

大圆筒码头模态试验和动力修改技术研究

顾培英,王五平

(南京水利科学研究院,江苏 南京 210029)

摘要 首次将模态试验分析和动力修改技术引进到大圆筒码头.通过大圆筒码头模型 4 种约束边界下的模态试验分析,得出大圆筒结构模态频率、模态振型规律,并结合动力修改技术,找出了质量和刚度修改的最佳位置和修改量级,为大圆筒码头抗震设计提供依据.

关键词 码头 大圆筒结构 动力特性 模态试验 动力修改

中图分类号 U656.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2002)04-0009-05

模态试验分析与动力修改技术是结构试验与理论分析的结合物,是 20 世纪 80 年代在振动理论、信号分析、数据处理、概率统计、自动控制、测试技术与计算机等学科基础上发展起来的边缘学科.模态分析提供了研究实际结构振动的一条有效途径.首先将结构物在静止状态下进行人为激振,通过测量激振力与振动响应并经双通道 FFT 分析,得到任意两点之间的传递函数,用模态分析理论通过对试验传递函数的曲线拟合,识别出结构物的模态参数,从而建立起结构物的模态模型.

通过模态试验对结构自振特性和模态进行分析,在模态分析技术的基础上,再对结构质量和刚度进行灵敏度分析,发现结构的薄弱环节,找到最佳修改位置及修改量级,并针对实际工程进行自振特性的修正,使结构自振频率避开场地特征频率,避免结构发生共振,并提出动力响应小、抗震性能好的修正方案,以达到减震的目的.目前,模态试验分析和动力修改技术主要应用在机器和航天航空飞行器上,有些柔性杆系结构也有所应用,但水利、交通等系统中刚性较大的大体积结构几乎没有应用,尤其是动力修改技术.

针对国家‘九五’科技攻关课题‘深水大圆筒码头结构关键技术’中的沉入式大直径圆筒(简称大圆筒结构)抗震问题,本研究系国内外首次引进模态试验分析和动力修改技术,对提高大圆筒结构抗震水平起到积极的作用.

1 模态试验分析及结构动力修改原理

1.1 模态试验分析

1.1.1 传递函数矩阵

根据具有比例阻尼 n 阶多自由度线性系统运动微分方程,得到特征方程式,并求得特征值 ω_r^2 ($r = 1, 2, \dots, n$) 和模态振型向量.将 n 个模态向量组成模态振型矩阵 Φ ,模态振型矩阵具有加权正交性,有下式成立:

$$\Phi_r^T m \Phi_r = m_r \quad \Phi_r^T c \Phi_r = 2\zeta_r \omega_r \quad \Phi_r^T k \Phi_r = k_r$$

式中: m, c, k ——系统质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵 ($n \times n$); ω_r ——系统第 r 阶固有圆频率 ($r = 1, 2, \dots, n$); ζ_r ——系统第 r 阶模态阻尼比 ($r = 1, 2, \dots, n$); m_r, k_r ——系统第 r 阶模态质量、模态刚度 ($r = 1, 2, \dots, n$).

虽然实际工程中结构自由度很高,但总是低阶模态占主导地位,通常只取前 l 阶 ($l \ll n$) 即能满足设计和使用要求.由于模态振型的正交性,运动方程可转换成一组彼此独立的模态方程组,由此求得以模态参数(模态频率 ω_r 、模态阻尼比 ζ_r 、模态振型矩阵 Φ) 描述的位移传递函数矩阵^[1]:

$$H(j\omega) = \sum_{r=1}^l \frac{\Phi_r \Phi_r^T}{k_r [1 - \bar{\omega}_r^2 + j2\zeta_r \bar{\omega}_r]} \tag{1}$$

式(1)即为

$$H(j\omega) = \sum_{r=1}^l F_r \begin{bmatrix} \Phi_{1r} \Phi_{1r} & \Phi_{1r} \Phi_{2r} & \cdots & \Phi_{1r} \Phi_{nr} \\ \Phi_{2r} \Phi_{1r} & \Phi_{2r} \Phi_{2r} & \cdots & \Phi_{2r} \Phi_{nr} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{nr} \Phi_{1r} & \Phi_{nr} \Phi_{2r} & \cdots & \Phi_{nr} \Phi_{nr} \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中 $F_r = \frac{1}{k_r (1 - \bar{\omega}_r^2 + j2\zeta_r \bar{\omega}_r)}$

