

# 基于 LabVIEW 的波浪驱动测量系统仿真设计

姜静波, 龚德俊, 李思忍, 徐永平, 陈永华

(中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 提出了一种通过虚拟仪器软件 LabVIEW 对水下测量系统进行仿真的方法, 通过受力分析, 可以近似地模拟出波浪驱动测量系统在水中的工作状态, 为系统合理地 布放提供有效的搭配方案。

**关键词:** LabVIEW; 虚拟仪器; 仿真; 测量系统

中图分类号: TP212. 9

文献标识码: A

文章编号: 1009 3096(2008) 12-0025-04

在当前的海洋观测领域, 各种海洋环境参数的长期、定点和连续测量, 尤其是从海洋表面到海底的垂直剖面的监测大多由船只完成, 不仅耗费大量钱财和人力, 而且受条件所限无法得到极端风浪条件下的珍贵信息, 手段显得落后<sup>[1]</sup>。垂直剖面的连续、长期测量对海洋工程建设、军事活动以及海洋学研究有着重要的意义。波浪驱动垂直剖面测量系统, 利用海洋无时不在的波浪能, 驱动滑行器单方向下潜运动, 直达海底或程序设定的预定深度, 在控制系统作用下, 滑行器依靠自身的浮力匀速上浮, 并在此过程中, 完成海洋要素的自动测量和存储。然而由于系统在水下工作时的状态无法有效地呈现出来, 下水后一旦出现问题再重新回收检测, 势必将消耗大量的人力物力, 浪费时间, 更为严重的是有可能错过最佳的观测时期。目前关于此类系统在海洋中的姿态反映, 并没有行之有效的理想的观测方法。因此, 集成系统必要的实验室虚拟仿真工作将会对系统日后的正常工作起到至关重要的作用。通过仿真, 可以足不出户就得到将来系统在水下工作时的第一手理论参数。

## 1 技术方案

### 1.1 实现各设备在水下姿态的分析

通过信号发生器产生的模拟海流数据输出, 或采集到的海流数据回放, 制造出模拟的海洋环境, 将系统置于此环境中, 智能的体现系统在水中的姿态及受力情况, 得到其在水中的状态模型, 将无法看到的真实场面通过计算机有效地仿真出来。

### 1.2 得出理想的系统配置方案

根据得到的仿真模型, 软件能够自我分析, 向用户提出建设性的提议, 如设计的有效浮力, 配重的大小, 水下绳索的承受力, 释放器的位置等等。从理论上得到系统的最佳配置方案(图 1)。

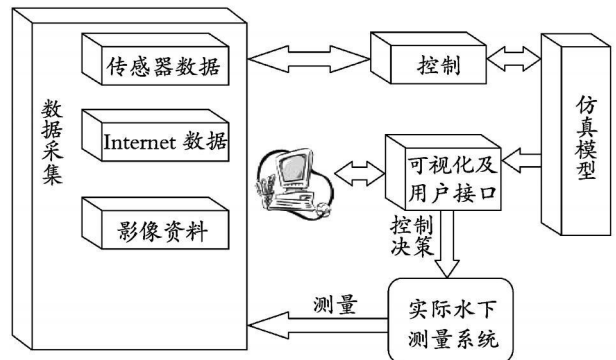


图 1 总体框架图

Fig. 1 Whole frame

**控制部分:** 控制仿真模型运行, 抽取模型的状态特征数据, 与注入的测量数据对比, 据此调整模型和模型状态, 并控制数据采集。

**可视化及用户接口部分:** 显示仿真结果, 支持用户决策和仿真对实际系统的控制。

**仿真模型部分:** 具有多物理过程、多形态、多分辨率等复杂耦合性的仿真模型运行在远程并行的计算机上。通过动态运行多形态、多分辨率模型, 为决策提供准确分析与预测, 为控制实际系统提供精确的信息。

**数据采集部分:** 多种渠道获取数据, 进行多信息源数据融合, 并依据控制要求, 转换各种数据格式, 适时调整数据采样率等。

## 2 实现过程

### 2.1 工作环境状态

系统工作水域为有限水深, 考虑的环境荷载包括风、浪和流。风、浪、流之间可有任意夹角, 波浪为

收稿日期: 2008 03-05; 修回日期: 2008 05-08

基金项目: 中国科学院重大科研装备研制项目(YZ0619)

作者简介: 姜静波(1979), 男, 山东青岛人, 硕士, 主要从事海洋环境监测仪器的研究, 电话, 0532 82898736, E-mail: jingbo\_1002@163.com

