

doi: 10.7690/bgzd.2016.10.019

基于 CFD 技术的火药气体作用系数计算

殷鹏贤, 赵俊利, 王立君, 刘 凯, 李大勇

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 火炮反后坐装置设计需要确定火药气体作用系数。为准确计算火药气体作用系数, 提出一种基于 CFD 技术的火药气体作用系数的数值计算方法。选用某火炮不带炮口装置为算例, 在 Fluent 前处理软件 Gambit 中建立流场计算模型, 监测身管受力, 得到后效期内膛膛合力的冲量, 求得火药气体作用系数。将仿真计算值与经验公式、理论公式和实验值进行对比分析, 并对该方法的正确性进行验证。对比分析结果表明, 基于 CFD 技术的火药气体系数计算值准确可信。

关键词: CFD; 火炮; 膛口流场; 非定常; 火药气体作用系数

中图分类号: TJ302 **文献标志码:** A

Computation of Propellant Gas Active Coefficient Based on CFD

Yin Pengxian, Zhao Junli, Wang Lijun, Liu Kai, Li Dayong

(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Designing of gun recoil mechanism needs calculating the propellant gas active coefficient accurately, to accurately calculate the propellant gas active coefficient, proposed a calculation method that based on CFD technology. The numerical method set up a 3D flow model by the software Fluent and Gambit of the gun without muzzle device, monitor the force of barrel, get the impulse of gun bore resultant force during after-effect period, and then calculate the propellant gas active coefficient according to the formula. In order to verify the correctness of numerical method, compared the result of numerical method with empirical, theoretical formula and experimental values. The conclusion that computation of propellant gas active coefficient based on CFD is accurately can be proved after comparative analysis.

Keywords: CFD; gun; muzzle flow field; unsteady; the propellant gas active coefficient

0 引言

火炮反后坐装置设计需要进行自由后坐运动计算, 利用火药气体的作用系数 β 可以得到后效期自由后坐运动诸元; 因此, 准确地计算 β 对火炮设计很重要^[1]。火药气体作用系数 β 是表征火药气体对后坐作用程度的参数, 在进行炮口制退器效率计算时, 炮口制退器效率为

$$\eta = 1 - \left(\frac{m + \alpha\beta\omega}{m + \beta\omega} \right)^2 \times 100\% \quad (1)$$

式中: m 为弹丸质量; α 为炮口制退器结构特征量; ω 为装药量。因此, 在炮口制退器的设计与分析中, 不带炮口制退器时火药气体作用系数 β 也是一个重要的参数。

计算火药气体的作用系数 β 一般有经验公式、理论公式以及数值方法^[2]。对火炮后效期过程使用不同的简化算法得到不同的火药气体作用系数计算公式, 经验公式与理论公式都是在一定条件下针对具体的情况总结出来的, 具有某些特定的适用范围。

随着计算流体力学的发展, 膛口流场的数值模拟成为研究炮口气流排空过程研究的重要方法。同时国内的专家利用多种数值方法有针对性地对膛口流场进行模拟分析, 提供了许多有价值的结果^[3-5]。数值方法可以对整个后效期火药气体排空过程进行准确模拟仿真; 基于此, 笔者提出一种基于 CFD 技术的火药气体作用系数 β 的数值计算方法。

1 数值方法及流场计算模型

1.1 控制方程

火药气体为气固两相、多组分、含有化学反应的复杂气流结构, 建立其真正的数学模型非常困难, 既不现实又不必要; 因此, 工程中一般都基于以下假设^[6], 对其进行合理的简化:

1) 将空气和火药气体当作同一介质, 采用理想气体的材料特性来计算;

2) 不考虑弹丸, 忽略弹丸运动对气体的影响。

根据以上假设, 笔者采用无粘三维 Euler 方程来描述炮口气流^[7], 其控制方程为

收稿日期: 2016-06-29; 修回日期: 2016-08-20

作者简介: 殷鹏贤(1991—), 男, 河北人, 硕士, 从事火炮总体技术研究。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

其中

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho wu \\ (e+p)u \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (e+p)v \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ (e+p)w \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中： ρ 为火药气体密度； p 为火药气体压强； u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 3 个方向的速度分量； e 为单位质量气体的总能量，其表达式为

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2). \quad (4)$$

式中： γ 为理想气体比热比；假设气体为理想气体，满足气体状态方程 $p = \rho RT$ ， R 是理想气体常数。

1.2 流场计算模型

选用某不带炮口装置的火炮为算例，在 Fluent 前处理软件 Gambit 中建立流场计算模型。由于火炮身管的对称结构，只需建立火炮身管的 1/4 模型。同时为了得到高质量的流场网格，忽略身管内的膛线及炮口处的螺纹等对流场分析影响不大的特征。建立火炮流场计算模型的网格划分及仿真计算选取的边界条件，如图 1 所示。