式中： $H(j\omega)$ ——传递函数矩阵($n \times n$)； ω ——激励圆频率； l ——模态个数； $\bar{\omega}_r$ ——第 r 阶频率比，即激励圆频率与第 r 阶固有圆频率之比， $\bar{\omega}_r = \frac{\omega}{\omega_r}$ 。

由此可知，如果通过导纳测量得到传递函数的任一列或任一行，则包含了模态振型矩阵($n \times l$)的全部信息，所以不必测量任意两点的导纳，而只需测量某一列或某一行就足够了。测量某一列，相当于固定激振点，测量全部自由度响应；测量某一行，相当于固定测量点，移动激振点位置。

1.1.2 模态参数频域识别原理

频域识别法即曲线拟合法，主要是利用传递函数的模态参数表达式去拟合实测的传递函数或曲线。对于实模态分析可采用虚频特性或实频特性之一进行拟合，这样最小二乘列向量的阶数小了一倍。加速度或位移响应利用虚频特性数据识别，速度响应则采用实频特性数据识别。

小阻尼情况下，由 FFT 分析所得试验传递函数只在共振附近才有效，远离共振处的数据信噪比很低，相干函数很小，所以，只需在每阶模态频率附近取出传递函数的有限个数。由于剔去了非共振区域内信噪比差的数据，因而不仅大幅度提高了识别速度，而且提高了识别精度。

由式(2)可得加速度虚频特性函数任一元素 $H_{ab}^l(\omega)$ 为

$$H_{ab}^l(\omega) = \sum_{r=1}^l T_r A_r \tag{3}$$

其中 $T_r = 2\zeta_r \omega_r \omega^3 / W_r$ $A_r = \Phi_{ar} \Phi_{br} / m_r$ $W_r = (\omega_r^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_r^2 \omega_r^2 \omega^2$

在每一阶模态附近各选取若干点， l 阶模态总共选取 s 个频率点，试验数据虚部组成 $s \times n$ 阶矩阵 H^l ，残数也组成 $l \times n$ 阶矩阵 A ， T 为 $s \times l$ 阶矩阵。式(3)用矩阵表示，并进行矩阵转换为

$$A = (T^T T)^{-1} T^T H^l \tag{4}$$

T 矩阵中包含了各阶模态频率与阻尼比。对于第一阶模态，先假定频率、阻尼比初始估计值，利用最小二乘法，首先对频率优化，根据已识别的频率，再应用黄金分割法优化阻尼比。重复上述过程，直至达到给定的收敛精度。在优化第 r 阶频率时，前 $r-1$ 阶采用已识别的频率，后 $l-r+1$ 阶采用估计值。最后根据每一个测量的识别结果进行平均。

残数矩阵 A 转置后，其每一列代表某一阶模态振型，若对模态进行质量归一，即可得到归一化的模态振型矩阵。

1.2 结构动力修改

1.2.1 结构设计修改(正问题)

结构设计修改正问题是指在结构设计上作某些局部修改后，预测结构动力特性的变化。经过模态试验分析，得到 l 个模态参数。若刚度、阻尼、质量分别作一定量的修改 Δk 、 Δc 、 Δm ，则修改结构在模态坐标下的运动方程为

$$E\ddot{q} + F\dot{q} + Gq = \Phi^T f \tag{5}$$

其中 $E = I + \Phi^T \Delta m \Phi$ $F = 2\zeta \omega_r + \Phi^T \Delta c \Phi$ $G = \omega_r^2 + \Phi^T \Delta k \Phi$

式中： f ——系统外部施加在系统相应各点上的力向量($n \times 1$)； E, F, G —— $l \times l$ 阶实对称矩阵。

再次利用上述方法求解修改结构的模态参数。

1.2.2 共振频率修改(反问题)

一个新产品或结构模型经过模态试验发现某一阶共振频率与设计要求不符,需进行共振频率修改,其结果可指导设计的更改.只有当结构作一个质量或一个刚度的局部修改时,共振频率修改反问题才有唯一解.

