DOI: 10.11883/bzycj-2017-0160

文章编号: 1001-1455(2018)06-1404-08

# 多目标优化算法在弹头侵彻明胶运动模拟中的应用*

莫根林[1],金永喜[2],李忠新[3],吴志林[3]

(1. 江苏大学先进制造研究院,江苏 镇江 212013;
2. 中国兵器工业第 208 研究所瞬态冲击技术重点实验室,北京 102202;
3. 南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要**: 为使弹道模型更好地模拟弹头侵彻明胶的运动规律,从而有助于揭示弹头对人体组织的致伤机理,以弹头水平位移、竖直位移、侧向位移、俯仰角以及偏航角理论值的均方根误差作为目标函数组,以弹头的待定初始运动参数和弹道模型的待定力学系数作为优化变量,通过 Gamultiobj 多目标遗传算法获得了的优化变量的 Pareto 解集,并通过 TOPSIS 综合分析方法获得了 Pareto 解集的最优解。研究结果表明该方法能够快速获得可信性较强的最优解,使最优解能较好地模拟 7.62 mm 步枪弹侵彻明胶的运动过程。

**关键词**: 多目标优化;步枪弹;明胶;侵彻

**中图分类号**: O385 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

为揭示弹头侵彻人体组织的致伤机理,通常采用弹道明胶作为人体组织的替代物[1-2]。程可[3]、S. S. Liu 等[4]和 Y. Wen 等[5]、温垚珂等[6]建立了步枪弹侵彻明胶的数值模拟模型;D. Datoc[7]、Y. Wang 等[8]、G. H. Yoon 等[9]建立了手枪弹侵彻明胶的数值模拟模型。刘坤等[10]、Liu 等[11]基于弹头所受合力和合力矩的经验假设建立了弹头侵彻明胶的平面运动模型;莫根林等[12]基于弹头表面微元的受力假设建立了弹头的六自由弹道模型。研究表明这些模型均能较好地模拟对应投射物的运动规律,但模型中的力学系数和弹头的一些初始运动参数一般不是由实验直接得到的[1],而是由试算的方法进行推测的。由于待定参数较多,为获得较好的弹头运动模拟结果,试算过程会消耗大量的时间。

待定参数的试算过程可看作是一个多目标问题的求解过程。传统求解此类问题的方法一般是利用线性加权法、约束法等将其转化为单目标问题,但其存在探索未知空间的能力不强、容易陷入局部极值点等问题,不能很好地处理复杂、非线性问题[13]。而多目标进化算法如多目标遗传算法(MOGA)、Pareto 存档进化策略(PAES)、非劣分类遗传算法(NSGA)以及基于遗传算法的多目标优化算法(Gamultiobj)等,具有全局性和多向性的优点,可以很好地解决此类问题[14]。为此,本文中以待定参数作为优化变量建立弹头侵彻明胶运动模拟的多目标优化模型,并运用 Gamultiobj 算法和决策策略对优化变量进行求解分析。

## 1 弹道模型

建立全局坐标系 $O'$-$x'y'z'$,其中 $x'$ 轴平行于明胶块底面,$y'$ 轴竖直向上,$z'$ 轴指向明胶块内部,如图 1 所示。在弹头上建立连体坐标系 $O$-$xyz$,其中 $z$ 轴和弹轴重合,$O$ 点位于弹头的质心位置。采用欧拉角描述弹头的空间姿态,即全局坐标系依次绕 $z$ 轴旋转 $\psi$(进动角)得到辅助坐标系 $O'$-$x''y''z''$;再绕 $x''$ 轴旋转 $\theta$(章动角)得到辅助坐标系 $O'$-$\xi\eta\zeta$,最后绕 $\zeta$ 轴旋转 $\varphi$(自转角)即可得到坐标系 $O$-$xyz$,如图 2 所示。

根据文献[10],弹头侵彻明胶过程中所受到的阻力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}$、升力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}$ 以及翻滚力矩 $\boldsymbol{M}$ 的大小可表示为:

* **收稿日期**: 2017-05-05; **修回日期**: 2017-10-27
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(11372137);国防科技重点实验室基金项目(162606013)
**第一作者**: 莫根林(1987— ),男,博士,助理研究员; **通信作者**: 吴志林,wuruinan−1994@njust.edu.cn。

$$\begin{cases} F_{\mathrm{D}} = \dfrac{1}{2}\rho v^2 A_0 C_{\mathrm{D}0}(1 + C_1 \sin^2\delta) \\ F_{\mathrm{L}} = \dfrac{1}{2}\rho v^2 A_0 C_{\mathrm{L}0} \cos^2\delta \sin 2\delta \\ M = \dfrac{1}{2}\rho v^2 A_0 l C_{\mathrm{M}0} \sin 2\delta \end{cases} \tag{1}$$

