

# 水下爆炸时爆源与压力探头间距离的测定

严忠礼 赵诚钧 张金城

(中国科学院力学研究所)

## (一) 前言

水下爆炸的各主要参量如冲击波压力、冲量、能流密度等都是距爆源距离的函数,即这些参数的值都是指某一特定距离下的值。如果用传感器去测定某点的爆压等参量,则必须同时确切地测出该点与爆源的距离,否则所测得的压力等参量便毫无实际意义。由此可知,在水下爆炸的各种实际测量中,瞬间距离的测定是与测量冲击波各参量的任务具有同等的重要意义。

在水井和水池中测量小药包爆炸所产生的冲击波的诸参量时,测点与爆源的距离可以通过机械装置加以精确保证。但在江河湖海中进行各种现场实测,由于在水下进行现场布设十分困难,加上水流及涌浪等恶劣的条件所造成的影响,很难保证测点的布设距离。因此,如何提高水下爆炸中瞬间距离测量的精确度,是一项十分迫切的任务。

目前,在水中测距比较常用的方法有以下两种:

### 1. 时差测距法(双曲线法)

距二定点距离差为定值的点之轨迹为一双曲线,由三点作出的二组双曲线的交点即可决定该定点在平面上的方位(实际上为了减少误差,常用四个点组成两组阵元进行求解)。由冲击波的特性可知,对距爆源有相当距离的两个点,冲击波所经历的变速段近于相同,故可用时间差来表示距离差值,即可通过分别测定两组阵元中四个测点的时差来确定各测点与爆源的瞬间距离。但通过对求距计算式进行误差分析可看到,只有能满足两阵元间距足够大的条件下,方可使测距的准确度得到保证。而这种条件只

有在地面固定阵元或海上试验场固定设备情况下方能满足。在现场水下布设时,则难以实现,因此此法缺乏现实性。

### 2. 声波传播时间测距法

在爆源上装一个声发射器,在测点安装一个声波敏感元件,通过测定声波传播时间即可确定距离。这不仅使得整个设备变得繁琐,而且每爆炸一次就要炸毁一台声发射机,很不经济。

改进的方法是利用爆炸冲击波本身的传播时间作为转换量进行瞬间测距,爆源同时兼作声源而给出测时的始点,压力传感器同时起到声接收器的作用而给出测时的终止时间,这样,既简化了设备也避免了由于附加设备而引入新的误差。但在从时间转换到距离的过程中,必须考虑到冲击波并不是匀速的。我们以有关的某些经验式为基础导出对应于各种情况下的变速修正系数,并以实验给予了必要的验证,实用结果良好。

## (二) 测距原理及修正系数的推导

冲击波从爆源传播到测压点,各点的瞬间速度是与距爆源特征距离  $R_0/a_0$  间具有一定关系的。波速从很高的值迅速衰减,在相当距离后接近声速  $C_0$ 。对应于自由场点爆源的情况,利用某些经验公式得:

$$u = C_0[1 + abx(R_0/a_0)^{-a}] \quad (1)$$

式中  $u$  为冲击波速度;

$R_0$  为爆源中心与测点间的距离;

$a_0$  为爆源的等效药包半径;

$a$  为压力对速度的影响系数;

$b, a$  与  $x = A \cdot B$  为与爆源性质有关的系数。

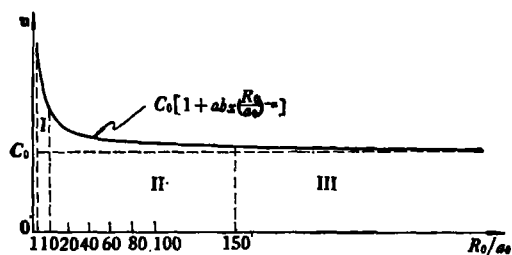


图1  $u-R_0/a_0$  曲线

由图1看出按速度变化率不同可将曲线分为三个区。 $R_0/a_0 \geq 150$ 为III区,冲击波在此区内基本是以声速传播,如以 $C_0$ 代替冲击波的传播速度所引起的误差不会大于3%,距离愈远误差愈小。速度变化率极大的I区,虽然速度变化的规律不易测准,但由于本区 $R_0/a_0 < 10$ ,距离极近,不难通过刚性固定的方法准确测定测点的距离。而II区则是应用最多最关键的区域。据

$$R_0 = a_0 + \bar{u}t \quad (2)$$

由图1知,冲击波从药包边缘传到测点 $R_0$ 所需的时间 $t$ 为:

$$t = \int_1^{R_0/a_0} \frac{d(R/a_0)}{u(R/a_0)} = \int_1^{R_0/a_0} \frac{d(R/a_0)}{C_0[1 + abx(R/a_0)^{-\alpha}]} \quad (3)$$