单向不规则波。锚链底端固定于海底, 顶端受到浮标施加的水平拉力, 将缆绳及观测平台细化为  $n$  个微元, 将每个微元依次分析, 可得到整个水中系统的受力状态<sup>[2]</sup>。

### 2.2 海面浮标受波浪力及表面流动力影响数值分析

通常状态下, 漂浮于自由表面的浮标, 会有部分表露在海面空气中, 在定常的风力和流力的作用下将产生漂移<sup>[3]</sup>。但由于锚泊线的系留作用, 浮标漂移至一定距离后, 必处于某一平衡状态。选取普遍规则浮标, 根据图 2 所示受力情况, 得平衡方程如下:

$$D_a + D_c = T \cos \varphi \quad (1)$$

$$B(\theta, h) = W_B + T \sin \varphi \quad (2)$$

$$M_a + M_c = T(X_c^2 + Z_c^2)^{\frac{1}{2}} \sin \left[ \varphi + \theta - \arctg \left( \frac{Z_c}{X_c} \right) \right] + B(\theta, h) \overline{GZ}(\theta, h) \quad (3)$$

式中,  $T$  为锚泊线上端的拉力;  $\varphi$  为  $T$  的倾角;  $D_a$  为风引起的水平力;  $D_c$  为流引起的水平力;  $W_B$  为浮标的质量;  $B(\theta, h)$  为浮标的浮力;  $\theta$  为浮标的倾角;  $h$  为浮标的正浮吃水;  $M_a$  为风引起的对过浮标重心轴的力矩;  $M_c$  为流引起的对过浮标重心轴的力矩;  $X_c, Z_c$  为锚泊线系结点与浮筒重心的水平及垂直距离;  $\overline{GZ}(\theta, h)$  为浮标的静复原力臂。其中,  $D_a, M_a, D_c, M_c$  按下列各式计算:

$$D_a = c_k A_a(\theta, h) V_a^2 \quad (4)$$

$$M_a = D_a l_a(\theta, h) \quad (5)$$

$$D_c = c_d \frac{1}{2} \rho A_c(\theta, h) V_c^2 \quad (6)$$

$$M_c = D_c l_c(\theta, h) \quad (7)$$

式中,  $c_k$  为经验系数;  $A_a(\theta, h)$  为浮标的水上部分在与风向垂直的平面上的投影面积;  $V_a$  为风速;  $l_a(\theta, h)$  为风力中心与浮标重心的距离;  $c_d$  为流拖曳力系数;  $\rho$  为水密度;  $A_c(\theta, h)$  为浮标的水下部分在与流向垂直的平面上的投影面积;  $V_c$  为流速;  $l_c(\theta, h)$  为流力中心与浮标重心的距离。浮标分析图见图 2。

