

定量模拟分析船体与空气枪间的安全距离

王立明^{1,2}, 胡毅¹, 许江¹, 刘保华³

(1. 国家海洋局第三海洋研究所海洋与海岸地质实验室, 福建 厦门 361005; 2. 长安大学, 陕西 西安 710064;

3. 国家海洋局国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266061)

摘要:海洋地震勘探过程中, 水中放置的空气枪与船体之间须保持一定安全距离, 否则引起船载设施和仪器剧烈抖动, 影响船舶设施和仪器的安全运行, 甚至更严重情况下, 有可能造成船体的损坏. 利用海水压力脉冲与船体受到的冲击压力关系, 结合建立的空气枪震源子波模型模拟近场震源子波, 可计算出船体与空气枪间的安全距离. 研究表明, 根据震源子波模型模拟的近场子波主峰值, 总容量 150 in³ G 枪、300 in³ 相干 G 枪及 760 in³ 相干 G 枪的安全距离分别为 3.90、6.57 m 和 9.13 m. 由此可知, 空气枪与船体间距离只有大于安全距离, 才能避免船体大的振动或设备免遭损害, 保证海洋地震勘探有效、安全的进行.

关键词:海洋地质学; 空气枪; 安全距离; 子波模型; 近场震源子波

DOI:10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2016. 04. 016

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972 (2016)04-0575-04

空气枪因具有稳定性强、安全性可靠、环保性好、购置成本较低等特点, 自问世后已成为海洋地震勘探最重要的人工震源^[1-2]. 在海洋地震勘探过程中, 空气枪阵列收放方式主要有侧吊式和后拖式两种. 在空气枪与船体的距离范围内, 空气枪震源装置结构不可能为点震源, 它是具有一定尺寸大小的. 随着空气枪震源与船体间的距离越来越小, 激发时产生的海水冲击力对船体的压力也快速增加, 从而导致船载设施与仪器设备剧烈抖动, 影响海上作业, 可能甚至造成船体的损坏^[3]. 因此通过建立的空气枪震源模拟方式定量确定震源与船体间的安全距离, 能保证空气枪激发时, 对船体瞬时冲击震动不会影响船上空气枪震源系统工作的稳定性.

不少研究学者对空气枪震源模拟进行了深入探讨, 建立了空气枪震源子波模型数值模拟方法. 本研究利用 Ziolkowski (1998) 提出的通过空气枪排气口的压力变化推出的空气枪远场子波模拟算法^[4], 结合 Gilmore (1952) 气泡振荡运动方程和 Alexander (2000) 气泡振荡阻尼机制^[5-6], 引入更准确的范德瓦尔斯气体 (简称范氏气体) 状态方程^[7-8], 建立空

气枪震源子波模型, 得到与实际较符合的震源模拟子波. 通过震源子波模型模拟方法和海水压力脉冲与船体受到的冲击压力的关系, 定量计算空气枪震源与船体间的安全距离.

1 材料与方法

1.1 海水压力脉冲对船体的潜在影响

海水压力脉冲对船体的冲击程度取决于船体的结构. 不同强度的海水压力脉冲对船体的影响有以下几种: (1) 低强度振动, 船壳板和骨架弹性变形. (2) 中低强度振动, 船壳板变形, 骨架弹性变形. (3) 中强度振动, 船壳板和主骨架大部扭曲变形. (4) 较高强度振动, 结构应力集中点和焊缝附近船壳板撕裂, 局部丧失水密完整性. (5) 极高强度振动, 船壳板和主骨架大部撕裂, 造成明显的不可控漏水^[3,9]. 因此, 空气枪激发形成的高能量气体气泡膨胀和收缩产生海水压力脉冲时, 会对船舶结构载荷产生影响.

