

# 张力和流场分布对 张力腿涡激振动响应的影响分析

陈伟民 王 艺

(中国科学院力学研究所 工程科学部)

## 摘 要

本文以尾流振子模型为基础,通过改进 Lyong 的半经验公式法,研究了张力腿的张力变化以及流场分布对张力腿涡激振动响应的影响。计算结果表明,张力腿的张力改变,使各阶模态的锁频区域分布发生变化,从而改变了结构的涡激振动响应;流场分布的响应计算表明,同样的流场分布对不同阶模态的激励作用的效果不同,因此最后的响应结果是各阶模态响应的综合。

关 键 词: 涡激振动; 动力响应

## 1 尾流振子模型及其改进

人们根据实验观察现象,结合流体力学、固体力学等方面知识,发展了很多涡激振动计算模型。其中最有影响的是 Disilvio<sup>[1]</sup>、Hartlen<sup>[2]</sup> 等根据涡激振动分析提出的升力振子模型,以及该模型的发展和完善<sup>[3-10]</sup>。如 Iwan<sup>[3]</sup>、Griffin<sup>[5]</sup>、Sarpkaya<sup>[6]</sup>等对这些模型中的回复力、阻尼以及升力系数进行了非线性修正,使得理论分析结果更接近实验结果。目前使用较为方便的是 Iwan 的半经验方法。根据该方法得出结构的幅值响应后,再在减缩速度范围进行响应振幅修正。Lyon 根据 Griff 的实验结果给出了线性修正(见图 1)。但从 Griff 的实验结果看,其分布更接近于 Gauss 分布,所以这里建议使用 Gauss 分布修正。在拟合 Gauss 修正函数时,除了 Griff 的实验结果,我们还考虑了 Feng<sup>[10]</sup>、Brika<sup>[11]</sup> 的实验结果以及 Foulhoux<sup>[12]</sup>的计算结果,取这些结果的平均值进行高斯拟合,拟合函数为:

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-2(x-x_c)^2/w^2}$$

式中的系数为:  $y_0 = 0.014$ ,  $A = 2.040$ ,  $x_c = 6.172$ ,  $w = 1.723$ 。两种修正与实验和计算结果的误差对比见表 1。表 1 表明,用 Gauss 修正其误差低于线性修正。

表 1 两种修正与实验和计算结果的误差对比

误差	Griff	Feng	Brika	Foulhoux
Gauss	.1125	.1029	.1001	.0898
Linear	.1539	.2396	.2183	.1977

