

锁频阶段涡激振动圆柱的附加质量研究*

王 艺, 陈伟民, 林 緬

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)

摘 要

在对涡激振动圆柱的附加质量进行理论分析的基础上, 综合实验和数值模拟的结果, 根据涡激振动中结构振动频率、来流约化速度的关系, 推导出涡激振动锁频阶段的圆柱附加质量系数估算公式。通过对有关圆柱涡激振动实验结果和数值模拟结果进行分析, 并与有关圆柱涡激振动实验结果进行对比, 表明本文提出的圆柱涡激振动锁频阶段附加质量系数的估算公式与实验结果是相吻合的。另外, 本文还以单自由度弹簧质量阻尼模型为研究对象, 在对其涡激振动中的附加质量进行理论分析的基础上, 给出了上述估算公式的适用条件。最后, 做为应用算例, 考察比较了进行附加质量修正和不修正两种情况下的圆柱涡激振动响应。结果表明采用本文提出的附加质量计算公式, 能够更好地预测涡激振动影响。

关键词: 附加质量; 锁频; 质量比; 约化速度; 固有频率

1 前言

关于圆柱涡激振动问题的计算模型, 有尾流振子模型、相关模型、统计模型以及多项伽辽金求解模型等, 其中比较常用、使用比较方便的是 Iwan 和 Lyong 提出的基于尾流振子模型的半经验公式方法及其改进方法^[1~3]。在运用这些方法来分析和计算涡激振动问题时, 附加质量是经常涉及到的重要物理量。目前, 在计算涡激振动问题的模型和公式中, 涉及到流体中结构的附加质量时, 往往采用理想附加质量, 即在无限大的无粘不可压流体区域中作定向加速运动的物体的附加质量。比如, 圆球的理想附加质量系数等于 $\frac{1}{2}$, 圆柱的理想附加质量系数为 1。

当结构在粘性流体中运动时, 只有当结构从静止开始运动的瞬时, 初步生成的涡还在边界层的薄层中, 而且雷诺数较低以及振动幅值较小时, 附加质量才接近于理想附加质量^[4]。但是这些限制条件往往被忽略, 理想附加质量被推广到非定常粘性流中的运动结构中。Sarpkaya 等曾经提出这个推广对于涡激振动圆柱是不合理的^[4], 并且对涡激振动中结构的流体作用力(包括惯性力和阻尼力)分别进行了实验研究, 实验结果显示流体作用力的惯性分量(附加质量的相关项)在整个锁频阶段是变化的。Vikestad^[5]等研究了涡激振动中附加质量的变化, 他们的实验结果显示: 当约化速度(reduced velocity, $U^* = \frac{U}{f_{n0}D}$, 其中圆柱在静水中的固有频率 $f_{n0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m+m_0}}$, U 是来流速度, D 是圆柱直径)从 3.0 增加到 13.0 时, 附加质量系数从 4.5 变化到 -0.8。这表明附加质量会随流速的变化出现较大的变化, 甚至会出现负的附加质量, 因此不能简单地采用理想附加质量来描述涡激振动中的附加质量。

尽管有人已经认识到涡激振动中附加质量的变化, 并且进行了一些实验和数值计算, 但是对于附加质量的变化规律还未见有文献给出。本文在对涡激振动圆柱的附加质量进行理论分析的基础上, 综合实验和数值模拟的结果, 根据涡激振动中结构振动频率、来流约化速度的关系, 推导出涡激振动锁

* 自然科学基金项目(项目编号 10532070)和国家 863 课题(项目编号 2004AA617010)资助。

频阶段的圆柱附加质量系数估算公式。通过对有关圆柱涡激振动实验结果和数值模拟结果进行分析,并与有关圆柱涡激振动实验结果^[4,5,7,8]进行对比,表明本文提出的圆柱涡激振动锁频阶段附加质量系数的估算公式与实验结果是相吻合的。另外,本文还以单自由度弹簧质量阻尼模型为研究对象,在对其涡激振动中的附加质量进行理论分析的基础上,给出了估算公式的适用范围和附加质量的取值范围。最后,做为应用算例,考察比较了进行附加质量修正和不修正两种情况下的圆柱涡激振动响应。结果表明采用本文提出的附加质量计算公式,能够更好地预测涡激振动响应。

