

水下监测平台系泊缆冲击张力的数值模拟*

何孔德^{1,2}, 李友荣¹, 方子帆², 杨蔚华^{1,2}

(1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉, 430081)(2. 三峡大学机械与材料学院 宜昌, 443002)

摘要 针对水下监测平台系统在水流作用下的动力响应及系泊缆的冲击张力问题, 基于 Hopkinson 冲击载荷理论, 考虑系泊缆的垂度效应, 采用等效弹性模量法修正了系泊缆拉力和弦向作用力之间的差异, 建立了水下监测平台浮体和系泊缆在碰撞及稳定运行过程中的系统动力学模型。利用水力学理论和海洋工程结构力学理论对其进行求解, 研究了在受到冲击及冲击结束后系泊缆的受力特性和平台的运动特性。针对具体算例和水文环境进行计算。计算结果表明, 在水流的作用下, 浮体会产生较大的垂荡和横荡位移, 横荡位移很快趋于稳定, 垂荡位移由于水流涡激升力的影响会产生振动。由于浮体和系泊缆间冲击的存在, 以及水流涡激升力的影响, 系泊缆在松弛-张紧转变过程中, 其张力产生较大的变化。

关键词 水下监测平台; 系泊缆; 冲击; 数值模拟

中图分类号 TH113.1

1 问题的提出

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。

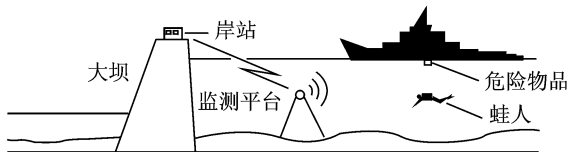


图 1 水下监测系统工作原理示意图

水下监测平台的重要组成部分。系泊缆的工作环境十分复杂, 当平台运动时, 平台运动产生的能量会通过系泊缆传到江底。在这个过程中, 系泊缆吸收了大部分能量, 当平台由于外界环境的变化做大幅运动时, 系泊缆会出现张紧-松弛的反复快速变化, 引起系泊缆内张力的突变, 产生冲击载荷。这种冲击载荷要比静态载荷和普通动载荷大得多, 系泊缆在这种循环载荷的作用下很容易发生疲劳破坏, 对监测平台的工作稳定性和可靠性产生重要影响, 研究系泊缆在受到冲击时其张力的变化对监测平台的设计工作具有十分重要的指导意义。

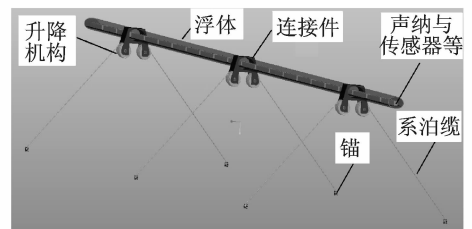


图 2 水下监测平台组成示意图

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, 作为

水下监测平台是一种新型的监测装置, 其设计中尚无现成的设计规范和资料可以参考, 工作环境复杂, 承受了很多的不确定性载荷。除自重等确定性载荷外, 还有波浪力、水流冲击力等都是不确定性

* 湖北省自然科学基金资助项目(2010CDB10804)
收稿日期: 2011-07-14; 修改稿收到日期: 2011-09-26

载荷,这些载荷的随机性都必须在结构分析、设计中予以考虑。虽然国内外少有学者从事水下监测平台的研究,但是有学者从事海洋系泊平台和水下悬浮隧道的研究,并取得一些相关的成果,这些成果对于水下监测平台的设计有一定的参考意义。Kamman 等使用空间离散方法对包含固定长度和可变长度缆段的拖曳系统进行了仿真研究^[1]。Niedzwecki 等提出一种多自由度的集中质量模型,用以研究水下缆索在冲击载荷下的响应,但是这种方法计算量大,对缆索弹性问题的处理欠缺精度^[2]。李晓平等学者应用 Huston 提出的缆索有限段方法,考虑了流场作用力性质,推导了流体切向力、法向阻力和附加质量对应的广义力表达式,建立了水下缆索三维有限段模型的动力学方程,但没有考虑缆索受到突变载荷以及浮体和缆索的耦合效应引起的振动^[3]。麦继婷进行了波流作用下悬浮隧道的动力学响应研究,把悬浮隧道的力学模型简化为两端简支的梁^[4],与水下监测平台的空间运动状态不符。笔者在研究监测平台受到冲击的力学模型的基础上,借鉴 Hopkinson 的冲击载荷理论,建立了水下监测平台力学模型,利用水力学理论和海洋工程结构力学理论对其进行求解,研究了在受到冲击载荷时系泊缆的受力特性和平台的运动特性。

