

doi: 10.7690/bgzd.2020.12.019

## 考虑火炮身管后坐的内弹道两相流数值仿真方法

包光辉<sup>1</sup>, 王国平<sup>1</sup>, 黎超<sup>1</sup>, 王燕<sup>1</sup>, 马振政<sup>1</sup>, 刘飞<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学发射动力学研究所, 南京 210094;

2. 内蒙古北方重工业集团有限公司特钢事业部, 内蒙古 包头 014000)

**摘要:** 为准确计算火炮内弹道两相流动力学各参量以及膛内弹丸的运动规律, 提出一种内弹道两相流动力学与火炮发射动力学耦合计算的仿真方法。对经典内弹道、不考虑后坐运动的内弹道两相流以及耦合计算得到的内弹道参量变化规律进行分析, 耦合计算得到的膛压及初速与实验值吻合良好。分析基于经典内弹道理论和耦合算法得到的弹丸运动规律, 耦合算法能够得到反映膛内弹丸实际运动变化规律的结果, 表明该方法可为内弹道和发射动力学准确计算提供参考。

**关键词:** 内弹道两相流动力学; 发射动力学; 后坐运动; 弹丸运动

**中图分类号:** TJ012 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation Method of Two-phase Flow in Interior Ballistics Considering Recoil of Artillery Barrel

Bao Guanghui<sup>1</sup>, Wang Guoping<sup>1</sup>, Li Chao<sup>1</sup>, Wang Yan<sup>1</sup>, Ma Zhenzheng<sup>1</sup>, Liu Fei<sup>2</sup>

(1. Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China;

2. Division of Special Steel, Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp. Ltd., Baotou 014000, China)

**Abstract:** In order to accurately calculate the parameters of the two-phase flow dynamics in the artillery and the movement law of the projectile in the bore, a simulation method for coupling calculation of the two-phase flow dynamics in interior ballistics and launch dynamics is proposed. The variation law of the interior ballistics parameters obtained by the classic interior ballistics, the two-phase flow in interior ballistics without considering recoil motion and the coupling calculation are analyzed. The bore pressure and initial velocity obtained by the coupling calculation are in good agreement with the experimental values. The motion law of projectiles obtained by basing on the classical interior ballistic theory and the coupling algorithm are analyzed, the coupling algorithm can obtain the results reflecting the actual motion change law of the projectiles in the bore. It shows that this method can provide a reference for accurate calculation of interior ballistics and launch dynamics.

**Keywords:** two-phase flow dynamics in interior ballistics; launch dynamics; recoil motion; projectile motion

### 0 引言

现代战争对火炮武器系统提出了“精确打击高效毁伤”的要求<sup>[1]</sup>。为了分析火炮复杂的射击过程, 了解其变化规律, 需要对内弹道学和火炮发射动力学进行研究。国内外的学者对此展开了深入研究, 对内弹道两相流的研究始于文献[2]。王升晨等<sup>[3]</sup>对反坦克高膛压火炮的点火和燃烧现象展开了研究。对火炮发射动力学的研究中, Marting 等<sup>[4]</sup>抛弃了“弹带中心沿炮膛轴线运动”的假设, 建立膛内弹丸运动的微分方程。芮筱亭等<sup>[5]</sup>将多体系统传递矩阵法应用于发射动力学计算, 极大地提升了对复杂机械系统的仿真速度。

以往的内弹道两相流计算中, 往往不考虑火炮身管后坐运动影响, 且对弹丸膛内运动受力作出相

应的简化。火炮发射动力学对内弹道部分的计算中, 采用经典内弹道模型, 将对弹-炮-药耦合运动的分析产生影响; 因此, 笔者应用火炮发射动力学理论, 对弹丸在膛内复杂受力进行全面分析, 建立综合内弹道两相流和火炮发射动力学的耦合仿真方法, 提高了内弹道两相流数值计算精度, 实现了对弹丸膛内运动规律的精确预测。

### 1 弹丸复杂受力及火炮后坐运动分析

#### 1.1 膛内弹丸受力分析

弹丸在膛内的受力极为复杂。弹丸在火炮膛内的运动, 是发射引发的弹-炮耦合运动的重要组成部分, 确切地说是其在身管约束条件下发生的 6 个自由度运动, 主要包括重力、火药气体压力、弹前空

