

· 采集技术 ·

二次水声定位系统误差分析

易昌华*^{①②} 任文静^② 王钊^②

(^①武汉大学测绘学院,湖北武汉 430079; ^②中国石油东方地球物理公司,河北涿州 072751)

易昌华,任文静,王钊. 二次水声定位系统误差分析. 石油地球物理勘探, 2009, 44(2): 136~139

摘要 本文介绍了二次水声定位系统的系统构成、定位原理和整个系统控制流程,详细剖析了二次水声定位过程中产生的GPS测量系统误差、天线相位中心天顶坐标系下的三维改正、GPS系统和发射/接收换能器位置引起的误差、定位流程和时间延迟误差、声速计算中存在的误差等,从其大小和方向等方面进行定性和定量研究,给出了减小和消除各种误差,进而提高定位精度的方法。

关键词 二次定位 测量误差 GPS 数据采集单元(DAU) 水声换能器 误差传播定律

1 概述

近年来,基于GPS定位与水声定位相结合的水下定位技术,已广泛地应用于水下地形测绘、海洋资源开发、海洋工程建设、海底地壳运动监测等领域。长基线、短基线和超短基线等水下声定位的理论和系统已在实际中得以建立和应用。本文所设计的定位系统是一个长基线和短基线相结合的定位系统,由安装在船只上的收发器(transducer)和一系列固定在海底的应答器等两部分构成。系统通过多点测量得到收发器和应答器之间的距离,利用球面交会法就可以对水下目标进行定位解算。目前在水下定位系统中测量收发器和应答器之间的距离多采用由测得的收发器收发信号之间的时间差再乘以声速来获得。由于水中声速不是一个固定值,而声线的轨迹(速度—深度关系曲线)也不是一条直线,因此采用时间乘以声速的方法会带来很大的测距误差,从而直接影响水下定位结果。特别是在复杂多变的海洋中,此误差更严重。

基于此,本文阐述了声学定位系统的原理,并对系统工作过程中可能产生的误差进行了讨论,且提出了修正方法。

2 系统组成及定位原理

本测量定位系统主要由以下几大模块构成:主控计算机、数据采集单元(DAU)、GPS接收机、应答

器以及船载水声换能器等。主控计算机用于控制GPS数据的接收、设置DAU、获取水声换能器的发射时刻和DAU回送的应答器信息,并对全部数据进行处理。DAU主要接收应答器的数据并转发给主控计算机,它可根据不同的海况和海深随时改变其发射功率及应答器组号信息等。GPS接收机可获取各接收点的位置和时间信息。船载水声换能器主要实现电信号与声信号的转换并完成声信号的发射和接收。应答器是布放于海底的全封闭式系统,每个应答器都有事先被设定的ID号,它主要接收声信号并输出响应,也可通过压力传感器测量应答器所在位置的水深。

定位系统的结构框图如图1所示。其定位方法为:行驶中的舰船拖拽一个位于水下的收发并置的水声换能器,以一定的时间间隔发射询问信号,海底应答器接收到信号后发回响应信息,换能器接收到该返回波后,由DAU转发给主控计算机,主控计算机计算出换能器发射信号与应答器回应信号的时间差,就可以得到换能器与应答器之间的斜距值。而

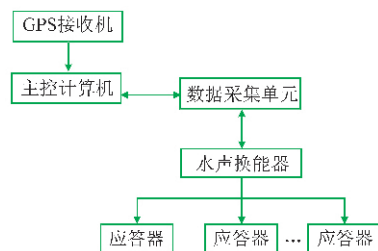


图1 长基线定位系统框图

* 河北省涿州市东方地球物理公司装备事业部,072751

本文于2008年1月10日收到,修改稿于2008年8月20日收到。

换能器的位置坐标可通过 GPS 得到,经过解算就能得出海底应答器的位置。测量原理如图 2 所示。

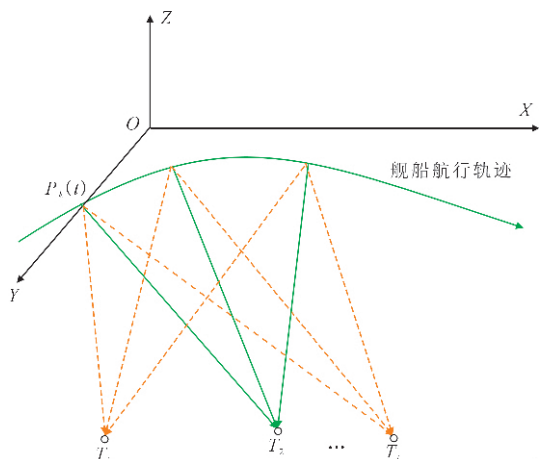


图 2 海上二次定位系统测量原理图

T_1, T_2, \dots, T_i 为布放了水声应答器的海底控制点; $P_k(t)$ 为测量船上 GPS 接收机的瞬时位置,可通过 GPS 相对动态定位而精密确定。在用 GPS 接收机同步观测 GPS 卫星进行定位的同时,利用海底水声应答器同步测定 $P_k(t)$ 到 T_i 之间的距离 $S_{ki}(t)$, 则可得到距离观测方程