2 浮体与系泊缆碰撞后动力学方程的建立

由文献^[4]可知,水下浮体结构在放置深度、表面流速、总水深和断面形式不同的条件下,垂直浮体轴向的流体力和绕流阻力数值最大,沿浮体轴向的流体力和绕流阻力数值最小,根据监测平台的受力特点和与系泊缆的相互作用可知,影响系泊缆张力的主要运动是监测平台在流速方向的平面运动,图 3 为其简化示意图。

对于图 3 监测平台简化示意图,在水文环境的改变或外来干扰的影响下,浮体会产生不稳定的运动,破坏其初始平衡。由于系泊缆较轻,在外来干扰的作用下,会产生突然的绷紧或松弛,引起浮体和系泊缆之间的碰撞,产生冲击载荷。根据 Hopkinson 的冲击载荷理论^[5],由于浮体在 YOZ 平面内作平面运动,浮体突然运动时,会与系泊缆冲击产生冲击力。由于系泊缆的弹性,还将产生弹性拉力,同时浮体还受到水流方向的拖曳力、流体的阻力、江水的浮

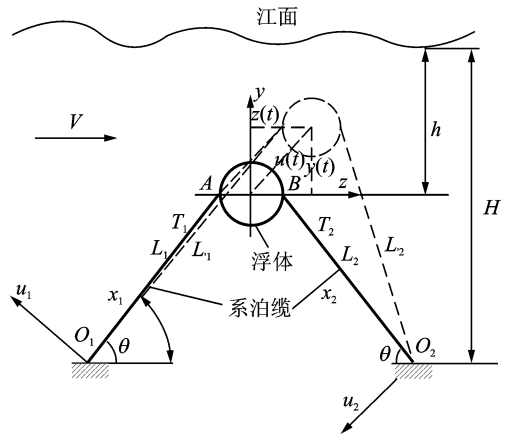


图 3 监测平台简化示意图

力、自身的重力。设坐标原点 O 位于浮体的初始位置,忽略系泊缆上的波浪力,根据牛顿力学定律,建立浮体与系泊缆碰撞时的运动方程为

$$m \frac{d^2 Y}{dt^2} = -A_c \rho_c C_0 \frac{dY}{dt} - kY - C \frac{dY}{dt} + F_Y \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = -A_c \rho_c C_0 \frac{dZ}{dt} - kZ - C \frac{dZ}{dt} + F_Z \quad (2)$$

其中: m 为浮体的质量; A_c 为系泊缆的横截面积; ρ_c 为系泊缆的密度; $C_0 = \sqrt{E/\rho_c}$; E 为系泊缆的弹性模量; k 为系泊缆刚度系数; C 为水动力阻尼系数。

浮体与系泊缆碰撞结束之后,浮体将产生初始位移和初始速度。浮体将以该初始位移为起点,以该初始速度在系泊缆的弹性拉力、水流方向的拖曳力、流体的升力、水的阻力、江水的浮力、自身的重力的作用下继续运动,直到达到平衡位置为止。根据牛顿力学定律,建立浮体与系泊缆碰撞后的运动方程为

$$m \frac{d^2 Y}{dt^2} = -kY - C \frac{dY}{dt} + F_Y \quad (3)$$

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = -kZ - C \frac{dZ}{dt} + F_Z \quad (4)$$

