

Computation Model and Analysis of Influencing Factors for Underwater Monitoring Platforms Dynamic Characteristic*

Kongde He, Zifan Fang, Yi Zhang, Weihua Yang

Mechanic and Material College, China Three Gorges University, Yichang
Email: hekognde@ctgu.edu.cn

Received: Dec. 17th, 2012; revised: Jan. 18th, 2013; accepted: Jan. 26th, 2013

Copyright © 2013 Kongde He et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The paper aimed at the dynamic characteristic of underwater monitoring platform, which endured drag force, normal lift along flow and buoyancy, and taken into account the influence of flow force to structures dynamic characteristic, the computational model was formulated with the finite computing method of structure vibration modal on flow field and infinitesimal method idea. The influencing factors were discussed for natural frequency of underwater monitoring platform by numerical analysis method. Natural frequency of buoy was far from the vortex release frequency by adjusting the influencing factors. This method can effectively decrease the vibration by resonance and it has important implications to design the underwater monitoring platform.

Keywords: Underwater Monitoring Platform; Dynamic Characteristic; Computation Model; Numerical Simulation

水下监测平台动态特性计算模型及影响因素分析*

何孔德, 方子帆, 张 屹, 杨蔚华

三峡大学机械与材料学院, 宜昌
Email: hekognde@ctgu.edu.cn

收稿日期: 2012年12月17日; 修回日期: 2013年1月18日; 录用日期: 2013年1月26日

摘 要: 论文针对水下监测平台动力学特性问题, 利用流场中结构振动模态的有限元计算方法及微元法的思想, 考虑了流体对结构动态特性的影响, 建立了水下监测平台浮体在流体的拖曳力、流体的垂直升力、浮力作用下的计算模型。通过数值分析方法, 探讨了水下监测平台浮体固有频率的影响因素, 通过对影响因素的调整, 可以使浮体结构的固有频率远离水流漩涡释放频率, 有效地减小共振给监测平台带来的危害, 对水下监测平台的设计具有十分重要的意义。

关键词: 水下监测平台; 动态特性; 计算模型; 微元法

1. 引言

水下监测平台是水下监测系统图像采集仪器与设备的支撑平台, 横向布放于安检区域, 安装在其上的声纳线阵垂直水面向上, 连续发射探测脉冲, 实现声纳线阵波束对安检区域的扫描, 声纳线阵将接收到

的每帧回波数据实时发送到安检岸站声纳处理器, 形成单幅窄带图像, 声纳处理器将接收到的连续窄带图像进行在线合成处理, 自动拼接形成三维图像进行识别。由水下监测平台、基站信息处理与识别系统、应急处理系统三部分组成的水下监测系统, 其工作原理示意图如图1所示。

*基金项目: 国家自然科学基金(51275274)。

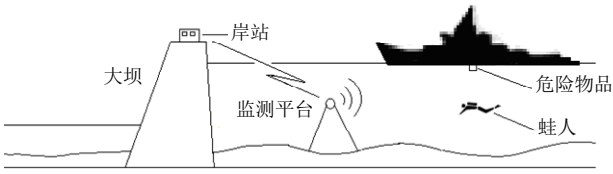


Figure 1. Schematic plot of underwater platform principle
图 1. 水下监测系统工作原理示意图

水下监测平台组成示意图如图 2 所示, 是由锚、系泊缆、被系泊的浮体以及安装在浮体上的声纳、传感器组成。这类系统需要长期工作于水下环境, 能够连续、实时地测量周围水域的多种环境参数, 为了获得实时稳定的信号, 避免外界环境的干扰, 进行水下监测平台的动态特性研究及其影响因素的分析具有十分重要的意义。

近年来, 有很多学者针对水下结构做了大量研究, 并取得了一些成果, Christian Cabos^[1]利用有限元方法对三维船体结构进行了流固耦合分析, 研究了其动态特性, 但是建模过程复杂, 计算量大, 没有考虑附加水域的作用; 叶伟、赵德有等学者利用薄壁杆件理论的有限元模型对集装箱这类大船进行了弯扭耦合振动分析^[2,3]; 董国海等学者对深水重力式网箱浮架进行了流固耦合研究^[4], 这些研究都没有给出结构体外的附加水质量对其动态特性的影响, 目前检索到的文献也很少有考虑附加水域对结构体影响的研究, 本文利用流场中结构振动模态的有限元计算方法, 结合微元法的思想, 考虑了流体对结构动态特性的影响, 建立了水下监测平台浮体在流体的拖曳力、流体的垂直升力、浮力作用下的计算模型, 探讨了水下监测平台浮体固有频率的影响因素, 该方法可以在设计中使水流湍流释放频率远离浮体结构的固有频率, 有效地减小共振给监测平台带来的危害, 对水下监测平台的设计具有十分重要的意义。