式中：$\rho$ 为明胶密度、$v$ 为弹头速度、$A_0$ 为弹头的横截面积；$\delta$ 为弹头速度方向和弹轴方向的夹角(攻角)；$C_{\mathrm{D}0}$ 和 $C_1$ 为阻力系数，$C_{\mathrm{L}0}$ 为升力系数，$C_{\mathrm{M}0}$ 为弹头的转矩系数。阻力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}$ 方向与弹头速度方向相反，升力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}$ 方向垂直于速度方向且与 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}$ 和弹轴共面，翻滚力矩 $\boldsymbol{M}$ 垂直于 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{D}}$ 和 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}$。

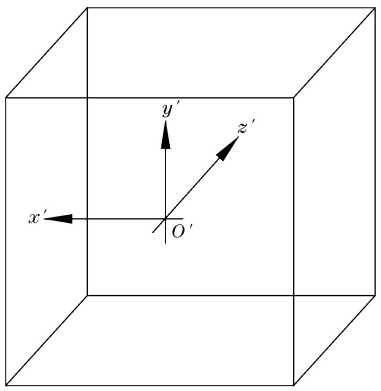



图 1　弹道模型全局坐标系

Fig. 1　Global coordinate system of ballistic model

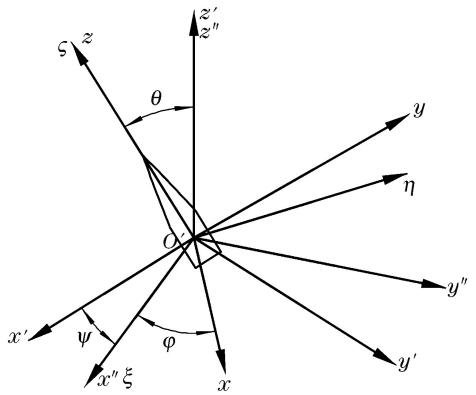



图 2　欧拉角的定义

Fig. 2　Euler angles

令弹头速度方向余弦为$(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3)$，则弹头的水平速度分量 $v_z$、竖直速度分量 $v_y$ 和侧向速度分量 $v_x$ 可以表示为：

$$v_z = v\lambda_3, \qquad v_y = v\lambda_2, \qquad v_x = v\lambda_1 \tag{2}$$

令弹轴在全局坐标系中的方向余弦为$(\lambda_4,\lambda_5,\lambda_6)$，可由欧拉角表示为[15]：

$$\lambda_4 = \sin\theta\sin\psi, \qquad \lambda_5 = \sin\theta\cos\psi, \qquad \lambda_6 = \cos\theta \tag{3}$$

令升力 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{L}}$ 的方向余弦为$(\lambda_7,\lambda_8,\lambda_9)$，翻滚力矩 $\boldsymbol{M}$ 的方向余弦为$(\lambda_{10},\lambda_{11},\lambda_{12})$，由定义可知，它们可由弹头速度的方向余弦和弹轴的方向余弦表示：

$$\begin{cases} \mu_1 = \lambda_4 - \lambda_1\lambda_4, \qquad \mu_2 = \lambda_5 - \lambda_2\lambda_5, \qquad \mu_3 = \lambda_6 - \lambda_3\lambda_6 \\ \Delta = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2} \\ \lambda_7 = \mu_1/\Delta, \qquad \lambda_8 = \mu_2/\Delta, \qquad \lambda_9 = \mu_3/\Delta \end{cases} \tag{4}$$

$$\lambda_{10} = \lambda_2\lambda_6 - \lambda_3\lambda_5, \qquad \lambda_{11} = \lambda_3\lambda_4 - \lambda_1\lambda_6, \qquad \lambda_{12} = \lambda_1\lambda_5 - \lambda_2\lambda_4 \tag{5}$$

在连体坐标系中，令 $\boldsymbol{M}$ 的方向余弦为$(\lambda_{13},\lambda_{14},\lambda_{15})$，它与$(\lambda_{10},\lambda_{11},\lambda_{12})$的关系可表示为[15]：

$$\begin{bmatrix} \lambda_{13} \\ \lambda_{14} \\ \lambda_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\varphi - \sin\psi\cos\theta\sin\varphi & -\cos\psi\sin\varphi - \sin\psi\cos\theta\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta \\ \sin\psi\cos\varphi + \cos\psi\cos\theta\sin\varphi & -\sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\cos\theta\cos\varphi & -\cos\psi\sin\theta \\ \sin\theta\sin\varphi & \sin\theta\cos\varphi & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{10} \\ \lambda_{11} \\ \lambda_{12} \end{bmatrix} \tag{6}$$

