

doi: 10.7690/bgzdh.2015.02.005

12.7 mm 转管机枪枪口助旋制退器流场数值仿真分析

黄建业, 王惠源

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 转管机枪枪口助旋制退装置, 是有效提高转管机枪射速(或减小驱动电机功率)和降低武器后坐力的技术途径。提出了一种新型助旋制退器, 建立了助旋制退器的三维模型, 对结构进行了分析。建立了助旋制退器流场计算模型与控制方程组, 使用 Matlab 软件对内弹道以及后效期进行计算, 利用 icem-cfd 软件进行网格的划分, 用 Fluent 软件完成流场的仿真, 并对助旋力矩进行了计算。结果表明, 该枪口助旋制退装置可以为武器提供旋转力矩和制退力。

关键词: 转管机枪; 助旋; 制退; 流场分析; 仿真

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Brake Torque Assist for the Muzzle of 12.7mm Gatling Gun Analysis

Huang Jianye, Wang Huiyuan

(School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Muzzle torque assist & brake for gatling machine gun is an effective technical way to improve the gatling gun firing rate (reduce the driving motor power). This paper presents a new type of rotary muzzle brake assist, establishes three-dimensional model of rotary muzzle brake assist, analysis the structural. Establishes auxiliary rotary muzzle brake flow field calculation model and the control equations, on the interior ballistic and aftereffect period were calculated using Matlab software, divides the grid using icem-cfd software, completes the flow field simulation with Fluent software and calculates help rotary torque. The results show that the gun muzzle device can provide help rotary torque and recoil force as a weapon.

Keywords: gatling machine gun; rotation assistant; recoil brake; flow field analysis; simulation

0 引言

枪炮的膛口流场是从膛内高速留出的欠膨胀非定常射流与在膛口外的空气相互作用而形成的^[1]。计算机技术的成熟以及流体力学的发展, 为膛口流场的研究提供了新的途径。如 Cook 等人计算了激波管外的冲击波传播问题以及轴对称条件下的膛口流场问题; Carofanorev 等人采用了二阶精度的 TVD 格式对膛口冲击波进行计算, 大大提高了计算精度。Daniel L. cler 等人分别用 FLUENT 和 DG 模拟 7.62 mm 步枪的膛口流场, 显示的计算结果与实验结果基本吻合^[2-4]。国内针对于膛口流场也展开了大量研究, 李鸿志研究了膛口冲击波与膛口流场的形成机理, 并对炮口装置的效率以及受力情况进行了分析, 首先在国内提出了膛口冲击波的减小途径^[5]。廖振强教授提出国内首创的拉瓦尔喷管气流发明专利技术应用于 6 管 14.5 mm 内能源转管机枪的驱动方式上, 随后其带领的团队对这一驱动方式进行一系列

的理论研究、实验模拟、数值仿真、优化设计等, 使之在理论与实际上不断趋于完善^[6]。国内的其他研究者还针对外能源超高射速转管炮所需驱动功率过高的问题, 提出了内外能源相结合的方法, 并运用拉瓦尔喷管原理提出了一种新型助旋制退装置。

笔者在转管枪口或者转管炮口处添加助旋制退装置, 即采用内外能源相结合的方式, 相对而言其质量较轻, 助旋效率高, 可有效降低转管枪或者转管炮对武器平台承载能力的要求, 并且助旋制退装置的添加可以缩短转管武器达到额定射速的时间, 相同的条件下, 添加助旋制退装置能够增加武器射频, 可提高转管武器的战术技术性能。

