

# 脉冲防暴水炮出口段射流的大涡模拟

汪 送<sup>1,2</sup>, 战仁军<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 武警工程学院, 陕西 西安 710086)

**摘 要:**为优化装备设计,减少实验投入,采用大涡模拟方法耦合二维非稳态 VOF 模型对脉冲防暴水炮发射管内及出口段的气液两相射流进行了数值模拟研究。通过搭建实验台对脉冲防暴水炮出口段射流进行了高速摄影实验,并利用高速图像记录系统自带的判读软件对射流出口段的速度值进行了判读,实验所得的射流形状及速度与仿真结果吻合较好。利用仿真方案进行变运动参数的数值模拟,结果表明:初始压力对出口速度影响较大,而初始射角对出口速度大小没有影响,因改变了初始射流方向,导致最大射程有所变化。研究表明较大的初始压力和较小的水量能获得更大的射流出口速度和更少的水炮发射时间。

**关键词:**脉冲防暴水炮;出口段射流;大涡模拟;实验研究

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.03.016

**中图分类号:**TV 131 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2010)03-0072-04

提高警用脉冲防暴水炮持续作战能力必须改善其作用效能<sup>[1-2]</sup>。通过对脉冲防暴水炮发射管内及出口段气液两相射流进行研究,可以找到影响性能因素的敏感参数,为装备改进设计提供科学可靠的参考依据。

早在 20 世纪 70 年代,G A Atanov 等国内外学者对水炮进行了最优化研究,同时提出了一种数值计算方法<sup>[3-4]</sup>,另外,其对喷嘴的尺寸也进行过研究<sup>[5]</sup>。É. S. Geskin 等<sup>[6]</sup>使用 Godunov 方法从力学的角度对水炮进行了研究,利用火药气体燃烧所产生的高压气体来推动活塞完成发射过程。Federico Montanari<sup>[7]</sup>等利用 Fluent 软件,数值研究了活塞推动式脉冲防暴水炮发射管内及出口段的射流运动过程,与实验结果吻合较好。战仁军<sup>[8]</sup>等利用 CFD 软件,数值研究了脉冲防暴水炮不同结构喷嘴对水柱的加速作用,得到了较为合理的优化设计方案。文献[8-9]对脉冲防暴水炮发射管内的气液运动进行了理论建模和数值计算,分析了两者的吻合情况。同时搭建了模型试验台,为实验的展开奠定了基础。本文拟在此基础上进行进一步的研究。

## 1 实验台的搭建

本实验搭建的试验台构造如下:2 个高压气瓶通过一个三通阀将高压气体输入到双极减压阀内,双极减压阀分别输出 2.5 MPa 和 0.6 MPa 的双向定额压力,前者输入高压气室,后者为水室注水提供压力。由于高压气室的最大承压能力有限,同时为考虑不同初始气压的影响,在双极减压阀和高压气室间设置了一个调压阀,这样就可以根据需要调低初始压力,以观察其对出口性能的影响。调压阀将定额压力输入高压气室,待水室注满水后,扣动脉冲防暴水炮的扳机,就可以完成一次发射动作。然后,再次充气、注水,完成第二次发射,如此循环。为保证初始条件的统一,特设计了一个炮架,使初始射角能根据需要调整,可缓解一部分的后坐力。采用高速相机对出口段射流进行拍摄,同时利用系统自带的判读软件对射流出口速度进行判读。

收稿日期:2009-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50876113)

作者简介:汪 送(1984-),男,湖南衡阳人,博士生,主要从事军事装备学研究;

战仁军(1963-),男,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事军事装备学和非致命武器研究。

E-mail:zhanrenjun@yahoo.com.cn

## 2 数值模拟模型及参数设定

湍流的数值模拟方法有直接数值模拟(Directed Numerical Simulation, DNS)、雷诺平均模拟(Reynolds - average Navier - Stokes, RANS)和大涡模拟(Large Eddy simulation, LES)<sup>[11]</sup>。直接数值模拟对计算机资源要求较高,雷诺平均模拟将变量做均化处理,难以获得流动细节,而大涡模拟则介于两者之间,对计算资源要求不高,同时能较好描述湍流的瞬时运动,因此本文运动大涡模拟方法对脉冲防暴水炮气液射流进行数值模拟,用二维 VOF 模型对气液界面进行追踪<sup>[12]</sup>。