同时, 海水压力脉冲也会影响船舶内的仪器设备或部件, 如内舱室壁上的小润滑泵、照明设备、管子、电缆滚筒和小电接线盒等. 当海水压力波冲击船

收稿日期: 2015-12-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目 (41204100); 福建省自然科学基金资助项目 (2013J05059); 国家海洋局青年海洋科学基金资助项目 (2013338); 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务专项资助项目 (海三科 2011026); 南北极环境综合考察与评估专项资助项目 (CHINARE2016-03-03, CHINARE2016-04-03, CHINARE2016-01-03, CHINARE2016-04-01)

作者简介:王立明 (1978 ~), 男, 助理研究员, 博士; E-mail: wlm@tio.org.cn

壳板时产生剧烈振荡. 它会传播到甲板、舱室与支架结构, 再传播到仪器设备上. 这种现象会引起甲板和隔舱低频振动, 仪器设备也产生较大位移. 因此任何一种因素都会对仪器造成潜在的损坏. 当悬臂、轴、管子等设备产生共振时, 陶瓷、玻璃和电器对压力波很敏感, 导致设备发生故障^[3,9].

1.2 空气枪子波模型建立

空气枪中的高压气体主要为空气, 为了更好的模拟空气枪震源子波, 把高压气体看成范氏气体模型, 从而引入精确性更高的范德瓦尔斯方程^[6-7]. 其表达式为:

$$(P + am/V)(V - bm) = R_g m \cdot T \quad (1)$$

式(1)中: V 、 P 和 T 分别为气泡体积(m^3)、压强(Pa)和温度(K), m 为气泡内气体摩尔量(mol), R_g 为普适气体常数 $[\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$, a 、 b 为范德瓦尔斯改正常量.

准静态热力学方程能准确的反映空气枪能量变化, 从而可得方程为:

$$R_g T dm/dt + (a/V) dm/dt - dQ/dt = C_{V,m} \cdot m dT/dt + (am/V^2 + P) dV/dt \quad (2)$$

式(2)中: $C_{V,m}$ 为定体摩尔热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$.

空气枪内高压气体喷出气流率 dm/dt 的表达式为:

$$dm/dt = \tau \sqrt{m_g(P_g - P)/V_g} \quad (3)$$

式(3)中: V_g 、 P_g 和 m_g 分别为气枪气室内的体积、压力和气体摩尔量.

气体节流系数 τ 为:

$$\tau = \tau_0 V_g^\zeta \quad (4)$$

式(4)中: τ_0 为空气枪容积的气体节流常数, ζ 为气体节流幂指数.

气泡壁处气体与周围水热转换率 dQ/dt 的表达式为:

$$dQ/dt = 4\pi R^2 \psi \Delta T \quad (5)$$

式(5)中: ψ 为传热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$, ΔT 为温度差(K).

齐奥科夫斯基模型是以 Gilmore 气泡振荡方程和远场子波方程建立^[3,10].

水中气泡壁处内外气泡的焓差为:

$$H = (p - p_\infty)/\rho \quad (6)$$

式(6)中: H 为焓差(J/kg), ρ 为水密度(kg/m^3), p 为气泡压力(Pa), p_∞ 为静水压力(Pa).

根据 Gilmore 给出的气泡运动方程为:

$$R \cdot R(1 - 2R/c) + 3 R^2(1 - 4R/(3c))/2 = H + R \cdot \dot{H}/c(1 - \dot{R}/c) \quad (7)$$

式(7)中: c 为水中声波速度(m/s), $\dot{R}$ 为气泡壁质点速度(m/s), $\ddot{R}$ 为气泡壁质点加速度(m/s^2).

根据泰勒级数展开, 可得到新的气泡壁处质点速度 $\dot{R}_{\text{new}}$ 和气泡半径 R_{new} :

$$R_{\text{new}} = R + \dot{R} \cdot \Delta t + \ddot{R} \cdot \Delta t^2/2 \quad (8)$$

$$\dot{R}_{\text{new}} = \dot{R} + \ddot{R} \cdot \Delta t + \dddot{R} \cdot \Delta t^2/2 \quad (9)$$

最终, 得到空气枪远场子波方程为:

$$p - p_\infty = \rho_\infty [f'/r - [f/r^2 + f'/(r \cdot c)]^2/2] \quad (10)$$

式(10)中: $f(\tau) = R^2 [R - f'(\tau)/(Rc)]$, $f'(\tau) = R(H + R^2/2)$; r 为远场子波水听器与气枪位置之间距离(m).