1 计算模型与处理

1.1 计算模型处理

图 1 为助旋制退装置原理图, 箭头方向为火药气体流动方向; 图 2 为助旋制退装置整体三维视图和剖视图。

收稿日期: 2014-09-14; 修回日期: 2014-11-05

作者简介: 黄建业(1988—), 男, 安徽人, 在读硕士, 从事火炮、自动武器与弹药工程研究。

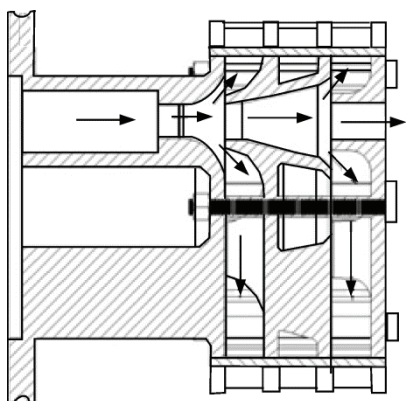


图 1 助旋制退装置原理

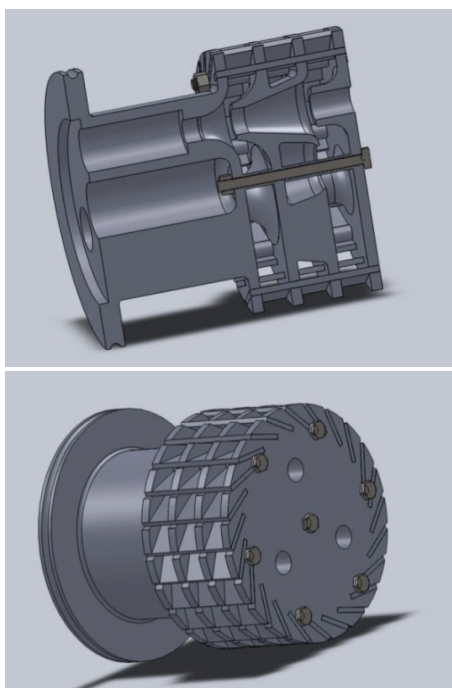


图 2 助旋制退装置整体三维视和剖视图

由于助旋制退装置内部结构较为复杂，fluent 前处理器建模功能有限，笔者采用 Solidworks 建立助旋制退装置模型，并对模型进行相应简化，简化中去除不影响计算或者影响很小的配件，剔除拐点和刺边，以利于后期计算，通过布尔运算建立生成计算区域。为了定性地分析计算助旋制退装置对转管武器的影响，有必要对其做进一步的假设简化：高速旋转对助旋制退装置 48 个侧喷孔的影响与不旋转时影响相差不大，为了方便研究与计算，在此当作无旋转处理；忽略弹丸的影响；整个过程视作准静态过程；膛壁的导热系数为 0；不考虑火药气体的摩擦、重力、化学反应以及热辐射；没有燃尽的火药颗粒以及火药气体在仿真时间内均匀分布，忽略膛内压力波的反射以及身管后坐在仿真过程中造成的影响，通过以上简化以及假设，助旋制退装

置内部流场便简化成如图 3 所示的流体计算模型。

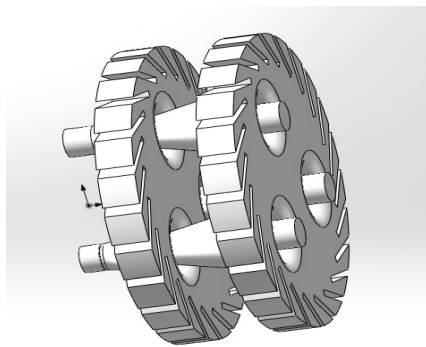


图 3 流体计算模型

1.2 网格划分

流体计算模型建好后通过 solidworks 和 ansys 之间的接口导入 ansys 中，对计算区域进行网格划分，网格的划分对流体数值计算的计算精度、收敛性以及可行性影响至关重要，ICEM-CFD 软件是一款较为成熟的网格划分软件，其网格划分能力能够满足 CFD 的仿真需求。笔者考虑到计算区域结构的复杂性和流场分析特性，使用 ICEM-CFD 划分网格时，全场采用四面体非结构化网格对计算区域进行网格创建，创建后的网格如图 4 所示。网格文件导入 fluent 之后需要查看网格是否存在负体积，以及网格的扭曲率是否在合理的范围之内。