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-08-12

作者简介: 包光辉(1995—), 男, 内蒙古人, 蒙古族, 硕士, 从事内弹道两相流动力学与发射动力学研究。E-mail: baoguanghui003@163.com。

气激波阻力、弹带与炮膛的接触力、定心部与炮膛的接触力。弹丸受到的各个作用力以矩阵形式在火炮系  $O_3x'_0y'_0z'_0$  [6-7] 中表述。

弹丸所受到的合外力在火炮系  $O_3x'_0y'_0z'_0$  下的矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} F_{O_3x'_0} \\ F_{O_3y'_0} \\ F_{O_3z'_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_q g \sin \theta + P_b S_b - F_R - \\ K_b \mu_r r_{O_3O} \cos \alpha - \mu_1 F^s \cos \alpha \\ -m_q g \cos \theta - K_b (y'_{O_3O} - z'_{O_3O} \mu_r \sin \alpha) + \\ F^s (-y'_{O_3O_2} + \mu_1 z'_{O_3O_2} \sin \alpha) / r_{O_3O_2} \\ m_q g \psi_2^l \sin \theta - K_b (z'_{O_3O} + y'_{O_3O} \mu_r \sin \alpha) + \\ F^s (-z'_{O_3O_2} - \mu_1 y'_{O_3O_2} \sin \alpha) / r_{O_3O_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $F_R$  为示弹前空气激波阻力、弹带挤进阻力和导转阻力三者之和，表达式为：

$$F_R = p_a S_b + \sigma_n A_n (\mu_n \cos \phi + \sin \phi) + 2C\dot{\gamma}(\mu_r \cos \alpha + \sin \alpha) / (\cos \alpha - \mu_r \sin \alpha) d_0 \quad (2)$$

式中： $m_q$  为弹丸质量； $p_b$  为弹底压力； $S_b$  为弹底面积； $F^s$  为弹丸定心部与炮膛接触力。

## 1.2 火炮身管后坐运动分析

火炮后坐运动是在炮膛合力和反后坐装置提供合力联合作用下进行的。要想反映火炮后坐运动对火炮射击和对内弹道计算的影响，需要对炮膛合力和后坐阻力进行精确求解。发射时后坐部分所受的主动力为炮膛合力  $F_{pt}$  和后坐部分重力  $m_h g$ 。还有弹丸作用于膛线导转侧的力矩  $M_{hz}$ ，与弹丸旋转方向相反。约束反力包括制退机力  $F_{\phi h}$ ，复进机力  $F_f$  和密封装置摩擦力  $F$ ，以及摇架导轨上的总摩擦力  $F_T$  [8]。

假设后坐部分为一个集中质量，作用于火炮后坐部分的主动力、约束力和惯性力组成一个平衡力系，沿炮膛轴线方向的力平衡方程为：

$$m_h (\partial^2 x' / \partial t^2) = F_{pt} - F_{\phi h} - F_f - F - F_T + m_h g \sin \phi \quad (3)$$

式中： $x'$  为后坐位移； $\phi$  为火炮射角。

目前，炮膛合力  $F_{pt}$  的计算大多采用经典内弹道理论。该理论得到的膛底与弹底压力是一个比例关系，而内弹道两相流理论能够计算出更为符合膛内真实过程的膛底与弹底压力；因此，应用内弹道两相流理论可以得到更精准的炮膛合力  $F_{pt}$  值。

## 2 内弹道两相流与弹丸发射理论

以某型 155 mm 口径火炮为研究对象，装药结构主要由主装药、金属药筒和中心点火管组成。

### 2.1 基本假设

- 1) 火药颗粒群组成的固相连续地分布在气相中，且考虑气固两相间的相互作用；
- 2) 膛内流动为一维两相流动，考虑膛内截面的变化，忽略烧蚀和摩擦引起的身管微小变形；
- 3) 火药颗粒服从几何燃烧定律和指数燃烧定律；
- 4) 火药燃烧产物的组分保持不变，火药气体的热物性参数均为常数；
- 5) 点火管内只有燃气流动，固体颗粒不流动；
- 6) 火药颗粒着火准则为火药表面温度，当表面温度达到着火温度时，火药即被点燃；
- 7) 气相的状态变化服从诺贝尔-阿贝尔状态方程；
- 8) 固体火药颗粒不可压缩，即火药的物质密度  $\rho_p$  为常数。