因此，$\boldsymbol{M}$ 在连体坐标系中的分量 $M_x$、$M_y$ 和 $M_z$ 可以表示为：

$$M_x = M\lambda_{13}, \qquad M_y = M\lambda_{14}, \qquad M_z = M\lambda_{15} \tag{7}$$

根据推广的欧拉动力学方程，弹头的弹道方程可表示为：

$$\begin{cases} m\ddot{x}'_O = -F_{\mathrm{D}}\lambda_1 + F_{\mathrm{L}}\lambda_{10}, \qquad m\ddot{y}'_O = -F_{\mathrm{D}}\lambda_2 + F_{\mathrm{L}}\lambda_{11}, \qquad m\ddot{z}'_O = -F_{\mathrm{D}}\lambda_3 + F_{\mathrm{L}}\lambda_{12} \\ \ddot{\varphi} = k_3 - k_2\cos\varphi\cot\theta - k_1\cot\theta\sin\varphi - \cot(\theta)\varphi_t\theta_t + \csc(\theta)\psi_t \\ \ddot{\psi} = k_2\csc\theta\cos\varphi + k_1\csc\theta\sin\varphi + \csc(\theta)\varphi_t\theta_t - \cot(\theta)\psi_t\theta_t \\ \ddot{\theta} = k_1\cos\varphi - k_2\sin\varphi - \sin(\theta)\varphi_t\psi_t \end{cases} \tag{8}$$

式中：$m$ 为弹头的质量、$(x'_O, y'_O, z'_O)$为弹头质心在固定坐标系 $O'$-$x'y'z'$中的坐标，下标 $t$ 表示相应物理量对时间的导数，$k_1$、$k_2$和 $k_3$是弹头角速度的函数：

$$\begin{cases} k_1 = (M_x - (J_z - J_y)\omega_z\omega_y)/J_x \\ k_2 = (M_y - (J_x - J_z)\omega_x\omega_z)/J_y \\ k_3 = (M_z - (J_y - J_x)\omega_x\omega_y)/J_z \end{cases} \tag{9}$$

式中：$J_x$、$J_y$和 $J_z$分别为弹头绕 $x$、$y$、$z$ 轴的转动惯量；$\omega_x$、$\omega_y$和 $\omega_z$为弹头绕 $x$、$y$、$z$ 轴的角速度分量，它们与欧拉角角速率的关系为：

$$\begin{cases} \omega_x = \psi_t \sin\theta \sin\varphi + \theta_t \cos\varphi \\ \omega_y = \psi_t \sin\theta \cos\varphi - \theta_t \sin\varphi \\ \omega_z = \psi_t \cos\theta + \varphi_t \end{cases} \tag{10}$$

将式(1)～(7)和式(9)～(10)带入式(8)，并通过龙格-库塔法求解，可得弹头运动位移和空间欧拉角随时间的变化规律。

## 2 多目标优化模型与算法

### 2.1 目标函数组

令弹轴在 $x'z'$平面上的投影与 $z'$轴的夹角(偏航角)为 $\alpha'$、弹轴在 $y'z'$平面上投影与 $z'$轴的夹角(俯仰角)为 $\beta'$，它们可由弹头的欧拉角计算得到：

$$\tan\alpha' = \cos\psi\tan\theta, \qquad \tan\beta' = \sin\psi\tan\theta \tag{11}$$

令弹头质心坐标的实验值为$(x_O, y_O, z_O)$，弹头偏航角的实验值为 $\alpha$，俯仰角的实验值为 $\beta$。以弹头质心坐标、偏航角和俯仰角的理论值均方根误差表示弹道模型模拟弹头运动的好坏程度，则目标函数组可表示为：

$$\min\sigma = \begin{bmatrix} \left(\dfrac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(z_O(i) - z'_O(i))^2\right)^{\frac{1}{2}} \\ \left(\dfrac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(y_O(i) - y'_O(i))^2\right)^{\frac{1}{2}} \\ \left(\dfrac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_O(i) - x'_O(i))^2\right)^{\frac{1}{2}} \\ \left(\dfrac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\alpha(i) - \alpha'(i))^2\right)^{\frac{1}{2}} \\ \left(\dfrac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\beta(i) - \beta'(i))^2\right)^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中：$N$ 为实验数据的总量。

