

文章编号: 1001-1455(2013)02-0181-05

水下爆炸爆源定位方法与误差分析*

龙仁荣¹, 付跃升², 张庆明¹

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 福州大学紫金矿业学院, 福建 福州 350108)

摘要: 提出了一种采用最小误差逼近法对水下爆源进行定位计算的方法。通过验证性实验表明, 在有效传感器观测数据不小于 4 个的情况下, 该方法完全可以满足现场测量的要求; 该方法在个别测量数据准确性较差的情况下, 仍能得出较好的计算结果。最后分析了测点数据准确性、测点布置紊乱度、模型参数的准确性和测点数量对计算误差的影响, 提出了定位计算实验所需要注意的问题。

关键词: 爆炸力学; 爆源定位方法; 最小误差逼近法; 水下爆炸; 误差分析

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

水下爆炸实验中, 由于暗流与海浪的作用, 药包难以一直停留在一个固定的位置; 在鱼雷爆炸实验时, 由于鱼雷在运动中爆炸, 爆炸时的准确位置更加难以预知。为了准确确定实验原始条件, 精确评估实船抗爆性及鱼雷的爆炸威力, 必须在起爆后根据传感器测量信号对爆源进行精确定位。

目前, 水下爆炸实验中爆源定位方法有 GPS RTK 技术^[1-5]、冲击波零时法^[6]等, 这些方法都存在系统复杂、计算精度不高的问题。

本文中, 拟采用最小误差逼近法解决这一问题, 这一方法具有系统简单、定位误差小的优点。

1 计算原理

1.1 计算流程

最小误差逼近法要求至少布置 4 个水中自由场压力测点及配套测量系统, 通过爆炸后已知位置的测点测到的自由场压力时程曲线和输入药量、水的声速等原始条件进行计算, 计算流程如图 1 所示。

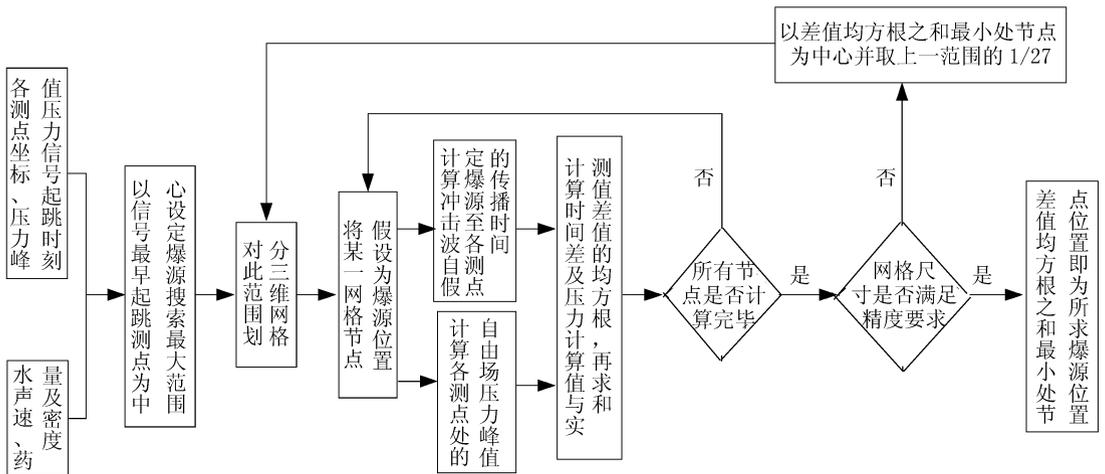


图 1 计算流程示意图

Fig. 1 Computation flow process chart

* 收稿日期: 2011-12-01; 修回日期: 2012-03-31

作者简介: 龙仁荣(1982—), 男, 博士, 讲师。

1.2 假定爆源处起爆后各参数的计算

1.2.1 水中冲击波传播时间的计算

水中爆炸后,冲击波至各测点的传播时间与传播路径长度、路径上各处压力以及水的声速等各因素有关。冲击波沿传播路径上各点的波速与该点处压力密切相关,对于测点距爆源较近的情况,二者的关系对精确求解爆源位置至关重要。鉴于水的高压状态方程的复杂性,并便于实际工程的准确计算,本文中在水中冲击波传播速度写为下列形式