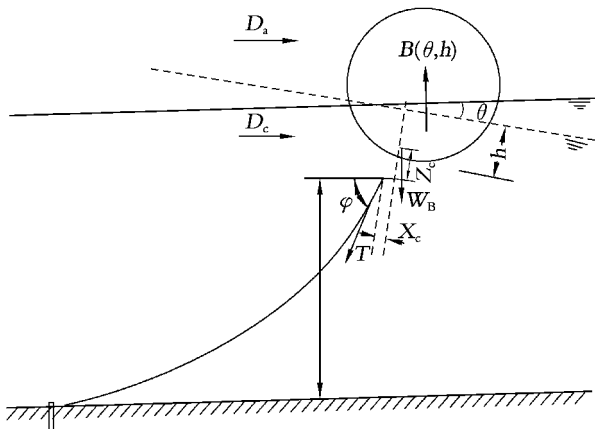


图 2 浮标分析图

Fig. 2 Buoy analysing frame

综上所述, 可以看出在式(1), (2), (3) 中有 4 个未知数:  $T, \theta, \varphi, h$ , 其余的参数均可视为已知。在这 4 个未知数中,  $T, \varphi$  与锚泊线的悬垂状态有关,  $\theta, h$  与浮标的浮态有关。为了求得方程的唯一解, 根据锚泊线的悬垂状态补充条件。因为当锚泊线上端的拉力  $T$  与倾角  $\varphi$  满足方程(1), (2), (3)的要求时, 其下部必须同时满足与海底接触的相应条件, 即: 当锚泊线未被全部提起时, 其上端点与其悬垂线最低点的垂直距离应等于上端点至水底平面的垂直距离; 当锚泊线全部提起时, 该距离不变, 同时下端点处的倾角  $\geq 0$ 。求解时可先假定一个  $h$ , 从而算出浮力  $B$ , 进而根据式(1), (2), (3)和(4)至(7)便可求得一组  $T, \varphi, \theta$  (用逐步近似法)。这样求得的一组解虽满足浮标的浮态平衡条件, 但未必能满足锚泊线悬垂状态的要求, 因此需要检验。其方法是以所求得的  $T, \varphi$  作为锚泊线上端的边界条件, 利用式(1)至(4)沿锚泊线从上向下积分, 如其结果符合上述的相应条件, 这组解则成立。否则重新假定一个  $h$ , 重复前面的计算, 直至出现符合相应条件的解。

### 2.3 水下锚泊系统坐标系的定义与模型的建立

假设锚块的质量足够大, 锚索相当于直接固定于海底。采用多刚体-球铰模型对第  $j$  段钢缆进行离散( $j = 1, 2 \dots$ ), 即把它离散成  $m_j$  微段以球形铰链相连的直杆刚体, 即每一段相当于一个部件<sup>[4,5]</sup>。这样连同锚定系统原有的除钢缆以外的  $x$  个部件, 此锚定系统总共的部件数:  $n = x + m_1 + m_2 + \dots + m_y$  ( $y$  为钢缆的条数)。对这  $n$  个刚性部件按照从上到下进行排序, 也就是说, 最上面的大浮球作为第 1 个部件, 以锚块作为第  $n$  个部件。以锚的固定点为坐标原点, 竖直向上为  $Z$  轴, 按右手握旋法则建立空间坐标系(即  $X, Y$  轴在水平面内)。

当第  $i$  个部件置于水中时, 水流作用于物体在方向  $j$  ( $x, y$ , 或者  $z$ ) 上的力为:

$$Q_j = \frac{1}{2} \rho_w C_j A_j U_i U_j \quad (8)$$

$$U_i = \sqrt{U_{ix}^2 + U_{iy}^2 + U_{iz}^2} \quad (9)$$

$\rho_w$  是第  $i$  个部件所在水体的密度;  $C_j$  为一系数(数值大小与水体雷诺数以及第  $i$  个部件的形状和部件表面光滑程度有关);  $A_j$  为此部件与  $j$  ( $x, y$ , 或者  $z$ ) 方向相垂直的截面积。  $U_i$  是第  $i$  个部件所在水体的流速大小, 数值上  $U_j$  是第  $i$  个部件所在水体的流速在  $j$  ( $x, y$ , 或者  $z$ ) 方向上的流速分量。

整个系统在水中稳定后, 对每一个部件进行受力分析, 沿  $x, y, z$  三个方向分别受力平衡, 得三个受力平衡方程, 并组成方程组为:

$$\begin{cases} Q_{ix} + T_i \cos\theta_i \sin\phi_i = T_{i+1} \cos\theta_{i+1} \sin\phi_{i+1} \\ Q_{iy} + T_i \sin\theta_i \sin\phi_i = T_{i+1} \sin\theta_{i+1} \sin\phi_{i+1} \\ B_i g + Q_{iz} + T_i \cos\phi_i = T_{i+1} \cos\phi_{i+1} \end{cases} \quad (10)$$

其中  $Q_{ix}$ ,  $Q_{iy}$  和  $Q_{iz}$  分别表示水流作用于第  $i$  个部件上的力  $Q_i$  在  $x, y, z$  三个方向上的分力,  $B_i$  是第  $i$  个物体受到的正浮力(单位为 kg)。

在部件和海况确定的情况下, 以上这几个为已知量; 还剩余 6 个未知量: 与其相邻的上下两个部件对它的拉力—— $T_i$  和  $T_{i+1}$ ; 第  $i$  和  $i+1$  个部件与  $z$  轴的夹角:  $\phi_i$  和  $\phi_{i+1}$ ; 以及此两个部件在  $x-y$  平面的投影与  $x$  轴的夹角  $\theta_i$  和  $\theta_{i+1}$ 。

也就是说, 对于每  $i$  个部件来说都有 3 个方程和 6 个未知量。但是对于第一个部件, 它上面没有部件的拉力, 即  $T_1 = 0$ , 则对于第 1 个部件, 方程组(1)变为:

$$\begin{cases} Q_{1x} = T_2 \cos\theta_2 \sin\phi_2 \\ Q_{1y} = T_2 \sin\theta_2 \sin\phi_2 \\ B_1 g + Q_{1z} = T_2 \cos\phi_2 \end{cases} \quad (11)$$

