文章编号: 1001-1455(2014)04-0508-05 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)04-0508-05

小口径膛口射流噪声的数值模拟*

王 杨[1],姜孝海[2],杨绪普[3],郭则庆[2]
(1.南京理工大学理学院,江苏 南京 210094;
2.南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094;
3.解放军理工大学国防工程学院,江苏 南京 210007)

摘要: 为了研究小口径武器的膛口气动噪声特性,采用 CFD-CAA 耦合算法对 7.62 mm 枪的射流噪声场进行了数值模拟。由于膛口流场结构复杂,在目前的计算发展水平下还不足以采用 CAA 直接法,因而本文中采用混合方法,即首先采用 CFD 方法计算 7.62 mm 枪的膛口流场,然后利用所得结果,采用声学方程计算射流噪声,具体为膛口近场采用 LES 进行计算,远场声场采用 FW-H 声拟法计算。通过对比验证实验,验证了该计算方法的可行性。然后,对 7.62 mm 枪射流噪声进行了数值模拟,分析了噪声指向性,绘制了声压级云图。研究表明:在本文的计算条件下,射流噪声强度主要集中在近膛口区域;且射流最大噪声主要分布在与轴线方向成 30°~60°范围内。

关键词: 爆炸力学;射流噪声;大涡模拟;小口径膛口;噪声指向性;声压级云图
中图分类号: O389;TB533 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

枪炮噪声广泛存在于军事和兵工部门,由于其突发性和特殊的物理性质,对周围人员、设备和环境都造成不同程度的危害和干扰。在枪械设计过程中,了解膛口噪声特性,采用一定的计算方法预测膛口噪声的大小,将膛口噪声合理地控制在一定范围内,对于优化枪械性能有重要意义[1]。

膛口脉冲噪声的声源包括各种机械噪声和气动噪声,而后者是主要的。关于气动噪声的研究已有半个多世纪的历史。对气动噪声研究的理论和方法对膛口脉冲噪声研究有借鉴意义,为过去无法计算的复杂气动噪声场提供了数值模拟的途径。然而,与喷气发动机和火箭发动机流场不同的是,膛口流场是多层冲击波包围的高瞬态、高度欠膨胀的非定常燃气射流流场。膛口噪声具有强非线性和复杂的噪声源,目前仍是膛口流场研究中最具挑战性的问题之一。

目前有关膛口气流噪声的计算与预测方面的工作还比较少[2-5]。J. Bin[2]等利用 CAA 方法对 7.62 枪的复杂流场进行了数值模拟,根据数值结果分析了膛口流场的复杂特征,研究了脉冲噪声的产生机理,认为噪声源有:火药燃气欠膨胀超音速射流噪声、冲击波(激波)和湍流及它们与固体相互作用、弹丸飞行扰动、武器机械冲击等产生的噪声等。I. C. Lee 等[3]对忽略弹丸影响的高压条件下的噪声场进行了研究,近场采用 CFD 中的 Roe 格式及二阶中心差分格式进行数值模拟,远场采用 CAA 方法进行模拟,根据计算结果,讨论了包含和不包含消音器 2 种噪声场的特征。H. Rehman 等[4]对某坦克炮在发射过程中产生的高压脉冲噪声进行了数值研究,分析了消声器的降噪效果。S. M. Liang 等[5]对单激波穿过排气管引起的声学问题进行了分析,详细研究了排气管内部和下游方向的噪声形成机理。

由于膛口脉冲噪声的复杂性,膛口射流是膛口噪声的重要声源,本文中对膛口噪声问题进行简化,只对膛口射流噪声开展初步的研究,即首先采用 CFD 中的 LES 计算近膛口流场,然后采用 FW-H 方程计算射流中远场噪声。

1 模型与求解方法

计算模型如图 1 所示,身管长为 l、内外直径分别为 d 和 D,左端面封闭,右端为枪口。管外流场为

* **收稿日期**: 2012-10-16; **修回日期**: 2013-04-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(10902052)
作者简介: 王 杨(1972—),女,博士,讲师。