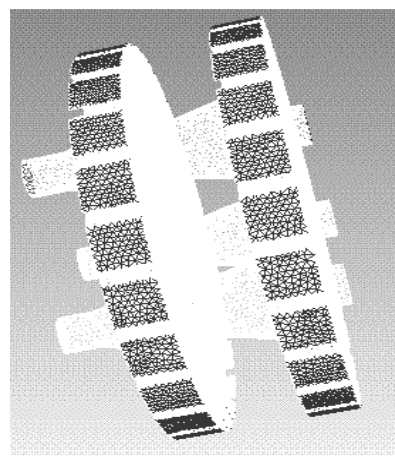


图 4 模型网格划分示意图

2 装置的数学模型

2.1 装置的三维控制方程^[7]

在考虑上一节中的简化与假设的基础上，三维笛卡尔坐标系下的粘性可压气体流动控制方程为

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中：

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho\mu \\ \rho v \\ \rho\omega \\ E \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$F = \begin{Bmatrix} \rho\mu \\ \rho\mu^2 + p + \sigma_x \\ \rho\mu v + l_{xy} \\ \rho\mu\omega + l_{xz} \\ (E + p)\mu + \mu\sigma_x + l_{xy} + \omega l_{xz} - q_x \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$G = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho\mu v + l_{yx} \\ \rho v^2 + p + \sigma_y \\ \rho v\omega + l_{yz} \\ (E + p)v + \mu l_{yx} + \omega\tau_{yz} + v\sigma_y - q_y \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$H = \begin{Bmatrix} \rho\omega \\ \rho\mu\omega + l_{zx} \\ \rho\mu\omega + l_{yz} \\ \rho\omega^2 + p + \sigma_z \\ (E + p)v + \mu l_{xz} + v l_{yz} + \omega\sigma_z - q_z \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中： σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为 x 、 y 、 z 3 个方向上的正应力； l_{xy} 、 l_{yx} 、 l_{xz} 、 l_{zx} 、 l_{yz} 、 l_{zy} 为 6 个切应力分量，且互换下标的每一对切应力是相等的； ρ 为火药气体密度； p 为单位面积上的正压力； u 、 v 、 w 为 x 、 y 、 z 3 个方向上的速度； E 为单位体积上流体的总能； μ 为粘性系数； q_x 、 q_y 、 q_z 为 3 个方向上的能量通量。对于 3 个正应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z ；6 个切应力 l_{xy} 、 l_{yx} 、 l_{xz} 、 l_{zx} 、 l_{yz} 、 l_{zy} 以及能量通量 q_x 、 q_y 、 q_z 由以下式得出：

$$\sigma_x = -\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6)$$

$$\sigma_y = -\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (7)$$

$$\sigma_z = -\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (8)$$

$$l_{xy} = l_{yx} = -\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (9)$$

$$l_{xz} = l_{zx} = -\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (10)$$

$$l_{yz} = l_{zy} = -\lambda \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (11)$$

$$\begin{cases} q_x = \frac{\mu}{p_r(\gamma-1)} \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y = \frac{\mu}{p_r(\gamma-1)} \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z = \frac{\mu}{p_r(\gamma-1)} \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases} \quad (12)$$

式中 λ 和 μ 满足 Navier-Stokes 关系式，即

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu;$$

对于完全气体来说，满足以下关系式

$$p = (\gamma - 1) \left(E - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \right) \quad (13)$$

以上式中： γ 为比热比，在文中取值为 1.33； p_r 为普朗特常数。

2.2 内弹道和后效期的计算

内弹道计算基于如下基本假设：火药燃烧遵循集合燃烧定律；使用比热比或者是火药力间接修正内膛表面损失的热量；药粒视为在恒定的压力下均匀充分的燃烧；弹丸进入膛线后，忽略漏气且密闭性良好；忽略弹丸挤进膛线所需要的时间；火药燃气服从诺贝尔·阿贝尔状态方程；将火药燃气产生的热量和温度视为定值，忽略在过程中燃气成分变化和热量损失以及引起的余容、火药力及比热比的变化。使用上述参数及假设，用 Matlab 软件编写 Runge-Kutta 法解算内弹道基本方程组，解出内弹道膛压随时间的变化曲线如图 5 所示。