方程组(2)为 3 个方程 3 个未知量:  $T_2$ ,  $\phi_2$  和  $\theta_2$ , 可以通过它求解出  $T_2$ ,  $\phi_2$  和  $\theta_2$ ; 将上面 3 个解出量作为已知量代进关于第二个部件的方程组有:

$$\begin{cases} Q_{2x} + T_2 \cos\theta_2 \sin\phi_2 = T_3 \cos\theta_3 \sin\phi_3 \\ Q_{2y} + T_2 \sin\theta_2 \sin\phi_2 = T_3 \sin\theta_3 \sin\phi_3 \\ B_2 g + Q_{2z} + T_2 \cos\phi_2 = T_3 \cos\phi_3 \end{cases} \quad (12)$$

3 个方程构成的方程组(3)也只含有 3 个未知量  $T_3$ ,  $\phi_3$  和  $\theta_3$ , 它们也可以求得, 再往下代进关于第三个部件的方程组, 如此反复叠代、求解, 直到最下端一个部件——锚块。这样所有部件的受力情况都可以确定。

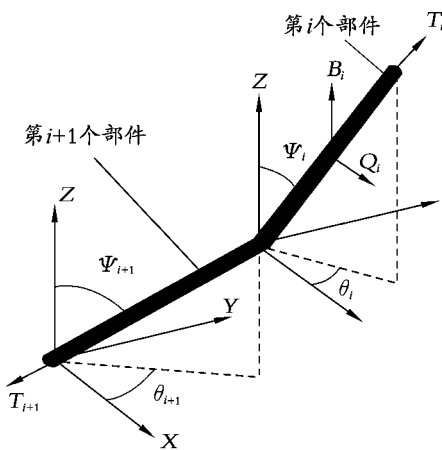


图 3 索缆分析图

Fig. 3 Cable analysing frame

## 2.4 位置的确定

假定第  $i$  个部件的长度为  $L_i$ , 其所设定的空间坐标系里的坐标为  $(X_i, Y_i, Z_i)$  则有:

$$\begin{cases} X_i = X_{i+1} + L_i \cos\theta_i \sin\phi_i \\ Y_i = Y_{i+1} + L_i \sin\theta_i \sin\phi_i \\ Z_i = Z_{i+1} + L_i \cos\phi_i \end{cases} \quad (13)$$

其中  $X_{i+1}$ ,  $Y_{i+1}$  和  $Z_{i+1}$  分别为第  $i+1$  个部件的 3 个坐标, 且最底下锚块的坐标  $(X_n, Y_n, Z_n) = (0, 0, 0)$ 。而一旦每一个部件的张力和倾角计算出来了, 那么就可以根据每个部件的长度, 按照从下向上的顺序, 依次叠代计算出每一个部件的空间位置, 即它相对锚块的位置。

## 2.5 软件实现过程

LabVIEW 是“实验室虚拟仪器工程平台(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)”的简称, 可以迅速从算法设计的理论过渡到现实世界的 I/O 当中, 使设计者们能够轻松地将非常复杂的设计转化为可以响应现实信号的硬件原<sup>[6]</sup>。LabVIEW 不仅能轻松方便地完成与各种软硬件的连接, 更能提供强大的后续数据处理能力, 设置数据处理、转换、存储的方式, 并将结果显示给用户<sup>[7]</sup>。

采用 labVIEW8.2 作为程序开发工具, 软件的左半部分是系统的模拟控制单元, 右半部分则是姿态显示单元。控制单元中给出海洋参数以及系统本身参数的模拟输入量。在程序中分别有东西向流速 Velocity\_E、南北向流速 Velocity\_N、垂直方向流速 Velocity\_U 以及浪高和水深参数。通过控制海洋参数, 可以得到指定海况下系统的运行姿态。图 4 中左上方的进度条分别表示海中三个方向的流速。柱状条表示浪高和水深。这些组成了系统的运行环境。同时, 在软件界面的左下方给出了系统自身各参数的模拟输入量。从左至右的三个圆形表盘分别可以模拟滑行器质量、装进锤质量和配重锚块的质量。下方的旋钮用来模拟控制浮球半径的大小, 而底部的两个进度条用来模拟缆绳长度和滑行器的运动距离。在完成了系统的模拟配置后, 水中的姿态就将通过数学计算后呈现出来。