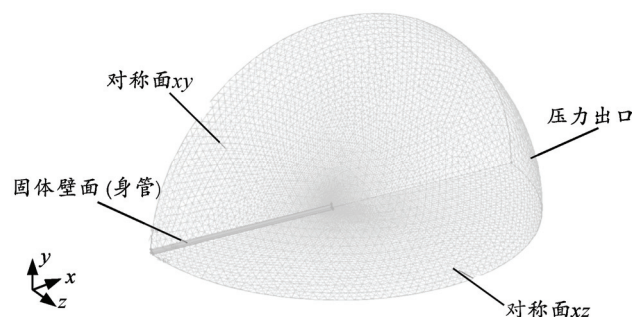


图 1 火炮流场计算模型

火炮发射过程是典型的非定常流动问题，再结合流场模型的其他特征，最终选择密度基、隐式、非定常求解器。由于火药气体在膛内流动过程属于有壁面限制的流动问题，选择适合求解这种过程的 Spalart-Allmaras 模型。以后效期开始为初始时刻，将内弹道计算的压力、温度和火药气体运动速度利

用 Fluent 软件中的 Patch 功能，对身管内部进行初始化。

2 火药气体作用系数 β 的计算方法

火药气体作用系数虽然是作为一个经验系数引出和使用的，但在力学概念上具有明确的物理意义。计算自由后坐最大速度公式为：

$$-m_h W_{\max} + m v_0 + \beta \omega v_0 = 0. \quad (5)$$

其中： m_h 为后坐部分质量； m 为弹丸质量； v_0 为弹丸初速； ω 为装药量。式 (5) 表示了后效期结束时，由自由后坐的后坐部分、装药和弹丸组成的系统的动量守恒关系。 $\beta \omega v_0$ 是后效期结束时全部火药气体的总动量， βv_0 则是后效期结束时全部火药气体的平均速度 v_{ave} ；因此， β 的物理意义为后效期结束时全部火药气体的平均速度 v_{ave} 与弹丸初速 v_0 的比值。

对于自由后坐时的后坐部分，动量方程为：

$$\int_0^{t_g + \tau} F_{\text{pt}} dt = \int_0^{t_g} F_{\text{pt}} dt + \int_0^{\tau} F_{\text{pt}} dt = m_h W_{\max}; \quad (6)$$

$$\int_0^{t_g} F_{\text{pt}} dt = m_h W_g. \quad (7)$$

式中： t_g 代表内弹道过程经历时间； τ 代表后效期经历的时间（当膛内燃气平均压力将为 0.176 4 MPa 时后效期结束）； W_g 代表内弹道过程结束时自由后坐速度； W_{\max} 代表后效期过程结束时自由后坐最大速度； F_{pt} 为炮膛合力。

后坐部分、装药和弹丸组成的系统动量守恒关系有：

$$m_h W_{\max} = m v_0 + \beta \omega v_0. \quad (8)$$

根据数学关系变换其形式得：

$$m v_0 + \beta \omega v_0 + 0.5 \omega v_0 - 0.5 \omega v_0 = (m + 0.5 \omega) v_0 + (\beta - 0.5) \omega v_0; \quad (9)$$

$$m_h W_{\max} = m_h W_g + (\beta - 0.5) \omega v_0. \quad (10)$$

对比式 (6) 和式 (10) 可得：

$$\int_0^{\tau} F_{\text{pt}} dt = (\beta - 0.5) \omega v_0; \quad (11)$$

$$\beta = 0.5 + \frac{\int_0^{\tau} F_{\text{pt}} dt}{\omega v_0}. \quad (12)$$

3 数值模拟分析

经过 Fluent 软件三维仿真计算后, 可以得到不带炮口装置的火炮膛口流场, 在后效期内的发展过程。选取后效期内 4 个时刻的速度等值线图来具体分析膛口流场, 可以清晰地看到炮口欠膨胀流的发展过程, 即以相交激波、反射激波和马赫盘组成的瓶装激波系为特征的射流结构经历了生长期、稳定期和衰减期^[8], 表明该数值模拟方法准确描述了膛口流场的变化过程。不同时刻膛口流场速度等值线云图如图 2 所示。

