

深海剖面测流潜标系统设计及姿态分析

兰志刚¹, 杨圣和¹, 刘立维², 龚德俊³, 李思忍³, 朱素兰³

(1. 中海石油基地集团北京分公司, 北京 100027; 2. 中海石油“中国”有限公司番禺/惠州天然气开发项目组, 广东 深圳 518067; 3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 结合深海海流剖面测量实际应用, 介绍了潜标系统的设计中须注意的几个问题。针对绳索和不同形状的潜标系统测量单元, 给出了静力计算和姿态分析的步骤与方法。根据测量要求, 在假定的海流剖面环境下, 计算了各潜标单元在海水中的位置、倾斜以及潜标系统的浮力配置和锚块配重。该方法对于潜标设计具有实际参考意义。

关键词: 潜标; 海流剖面; 受力分析; 绳索张力; 拖曳力

中图分类号: P71

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)08-0021-04

在水下布放潜标, 是获取长期海洋环境资料, 特别是水体内部环境参数垂直分布信息的最常用的技术手段。出于以下三方面的原因, 需要对潜标系统在水中的受力情况和姿态进行精确的分析和计算:

(1) 为了保证潜标系统不会因风浪、海流等外力作用造成连接部件断裂或产生整体移位, 导致潜标丢失, 必须通过计算给出合理的部件受力设计参数及锚定重量。(2) 为了正确地利用潜标测得的数据推算出布放水域的环境参数垂直分布信息, 需要清楚地知道潜标组成设备的水下位置和姿态。(3) 为了监测某一水深的环境参数, 必须通过一定的浮力设计, 保证测量设备的空间位置相对固定。

特别是对于深水区布放的半悬浮式的潜标系统, 由于海流的拖曳作用, 设计不当, 系统会随海流变化产生很大的位置和姿态变化, 出于安全和可靠测量的考虑, 必须对潜标系统在一定环境荷载作用下的受力及姿态进行分析。

1 潜标系统的受力和姿态分析方法

为了完成潜标系统的受力和姿态计算, 需要知道以下信息: (1) 部件的尺寸和净浮力大小; (2) 绳索的受力拉伸情况; (3) 部件在水中受到的拖曳力的大小; (4) 部件的综合受力分析。

潜标设备的尺寸和净浮力可由厂家提供, 绳索的尺寸可以根据布放水深进行设计。由于在张力的作用下, 绳索部件会产生拉伸, 引起长度变化。该变化符合以下规律:

$$L_i = H_i \left[1 + \frac{T_i}{\pi R_i^2 M_i} \right] \quad (1)$$

式中 L 为拉伸后的长度, H 为自然长度, T 为绳索所受的张力, R 为绳索截面半径, M 为绳索材料的弹性模量。常用的潜标绳索由涤纶、尼龙、钢、Kev-

lar、聚丙烯、聚乙烯等材料制成, 其弹性模量分别为: 1.38×10^{11} , 6.9×10^8 , 3.45×10^8 , 3.45×10^8 , 6.9×10^{10} 和 6.9×10^8 Pa。

利用张力分析结合该表, 可以知道绳索尺寸的变化, 从而更准确地计算潜标组件的位置。在深水处, 潜标所受的拖曳力主要由海流引起, 其在 x , y , z 三个方向的分力可以用以下计算公式获得:

$$Q_j = \frac{1}{2} \rho_w C_{Dj} A_j U U_j \quad (2)$$

式中 ρ_w 为海水密度, A_j 为受力物体在垂直于流速方向平面上的投影面积, C_{Dj} 为拖曳系数, 它是物体形状、粗糙度以及海水的雷诺数的函数。 U 为海水总流速, 其值为:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (3)$$

U_j 为 $j(x, y, z)$ 方向的流速值。通常对于直径较大的球体, C_{Dj} 取值为 0.65, 较小的球体为 1.0; 对于圆柱体, 取值为 1.0~1.3。当已知布放海域的海流空间分布以及潜标个组件的尺寸, 就可以计算潜标系统所受的由海流引起的拖曳力。

潜标组件 E_i 在水中的受力情况如图 1 所示, 其中垂向作用力有: (1) 净浮力 B ; (2) 上端张力 T_i 的垂直分量; (3) 下端张力 T_{i+1} 的垂直分量; (4) 垂向