2.1 系泊缆静张力及静变形的求解

浮体处于静平衡位置时的受力图如图 4 所示。

浮体在静平衡位置受到系泊缆的张力 T_1, T_2 , 浮力 F 和浮体重力 W 的作用。由于系泊缆的安装位置为对称安装,所以有

$$T_1 = T_2 = \frac{F - W}{2 \sin \theta} \quad (5)$$

其中: θ 为系泊缆的安装角度。

根据材料力学原理,系泊缆在张力 T_1, T_2 的作

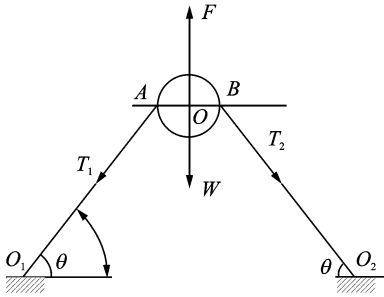


图4 静平衡位置浮体受力图

用下的静变形量为

$$\Delta l = \frac{T_1 l}{EA} \quad (6)$$

其中: l 为系泊缆的长度。

2.2 浮体运动时系泊缆变形量及张力的求解

2.2.1 系泊缆变形量

式(1~4)右边的第二项为考虑弹性变形时系泊缆所产生的张力,其大小为系泊缆刚度和变形量的乘积,水下监测平台在水流的作用下,两侧的系泊缆的变形是不同的。设由于浮体的运动产生的系泊缆的弹性变形为 $u_i(t)$,参考图3,并根据位移变形协调条件可知

$$u_1(t) = l'_1 - l_1 = Y \cos \theta + Z \sin \theta \quad (7)$$

$$u_2(t) = l'_2 - l_2 = Y \cos \theta - Z \sin \theta \quad (8)$$

2.2.2 系泊缆刚度

系泊缆是水下监测平台的主要约束构件,其性能对整个平台的动态性能有着重要的影响。系泊缆作为只受单向拉应力的柔性构件,在其自身重力和水流力的影响下产生一定垂度,在计算求解的过程中,应考虑垂度的影响^[6]。目前对系泊缆的垂度效应的计算主要采用等效弹性模量法。由于水下监测平台的系泊缆是处于绷紧状态,在分析过程中,常将其模拟成直杆桁架单元,认为其拉力沿弦向作用,但是由于系泊缆有一定的垂度,其拉力和弦向作用力之间存在一定的差异,根据 Ernst 建议,采用等效弹性模量法来修正它们之间的偏差^[7]。其计算公式为

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{(ql_x)^2 EA_c}{12T^3}} \quad (9)$$

其中: q 为单位长度系泊缆重量; l_x 为系泊缆水平投影长度; E 为系泊缆的弹性模量; A_c 为系泊缆的截面积; T 为系泊缆的初始张力,初始张力可通过浮体的静平衡位置求解, $k = \frac{E_{eq} A_c}{l}$ 。

2.2.3 系泊缆运动过程中的张力

系泊缆在 y 方向弹性变形产生的力为

$$k[u_1(t) + u_2(t)] \sin \theta = 2kY \sin \theta \cos \theta \quad (10)$$

系泊缆在 z 方向弹性变形产生的力为

$$k[u_1(t) + u_2(t)] \cos \theta = 2kY \cos^2 \theta = 2kZ \frac{\cos^3 \theta}{\sin \theta} \quad (11)$$

2.3 水流作用力的求解

流体的拖曳力 F_d , Y 向惯性力 F_{iy} 与 Z 向惯性力 F_{iz} 可根据 Morison 公式计算^[8],考虑浮体和水流的相对运动,设江水为均匀定常流体

$$F_d = C_D \rho \frac{D}{2} \left| v - \frac{dZ}{dt} \right| \left(v - \frac{dZ}{dt} \right) L \quad (12)$$

$$F_{iy} = C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \frac{d^2 Y}{dt^2} L \quad (13)$$

$$F_{iz} = C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \frac{d^2 Z}{dt^2} L \quad (14)$$