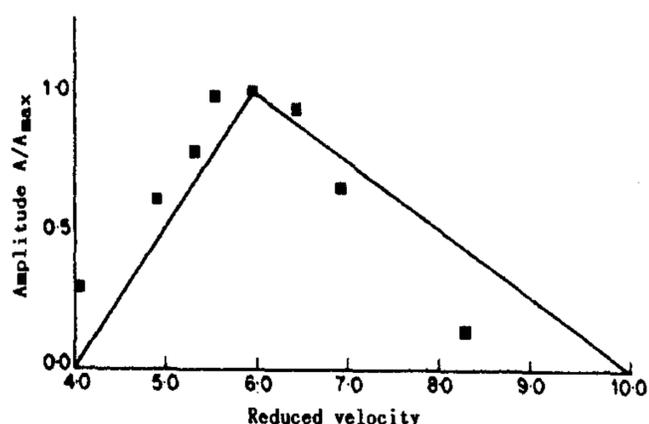


图1 线性修正

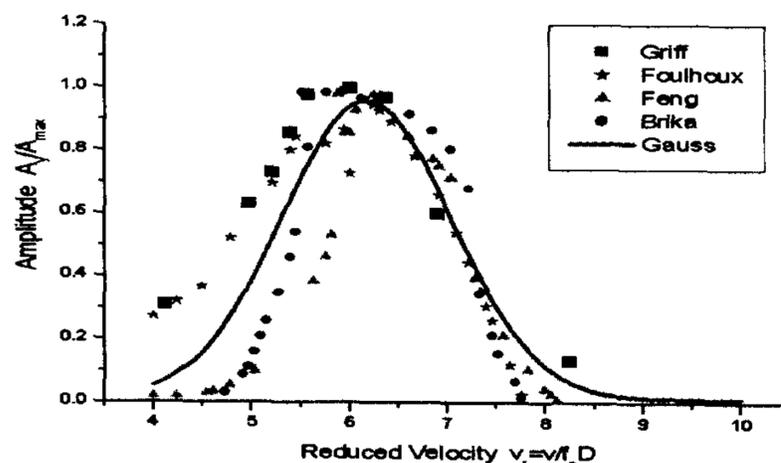


图2 Gauss修正

涡激振动响应分析最终要为疲劳分析提供应力状态, 所以还要再进一步进行受力分析。

使用修正的尾流振子模型半经验公式计算涡激振荡相应的步骤如下:

- 1) 计算结构的固有频率和模态, 注意要考虑附联水质量的影响。
- 2) 根据流场的速度分布, 计算沿结构的长度方向各界模态的锁频范围。当高阶模态和底阶模态的锁频范围有重叠时, 按高频占优假设, 取高频模态。
- 3) 计算结构的有效质量和模态形状系数。

有效质量  $v_n = \int_0^l m(x) \xi_n^2(x) dx / \int_0^l s(x) \xi_n^2(x) dx$ 。对于均匀缆索结构且沿缆长的全部区域均处于锁频状态, 则  $v_n$  为缆索的单位长度质量; 对于只在局部区域发生锁频的情况,  $v_n$  的值比全部区域处于锁频的值要大, 且缆索上的附加集中质量也会增加有效质量的值。

$$\text{形状系数 } I_n = \int_0^l m(x) \xi_n^4(x) dx / \int_0^l m(x) \xi_n^2(x) dx \text{。对于均匀结构, } I_n = \int_0^l \xi_n^4(x) dx / \int_0^l \xi_n^2(x) dx$$

对于弹簧支持的刚体圆筒,  $I_n = 1.0$ ; 对于悬臂梁的一阶模态,  $I_n = 1.305$ ; 正弦模态,  $I_n = 1.155$ 。但是对于非均匀结构  $I_n$  与通常的模态形状系数会有很大差别。

- 4) 给出结构的初始阻尼  $\zeta_n^I$ , 并令  $\zeta_n^S = \zeta_n^I + F_n \phi_n$

$$\phi_n = 2D \int_0^l C_D(x) \rho D(x) [1 - s(x)] |\xi_n(x)|^3 dx / \{3\pi [\int_0^l m(x) \xi_n^4(x) dx]^{1/2} [\int_0^l m(x) \xi_n^2(x) dx]^{1/2}\}$$

- 5) 幅值响应的放大系数:  $F_n = 1/[1 + 9.6(\mu_r^n \zeta_n^S)^{1.8}]$

- 6) 是否满足收敛条件, 如果不满足至 4, 如果满足, 则求出结构的最大响应幅值:

$$Y_n(x)_{\max} = DF_n I_n^{-1/2} \xi_n(x)$$

- 7) 根据减缩速度的范围, 对响应幅值进行修正 (见图 2)。
- 8) 求解各阶模态的应力。
- 9) 对每一阶模态, 重复步骤 3~7。即得各阶模态的幅值和应力响应。

## 2 算例及结果分析

### 2.1 张力腿张力的影响

取 Hutton 平台为分析对象。表 2 为该平台的主要参数，图 3 为简化的计算模型。图 4 为设计张力下沿张力腿长度方向的各阶模态的锁频范围和各阶模态的响应。

表 2 Hutton 平台的主要参数

1. 流	$a=0.4 \text{ m/s}$
2. 平台吃水 (m)	50
3. 张力腿参数	
长度 (m)	300
外径 (m)	1.1176
壁厚 (m)	.038
张力比	.328
单位长度质量 (T/m)	1.000
单位长度附加质量(T/m)	1.006
弯曲刚度 ( $\text{KN m}^2$ )	$3.854 \times 10^6$