$$S_{ki}(t) = [X_k(t) - X_i]^2 + [Y_k(t) - Y_i]^2 + [Z_k(t) - Z_i]^2 \quad (1)$$

式中: $(X_k(t), Y_k(t), Z_k(t))$ 为 GPS 接收机的坐标; (X_i, Y_i, Z_i) 为海底控制点的待定坐标。对船只移动进行多次观测,有三个以上历元的同步观测结果,便可以通过平差的方法确定海底控制点的位置^[1]。

3 系统误差分析

在海上声学二次定位系统中,定位精度是衡量系统性能优劣的重要技术指标。下面将对影响应答器定位精度的因素进行分析。

3.1 GPS 测量本身存在误差

GPS 在测量其天线相位中心坐标时,本身存在不可避免的系统误差,目前还没有办法消除该误差对应答器定位精度的影响。由于该误差通常为厘米级,因此在定位精度要求不高时将被忽略。

3.2 GPS 天线相位中心天顶坐标系下的三维改正

GPS 天线和换能器分别安装在船体甲板上、下方, GPS 天线中心距离换能器中心有一段距离 d_h , 换能器位置是由 GPS 天线位置和两者之间的相对位置关系推算出来的。GPS 天线在测量瞬间并不

一定处于水平状态,因而所测得的坐标只是其相位中心的瞬时坐标。若想根据 GPS 天线相位中心坐标推算换能器中心坐标,则需在以 GPS 天线相位中心为原点的所谓天线天顶坐标系下完成三维姿态改正,即计算出船体姿态对由 GPS 天线相位中心坐标推算的换能器中心坐标的影响的改正数。

$N''T''E''$ 是以 GPS 天线中心 O'' 为原点的天线天顶坐标系,其中 N'' 指向船艏方向, T'' 指向天顶方向。 $N'T'E'$ 是以水听器探头 O 为原点的三维天顶坐标系,其中 N' 指向船艏方向, T' 指向天顶方向。 NTE 是以水听器探头 O 为原点的三维地平坐标系,其中 N 指向北方向, E 指向东方向, T 指向天顶方向。GPS 天线到水听器探头的垂直高度为 d_h 。设由姿态传感器测量得到的船艏方向角为 θ_h , 横摇角为 θ_r , 纵摇角为 θ_p , 那么 GPS 天顶坐标系坐标改正实际就是计算在天顶坐标系下水听器中心的坐标(图 3)。其坐标旋转改正公式为

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_h & -\sin\theta_h & 0 \\ \sin\theta_h & \cos\theta_h & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_p & 0 & -\sin\theta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_p & 0 & \cos\theta_p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ 0 & \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_h \end{bmatrix} \quad (2)$$

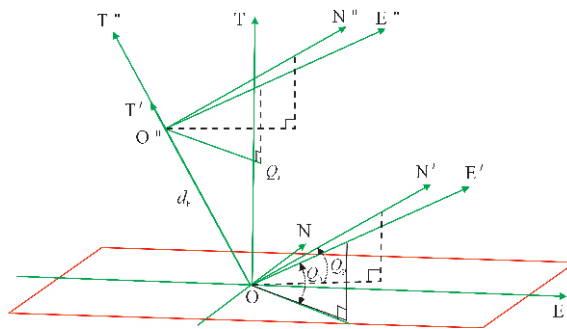


图 3 GPS 天线相位中心天顶坐标系下的三维改正

3.3 GPS 系统和发射/接收换能器位置引起的误差

GPS 系统的天线和发射/接收换能器虽然均安装在测量船上,但是位置往往不在一起,这样两者位置上的差异会引起计算出的换能器位置的偏差。这种偏差可通过以下方法解决:尽量在施工中将 GPS 系统和换能器安装在同一垂直线上;如果不在同一垂直线上, GPS 系统和换能器之间可以通过测量船坐标系建立起一种坐标转换关系。GPS 测量的数据为大地坐标系,测量船坐标系是以 GPS 相位中心

为坐标原点,船艏向(即船航行方向)为 X 方向,垂直 X 方向向上为纵坐标。当测量船在大地坐标系中以方位角 α 角(逆时针)航行,并假设换能器在测量船坐标系中位置为 (a, b) , GPS 在大地坐标系中位置为 (x_g, y_g) , 则换能器在大地坐标系中坐标 (X_h, Y_h) 为

$$\begin{aligned} X_h &= x_g + a\cos\alpha - b\sin\alpha \\ Y_h &= y_g + a\sin\alpha + b\cos\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