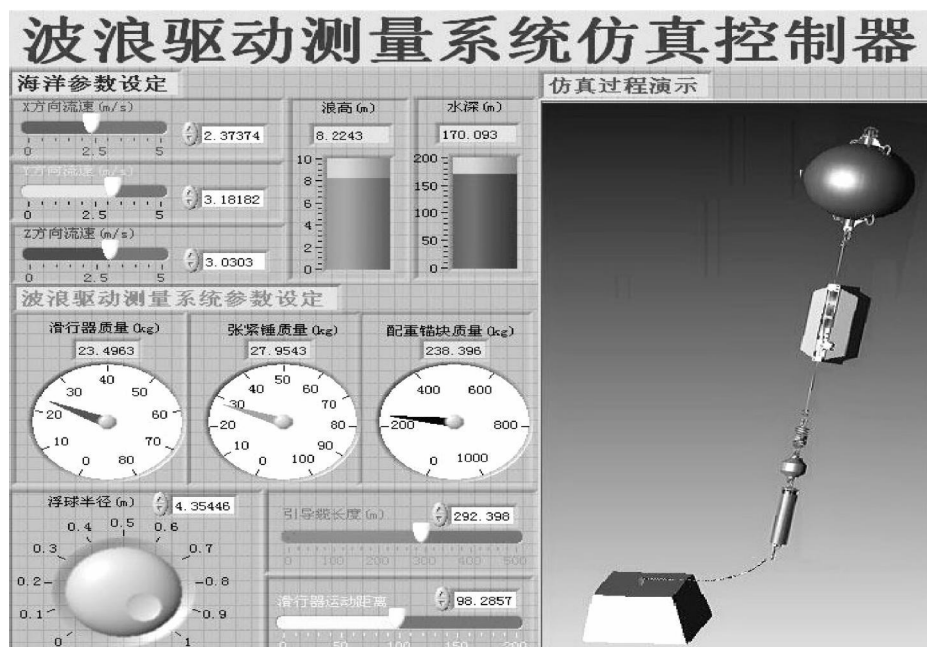


图4 仿真软件

Fig. 4 Simulation software

### 3 结束语

LabVIEW 作为当今功能最为强大的虚拟仪器开发工具之一,对虚拟现实技术领域有着强大的仿真功能,通过有效的数学推导与合理的编程,对测量系统的水下工作进行近似模拟,能够从整体描述出系统的工作状态,并且得到必要的理论数据,从而为系统的完善研制提供良好的优化方案。

#### 参考文献:

[1] 郝菁,龚德俊,徐永平. 基于单片机的海洋要素垂直剖面测量系统的控制电路设计[J]. 海洋科学, 2007, 4: 5-8.  
 [2] 黄国梁,藤野正隆. 关于风和潮流作用下单点系泊船体的

鱼尾状摆动的研究[J]. 海洋工程, 1987, 3: 1-13.  
 [3] 李宾,李映辉,殷学纲. 大垂度柔索的动力学建模与仿真[J]. 应用数学和力学, 2000, 6: 640-646.  
 [4] Gong De jun, Chen Yong hua. A moored underwater energy conservation system for profiling measurement [J]. **China Ocean Engineering**, 2007, 3: 541-548.  
 [5] Nishimoto K, Brinati H L, Fucatu C H. Analysis of single point moored tanker using manoeuvring hydrodynamic model [A]. ASME. Proceedings of the ASME 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering [C]. Denmark: ASME, 1995. 253-261.  
 [6] 侯国屏,王鲲,叶齐鑫. LabVIEW 7.1 编程与虚拟仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 20-88.  
 [7] 陈敏,汤晓安. 虚拟仪器开发环境 LabVIEW 及其数据采集[J]. 计算机工程与设计, 2001, 5: 61-63.

## A simulation design based on LabVIEW for a water wave energy mooring system

JIANG Jing-bo, GONG De-jun, LI Si-ren, XU Yong-ping, CHEN Yong-hua

(Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Mar. , 5, 2008

Key words: LabVIEW; virtual instrument; simulation; mooring system

**Abstract:** The simulation method based on LabVIEW for a water wave energy mooring system is provided here. The virtual instruments software is used to evaluate and simulate the working condition of the underwater system after its dynamic analysis. Based on this, we can present a more reliable assembling and deployment protocol for the underwater system.

(本文编辑: 刘珊珊)