### 2.2 内弹道两相流数学模型

根据主装药的流体力学模型和基本假设，建立主装药两相流动力学基本方程。分别为气相质量、动量和能量守恒方程，固相质量和动量守恒方程：

$$\left. \begin{aligned} \partial A \phi \rho / \partial t + \partial A \phi \rho_g u_g / \partial x &= A \dot{m}_c - A \dot{m}_{ign} \\ \partial A \phi \rho_g u_g / \partial t + \partial A \phi \rho_g u_g^2 / \partial x + A \phi (\partial P / \partial x) &= \\ -AD + A \dot{m}_c u_p \\ \partial A \phi \rho_g (e_g + u_g^2 / 2) / \partial t + \partial A \phi \rho_g u_g (e_g + u_g^2 / 2) / \partial x + \\ \partial A \phi u_g P / \partial x + P (\partial A \phi / \partial t) &= A \dot{m}_c H_c - \\ A \dot{m}_{ign} H_{ign} - AD u_p - A Q_s \\ \partial A (1 - \phi) \rho / \partial t + \partial A (1 - \phi) \rho_g u_g / \partial x &= -A \dot{m}_c \\ \partial A (1 - \phi) \rho_p u_p / \partial t + \partial A (1 - \phi) \rho_p u_p^2 / \partial x + \\ A (1 - \phi) \partial P / \partial x &= AD - A \dot{m}_c u_p - A (1 - \phi) \partial R_p / \partial x \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： $A$  为炮膛截面积； $\rho_g$  和  $\rho_p$  分别为气相和固相密度； $u_g$  和  $u_p$  分别为气相和固相速度； $\dot{m}_c$  为在单位总体积上的主装药燃气质量生成速率； $\dot{m}_{ign}$  为在药室内一个格子总体积上的气体源质量流量。在求解上述主装药两相流动力学数学方程组时，需要用到辅助方程，可参见文献[9]。

### 2.3 弹底控制体中的弹丸运动方程

经典内弹道理论中弹丸运动方程为：

$$p_b S_b = \varphi_1 (du_q / dt) \quad (5)$$

式中： $p_b$  为弹底压力； $S_b$  为弹底面积； $u_q$  为弹丸运动速度； $\varphi_1$  为阻力系数。

以往的内弹道两相流理论中对弹底控制体中弹丸运动方程为:

$$m_q (du_q/dt) = p_b S_b - F_R \quad (6)$$

式中:  $p_b$  为弹底压力;  $S_b$  为弹底面积;  $u_q$  为弹丸运动速度;  $m_q$  为弹丸质量;  $F_R$  为弹丸运动所受阻力。

经典内弹道理论中以系数  $\varphi_1$  的形式对弹丸运动所受阻力作出简化, 方便了计算过程, 但针对不同火炮需要选取不同的阻力系数, 且不考虑弹带的挤进过程, 存在着较大误差。内弹道两相流理论对弹丸运动阻力  $F_R$  的计算更为准确, 通常考虑了弹带挤进阻力、导转阻力和弹前空气激波阻力, 但忽略了火炮身管后坐运动。为了准确描述膛内弹丸运动过程, 使内弹道过程的求解更加准确, 对内弹道两相流弹底控制体部分中的弹丸膛内运动方程作出修正, 相比于以往的内弹道两相流计算, 增加了对火炮身管的后坐运动的考虑, 弹丸运动阻力中增加了弹丸定心部与炮膛的碰撞力, 从而建立更为精确的弹丸运动方程。弹丸在火炮系  $O_3x'_0y'_0z'_0$  中膛内  $x$  向的运动方程为:

$$a_q = F_{O_3x'_0} / m_q - a_{xh} \quad (7)$$

式中:  $a_q$  为弹丸  $x$  方向加速度;  $m_q$  为弹丸质量;  $F_{O_3x'_0}$  为膛内弹丸在火炮系  $O_3x'_0y'_0z'_0$  中  $x$  方向所受合力, 在 1.1 节中已给出表达式;  $a_{xh}$  为火炮后坐过程产生的加速度,  $a_{xh} = \partial^2 x' / \partial t^2$ ,  $x'$  为后坐位移。