### 2.2 优化变量

由式(1)、(8)可知，求解弹头运动的理论值 $x'_O$、$y'_O$、$z'_O$、$\alpha'$和 $\beta'$需要输入的参数包括弹头的质量($m$)和转动惯量($J_x$、$J_y$、$J_z$)、模型的力学系数($C_{D0}$、$C_1$、$C_{L0}$和 $C_{M0}$)以及弹头的初始运动参数(初始水平坐标 $z_{O0}{}'$、竖直坐标 $y'_{O0}$和侧向坐标 $x'_{O0}$；初始水平速度 $v_{x0}$、竖直速度 $v_{y0}$和侧向速度 $v_{z0}$；初始自转角 $\varphi_0$、进动角 $\psi_0$和章动角 $\theta_0$；以及弹头的初始自转角速率 $\varphi_{t0}$、进动角速率 $\psi_{t0}$和章动角速率 $\theta_{t0}$)。

对于指定弹头，其质量和转动惯量为常数，因此尚需输入模型的力学系数和弹头的初始运动参数即可求解弹头的运动规律。由于固定坐标系的原点可以设置在弹头的初始位置，因此将 $z'_{O0}$、$y'_{O0}$和 $x'_{O0}$视作已知参数。又由于步枪弹弹头为轴对称体，可不考虑 $\varphi_0$对侵彻过程的影响。因此目标函数组(12)对应的优化变量为力学系数 $C_{D0}$、$C_1$、$C_{L0}$和 $C_{M0}$以及弹头的初始参数 $v_{x0}$、$v_{y0}$、$v_{z0}$、$\psi_0$、$\theta_0$、$\varphi_{t0}$、$\psi_{t0}$和 $\theta_{t0}$。

### 2.3 优化算法

Gamultiobj 算法的基本流程如图 3 所示。初始种群一般由随机产生的多个个体组成，每个个体由

待求解的优化变量组成；该算法首先判断初始种群是否满足用户设定条件，若满足则得到 Pareto 解集（每个解至少存在一个目标值优于集合中所有其他的解）；否则将使种群进化一代，并再一次对其判断，循环往复直至满足终止条件。

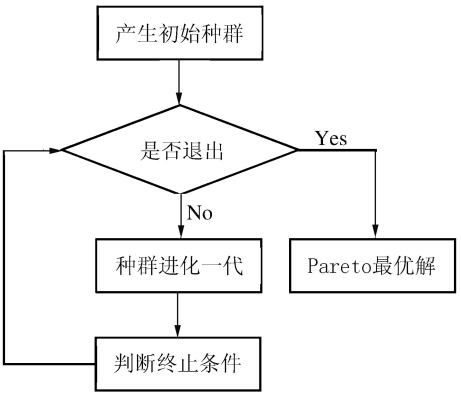



图 3 Gamultiobj 算法结构图

Fig. 3 Algorithm structure of Gamultiobj

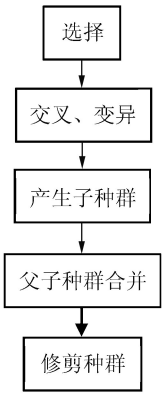



图 4 Gamultiobj 算法中的种群进化流程

Fig. 4 Population evolution in Gamultiobj algorithm

种群的进化流程如图 4 所示。首先，基于个体的序值和拥挤距离，采用锦标赛算法从上一种群（父种群）中选择一定数量的个体，其中序值小的个体先被选中；序值相同时，拥挤距离大的个体被选中。其次对选择得到的个体进行交叉、变异操作，以产生一个由新个体的集合即子种群。其次，将子种群和父种群合并成一个新的种群（此时新种群的大小是父种群的两倍）。最后，通过修剪算法从合并种群中选择与父种群大小相同的新种群，其中修剪算法是基于序值和拥挤距离进行的，序值高、拥挤距离小的个体被剔除[16]。

### 2.4 决策策略

为从 Pareto 解集中挑选出最优解，引入 TOPSIS 综合评价方法对解集中的解进行综合评价[17]。其决策过程可概括为：

（1）将多目标函数的解构成决策矩阵及规范化决策矩阵；

（2）确定近似理想解，一般由解集中同一目标的最小值构成；

（3）求各个解与理想解的近似度。一般首先求出各个解与理想解的距离，其次对多个目标赋予权重，最后将各个权重与各个距离的乘积之和作为近似度；

（4）根据近似度的大小，对解集中的解进行排序；

（5）选出最优的多目标函数解[18]。

## 3 算　例

### 3.1 实验

实验所用明胶块的制作方法为：将明胶颗粒和水按照 1∶9 的质量比例混合，并放入水浴炉中加热至 60 ℃。保温 2 h 后将澄清的凝胶液体注入 300 mm×300 mm×300 mm 的模具中。待模具中的明胶液体冷却至室温时，将其放入 4 ℃ 的恒温箱中保温 24 h，经测量其密度为 1 060 kg/m$^3$。实验时，以 81 式 7.62 mm 自动步枪瞄准明胶块中心位置射击 56 式 7.62 mm 普通弹，发射时枪口距离明胶块约 2.2 m。实验示意图如图 5 所示。镜面放置