利用等时传播的原则,由(2)、(3)式可求得对应于各 $R_0/a_0$ 值的平均速度 $\bar{u}$ 。为方便起见,引入变速修正系数 $k$ ,令 $k = \bar{u}/C_0$ ,它为恒大于1的一个系数。由上可知

$$k = (k_0 - a_0)/C_0 t = (R_0 - a_0) / \int_1^{R_0/a_0} \frac{d(R/a_0)}{1 + abx(R/a_0)^{-\alpha}} \quad (4)$$

现将TNT药包的计算结果绘出 $k-(R_0/a_0)$ 及 $k-p_m$ 关系曲线(参见图2、图3)。

为确定测压点到爆源间的瞬间距离,可用同一个测压传感器测出该点的压力及冲击波传播时间 $t$ ,通过 $k-p_m$ 曲线找到对应的 $k$ 值,即可求得 $R_0$ 之值。

由式(4)可知,对应于不同的 $a$ 、 $b$ 、 $x$ 及 $\alpha$ ,所求得的 $k(p_m)$ 曲线也各不相同。这就意味着对不同品种的装药以及不同的使用条件(如沉

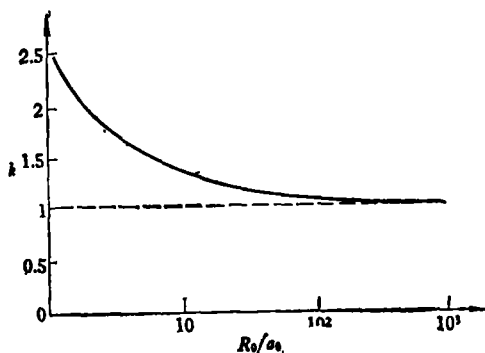


图2 TNT  $k-(R_0/a_0)$  曲线

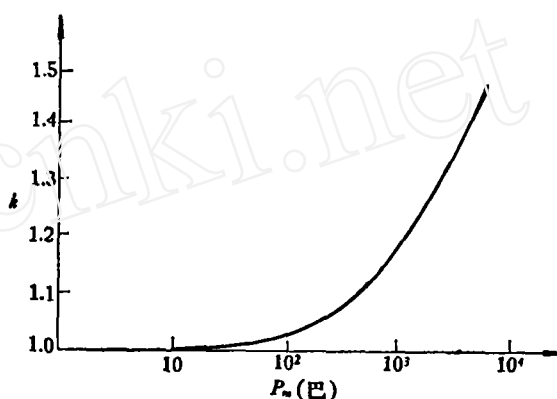


图3 TNT  $k-p_m$  曲线

底雷、锚雷、漂雷等)都有其相对应的不同的 $k(p_m)$ 曲线,这给使用带来不便。能否建立泛用的修正曲线,将决定这种测距方法的实用价值。

据分析,各种情况下的 $k(p_m)$ 曲线其差别主要表现在近区较为明显,在II区之后差别就很小了。如能在靠近爆源处用一已知长度 $L$ 来取代速度变化率较大的这一段传播距离,则有

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= L + KC_0 t \\ t &= \int_L^{R_0} \frac{dR}{u(R)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $K$ 为从 $L$ 到 $R_0$ 之间冲击波速度修正系数。

由于去掉了速度变化率最大的一段传播时间,将使 $K-p$ 曲线变得更为平缓,可显著地提高测距精度。 $L$ 愈大则曲线愈平坦。但考虑到现场实测中,刚性杆 $L$ 过长会给布设带来困难;且在最大药量为1吨TNT装药下,不希望 $L$ 超过3米的具体条件,因此取 $L = 5a_0$ 。据此计算得出 $K-p$ 数据表(见表1),并绘出 $K-p$ 曲线(见图4),预计以该曲线作为用于不同装药