同轴的圆柱区域，直径为 L_2，长为 L_1。考虑到轴对称性，计算时只包括图 1 的上半部分。本算例取 $d=7.62$ mm、$D=11.4$ mm、$l=644$ mm、$L_1=1\ 192$ mm、$L_2=640$ mm。

对所研究的问题，采用 CAA 中 LES 耦合 FW-H 方程的混合方法，即：利用可压缩大涡模拟求解膛口近场部分，其中的亚格子尺度应力的求解采用 Smagorinsky-Lilly 模型[6]，再应用声类比方程 FW-H[7-9]计算流动所诱发的中远场气动声场。

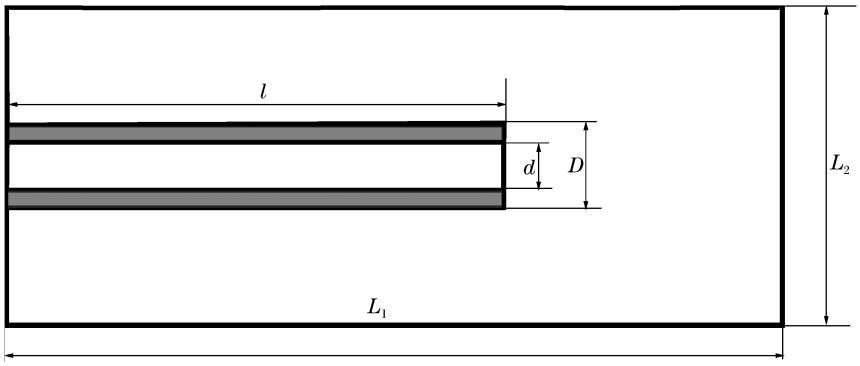


图 1 计算区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computational domain

2 数值模拟与结果分析

2.1 验证算例

物理模型为 Seiner&Ponton's 喷管，给定喷管出口 $Ma=2$，出口直径 9.144 cm，入口处温度 1 370 K，出口处的 $Re=10^6$。图 2 为距喷管管口 3.66 m 处的噪声指向图，其中曲线(CFD-CAA)为采用本文算法计算所得结果，图中其余数据均来自 Aleksey 等[10]的计算结果和实验结果。从图 2 中可以看出：计算结果与其他结果的噪声指向趋势一致；与实验数据吻合得较好，误差不超过 5 dB。

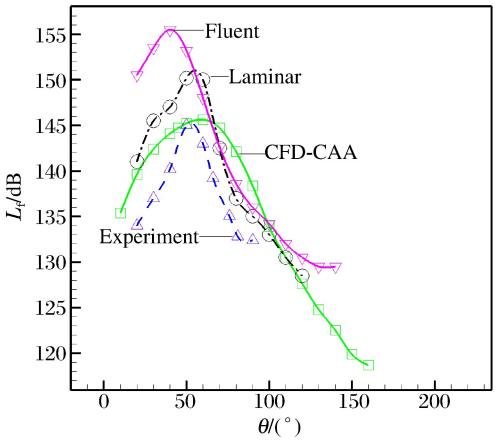


图 2 噪声指向图

Fig. 2 Noise directivity diagram

2.2 膛口流场的数值模拟

为了更好地预测声场，先对流场进行模拟，得到流场的整体特性，并为以后声场预测中声源面的选取提供参考。对图 1 所示的二维模型划分网格，网格间距非均匀，在固壁处进行加密处理，总的网格数为 1 723 447。边界条件包含固壁和外推边界，即身管的内外表面为固壁边界，中心线为轴对称边界条件，其他边界为外推边界。

