

大口径竖井参数测量系统

向大威 华乐荪 顾亚平

(上海, 中国科学院东海研究站, 200032)

1 引言

在大口径竖井的建造过程中, 往往需要在不同的深度上测量井的各种参数(诸如: 井半径、井心坐标、井轴倾斜程度)及井壁形状, 以保证建成的竖井能满足设计的要求。一般而言, 竖井内总是充满水的, 因此可以采用声学的方法来测量竖井的参数和井壁的形状。

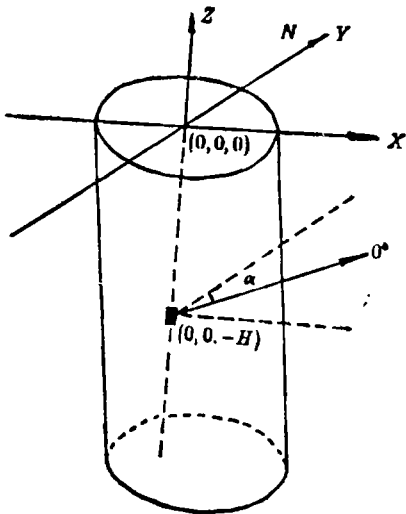


图1 大口径竖井

如图1所示, 设坐标原点在地平面上的井心处, Y轴与正北方向一致, 而Z轴垂直向上。在地面井心处将一高分辨率声呐垂直吊放入井中, 声呐沿Z轴下降, 其下降深度为H。声呐的参考方向(声呐的0°方向)与正北

声学技术

方向的夹角为 α 。当声呐波束偏转到 θ_j (相对于声呐参考方向)时, 声呐与井壁的距离为 $l(\theta_j) = \tau(\theta_j) \cdot \frac{1}{2} c_{Hh}$ 。式中 $\tau(\theta_j)$ 为声呐回波在 θ_j 方向上的时延, c_{Hh} 代表在深度H上的声速。于是, 当声呐波束旋转360°后, 就能测得在深度H处的井壁上N个点的极坐标 $[l(\theta_j), \theta_j]$ ($j=0, 1, 2, \dots, N-1$)。从而得到了在深度H处井壁的形状。然后根据本文所介绍的公式可以得到井半径R, 井心直角坐标(X, Y), 井心的极坐标(S, β)等参数。当在各个深度上均测量完毕后, 就可获得井轴的倾斜程度。

2. 原理

声呐的波束是以 $\Delta\theta$ 为步距, 步进地偏转, 即:

$$\theta_j = j \cdot \Delta\theta \quad j=0, 1, 2, \dots, N-1$$

当竖井的截面是一个标准圆时, $l(\theta_j)$ 即是圆周上j点的矢径:

$$l(\theta_j) = \rho(\theta_j)$$

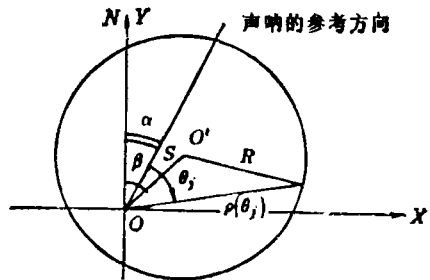


图2 大口径竖井的横截面

由图 2 及余弦定理不难求得井半径:

$$R \approx \left[\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \rho^2(\theta_j) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

用类似的方法可以得到井心坐标:

$$\begin{cases} X \approx \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \rho(\theta_j) \cdot \sin(\theta_j + \alpha) \\ Y \approx \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \rho(\theta_j) \cdot \cos(\theta_j + \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} S = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}} \\ \beta = \arctg \frac{X}{Y} \end{cases} \quad (3)$$

