

一种新型海洋环境监测系统的静力分析和姿态计算

陈忠梅^{1,2}, 龚德俊¹, 李思忍¹, 徐永平¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:介绍了将浮标与潜标相结合的一种新型海洋环境监测系统的静力分析和姿态计算方法, 结合 MATLAB 编程给出了在 0~2 m/s 流速范围内主浮标、主潜标和缆绳的受力、倾角情况, 为确保系统能在水下长期可靠地工作提供了理论依据。

关键词:浮标; 潜标; 静力分析; 姿态计算

中图分类号:P715

文献标识码:A

文章编号:1000-3096(2009)02-0050-05

锚系资料浮标和潜标是海洋监测网中最普遍采用的搭载平台之一, 它们主要用于海洋环境定点监测, 但都有缺陷, 某种程度上限制了应用。拟研制的新型海洋环境监测系统将浮标和潜标技术结合起来, 充分发挥潜标隐蔽性、安全性好和浮标测量参数多的优点来获取海气交界面水文气象资料, 对区域性海洋环境现场监测带来非同寻常的意义。

该测量系统采用单点绷紧型系留系统, 具有较大张力, 所以系统在水下工作时偏离垂线的倾角较小。为确保系统能在水下长期可靠地工作, 必须对系统在水下的受力状况和姿态进行计算, 计算中首先根据总体技术要求进行合理的简化和假设, 建立水下系统的数学模型, 编制系统在水下的受力和姿态计算程序, 完成系统的结构配置、受力分析和水下姿态的计算。

1 水下系统的数学模型

水下系统的力学分析和姿态计算是系统研制的理论基础和前提, 该数学模型就是建立在上述工程简化和海流剖面基础上的。系统在水下将受浮力、重力、张力、流体动力、海底摩擦力和抓力等作用, 处于静力平衡状态。可用下式表示:

$$\sum_{i=1}^n \vec{B}_i + \vec{W}_i + \vec{T}_i + \vec{R}_i + \vec{F} + \vec{F}_Z = 0$$

式中 $\vec{B}_i$ 为各部件的浮力, $\vec{W}_i$ 为各部件的重力, $\vec{T}_i$ 为各部件的张力, $\vec{R}_i$ 为各部件的流体动力, $\vec{F}$ 为重力锚与海底摩擦力, $\vec{F}_Z$ 为抓力锚与海底抓力。

由于系统较长, 几何尺寸、物理性能和流体动力也不同, 所以给计算带来很多困难, 计算工作量也很大。为计算方便, 作者用分离法将系统分成一些部件或部件组来计算, 对于不同的部件采用不同的方

法来处理。

作者将系统分成主浮体、主潜标、钢丝绳以及锚组件等部件。这里主要计算主浮体、主潜标以及钢丝绳的张力、倾角等参数。进行这种计算的目的是: (1) 保证主浮体、主潜标在水下预定深度和所需姿态, 确保系统能在水下长期可靠地工作; (2) 使测量仪器处于预定的测量层次和适宜的工作倾角; (3) 计算钢丝绳的受力状况和姿态, 核实其强度和安全系数, 确定主浮体、主潜标所受的拉力及其准确位置; (4) 确定所需最小电机扭矩, 为购买电机提供理论依据。

2 各部件的静力分析和倾角计算

2.1 简化和假设

为便于力学分析, 对水下系统的工作环境条件和受力状况进行合理的简化和假设。

(1) 假设海水为定常、不可压、黏性流体, 密度均匀。

(2) 由于系统顶部主浮体在水下几十米, 海面波浪对其影响较小, 仅对水下系统进行静力分析。

(3) 假设海流为平面流, 垂直分量影响较小, 可忽略, 将其简化为二维问题处理。

(4) 由于采用无扭矩转环和低扭矩钢丝绳, 假设系留索为理想柔性体, 不传递力矩。

(5) 由于采用钢丝绳作为系留索, 在张力作用下伸长忽略不计。

收稿日期: 2008-07-07; 修回日期: 2008-10-20

基金项目: 国家 863 计划项目 (2008AA09Z113)

作者简介: 陈忠梅 (1984-), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事海洋环境监测仪器的研究, 电话: 0532-82898737, E-mail: chenmei. 84@163. com

2.2 主浮标

浮标式搭载平台如图 1 所示:

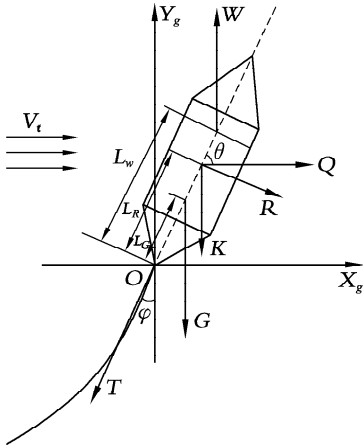


图 1 浮标式搭载平台受力图

Fig.1 The buoy force system

图中, V_t 为流速; T 为信号引导缆顶点的拉力; φ 为信号引导缆相对与垂直线夹角; W 为浮力; G 为重力; θ 为横倾角; L_G, L_R, L_W 为重心、流力作用点、浮心到系留点距离;

R 为沿相对轴线法线方向的流体作用力:

$$R = \frac{C_X \rho A V_t^2 \sin^2 \theta}{2}$$

式中, ρ 为海水密度, $\rho = 1\,026.8 \text{ kg/m}^3$; 球体的迎风面积 $A = \frac{1}{4} \pi d^2$ 。

Q 为迎面阻力, $Q = R \sin \theta$;

K 为升力, $K = R \cos \theta$;

C_X 为浮标阻力系数, 实际计算时取 $C_X = 6C_D$ 或者 $C_X = 9C_D$ 。

对于球体, 阻力系数 C_D 与雷诺数 Re 间关系有以下结论^[1,2]:

$$\begin{cases} Re \leq 1 \text{ 时, } C_D = \frac{24}{Re}; \\ Re = 1 \sim 8 \text{ 时, } C_D = \frac{24}{Re} \times (1 + \frac{3}{16} Re); \\ Re = 10 \sim 10^3 \text{ 时, } C_D = \frac{13}{Re}; \\ Re = 10^3 \sim 2 \times 10^5 \text{ 时, } C_D \text{ 几乎与 } Re \text{ 无关} \end{cases}$$

式中, Re 为雷诺数, $Re = \frac{dV_t}{\nu}$; d 为球体直径; ν 为流速; ν 为流体运动黏度, $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

为了保证传感器系统的正常工作, 必须使浮标式搭载平台在海流、海浪和风的作用下处于较稳定的姿态。由于本系统为水下系统, 只需要考虑海流作用。要想保证浮标式搭载平台处于直立姿态, 由经验可知, 信号引导缆的系留点应位于浮标式平台

压力中心。相对此点, 流体动力矩等于 0, 即流体动力矩之合力作用在改点。但受条件限制, 本方案只能尽可能使系留点靠近于浮标压力中心。

分析水下浮标式搭载平台的受力情况可知, 所有投影到轴 X 与 Y 轴上的力之和应等于零。

$$\sum X = Q - T \sin \varphi = 0 \quad (1)$$

$$\sum Y = W - K - G - T \cos \varphi = 0 \quad (2)$$

由式(1), (2)可推出:

$$T = \sqrt{Q^2 + (W - K - G)^2} \quad (3)$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{W - K - G} \quad (4)$$

为了确定浮标式搭载平台的倾角, 必须建立相对原点 O 的力矩方程:

$$\sum M = G L_G \cos \theta - W L_W \cos \theta + R L_R = 0 \quad (5)$$

将相关参数带入, 通过编程计算可以得到 $\theta - V_t$ 、 $\varphi - V_t$ 值。

2.3 缆绳

由于缆绳比较长, 若作为一个部件来计算, 将产生较大误差, 所以一般将缆绳分成若干微元段, 建立每个微元段的静力平衡方程。作用在长 ds 微元段上的作用力如图 2 所示^[3,4]。

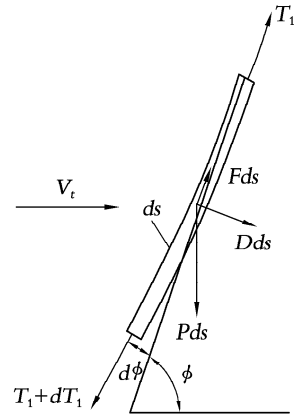


图 2 微元段上的作用力

Fig.2 The cable tensile force system

图中, ds 为微元段的长度; T_1 为微元段上端的张力; $T_1 + dT_1$ 为微元段下端张力; Dds 为微元段上的法向阻力; Fds 为微元段上的切向阻力; Pds 为微元段的水中重量; ϕ 为微元段与海流方向 V_t 的夹角; $d\phi$ 为微元段下端角度 ϕ 的变化量。

在静力平衡状态下, 这些力的矢量和一定为零。将这条件应用于这些力的法向和切向分力, 可得:

在法向方向上:

$$(T_1 + dT_1) \sin d\phi - Dds - P \cos \phi ds = 0$$

由于 $\sin d\phi \cong d\phi$, $dT_1 d\phi \cong 0$, 所以可简化为:

$$T_1 d\phi = (D + P \cos \phi) dx \quad (6)$$

在切向方向上:

$$-T_1 + (T_1 + dT_1) \cos d\phi + P \sin \phi ds - F ds = 0$$

由于 $\cos d\phi \cong 1$, 同样可简化为:

$$dT_1 = (F - P \sin \phi) ds \quad (7)$$

微元段上的法向阻力 $D ds$ 由下式确定:

$$D ds = \frac{1}{2} \rho C_{DN} d (V_N^2) ds$$

式中, d 为缆绳直径; C_{DN} 为法向阻力系数; $V_N = V_i \sin \phi$ 为垂直与微元段的速度分量, 故

$$D = \frac{1}{2} \rho C_{DN} d V_i^2 \sin^2 \phi \quad (8)$$

微元段上的切向阻力 $F ds$ 由下式确定:

$$F ds = \frac{1}{2} \rho C_{DT} \pi d V_T^2 ds$$

式中, $C_{DT} = \gamma C_{DN}$ ($0.01 \leq \gamma \leq 0.03$) 为切向阻力系数, $(\pi d) ds$ 为被纵向水流所“浸湿”的面积, $V_T = V_i \cos \phi$ 是与缆绳相切的速度分量, 故

$$F = \frac{1}{2} \rho \gamma C_{DN} (\pi d) V_i^2 \cos^2 \phi \quad (9)$$

由(6), (7), (8), (9)式可得:

$$d\phi = \frac{(\frac{1}{2} \rho C_{DN} d V_i^2 \sin^2 \phi + P \cos \phi) ds}{T} \quad (10)$$

$$dT_1 = (\frac{1}{2} \rho \gamma C_{DN} (\pi d) V_i^2 \cos^2 \phi - P \sin \phi) ds \quad (11)$$

计算时从缆绳上部的已知参数张力和倾角作为边界条件, 开始计算第一个微元段下端的 dT_1 和 $d\phi$, 再将该段下端的参数作为下一微元段上端的已知参数, 计算下一微元段下端的 dT_1 和 $d\phi$, 这样逐段计算直至求出缆绳下部张力和倾角。该计算方法中, 微元段分得越多, 数学模型越佳, 计算结果越精确。

2.4 主潜标

潜标式主浮体在海流中受力情况如图 3 所示。

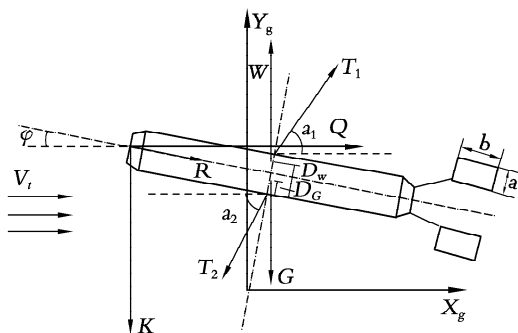


图 3 潜标式主浮体在海流中受力图

Fig. 3 The submersible buoy force system in current

图中, φ 为横倾角; T_1, T_2 为潜标受到上下端缆绳拉力; α_1, α_2 为上下端拉力与水平线夹角; L, D 为潜标长度与直径; D_G, D_W 为重心, 浮心到潜标缆绳下引导口距离; R_2 为沿相对轴线方向的流体作用力。

$$R_2 = \frac{C_X \rho L D V_i^2 \cos^2 \varphi}{2}$$

Q 为迎面阻力, $Q = R_2 \cos \varphi$; K 为升力, $K = R_2 \sin \varphi$; C_X 为阻力系数; a, b 分别为潜标尾翼翼板长, 宽。

分析潜标式主浮体在海流中的受力情况(图 3), 所有投影到轴 X 与 Y 轴上的力之和应等于 0。可得:

$$\sum X = Q + T_1 \cos \alpha_1 - T_2 \cos \alpha_2 = 0 \quad (12)$$

$$\sum Y = W + T_1 \sin \alpha_1 - K - G - T_2 \sin \alpha_2 = 0 \quad (13)$$

于是:

$$T_2 = \sqrt{(Q + T_1 \cos \alpha_1)^2 + (W + T_1 \sin \alpha_1 - K - G)^2} \quad (14)$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{W + T_1 \sin \alpha_1 - K - G}{Q + T_1 \cos \alpha_1} \quad (15)$$