图 3 为利用 LES 模拟方法计算所得膛口流场瞬时压力分布图，图中可以看出激波、压缩波及涡的相互作用过程。高温、高压火药燃气突然释放，在膛外迅速膨胀，推动周围气体形成火药燃气冲击波和火药燃气射流，如图 3(a)所示。在图 3(b)中，火药燃气流场进一步发展，形成包含射流边界层、马赫盘及其后的反射激波和切向间断的射流结构，其中剪切层、反射激波及切向间断止于涡环。

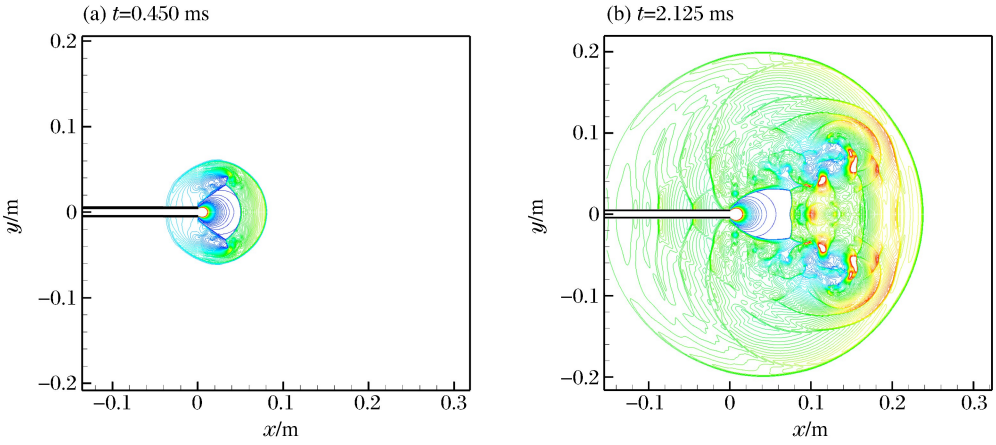


图 3 膛口流场瞬时压力分布

Fig. 3 Instantaneous pressure distribution

2.3 射流噪声的数值计算

火药燃气射流是高瞬态高压非定常射流，经历了生长期、稳定期和衰减期。由于在稳定期，膛口压力、密度等参量值变化不显著，稳定期的射流强度以及对流场发展的贡献在整个射流发展阶段内应不低于平均射流。因此，将稳定期的射流状态视为平均态，对火药燃气射流作定常化假设。

射流噪声计算域如图 4 所示，其中 l_1 = 640 mm、l_2 = 320 mm、l_3 = 156.21 mm、l_4 = 320 mm。计算域中声源面取为半径为 l_3、长度为 l_2 的圆柱面。网格的划分采取非均匀网格，网格数为 1 989 863。采用的边界条件为：远场为压力出口，喷管表面为固壁边界条件。

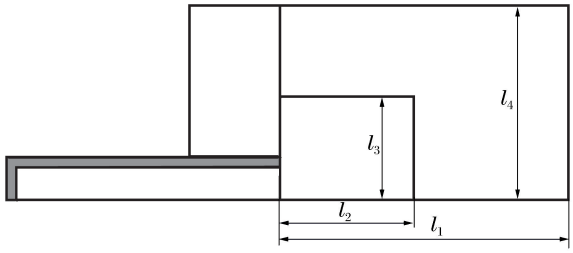


图 4 计算区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of computational domain