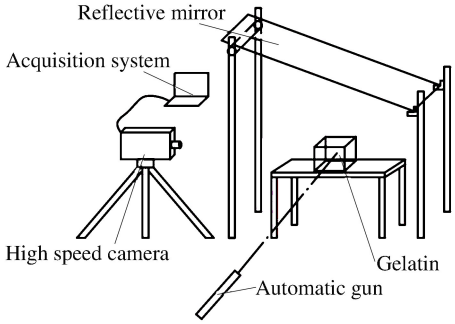



图 5 弹道实验示意图

Fig. 5 Ballistic test setup

在明胶块上方,明胶块侧面的高速摄像机同时拍摄弹头在明胶块中的运动和弹头在镜面中像的运动。高速摄像机的采样频率为 30 000 $s^{-1}$、曝光时间为 2 μs、图像分辨率为 640×480。实验所得弹头侵彻明胶的运动过程如图 6 所示。通过 Phantom Camera Control 软件的测量功能从拍摄的图片上测量弹头运动的实验值 $x_O$、$y_O$、$z_O$、$\alpha$ 和 $\beta$。

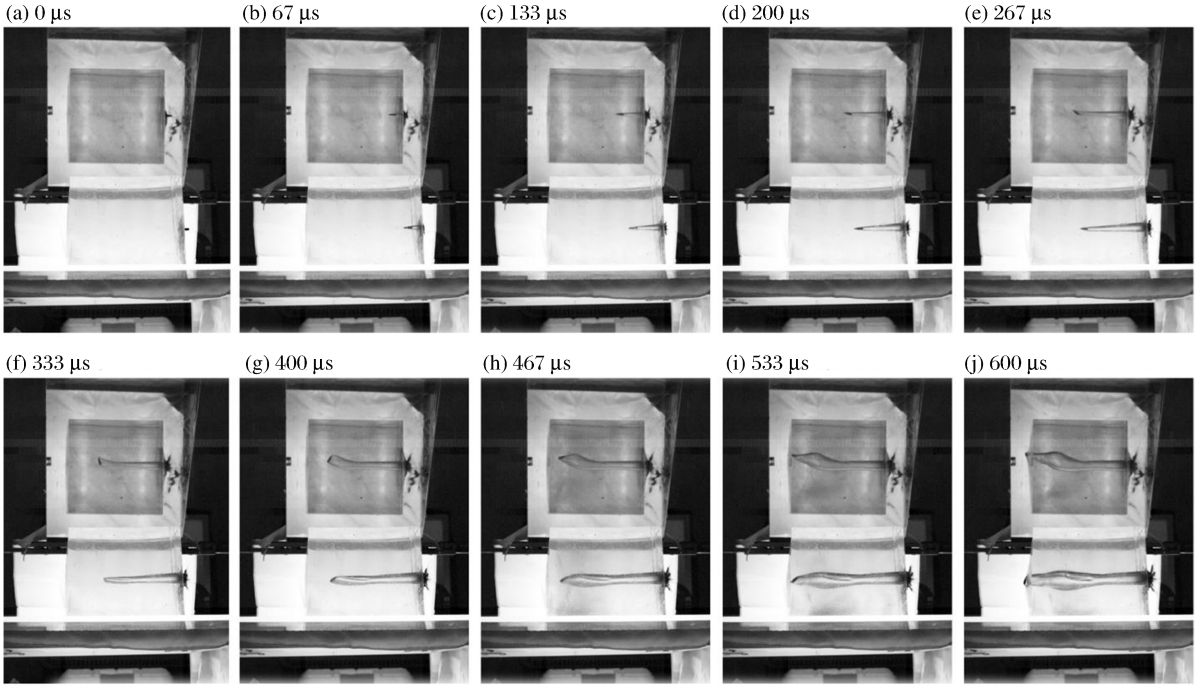



图 6 典型时刻弹头的空间位置和姿态

Fig. 6 Bullet's positions and orientations at critical moments

### 3.2 约束条件

对于弹道模型中的力学系数,在文献[10]的基础上通过试算确定它们的上、下边界,如表 1 所示。对于弹头的初始运动参数,通过对水平位移 $z_O$ 实验值的差分运算可得 $v_{z0}=680$ m/s,考虑差分误差的影响,限定 $v_{z0}$ 取值范围为 650～730 m/s;由于实验中通过瞄准使弹头的入射方向基本垂直于明胶块的入射面,因此假定弹头速度方向和水平方向的夹角小于 3.5°。再由 $v_x$、$v_y$ 和 $v_z$ 的关系可知,$v_x$ 和 $v_y$ 的取值范围均为－30～30 m/s;由图 6 可知弹头的初始章动角 $\theta_0$ 较小,考虑误差的影响,设定其取值范围为－5～5°;考虑到弹头轴线方向可能为空间的任意取值,设定弹头进动角 $\psi_0$ 的范围为 0～180°;由文献[19]可知,弹头出枪口时的自转角速率 $\varphi_{t0}=1\ 357$ rad/s、进动角速率 $\psi_{t0}=17\ 997$ rad/s,以它们 2～3 倍的数值估计它们的取值范围,即 $0<\varphi_{t0}<3\ 000$ rad/s、$0<\psi_{t0}<40\ 000$ rad/s。由于一般认为弹头的章动角速率 $\theta_{t0}$ 较小,设定其取值范围为 0～2 000 rad/s。