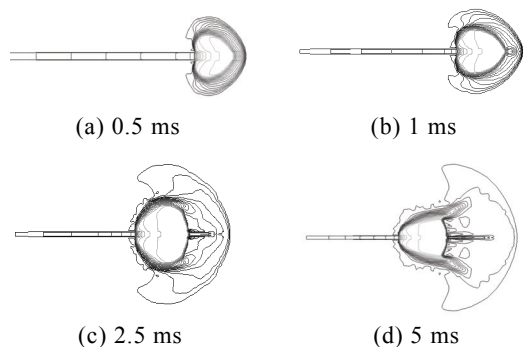


图 2 不同时刻膛口流场速度等值线云图

流场计算开始时在 Fluent 内监测火炮身管和膛底沿膛线方向的受力(取后坐方向为正方向), 仿真计算结束后可得到炮膛合力随时间变化的曲线, 后效期内炮膛合力最大值为 962.5 kN, 如图 3。将炮膛合力曲线对时间积分得到整个后效期内, 火药气体对火炮后坐部分的总冲量 $I = \int_0^{\tau} F_{pt} dt = 5\ 415.3$ N·s。根据式 (12) 计算出火药气体作用系数 $\beta = 2.115$ 。

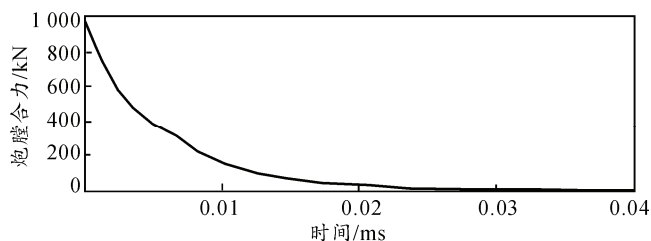


图 3 炮膛合力随时间变化曲线

为检验本方法的正确性, 笔者将本方法结果与经验公式、理论公式和试验计算值进行分析对比, 不同计算公式对应的火药气体系数见表 1, 其中斯鲁霍斯基公式为理论公式, 其余的公式均为经验公式。表 1 中 $a_g = \sqrt{k \frac{p_g}{\rho_g}}$, p_g 为后效期起始点的膛内平均压力; ρ_g 为后效期起始点的膛内密度; k 为火药气体比热比。

表 1 不同计算公式对应的火药气体系数

公式名称	表达式	计算值
法国公式	$\beta = \frac{1300}{v_0}$	1.823
俄炮兵研究所公式	$\beta = 0.5 + \frac{1400}{v_0}$	2.463
美国公式	$\beta = \frac{1431}{v_0}$	2.001
斯鲁霍斯基公式 ($k=1.33$)	$\beta = 1.3932 \frac{a_g}{v_0}$	1.763

已知该火炮带炮口制退器时的试验实测效率为 45%, 同时根据改进的奥尔洛夫法求解出此炮口制退器结构特征量 $\alpha = 0.157$, 根据式 (1) 求得不带炮口制退器时火药气体作用系数为 $\beta_0 = 2.011$ 。对比表 1 可得到该火炮气体作用系数的经验公式数值范围, 判断该值是否符合实际情况。对比试验数据, 求得气体作用系数误差率为 5.17%, 可见仿真方法计算的结果表现出较好的符合性。

4 结论

限于经验公式与理论公式的适用范围, 笔者提出利用 CFD 技术, 使用 Fluent 软件, 对不带炮口装置的火炮进行流场仿真, 并基于仿真结果所得到的炮膛合力曲线计算了火药气体作用系数。通过与经验公式、理论公式和实验计算值对比可知, 仿真模拟计算符合实际情况, 并且计算值可信。

参考文献:

- [1] 高树滋, 陈运生, 张月林, 等. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 276-280.
- [2] 柯彪, 贾强, 高跃飞, 等. 神经网络在火药气体作用系数计算中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2012, 173(4): 23-25.
- [3] 代淑兰, 许厚谦, 孙磊, 等. 含动边界的膛口流场数值模拟[J]. 弹道学报, 2007, 19(3): 93-96.
- [4] 姜孝海, 范宝春, 李鸿志, 等. 基于 ALE 方程的动网格膛口流场数值研究[J]. 计算力学学报, 2008, 25(4): 563-567.
- [5] 郭则庆, 王扬, 姜孝海, 等. 小口径武器膛口可视化实验[J]. 实验流体力学, 2012, 26(2): 46-50.
- [6] 张辉. 复杂流场数值方法研究及在炮口制退器设计中应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [7] 张焕好, 陈志华, 姜孝海, 等. 膛口装置三维流场的数值模拟与制退效率计算[J]. 兵工学报, 2011, 32(5): 513-519.
- [8] 陈新, 曹从咏, 周翠平, 等. 膨胀波火炮后喷冲击波流场数值模拟[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(3): 333-336.