2 涡激振动圆柱在锁频阶段的附加质量理论分析

附加质量是一个比较复杂的问题,关于其定义以及求解,一直存在着争论。正如 T. Sarpkaya^[4]所说:附加质量是流体动力学中最著名、理解最少、最混乱的特征量之一。在研究附加质量的文献中^[9,16],一般首先通过理论求解结构所受到的流体作用力,将其中的与加速度有关的惯性分量分离出,即得到附加质量。但是直接求解涡激振动圆柱的流体作用力,因为涉及分离、转捩、涡动力、湍流等复杂现象,直接进行理论求解非常困难。本文从涡激振动结构的运动平衡方程入手,推导出锁频阶段的附加质量的表达式,并得出附加质量和振动频率的关系,为后面的根据涡激振动的频率实验结果观察分析附加质量的变化情况,并进一步推导附加质量的估算公式奠定基础。

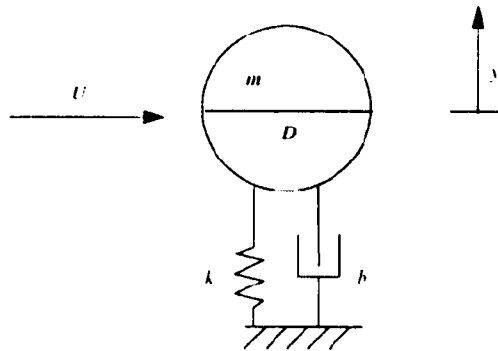


图1 VIV的弹簧质量阻尼模型示意图

为简化并具有代表性起见,这里采用如图1的弹簧质量阻尼模型。假设系统为线性的,并且振动过程中结构刚度保持为常数。因此,涡激振动圆柱的动力平衡方程可表达为:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta m (2\pi f_0) \frac{dy}{dt} + m (2\pi f_0)^2 y = F_v(t) \quad (1)$$

其中: m 是单位长度圆柱的质量; f_0 是圆柱弹簧系统在真空中的固有频率; $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$ y 是圆柱的位移; ζ 是阻尼比; $F_v(t)$ 是流体升力。

在锁频阶段,可假设圆柱的位移和流体升力分别为:

$$y(t) = A \sin(2\pi f_0 t), \quad F_v(t) = F_L \sin(2\pi f_0 t + \phi) \quad (2)$$

则有

$$F_v(t) = F_L \cos \phi \sin(2\pi f_0 t) + F_L \sin \phi \cos(2\pi f_0 t) \quad (3)$$

将(3)代入(1)式有

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta m (2\pi f_0) \frac{dy}{dt} + m (2\pi f_0)^2 y = F_L \cos \phi \sin(2\pi f_0 t) + F_L \sin \phi \cos(2\pi f_0 t) \quad (4)$$

由(2)、(4)可得

$$\left[m + \frac{F_L \cos \phi}{A(2\pi f_0)^2} \right] \frac{d^2 y}{dt^2} + \left[2\zeta m (2\pi f_0) - \frac{F_L \sin \phi}{A(2\pi f_0)} \right] \frac{dy}{dt} + m (2\pi f_0)^2 y = 0 \quad (5)$$

根据附加质量的定义,由式(5)可以得到附加质量的表达式为:

$$m_a = \frac{F_L \cos \phi}{A(2\pi f_0)^2} \quad (6)$$

当圆柱的涡激振动进入锁频阶段以后,在低阻尼($0 < \zeta \ll 1$)的情况下,公式(5)表示的是单自由度无阻尼简谐振动,因此其固有频率 f_n 可用下式表示:

$$f_n = \frac{f_0}{\sqrt{1 + m_a / m}} \quad (7)$$

我们将 f_n 定义为流体和圆柱组合系统的固有频率。

在圆柱的质量比很大时,Feng在风洞中的实验结果^[13]表明:当圆柱(质量比 $m^* = 248$)进入涡激振动锁频状态以后,流体和圆柱组合系统的固有频率 f_n 基本保持不变。当圆柱的质量比较低时,则可观察到明显的 f_n 的变化。Vikestad^[5]等的实验结果和Willden^[6]等的数值模拟结果都表明当较低质量比的圆柱进入涡激振动锁频状态以后,随着约化速度的增加,涡激力频率不断增长,圆柱的振动频率也不断增长,但是基本保持在流体和圆柱组合系统的真实固有频率 f_n 附近振动。而 f_0 保持为常数,由(7)式可得系统频率变化是由附加质量的变化引起的。