收稿日期: 2008-04-02; 修回日期: 2008-05-18

基金项目: 中国海洋石油总公司综合科研项目“渤海海域水文气象设计参数的区划研究”; 中国海洋石油总公司综合科研项目“深水区油气田开发水文气象监测及研究”; 中国海洋石油总公司工程应用项目“番禺海洋平台水文气象监测”

作者简介: 兰志刚(1963), 男, 山东青岛人, 高级工程师, 主要从事海洋工程环境研究与监测, 电话: 010-84525120, E-mail: lanzhg@cnooci.com.cn

流拖曳力 Q_{zi} 。水平作用力有: (1) 上端张力 T_i 的水平分量; (2) 上端张力 T_{i+1} 的水平分量; (3) 水平流产生的拖曳力 Q_{xi} 和 Q_{yi} 。

系统受力平衡后, 满足如下方程:

$$Q_{xi} + T_i \cos\theta_i \sin\phi_i = T_{i+1} \cos\theta_{i+1} \sin\phi_{i+1} \quad (4)$$

$$Q_{yi} + T_i \sin\theta_i \sin\phi_i = T_{i+1} \sin\theta_{i+1} \sin\phi_{i+1} \quad (5)$$

$$B_i g + Q_{zi} + T_i \cos\phi_i = T_{i+1} \cos\phi_{i+1} \quad (6)$$

对于顶端浮球以外的每个组件, 上述方程组有 6 个未知数, 他们分别是: 上端张力 T_i , 下端张力 T_{i+1} , 上端的 Z 方向夹角 ϕ_i , 下端的 Z 方向夹角 ϕ_{i+1} , 上端 $X-Y$ 平面上的夹角 θ_i , 下端 $X-Y$ 平面上的夹角 θ_{i+1} 。

由于顶部的浮球上端不受张力, 方程组只有 3 个未知数, 可以求解。而且相邻两个部件的张力和空间夹角相同, 方向相反。我们就可以通过先求解顶部浮球的受力情况, 进而一步一步求解所有部件的受力情况。一旦张力和角度计算出来, 潜标各组件相对于固定重块的位置也可以由下式计算得出:

$$X_i = X_{i+1} + L_i \cos\theta_i \sin\phi_i \quad (7)$$

$$Y_i = Y_{i+1} + L_i \sin\theta_i \sin\phi_i \quad (8)$$

$$Z_i = Z_{i+1} + L_i \cos\phi_i \quad (9)$$

在进行系统受力分析时, 首先假定潜标是垂直站立在水中的。受力后, 潜标产生倾斜, 导致位置和姿态发生变化。对于流速随水深变化的水域来说, 水深的变化会导致拖曳力的变化。由此, 潜标倾斜后, 其受力情况会相应变化, 需要在前一步计算的基础上重新进行受力分析, 得出新的位置参数。因此, 最终的受力和位置计算结果需要进行多次迭代计算后才能获得准确的结果。

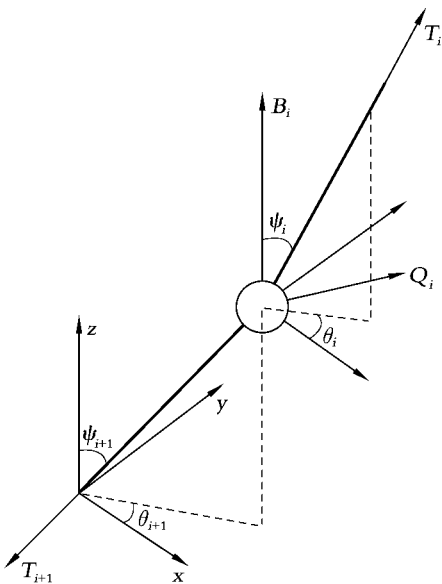


图1 潜标单元受力分析

Fig. 1 Analysis of static forces on elements of deep sea subsurface buoy

2 | 套深水潜标系统设计及受力分析

对于水深达千米以上的开发水域工程建设来说, 掌握深水区整个垂直断面上的海流剖面特征, 是至关重要的。为了测量中海石油公司深水(1 200 m)开发区域的海流剖面, 作者特设计了一套深水测流潜标。其主要设备组成和功能如下: (1) 两台 75 kHz 长距离 ADCP, 一台位于水面下约 500 m 处, 测量海洋中上层的海流剖面, 一台位于水下约 530 m 处, 测量海洋中下层的海流剖面。(2) 300 kHz ADCP: 位于距海底 100 m 处, 测量底层流速剖面。(3) 声学释放器: 位于距海底 70 m 处, 用于潜标回收。当需要回收潜标系统时, 通过舰船上的声学释放甲板单元, 向释放器发出释放指令, 释放器通过其机械结构, 释放掉位于海底的重块, 仪器设备随浮球漂到水面, 以供回收。系统构成如图 2 所示。

