

校准点与方程(11)的最大正误差 $y = 0.08$

校准点与方程(11)的最大负误差 $y = -0.064$

截距 $b = b_1 + [y_1 + y_2]/2 = -0.48$

端点连线平移方程

$$y = 18.668x - 0.48 \quad (12)$$

各性能指标计算

传感器测量上限 $x_m = 100$

传感器测量下限 $x_1 = 0.026$

传感器满量程输出 $y_{F.S} = [(x_m - x_1)k] = 1866.3$

子样标准偏差 $S = 0.12$

置信系数 $\lambda = 3$

最大误差 $(y_L)^{max} = [|y_1| + |y_2|]/2 = 0.36$

(1) 重复性 $\xi_R = \frac{S}{y_{F.S}} \times 100\% = 0.02\%$

(2) 非线性度 $\xi = \frac{(y_L)^{max}}{y_{F.S}} \times 100\% = 0.02\%$

(3) 精度 $\xi = \frac{|(y_L)^{max}| + \Delta S}{y_{F.S}} \times 100\% = 0.04\%$

6 结束语

实验表明, 这种传感器性能稳定, 线性很好, 精度较高, 达到预期设计效果

为了提高测试精度, 减少误差, 应采取以下措施:

(1) 圆环内外表面应变片的粘贴, 必须贴在最大直径上, 且应变片几何尺寸尽量选小的为宜

(2) 通过实验表明, 为了保证测试精度, 必须选择高度合金钢材料且严格热处理工艺规程使其具有良好的弹性变形

(3) 每次实验时, 圆环装夹位置必须正确, 保证载荷作用点的连线垂直于被测点的连线

参 考 文 献

- 1 博雷西 AP 等著 高等材料力学 北京: 科学出版社, 1987
- 2 沈久珩 机械工程测试技术 北京: 冶金工业出版社, 1985
(1995年7月9日收到第1稿,
1996年4月22日收到修改稿)

调谐流体阻尼器 (TLD) 及其应用

沈国光

(天津大学海船系, 天津 300072)

摘要 以两层流体调谐阻尼器为例, 介绍了 TLD 的自振特性和减振机理, 通过计算实例阐明了两层流体 TLD 的优点和应用前景

关键词 减振, TLD, 分层流体

1 引言

振动问题关系到结构物的安全可靠度、使用寿命、作业条件和人员生存环境。在现代高层(耸)建筑、海

洋平台和舰船设计中如何经济而有效的克服振动所带来的危害, 一直是设计人员潜心研究的课题。70年代以来, 广泛发展的被动式调谐减振技术, 应用环境荷载(地震、风、波流、冰等)对结构物以及放置在结构物上减振装置的双调谐原理, 吸收部分振动能量, 其减振效果明显, 已在不少领域使用。目前在文献[1]中常见的此类装置有调谐流体阻尼器(Tuned liquid damper), 调谐质量阻尼器(Tuned mass damper), 调

谐流体柱阻尼器 (Tuned liquid column damper) 及与之原理相近或为其组合形式的摆阻器、防摇水舱和 TLCMD 等 所有这些装置都具有结构简单, 不需额外动力和控制的优点 图 1 给出的是在海洋平台和船舶上应用时的减振原理图

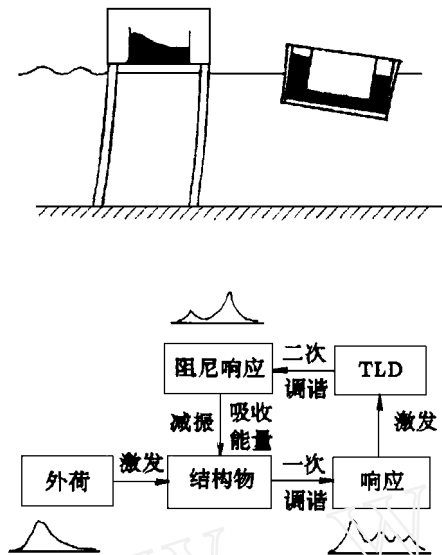


图 1 TLD 减振原理图

由于环境荷载的不规则性, 其频域一般较宽广, 结构物将在其几个固有频率点上发生谐振 如果调谐阻尼器只具有单一有效减振频率, 则二次调谐后只能在一个频率点附近发挥减振作用 由于单一流体调谐减振的功效主要来自基频, 它就属于上述之列 为克服这一缺欠, 人们提出 TLD 群和加大流体阻尼的方案^[2], 但由于增大了设备量和能量损耗, 并不十分可取 如果在 TLD 中置入两层互不相溶的不同密度流体则可克服上述不足 本文将双层流体 TLD 为例说明调谐流体减振的基本原理