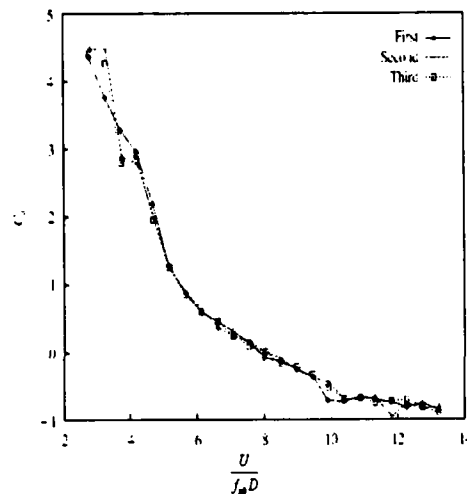


图2 附加质量系数随 $\frac{U}{f_0 D}$ 的变化

为了进一步研究圆柱涡激振动锁频阶段的附加质量变化情况,我们考察了附加质量的实验和数值模拟结果^[5,6](图2为附加质量的典型实验结果)。结果表明附加质量 m_a 随来流速度 U 的改变而改变;同时在锁频速度范围内,附加质量的改变也体现在频率比 f_{osc} / f_{no} 的变化中。另外,图2显示随着来流速度的增加不断减小,附加质量由正值变成负值,且随着约化速度的增加继续减小。从(7)式可得出:

$$m_a = m \left(f_0^2 / f_n^2 - 1 \right) \quad (8)$$

因为 f_0^2/f_n^2 始终是正值, 故在锁频阶段始终有附加质量

$$m_a > (-m) \tag{9}$$

即锁频阶段附加质量不会减小到 $-m$ 以下。

3 锁频阶段涡激振动圆柱的附加质量经验公式

前面的分析表明约化速度是影响附加质量的主要参数, 而且附加质量的变化体现在频率比 f_{osc}/f_{no} 的变化中。因此, 如果能得到锁频阶段的频率比 f_{osc}/f_{no} , 则由 (8) 式就可得出锁频阶段的附加质量。锁频阶段的各种频率之间的关系, 已经有一些实验结果报道于文献中。这些结果表明频率比 f_{osc}/f_{no} 主要受约化速度以及质量比的影响。

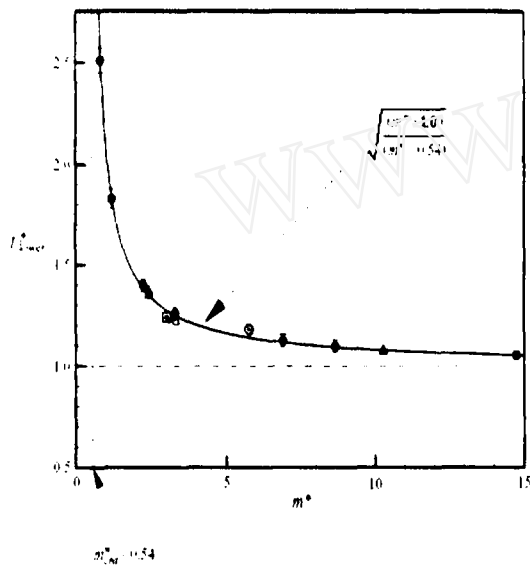


图3 锁频阶段涡激振动圆柱在 Lower branch 的共振频率和质量比的关系。● GOVARDHAN (2000)
△ Khalak (1999), □ Hover (1998), ○ Anand (1985)