### 2.4 弹丸发射动力学模型

非对称弹丸在渐速膛线身管内一般运动方程为:

$$\left. \begin{aligned} a_q &= F_{O_3x'_0} / m_q - \partial^2 x' / \partial t^2 \\ \ddot{y}'_{oc} &= F_{O_3y'_0} / m_q - \ddot{y}'_o \\ \ddot{z}'_{oc} &= F_{O_3z'_0} / m_q - \ddot{z}'_o \\ \ddot{\delta}'_1 &= -(C/A)\dot{\gamma}(\dot{\psi}'_2 + \dot{\delta}'_2) + (1-C/A)(\dot{\gamma}^2\beta_{D_\gamma} + \dot{\gamma}\beta_{D_\gamma}) - \\ &\quad (C\dot{\gamma}/A)\delta'_2 + a_{py}'_{oc} - (Kh^2/12A)(\delta'_1 - \delta'_2\mu\sin\alpha) + \\ &\quad (K(l_R + r_b\mu)/A)y'_{oo} - (Kl_R\mu\sin\alpha/A)z'_{oo} + \\ &\quad (l_1/A)F_y^{sf} - \ddot{\psi}'_1 \\ \ddot{\delta}'_2 &= (C/A)\dot{\gamma}(\dot{\psi}'_1 + \dot{\delta}'_1) + (1-C/A)(\dot{\gamma}^2\beta_{D_\gamma} - \dot{\gamma}\beta_{D_\gamma}) - \\ &\quad (C\dot{\gamma}/A)\delta'_1 + a_{pz}'_{oc} - (Kh^2/12A)(\delta'_2 + \delta'_1\mu\sin\alpha) + \\ &\quad (K(l_R + r_b\mu)/A)z'_{oo} - (Kl_R\mu\sin\alpha/A)y'_{oo} + \\ &\quad (l_1/A)F_y^{sf} - \ddot{\psi}'_2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $a_q$  为弹丸质心加速度;  $y'_{oc}$  和  $z'_{oc}$  为弹丸质心

铅垂和侧向位移;  $\delta'_1$  和  $\delta'_2$  为弹丸轴线与身管轴线切线夹角在铅垂面和侧平面上的分量。

## 3 耦合仿真算法

### 3.1 内弹道两相流算法

Mac Cormack 差分格式<sup>[10]</sup>是一种求解可压缩流体流动问题的二步 2 阶的非中心差分格式。此格式的特点为在两步中交替地使用向前和向后差分作为预估和校正计算。格式为:

$$U_j^{\overline{n+1}} = U_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} [\xi \Delta F_j^n + (1-\xi) \nabla F_j^n] + \Delta t H_j^n; \quad (9)$$

$$U_j^{n+1} = \frac{1}{2} \left\{ U_j^n + U_j^{\overline{n+1}} - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ \frac{(1-\xi)\Delta F_j^{\overline{n+1}}}{\xi \nabla F_j^{\overline{n+1}}} \right] + \Delta t H_j^{\overline{n+1}} \right\} \quad (10)$$

式中:  $\Delta F_j^n = F_{j+1}^n - F_j^n$ ,  $\nabla F_j^n = F_j^n - F_{j-1}^n$ ;  $\xi$  作为选择开关,  $\xi = 1$  时预估计算向前差分, 校正计算向后差分,  $\xi = 0$  时预估计算向后差分, 校正计算向前差分。

根据该差分格式, 分别将主装药及中心点火管的两相流动力学方程组离散化, 将方程组化为  $\partial U / \partial t + \partial F / \partial x = H$  的形式, 进行计算。