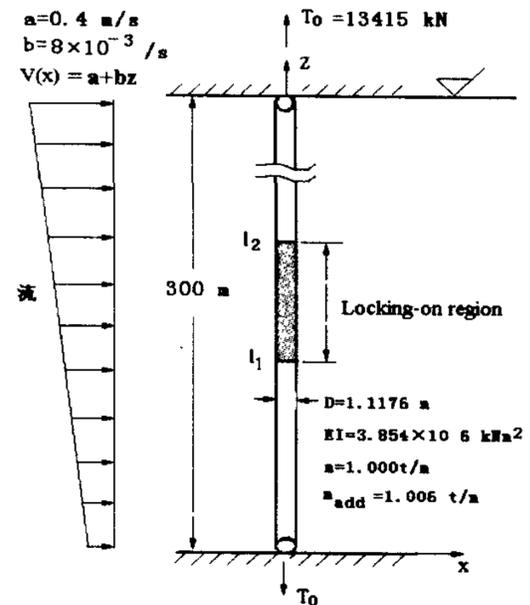


图 3 张力腿计算模型

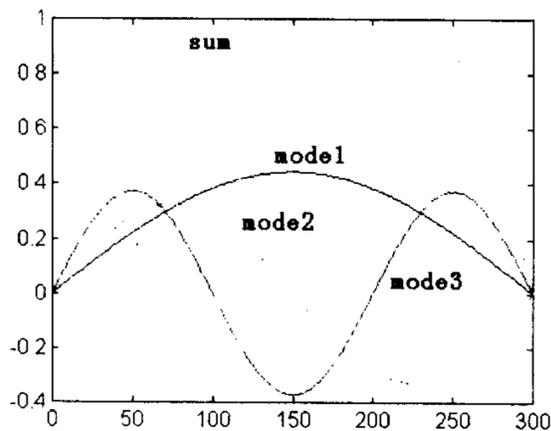


图 4a 各阶模态的响应

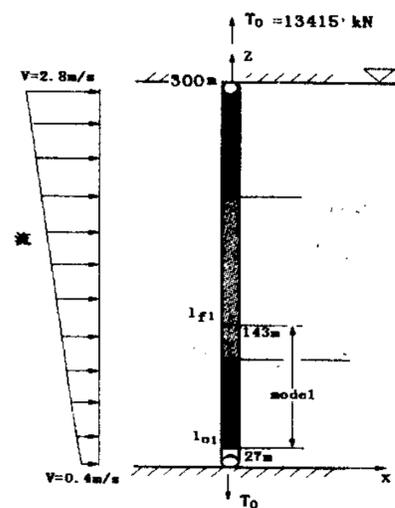


图 4b 张力腿各阶模态的锁频区域

我们还计算了张力腿张力对响应幅值的影响。张力的变化改变了张力腿的模态频率，从而使各级模态的锁频区域发生变化（见图 5）。各阶模态的响应以及总体响应的幅值随张力腿张力的变化曲线见图 6。由图可见幅值响应在张力的变化范围内有最小值。设计平台时，取响应幅值的最小值将是有利的。