2. 流体作用力

图 2 所示的水下监测平台, 在进行动态特性分析时, 忽略接头的影响, 将其简化为图 3 所示的示意图。将坐标原点 O 设在监测平台浮体左端面中心位置处, X 轴和浮体轴线重合, Z 轴沿流速方向, Y 轴垂直 ZOY 平面, 指向水面。

当水流流过浮体时, 垂直于流速方向的作用力可以分为两部分, 一部分为涡激振动产生的水流涡激升

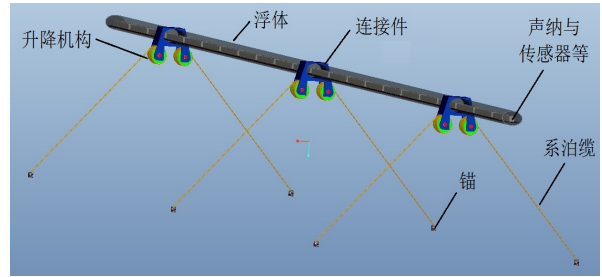


Figure 2. Schematic plot of underwater platform composition
图 2. 水下监测平台组成示意图

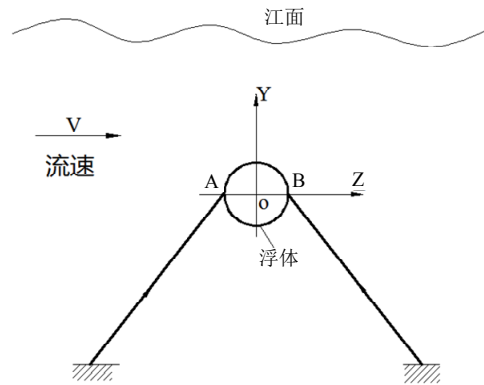


Figure 3. Simplified schematic plot of monitoring platform
图 3. 监测平台简化示意图

力 $f_i(x,t)$, 另一部分为水流产生的拖曳力 $f_d(x,t)$ 和惯性力 $f_g(x,t)$, 垂直于流速方向的作用力为:

$$f(x,t) = f_i(x,t) - f_d(x,t) - f_g(x,t) \quad (1)$$

拖曳力 $f_d(x,t)$ 和惯性力 $f_g(x,t)$ 可根据 Morison 公式计算^[5], 考虑浮体和水流的相对运动, 设江水为无黏流体, 且为均匀定常流体, 作用于单位长度上流体产生的拖曳力和惯性力分别为:

$$f_d(x,t) = C_D \rho \frac{D}{2} \left| \frac{\partial y}{\partial t} \right| \frac{\partial y}{\partial t} \quad (2)$$

$$f_g(x,t) = C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3)$$

C_D 为黏性阻力系数, ρ 为江水密度, D 为浮体直径, C_M 为惯性力系数。

$f_i(x,t)$ 可根据“卡门涡旋”理论求解^[6]:

$$f_i(x,t) = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 D \quad (4)$$

v 为江水的流速, C_L 为升力系数。

把式(2)、(3)、(4)代入(1)可得单位长度浮体所受作用力为:

$$f(x,t) = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 D - C_D \rho \frac{D}{2} \left| \frac{\partial y}{\partial t} \right| \frac{\partial y}{\partial t} - C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (5)$$

3. 计算模型

考虑到水下系泊监测平台浮体在流体的拖曳力、流体的垂直升力、浮力的作用下，在流速方向和垂直于流速方向会产生较大位移，但是在流速方向位移很快趋于平稳，垂直于流速方向的位移由于水流涡激升力的影响会产生振动^[7]。设监测平台浮体垂直于流速方向离开它的平衡位置的位移是 $y(x,t)$ ，并假定这个位移足够小，而且浮体在运动过程中，截面始终满足经典梁理论中的平截面假设^[8]。从距离左端 x 处取长度为 dx 微元进行分析，如图 4 所示。

经以上分析可知，单位长度管段受到的垂直于流速方向的作用力为 $f = f(x,t)$ ；根据惯性定理可知单位长度管段上受到的惯性力和流体阻尼力为：

$$f_i = m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C \frac{\partial y}{\partial t} \quad (6)$$