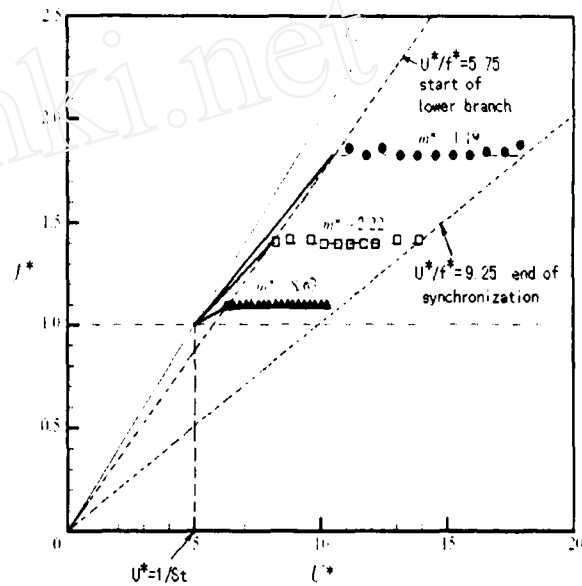


图4 低 ($m^*\zeta$) 情况下, 锁频阶段 f^* 随 U^* 的变化以及对应不同质量比 m^* 的 Lower Branch 阶段频率响应。

Govardhan 和 Williamson^[7] 系统总结了频率比和简缩速度以及质量比的关系, 图3为根据大量实验结果得到的锁频阶段涡激振动圆柱在 Lower branch 的共振频率和质量比的关系。从图3中可见, 经验公式:

$$f_{lower}^* = \sqrt{\frac{m^* + 1.0}{m^* - 0.54}} \tag{10}$$

与实验结果符合得很好。其中: 质量比 $m^* = \frac{m}{m_D}$, m_D 是单位长度圆柱的排水质量; 频率比

$f^* = f/f_{n0}$, 其中 f 是圆柱的振动频率, $f_{n0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m+m_D}} = f_0 \sqrt{\frac{m}{m+m_D}}$ 是圆柱在静水中的固有

频率。在锁频阶段:

$$f^* = \frac{f_n}{f_{n0}} = \sqrt{\frac{m+m_D}{m+m_a}} \quad (11)$$

另外, Govardhan 和 Williamson^[7] 还给出了锁频阶段频率比 f^* 随约化速度 U^* 的变化规律。图 4 为在不同质量比 m^* 、低 $m^*\zeta$ (一般认为 $m^*\zeta \leq 0.02$) 的情况下, 锁频阶段频率比 f^* 随约化速度 U^* 的关系。从图 4 可见: (1) 锁频阶段频率比 f^* 随约化速度 U^* 的变化曲线可以分为两个阶段: 第一阶段, f^* 随 U^* 的增大而增大, 而且二者近似呈线性关系; 第二阶段(对应着 Lower Branch 阶段), f^* 不随 U^* 变化而变化, 基本保持为一个恒定值 $f^* = f_{lower}^*$ 。(2) 随着 m^* 的不同, 第一、第二锁频阶段对应的约化速度范围不同。(3) 在 $m^* \geq 10.0$ 的情况下, 当圆柱刚进入涡激振动锁频阶段, 就可认为涡激振动圆柱进入第二锁频阶段, 而且 $f^* = f_{lower}^* \approx 1.0$ 。

我们分 $m^* < 10.0$ 和 $m^* \geq 10.0$ 两种情况来给出锁频阶段涡激振动圆柱的附加质量系数估算公式。

3.1 质量比 $m^* < 10.0$

从图 4 可见, 当涡激振动圆柱进入锁频阶段, 在第一锁频阶段 f^* 随着来流速度的增加而线性增加; 第二锁频阶段 $f^* = f_{lower}^*$ 。两个阶段的相交点近似为斜线 $\frac{U^*}{f^*} = 5.75$ 与水平线

$$f_{lower}^* = \sqrt{\frac{m^*+1.0}{m^*-0.54}}$$

的交点。

在圆柱涡激振动的第二锁频阶段, 由 $f^* = f_{lower}^*$ 可得 $\sqrt{\frac{m+m_D}{m+m_a}} = \bar{m}$, 其中 $\bar{m} = \sqrt{\frac{m^*+1.0}{m^*-0.54}}$,

因此, 附加质量系数 $C_a = -0.54$; 在第一锁频阶段 $\frac{f^*-1.0}{U^*-5.0} = \frac{\bar{m}-1.0}{5.75\bar{m}-5.0}$, 则有

$$f^* = \frac{\bar{m}-1.0}{5.75\bar{m}-5.0}(U^*-5.0)+1.0, \text{ 所以 } \sqrt{\frac{m+m_D}{m+m_a}} = \frac{\bar{m}-1.0}{5.75\bar{m}-5.0} \left(\frac{U}{f_0 D} \sqrt{1+\frac{1}{m^*}} - 5.0 \right) + 1.0,$$