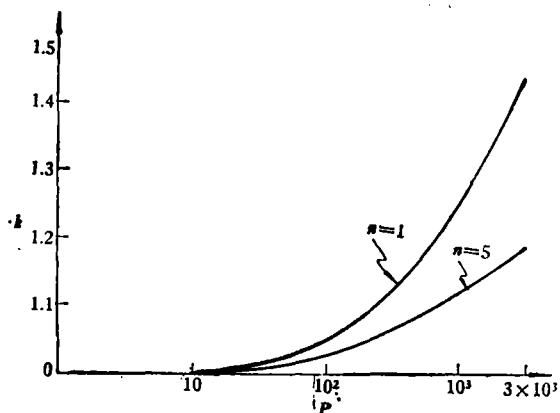


图4  $K-p$  曲线 ( $n=5$ )

表1  $n=5$  时  $K-p$  数据表

$R_0/a_0$	$p$	$K$
6	2300	1.17966
8	1580	1.15115
10	1085	1.13146
20	453	1.08296
30	303	1.06235
40	229	1.05059
50	179	1.04287
60	147	1.03737
70	118	1.03322
80	102	1.02998
90	91	1.02736
100	80	1.20519
110	70.9	1.02337
120	65.8	1.02181
130	58.4	1.02047
140	55	1.01929
150	51.3	1.01825
200	36.6	1.01445
250	28.6	1.01203
300	23.2	1.01034
400	16.8	1.00812
500	13	1.00672
600	10.5	1.00575
700	8.84	1.00503
800	7.72	1.00448
900	6.68	1.00405
1000	6.15	1.00369

及不同工作条件下的泛用曲线，将可使测距误差限于3%之内。

### (三) 模拟试验

为对这种测距方法的原理及实用范围进行验证，我们主要围绕以下两方面进行试验：

### 对 TNT 估算曲线的验证

1. 试验方案 为保证设定距离  $R_0$  的准确，使用刚性杆布设，为缩短布距长度，采取改变距离与改变药量相结合；为保证时间计测准确，使用爆轰波中电离气体瞬间接通的方式作为“零时”信号，而用测压传感器兼作时间截止信号；使用扩爆药柱，保证药包的充分爆炸；对试验场的声速  $C_0$  值加以实测，或依据现场水文资料推定，消除由  $C_0$  不准确而引起的数据偏差。

具体实验中，采用了5种药量（0.2，0.4，0.8，2.4及8公斤 TNT），在3个设定距离（ $R_0 = 1.6, 3.2$  及 4.7 米）加上个别补点，即可达到  $R_0/a_0 = 10-150$  的变化范围。并采用每次试验中取双点数据，以核对各种试验条件是否稳定。

2. 仪器布置图见图5。

3. 实验结果 海上测距模拟试验的结果取

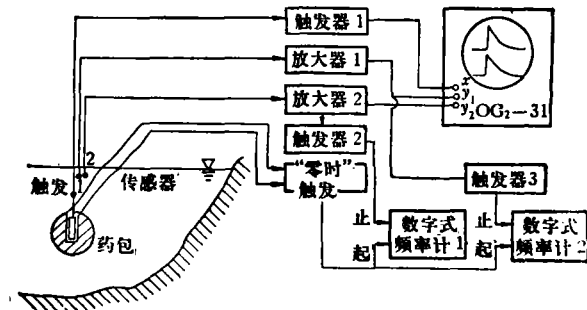


图5

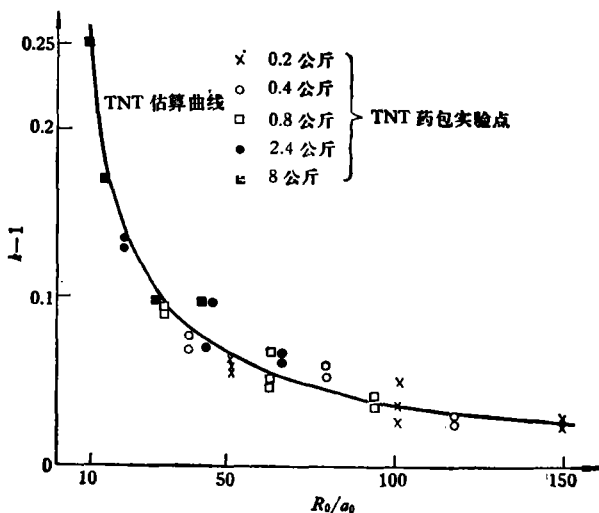


图6 实验点分布(放大)

得了 59 个有效数据,与 TNT 估算曲线之比较见图 6. 图示用估算曲线代替实验曲线,最大误差不超过 3%. 说明分析估算与实际基本相符.