式中 C 为水动力阻尼系数， m 为单位长度浮体质量。根据文献[9]，水动力阻尼系数 C 可按下式计算：

$$C \approx \frac{4\omega}{3\pi} \rho C_D A_L U \quad (7)$$

式中 ω 为浮体振动的无阻尼固有频率， A_L 为浮体的横截面积， U 系泊缆稳态响应的幅值。

根据达朗伯 - 拉格朗日原理，建立浮体微元在 Y 方向的平衡方程：

$$Q + f dx - (Q + dQ) - f_i dx = 0 \quad (8)$$

简化(8)可得：

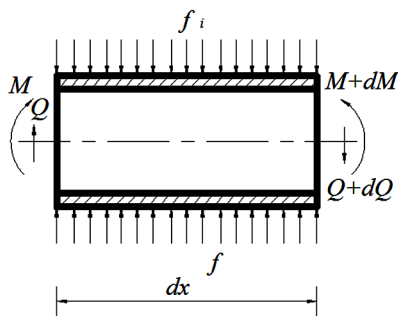


Figure 4. Force diagram of infinitesimal for buoy
图 4. 浮体微元受力图

$$dQ = f dx - f_i dx \quad (9)$$

根据材料力学理论，有 $Q = \frac{\partial M}{\partial x}$ ， $dQ = \frac{\partial Q}{\partial x} dx$ ，式(9)可以化为：

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + f_i = f \quad (10)$$

根据材料力学弯矩和弯曲曲率之间的关系有：

$M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ ，可以得到水下监测平台浮体在 YOX 平面内的动力学方程为：

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C \frac{\partial y}{\partial t} = f \quad (11)$$

式中 EI 为弯曲刚度。

将(5)式代入(11)式可以得到水下监测平台浮体在涡激作用下的振动控制方程为：

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \left(m + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 D - C_D \rho \frac{D}{2} \left| \frac{\partial y}{\partial t} \right| \frac{\partial y}{\partial t} - C \frac{\partial y}{\partial t} \quad (12)$$

4. 动力学特性分析

式(12)是水下监测平台浮体在涡激作用下的振动控制方程，等式右边为干扰力，忽略干扰力，可以得到水下监测平台自由振动的方程：

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \left(m + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

其中 $C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ 项为流体附加质量的影响，这和空气中结构的自由振动方程有所不同，该项表明水下监测平台浮体在水中的自由振动特性不但和自身的结构有关还和浮体排开流体的质量有关。方程(13)有两个自变量，是偏微分方程，可以通过“分离变量法”求解，将 $y(x,t)$ 分解为两个单变函数的乘积：

$$y(x,t) = X(x)T(t) \quad (14)$$

$X(x), T(t)$ 分别为仅含有 x 和 t 的单变量函数。把式(14)代入(13)，偏微分符号 ∂ 可以写为常微分 d ，可以得到以下方程：

$$\frac{T''}{T} = \frac{EI}{m + \frac{1}{4} C_M \rho \pi D^2} \frac{X^{(4)}}{X} \quad (15)$$

由于变量 x, t 是独立变量, 方程(15)左端为含有变量 t 的方程, 右端为含有变量 x 的方程, 要使等式成立, 必须有方程等于同一个常数, 设该常数为 $-\omega^2$, 方程(5)可以改写为两个微分方程:

$$\frac{d^2T}{dt^2} + \omega^2 T = 0 \quad (16)$$

$$\frac{d^4X}{dx^4} - \frac{m + \frac{1}{4}C_M \rho \pi D^2}{EI} \omega^2 X = 0 \quad (17)$$

求解式(16)、(17)得:

$$T = A_1 \sin \omega t + A_2 \cos \omega t \quad (18)$$

$$X = B_1 \sin kx + B_2 \cos kx + B_3 \operatorname{sh} kx + B_4 \operatorname{ch} kx \quad (19)$$

其中 ω 为监测平台浮体的自振频率,

$k^4 = \frac{m + \frac{1}{4}C_M \rho \pi D^2}{EI} \omega^2$, $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, B_4$ 为待定常数, 可以根据系泊缆的约束作为边界条件确定, $k = \frac{n\pi}{l}$, 其中 l 为每组系泊缆间的距离, 因此有:

$$\omega = \left(\frac{n}{l} \pi\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m + \frac{1}{4}C_M \rho \pi D^2}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (20)$$

5. 影响因素分析

5.1. 设计参数

根据设计要求, 水下监测平台相关的设计参数如表 1 所示。

5.2. 影响因素分析

从式(20)可以看出, 水下监测平台浮体固有频率

Table 1. Design parameters
表 1. 设计参数

系泊缆间的距离 $l(m)$	12.5
浮体的长度 $l(m)$	50
浮体直径 $D(m)$	0.2
浮体的弹性模量 $E(pa)$	2×10^{11}
惯性力系数 C_M	1
江水密度 $\rho(Kg/m^3)$	1×10^3
浮体质量(Kg)	1463
系泊缆数量	6

的影响因素主要有每组系泊缆间的距离 l 、单位长度浮体质量 m 、浮体直径 D 以及浮体的结构刚度 EI 。浮体的结构刚度主要由浮体材料的弹性模量和转动惯量决定, 浮体材料选定后其弹性模量不会改变, 但是转动惯量是由单位长度浮体质量和浮体直径确定, 因此影响监测平台浮体的固有频率的因素主要是每组系泊缆间的距离 l 、单位长度浮体质量 m 、浮体直径 D 。