**表 1 待优化力学系数的取值范围**

**Table 1 Bounds of undetermined mechanical coefficients**

| 边界 | $C_{D0}$ | $C_1$ | $C_{L0}$ | $C_{M0}$ |
|---|---|---|---|---|
| 下界 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 上界 | 0.1 | 15.0 | 1.0 | 0.2 |

### 3.3 计算结果

设定 Gamultiobj 算法的具体参数为:种群的大小,200;初始种群的生成,随机法;变异操作,自适应可行策略;交叉操作,中间策略;优化的终止条件,迭代次数达 600 次或平均适应值函数的相对误差小于

$0.5\times10^{-4}$。由于多目标函数组(12)中的各个目标之间相互独立，令 TOPSIS 算法中各个目标的权重相同均为 0.2。

经计算得到优化变量的最优解，如表 2 所示。将第 1 组解带入弹道方程组(8)，通过目标函数组(12)的计算可知，位移 $x'_O$ 和 $x_O$ 的均方根误差为 2.22 mm，位移 $y'_O$ 和 $y_O$ 的均方根误差为 1.59 mm，位移 $z'_O$ 和 $z_O$ 的均方根误差为 9.54 mm，$\alpha'$ 和 $\alpha$ 的均方根误差为 5.47°，$\beta'$ 和 $\beta$ 的均方根误差为 5.02°，可见理论值和实验值的误差均较小。实验值和理论值曲线的对比如图 7～8 所示，可见理论值和实验值的变化趋势比较接近，因此可认为所得弹头的初始参数和模型力学系数能够较好地模拟实验弹头侵彻明胶的运动过程。