1.3 安全距离计算

海水压力脉冲可与船体受到的冲击压力建立安全距离计算经验公式. 一般船舶抗海水压力冲击的承受能力随震源与船体间距离增大而衰减, 从而建立的表达式为

$$D_{\min} = P_{\text{main}}/P_{\text{cons}} \quad (11)$$

式(11)中: $D_{\min}$ 为安全距离(m), P_{main} 为近场压力主峰振幅值($\text{bar} \cdot \text{m}$), P_{cons} 为作用于船体上的压力(bar).

P_{cons} 可由船舶响应试验测得. 通过安装在船侧的压力传感器和布放于机舱的各个部位的机械振动检波器, 可测量空气枪激发时产生的响应值. 船舶响应试验结果表明, 在风力 4 级、浪高 1.25 ~ 2.50 m 的中等海况条件下, 海水压力脉冲冲击船体时压力约为 0.83 bar. 因此选择 $P_{\text{cons}} = 0.83 \text{ bar}$. P_{main} 可通过空气枪震源子波模型模拟方法获得压力主峰振幅值, 最终得到安全距离 $D_{\min}$.

2 结果与分析

由于空气枪阵列离船体很近, 不能作为一个点来处理. 每支空气枪对船体产生的压力波是一个很大范围的非均匀分布载荷. 它随空气枪或子枪阵的容积变化而变化, 在空气枪阵列中容积最大的空气枪或子枪阵冲击的载荷最大. 实验证明, 在空气枪或子枪阵间的距离大于 4 倍的空气枪最大气泡半径时, 可忽略它们之间的激发响应. 因此, 海水压力脉冲对船体的影响只需考虑空气枪阵列中最大容积的空气枪或子枪阵. 值得注意的是, 造成损坏的压力振幅主峰值不是指空气枪阵列远场子波主峰值, 而是指阵列中最大容积的空气枪或子枪阵近场子波主峰值.

图 1 为 G 枪在沉放深度 5 m 和容量 150 in^3 条件下得到的近场子波结果. 近场子波波形开始急剧增加至最高点, 随后快速下降至最低点, 之后按一定气泡周期缓慢变化, 直至消失停止. 由表 1 可知单支

G 枪的震源子波模型模拟的近场子波压力振幅主峰值为 $3.24 \text{ bar} \cdot \text{m}$,则得到的安全距离为 3.90 m . 也

就是说,为保证避免船体大的振动或设备损害,空气枪震源至少要离船 3.90 m 以外.

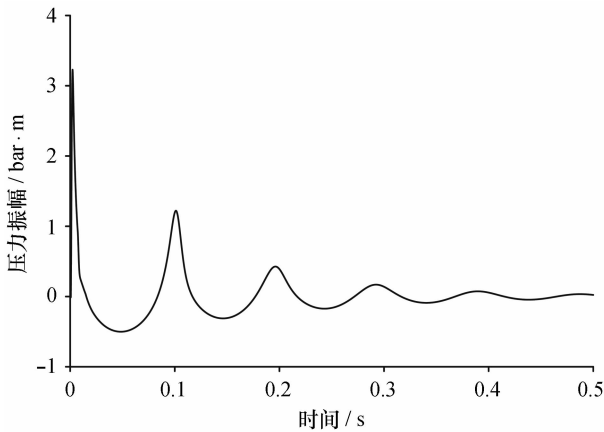


图 1 总容量 150 in^3 G 枪近场子波波形
Fig. 1 Total capacity of 150 in^3 G gun near field wavelet