$$c_i = kc_0 \quad (1)$$

式中: c_i 为爆源至测点 i 间的冲击波平均传播速度; c_0 为水的当地声速; k 为压力修正系数,此系数是与对应测点处自由场超压 p 相关的量,可写为

$$k = y_0 - A_1 e^{-\frac{p}{t_1}} - A_2 e^{-\frac{p}{t_2}} - A_3 e^{-\frac{p}{t_3}} \quad (2)$$

式中: $y_0, A_1, A_2, A_3, t_1, t_2, t_3$ 为待定系数,可由实验确定。本文中测到的压力修正系数随测点处的压力变化曲线如图 2 所示,实测条件为海水中 200 g 裸装 TNT 爆炸。

根据假定的爆源及实际测点位置,则冲击波从假定爆源到第 i 个实际测点传播时间的计算值 $t_{c,i}$ 为

$$t_{c,i} = \frac{L_i}{c_i} \quad (3)$$

式中: L_i 为假定爆源到测点 i 之间的距离。自第 2 个测点开始,各测点与距实际爆源最近处测点(实测中最早起跳的测点)的传播时间差 $\Delta t_{c,i}$ 为

$$\Delta t_{c,i} = t_{c,i} - t_{c,1} \quad (4)$$

1.2.2 测点处自由场压力峰值的计算

水中冲击波压力峰值可以通过数值计算求得^[7],也可以通过经验公式求得。大量实验证明,库尔公式在水中爆炸自由场压力峰值计算中具有较高的可信度,本文中采用此公式,即

$$p_{c,i} = 53.3 \bar{R}^{-1.13} \quad (5)$$

式中: \bar{R} 为比例距离, $\bar{R} = r/\omega^{1/3}$, 其中 r 为爆源至测点 i 的距离, ω 为药包的 TNT 当量, $p_{c,i}$ 为测点 i 处自由场压力峰值的计算值。

1.2.3 计算值与实测值之差的均方根的计算

冲击波传播时间差计算值与实测值之差的均方根 $\sigma_{\Delta t}$ 为

$$\sigma_{\Delta t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n (\Delta t_{c,i} - \Delta t_{t,i})^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中: $\Delta t_{t,i}$ 为由实测数据得到的各测点与距实际爆源最近处测点的传播时间差, n 为测点总数量。

所有测点自由场压力峰值计算值与实测值之差的均方根 σ_p 为

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{c,i} - p_{t,i})^2}{n}} \quad (7)$$