### 对泛用性 $K-p$ 曲线的验证

1. 试验方案 使用特制的 1 公斤重 TTA (梯黑铝烈性炸药) 球形药包代替 TNT 药包,校核在改变炸药品种条件下对速度修正系数  $K$  以的影响; 把不同的使用条件考虑成爆炸物能量改变的观点,采用保持实验条件不变,只是将 1 公斤 TTA 药球改换成 0.6 公斤 TNT 药包,以模拟不同使用条件,实测其对  $K$  的影响.

具体方案为: 取长度为 5 倍药包半径 ( $L = 5n$ ) 的刚性杆,实测 TTA 药包的  $R_0/a_0$  分别为 10、30、60、80 及 100 各点的时差及峰压,并在 60 倍药包半径处进行不同使用情况的模拟. 对试验场的海水声速  $C_0$  加以实测. 注意传感器的隔振,以保证定距及测压的精度,每次试验取双点数据.

2. 实验仪器布置 除将零时触发传感器置于 5 倍药包半径处,其余与图 5 同.

3. 试验结果绘于图 7, 由所测的结果可看

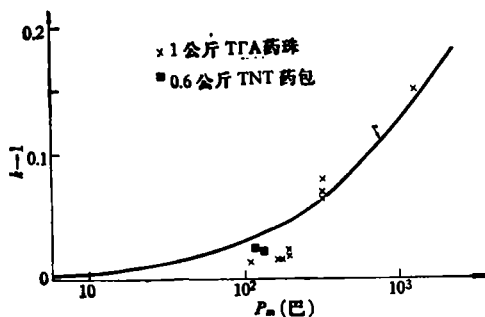


图 7 实验点分布

到,在测定的整个范围内,实验点很接近于估算曲线,最大误差小于 3%. 说明本测距方法具有实用性,所推导的  $K-p$  曲线 ( $n = 5$ ) 具有泛用性.

### (四) 实例分析

取一组实测数据进行分析. 如: 在一次定距实验中,用 0.6 公斤 TNT 药包为爆源,用刚性杆设置测点距离  $R_0 = 3.077$  米,取  $L = 0.256$  米,在  $R_0$  处放两个传感器测定各自的时间与压力. 实测数据分别为:  $t = 1.82223$  毫秒与 1.82542 毫秒.  $p_m$  为 118.5 大气压与 132 大气压. 由  $K-p$  曲线查得对应  $K$  值分别为 3.09 米与 3.095 米,测距相对误差  $\Delta = 0.45\%$  与  $0.7\%$ ,而通过所测压力按 TNT 的相似律公式直接计算出距离  $\Delta = 3.715\%$  与  $-5.75\%$ ,误差几乎增大了十倍.

### (五) 结论

1. 冲击波传播时间测距法是利用测点压力推算出冲击波的平均速度,从而实现通过传输时间来测定瞬间距离的方法,其平均速度是由速度修正系数确定的. 实验证实了,按 TNT 参量推导的速度修正系数与实验结果相符.

2. 利用一已知长度代替冲击波最初剧烈变速段,会有效地提高测距的精度. 所推导出的  $K-p(n = 5)$  的曲线具有较广的泛用性. 该曲线对各种不同品种的爆源及不同的工作条件都适用.

3. 对于完成水下爆炸瞬间测距,本方法较之其它方法简便、实用. 特别对于海中定距这一难题,提供了一种简易的工程解决方法.

(上接第 34 页)

- [6] Meeron, E., *J. Chem. Phys.*, 28, 630(1958). Meeron, E., *J. Math. Phys.*, 1, 192 (1960).
- [7] Percus, J. K. and Yevick, G. J., *Phys. Rev.*, 110, 1(1958). Percus, J. K., *Phys. Rev. Letters*, 8, 462(1962).
- [8] Rowlinson, G. S. and Scoins, H. I., *Prac. Roy. Soc. A216*, 203(1963).
- [9] Alder, B. J., *Phys. Rev. Letters*, 12, 317(1964). Rahman, A., *Phys. Rev. Letters*, 22, 575(1964).
- [10] Levesque, D., *Physica*, 32, 1985(1966).
- [11] Alder, B. J. and Wainwright, T., *J. Chem. Phys.*, 27, 1209(1957). Wood, W. W. and Jacobson, J. D., *J. Chem. Phys.*, 27, 1207(1957).
- [12] Verlet, L., *Physica*, 30, 95(1964).
- [13] Rowlinson, J. S., *Mol. Phys.*, 12, 513(1967).
- [14] Taylor and Francis, *Proceedings of Second International Conference of Liquid Metals* (1973).