### 2.1 LES 模型

通过在傅立叶空间或构形空间过滤随时间变化的 N - S 方程得到 LES 的控制方程。过滤处理有效地将比计算中使用的过滤宽度或网格间距小的漩涡过滤掉,最终得到的 LES 控制方程能够有效地控制大漩涡的动态变化<sup>[13]</sup>。过滤变量定义为:

$$\overline{\phi(x)} = \int_D \phi(x') G(x, x') dx' \quad (1)$$

式中:  $D$  为流体计算控制域;  $G$  为决定求解漩涡大小的过滤函数。不可压缩流动过滤后的 N - S 方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \overline{\sigma_{ij}}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{ij}$  是由于分子粘度作用的应力张量;  $\tau_{ij}$  是亚网格尺度应力。

### 2.2 亚网格尺度模型

过滤后无法获得 N - S 方程中亚网格尺度应力,因此需要建模,FLUENT 中亚网格尺度湍流模型应用与 RANS 模型相同的 Boussinesq 假设<sup>[14]</sup>,计算模型为:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \overline{S_{ij}} \quad (4)$$

式中  $\mu_t$  是亚网格尺度湍流粘度,  $\overline{S_{ij}}$  是对于求解尺度的应力张量比率,定义为:

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

### 2.3 网格划分

由于本文计算区域比较规则,可将计算网格简单划分为 2 部分:一部分是靠近管壁的流动区域,考虑到管壁区域速度梯度变化剧烈,采用加密网格技术,使得网格按照幂函数规律变化,结合计算机的实际计算能力对该区域适当加密;另一部分则采用均匀直线网格划分技术。网格数约为 21 万,由 Gambit 软件生成。

### 2.4 参数设定

由于气液冲击过程是一个非稳态的过程,因此选用非稳态的求解计算器进行求解,可以得出在不同时刻的流型图。采用二维非稳态、隐式分离算法进行数值计算。采用大涡模拟的一阶时间离散格式耦合二维非稳态隐式 VOF 模型对控制方程进行数值求解。模拟时高压气体自动膨胀,推动水从喷口高速喷出,因此没有入口边界条件,采用压力出口边界条件,出口压力值设为 0 MPa。采用 VOF 模型时,给高压气室和水室分别定义次要相的体积分。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 射流形状的对比

为比较实验数据和模拟数据的异同,根据初始压力为 1.0 MPa、水量为 1 L 的工况进行模拟,得到不同时刻的射流两相分布,见图 1,左边为实验图片,右边为模拟图像。从图可知,两者能较好地吻合。实验时发现水炮出现二次喷射现象(即二次高速射流),从模拟结果可以看出,管内气液出现参混,由于管内气液混合物的速度远大于水射流的速度,因此在气体贯穿喷口时,出现了后面射流追赶前面射流的情况,此即射流的二次喷射现象。图 2 比较了射流出口速度的实验值和模拟值,两者的基本趋势完全相同,说明所选用的仿真方案能较好预测射流出口段的速度。

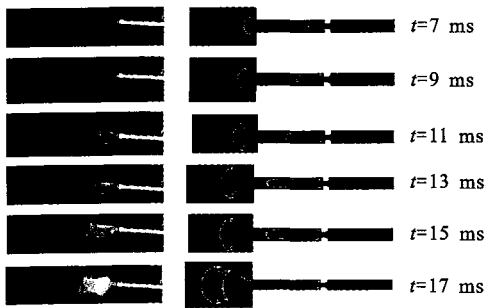


图1 1.0 MPa 初始压力下不同时刻的出口段射流  
Fig.1 Nozzle jet at different time under initial pressure of 1.0 MPa