式中: $p_{t,i}$ 为由实测数据得到的各测点自由场压力峰值。

考虑到 $\sigma_{\Delta t}$ 和 σ_p 的权重相同,计算用的均方根为合计均方根 σ ,

$$\sigma = \sigma_{\Delta t} + \sigma_p \quad (8)$$

实际计算中,每划分一次网格,就假设爆源在每个网格节点上,对逐个节点进行计算,合计均方根最小值对应的节点处即为本一轮计算确定的爆源位置。

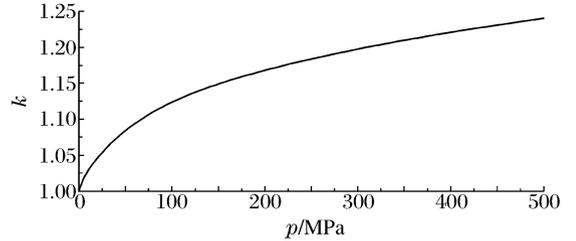


图 2 压力修正系数随测点处压力变化曲线

Fig. 2 Pressure modifying factor as a function of pressure at observation point

2 计算结果

根据本方法编制了计算机程序,并应用于实际实验中。在众多应用实例中,现列出一个具有代表性的计算结果。实验时,将药包及传感器全部固定在一个刚性架子上,使它们之间的相对位置不动,采用的 TNT 药包质量为 40 g,密度 1.55 g/cm³,海水声速 1 521 m/s,爆源实际位置为 (0.500 m, 0.500 m, -0.470 m),测点坐标、所测冲击波传播时间 $t_{f,i}$ 、所测压力峰值 $p_{f,i}$ 及测点与爆源距离计算误差 ϵ 如表 1 所示。计算得到的爆源位置为 (0.500 m, 0.519 m, -0.458 m),测点布置与计算爆源位置见图 3,爆源至测点距离误差绝对值的平均值为 1.597 0%,完全满足工程应用的要求。

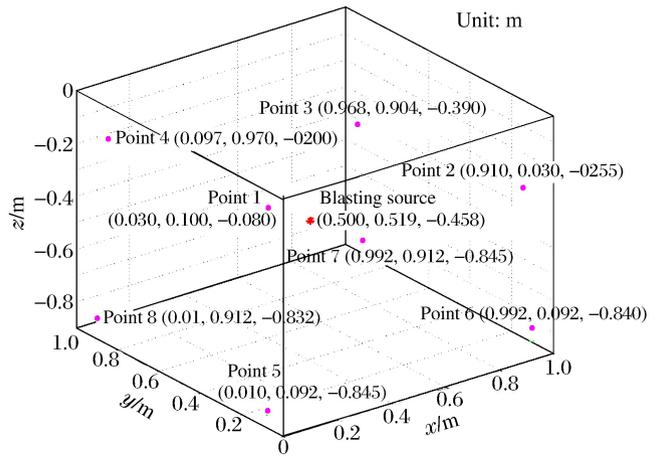


图 3 测点布置及爆源定位计算结果三维图

Fig. 3 A graphical model for observation point layout and computed blasting source position

表 1 测点布置及测量结果原始数据表

Table 1 Initial data of observation point layout and measured results

测点	测点位置			$t_{f,i}/s$	$p_{f,i}/MPa$	$\epsilon/\%$
	x/m	y/m	z/m			
1	0.030	0.100	-0.080	1.305 384	26.340	0.629 2
2	0.910	0.030	-0.255	1.305 347	28.185	1.504 1
3	0.968	0.904	-0.390	1.305 304	29.456	-2.241 0
4	0.097	0.970	-0.200	1.305 341	28.520	-2.654 7
5	0.010	0.092	-0.845	1.305 406	25.656	2.309 3
6	0.992	0.092	-0.840	1.305 398	22.760	2.259 0
7	0.992	0.912	-0.845	1.305 383	23.840	-0.592 8
8	0.010	0.912	-0.832	1.305 377	27.930	-0.586 1

3 计算误差分析

爆源定位计算中,不计人工计量误差,误差影响因素主要有测点数据的准确性、测点布置的紊乱度、水中冲击波传播速度和压力峰值的计算误差、测点数量。

3.1 测点数据的准确性

一般而言,传感器测量结果的准确性对计算结果应该有较大的影响。将前述实例中的实测数据对测点进行排序,结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,根据水中冲击波传播规律,3 种排序方式的结果应该是一致的,但实际测量结果并不一致,说明压力传感器测得的数据不理想,实际计算中可以根据情况找出测量结果明显有问题的测点进行剔除,但有时却难以判断。

表 2 根据不同的排序方式对测点排序表

Table 2 Sequence of observation point by different methods

排序方式	测点编号							
按波形起跳时间由小到大排序	3	4	2	8	7	1	6	5
按峰值压力由大到小排序	3	4	2	8	1	5	7	6
按传感器与爆源的距离由小到大排序	3	2	4	1	8	6	5	7