由上式可得 $C_a = \frac{m^*+1}{G^2} - m^*$, 其中 $G = \frac{\bar{m}-1.0}{5.75\bar{m}-5.0} \left(\frac{U}{f_0 D} \sqrt{1+\frac{1}{m^*}} - 5.0 \right) + 1.0$ 。

所以, 在质量比 $m^* < 10$ 时, 锁频阶段涡激振动圆柱的附加质量系数:

$$C_a = \frac{m^*+1}{G^2} - m^*, \quad \text{当 } 5.0 \leq U^* < 5.75\bar{m} \quad (12)$$

$$C_a = -0.54, \quad \text{当 } 9.25\bar{m} > U^* > 5.75\bar{m} \quad (13)$$

其中

$$G = \frac{\bar{m}-1.0}{5.75\bar{m}-5.0} \left(\frac{U}{f_0 D} \sqrt{1+\frac{1}{m^*}} - 5.0 \right) + 1.0 \quad (14)$$

$$\bar{m} = \sqrt{\frac{m^*+1.0}{m^*-0.54}} \quad (15)$$

3.2 质量比 $m^* \geq 10$

当质量比 $m^* \geq 10$, 可以近似认为圆柱直接进入涡激振动第二锁频阶段, 即 $f^* = f_{lower}^*$ 。而且随着 m^* 的增加, f^* 趋近于 1.0。因此, 根据 (12)、(13) 式, 有 $\sqrt{\frac{m+m_D}{m+m_a}} = \bar{m}$, 所以 $m_a = -0.54m_D$,

即:
$$C_a = -0.54 \quad (16)$$

3.3 附加质量的下限值以及适用范围

由公式(12)可得到 $m > 0.54m_D$, 即 $-m < -0.54m_D$ 。由公式(11)可得到 $m_a > -m$, 或者 $m_a \geq -0.54m_D$ 。这样就得到锁频阶段圆柱附加质量系数的理论下限值 $C_{a\min} = -0.54$ 。

Govardhan 和 Williamson^[6]给出了锁频阶段涡激振动圆柱在 Lower branch 的共振频率和质量比的关系表达式 (12), 可见式 (12) 的质量比适用范围 $m^* > 0.54$, 见图 3。

从图 3 和图 4 可见, 锁频阶段的起始约化速度 $U^* = \frac{1}{S_r} = 5.0$, S_r 是 Strouhal 数。从文献[10,11]可得出: 在 $100000 > Re > 300$ 的情况下, 可认为 $S_r = 0.2$ 。也就是说公式 (12)、(13) 和 (16) 的取值范围是 $100000 > Re > 300$ 。

图 3 和图 4 是在低 ($m^*\zeta$) (一般认为 ($m^*\zeta \leq 0.02$)) 的情况下得出的结果^[6], 因此经验公式 (12)、(13) 和 (16) 的适用条件是在 ($m^*\zeta \leq 0.02$) 的前提下。

总之, 本文给出的经验公式 (12)、(13) 和 (16) 是在 $m^* > -0.54$ 、 $100000 > Re > 300$ 和 ($m^*\zeta \leq 0.02$) 的假设条件下提出的。

4 附加质量的验证

4.1 同实验结果和数值模拟结果的比较

在低 ($m^*\zeta \leq 0.02$) 的情况下, Govardhan^[6]对 $m^* = 1.19, 2.22$ 等情况进行了涡激振动实验, 得出附加质量系数在锁频阶段的 Lower branch 上基本保持恒定 $C_a = -0.54 \pm 0.02$; Sarpkaya 的实验结果^[4]也证实了这个结论。因此当涡激振动圆柱处在锁频阶段的第二锁频阶段 (或者 lower branch) 时, 对其响应进行分析时可以采用附加质量系数 $C_a = -0.54$ 。