这样, 由式(1)至式(3)就获得了井半径 R 及井心的直角坐标 (X, Y) , 井心的极坐标 (S, β) 。

实际竖井的截面不可能是一个理想的标准圆, 另外还存在测量误差, 此时:

$$l(\theta_j) = \rho(\theta_j) + n_j$$

式中, n_j 是由于井壁的凹凸不齐(非标准圆)以及测量误差所引入的。若以:

$$\widehat{R} = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} l^2(\theta_j) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \widehat{X} = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} l(\theta_j) \cdot \sin(\theta_j + \alpha) \\ \widehat{Y} = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} l(\theta_j) \cdot \cos(\theta_j + \alpha) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} X_c = \left[\widehat{X} + \frac{B_w}{180^\circ} \sin \widehat{\beta} \cdot \left(\widehat{R} - \frac{\widehat{R}^2 - \widehat{S}^2}{2\widehat{S}} \ln \frac{\widehat{R} + \widehat{S}}{\widehat{R} - \widehat{S}} \right) \right] / \cos \frac{B_w}{2} \\ Y_c = \left[\widehat{Y} + \frac{B_w}{180^\circ} \cos \widehat{\beta} \cdot \left(\widehat{R} - \frac{\widehat{R}^2 - \widehat{S}^2}{2\widehat{S}} \ln \frac{\widehat{R} + \widehat{S}}{\widehat{R} - \widehat{S}} \right) \right] / \cos \frac{B_w}{2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} S_c = (X_c^2 + Y_c^2)^{\frac{1}{2}} \\ \beta_c = \arctg \frac{X_c}{Y_c} \end{cases} \quad (9)$$

3 系统

如图 3 所示, 整个测量系统可以分成井

$$\begin{cases} \widehat{S} = (\widehat{X}^2 + \widehat{Y}^2)^{\frac{1}{2}} \\ \widehat{\beta} = \arctg \frac{\widehat{X}}{\widehat{Y}} \end{cases} \quad (6)$$

分别作为 $R, X, Y, S,$ 及 β 的估计量, 且当 n_j 满足:

$$E[n_j] = 0 \quad E[n_j \cdot n_k] = \begin{cases} 0 & j \neq k \\ \sigma^2 & j = k \end{cases}$$

则可以得到:

$$\begin{aligned} E[\widehat{R}] &= R & E[\widehat{R}^2 - R^2] &\approx \sigma^2/N \\ E[\widehat{X}] &= X & E[\widehat{X}^2 - X^2] &\approx 2\sigma^2/N \\ E[\widehat{Y}] &= Y & E[\widehat{Y}^2 - Y^2] &\approx 2\sigma^2/N \end{aligned}$$

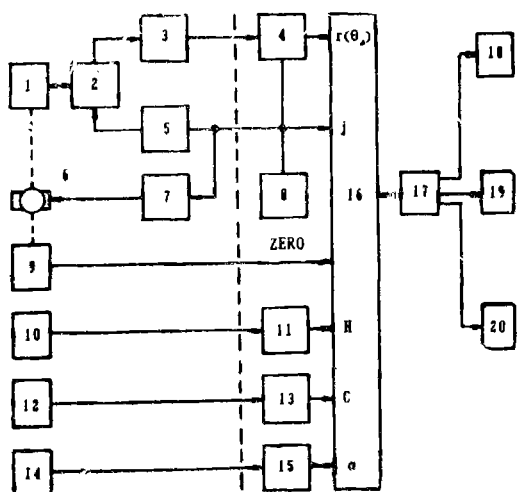
显见: 估计量 \widehat{R}, \widehat{X} 和 \widehat{Y} 可以视作是无偏的。而 \widehat{R}, \widehat{X} 和 \widehat{Y} 的方差均随着 N 的增加而下降, 这就是由于平均所产生的平滑效果。