2 矩形容器内流体的自振特性

考虑一个 x 向宽为 a 的矩形容器, 其内部置入的流体密度、厚度如图 2 所示 在理想流体和微幅波假定下, 可得出其自振频率与流体密度比 $R_{12} = \rho^1/\rho_2$ 和几何参数之间的关系^[3,4]

$$\omega_{\pm}^2 = \left\{ \frac{(1 - R_{12})k_n g + T_{12}k_n^3/\rho_2^2}{1 + R_{12}} \right\} th_{n2} \text{ (全充满时)} \quad (1)$$

$$\omega_{\pm}^2 = \left\{ \alpha_n \pm \sqrt{\alpha_n^2 - \gamma_n \beta_n} \right\} / \gamma_n \text{ (上端自由)} \quad (2)$$

式中 $k_n = \frac{n\pi}{a}$, $th_{ni} = th \frac{n\pi h_i}{a}$, $i = 1, 2, n = 1, 2, \dots$

$$a_n = k_n g (th_{n1} + th_{n2}) + T_{12} k_n^3 / \rho_2 th_{n2} +$$

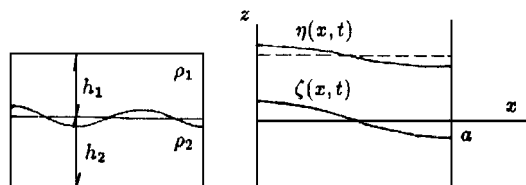
$$T_{01} k_n^3 / \rho_1 (th_{n1} + R_{12} th_{n2})$$

$$\beta_n = th_{n2} \cdot th_{n1} (k_n g + T_{01} k_n^3 / \rho_1)$$

$$((1 - R_{12})k_n g + T_{12} k_n^3 / \rho_2)$$

$$\gamma_n = 2(1 + R_{12} th_{n2} th_{n1})$$

g 为重力加速度, T_{01} 和 T_{12} 分别为自由表面和界面上的表面张力系数



(a) 全充满, 上端封死 (b) 上端敞开, 自由面

图 2 双层流体 TLD

不难看出, 上端为自由面时, 对应于每个 n (即波长 $\lambda = \frac{2a}{n}$) 都有两个固有频率 图 3 给出的是所选算例前 3 个固有频率与密度比的关系 (由于相对于中点晃动波型的反对称性, n 只取奇数).

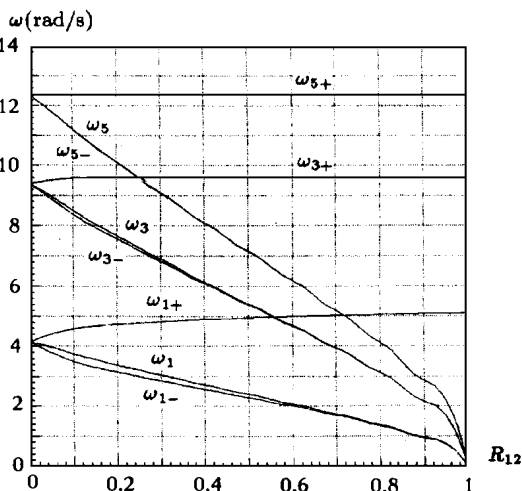


图 3 固有频率与密度比关系

$$a = 1 \text{ m}, h_1 = h_2 = 0.2 \text{ m}, \rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

3 对水平强迫激励的响应

设结构物以如下方式振动

$$x_s(t) = x_0 e^{i\Omega t} \quad (3)$$

利用分离变量法, 对上、下两层流体可得出其势流解,

并进而求得 TLD 对基底的剪力^[4]

$$F_l = \int_0^{h_1} [p_1|_{x=a} - p_1|_{x=0}] dz + \int_{-h_2}^0 [p_2|_{x=a} - p_2|_{x=0}] dz \quad (4)$$

p_1, p_2 是上、下层流体的压力, 有自由面时

$$F_l = \Omega^2 x_0 e^{i\Omega t} \left\{ \sum_{n=1,3,\dots} -\rho_1 (2C_n \text{Sh}_{n1} + B_n \text{sh}_{n2} (\text{ch}_{n1} - 1)) / k_n + m_1 + \sum_{n=1,3,\dots} -\rho_2 2B_n \text{sh}_{n2} / k_n + m_2 \right\} \quad (5)$$

