



管节沉放对接中环境因素 对声呐测距精度的影响*

方长远¹, 李惠明², 梁国栋¹, 赵建虎³, 刘国辉³

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东广州 510300;

2. 中交第四航务工程局有限公司, 广东广州 510231; 3. 武汉大学测绘学院, 湖北武汉 430079)

摘要: 为确保管节水下沉放对接中声呐定位系统的测距和定位精度, 对影响声呐测距精度的主要环境因素进行了研究, 分析了温度和盐度对声速的影响及其引起的声线弯曲对测距的影响、多路径效应对测距的影响和海水浑浊度对测距的影响, 给出了对管节精确沉放和对接施工有指导性作用的结论和建议。

关键词: 管节沉放; 声呐定位; 声线弯曲; 多路径效应; 浑浊度

中图分类号: O 427.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0042-04

Influence of environment factors on ranging accuracy in pipe sinking

FANG Chang-yuan¹, LI Hui-ming², LIANG Guo-dong¹, ZHAO Jian-hu³, LIU Guo-hui³

(1. Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China; 2. CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510231, China; 3. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: To ensure the accuracy of sonar positioning in pipe sinking, we study the influence of environment factor on the positioning. Based on the analysis of the influence of temperature and salt on the sound ray curve, multi-path effect and turbid degree, we draw some conclusions for pipe sinking and connecting construction.

Key words: pipe sinking; sonar positioning; sounding ray; multi-path effect; turbid

管节水下沉放和对接施工中, 需要对管节实施精密定位, 尤其在管节对接时, 定位精度要求非常高^[1-3]。声呐是利用水中声波对水下目标进行测距定位的电子设备, 因此声呐法测量定位技术在沉管隧道施工中得到了广泛的应用, 日本京叶线53F0场隧道和多摩川隧道均采用了声呐定位测量技术^[4-5]。声呐法沉管定位设备配置见图1, 工作原理见图2。

水下声呐定位系统借助声呐测距、后方交会原理, 根据已沉管上控制点坐标和实测距离, 计算待沉管上控制点与已沉管上控制点间的坐标矢量, 进而获得待沉管上各控制点坐标。

$$S_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \quad (1)$$

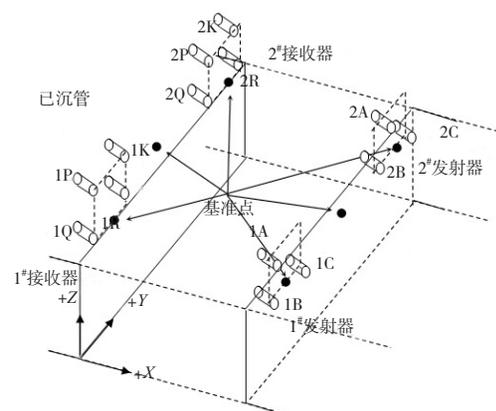


图1 声呐定位系统设备配置

收稿日期: 2012-09-20

*基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B01)

作者简介: 方长远(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事施工测量技术管理工作。

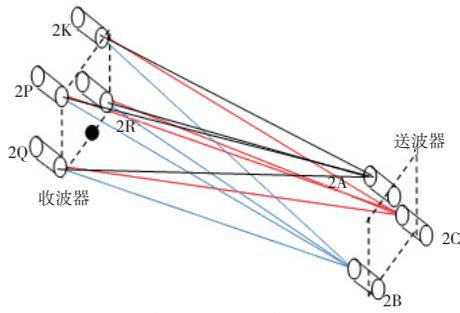


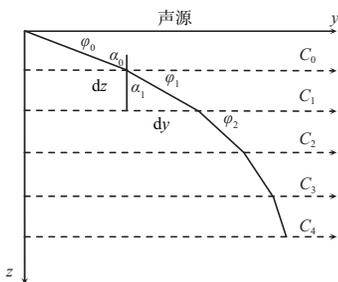
图2 声呐定位系统工作原理

由图1知,根据实测距离 S_{ij} ,可组成12个距离方程,结合已沉管上坐标 (X_j, Y_j, Z_j) ,解算待沉管上各控制点坐标 (X_i, Y_i, Z_i) ,从而指导待沉管沉放和对接作业。

由式(1)知,待沉管点位计算精度依赖于测量距离精度 S ,而 S 借助声呐测距方式获得,管节沉放海域水文条件复杂,对 S 的准确确定具有显著的影响。水下声呐定位系统通过测距交会来实现定位,测距精度对最终的定位精度影响显著,需对影响测距精度的各种因素进行分析以得出测距修正模型,进而实现精确测距和定位。