图 5 是浮体一阶频率与系泊缆支撑间距的关系, 从图 5 可以看出, 浮体的固有频率随着系泊缆间距的增大而逐渐降低, 但不呈线性变化, 固有频率下降的幅度先快后慢, 到一定程度后, 改变支撑间距对固有频率的影响很小。

图 6 是浮体一阶频率与直径的关系。浮体直径增大, 其结构刚度和附加质量都有增大, 但是结构刚度和直径呈四次方变化, 而浮体质量和附加质量呈平方项变化。因此浮体的固有频率随着浮体直径的增大而

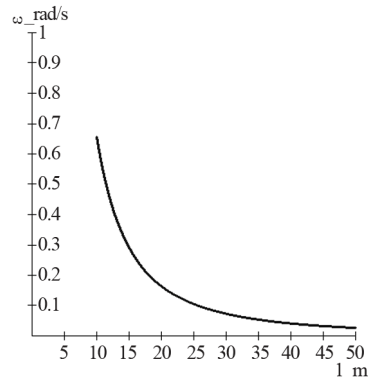


Figure 5. Relations between the first natural frequency and support distance of mooring cable
图 5. 浮体 - 一阶频率与系泊缆支撑间距的关系

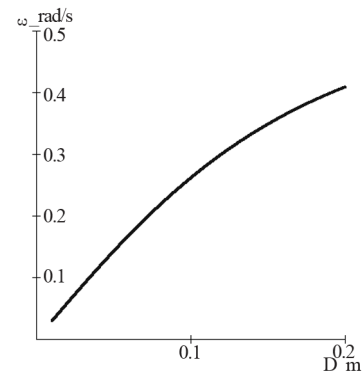


Figure 6. Relations between the first natural frequency and diameter of buoy
图 6. 浮体 - 一阶频率与直径的关系

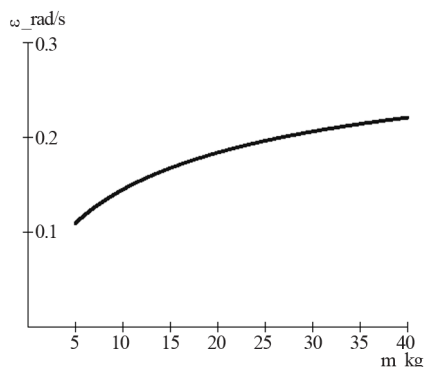


Figure 7. Relations between the first natural frequency and mass per unit length of buoy
图 7. 浮体 - 阶频率与单位长度质量关系

逐渐增大，但不呈线性变化，增大幅度较快，浮体直径可以作为改变其固有特性的主要调整因素。

图 7 是浮体一阶频率与单位长度浮体质量的关系。浮体的固有频率随着单位长度质量的增大而逐渐增大，增大幅度较慢，但不呈线性变化。

6. 结论

综合分析图 5 到图 7 可知，每组系泊缆间的距离 l 、单位长度浮体质量 m 、浮体直径 D 都会对其固有频率产生影响，但各自的影响程度不同，在所讨论的影响因素中，系泊缆间的距离和浮体直径对其固有频

率影响较大，单位长度浮体质量影响最小。一旦浮体材料选定后，单位长度浮体质量也随之确定，但浮体直径及系泊缆间的距离变化范围却比较大。因此在进行水下监测平台浮体设计时，应以浮体直径及系泊缆间的距离为主控因素，当已知水流速度时，可以选择合适的浮体直径使得水流漩涡释放频率远离浮体的固有频率，从而有效地减小由于共振给监测平台带来的危害。

参考文献 (References)

- [1] C. Cabos, F. Ihlenburg. Vibrational analysis of ships with coupled finite and boundary elements. *Journal of Computational Acoustics*, 2003, 11(1): 91-114.
- [2] 叶伟, 俞国新, 陆鑫森. 集装箱船弯扭耦合振动分析[J]. *中国造船*, 1995, 1: 36-44.
- [3] 黎胜, 赵德有, 郭昌捷. 船体弯扭耦合振动计算研究[J]. *中国造船*, 2000, 41(2): 72-77.
- [4] 郝双户, 董国海, 宗智, 郑艳娜. 圆环在波浪作用下的非线性流固耦合分析[J]. *工程力学*, 2007, 24(7): 53-58.
- [5] 唐友刚. *海洋工程结构力学*[M]. 天津大学出版社, 2008.
- [6] 李晓平. 多体系统动力学建模方法及在水下缆索中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [7] 麦继婷. 波流作用下悬浮隧道的响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [8] 聂毓琴, 孟广伟. *材料力学*[M]. 机械工业出版社, 2009.
- [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[J]. *海洋学报*, 1998, 20(3): 119-128.