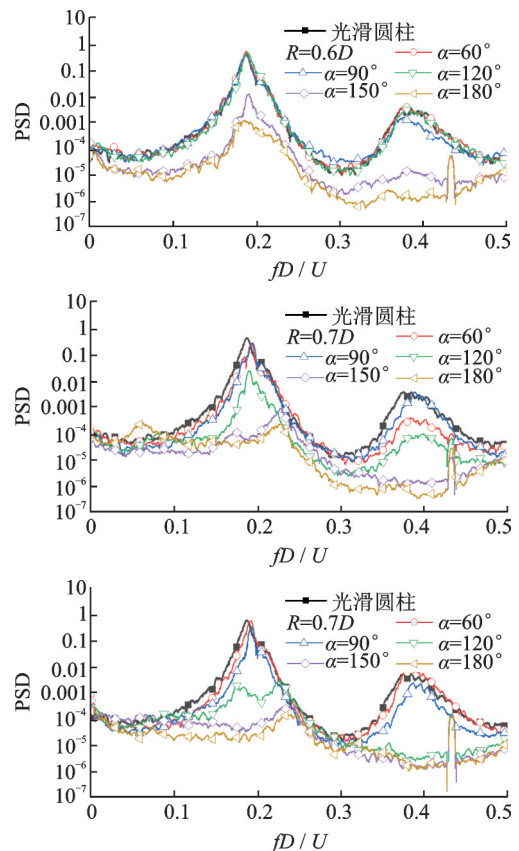
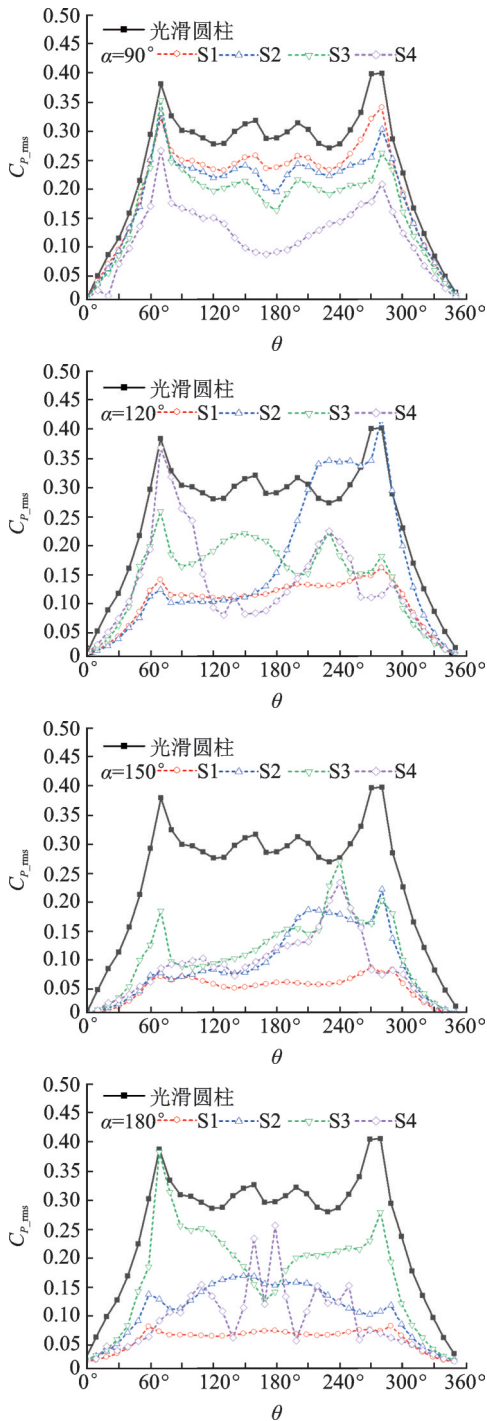


图 6 $Re \approx 1.7 \times 10^5$ 时升力系数功率谱密度

Fig. 6 The power spectra density of lift coefficient at $Re \approx 1.7 \times 10^5$