### 3.2 耦合仿真思路

内弹道两相流动力学与发射动力学耦合仿真的算法设计思路如下。

1) 确定连接内弹道两相流仿真和弹丸发射动力学仿真的接口参数。

通过对建立的内弹道两相流动力学数学模型、弹丸发射动力学方程、弹丸的受力分析以及火炮后坐运动分析得出, 联系弹丸运动过程和内弹道过程的参量有内弹道两相流动力学中的膛底压力  $p_t$ 、弹底压力  $p_b$ 、弹丸加速度  $a_q$  和发射动力学中弹丸运动过程受到的各种阻力  $F_R$ , 以及火炮后坐运动产生的加速度  $a_{xh}$ 。后坐加速度则可以根据炮膛合力与后坐阻力计算得到, 而炮膛合力值  $F_{pt}$  可以根据  $p_t$ 、 $p_b$  来计算。

2) 将膛内时期的内弹道两相流动力学计算与发射动力学进行耦合计算。

① 选取时间步长: 内弹道两相流中的时间步长选取满足 Mac Cormack 差分格式的稳定性条件, 由于发射动力学采用的是定时间步长进行计算; 因此, 选取两者间的小值, 保证稳定计算。

② 在内弹道两相流中, 对弹丸的运动边界采用弹底控制体的方法, 在计算弹丸运动加速度  $a_q$

时，调用发射动力学中弹丸受力分析的部分，诸如弹丸挤入弹带时的挤进阻力和导转侧力，弹丸定心部与炮膛的碰撞力等运动阻力，同时调用火炮后坐运动中产生的后坐加速度  $a_{sh}$ 。综上所述：得到一个综合考虑弹炮相互作用的弹丸加速度  $a_q$ ，随后，在弹底边界上更新弹底压力  $p_b$  等参量，实现内弹道两相流过程的精确计算。

③ 将通过内弹道两相流计算得到的膛压分布及膛底压力  $p_t$ 、弹底压力  $p_b$ 、弹丸加速度  $a_q$  代入到弹丸发射动力学方程中，计算弹丸在膛内的运动规律；将膛底压力  $p_t$ 、弹底压力  $p_b$  值代入到火炮后坐过程中炮膛合力  $F_{pt}$  中，得到准确的膛内时期后坐运动过程。

### 3) 弹丸出炮口后的后效期计算。

弹丸出炮口后，内弹道两相流过程停止计算，将弹丸出炮口时刻的各参量值，作为后效期的初值；后效期采用弹后压力变化的经验公式，将此期间的压力变化代入到弹丸发射动力学方程中，计算后效期的弹丸运动规律；由于在后效期过程中，膛内压力迅速下降，此时的炮膛合力  $F_{pt}$  的下降趋势近似为指数规律，弹丸出炮口时刻后坐速度达到最大值，随着炮膛合力  $F_{pt}$  的迅速减小，后坐部分在运动到最大位移处之后，主要受复进机力的作用，开始进行复进运动。

图 1 为内弹道两相流动力学与发射动力学耦合仿真算法流程。

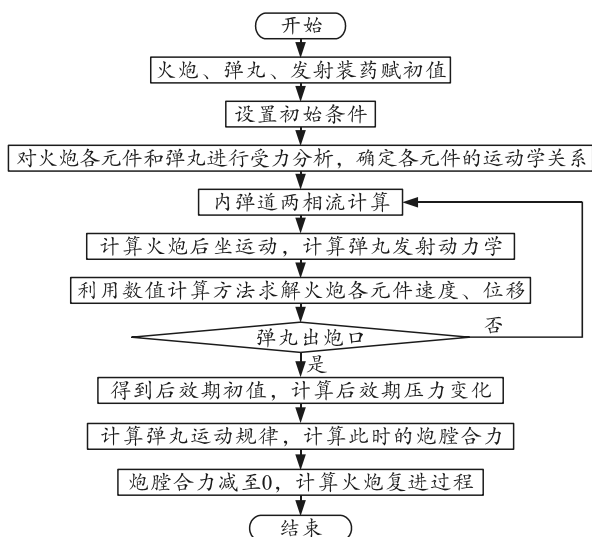


图 1 耦合仿真流程

## 4 计算结果及讨论

### 4.1 内弹道两相流计算结果

将经典内弹道、不考虑火炮后坐运动的内弹道

两相流及耦合仿真方法得到的内弹道膛压和初速值与实验所得结果进行比较，图 2 为经典内弹道、不考虑火炮运动的两相流内弹道和考虑炮身后坐的两相流内弹道膛底压力与实验值的对比图。表 1 为内弹道参量膛压和初速与实验值的对比关系。表 2 为不同方法下仿真值与实验值的误差。