表 1 G 枪近场子波模拟的安全距离计算结果

Tab. 1 Simulation results of safe distance in G gun near field wavelet

G 枪数量/支	单支 G 枪容量/ in^3	气体总容量/ in^3	近场子波模拟主峰值/ $\text{bar} \cdot \text{m}$	安全距离/ m
1	150	150	3.24	3.90
2	150	300	5.45	6.57
2	380	760	7.58	9.13

图 2 为两支 G 枪在沉放深度 5 m 和总容量 300 in^3 条件下得到的近场子波结果. 表 1 可知两支 G 枪的震源子波模型模拟的近场子波压力振幅主峰值为 $5.45 \text{ bar} \cdot \text{m}$,则得到的安全距离为 6.57 m .

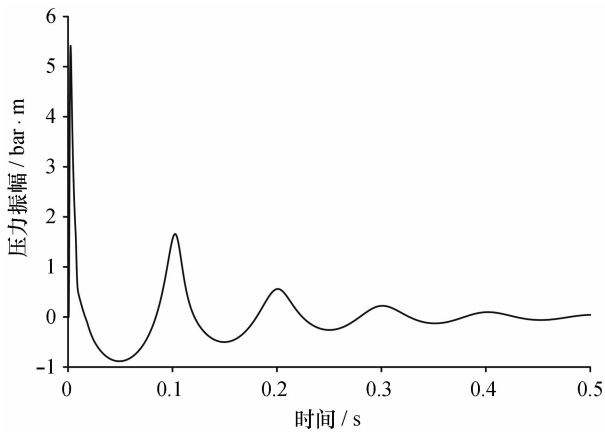


图 2 总容量 300 in^3 G 枪近场子波波形
Fig. 2 Total capacity of 300 in^3 G gun near field wavelet

某科学考察船装备了最大总容量 $2\,602 \text{ in}^3$ 的气枪阵列,共 10 支 G 枪,其中 4 支 380 in^3 ,4 支 150 in^3 ,2 支 250 in^3 . 由此最大空气枪相干阵列为 2 支 380 in^3 的 G 枪. 图 3 为两支 380 in^3 的 G 枪在沉放深度 5 m 和总容量 760 in^3 条件下得到的近场子波

结果. 表 1 可知两支 G 枪的震源子波模型模拟的近场子波压力振幅主峰值为 $7.58 \text{ bar} \cdot \text{m}$,则得到的安全距离为 9.13 m . 这就表明,科考船在进行海洋地震勘探过程中,使用 2 支 380 in^3 的 G 枪作相干阵列时,空气枪震源与船间的安全距离为 9.13 m ,以保证避免船体大的振动或设备免遭损害.

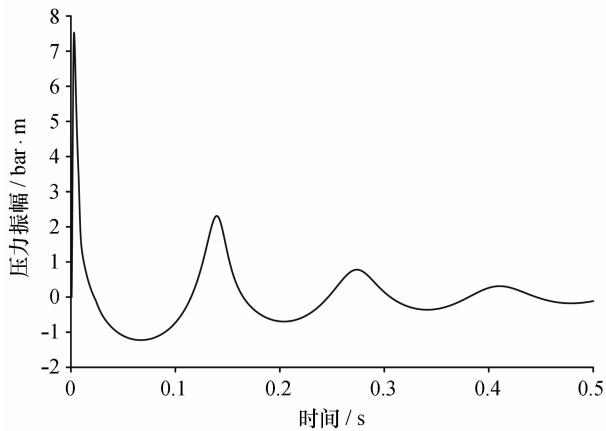


图 3 总容量 760 in^3 G 枪近场子波波形
Fig. 3 Total capacity of 760 in^3 G gun near field wavelet

3 结论

(1)空气枪常用收放方式为侧吊式和后拖式,

激发形成的海水压力脉冲会对船体产生作用. 在容量较大的空气枪或空气枪子阵列激发下, 如果与船体之间的距离小于安全距离, 会造成船载设施和仪器剧烈振动, 影响船舶设施和仪器的安全运行, 甚至更为严重情况下导致船体的损坏. 因此必须保证空气枪与船体间距离大于安全距离.