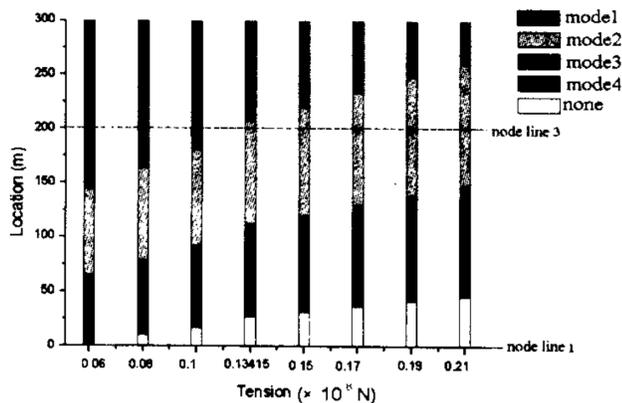


图 5 不同张力下各阶模态的锁频范围

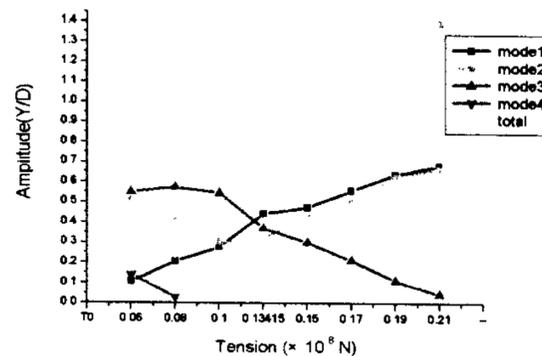


图 6 响应随张力的变化曲线

### 2.2 流场分布的影响

为了考察流场的分布位置对响应的影响, 本节设计了两种流场分布, 分别如图 7、图 11 所示。图 7 中流场从中点 ( $W=0$ ) 对称地向两个端点延伸 (直至  $W=L$ )。图 11 中流场从两个端点 ( $W=L$ ) 对称地向中点延伸 (直至  $W=0$ )。梁结构的参数取算例 1 中张力腿的参数。计算时阻尼分别取 0.008、0.02、0.10, 模态取前三阶模态。两种流场分布下结构的幅值响应和应力响应结果见图 8-10、12-14。