1 声速对测距精度的影响

海水中,声速随温度、盐度和压力的变化而变化,是压力 $P(\text{bar})$ 或者深度 $Z(\text{m})$ 的线性函数,是温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 及盐度的非线性函数。海水中的声速可以用声速剖面来描述。受声速剖面影响,空间声线是一条曲线,而坐标计算需要待沉管到水下应答器间的直线距离。为此,在测距结果中应加声线弯曲修正。如图3所示,在声速垂直剖面内取直角坐标系, y 轴平行于海面, z 轴垂直向下。将声线穿透的整个水体,按照声速剖面划分为若干层,并假定各层声速垂直变化梯度 $G_c=dC/dZ$ 在层内为常数。



注: α_0 为声射线入射角; α_1 为声射线折射角;入射角与海平面夹角为 ϕ_0 ;每层中的声速分别为 C_i 。

图3 曲线修正

由图3可得:

$$\tan\alpha_1 = \frac{\Delta y}{\Delta z} = \frac{\sin\alpha_1}{\sqrt{1 - \sin^2\alpha_1}} \quad (2)$$

由Snell定律,有 $\frac{C_1}{\sin\alpha_1} = \frac{C_0}{\sin\alpha_0} = \frac{C_0}{\cos\phi_0}$,故

$\sin\alpha_1 = \frac{C_1}{C_0} \cos\phi_0$ 。代入式(2)有:

$$\frac{\Delta y}{\Delta z} = \frac{\frac{C_1}{C_0} \cos\phi_0}{\sqrt{1 - \frac{C_1^2}{C_0^2} \cos^2\phi_0}} \quad (3)$$

考虑分层声速 $C(Z)$,得计算式:

$$C(Z) = C_0 + G_c Z = C_0 \left(1 + \frac{1}{C_0} G_c Z\right) = C_0(1 + aZ) \quad (4)$$

式中: $a = \frac{1}{C_0} \frac{dC}{dZ}$,称为声速的相对速度; C_0 为入射海面层的声速。则有:

$$\frac{\Delta y}{\Delta z} = \frac{(1 + az) \cos\phi_0}{\sqrt{1 - (1 + az)^2 \cos^2\phi_0}} \quad (5)$$

当海水分层很小时,将式(5)对 y 进行积分,经整理后可得:

$$\left(y - \frac{C_0}{G_c} \tan\phi_0\right)^2 + \left(y + \frac{C_0}{G_c}\right)^2 = \frac{C_0^2}{G_c^2 \cos^2\phi_0} \quad (6)$$

这显然是一条以半径为 $R = \frac{C_0}{|G_c| \cos\phi_0}$ 的圆弧。

在这种情况下,声线曲率修正可取圆弧长与圆弧两端的弦长之差来确定,即:

$$\Delta S = -2R \left(\frac{\varepsilon}{\rho} - \sin\varepsilon\right) \quad (7)$$

式中: ε 为弦切角。

为了检验上述推导模型的正确性,进一步说明声线弯曲对定位计算的影响,开展试验研究,以期得到指导实际施工的措施。设定作业水深为50 m,给出声速剖面,计算不同入射角下声线弯曲修正量 ΔS 。统计结果如表1所示,弯曲修正变化量 ΔS 随入射角的变化如图4所示。

从以上理论模型和试验结果(表1,图4)可以看出:近距离测距,声线弯曲引起的修正量 ΔS 较小;但随着距离和水深的增加, ΔS 随之增大,最大可达2.7 cm;随着波束入射角的增大,声线弯曲修正量增大。

表1 声速剖面 and 深度一定情况下, 声线弯曲修正量变化

$\theta_i / (^\circ)$	D/m	$\sum S_i / m$	$\Delta S / mm$
70	121.938	121.965	-27.0
65	105.052	105.067	-15.3
60	92.221	92.230	-9.2
55	82.375	82.381	-5.7
50	74.724	74.728	-3.7
40	63.955	63.957	-1.6
30	57.175	57.175	-0.7
20	53.002	53.002	-0.3
10	50.725	50.725	-0.1
5	50.180	50.180	0.0