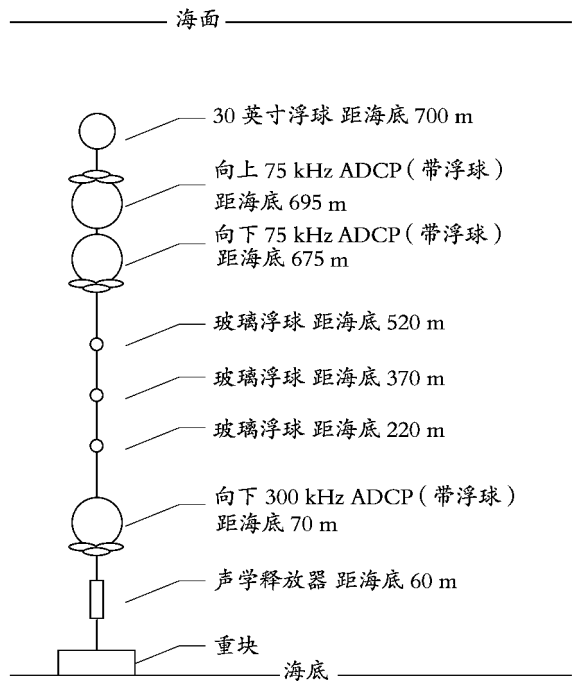


图2 深水潜标构成

Fig. 2 Composition of a deep sea subsurface buoy

鉴于该水域的水深特点以及测量的具体需要, 该潜标系统设计的总体长度达 700 m。我们希望该潜标在水下垂向位置的变化 $< 5\%$ 。由于深海区海流通常较小, 且海洋中的海流分布常常具有负指数分布特点。南海深水区海流通常不超过 1 节, 为安全设计起见, 假设 1 200 m 深的海洋中海流在 X, Y 两个方向上的分布分别为:

$$U_x = 0.6 - 0.6e^{-0.011Z} \quad (10)$$

$$U_y = 0.6 - 0.6e^{-0.011Z} \quad (11)$$

式中 Z 为水深, 则总的水平流速为 $U = 0.85e^{-0.011Z}$, 变化等参数的结果如表 1 所示。则算得的潜标受力情况以及由此引起的位置、姿态

表 1 深水潜标受力和姿态计算结果

Tab. 1 Calculation results of static forces on a deep sea subsurface buoy and its attitude

锚系组件	实际尺寸(m)	净浮力(kg)	实际高度(m)	高度偏移(m)	X 方向偏移(m)	Y 方向偏移(m)	上端张力(kg)	下端张力(kg)	上端偏角(°)	下端偏角(°)
30 英寸浮球	0.76	160.00	665.36	34.5	142.8	142.8	0.0	160.4	4.0	4.0
1/4Kevlar 绳索	3.0	-0.01					160.4	160.4	4.0	4.3
WHS75(带浮球)	1.14	319.00	661.42	34.5	142.6	142.6	160.4	480.4	4.3	4.4
1/4Kevlar 绳索	20.04	-0.01					480.4	480.7	4.4	5.2
WHS75(带浮球)	1.14	319.00	640.31	34.4	141.3	141.3	480.7	800.6	5.2	4.9
1/2Kevlar 绳索	150.13	-0.03					800.6	805.1	4.9	11.6
玻璃浮球 1	0.43	25.40	491.03	32.8	126.1	126.1	805.1	830.7	11.6	11.5
1/2Kevlar 绳索	150.13	-0.03					830.7	836.6	11.5	17.5
玻璃浮球 2	0.43	25.40	345.31	27.9	99.5	99.5	836.6	861.9	17.5	17.2
1/2Kevlar 绳索	150.14	-0.03							17.2	22.3
玻璃浮球 3	0.43	25.40	203.68	19.0	63.5	63.5	865.5	890.0	22.3	21.8
1/2Kevlar 绳索	150.14	-0.03							21.8	24.8
WHS300(带浮球)	0.61	30.00	65.57	6.5	20.9	20.9	889.4	917.4	24.8	24.1
1/2Kevlar 绳索	10.01	-0.03							24.1	24.2
Benthos 866A	0.66	-13.00	55.86	5.5	17.9	17.9	917.2	905.3	24.2	24.6
1/2Kevlar 绳索	60.06	-0.03							24.2	24.8
重块	1.00	-2 500.0	0.5	0.0	0.0	0.0	903.7		24.8	