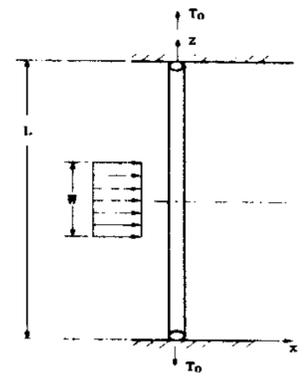


图 7 流场分布示意图

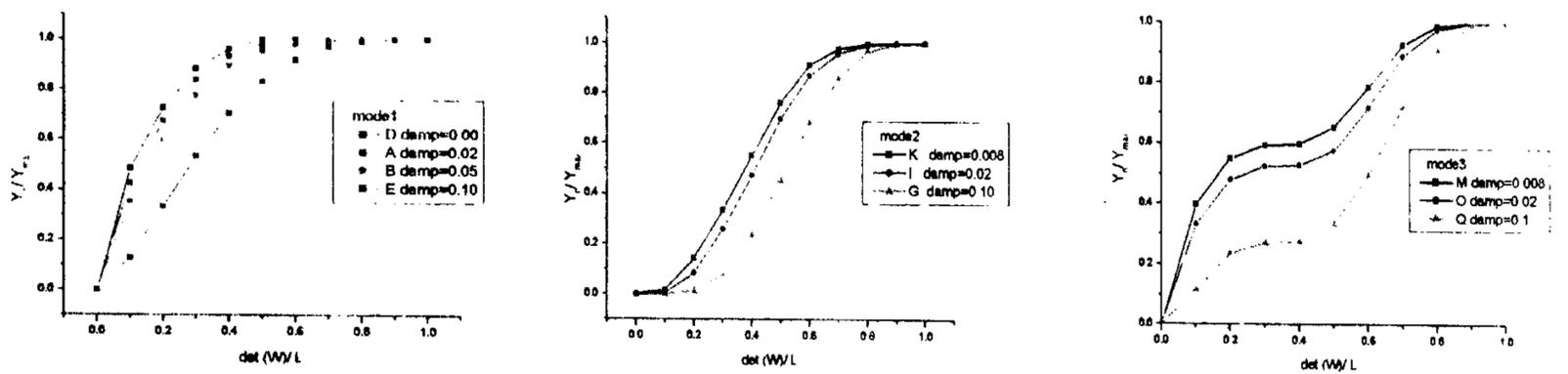


图 8 各阶模态的幅值响应

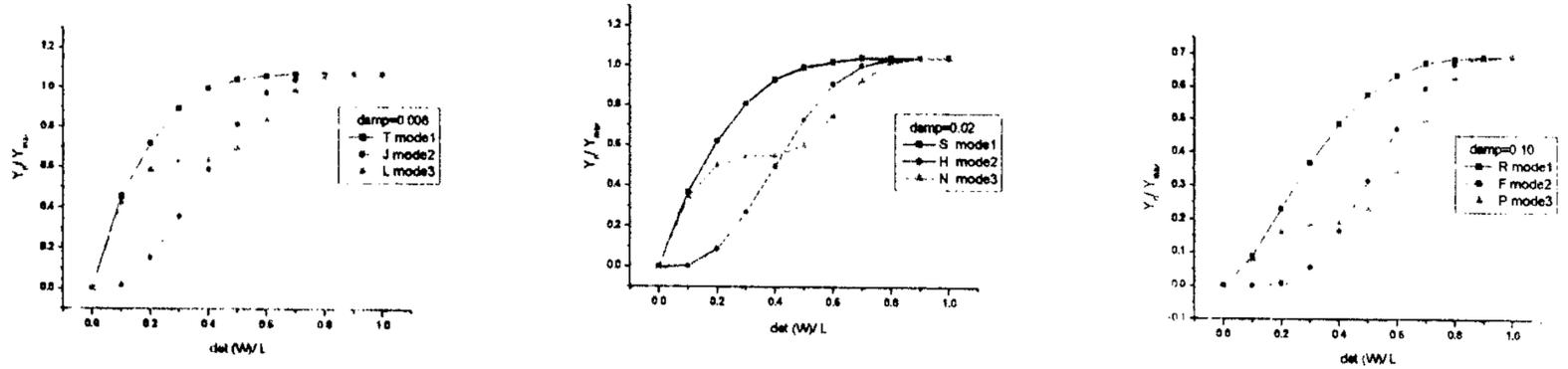


图 9 不同阻尼下各阶模态幅值的响应

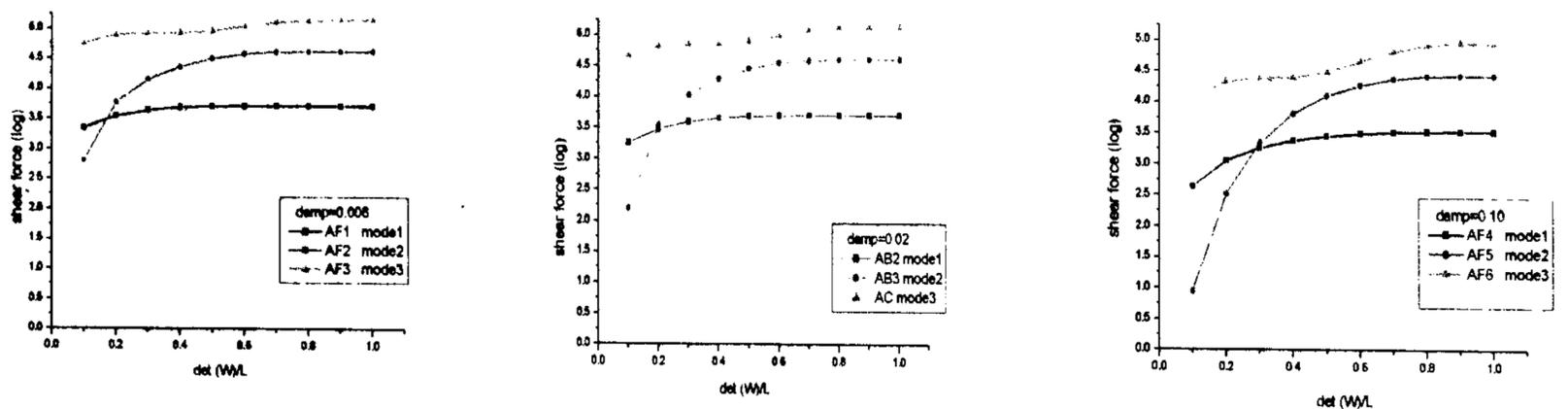


图 10 不同阻尼下各阶模态的剪应力

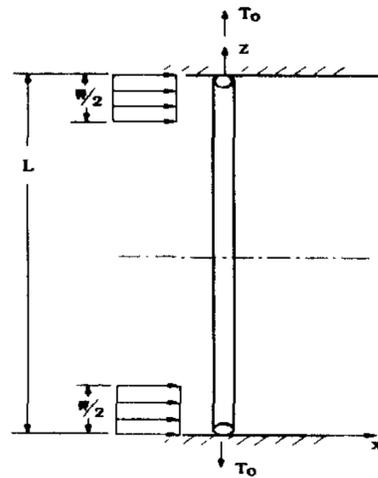