为了进一步分析个别测点数据的准确性对计算误差的影响程度,人为修改测点 2 的压力峰值 $p_{m,2}$ 为测量值 $p_{f,2}$ 的 3 倍时,计算结果仍未改变;将测点 2 与测点 3 的时间差 $\Delta t_{m,2}$ 人为修改为测量值 $\Delta t_{f,2}$ 的 0.6 倍逐渐增加到 8 倍时,计算爆源至各测点距离误差绝对值的平均值 ϵ_d 的变化曲线如图 4 所示。从图中可以看出,当测量值达到真值的 2 倍以上时,计算误差才开始有明显的变化。

从上述分析可以看出,个别测点即使有较大的误差,对本方法的计算结果仍不会产生较大的影响。

3.2 测点布置的紊乱度

测点布置的紊乱度从两个方面来考虑:爆源与各测点之间的连线所形成方位角的离散程度;爆源与各测点之间距离的离散程度。测点布置的紊乱度可用这些距离的标准差来衡量。从定位计算方法分析,测点布置的紊乱度越大,计算误差越小。如图 5 所示,当方位角离散程度较小时,即爆源在传感器布置范围之外,且爆源与传感器之间的距离大于传感器布置范围本身的尺寸,而不是传感器布置在爆源四周,在爆源与各测点之间的连线所形成方位角不变的情况下,图 6 给出了系列验证性实验中爆源与各测点之间距离的标准差 σ_D 对计算误差 ϵ_d 的影响。

不难看出,爆源与各测点之间距离的标准差越大,测点布置的紊乱度就越大,计算误差就越小。

3.3 水中冲击波传播速度及压力峰值的计算误差

实际计算中,本文中提到的水中冲击波传播速度及压力峰值计算模型中各参数都是通过大量实验拟合而成的,与实际工程之间具有很高的吻合度,因此计算结果也具有很高的精度,在测点布置紊乱度较大、测量结果正常时,定位计算误差约 0.5%。

为分析模型参数误差对定位计算的影响,更改了上述 2 个模型的结果,结果表明,当模型计算结果误差在 $\pm 5\%$ 时,定位计算误差改变不明显。可能是在该定位计算过程中 1.2.3 节所述的是将合计均方根最小值对应的节点处即为本轮计算确定的爆源位置,而不对此最小值规定为某一值,使得在计算过程中误差互相抵消,这正是本方法计算精度高的原因。

3.4 测点的数量

本方法要求测点数量至少 4 个才能有解,通过对实验数据进行计算分析,在测量数据比较正常的情况下,得出测点数量对计算误差 ϵ_d 的影响如图 7 所示。从图中可以看出,有效测点数量对计算精度并无明显的影响。多次计算表明,测点数达到 8 个即可达到很高的计算精度。

4 结论

通过现场实践和分析说明,采用最小误差逼近法对水下爆源定位计算是可靠的,在有效数据不小于

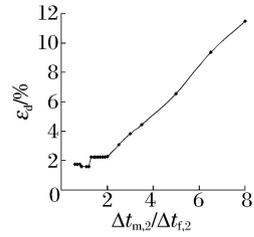


图 4 测点 2 与 3 的时间差变化量对定位计算误差的影响曲线图

Fig. 4 Influence of time difference between observation points 2 and 3 on error

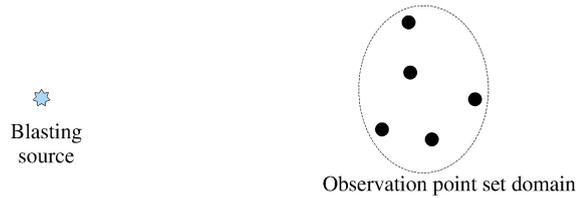


图 5 小方位角离散度布置示意图

Fig. 5 Influence of small-azimuth dispersion on error

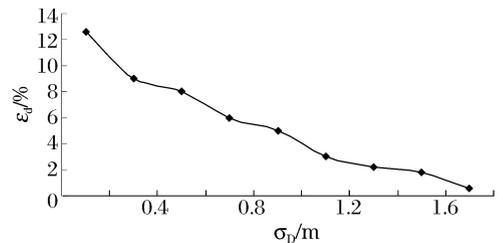


图 6 爆源与各测点之间距离的标准差对定位计算误差的影响

Fig. 6 Influences of distance standard deviation between blasting source and observation points on error