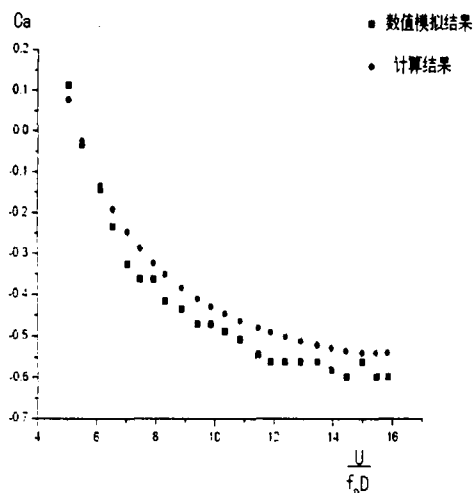


图 5 $m^* = 0.6366$ 时锁频阶段圆柱涡激振动的附加质量系数的数值模拟结果和计算值之比较

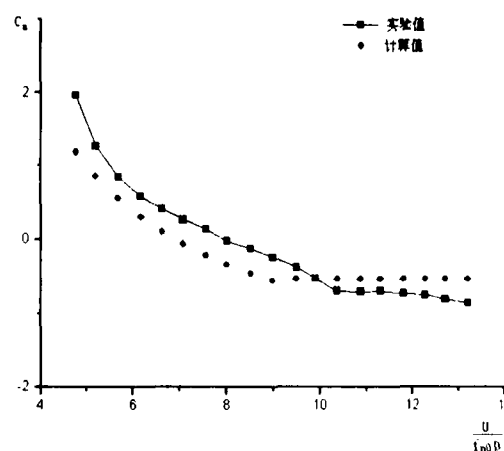


图 6 $m^* = 1.6552$ 时锁频阶段圆柱涡激振动的附加质量系数的计算值和实验值之比较

我们分别用数值模拟结果和实验结果来验证计算公式(12)~(15)。根据公式(12)、(13)得到的计算结果同数值模拟结果的比较见图5。从图5可见,虽然有一定的误差,但是锁频范围内附加质量系数的估算值与数值模拟值基本吻合,尤其在约化速度较低时,符合很好。另外,我们根据(12)、(13)两式计算附加质量系数,并在图6中将计算结果同实验结果进行比较。从图6可见,利用估算公式(12)、(13)得到锁频范围内的附加质量系数计算值与附加质量系数实验值的变化趋势是吻合的。

在高质量比即 $m^* > 10.0$ 的情况下, Sarpkaya^[8]在1978年作了圆柱涡激振动试验,质量比分别约等于50、200、800,并在2004年重复了这次试验。并给出了实验结果^[4,9]。在锁频阶段 $f_{ex} = f_n$, 附加质量系数则是 $C_a \approx -0.50$, 与前面 $C_a = -0.54$ 非常接近,这也证明了前面的结论。

4.2 对涡激振动响应的影响比较

我们分别采用本文提出的附加质量经验公式和理想附加质量,对Khalak和Williamson试验^[23]中圆柱锁频阶段的位移进行了计算,并与试验值进行了比较。

试验参数如下:圆柱直径 $D=0.05\text{m}$, 圆柱长度 $L=1\text{m}$, 流体密度 $\rho_{water}=1000\text{kg/m}^3$, 弹簧刚度 $K=10000\text{N/m}$ 。(1)质量比 $m^*=2.4$, 圆柱材料密度 $\rho=2.4 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 阻尼比 $\zeta=0.0045$, $f_n=6.16\text{Hz}$, $f_n D=0.308\text{m/s}$; (2)质量比 $m^*=3.3$, 圆柱质量密度 $\rho=3.3 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 阻尼比 $\zeta=0.0026$, $f_n=5.4772\text{Hz}$, $f_n L=0.27386\text{m/s}$ 。

圆柱涡激振动响应幅值的计算采用修正的尾流振子模型^[24],该模型考虑的响应振幅与约化速度间的非线性关系,两种参数情况下的计算与实验结果见图7。对比附加质量修正前 ($C_a=1.0$) 和修正后 (本文提出的经验公式) 的涡激振动响应幅值计算结果,可以看出采用本文提出的附加质量后,响应幅值的计算结果与实验结果更接近。这说明采用本文提出的附加质量经验公式,进行涡激振动响应计算可以得到更加符合实际的预测结果。