图 11 流场分布示意图

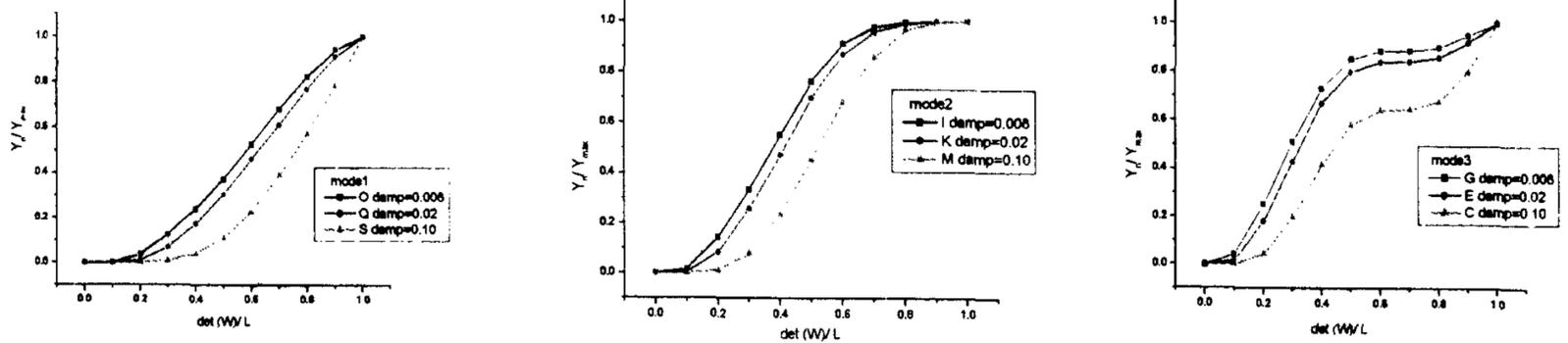


图 12 各阶模态的幅值响应

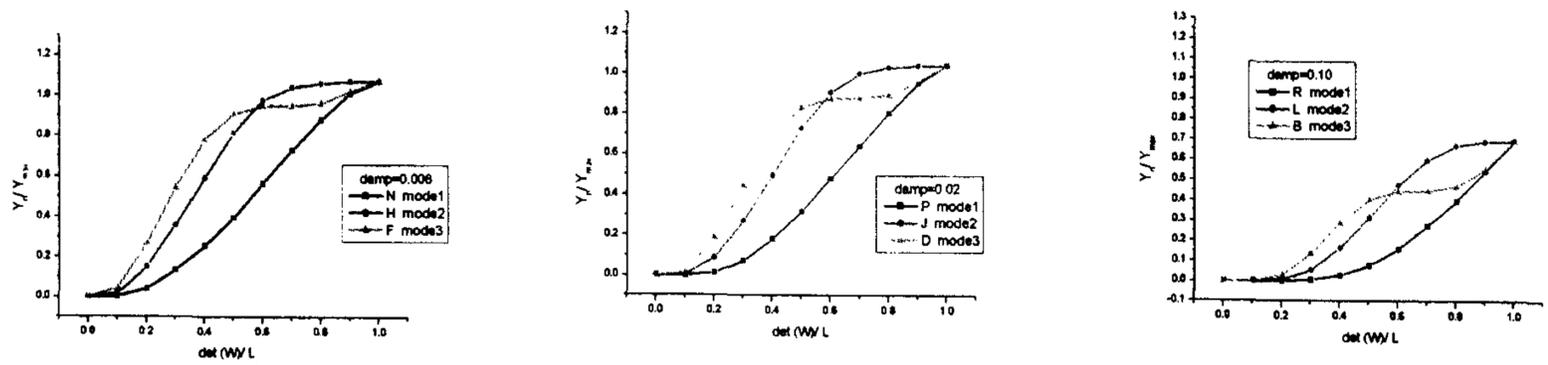


图 13 不同阻尼各阶模态的幅值响应

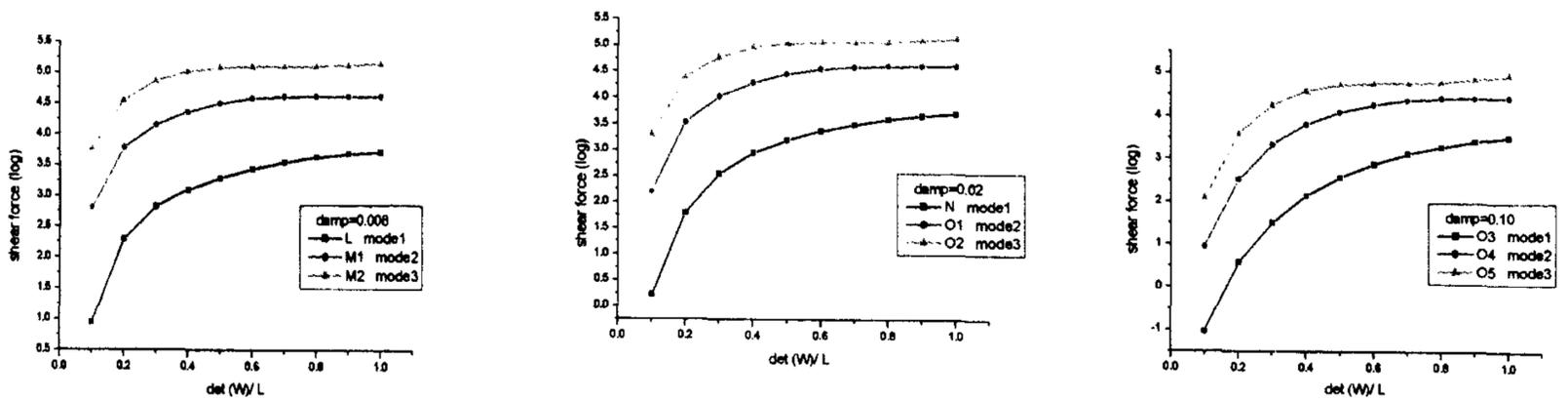


图 14 不同阻尼各阶模态的剪应力

## 结果分析

1) 从幅值响应变化曲线看, 随着流场范围的增大, 各阶的响应幅值都是单调增大的, 但是曲线斜率的变化不尽相同。究其原因, 输入能量位于模态的幅值点时结构对能量的吸收具有最高的效率, 对应曲线的斜率最大点; 反之, 位于模态节点能量吸收效率为零, 对应曲线的斜率为零。尽管能量吸收的效率不同, 但能量吸收的总量总是单调增加的, 所以曲线是单调增大的。图 8、9、12、13 中各曲线的变化均满足以上的规律。

2) 从阻尼变化的计算结果 (图 8、12) 来看, 阻尼较大的曲线更为光滑, 即曲线的二阶导数变化较小, 表明阻尼的作用减小了结构响应输入能量位置的敏感程度。但其根本原因是阻尼的存在消耗了输入能量。