图7 $Re \approx 1.7 \times 10^5$ 时圆柱截面脉动风压系数Fig. 7 Pulsation wind pressure coefficient for cylinder cross sections at $Re \approx 1.7 \times 10^5$

圆柱及安装 $R=0.7D$ 的圆柱 S1~S4 四个截面处的脉动风压系数 $C_{p,rms}$ 的分布情况。图中横坐标 θ 为测点位置与来流方向夹角,其中 0° 为正对来流方向,黑色实线为光滑圆柱 S2 截面的脉动风压系数分布。从图 7 中可以看出,对于光滑圆柱,正对来流的前表面脉动风压系数较小,而随着夹角 θ 的增大,其脉动风压系数也越大,在约 $\pm 80^\circ$ 位置时达到最大值约 0.4,同时圆柱后表面脉动风压系数约为 0.28~0.40。C 型环能够显著降低圆柱各截面处尤其是背风侧的脉动风压系数,当 $\alpha=90^\circ$ 时, S4 截面处后表面脉动风压系数下降明

显,而其他位置变化很小。对于使用较大圆心角的 C 型环情况,距离中心较远的 S1 截面处脉动风压系数减小更明显,如 S3 截面距离 C 型环边缘较近,脉动风压系数较大。因此当 $\alpha=150^\circ$ 和 180° 时, C 型环能够对圆柱表面风压系数的脉动产生抑制作用,且在一定范围内,距中心相对较远的位置抑制效果更为明显。脉动风压系数的降低表明 C 型环能够抑制尾流旋涡的脱落强度,进而可能抑制圆柱涡激振动。

3 结论

本文通过刚性模型风洞试验,研究了不同半径和圆心角的 C 型环在不同雷诺数下对圆柱气动力的影响,并通过圆柱表面的风压分布揭示了 C 型环的减阻抑振机理。主要结论如下:

(1) 在亚临界雷诺数区, C 型环能降低圆柱的阻力系数,但是在临界雷诺数区会增大阻力系数,因此,在实际应用时,应当考虑工程结构的工作环境,避免安装 C 型环后产生负面效果。

(2) C 型环半径 R 和圆心角 α 是影响其减阻抑振性能的重要参数。在本研究测试范围内,即 $R=0.6D, 0.7D$ 和 $0.8D$, 半径 R 较大时, C 型环减阻抑振效果相对较好;对于具有相同半径 R 的 C 型环,圆心角 α 较大时,减阻抑振效果较好。在所有型号的 C 型环中,当 $\alpha=60^\circ$ 时均没有明显的减阻抑振效果,因此在实际中不推荐 $\alpha=60^\circ$ 和 90° 的 C 型环。减阻抑振效果较好的是 $\alpha=150^\circ$ 和 180° 两种型号,尤其是当 $R=0.8D, \alpha=150^\circ$ 时,在雷诺数 $0.5 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^5$ 范围内, C 型环使光滑圆柱的阻力系数从约 1.2 减小到不超过 0.6,减阻约达到 50%。

(3) C 型环通过对圆柱尾流的干扰,使圆柱背风侧风压增大甚至变为正压,减小圆柱前后表面压力差进而减小阻力,同时产生的射流干扰尾流旋涡的脱落,从而可能对圆柱的涡激振动具有抑制效果。C 型环对尾流的干扰范围覆盖圆柱全长,其影响表现出极强的扩展性,影响范围不小于 $11D$ (D 为圆柱直径)。

参考文献:

- [1] Zdravkovich M 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.
- [2] Roshko A. On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies: NACA-TN-3169 [R]. Washington D.C.: NACA, 1954: 1-29.
- [3] Assi G R S, Bearman P W. VIV suppression and drag