各测量点的位置如图 5 所示，即：以管口中心点为圆心，半径 R 取为 1 m，射流下游方向为起始方向，每隔一定的角度取一个测量点。

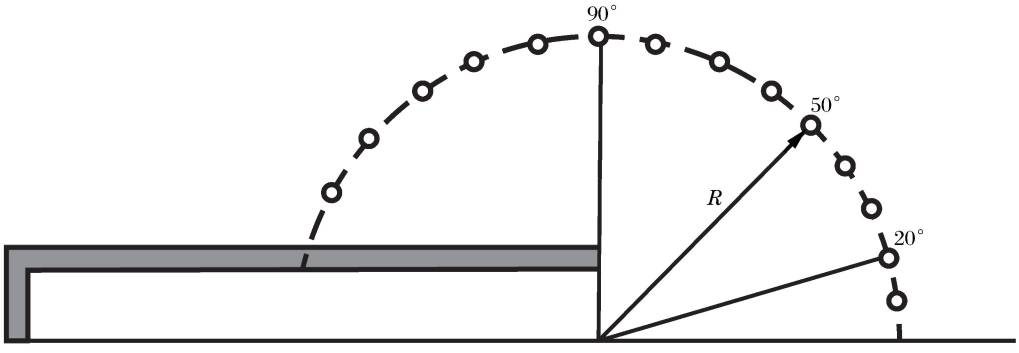


图 5 测量点位置

Fig. 5 Measurement points location

图 6 为射流噪声计算过程中得到的某瞬时流场压力分布图，此时流场计算进入相对稳定状态，启动 FW-H 方程计算各测量点处的声压。

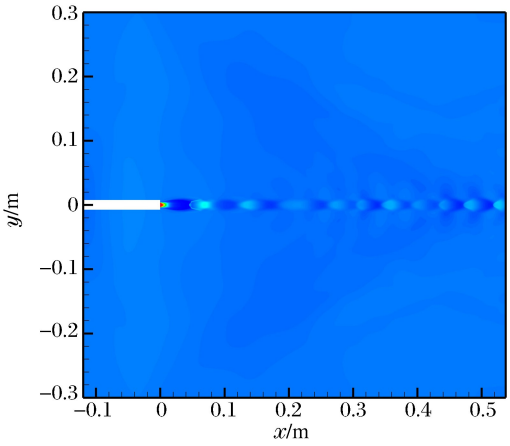


图 6 瞬时压力分布图

Fig. 6 Instantaneous pressure distribution

利用流动部分的数值计算结果作为声源数据，计算各测量点处声压信号，对其进行谱分析，可得到总声压级，由此绘制出噪声指向图。图 7 为经计算获得的距枪口 1 m 处的噪声指向图，其中 60°方向噪声最大。

根据计算结果绘制的等声压级云图如图 8 所示。图形呈蝴蝶型，最大总声压级出现在距膛口0.5～1 m、角度为 30°～60°方向。随着各测量点距膛口距离的增大，火药燃气射流强度降低，总声压级在减小。射流噪声具有较强的指向性，总声压级与夹角呈非线性关系。在距枪口等距离的条件下，射流噪声在与轴线成 30°～60°夹角的范围内总声压级最强，可能的原因是此方向上激波/涡环、涡/涡之间的相互作用很强。另外由于在流场计算中没有考虑运动弹丸，接收点处的声压会受影响。其他更深层次的原因还需做进一步的研究。