3) 与之类似, 对于各阶模态, 输入能量作用点位于模态幅值点引入最大的横向变形造成较大的剪应变, 对应剪应力曲线的斜率最大值, 而位于模态节点不能引起横向变形对应曲线的斜率为零 (图 10、14)。

另外, 需要注意的是, 本算例中高阶模态的剪应力大于低阶模态, 根据应力水平进行疲劳分析时要注意这一点。

## 3 结论

本文以尾流振子模型为基础, 通过改进 Lyong 的半经验公式法, 研究了张力腿的张力变化以及流场分布对张力腿涡激振动响应的影响。计算结果表明, 张力腿的张力改变, 使各阶模态的锁频区域分布发生变化, 从而改变了结构的涡激振动响应; 流场分布的响应计算表明, 同样的流场分布对不同阶模态的激励作用的效果不同, 因此最后的响应结果是各阶模态响应的综合。

## 参 考 文 献

- 1 G. Disilvio, Self-controlled vibration of a cylinder in a fluid stream, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. J. Engng. Mech. Div. 95, Proc Paper 6498 April 1969.
- 2 R.T. Hartlen, I.G. Currie, Lift-Oscillator Model of Vortex-Induced Vibration, Journal of the Engineering Mechanics Division of ASCE, Vol.96, EM5, 1970, pp577-591.
- 3 W.D. Iwan, R.D. Blevins, A Model for the Vortex-Excited Oscillation of Structures, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 27, 1973, pp225-233.
- 4 R. Landl, Theoretical Model for Vortex-Excited Oscillations, Proceedings of the International Symposium on Vibration Problems in Industry, Keswick, England, 1973.
- 5 O.M. Griffin, R.A. Skop, S.E. Ramberg, The Resonant Vortex Excited Vibrations of Structures and Cable Systems, Proceedings of Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1975, OTC 2319.
- 6 T. Sarpkaya, In-Line and Transverse Forces on Cylinders in Oscillatory Flow at High Reynolds Numbers, Journal of Ship Research, Vol.21, 1977, pp200-216.
- 7 W.D. Iwan, The Vortex-induced Oscillation of Non-uniform Structure Analysis, Journal of Sound and Vibration, 1981,

- Vol.79, No.2, pp291-301.
- 8 G.J. Lyong, M.H. Patel, A Prediction Technique for Vortex Induced Transverse Response of Marine Risers and Tethers, *Journal of Sound and Vibration*, 1986, Vol.11, No.3, pp467-487.
  - 9 王东耀, 凌国灿, 在平台振荡条件下 TLP 张力腿的涡激非线性响应, *海洋学报*, 1998 年第 20 卷第 5 期, pp119-128。
  - 10 T. Sarpkaya, Vortex-induced Oscillations, *Journal of Applied Mechanics*, June 1979, Vol.46, pp241-258.
  - 11 D. Brika, A. Laneville, Vortex-induced Vibrations of a long flexible circular cylinder, *J. Fluid Mech.* Vol.250, pp481-508.
  - 12 L. Foulhoux, V. Saubestre, An Engineering Approach to Characterize the Lock-in Phenomenon Generated by a current on a Flexible Column, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.4, No.3, September 1994, pp231-233.

## The Effect of Tension and Current Distribution on Vortex-induced Vibration of Tendon

Chen Wei-min Wang Yi

(Div. of Eng. Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,)

### Abstract

The vortex-induced vibration of the tendons, risers and pipelines directly affects the fatigue life of offshore structures. By developing the wake oscillator model, the effect of tension and current distribution on vortex-induced vibration of TLP's tendon is analyzed in this paper. It is implied that with the change of tension and current distribution, the domain of lock-on of modes changes differently, so the final response is a synthesis of total modes.

**Key words:** Vortex-induced vibration; dynamic response

### 作者简介

陈伟民 女, 博士, 中科院力学所, 主要从事深海平台结构动力分析

王艺 男, 博士生, 中科院力学所, 主要从事深海平台结构动力分析