假定第 i 阶模态频率 ω_i 被修改为 ω'_i ,并且只在第 p 自由度上进行质量局部修改,或只在 s 和 t 自由度之间作刚度修改,则质量修改量 Δm_p 、刚度修改量 Δk_{st} 分别为

$$\Delta m_p = \frac{1}{\omega_i'^2 \sum_{r=1}^l \frac{\Phi_{pr}^2}{\omega_r^2 - \omega_i'^2}} \qquad \Delta k_{st} = - \frac{1}{\sum_{r=1}^l \frac{(\Phi_{sr} - \Phi_{tr})^2}{\omega_r^2 - \omega_i'^2}}$$

(6)

1.2.3 灵敏度分析

结构设计修改时,特别是连续结构很难只在一个局部自由度上修改,为了在众多可行方案中确定设计允许最佳方案,必须进行频率灵敏度分析.频率灵敏度是结构参数改变引起对共振频率改变的灵敏程度.根据摄动原理,假定 Δm 和 Δk 都是小量,令

$$\begin{aligned} m' &= m + \Delta m & k' &= k + \Delta k \\ \omega_r' &= \omega_r + \Delta \omega_r & \Phi' &= \Phi + \Delta \Phi \end{aligned}$$

假定只在 p 自由度上进行质量修改或只在 s 和 t 自由度间进行刚度修改,则质量修改灵敏度 α_{pi} 、刚度修改灵敏度 β_{sti} 分别为

$$\alpha_{pi} = - \frac{\omega_i \Phi_{pi}^2}{2m_i} \qquad \beta_{sti} = \frac{(\Phi_{si} - \Phi_{ti})^2}{2\omega_i m_i}$$

(7)

2 模型设计制作及试验方法

2.1 模型设计制作

大圆筒原型外径 18.0 m、高 24.0 m、壁厚 0.4 m,取模型几何比尺 $\lambda_l = 1/72$,由模型相似律确定相关物理量.对于大圆筒结构的抗震问题,模型可以按抗弯刚度 EI 相似设计.钢筋混凝土重度 γ 可取 24.0 ~ 25.0 kN/m³,弹性模量 E 可取 31.5 GPa.根据有机玻璃、PVC 塑料、加重橡胶的动弹性模量和重度测试结果,模型材料选用加重橡胶,其重度约为 25.1 kN/m³,与钢筋混凝土的重度非常接近,满足相似要求.动弹性模量 $E = 92$ MPa,满足抗弯刚度相似,相应的模型外径、高度、壁厚分别为 250 mm,333 mm,40 mm.此外,用 L 形实心盖板模拟原型空心盖板及上部结构,并根据筒内填料的重度进行了模拟.

2.2 试验方法

沿大圆筒模型周向 16 等分,轴向 10 等分,离散成 176 个结点^①.激励采用锤击法,移动激励点的位置,加速度计固定在 1[#] 点,试验采用 CRAS 随机信号与振动分析系统进行数据采集和处理,该系统最大误差小于 0.3%.

为了对大圆筒本身振动特性有充分的了解,模态试验由简入繁,逐步深化,对 4 种工况下的大圆筒进行试验,试验工况如表 1 所列.

表 1 模态试验工况及大圆筒前二阶模态频率

Table 1 Operating modes of modal tests and first two orders of modal frequency of a large cylindrical structure

工况	边界			频率/Hz	
	上部结构	筒内填料	筒底约束	一阶	二阶
1	无	无	自由	22.8	72.7
2	有	无	自由	17.6	87.5
3	有	有	自由	23.0	87.0
4	有	有	固定	31.8	89.0

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

大圆筒前二阶模态频率如表 1 所列.典型的激励力和加速度响应波形见图 1,图 2 为第 4 组具有上部结构和筒内填料以及筒底固定结构的频响函数曲线,图 3 为该结构第一阶、第二阶模态振型.表 2 为动力修改(包括质量、刚度修改)对前二阶模态频率变化的灵敏度(表中列出了灵敏度较大的前 10 点).

① 顾培英.大圆筒码头结构抗震性能试验研究.南京水利科学研究院研究报告,2000.