为确定浮标式搭载平台的倾角, 必须建立相对下端缆绳受力点 T_2 的力矩方程:

$$\sum M = -R_2 \frac{D}{2} + T_1 D \cos (\alpha_1 + \varphi) + W D_W \sin \varphi - G D_G \sin \varphi = 0 \quad (16)$$

将相关参数代入, 通过编程计算可以得到 $\theta - V_i, \varphi - V_i$ 值。

为使潜标式主浮体在水平面内系留角度的稳定, 还必须安装垂直稳定器即尾翼。这时, 系统稳定的条件是:

$$m_y^\beta < 0$$

式中, $m_y^\beta = m_{y_k}^\beta + m_{y_{on}}^\beta$ 为流体动力系数 m_y 的方位系数。

$$\text{其中, } m_{y_k}^\beta = 2 \left[\left(\frac{X_0}{L} - 1 \right) S + \psi_V \right], m_{y_{on}}^\beta = -\frac{C_L^\beta}{L_{on}}$$

式中, X_0 为系留点到潜标头部距离; $S=1$ 为该切断面无量纲面积; L 为潜标式主浮体长度; $\psi_V=1$ 为圆柱形主浮体丰满系数; C_L^β 为侧向受力系数的方位导数; L_{on} 为从系留点到尾翼弦杆中点的距离。

$$\text{则 } C_L^\beta = \frac{5.6 \lambda_{nep} 2 S_{nep}}{1.3 + \lambda_{nep} S_0}$$

式中, $\lambda_{nep} = \frac{a}{b}$ 为稳定器翼板的长宽比; $S_{nep} = ab$ 为翼板面积; $S_0 = \frac{\pi D^2}{4}$ 。

可从总体结构考虑出发, 给出 λ_{nep} 值, 便可以确定尾翼所需的面积值。

3 计算实例

3.1 主浮标

主浮标外形见图 1,图中尺寸如下:
浮力 $W=1.707\ 1\times 10^3\ \text{N}$,为 12 个直径大小为 0.3 m 浮球的浮力之和;浮标质量 $M=1\ \text{kg}$;重心、流
力作用点、浮心到系留点距离 L_G,L_R,L_W 分别为 0.3 m、
0.45 m 和 0.6 m;球体阻力系数 $C_D=0.48$,实际计
算时取 $C_X=6C_D$,所以浮标阻力系数 $C_X=0.48\times 6$ 。
通过 MATLAB 编程计算表明,在 2 m/s 流速范围
内,主浮标倾角不超过 11° 。结果见表 1。

表 1 主浮标在不同海流中的姿态
Tab. 1 Different attitudes of buoy in current

$V_t(\text{m/s})$	$\theta(^{\circ})$	$T(10^3\text{N})$	$\varphi(^{\circ})$
0.0	90.0	1.697 3	0.0
0.2	89.894 5	1.697 3	0.141 1
0.4	89.577 9	1.697 3	0.564 5
0.6	89.050 4	1.697 1	1.269 9
0.8	88.312 6	1.696 6	2.256 5
1.0	87.366 2	1.695 7	3.522 5
1.2	86.214 4	1.694 0	5.063 7
1.5	84.115 5	1.689 4	7.874 9
2.0	79.726 8	1.673 2	13.770 4

观察表 1 中缆绳拉力 T ,可知它随着流速的增
大反而减小。这是因为随着流速的增大,主浮标横
倾角 θ 减小,使得作用于主浮标上的流力 R 的横向
分力 Q 减小,纵向分力 K 却增大,对主浮标产生一
个向下的压力,最终使得缆绳拉力减小。

3.2 缆绳

缆绳外形见图 2,图中尺寸如下:计算查表^[2]得
法向阻力系数 $C_{DN}=0.9$; $\gamma=0.02$;缆绳直径 $d=$
0.018 m;微元段在水中质量 $P=1\ \text{kg/m}$;将主浮标
与主潜标间缆绳分 50 个微元段计算,每个微元段长
度 $ds=1\ \text{m}$ 。用 MATLAB 编程计算,结果见表 2。

表 2 缆绳受力和倾角变化情况
Tab. 2 The change of cable tensile and obliquity

$V_t(\text{m/s})$	$T(10^3\text{N})$	$\varphi(^{\circ})$
0.0	1.647 3	90.0
0.2	1.647 3	89.274 2
0.4	1.647 3	87.105 1
0.6	1.647 3	83.511 7
0.8	1.647 3	78.567 1
1.0	1.647 6	72.449 3
1.2	1.648 7	65.481 1
1.5	1.652 8	54.427 2
2.0	1.669 5	37.912 6