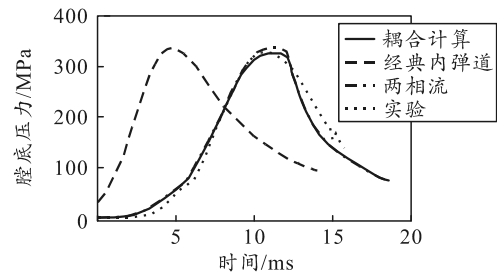


图 2 膛底压力变化

由图可以看出：由于经典内弹道理论中，认为弹丸瞬间挤进弹带，忽略弹丸的挤进过程，在图像中表现为整个膛底压力变化过程要先于内弹道两相流仿真值和实验值，而内弹道两相流及耦合算法中考虑弹丸的挤进过程。应用内弹道两相流理论的耦合仿真方法所得结果能更好地与实验曲线吻合。

由表 1、表 2 的膛压及初速仿真值和实验值的对比可以看出，考虑火炮身管后坐运动及弹丸复杂受力过程的内弹道两相流与发射动力学耦合仿真得到的膛底压力和初速精度更高。

表 1 内弹道数值仿真值和实验值

仿真与实验结果	实验值	经典内弹道	两相流仿真值	耦合算法仿真值
最大膛压 $p$ /MPa	325.600	337.302	338.162	327.243
炮口初速 $v$ /(m/s)	931.100	929.086	937.831	929.461

表 2 与实验值相对误差 %

相对误差	经典内弹道	两相流仿真值	耦合算法仿真值
最大膛压	3.594	3.858	0.505
炮口初速	0.216	0.723	0.176

当内弹道诸元参数选取值相同时，总体上 3 种计算都能较好地与实验值吻合，其中耦合计算仿真值最为准确。经典内弹道和不考虑后坐运动的内弹道两相流最大膛底压力仿真值要比实验值高 13 MPa 左右。不考虑火炮后坐运动的内弹道两相流炮口初速仿真值要比实验值高 7 m/s 左右。

图 3 给出了耦合方法仿真得到的不同时刻膛内压力分布曲线。从图中可以看出：在内弹道初期，膛内存在着压力梯度，如 2、4 ms 曲线所示，由于膛底部分装药首先点火，膛内压力波从膛底向弹底传播，在弹丸加速运动之前，弹底压力高于膛底压力，压力波向膛底反射。当弹丸加速运动后，火药

颗粒的运动一般要滞后于气相速度，这是因为颗粒的运动只能依靠气流的带动，在弹底附近火药颗粒较少，造成弹底处的压力要低于膛底压力，膛底压力开始提升，开始高于弹底压力，如 8、10、12 ms 曲线所示。随着火药逐渐燃烧完毕，膛内压力分布也逐渐趋向拉格朗日假设分布，如 16、18 ms 曲线所示。

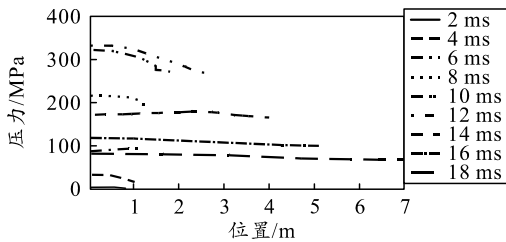


图 3 不同时刻压力分布

### 4.2 弹丸膛内运动规律及火炮后坐运动结果

#### 4.2.1 火炮后坐仿真结果

火炮的射击过程中是一个动态系统。内弹道中膛压值的准确计算将决定炮膛合力  $F_{pt}$  的准确性，因而影响火炮身管的后坐过程。图 4、图 5 分别为基于经典内弹道的火炮后坐运动仿真和耦合方法得到的炮膛合力和后坐速度的变化规律。