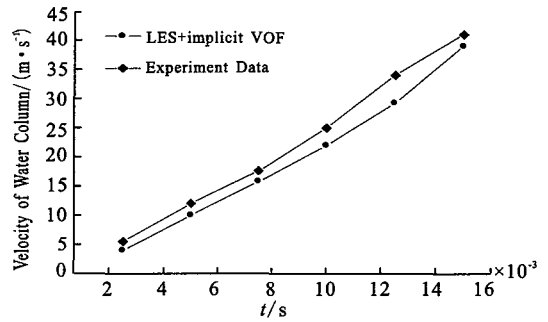


图2 射流出口速度值比较曲线  
Fig.2 Comparative curve of jet exit velocity

### 3.2 变运动参数的数值模拟

采用4.1节的模型进行变运动参数(初始压力和初始射角)的数值模拟。图3是不同初始压力下出口面平均速度时间曲线,可知:在水柱没有完全被推出喷口时,出口的速度即是水柱的速度;随着初始压力的升高,水柱所获得加速度逐渐增大,完成加速过程的时间逐渐缩短,即初始压力越大,完成发射过程所需的时间越短。随着发射管中水量的减少,气体开始贯穿喷口,出口面平均速度瞬间升高,可见管内气体的速度远大于水,因此气体射流段(管内高压气嘴出口至气液界面处)是充分发展的湍流。在水被完全推出后,高压气室内的压力仍大于0 MPa,因此仍有气流流出,但速度波动不大,当初始压力大于1.0 MPa时,出口最大速度值均在280 m/s左右波动,随后又经历了波浪式的降低,直到降为0。初始压力为0.5 MPa时,出口最大速度值为220 m/s,完成发射过程约需20 ms,因此如需加速脉冲防暴水炮的发射频率,必须适当加大初始压力。

图4给出了不同的初始射角时出口面的速度曲线,其基本重合,这说明,初始射角对出口速度的大小影响较小,因其影响了速度的方向,必然会导致各种射角下最大射程的不同。

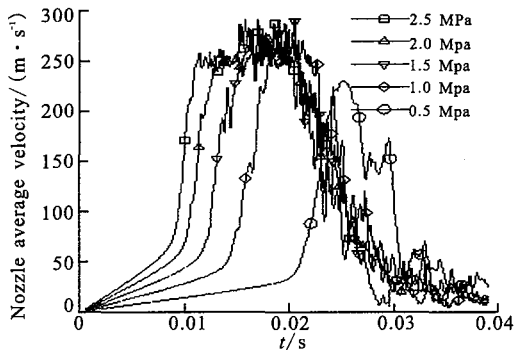


图3 不同初始压力时的平均速度时间曲线  
Fig.3 Nozzle average velocity curve under different Initial pressure

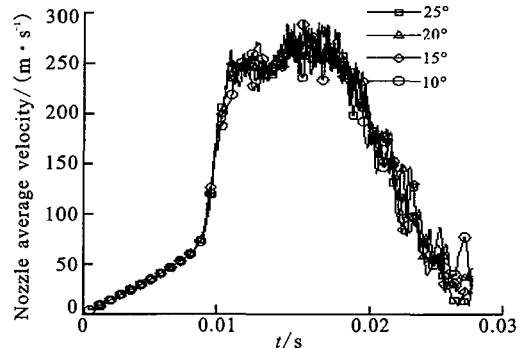


图4 不同初始射角时的平均速度时间曲线  
Fig.4 Nozzle average velocity curve under different initial launch angle

## 4 结论

本文对脉冲防暴水炮出口段的射流进行了实验和数值模拟以及变参数的数值计算,可得如下结论:

- 1)大涡模拟方法耦合二维非稳态的VOF模型能较好预测脉冲防暴水炮出口段射流的形状及速度分布,本文成功解释了射流二次喷射的成因;
- 2)初始压力是影响射流出口速度的较敏感的因素,压力越大速度值越高,完成发射过程所需时间越短;
- 3)初始水量对出口速度大小没有影响,因改变了射流初始方向,必然导致最大射程的异同,实验发现当初始射角为25°时,脉冲防暴水炮有最大射程。

### 参考文献:

[1] 汪送,战仁军,张威. 各式防暴水炮警用领域应用及研究现状[J]. 国防科技,2009,2:14-16.  
WANG Song, ZHAN Renjun, ZHANG Wei. Application and Study Actuality of All Kinds of Anti-riots Water Cannon in Police Area[J]. National Defence Science and Technology,2009,2:14-16. (in Chinese)