从该式可以看出,船艏方向的测量误差、GPS 相对换能器的空间位置测量误差会直接影响换能器坐标的测定。一般 a, b 的测量误差相同,均记为 m_a ; x_g 和 y_g 的误差可忽略,换能器在大地坐标系中的测量误差为 (m_{x_h}, m_{y_h}) , 偏移距离误差为 m_{ph} 。按照误差传播定律,可得到

$$\begin{aligned} m_{x_h} &= \sqrt{m_a^2 + (a^2\sin^2\alpha + b^2\cos^2\alpha)m_a^2} \\ m_{y_h} &= \sqrt{m_a^2 + (a^2\cos^2\alpha + b^2\sin^2\alpha)m_a^2} \\ m_{ph} &= \sqrt{2m_a^2 + (a^2 + b^2)m_a^2} \end{aligned} \quad (4)$$

不难看出,偏移距离的测量误差直接影响到换能器的误差,而船艏向的测量误差对换能器坐标误差的影响与偏移距离直接相关。假定不考虑偏移距离的测量误差,换能器坐标的误差与偏移距离成正比。GPS 与 DAU 相对位置误差对应答器定位精度的影响较大,在 Z (垂直)方向上应答器的测量误差等于 GPS 与 DAU 相对位置的垂直误差,水平误差随具体测量情况而有所不同。GPS 与 DAU 的相对位置误差在大小和方向上都是恒定的,故可以通过在数据处理环节直接对 GPS 定位坐标 (x, y, z) 进行补偿而消除,补偿后相对位置误差对应答器定位精度无影响。

3.4 时间延迟误差

本系统定位测试过程如图 4 所示,其具体步骤如下:

- (1)GPS 每秒测量 1 个数据,传递给主控软件(位置 1);
- (2)操作员设定主控软件发送指令给 DAU;
- (3)DAU 接收到主控软件指令后,通过换能器发送数据给应答器(位置 2),并计时;

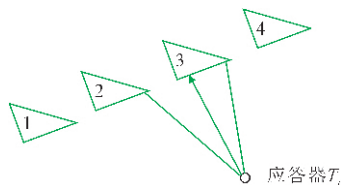


图 4 系统定位测试过程示意图

(4)DAU 接收到应答器返回的数据(位置 3), 计算激发和回收信号之间的时间间隔,再转发给主控软件;

(5)主控软件接收到返回的数据后(位置 4),立即匹配当前的 GPS 测量数据(匹配到位置 1);

(6)根据匹配的测量数据和返回的时间,计算定位应答器位置。

针对上面的过程,GPS 测量到地理坐标数据后传输到主控软件,主控软件发送数据到 DAU,DAU 接收到数据后即进行处理,再发射数据到应答器并接收应答器响应,然后 DAU 将接收到的应答器响应返回到主控软件,这些过程均需要时间。而在系统中只有 DAU 发射数据到应答器再接收应答器响应的这段时间由 DAU 测量得到并作为测距参与定位计算中,其余时间没有直接体现。由于测量船的运动,这些时间必将导致发送点和接收点位置不一致,在计算测距时,基本采用声速与时间的乘积,然后除以 2 得到,即假设 DAU 发送点和接收点相同来进行。实际上,测量船是运动的,DAU 发送点(位置 2)和接收点(位置 3)必不在同一点。因此接收点位置坐标的计算存在误差,需要补偿。由于是浅水定位,要求水深大致为 200m,最远定位距离不超过 500m,这样声信号往返持续时间最多为 0.67s,航船大约会前进 3m 左右。当然,这只是最坏情况下的假设,实际中可尽量沿着所布设的应答器航行,使往返时间减小。但误差始终是存在的,这就要求我们设法去减小它。

图 5 为声传播路径模型。由于声传播距离 \overline{ac} 和 \overline{bc} 大约为 200m 以上,而航船行驶位移 \overline{ab} 大约为 3m,相对于 \overline{ac} 和 \overline{bc} 非常小,则可将 \overline{ac} 和 \overline{bc} 看成近似相等,它们构成一个等腰三角形,这样就可以选取 \overline{ab} 中点来对 c 点进行定位。而对 \overline{ab} 中点的定位就是依据拉格朗日插值法^[2],由多次 GPS 的信息,根据开始时刻对发射时航船的大地直角坐标进行插值解算。