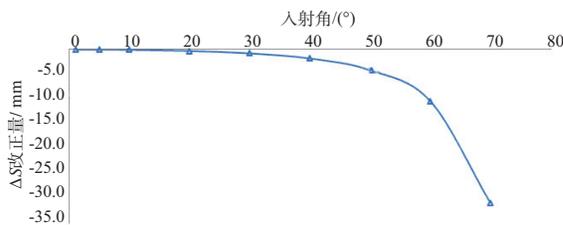


图4 声线弯曲修正随初始入射角变化曲线

因此, 沉管下放作业时声呐定位中声线弯曲修正不容忽视, 应实测声速剖面, 采用声线跟踪法, 对其实施修正, 提高测距精度。在水面上, 利用GPS将待沉管和已沉管在纵向控制在一个较小的距离范围内, 然后再开始下放, 期间采用声呐测距定位, 可保证入射角度在一个较小的范围内, 可减小声线弯曲修正量, 提高测距和定位精度。声呐测距定位精度与距离相关, 随着待沉管与已沉管距离的减小, 测距精度将提高, 因此, 在实际作业中, 应考虑这一特性, 随着距离减小, 适当增加声呐定位法的定位解在综合定位中的权重; 当待沉管与已沉管近似为一水平层内时, 声线弯曲修正可以不予考虑。

2 多路径效应的影响

主动声呐发射声波在海水中传播时, 如遇障碍物会发生反射, 此时被动声呐所接受到的信号不是由主动声呐直接发射过来的, 而是经过障碍物反射后的信号。如图5所示, 反射信号多经过的路径长度称为波程差, 用 Δ 表示。若 H 为声呐离水底高度, 则有

$$\Delta = GA - OA = GA[1 - \cos(2z)] = \frac{H}{\sin z} [1 - \cos(2z)] = 2H \sin z \quad (8)$$

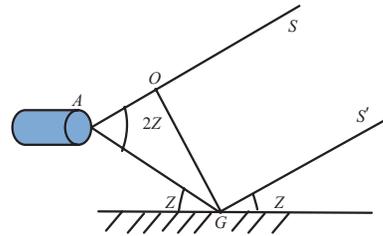


图5 多路径误差

由于存在波程差 Δ , 所以反射波和直射波间存在一个相位延迟 θ (以弧度为单位), 即:

$$\theta = \Delta \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{4\pi - H}{\lambda} \sin z \quad (9)$$

式中: λ 为载波波长。

反射波除了存在相位延迟外, 信号强度一般也会减小。反射面反射信号的能力可以用反射系数 α 来表示, $\alpha=0$ 表示信号完全被吸收不反射, $\alpha=1$ 表示信号完全被反射不吸收。

声波在传播过程中总会遇到障碍物, 所以实际测量中, 多路径误差是不可避免的, 只能通过采取相应的措施来减弱。主要方法有: 选择合适的接收声呐; 适当延长观测时间; 多路径误差取决于接收声呐周围的环境, 一般存在周期性变化。

由于下放和对接过程中沉管上的接收声呐位置保持不变, 故可采用延长时间、统计最短传播距离的办法来削弱多路径效应的影响。

3 海水浑浊度对测距的影响

管节下沉作业时, 由于海水搅动的影响, 安装在海底已沉管上的波形接收器周围区域水质相对浑浊, 不但会造成声呐测距过程中声能的衰减, 还会导致声波提前返回。因此, 采用声呐设备进行测距定位时, 需选择恰当频率的声呐系统, 分析这种频率下声波的穿透能力, 即讨论声波的有效作用距离和声波的频率以及海水浑浊度之间的关系。

声强常用声强级来描述。规定 $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$ 作为测定声强的标准, 定义声强级 L 为:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (10)$$

式中: 声强 I 是声波的平均能流密度, 即单位时间内通过垂直于传播方向单位面积的声波能量。

$$I = \frac{1}{2} \rho u A^2 \omega^2 \quad (11)$$

式中: ρ 为声波传播介质的密度; u 为声速; A 为声波振幅; $\omega=2\pi f$ 为声波角频率。

若仅考虑单程传播,入射声波的声强级为 SL ,传播过程中的能量损失为 TL ,接收声呐所接收到的声波能量为 EL ,则有:

$$EL=SL-TL \quad (12)$$

海水中距离声源 R 处声能的传播损失为:

$$TL=20\lg R+10\alpha R \quad (13)$$

式中: TL , R 单位分别为 dB 和 m ; α 为衰减系数 (dB/m)。

在浑浊的海水中 α 的求取可用下式来表示:

$$\alpha = 10\lg e^2 \left[\frac{\varepsilon k (\sigma - 1)^2}{2} \cdot \frac{s}{s^2 + (\sigma + \delta)^2} \right] \quad (14)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{9}{2\beta a_s} \right) \quad (15)$$

$$s = \frac{9}{4\beta a_s} \left(1 + \frac{1}{\beta a_s} \right) \quad (16)$$

$$\sigma = \frac{\rho_s}{\rho_0}, \quad \beta = \sqrt{\omega/2\nu} \quad (17)$$

式中: ρ_s , ρ_0 为悬浮颗粒物和周围液体的密度; a_s 为颗粒物的平均半径; ν 为周围液体的动态黏性系数; ω 为入射波的角频率; ε 为悬浮颗粒物的体积浓度; k 是声波数。

假设入射声波的穿透距离为 d , 那么则有:

$$d=R_{EL=0}=R_{TL=SL} \quad (18)$$

由于入射声波的声强级 SL 可以由给定的条件或设备求出,将 $TL=SL$ 代入 (12) 式即可求出 $EL=0$ 时对应的 R , 即入射声波的穿透距离 d 。

为了进一步分析海水浑浊度对声能及传播的影响,开展传播距离、海水密度和声呐频率对声能的影响试验。

1) 传播距离对声能的影响。若海水密度不变,为 $1\,200\text{ kg/m}^3$,声频率为 30 kHz ,根据工程海域水深,从 $5\sim 100\text{ m}$ 改变传播距离,声能随距离的衰减变化如图6所示。

2) 海水密度对声能的影响。采用频率为 30 kHz 的超声波,设定水深为 50 m ,改变海水密度,密度变化范围为 $1\,025\sim 1\,350\text{ kg/m}^3$,声能随海

水密度的衰减变化量如图7所示。

3) 频率对声能的影响。设定海水密度为 $1\,200\text{ kg/m}^3$,声波传播距离为 50 m ,改变声波频率,变化范围为 $1\sim 30\text{ kHz}$,声能随频率的衰减变化如图8所示。

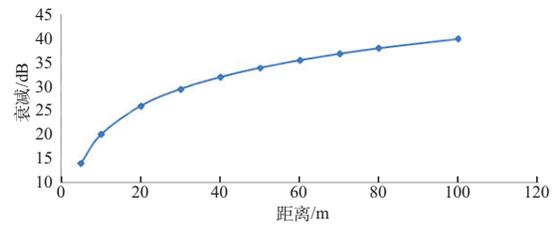


图6 距离造成的声能衰减变化

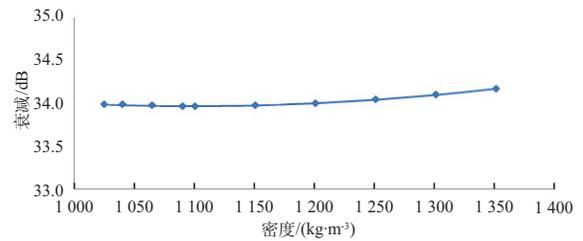


图7 海水密度引起的声能衰减变化

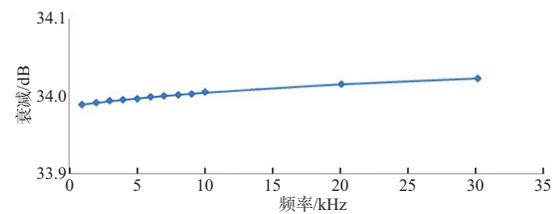


图8 声波频率引起的声能衰减变化

以上试验表明:随着传播距离的增大、海水浑浊度和声波频率的提高,声能衰减随之增大。传播距离是影响声能衰减的第一要素,其次是海水密度和声波频率。为了实现声呐精确定位,在港珠澳工程中,需要采用如下措施:正常海水密度下,根据声能与距离的衰减关系,要满足 2.5 cm 的管节对接要求,建议在发射阵列与接收阵列距离为 20 m 以内时采用声呐定位系统;当待沉管接近海床时,易搅浑海水,增加海水密度,此时会造成较大的声能衰减,建议降低设备作业频率,提高波束穿透能力,从而改善测距精度和定位精度;此外,海水密度的增大,还会引起回波杂乱现象,建议管节缓慢下放和对接,以增加多余观测,消除杂波影响,提高测距精度。

(下转第68页)