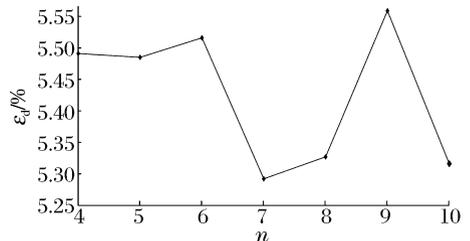


图 7 测点数量对定位计算误差的影响

Fig. 7 Influences of observation point number on error

4个的情况下,完全可以满足现场测量的要求;该方法在个别测量数据准确性较差的情况下,仍能得出较好的计算结果,使得该方法具有较强的可行性;在测点布设时应尽量加大布置的紊乱度,通过对观测数据进行分析,尽量剔除无效的传感器观测数据,以提高计算精度。

参考文献:

- [1] 李兵,王巍,房毅. GPS RTK 技术在舰船抗冲击试验中的应用[J]. 海洋测绘, 2009, 29(2): 53-55.
Li Bing, Wang Wei, Fang Yi. Application of GPS RTK to ship shock trial[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(2): 53-55.
- [2] 刘基余,李征航,王跃虎. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京:测绘出版社, 1993: 20-28.
- [3] 余小龙,胡学奎. GPS RTK 技术的优缺点及发展前景[J]. 测绘通报, 2007(10): 39-42.
Yu Xiao-long, Hu Xue-kui. GPS RTK technique: Merits, demerits and perspective[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(10): 39-42.
- [4] Mizugaki K, Fujiwara R, Nakagawa T, et al. Accurate wireless location/commutation system with 22-cm error using UWB-IR[C]//Symposium on Radio and Wireless, 2007 IEEE. Long Beach, 2007: 455-458.
- [5] Kang D, Namgoong Y, Yang S, et al. A simple asynchronous UWB position location algorithm based on single round-trip, transmission[C]//8th International Conference Advanced Communication Technology, ICACT 2006-Proceedings. Korea: Phoenix Park, 2006: 1458-1461.
- [6] 李兵,朱兴邦,侯宝娥. 基于冲击波测量的水下爆源定位方法研究[J]. 测绘科学, 2009, 34 增刊: 26-28.
Li Bing, Zhu Xing-bang, Hou Bao-e. Positioning method of underwater explosion source based on shock wave measuring[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34 suppl: 26-28.
- [7] 张振华,朱锡,白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 182-188.
Zhang Zhen-hua, Zhu Xi, Bai Xue-fei. The study on numerical simulation of underwater blast wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 182-188.

A location method for underwater explosion source and error analysis^{*}

Long Ren-rong¹, Fu Yue-sheng², Zhang Qing-ming¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: Based on the minimum mean-square error approach, a computational method was proposed for locating the positions of underwater explosion sources. The verification experiments show that the proposed location method can meet with the test requirements when the quantity of the effective data observed by the pressure sensors is not less than four. Satisfactory computational results can still be obtained even if the accuracies of several test data are weak. The influencing factors of the computational error were discussed as follows: veracities of test data, position turbulence of test points, accuracies of model parameters and quantity of test points. Consequently, some suggestions were put forward about the location computation for underwater explosion sources.

Key words: mechanics of explosion; location method of explosion source; minimum mean-square error approach; underwater explosion; error analysis

* Received 1 December 2011; Revised 31 March 2012

Corresponding author: Long Ren-rong, longrenrong@bit.edu.cn