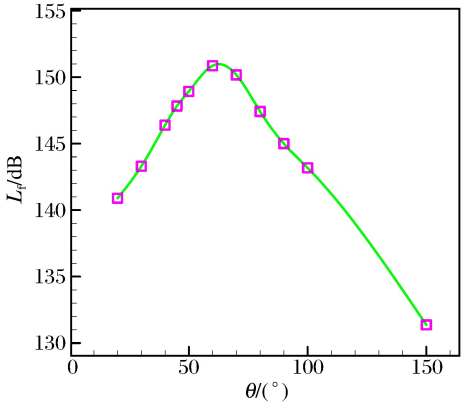


图 7 距喷口 1 m 处的噪声指向图

Fig. 7 Noise directivity diagram

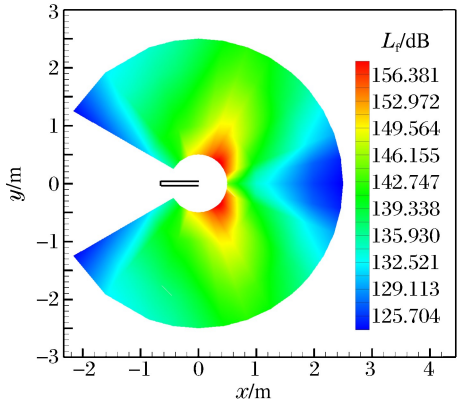


图 8 声压级云图

Fig. 8 Contour of sound pressure level

3　结　论

采用 CFD-CAA 耦合算法对某 7.62 mm 枪的射流噪声进行了数值研究，得到了射流噪声的一些基本规律。根据数值结果分析了射流噪声距喷口 1 m 处的指向性，并绘制了等声压级云图。结果表明：(1)射流噪声主要集中在近膛口处；(2)射流噪声具有指向性，在距枪口等距离的前提下，射流噪声在与轴线成 30°～60°夹角的范围内总声压级最强。

参考文献：

[1] 曾永珠. 枪械设计中的膛口噪声预测计算方法[J]. 弹道学报，1995，7(4)：92-96.
Zeng Yong-zhu. Prediction calculation method of muzzle noise in the firearms design[J]. Journal of Ballistics, 1995,7(4):92-96.

[2] Bin J, Kim M, Lee S. A numerical study on the generation of impulsive noise by complex flows discharging from a muzzle[J]. International Journal for Numerical Methods In Engineering, 2008,75(8):964-991.

[3] Lee I C, Lee D J, Ko S H, et al. Numerical analysis of a blast wave using CFD-CAA hybrid method[C]// 12th

AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference). Cambridge, Massachusetts, 2006.

[4] Rehman H, Hwang S H, Fajar B, et al. Analysis and attenuation of impulsive sound pressure in large caliber weapon during muzzle blast[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011,25(10):2601-2606.

[5] Liang S M, Tai C S. Analysis and prediction of shock-induced near-field acoustics from an exhaust pipe[J]. Computers & Fluids, 2011,45(1):222-232.

[6] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations, I: The basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963,91(3):99-164.

[7] Ffowcs Williams J E, Hawkings D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. Royal Society of London, 1969,264(3):321-342.

[8] Shur M, Spalart P R, Strelets M K. Noise prediction for increasingly complex jets, part I: Methods and tests[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2005,4(3/4):213-246.

[9] Shur M, Spalart P R, Strelets M K. Noise predicion for increasingly complex jets, part II: Applications[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2005,4(3/4):247-266.

[10] Sipatov A M, Usianin M V, Chuhlantseva N O. Applying Fluent Software for Jet noise Generation Modeling[C]//16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Stockholm, Sweden, 2010.

Numerical simulation on jet noise induced by complex flows discharging from small caliber muzzle*

Wang Yang[1], Jiang Xiao-hai[2], Yang Xu-pu[3], Guo Ze-qing[2]

(1. *School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
3. *School of Defense Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*)

Abstract: In order to investigate the characteristics of muzzle noise, a numerical study on jet noise induced by complex flows discharging from 7.62 mm gun is achieved. Because of the complex flows structure, it is not easy to study muzzle noise by direct simulation of CAA in current level of computational condition. CFD-CAA hybrid method is applied. At first, the muzzle flow is calculated by using LES. Using the obtained data, the jet noise is carried out by using FW-H equation. The feasibility of the numerical method is verified by comparing with the experiment. Then, the jet noise of 7.62 mm gun is numerically studied by using the hybrid method. Based on the numerical results, the jet noise directivity is analyzed and the contour of sound pressure level is also drawn. Results indicate that jet noise is mainly concentrated in the near muzzle region and the maximum jet noise mainly occurs in the range of 30°—60°.

Key words: mechanics of explosion; jet noise; large eddy simulation; small caliber muzzle; noise directivity; contours of sound pressure level

---

* Received 16 October 2012; Revised 19 April 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (10902052)
Corresponding author: Wang Yang, wangyangxupu@163.com

(责任编辑 曾月蓉)