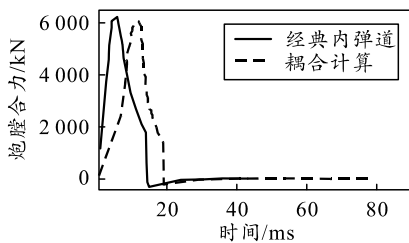


图 4 炮膛合力变化

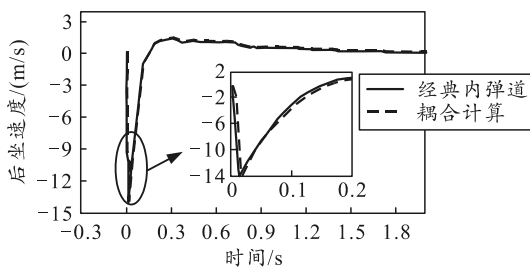


图 5 后坐速度变化

经典内弹道中认为弹丸瞬间完成挤进，而两相流理论中考虑了点传火过程和弹丸挤进过程。可以看出，耦合方法得到的后坐运动要比基于经典内弹道延后 4 ms 左右。由图 4 可以看出，基于经典内弹

道计算的炮膛合力略大于耦合方法得到的仿真值。

由图 5 可以看出：耦合方法仿真得到的后坐速度在弹丸出炮口 18.660 ms 时，达到最大值 13.699 m/s<sup>2</sup>。由 4.1 节得到的内弹道参量变化可以看出，火炮后坐运动会对内弹道过程计算产生一定影响。

#### 4.2.2 弹丸运动仿真结果

在 45°高低射角工况下，在保证其他条件一定的情况下，对基于经典内弹道理论的弹丸膛内发射动力学仿真结果和基于两相流内弹道理论的弹丸膛内发射动力学仿真结果进行对比。图 6、图 7 分别为弹丸膛内铅垂摆动角和侧向摆动角速度变化。

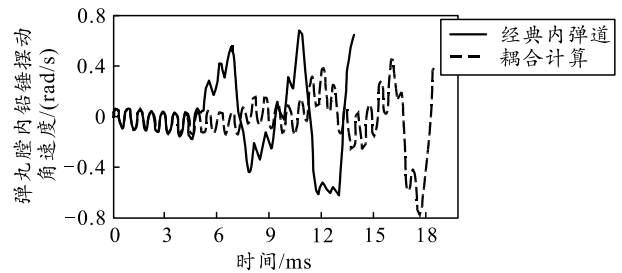


图 6 弹丸膛内铅垂摆动角速度变化

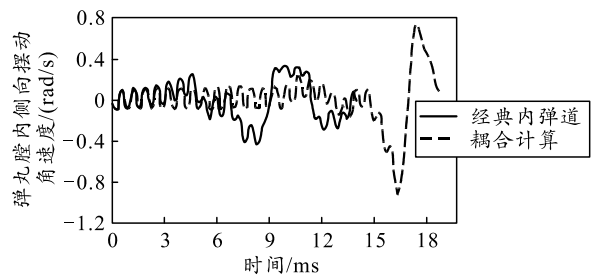


图 7 弹丸膛内侧向摆动角速度变化

由图 6 和图 7 可以看出：弹丸膛内铅垂和侧向摆动角速度的振幅要大于基于经典内弹道理论的仿真值，即在基于两相流内弹道理论的弹丸发射动力学仿真中，弹丸在膛内运动过程中角加速度的浮动较大，使得弹丸的运动处于不稳定状态。这是由于两相流内弹道理论中，对压力波动现象的描述，更贴近于真实的膛内流动过程。基于经典内弹道的弹丸运动仿真不能真实反映膛内复杂的流动现象，且忽略弹带的挤进过程，将会对弹丸运动规律的计算产生影响。

以弹丸出炮口时刻铅垂和侧向的角位移、角速度、速度表征弹丸起始扰动。应用文献[11]中建立的起始扰动评价指标  $f$ ，计算结果如表 3 所示。

表 3 45°射角弹丸起始扰动值

仿真方法	$\theta_y \times 10^{-3}/\text{rad}$	$\theta_z \times 10^{-3}/\text{rad}$	$\omega_y/(\text{rad/s})$	$\omega_z/(\text{rad/s})$	$v_y \times 10^{-1}/(\text{m/s})$	$v_z/(\text{m/s})$	$f$
基于经典内弹道	-0.154 8	-0.247 3	-0.017 3	0.650 8	0.149 8	0.009 7	1.000 0
耦合仿真	0.148 0	-0.428 9	0.097 6	0.384 5	0.041 8	0.074 2	2.308 6