(2) 利用气泡振荡运动方程和气泡振荡阻尼机制, 结合齐奥科夫斯基模型, 建立空气枪震源子波模型, 模拟获得近场子波波波形, 从而快速测量出近场子

波的压力脉冲振幅主峰值. 再根据海水压力脉冲与船体受到的冲击压力建立的安全距离经验公式, 定量计算出空气枪震源与船体之间的安全距离.

(3) 研究结果表明, 总容量 150 in^3 G 枪、 300 in^3 相干 G 枪及 760 in^3 相干 G 枪的安全距离分别为 3.90、6.57 m 和 9.13 m. 由此可知, 空气枪与船体间距离只有大于安全距离, 才可避免船体大的振动或设备损害, 以保证海洋地震勘探有效、安全的进行.

参考文献:

- [1] 周宝华, 刘威兆. 气枪震源的发展与使用分析(上)[J]. 物探装备, 1998a, 8(1): 1-6.
- [2] 周宝华, 刘威兆. 气枪震源的发展与使用分析(下)[J]. 物探装备, 1998b, 8(2): 1-6.
- [3] Tulett J R, Duncan G A, Thompson P R. Borehole seismic air-gun sources: what's the safe distance from a ship's hull? [J]. Journal of Petroleum Technology, 2002, 55(5): 1-6, DOI: 10.2118/74177-MS.
- [4] Ziolkowski A. Measurement of air-gun bubble oscillations[J]. Geophysics, 1998, 63(6): 2 009-2 024.
- [5] Gilmore F R. The growth or collapse of a spherical bubble in a viscous compressible liquid[R]. California: California Institute of Technology, 1952: 4-26.
- [6] Alexander O M. An acoustic modeling study of seismic airgun noise in Queen Charlotte Basin [D]. Canada: University of Victoria, 2000.
- [7] 黄淑清, 聂宜如, 申先甲. 热学教程[M]. 2. 北京: 高等教育出版社, 2000: 17-305.
- [8] 王立明. 范氏气体下气枪激发子波信号模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [9] 李海军, 李亚夫, 王长春, 等. 气枪震源与船体的安全距离[J]. 物探设备, 2010, 20(5): 299-301.
- [10] 陈浩林, 宁书年, 熊金良, 等. 气枪阵列子波数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(4): 363-368.

Quantitative simulation analysis on the safe distance between the hull and the air-guns

WANG Li-ming^{1,2}, HU Yi¹, XU Jiang¹, LIU Bao-hua³

(1. Ocean and Coast Geology Laboratory, Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China;

2. Chang'an University, Xi'an 710064; 3. National Deep Sea Center. SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: During marine seismic exploration process, the position of air-guns in water must keep a safe distance with the hull. Without doing so, air-gun source will cause shipboard facilities and equipment severely shaking, which affects the safe operation of ship. Even worse, it may cause damage to the hull. With consideration of the relationship between seawater pressure pulse and the impact pressure towards the ship and combination of the air-gun source wavelet model which stimulates the near-field source wavelet, the safe distance between the hull and the air-guns can be calculated. Research results show that the safe distance of total capacity 150 in^3 G gun, 300 in^3 coherent G guns and 760 in^3 coherent G guns are 3.90 m, 6.57 m and 9.13 m, respectively, according to peak value of near-field wavelet simulated by air-gun source wavelet model. It can be known that the distance between the place of air-guns and the hull should be greater than a safe distance in order to avoid large vibration of the hull or equipment from damage and to ensure effective and safe marine seismic exploration.

Key words: marine geophysics; air-gun; safe distance; wavelet model; near-field source wavelet

DOI:10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2016. 04. 016

(责任编辑: 王 静、杜俊民)