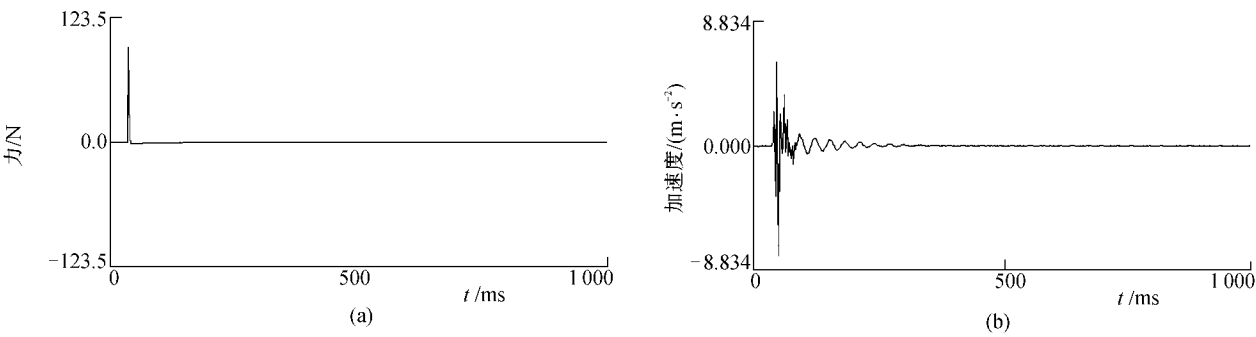


图 1 激励力和加速度响应波形

Fig.1 Waveforms of exciting force and acceleration response

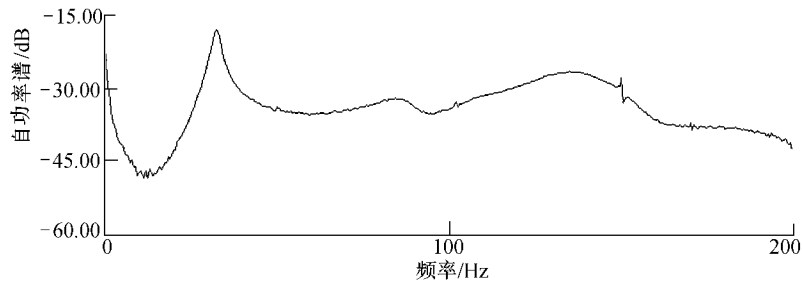


图 2 具有上部结构和筒内填料以及筒底固定结构的频响函数

Fig.2 Frequency response curve of a large cylindrical structure

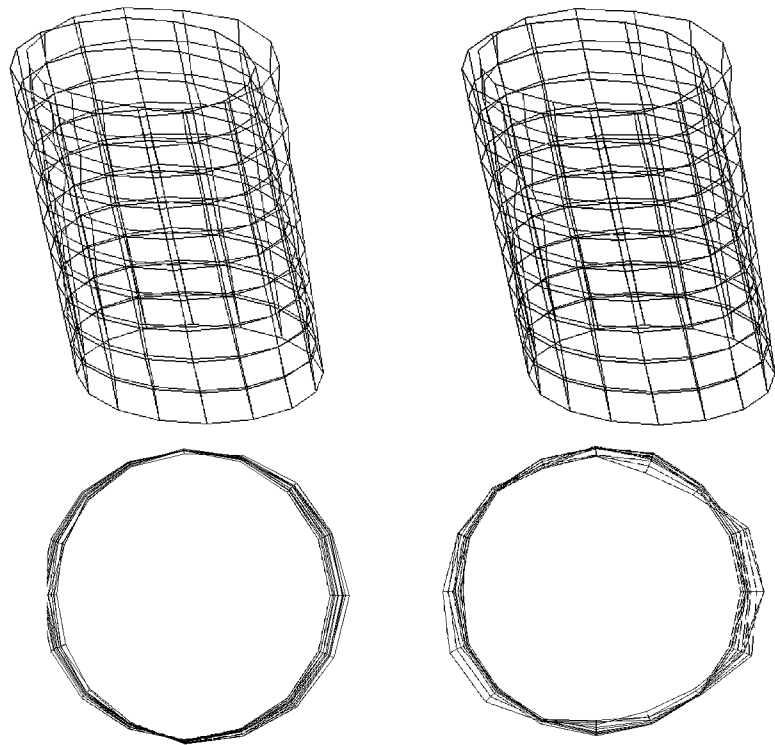


图 3 模态振型示意图

Fig.3 Modal mode of vibration

3.2 结果分析

3.2.1 模态试验

从图 3 模态振型和三维动画图形看,不同边界约束下大圆筒第一阶模态振型均为横向摇摆,横截面大小不变,第二阶模态振型为弯曲线,从横截面看,呈椭圆型振动,横向水平振动与振动台试验结果相符^[1].