表 2 中数据表明,缆绳下端的拉力随着流速的
增大而增大,倾角变化明显。

3.3 主潜标

主潜标外形见图 3。图中尺寸:浮力 $W=1.707\ 1\times$
 $10^4\ \text{N}$;潜标质量 $M=10\ \text{kg}$;直径 $D=1$;长 $L=$
2.5 m;计算查表^[2]得阻尼系数 $C_X=0.002\ 7$;重心、
浮心到潜标缆绳下引导口距离 D_G,D_W 分别为 0.2 m
和 0.8 m。

通过 MATLAB 编程计算表明,2 m/s 流速范围
内,主潜标倾角不超过 6° ,结果见表 3。

表 3 主潜标在不同海流中的姿态
Tab. 3 Different attitudes of submersible buoy in current

$V_t(\text{m/s})$	$\varphi(^{\circ})$	$T(10^3\text{N})$	$\alpha_2(^{\circ})$
0.0	0.0	1.532 6	90.0
0.2	0.099 6	1.532 6	89.936 1
0.4	0.395 9	1.532 8	89.754 8
0.6	0.885 3	1.533 7	89.431 0
0.8	1.550 1	1.536 2	89.000 6
1.0	2.349 5	1.541 0	88.476 0
1.2	3.214 5	1.548 8	87.894 4
1.5	4.454 5	1.565 7	87.019 1
2.0	5.931 5	1.599 9	85.857 4

4 结语

拟研制的新型海洋环境监测系统很好地将浮标
和潜标技术结合起来,充分发挥潜标隐蔽性、安全性
好和浮标测量参数多的优点,对区域性海洋环境现
场监测和海气交界面水文气象资料的获取带来非同
寻常的意义,它同时也是开展海洋学研究、进行海洋
资源开发与军事海洋学研究的重要基础。

本工作通过对该系统的静力分析和姿态计算,
有效地保证了主浮体、主潜标在水下预定深度和所
需姿态,使测量仪器处于预定的测量层次和适宜的
工作倾角,确保了系统能在水下长期可靠地工作,也
为系统进一步研究提供了理论依据。

参考文献:
[1] Berteaux H O. Buoy Engineering[M]. John Wiley&Sons, Inc,1976.
[2] Berteaux H O. Buoy Engineering[M]. John Wiley&Sons, Inc,1976.105.
[3] 陈卓如,金朝铭. 工程流体力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1987.449.
[4] 施里希廷. 徐燕侯,等译. 边界层理论上册[M]. 北京:科学出版社,1988.16,128.
[5] 王明午. 海洋潜标系统的静力分析和姿态计算[J]. 海洋技术,2001,20(4):39-47.

Static analysis and attitude calculation of a new type of marine environment monitoring system

CHEN Zhong-mei^{1,2}, GONG De-jun¹, LI Si-ren¹, XU Yong-ping¹

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Jul. ,7,2008

Key Words: buoy; submersible buoy; static analysis; attitude calculation

Abstract: Static analysis and attitude calculation of a new type of marine environment monitoring system are introduced in this paper. The system takes advantage of measurement techniques of both buoy and submersible buoy. For maintaining system long term reliability under water, we calculate stress and obliquity of buoy, submersible buoy and cable at the flow velocity between 0 m/s and 2 m/s using MATLAB.

(本文编辑:康亦兼)

(上接第 49 页)

Preparation and analysis of complete antigen for okadaic acid

LU Shi-ying¹, ZHOU Yu¹, REN Hong-lin¹, HUO Fang-zhen¹, Pan Feng-guang¹, LIU Zeng-shan¹, YU Shi-yu², YU Guang³

(1. Key Laboratory of Zoonosis, Ministry of Education, Institute of Zoonosis, Jilin University, Changchun 130062, China; 2. Fuqing Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Fuqing 350300, China; 3. Jilin Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Changchun 130062, China)

Received: Sep. ,20,2006

Key words: okadaic acid (OA); antigen couple; active ester method

Abstract: In order to construct the immunological detection method for okadaic acid, the carboxyl group of OA molecule is coupled to amino group of carrier protein IgG and BSA using active ester method. It certifies that the man-made prepared OA immunizing antigen and detecting antigen are successfully coupled by electrophoresis, animal experiment and ELISA. These establish favourable foundation for preparation the antibody against OA using the technique of Hybridoma and immunological method detecting OA from marine food.

(本文编辑:张培新)