重块上的总张力 = 903.7 kg, 垂直负荷 = 820.5 kg, 水平负荷 = 378.9 kg, 重块在水中的安全净质量 = 2 117.9 kg, 铁质重块在空气中的安全净质量 = 2 503.4 kg, 混凝土重块在空气中的安全净质量 = 3 350.7 kg。

锚块安全配重由美国 WOODSHOLE 研究所推荐的经验公式求得:

$$W = 1.5 \left[T_{\parallel} + \frac{T_{\perp}}{0.6} \right] \quad (12)$$

式中 T_{\parallel} 为重块的水平负荷, T_{\perp} 为重块的垂直负荷。

经上述计算得出, 潜标在该假定海流剖面荷载作用下的姿态如图 3 所示。

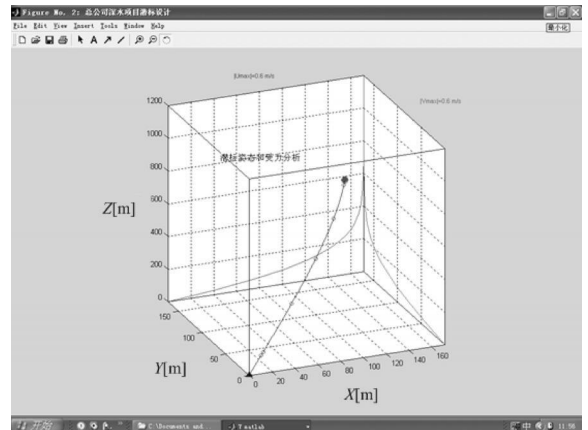


图 3 设计的潜标在假定海流剖面荷载作用下的姿态
Fig. 3 Attitudes of the designed subsurface buoy under the assumed background current profile

3 小结

为了使潜标系统能够按照测量方案设计要求正确地实施测量,提高潜标系统安全性,应该对潜标系统在一定环境荷载作用下的受力及姿态进行分析计算,计算连接部件的设计负荷,优化系统的浮力和配重。作者结合深海海流剖面测量实际应用,详细介绍了一种简便的潜标系统的静力计算和姿态分析的步骤与方法,可供潜标设计人员参考。

参考文献:

[1] 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.

- [2] 李飞权, 张选明, 张鹏, 等. 海洋潜标系统的设计和应用[J]. 海洋技术, 2004, 23(1): 19-21.
- [3] 李飞权, 王海峰. 深海潜标系统测量表层流的设计与试验[J]. 海洋技术, 2002, 23(1): 19-21.
- [4] Breaux H O. Buoy Engineering[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [5] Myers J J, Holm C H, McCallister R F. Handbook of Ocean and Underwater Engineering[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1969.
- [6] Trask R P, Weller R A. Mooring[R]. Woods Hole, Massachusetts USA: Academic Press of Woods Hole Oceanographic Institution, 2001.

The design and attitude analysis of a subsurface buoy for deep sea current profiling

LAN Zhi-gang¹, YANG Sheng-he¹, LIU Li-wei², GONG De-jun³, LI Si-ren³, ZHU Su-lan³

(1. Beijing Branch, China National Offshore Oil Corporation Base Group, Beijing 100027, China; 2. Panyu/Huizhou Gas Development PMT, CNOOC Ltd., Shenzhen 518067, China; 3. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Apr., 2, 2008

Key words: subsurface buoy; current profile; force analysis; wire tension; drag

Abstract: Combined with the application of deep sea current profiling, some issues which should be noticed in designing subsurface buoys were introduced. The steps and simplified methods to calculate a static force on a subsurface buoy and the attitude of the buoy was presented in this paper. In terms of the measurement requirements, position and pitch of each component of the buoy as well as the buoyance and anchor weight of the buoy were calculated under the assumed background current profile.

(本文编辑: 刘珊珊)