根据表 1 所列的大圆筒前二阶模态频率结果得出,如果增加上部结构,则第一阶模态频率降低,第二阶

表 2 动力修改对前二阶模态频率变化的灵敏度
Table 2 Modal frequency sensibility to dynamic modification

序号	质量修改				刚度修改					
	第一阶模态		第二阶模态		第一阶模态			第二阶模态		
	自由度	灵敏度 /(Hz·kg ⁻¹)	自由度	灵敏度 /(Hz·kg ⁻¹)	自由度		灵敏度 /(10 ⁻⁵ Hz·N ⁻¹ ·m·s ⁻²)	自由度		灵敏度 /(10 ⁻⁵ Hz·N ⁻¹ ·m·s ⁻²)
1	1X	-0.66	34X	-2.99	1X	9X	5.7281	14X	34X	2.5515
2	2X	-0.50	17X	-2.63	1X	8X	5.5734	21X	34X	2.4602
3	9X	-0.49	1X	-2.60	1X	58X	5.0274	14X	17X	2.3596
4	8X	-0.46	50X	-2.23	1X	26X	5.0217	1X	14X	2.3451
5	17X	-0.43	32X	-2.12	2X	9X	4.9562	34X	53X	2.2872
6	16X	-0.40	16X	-1.53	1X	25X	4.9484	17X	21X	2.2718
7	58X	-0.37	66X	-1.31	1X	41X	4.8292	1X	21X	2.2576
8	26X	-0.37	33X	-1.29	2X	8X	4.8124	1X	4X	2.0575
9	25X	-0.35	18X	-1.28	9X	17X	4.6087	1X	5X	1.7938
10	32X	-0.34	14X	-1.19	1X	10X	4.5836	1X	12X	1.5898

模态频率增加.这是因为对于第一阶模态而言,相当于增加了上部质量,导致第一阶模态频率降低,但对第二阶模态而言,大圆筒顶部椭圆型振动受到约束,因而第二阶模态频率增加.筒内填料使大圆筒刚度增加,第一阶模态频率增加.大圆筒底面固定,毫无疑问模态频率增加.

3.2.2 动力修改

从结构质量修改对模态频率变化的灵敏度(表 2)可知,大圆筒上部结构质量修改对基频变化影响最大,特别是码头前沿 1[#]点,模型灵敏度为 -0.66 Hz/kg(换算到原型灵敏度为 -2.08×10⁻⁷ Hz/kg),经过动力修改,当大圆筒上部结构质量增、减 1.36 kg(约为原结构的 20%)时,模型基频从 31.80 Hz 变到 31.46 Hz、32.14 Hz,改变了 0.34 Hz.

根据结构刚度修改对模态频率变化的灵敏度(表 2),大圆筒顶部 1[#]点与 9[#]点间刚度修改对基频变化影响最大,模型灵敏度为 5.7281×10⁻⁵ Hz/(N·m⁻¹·s²),换算到原型灵敏度为 1.8080×10⁻¹¹ Hz/(N·m⁻¹·s²),可见刚度修改对基频变化的影响远小于质量修改的影响.

4 结 论

a.大圆筒第一阶模态振型为横向摇摆,第二阶呈椭圆弯曲型振动.因此,整个结构抗震设计时,可以只考虑第一阶振型,但对大圆筒本身而言,不能忽视第二阶振型的影响.

b.增加上部结构,第一阶模态频率降低,第二阶模态频率增加.筒内填料和筒底固定,大圆筒刚度增加,模态频率增加.

c.上部结构质量修改及 1[#]点与 9[#]点间刚度修改对模态基频变化的灵敏度影响最大,但刚度修改对基频变化的影响远小于质量修改的影响.

参考文献：

[1] 顾培英,陈中一,王五平.大圆筒码头结构模型振动台试验研究[J].中国港湾建设,2000(3):21~24.

Modal tests and dynamic modification for large cylindrical wharf structures

GU Pei-ying, WANG Wu-ping
(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Techniques of modal tests and dynamic modification are applied to the analysis of large cylindrical wharf structures. Modal frequencies and vibration modes are drawn from modal tests of a large cylindrical wharf model under 4 constraint boundaries. Furthermore, the optimum position and level for mass and stiffness modification are obtained. The results provide a scientific basis for aseismic design of large cylindrical wharf structures.

Key words: wharf; large cylindrical structure; dynamic characteristics; modal tests; dynamic modification