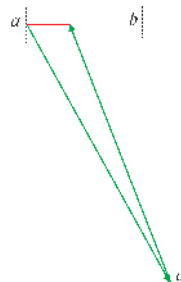


图 5 声传播模型

GPS 定位所需时间 t , 水面舰船定位时刻 T , 在确定水面舰船实时位置 $N(x, y, z)$ 的插值计算中, 以时间 t 为间隔选取三个相邻的样点 $N_1(x_1, y_1, z_1), N_2(x_2, y_2, z_2)$ 和 $N_3(x_3, y_3, z_3)$ 。插值模型如图 6 所示。

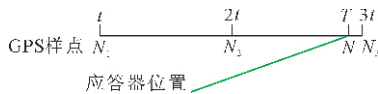


图 6 水面舰船实时位置计算的插值模型

将三样点的时刻分别用 $t, 2t, 3t$ 表示, 则插值公式为

$$\begin{cases} x = \frac{(T-2t)(T-3t)}{(t-2t)(t-3t)}x_1 + \frac{(T-t)(T-3t)}{(2t-t)(2t-3t)}x_2 + \frac{(T-t)(T-2t)}{(3t-t)(3t-2t)}x_3 \\ y = \frac{(T-2t)(T-3t)}{(t-2t)(t-3t)}y_1 + \frac{(T-t)(T-3t)}{(2t-t)(2t-3t)}y_2 + \frac{(T-t)(T-2t)}{(3t-t)(3t-2t)}y_3 \\ z = \frac{(T-2t)(T-3t)}{(t-2t)(t-3t)}z_1 + \frac{(T-t)(T-3t)}{(2t-t)(2t-3t)}z_2 + \frac{(T-t)(T-2t)}{(3t-t)(3t-2t)}z_3 \end{cases} \quad (5)$$

可将式(5)算出的插值点坐标作为当时发射时航船的大地直角坐标。通过以上算法的处理便可减小动态定位中时间延迟误差对应答器定位精度的影响。

3.5 声速计算中存在误差

本系统中测量的换能器到应答器的斜距是由声速 C 与传播时间 t 的乘积给出的。由于水下环境复杂, 导致声速传播路径也复杂。如果总采用声速为 1500m/s 来计算测距, 必然会带来测距误差。声速 C 在水中一般是按梯度分布的, 它与海水的温度 T 、盐度 S 、压力 P 都有一定的关系, 即随其增加而增大, 其中以温度的影响最显著。温度增加时, 压缩系数减小, 但密度变化不明显, 则声速随温度的增加而增大。盐度增加时, 压缩系数明显减小, 密度也增加, 则声速也随盐度而增加。静压力的增加也使压缩系数减小, 故声速也随压力的增加而增大^[3]。

通常声速测量采用下列经验公式

$$C = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \times 10^{-2} T^2 + 2.9 \times 10^{-4} T^3 + (1.34 - 10^{-2} T)(S - 35) + 1.6 \times 10^{-2} P \quad (6)$$

进行计算补偿。然而实际测量的是距离, 只知道某一点的声速是没有意义的, 工程上常用加权平均声速来计算距离。平均声速一般定义为

$$\bar{C} = \frac{1}{H} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(C_i + C_{i+1})(z_{i+1} - z_i)}{2} \quad (7)$$

具体计算方法为:

(1) 测量作业区中不同深度位置的声速值, 画出声速分布曲线(图 7);

(2) 将声速曲线沿深度分为 N 层, 使每层中声速随深度呈近似线性变化;

(3) 由式(7)计算平均声速值。

只有基于准确的声速参数, 应答器的定位精度

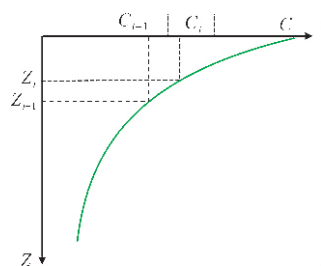


图 7 海水中的声速拟合曲线

才能得以保证。因此实际测量中一定要先对实测海域进行声速取样测定, 获取精确声速数据, 并通过主控软件的“参数设置”选项输入该精确值, 用于确定定位算法中的参数。

4 结束语

本文详细分析了海上声学二次定位系统定位测量各环节存在的误差, 从其大小和方向等方面做了定性和定量研究, 评估了它们对应答器定位精度的影响, 从而为减小或消除误差、提高定位精度提供了依据和方法。

虽然理论上只需要三次定位观测就足以确定应答器的位置, 但在实际测量中为了提高应答器的定位精度, 必须对观测到的多次测量值进行平差处理。本系统在定位算法中采用最小二乘法对定位数据做逐推估计, 以确保海上二次定位系统的精度和可靠性。

参考文献

[1] 侯自强, 李贵斌. 声纳信号处理原理与设备. 北京: 海洋出版社, 1986
 [2] 樊昌信. 通信原理. 陕西西安: 西北电讯工程学院, 1984
 [3] 秦臻. 海洋开发与水声技术. 北京: 海洋出版社, 1984

(本文编辑: 朱汉东)