其中: C_D 为黏性阻力系数; ρ 为江水密度; D 为浮体直径; v 为浮体布放位置江水的流速; C_M 为惯性力系数; L 为浮体长度。

F_L 可根据“卡门涡旋”理论^[8]求解

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho \omega^2 DL \quad (15)$$

其中: C_L 为升力系数。

2.4 水动力阻尼系数的求解

据文献^[9],水动力阻尼系数 C 可按下式求解

$$C \approx \frac{4\omega}{3\pi} \rho C_D A_L U \quad (16)$$

其中: 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。

2.5 监测平台与系泊缆碰撞后运动方程

考虑到系泊缆是3对,把式(5)~(16)代入(1~4)可得浮体与系泊缆碰撞时的运动方程为

$$\left(m + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} L \right) \frac{d^2 Y}{dt^2} + (6A_c \rho_c C_0 + CL) \frac{dY}{dt} + 6k \sin \theta \cos \theta Y = C_L \frac{1}{2} \rho \omega^2 DL + (F - W) \quad (17)$$

$$\left(m + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} L \right) \frac{d^2 Z}{dt^2} + (6A_c \rho_c C_0 + CL) \frac{dZ}{dt} + 6k \frac{\cos^3 \theta}{\sin \theta} Z = C_D \rho \frac{D}{2} \left| v - \frac{dZ}{dt} \right| \left(v - \frac{dZ}{dt} \right) L \quad (18)$$

浮体与系泊缆碰撞后的运动方程为

$$\left(m + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} L \right) \frac{d^2 Y}{dt^2} + CL \frac{dY}{dt} +$$

$$6k\sin\theta\cos\theta Y = C_L \frac{1}{2}\rho v^2 DL + (F - W) \quad (19)$$

$$\left(m + C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} L\right) \frac{d^2 Z}{dt^2} + C_L \frac{dZ}{dt} + 6k \frac{\cos^3 \theta}{\sin \theta} Z = C_D \rho \frac{D}{2} \left|v - \frac{dZ}{dt}\right| \left(v - \frac{dZ}{dt}\right) L \quad (20)$$

其中

$$K = \frac{E(F - W)^3 A_c \sin \theta}{18q^2(H - h)^3 \sin \theta \cos^2 \theta EA_c + (F - W)^3 (H - h)}$$

3 浮体和系泊缆碰撞时间的确定

根据文献[10]的定义,当载荷作用时间小于被冲击物体自振周期的一半时,就称为冲击载荷,其碰撞时间按如下方法计算,考虑碰撞瞬间,系泊缆在浮体的作用下发生运动,质量为 m 的浮体在该系泊缆

约束下的运动为周期为 $2\pi\sqrt{\frac{ml}{EA_c}}$,碰撞时间为

$$\Delta t = \pi\sqrt{\frac{ml}{EA_c}} \quad (21)$$

表 1 黄陵庙水文断面水力因子与河床质粒径

观测垂线编号	水温/ °C	起点距/ m	观测时间 间隔/s	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	水深/ m	过水断面 面积/ m^2	水面宽/ m	水面比 降/%
1#	23.2	350	2.47	30 000	60.63	17 922	504	0.102
2#	23.2	510	2.27	30 000	17.1	17 922	504	0.102
3#	23.8	350	2	42 200	63.2	18 530	511	0.181
4#	23.8	510	2	42 200	17.8	18 530	511	0.181
5#	22.4	310	0.57	11 200	60.87	17 092	495	0.019

3# 测点的水流量最大,水最深,平均流速为 2.27 m/s,选取 3# 测点为水下监测平台位置作分析。

5 数值算例

5.1 设计参数

根据设计要求及以上分析,相关参数见表 2。

5.2 浮体响应量的求解

把数据代入式(21),可得碰撞时间为 $\Delta t = 0.718$ s。把数据带入式(17,18),求解可得碰撞过程中浮体 y, z 方向的位移变化曲线(图 5,6)。从图 5、图 6 可看出,浮体在冲击结束之后在 y 方向产生 0.29 m 位移,在 z 方向产生 0.33 m 位移。