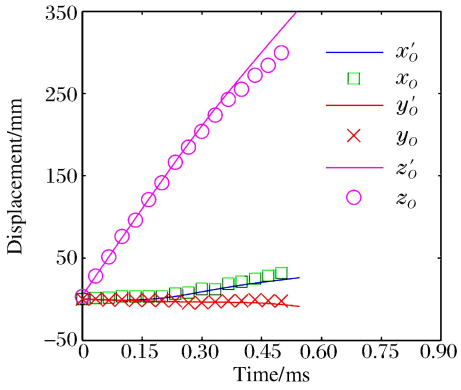



图 7　弹头的各运动位移分量

Fig. 7　Displacement components of the bullet

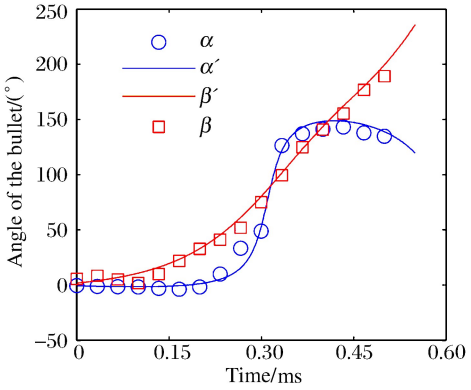



图 8　弹头的俯仰角和偏航角

Fig. 8　Pitch angles and yaw angles of the bullet

**表 2　待优化力学系数的最优解**

**Table 2　Optimum solutions of undetermined mechanical coefficients**

| 序号 | $C_1$ | $C_{D0}$ | $C_{L0}$ | $C_{M0}$ | $v_{x0}$/(m·s$^{-1}$) | $v_{y0}$/(m·s$^{-1}$) | $v_{z0}$/(m·s$^{-1}$) | $\theta_0$/(°) | $\psi_0$/(°) | $\theta_{t0}$/(rad·s$^{-1}$) | $\psi_{t0}$/(rad·s$^{-1}$) | $\varphi_{t0}$/(rad·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7.49 | 0.058 6 | 0.636 | 0.064 7 | −22.4 | −14.20 | 713 | 1.910 | 68.8 | 1 020 | 1 220 | 15 400 |
| 2 | 8.89 | 0.066 2 | 0.669 | 0.082 9 | 15.3 | −17.40 | 703 | 0.115 | 68.8 | 1 470 | 1 910 | 17 600 |
| 3 | 7.72 | 0.051 3 | 0.744 | 0.091 1 | 23.5 | 4.10 | 720 | 0.281 | 81.4 | 1 220 | 2 200 | 19 100 |
| 4 | 10.90 | 0.064 2 | 0.723 | 0.071 9 | 18.3 | 7.73 | 717 | 0.728 | 81.9 | 1 410 | 1 840 | 12 800 |
| 5 | 4.83 | 0.047 8 | 0.813 | 0.062 8 | 15.6 | −16.90 | 715 | 0.682 | 70.5 | 1 750 | 2 260 | 16 900 |

## 4　讨　论

3.3 节中 Gamultiobj 算法通过 167 次迭代获得了优化变量的最优解，由于种群的大小为 200，相当于进行了 33 400 次弹道模型的计算。若采用搜索算法对目标函数组(12)的 12 个优化变量进行优化，即使每个变量取 10 个数值，模型的运算次数也高达 $10^{12}$ 次，远大于 Gamultiobj 的计算次数，可见 Gamultiobj 算法能够大幅度缩减目标函数组优化所需的时间。

由 Gamultiobj 算法的基本原理可知，Pareto 解集中的解与初始种群的构成有关[16]。表 2 中第 2～5 组最优解为采用随机生成法生成初始种群时其他 4 次优化得到的；它们对应的目标函数值如表 3 所示。可见虽然每次优化得到的最优解各不相同，但各最优解对应的均方根误差均较小，表明它们均能较好地模拟弹头的运动规律。由计算可知，最优解中力学系数 $C_1$、$C_{D0}$、$C_{L0}$、$C_{M0}$ 的变异系数分别为 0.278、0.138、0.095 8 和 0.162，弹头初始参数 $v_{x0}$、$v_{y0}$、$v_{z0}$、$\theta_0$、$\psi_0$、$\theta_{t0}$、$\psi_{t0}$ 和 $\varphi_{t0}$ 对应的变异系数分别为 1.83、1.67、0.009、0.945、0.091 1、0.200、0.224 和 0.146。除了由于 $v_{x0}$、$v_{y0}$、$\theta_0$ 的均值接近零，导致其变异系数较大外，其他优化变量的变异系数均较小，表明所得最优解具有较强可信性。

表 3 最优解对应的目标函数值

Table 3 Values of objective functions corresponding to optimal solutions

| 序号 | $\sigma(1)$/mm | $\sigma(2)$/mm | $\sigma(3)$/mm | $\sigma(4)$/(°) | $\sigma(5)$/(°) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.22 | 1.59 | 9.54 | 5.47 | 5.02 |
| 2 | 2.35 | 1.53 | 6.90 | 5.39 | 9.50 |
| 3 | 4.09 | 1.97 | 12.1 | 7.22 | 11.6 |
| 4 | 3.91 | 1.65 | 7.28 | 11.6 | 4.30 |
| 5 | 6.79 | 1.73 | 12.4 | 5.42 | 6.26 |

## 5 结 论

在弹头侵彻明胶弹道模型的基础上,以弹头空间位置和姿态理论均方根误差作为目标函数,对 7.62 mm步枪弹侵彻明胶的运动进行了模拟分析,得到以下结论:

(1) Gamultiobj 算法和 TOPSIS 分析方法获得的弹头初始运动参数和弹道模型力学系数,能较好地模拟步枪弹侵彻明胶的空间运动过程,有助于揭示弹头对人体组织的致伤机理。

(2) Gamultiobj 算法和 TOPSIS 分析方法能够快速获得优化变量的多组最优解。

(3) 优化变量的最优解与初始种群的构成有关,但所得的最优解变异系数较小,结果具有较强的可信性。

## 参考文献:


[1] KNEUBUEHL B P, COUPLAND R M, ROTHSCHILD M A, et al. Wound ballistics, basics and applications [M]. New York: Springer, 2011:136-143.

[2] 刘荫秋,王正国,马玉媛. 创伤弹道学[M]. 北京:人民军医出版社,1991: 30-33.

[3] 程可. 轻武器杀伤元对明胶靶标侵彻的数值仿真研究[D]. 南京:南京理工大学,2012:15-19.