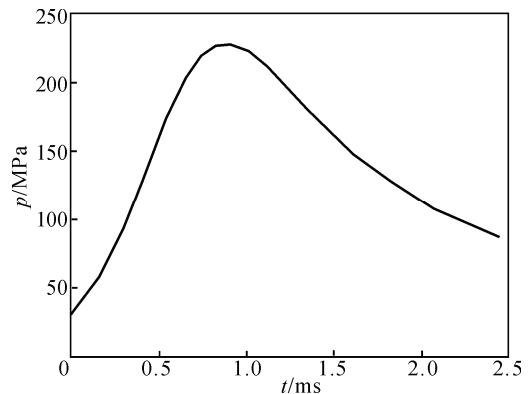


图 5 内弹道 $p-t$ 图

得出的炮口膛压将作为初始值求解后效期，经验证某 12.7 mm 口径转管机枪后效期满足经验公式

$p = p_g \exp(-\frac{t-t_g}{b})$, 由此解出后效期压强随时间的变化曲线如图 6 所示。

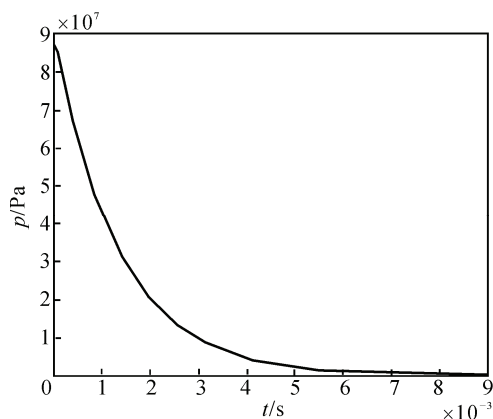


图 6 后效期 $p-t$ 图

2.3 模型的计算处理

2.3.1 边界条件

边界条件正确定义对仿真结果的正确性影响很大。在进口和出口处, 笔者采用压力进口与压力出口边界条件, 其余定义为壁面, 其中对于可压缩流动来说, 总压和静压存在如下关系: $p_{\text{total}} =$

$$p_{\text{static}} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{k/(k-1)}$$

由于文中所研究的为超高速的转管武器, 其每 2 发弹的时间间隔大约在 6 ms, 后效期计算的第 86 个点膛口压强已经降为 2.04 MPa, 可认为对计算结果影响较小, 用上一节所计算出的后效期随时间变化的压强, 取前 85 个点作为边界条件导入 fluent 中计算, 总仿真时间为 5.04 ms, 压力出口由内部流动计算结果给定。初始条件设为大气压条件, 装置入口端的速度设置为 0。

2.3.2 材料的物理属性

笔者需要自定义火药气体, 其中火药气体的热传导率和粘性采用默认值, 火药气体的分子量使用 4/7 樟火药的分子量, 比定压热容 C_p 由如下公式计算求得:

$$C_p - C_v = R \quad (14)$$

$$R = \frac{f}{T} \quad (15)$$

$$\frac{C_p}{C_v} = \gamma \quad (16)$$

其中: R 为气体常数; C_v 为比定容热容; T 为爆温; γ 为比热比。

2.3.3 控制求解与收敛控制参数

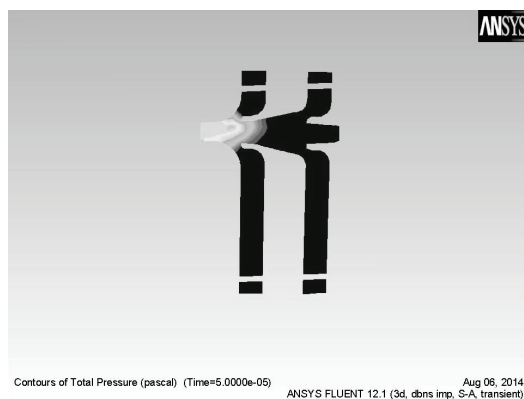
笔者采用适合超音速流场的密度基求解器, 隐式算法, 非定常流解法, 湍流模型中的 Spalart-Allmaras 方程湍流模型 (S-A 模型), 由于它是一种相对简单的单方程模型, 不必计算和局部剪切层厚度相关的长度尺寸, 对于较粗的壁面网格也有很好的收敛结果, 所以用此作为湍流的控制方程。考虑到数量巨大的网格将增加计算时间成本, 同时也为了保证每一个时间步的收敛, 所以对时间和空间的偏导数采用一阶迎风格式进行离散。

一般情况下可用来调节的控制参数为松弛因子和 Courant Number, 松弛因子的选取是为了保证加快计算的收敛, 一般取值在 1~2 之间, 对于文中的三维助旋制退装置由于较难收敛, 取值为 <1 的值, 通常情况下可改变动量的松弛因子。对于文中的助旋制退装置的非定常计算, 仿真的前几个时间步非常重要, 计算要保证其收敛, 考虑到较小的库朗数会使计算的数值比较稳定, 网格上的数值梯度不容易发散, 文中库朗数取值在 0.05~0.20 之间。

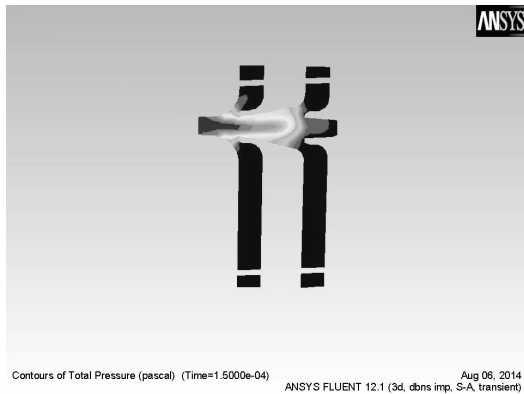
3 流场的仿真分析及求解结果

3.1 流场的仿真分析

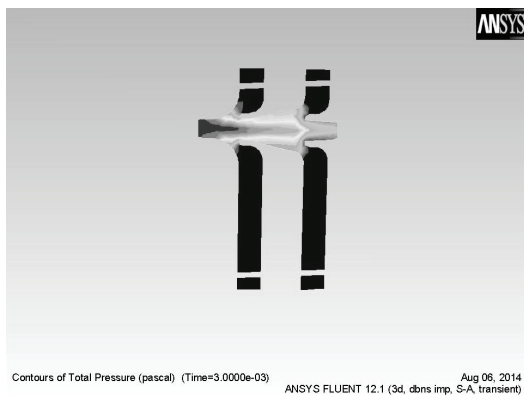
在以上网格的建立和模型的求解上, 根据计算条件对某 12.7 mm 口径的转管武器枪口处带有助旋制退装置的内部流场进行仿真, 仿真时间为毫秒级的短暂过程, 流场的变化也很剧烈, 为了使流场的计算收敛, 时间步长要设置的很短, 经过不断的测试, 取时间步长为 0.01 ms, 每一步迭代次数为 200 步, 迭代开始内部流场的仿真为非定常计算, 以火药气体出枪口处的瞬间为时间零点, 图 7 中(a)~(f) 是助旋制退装置中火药气体处膛口后不同时刻助旋制退装置内部流场的压力云图和速度云图。