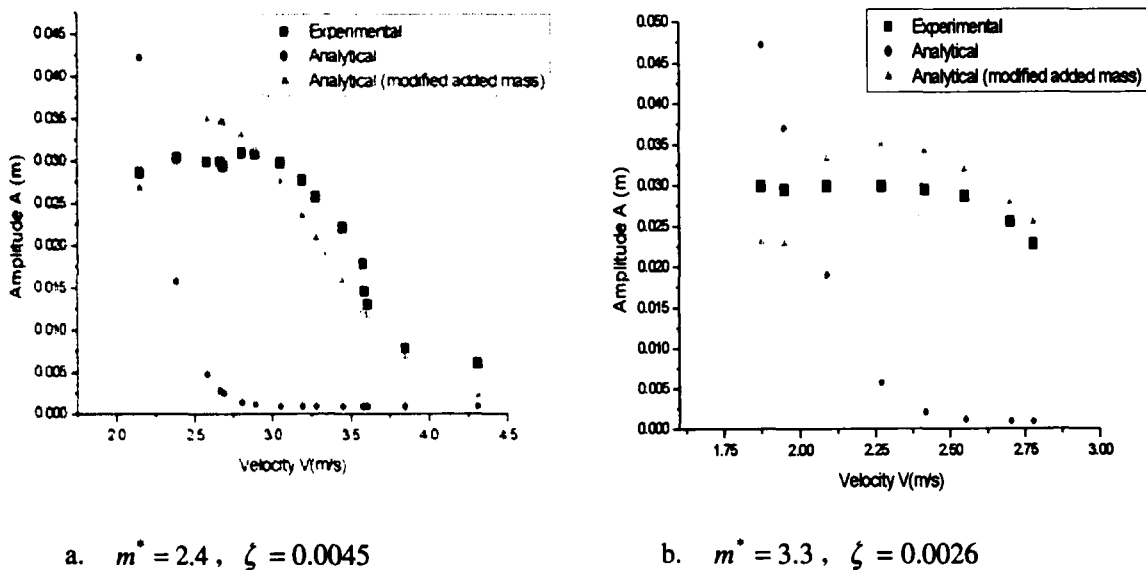


图7 附加质量修正前、后的涡激振动响应幅值与实验结果的对比

5 结论

本文对 $(m^* \zeta) \leq 0.02$ 、 $m^* > -0.54$ 和 $100000 > \text{Re} > 300$ 情况下锁频阶段涡激振动圆柱的附加质量进行了研究,得出以下结论:

- (1) 圆柱涡激振动锁频阶段的附加质量系数 C_a 与质量比 m^* 、约化速度 $\frac{U}{f_n D}$ 有关,可用函数关

系式 $C_a = f(m^*, \frac{U}{f_0 D})$ 表示。

(2) 在圆柱涡激振动锁频阶段的第一锁频阶段, 附加质量系数为

$$C_a = \frac{m^* + 1}{G^2} - m^* \quad \text{当 } 5.0 \leq U^* < 5.75\bar{m}$$

其中 $G = \frac{\bar{m} - 1.0}{5.75\bar{m} - 5.0} \left(\frac{U}{f_0 D} \sqrt{1 + \frac{1}{m^*}} - 5.0 \right) + 1.0$, $\bar{m} = \sqrt{\frac{m^* + 1.0}{m^* - 0.54}}$ 。

(3) 在圆柱涡激振动的第二锁频 (或 Lower Branch) 阶段, 附加质量系数为:

$$C_a = -0.54 \quad \text{当 } U^* > 5.75\bar{m}$$

(4) 在在质量比 $m^* \geq 10.0$ 的情况下, 在整个锁频阶段附加质量系数为:

$$C_a = -0.54$$

总之, 本文提出的附加质量系数计算公式, 是能够在一定的精度范围内反映锁频阶段涡激振动圆柱附加质量系数的变化趋势的。对于处在持续不断的流动及尾涡作用之下的海洋平台的张力腿、立管和海底管线等圆柱结构, 采用本文提出的附加质量系数计算公式, 比采用理想附加质量更能准确反映它们在锁频阶段的附加质量变化情况, 在响应计算中也较大地提高了计算精度。