式中

$$B_n = -\frac{4a}{\pi^2} \Omega^2 \frac{1}{n^2} \left\{ [(\rho_2 - \rho_1) - \rho_1 \Omega^2 / W] \right\} / \left\{ g(\rho_2 - \rho_1) \text{sh}_{n2} k_n - \Omega^2 (\rho_1 Q / W + \rho_2 \text{ch}_{n2}) + T_{12} \text{sh}_{n2} k_n^3 \right\}$$

$$C_n = \left[-\frac{4a}{\pi^2 n^2} - B_n Q \right] / W$$

$$W = k_n g \text{sh}_{n1} - \Omega^2 \text{ch}_{n1} + T_{01} \text{sh}_{n1} k_n^3 / \rho_1$$

$$Q = g \text{sh}_{n2} \text{ch}_{n1} k_n - \Omega^2 \text{sh}_{n2} \cdot \text{sh}_{n1} + T_{01} \text{sh}_{n2} \cdot \text{sh}_{n1} k_n^3 / \rho_1$$

引入与速度成比例的阻尼力可以很好地描述流体的粘性效应 (由于此力有势, 可以不影响势流前提, 导出相似的 Bernoulli 关系式)。对于强迫振动问题, 可将运动解分解为不同分量 $x_{jn} \cos(\Omega t + \theta_{jn})$

的组合, 其时间依赖函数 $f_{jn}(t)$ 应满足^[4]

$$\ddot{f}_{jn} + 2\nu_i \omega_n \dot{f}_{jn} + \omega_n^2 f_{jn} = \ddot{x}_s \quad (6)$$

式中 ν_i 为 i 层流体阻尼系数, 下标 $j=1, 2$ 对应于两层流体有自由面时 ω_{\pm} 的两组解, 而 n 表示振型序号

$$x_{jn} = \frac{x_n}{\sqrt{(\omega_n^2 - 1)^2 + (2\nu_i \omega_n)^2}}, \quad \bar{\omega}_{jn} = \frac{\omega_n}{\Omega}$$

$$\theta_n = \theta + \text{tg}^{-1} \frac{2\nu_i \bar{\omega}_n^2}{1 - \bar{\omega}_n^2}$$

进一步可将 F_l 表为

$$F_l = - \sum_{i=1}^2 m_i \left[\sum_{j=1}^2 \sum_{n=1,3,\dots} \alpha_{nj}^* \omega_{jn}^2 f_{jn}(t) - \beta_i^* \ddot{x}_s(t) \right] \quad (7)$$

$$\alpha_{nj}^* = - (2C_n \text{Sh}_{n1} + 2B_n \text{sh}_{n2} (\text{ch}_{n1} - 1)) \frac{\bar{\omega}_n^2 - 1}{n\pi h_1}$$

$$\alpha_{nj}^* = - 2B_n \text{sh}_{n2} \frac{\bar{\omega}_n^2 - 1}{n\pi h_2}$$

$$\beta_i^* = 1 - \sum_{j=1}^2 \sum_{n=1,3,\dots} \alpha_{nj}^*$$

α_{nj}^* 为 i 层流体以 ω_n 方式振荡的流体质量分数, β_i 为随基底做刚体运动的质量分数

为考查减振效果, 计算一个周期内 TLD 对基底的作功

$$\Delta W = \int_0^T F_l v_s dt = - \sum_{i=1}^2 \pi m_i x_0 \sum_{j=1}^2 \sum_{n=1,3,\dots} \alpha_{nj}^* \omega_{jn}^2 x_{jn} \sin(\theta_n - \theta) \quad (8)$$

此功为负, 表示吸收能量起消振作用。再定义 TLD 的功率 \bar{P} 和单位质量的减振阻尼系数 C ^[2]