- reduction with pivoted control plates on a circular cylinder[A]. ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering [C]. Estoril, Portugal: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 871-874.
- [4] Assi G R S, Bearman P W, Kitney N. Low drag solutions for suppressing vortex-induced vibration of circular cylinders[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2009, 25(4): 666-675.
- [5] Assi G R S, Bearman P W, Kitney N, et al. Suppression of wake-induced vibration of tandem cylinders with free-to-rotate control plates[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2010, 26(7-8): 1045-1057.
- [6] Assi G R S, Bearman P W, Tognarelli M A. On the stability of a free-to-rotate short-tail fairing and a splitter plate as suppressors of vortex-induced vibration [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 92: 234-244.
- [7] Grant R, Patterson D. Riser fairing for reduced drag and vortex suppression [C]. *Proceeding of the Annual Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: 1977: 343-352.
- [8] Masters R H, Griffith B L. Apparatus and method for securing a fairing to a marine element; EP10836623[P]. 2016.
- [9] Lee L, Allen D W, Henning D L, et al. Damping characteristics of fairings for suppressing vortex-induced vibrations [A]. ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering [C]. Vancouver, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2004: 433-438.
- [10] 盛磊祥, 陈国明, 许亮斌. 减振器绕流流场的 CFD 分析[J]. *中国造船*, 2007, 48(增刊): 475-480.
- Sheng Leixiang, Chen Guoming, Xu Liangbin. CFD analysis on the flow field of fairings[J]. *Shipbuilding of China*, 2007, 48(Sup): 475-480.
- [11] 谷斐, 王嘉松, 赵卓茂, 等. 圆柱附加旋转整流罩表面压力分布及气动力特性[J]. *实验力学*, 2012, 27(3): 368-376.
- Gu Fei, Wang Jiasong, Zhao Zhuomao, et al. Pressure distribution and aerodynamics of circular cylinder with freely rotating fairings[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(3): 368-376.
- [12] Ma W Y, Huang B C, Zheng D Q, et al. Effect of the presence of end plates and aspect ratio on the aerodynamic forces on circular cylinders in various flow regimes [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2019, 51(5): 055503.
- [13] Ma W Y, Du Z, Zhang X B, et al. A novel drag reduction and vortex shedding mitigation measure for a circular cylinder in the subcritical regime[J]. *Fluid Dynamics Research*, 2020, 53(1): 015504.
- [14] Vaz G, Mabilat C, Wal R, et al. Viscous flow computations on a smooth cylinders: a detailed numerical study with validation[A]. ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering [C]. Columbia: American Society of Mechanical Engineers, 2007: 849-860.
- [15] Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 133: 265-285.

Experimental study on effect of C-ring on mitigation of drag and vibration for a circular cylinder

MA Wen-yong^{1,2}, DU Zhan¹, JING Hong-miao^{1,2}, ZHANG Xiao-bin¹

(1.School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2.Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology for Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Slender cylindrical structures are often subject to vortex-induced-vibrations, which can lead to structural safety problems. The aerodynamic suppression measure with small drag is one of the ideal approaches to solve this issue. To this end, wind tunnel test of the cylinder with a new type of C-ring is carried out in this paper. Influence of the C-ring with different diameters and central angles on the aerodynamic forces of the cylinder under different Reynolds number is comprehensively investigated. Meanwhile, mechanism of the drag reduction and vibration suppression of the C-ring is analyzed and revealed according to wind pressure distribution on the cylinder surface. The results indicate that drag of the cylinder in the subcritical Reynolds number range can be effectively reduced by weakening negative pressure on the leeward, and the wake vortex shedding can be obviously restrained by interference of the wake.

Key words: circular cylinder; wind tunnel test; C-ring; aerodynamic force; vortex shedding

作者简介: 马文勇(1981—),男,博士,教授。电话:(0311)87939488; E-mail: ma@stdu.edu.cn。

通讯作者: 靖洪淼(1990—),男,博士,讲师。电话:(0311)87939488; E-mail: jhm@stdu.edu.cn。