实际上, 声呐的波束总有一定的宽度 B_w , 因此当声呐朝 θ_j 方向发射及接收声脉冲时, 所测到的声呐与井壁的距离并不是 $l(\theta_j)$, 而是在声呐波束范围内最短的行程方向 (θ_j') 上的距离 $l(\theta_j')$ 。从而测得井截面不再是一个圆, 而是一个长轴在 β 方向上的椭圆。于是由公式(4)~(6)来估计 $R, X, Y, S,$ 及 β 时会引入估计误差。经推导可得: R, X, Y 及 S, β 的修正估计公式为:

$$R_c \approx \widehat{R} + \frac{B_w}{180^\circ} \cdot \widehat{S} \quad (7)$$

下子系统和地面子系统两大部分。

井下子系统包括: 声呐换能器 1; 收发转换开关 2; 声呐前置放大器 3; 声呐发射机 5; 步进电机及其驱动电路 6, 7; 声呐参考方向传感器 9; 深度传感器 10; 声速传感器 12 以及指北陀螺 14。整个井下子系统封



井下子系统 地面子系统
图 3 系统方块图

装在一个带有透声窗的密封筒体内，筒体能承受100个大气压的工作压力。

地面子系统主要包括：声呐触发脉冲发生器8；声呐接收机4；深度测量电路11；声速测量电路13；方位测量电路15；计算机接口电路16；微型计算机17；高分辨率彩色图像显示器18；绘图仪19和打印机20等。

井下子系统与地面子系统之间通过带有钢芯的无扭电缆相连接。

声呐换能器由步进电机驱动。当声呐的波束转到声呐的参考方向时，声呐参考方向传感器就向计算机发送一个回零信号(ZERO)。声呐换能器的工作频率为1MHz。换能器晶片前面装有匹配层，后有背衬，因此有很低的Q值($Q = 5.5$)。波束宽度 $\theta_{-3dB} = 2.5^\circ$ 。声呐触发脉冲发生器每隔10ms发出一个触发脉冲，并触发声呐发射机。发射机的发射脉宽为 $15\mu s$ 。同时触发脉冲又使步进电机旋转一个角度 $\Delta\theta = 1.5^\circ$ ($N = 240$)，并馈给计算机的接口电路。这样，计算机根据ZERO信号和对触发信号计数，就可以计算

出波束相对声呐参考方向的夹角 $\theta_j = j \cdot \Delta\theta$ 。

声呐接收机测量井壁的回波与发射脉冲之间的时延 $\tau(\theta_j)$ 并通过接口电路馈给微型计算机。

深度传感器实际上是一个桥式半导体压力传感器，深度测量的范围为 $0 \sim 1000m$ ，测量的相对精度 $\leq 5\%$ 。

声速传感器采用环鸣式声速计，声速测量的范围为 $1400 \sim 1560m/s$ ，测量精度为 $\pm 0.5m/s$ 。

指北陀螺用来测量声呐参考方向与正北的夹角 α ，其测量精度为 $\pm 2^\circ$ 。

根据 $\tau(\theta_j)$ 、 c 、 θ_j 、 α 及H，微型计算机就可以计算出在H深度上的井半径R、井心直角坐标(X、Y)，井心极坐标(S、 β)，并在高分辨率彩色图像显示器上或在绘图仪上显示出H深度的井壁形状及参数。当各个深度上均测量完毕后，便可得知井的倾斜程度。

测量系统的测量误差小于6mm，最大井径为4m，典型的测量结果如图4所示。

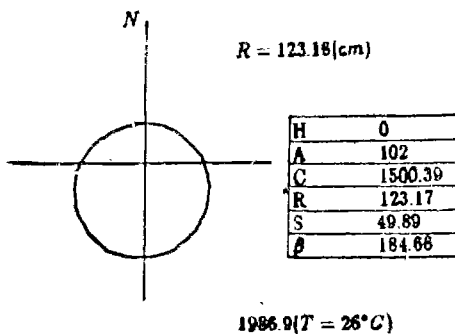


图 4 测量结果

参考文献

向大威，华乐荪，温周斌，杨彦菊，徐茂莲. 大口径竖井参数的测量方法，中国科学院声学研究所东海研究站报告，1985.9.1.