碰撞过程中浮体 y, z 方向的速度变化曲线如图 7,8

4 长江水文断面垂线流速分布特性

选取水下监测平台的布放位置为宜昌的黄陵庙水域,根据该水文站统计资料分析,该水域水文断面垂线流速分布符合卡拉乌舍夫椭圆流速分布规律^[11]

$$v = v_0 \sqrt{1 - p\eta^2} = \sqrt{p} v_0 \sqrt{\frac{1}{p} - \eta^2} \quad (22)$$

其中: v_0 为水面流速($\eta=0$); p 为流速分布参数,取 $p=0.6$,相当于谢才系数 $c=40\sim60$; η 为由水面向下起算的相对水深。

由式(22)按积分法计算垂线平均流速 v_m 为

$$v_m = \int_0^1 v d\eta = \sqrt{p} v_0 \int_0^1 \sqrt{\frac{1}{p} - \eta^2} d\eta = 0.897 v_0 \quad (23)$$

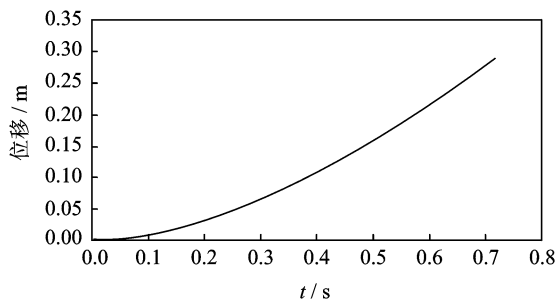
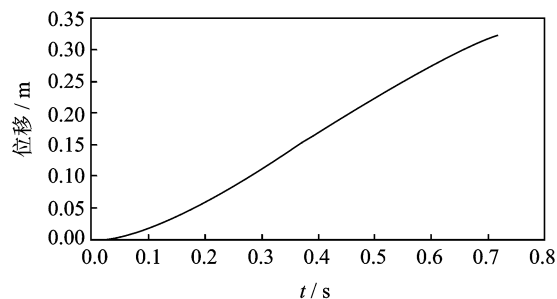
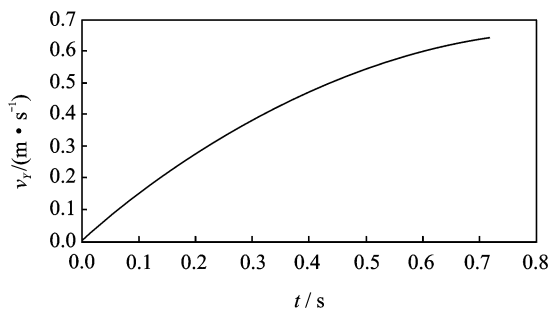
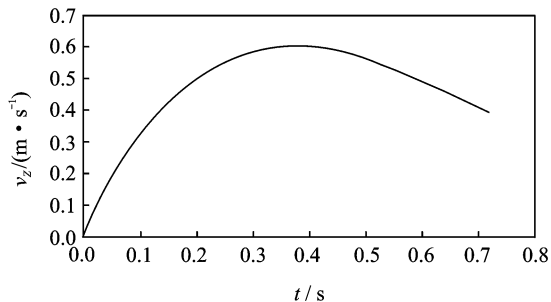
参考图 3,浮体位置处江水的流速为