由表可知: 耦合仿真方法得到的弹丸起始扰动要大于基于经典内弹道的发射动力学仿真值, 说明采用不同的内弹道仿真方法, 将会影响到弹丸运动变化规律和起始扰动的计算, 进而影响火炮的射击精度。

## 5 结束语

笔者建立了内弹道两相流动力学与发射动力学耦合仿真的方法。主要结论如下:

1) 分别对经典内弹道、不考虑火炮后坐运动的内弹道两相流及内弹道两相流与发射动力学耦合计算方法进行数值仿真。与膛压、初速实验结果对比得到: 耦合方法所得值与实验值吻合良好, 实验误差均小于 1%。

2) 将内弹道两相流与发射动力学耦合计算方法与常用的基于经典内弹道的发射动力学仿真所得膛内弹丸运动姿态仿真值进行对比分析可知, 耦合仿真方法计算得到的膛内弹丸运动及起始扰动更为准确。

## 参考文献:

[1] 杨超. 某型坦克炮混合装药内弹道数值计算与安全性

\*\*\*\*\*

(上接第 75 页)

## 参考文献:

- [1] 邹本贵, 孙学锋, 曹延杰, 等. 舰载导弹电磁线圈垂直发射方案设计[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 45-48.
- [2] 于存贵, 王惠方, 任杰. 火箭导弹发射技术进展[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 123-145.
- [3] 邹本贵, 曹延杰. 美军电磁线圈发射技术发展综述[J]. 微电机, 2011, 44(1): 80-89.
- [4] 向红军. 电磁感应线圈炮原理与技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015: 24-39.
- [5] 安进, 张胜利, 吴长春. 导弹电磁发射技术综述[J]. 飞航导弹, 2012(5): 27-29.
- [6] ZHAO KY, XIANG HJ, LI ZY, et al. Research on Interstage Magnetic Couple Effect of LCICL[C]//2014 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology. La Jolla, CA, USA: IEEE, 2014: 1-4.

分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

- [2] KUO K K, KOO J H, DAVIS T R, et al. Transient Combustion in Mobile Gas-Permeable Propellants[J]. Acta Astronautica, 1976, 3(7-8): 573-591.
- [3] 王升晨, 周彦煌. 中心点火装药结构两相流内弹道模型及计算[J]. 兵工学报, 1987(4): 10-19.
- [4] MARTING T S, ROBERT S B. Projectile Motion in a Flexible Gun Tube[R]. AD-A140737, 1984.
- [5] 戎保, 芮筱亭, 王国平, 等. 多系统动力学研究进展[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 178-187.
- [6] 芮筱亭, 刘怡昕, 于海龙. 坦克自行火炮发射动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 28-29.
- [7] 芮筱亭, 杨启仁. 弹丸发射过程理论[M]. 南京: 东南大学出版社, 1992: 5-8.
- [8] 张培林, 王成, 张晓东, 等. 火炮后坐复进运动仿真技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 56-64.
- [9] 芮筱亭, 贡来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 31-42.
- [10] 白桥栋. CE/SE 方法在内弹道两相流中应用的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [11] 李强. 影响弹丸起始扰动的某火炮结构参数分析与优化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [7] 向红军, 赵科义, 李治源, 等. 多级电磁感应线圈炮的级间耦合特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1084-1089.
- [8] RONALD J KAYE, EUGENE C CNARE, COWAN M, et al. Design and Performance of Sandia's contactless coilgun for 50mm projectiles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 19(1): 680-685.
- [9] CRAVEY W R, DEVLIN G L, LOREE E L, et al. Design and Testing of A 25-Stage Electromagnetic Coil Gun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 1323-1328.
- [10] 向红军, 李治源, 袁建生. 考虑电枢速度的多级感应线圈炮最佳触发位置[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(1): 7-11.
- [11] ZHANG Y D, RUAN J J, HU Y C, et al. Driving Circuit Research of a Coil Launcher[C]//2012 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Beijing, China: IEEE, 2012: 1-5.
- [12] 王小召, 于存贵, 沙赵明. 一种电磁线圈发射器磁场构型优化方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 1-5.