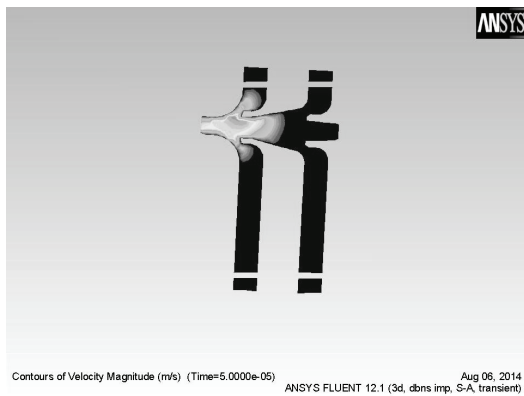
(a) $t=0.05$ ms 压力云图



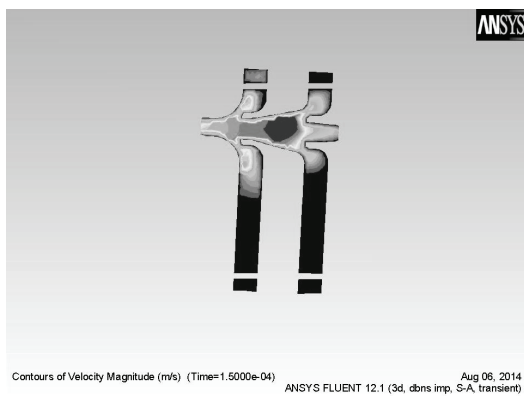
(b) $t=0.15$ ms 压力云图



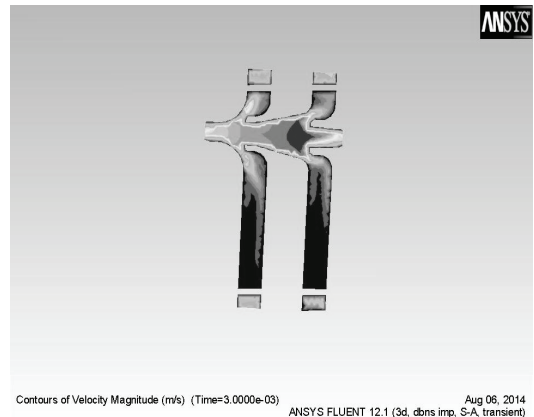
(c) $t=3$ ms 压力云图



(d) $t=0.05$ ms 速度云图



(e) $t=0.15$ ms 速度云图



(f) $t=3$ ms 速度云图

图 7 装置中火药气体处膛口后不同时刻的压力云图和速度云图

仿真结果展示了火药气体在助旋制退装置内部的形成发展过程：当火药气体流出枪口后，经过拉瓦尔喷管的加速，一部分火药气体以高温、高速以及高压迅速进入助旋制退装置冲击主制退盘，其余气体通过装置向前流动，冲击在主制退盘上气体提供一个向前的推力，表现为反后坐力，冲击主制退盘后气体将改变方向冲击装置周围的助旋盘，这个冲击将给装置提供一个旋转扭矩；向前流动的气体经过第 2 个拉瓦尔喷管时，其中的部分火药气体继续冲击第 2 个制退盘提供反后坐力，并冲击助旋盘提供旋转扭矩。向前的推力与后坐力相反，因此能够减小枪的后坐力；冲击在主助旋盘和第 2 个助旋盘上的力将提供驱动力矩支撑武器系统的驱动。

3.2 计算结果

仿真结果得到直喷口处火药气体平均压力为 $p_z = 3.492$ MPa，平均速度 $v_z = 475.64$ m/s，侧喷口火药气体平均力 $p_c = 0.125258$ MPa 平均速度 $v_c = 212.116$ m/s，装置内部的平均密度为 $q = 8.6986$ kg/m³，由于火药气体在装置内部流动时还会受到哥氏加速度的影响，哥氏加速度所产生的阻力距很小^[8]，因此忽略哥氏加速度对助旋装置所产生的影响。因装置侧喷口处与速度方向垂直的面积 $S = 211$ mm²，助旋制退装置的侧喷口到中心处的垂直距离为 $R = 70.5$ mm，气流在助旋制退装置内部的反作用力由 2 部分组成：一部分是喷出气流的反冲力，另一部分为气流的压力^[6]

$$F = (p_c - p_a)S + qv^2S \quad (18)$$