$$v = \frac{v_m}{0.897} \sqrt{1 - 0.6\left(\frac{h}{H}\right)^2} \quad (24)$$

在本研究中,对黄陵庙水域的水力因子与河床质粒径进行了测试,测试结果见表 1。从表 1 看出,

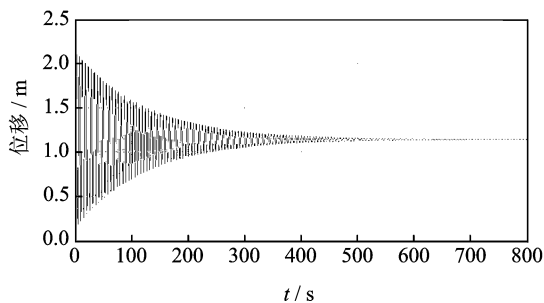
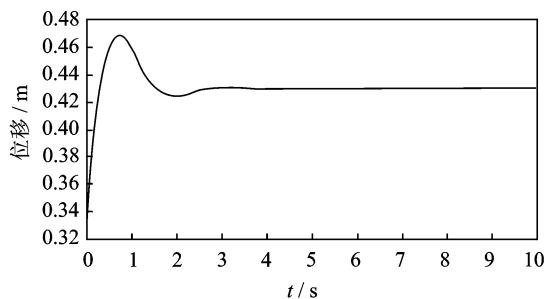
表 2 设计参数

参 数	数 值
浮体长度 L/m	50
浮体直径 D/m	0.2
系泊缆的直径 d/m	0.006
系泊缆密度 $\rho_c/(kg \cdot m^3)$	6.46×10^3
系泊缆弹性模量 E/Pa	1×10^{11}
惯性力系数 C_M	1
水深 H/m	63.2
浮体至江面距离 h/m	10
黏性阻力系数 C_D	0.4
江水密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1×10^3
浮体处江水平均流速 $v_m/(m \cdot s^{-1})$	2.27
升力系数 C_L	0.07
浮体质量 m/kg	1 463
系泊缆与江底夹角 $\theta/(^\circ)$	21°
系泊缆数量	6
总浮力 F/N	17 240

图5 冲击过程中浮体 y 向位移曲线图6 冲击过程中浮体 z 向位移曲线图7 冲击过程中浮体 y 向速度曲线图8 冲击过程中浮体 z 向速度曲线

所示。可以看出,浮体在冲击结束之后在 y 方向产生 0.63 m/s 的初速度,在 z 方向产生 0.4 m/s 的初速度。以碰撞结束之后的位移和速度为新的边界条件求解方程(19,20),可以得到浮体在冲击运动结束直到浮体稳定时的响应特性。

从图 9,10 可以看出,浮体在冲击结束后在流体的拖曳力、流体的垂直升力、浮力的作用下继续运

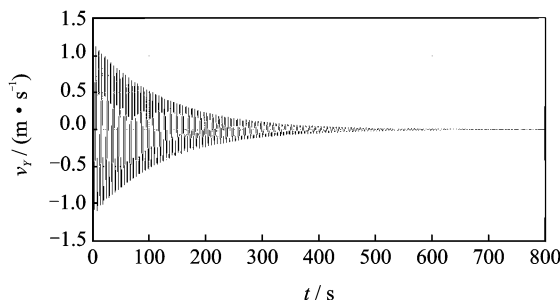
图9 冲击结束后浮体 y 向运动位移曲线图10 冲击结束后浮体 z 向运动位移曲线

动,最终在水的阻尼力作用下达到平衡位置。但是在来流方向浮体很快趋于平稳,在垂直于来流方向由于水流涡激升力影响浮体会产生振动,此时 y 方向运动位移达到 1.14 m , z 方向的位移达到 0.43 m 。

同时求解可得浮体 y 方向、 z 方向速度变化曲线,如图 11,12 所示。从图 11,12 可看出,浮体在冲击结束之后在流体的拖曳力、流体的垂直升力、浮力的作用下继续运动,最终在水的阻尼力作用下达到平衡位置。