[4] LIU S S, XU C, CHEN A J, et al. Effect of rifle bullet parameters on the penetration into ballistic gelatin[J]. Journal of Beijing Instituite of Technology, 2015,24(4):487-493. DOI: 10.15918/j.jbit1004-0579.201524.0409.

[5] WEN Y, XU C, JIN Y, et al. Rifle bullet penetration into ballistic gelatin[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016,67:40-50. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.11.021.

[6] 温垚珂,徐诚,陈爱军,等. 步枪弹侵彻明胶靶标的数值模拟[J]. 兵工学报,2013,34(1):14-19. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.01.003.
WEN Yaoke, XU Cheng, CHEN Aijun, et al. Numerical simulation of the penetration of bullet on gelatin target [J]. Acta Armamentarii, 2013,34(1):14-19. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.01.003.

[7] DATOC D. Finite element analysis and modeling of a .38 lead round nose ballistic gelatin test[D]. Ponoma: California Polytechnic State University, 2010:20-55.

[8] WANG Y, SHI X, CHEN A, et al. The experimental and numerical investigation of pistol bullet penetrating soft tissue simulant[J]. Forensic Science International, 2015,249C:271-279. DOI: 10.1016/j.forsciint.2015.02.013.

[9] YOON G H, MO J S, KIM K H, et al. Investigation of bullet penetration in ballistic gelatin via finite element simulation and experiment[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015,29(9):3747-3759. DOI: 10.1007/s12206-015-0821-7.

[10] 刘坤,吴志林,徐万和,等. 弹头侵彻明胶的运动模型[J]. 爆炸与冲击,2012,32(6):616-622.
LIU Kun, WU Zhilin, XU Wanhe, et al. A motion model for bullet penetrating gelatin[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(6):616-622.

[11] LIU S, XU C, WEN Y, et al. A new motion model of rifle bullet penetration into ballistic gelatin[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016,93:1-10. DOI: 10.1016/ j.ijimpeng.2016.02.003.

[12] 莫根林,吴志林,冯杰,等. 步枪弹侵彻明胶的表面受力模型[J]. 兵工学报,2014,35(2):164-169. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.02.004.

MO Genlin, WU Zhilin, FENG Jie, et al. Surface pressure model of rifle bullets penetrating into ballistic gelatin [J]. Acta Armamentarii. 2014,35(2):164-169. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.02.004.

[13] 戴光明，王茂才. 多目标优化算法及在卫星星座设计中的应用[M]. 湖北：中国地质大学出版社，2009：1-9.

[14] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，2008：48-70.

[15] 张延教. 高等动力学[M]. 南京：华东工程学院，1984：56-280.

[16] 郁磊. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2015：89-101.

[17] 杨路春，李学斌，丁明君，等. 多目标遗传算法和决策在船型论证中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报，2012，33(12)：1459-1464. DOI：10.3969/j.issn.1006-7043.201203053.
YANG Luchun, LI Xuebin, DING Mingjun, et al. Application of multi-objective genetic algorithm and decision-making skills in ship form evaluation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012,33(12):1459-1464. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.201203053.

[18] 叶义成，柯丽华，黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京：冶金工业出版社，2006：52-56.

[19] 高乃同. 自动武器弹药学[M]. 北京：国防工业出版社，1990：334-336.

# Application of multi-objective optimization algorithm to motional simulation of bullets penetrating ballistic gelatin

MO Genlin[1], JIN Yongxi[2], LI Zhongxin[3], WU Zhilin[3]

(1. *Advanced Manufacturing Institute, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *Jiangsu, China*;
2. *Key Laboratory of Transient Impact Technology, No.* 208 *Research Institute of China Ordnance Industrie, Beijing* 102202, *China*;
3. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

**Abstract**: To find out about the wounding mechanisms of bullets penetrating human bodies, we simulated in this work the processes of bullets penetrating ballistic gelatin using the ballistic model. By taking the root mean squares of the theoretical errors of the horizontal displacements, the vertical displacements, the lateral displacements, the pitch angles and the yaw angles as the objective functions, treating the undetermined initial parameters of the bullet and the force coefficients in the ballistic model as the optimization variables, and using the Gamultiobj method, one of the multi-objective algorithms, we successfully found the set of the Pareto solutions to the objective functions, and selected the optimum solution to the optimization variables through the TOPSIS strategy from the Pareto solutions. Our studies show that the optimum solution is reliable and can present precise simulation of the motions of the 7.62 mm rifle bullet.

**Keywords**: multi-objective optimization; rifle bullet; gelatin; penetration

(责任编辑　曾月蓉)