$$\bar{P} = \frac{\Delta W}{T}$$

$$C = - \frac{2\bar{P}}{\Omega^2 x_0^2 (m_1 + m_2)}$$

图 4 给出的是减振阻尼系数与激振频率的关系。可以看出图上有 4 个谐振点, 虽然在第 1 个谐振点

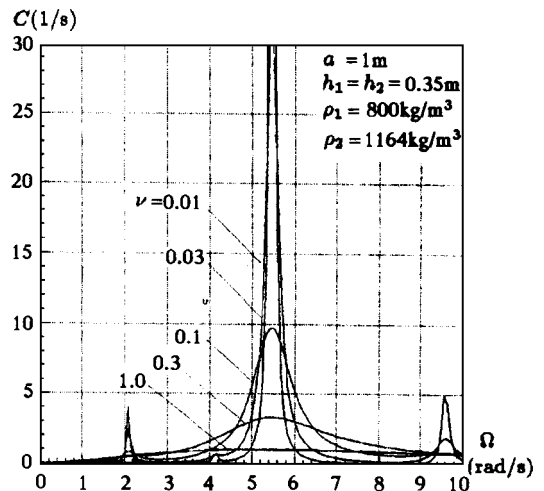


图 4 减振阻尼系数与激振频率关系

$\Omega = 2.105 \text{ 1/s}$ 处的 C 值比第 3 个点 $\Omega = 4.61 \text{ 1/s}$ 的值小近 10 倍, 但注意到减振阻尼系数是相对于 x_0^* 定义的, 而低频时的激振幅值 x_0 也大, 故相应的功率 \bar{P} 并不一定小。算例的结果是: 以 ω_+ 方式振荡的 $\alpha_{i1}^* = 0.5533$, $\alpha_{i1} = 0.2242$, 以 ω_- 方式振荡的 $\alpha_{i2}^* = 0.0821$, $\alpha_{i2} = 0.0726$, 本例显现还是 ω_+ 占优。

4 TLD 与结构物的相互作用

对于单自由度的结构物运动, 当计入放置其上的 TLD 效应后其运动控制方程为

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = F(t) + F_l \quad (9)$$

式中 m_s , c_s , k_s 分别为结构物的质量、阻尼和刚度系数, F 为结构所受外力, 而 TLD 对结构物的力 F_l 由式 (7) 和 (6) 给出。

对于复杂结构物 (以高层建筑为例) 当计入 TLD 的作用后其运动方程可表示为^[5]

$$[M]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{P(t)\} + \{H\}F_l \quad (10)$$

式中 $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$ 为结构振动方向的层位移、速度和加速度向量, $\{P(t)\}$ 为荷载向量 (如风), $\{H\}$ 为 TLD 设置层位置向量。应用振型迭加法可以得结构广

义坐标的方程, 再与对应的 (7)、(6) 联立便可求得响应过程。

5 结束语

调谐减振装置在工程设计中的应用已日趋广泛。本文重点介绍了双层流体 TLD 的特性, 说明了它的应用前景。结合此题, 今后应在实验研究、应用 MAC 方法对非线性和粘性效应进行数值模拟及表面张力影响等方面深入地开展工作。

参 考 文 献

- 1 Sun L M, et al. Nonlinear Waves and Dynamic Pressures in Rectangular Tuned Liquid Damper (TLD) - Simulation and Experimental Verification. Proc JSCE, 1989, (410): 81 ~ 92
- 2 王翎羽, 陈星, 安国亭. 矩形 TLD 减振作用的定量分析法则. 建筑工程学报, 1995, 16 (3): 29~ 36
- 3 Bauer H F. Oscillations of immiscible liquid in a rectangular container: A new damper for excited structures. *J Sound and Vibration*, 1984, 93 (1): 117~ 133
- 4 沈国光, 王日新, 李德筠. 分层流体 TLD 特性分析. 水动力学研究与进展, Ser A. 1996, 11 (2)
- 5 瞿伟廉, 宋波, 陈妍桂, 瞿新民. TLD 对珠海金山大厦风振控制的设计. 建筑工程学报, 1995, 16 (3): 21~ 28
(1995 年 3 月 7 日收到第 1 稿,
1996 年 5 月 30 日收到修改稿)

软粘土动剪切模量的研究

翟瑞彩

(天津大学, 天津 300072)

摘要 本文建立了动剪切模量随深度变化的函数关系, 运用模糊概率对动剪切模量进行评述, 以供地基的动力稳定性分析。

关键词 软粘土, 动剪切模量, 隶属度, 模糊概率

海洋工程建筑物除受静荷载的作用之外, 经常受到风、浪等动荷载的作用。此外, 渤海海域为高烈度地震区, 在地震中这些建筑物还要受到地震荷载这种动荷载的作用。分布在渤海海底表层 15m 之内的软粘土主要是淤泥、淤泥质粘土、淤泥质粉质粘土层, 这类软粘土在动荷载作用下会发生振动弱化, 从而易使建筑

物发生滑移和沉降等。因此, 在进行海洋工程建筑物的地基设计计算中, 应做地基的动力稳定性分析, 这时需要用到土的动力参数——动剪切模量。我们主要讨论渤海海底某一区域内软粘土动剪切模量随深度的变化规律, 并对该动力参数进行模糊概率分析。

1 动剪切模量随深度的变化规律

我们将渤海石油开发区某块内 8 个钻孔中不同动剪应变对应的动剪切模量 G 与深度 h 的关系数据描绘在坐标平面上, 并选用对数曲线

$$G(h) = a + b \ln h \quad (a, b \text{ 为常数})$$