参 考 文 献

- 1 W.D. Iwan, R.D. Blevins. A Model for the Vortex-induced Oscillation of Structures. ASME Journal of Applied Mechanics, 1974, 41: 581-586.
- 2 W.D. Iwan. The vortex-induced oscillation of elastic structural elements. Journal of Applied Mechanics, American Society of Mechanical Engineers, 1975, 97: 1378-1382.
- 3 W.D. Iwan. The Vortex-induced Oscillation of Non-uniform Structure Analysis. Journal of Sound and Vibration, 1981, 79(2): 291-301.
- 4 K. Vikestad, J. K. Vandiver, C. M. Larsen. Added mass and oscillation frequency for a circular cylinder subjected to vortex-induced vibrations and external disturbance. Journal of Fluids and Structures 2000 14: 1071-1088.
- 5 R. H. J. Willden, J. M. R. Graham. Numerical prediction of VIV on long flexible circular cylinders. Journal of Fluids and Structures 2001 15: 659-669.
- 6 R. Govardhan, C. H. K. Williamson. Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. J. Fluid Mech. 2000, 420: 85-130.
- 7 T. Sarpkaya. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19: 389-447.
- 8 T Sarpkaya. Fluid forces on oscillating cylinders. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Division ASCE, 1978, WW4, 104(WW4), 275-290.
- 9 T.Sarpkaya, Fluid forces on oscillating cylinders at various Reynolds numbers (2.5×10^3 , 7.5×10^3 , 12.5×10^3 , 15×10^3 , 20×10^3 , 45×10^3). Technical Report, 2004.
- 10 Robert D. Blevins, Flow-Induced Vibration. Van Nostrand Reinhold Company, 1977.
- 11 Fernando L. Ponta, Hassan Aref. Vortex synchronization regions in shedding from an oscillating cylinder. Physics of Fluids, 2005, 17, 011703-1-011703-4.
- 12 Bishop. R.E.D., Hassan, A.Y.. The lift and drag forces on a circular cylinder in a flowing fluid. Proceedings of Royal Society of London, 1964, Series A 277, pp.32-50, 51-75.

- 13 Feng, C. -C, The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and d-section cylinders. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, Canada.,1968.
- 14 T. Sarpkaya Vortex-induced Oscillations (A Selective Review). Journal of Applied Mechanics, 1979,46: 241~258.
- 15 周光炯、严宗毅、许世雄、章克本, 流体力学(第二版)上册, 高等教育出版社, 2000年6月第2版.
- 16 C.H.K. Williamson, R.Govardhan. Vortex-Induced Vibrations. Annu.Rev.Fluid Mech. 2004,36:413~455.
- 17 Kozakiewicz, A., Sumer, B. M. & Fredsoe, J. Cross-flow vibration of cylinder in irregular oscillatory flow. ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1994,120, 515-534.
- 18 董艳秋. 波、流联合作用下海洋平台张力腿的涡激非线性振动[J].海洋学报, 1994, 16(3): 121-129.
- 19 J.K.Vandiver. Dimensionless parameters important to the prediction of vortex-induced vibration of long, flexible cylinders in ocean currents. Journal of Fluids and Structures 1993, 7: 423~455.
- 20 A.Roshko, On the development of turbulent wakes from vortex streets. NACA TR 1191(1954).
- 21 D. shiels, A. Leonard, A. roshko. Flow-induced vibration of a circular cylinder at limiting structural parameters. Journal of Fluids and Structures 2001,15:3~21.
- 22 Khalak,A., Williamson,C.H.K., Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping. Journal of Fluids and Structures. 1999,13:813-851.
- 23 Khalak,A., Williamson,C.H.K., Fluid forces and dynamics of a hydroelastic structure with very low mass and damping. Journal of Fluids and Structures. 1997,11:973-982.
- 24 陈伟民, 王艺. 张力与流场分布对张力腿涡激振动响应的影响分析. 中国造船, 2004年11月, 第45卷增刊, 226-232.

Study on the added mass of a cylinder in the lock-in range of vortex-induced vibration

Wang Yi, Chen Weimin, Lin Mian

(Div. of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract

The added mass coefficient for a cylinder in the lock-in range of vortex-induced vibration (VIV) is analyzed theoretically. According to the relationship between the cylinder's vibration frequency and flow speed, the semi-empirical formulas of the added mass in VIV are presented. Compared with the experimental results and the numerical simulation results, the semi-empirical formulas are examined. In addition, the application range of these estimation formulas is also discussed in this paper. At last the amplitude of the cylinder's response in the lock-in range of VIV is calculated using the added mass given by this work. It is demonstrated that the amplitude of the cylinder's response in VIV more closely agree with experimental results than the response using the ideal added mass.

Key words: added mass; lock-in; mass ratio; reduced velocity; natural frequency

作者简介

王 艺 男, 1971年生, 博士研究生。主要从事海洋结构流固耦合研究。