系泊缆是一种索结构,索结构可以承受很大的轴向拉力,抗弯能力很弱,具有较大的柔性,其应力主要是在松弛-绷紧-稳定过程中轴向拉应力的变化,变化曲线如图 13 所示。

从图 13 看出,系泊缆张力一直处在不断波动状态,在冲击瞬间的最大值达到 30.8 kN ,最终在浮体稳定后其张力值稳定在 13588 N ,到达平衡位置。

图11 冲击结束浮体 y 向速度曲线

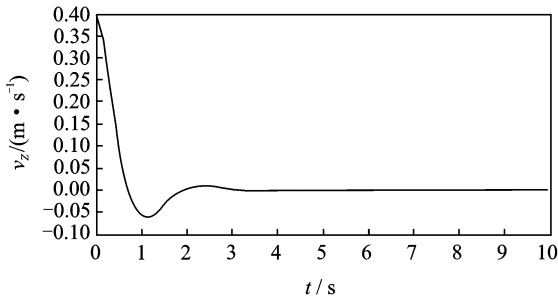
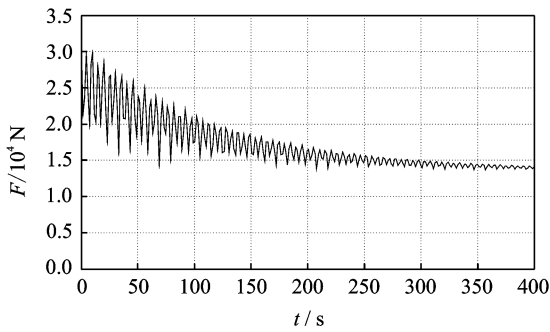
图12 冲击结束浮体 z 向速度曲线

图13 系泊缆张力曲线

6 结论

1) 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,会产生较大的垂荡和横荡位移,但是在来流方向横荡位移很快趋于平稳,垂直于来流方向的垂荡位移由于水流涡激升力的影响会产生振动。

2) 由于系泊缆在松弛-张紧转变过程中冲击的存在,以及水流涡激升力的影响,其张力产生不断波动,出现较大的变化。

3) 在进一步研究水下系泊监测平台浮体稳定性的过程中,涡激振动产生的影响是不能忽略的。

参 考 文 献

- [1] Kamman J, Huston R. Modeling of variable length towed and tethered cable systems[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1999, 22(4):602-608.
- [2] Niedzwecki J, Thampi S. Snap loading of marine cable systems [J]. Applied Ocean Research, 1991, 13(S): 210-218.

- [3] 李晓平. 多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.
- [4] 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.
- [5] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1992:196-206.
- [6] 姜健,李国强,郝坤超. 拉索平面内自由振动影响因素分析[J]. 振动、测试与诊断,2009,29(3):308-312. Jiang Jian, Li Guoqiang, Hao Kunchao. Analysis of influencing factors on free in-plane vibration of tensile cable [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(3):308-312. (in Chinese)
- [7] Wang Pao-Hsui, Yang Chiung-Guei. Parametric studies on cable-stayed bridges and structures[J]. Computers and Structures, 1996, 60(2):243-260.
- [8] 唐友刚. 海洋工程结构动力学[M]. 天津:天津大学出版社,2008:14-17.
- [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. Wang Dongyao, Ling Guocan. Vortex-induced nonlinear vibrations of TLP tethers under circumstances of platform oscillation [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(3):119-128. (in Chinese)
- [10] 凌邦国. 碰撞时间的精确测定及其应用[J]. 南通工学院学报:自然科学,2002,1(3):4-6. Ling Bangguo. High precision measurement of collision time and its application [J]. Journal of Nantong Institute of Technology: Natural Science, 2002, 1(3): 4-6. (in Chinese)
- [11] 姚仕明,卢金友,徐海涛. 黄陵庙水文断面垂线流速分布特性研究[J]. 长江科学院院报,2005,22(4):9-11. Yao Shiming, Lu Jinyou, Xu Haitao. Study of vertical velocity distribution at Huang Lingmiao hydrologic Section [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(4): 9-11. (in Chinese)



第一作者简介:何孔德,男,1973年5月生,博士,副教授。主要研究方向为机械系统动力学建模与仿真。曾发表《水下系泊监测平台动响应的计算模型与数值模拟》(《中国机械工程》2013年第23卷第4期)等论文。

E-mail:hekongde@ctgu.edu.cn