- [ 2 ] Symons M, Smith G. Less Lethal Technologies, Review of Commercially Available and Near - Market Products for the Association of Chief Police Officers[ R ]. UK: Home Office Scientific Development Branch, 2003.
- [ 3 ] Atanov G A. Calculation of the Shooting Parameters of A Pulsed Water Cannon[ J ]. Hydrodynamics, 1972, 22: 197 - 203.
- [ 4 ] Atanov G A. Optimization of the Action of A Pulsed Water Cannon with Power Drive[ J ]. Fluid Dynamics, 1993, 28(6): 872 - 875.
- [ 5 ] Atanov G A. The Profile of the Nozzle of A Water Cannon Designed for Maximal Inflow Velocity[ J ]. Journal of Mathematical Sciences, 1995, 77(6): 3537 - 3539.
- [ 6 ] Geskin ÉS, Petrenko ÉS, Rusanov O A. Strength Analysis and Optimization of the Barrel Nozzle of A Powder Water Cannon [ J ]. Strength of Materials, 2006, 38(2): 206 - 213.
- [ 7 ] Federico Montanariet. Exploratory CFD Analyses of the Fluid Dynamics of A Water Cannon[ R ]. AIAA 2005 - 1293.
- [ 8 ] ZHAN Renjun, WANG Song. Emulational Design of New - style Police Pulsed Anti - riots Water Cannon Based on Fluent [ C ]//5th European Symposium on Non - lethal Weapons. German: [ s. n. ], 2009: 1 - 12.
- [ 9 ] 汪送, 战仁军. 脉冲防暴水炮发射管内的建模与二维仿真[ J ]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(4): 37 - 42. WANG Song, ZHAN Renjun. Model and 2 - D Simulation Analysis of Launch Pipe of Police Pulsed Anti - riots Water Cannon [ J ]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(4): 37 - 42. (in Chinese)
- [ 10 ] 汪送, 战仁军. 警用脉冲防暴水炮实验系统设计[ J ]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 173 - 177. WANG Song, ZHAN Renjun. Experiment System Design of Police Pulsed Anti - riots Water Cannon[ J ]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 30(2): 173 - 177. (in Chinese)
- [ 11 ] 张兆顺, 崔桂香, 许晓春. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2008. ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Xiaochun. Theory and Application of Turbulence Large Eddy Simulation[ M ]. Beijing: Publishing Company of Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [ 12 ] Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries[ J ]. J Comput Phys, 1981, 39(1): 201 - 205.
- [ 13 ] 余熙, 卫宏远. 应用大涡模拟对水平管道进行大涡模拟[ C ]//中国过程系统工程年会. 天津: 中国过程系统工程年会, 2006: 562 - 569. YU Xi, WEI Hongyuan. Application of Large Eddy Simulation on Plane Pipe[ C ]//Annual Conference on Process Systems Engineering. Tianjin: PSE Press, 2006: 562 - 569. (in Chinese)
- [ 14 ] 陶容, 耿丽萍, 周静伟. 旋进射流流动的大涡模拟[ J ]. 中国计量学院学报, 2008(6): 124 - 128. TAO Rong, GENG Liping, ZHOU Jingwei. Large Eddy Simulation of Circle Jet[ J ]. Journal of Chinese Computation College, 2008(6): 124 - 128. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

## Large Eddy Simulation of Nozzle Water - jet of Pulsed Anti - riots Water Cannon

WANG Song<sup>1,2</sup>, ZHAN Ren - jun<sup>2</sup>

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Engineering College of CAPF, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** In order to optimize the design of equipment, and reduce the investment in experiment expense, a large eddy simulation method coupling with 2 - D unsteady VOF model is adopted to simulate the gas - liquid water - jet in and around the nozzle of pulsed anti - riots water cannon. After the setting up of experiment tape, the high - speed photography technology is adopted to photo the water jet around the nozzle, and then the velocity reader software is used to gain the velocity of the outside water - jet. Compared with the numerical result, the obtained experiment water - jet figure and velocity are in better accord with the simulation results. By using the said method to do the simulation of changing numerical parameters, the initial pressure has significant influence on the velocity of water - jet, but the initial launch angle has little influence on the velocity of water - jet, which only affect the biggest cannon - shot. The study results show that with bigger initial pressure and smaller initial water quantity, bigger water - jet velocity and shorter launch time can be obtained. The conclusion achieved is of some guide sense to the optimization of design of water cannon.

**Key words:** pulsed anti - riots water cannon; water - jet beside nozzle; large eddy simulation; experiment study