

doi: 10.7690/bgzdh.2024.02.002

基于鲸鱼算法的内弹道性能优化

王 鑫, 戴劲松, 林圣业, 何 福

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对某航炮对最大炮口初速越来越高的要求, 以提高最大炮口初速为优化设计目标, 对弧厚和发射药量进行优化设计。选用具有操作简单、跳出局部最优的能力强等优点的鲸鱼算法, 将鲸鱼算法与该炮内弹道数学模型相结合, 对内弹道性能进行优化。结果表明: 该方法优化效果较好, 最大炮口初速得到了有效提升, 所采用的鲸鱼算法与内弹道相结合是可行的, 为后续其他类型火炮内弹道设计提供了一定参考。

关键词: 内弹道; 鲸鱼算法; 参数优化; 火炮

中图分类号: TJ012.1 **文献标志码:** A

Interior Ballistic Performance Optimization Based on Whale Algorithm

Wang Xin, Dai Jinsong, Lin Shengye, He Fu

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the increasing requirement of the maximum muzzle velocity of an aircraft gun, the arc thickness and propellant quantity were optimized to improve the maximum muzzle velocity. Whale algorithm, which has the advantages of simple operation and strong ability to jump out of local optimum, is selected to optimize the interior ballistic performance by combining the whale algorithm with the interior ballistic mathematical model of the gun. The results show that the optimization effect of this method is good, the maximum muzzle velocity has been effectively improved, and the combination of the whale algorithm and interior ballistics is feasible, which provides a certain reference for the interior ballistic design of other types of guns.

Keywords: interior ballistics; whale algorithm; parameter optimization; gun

0 引言

随着时代发展, 对航炮的最大炮口初速要求越来越高, 而内弹道是火炮系统设计中重要部分。考虑到炮管材料的各种制约, 通过优化算法在有限条件下, 提高内弹道性能与设计效率, 已经在实际中得到了应用^[1]。

目前, 在内弹道优化上, 许多典型的算法有一定缺陷, 如一般的粒子群算法容易陷入局部最优, 导致收敛精度低; 遗传算法对参数选择需要依靠经验, 搜索的速度较慢^[2-5]。很多仿生算法被国内外学者提出, 参考自然界中生物的捕食行为, 能够克服典型算法的一些缺陷, 在各种问题的优化中展现了较大的潜力^[6-7]。鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA) 作为一种出现不久的仿生算法, 有着机制简单、参数较少、寻优能力强等优势, 已经在各行各业的优化中得到了较好应用^[8-9]。

笔者利用鲸鱼算法的优点, 将该炮的内弹道模型与鲸鱼算法结合, 提高了内弹道性能, 验证该方法在内弹道优化中的可行性, 可为今后内弹道优化

方面的应用提供一定借鉴。

1 鲸鱼算法原理

鲸鱼算法的启发是座头鲸的捕食行为, 根据追踪观察, 座头鲸喜欢在海洋表面, 采用“气泡网攻击觅食法”的方式捕食表面的小型鱼虾, 鲸鱼在下面螺旋式游动, 用吐出的气泡, 形成一个圈将鱼虾困住, 这一过程, 座头鲸通常游动成类圆形或“9”形, 能够最大可能将猎物全部围住, 进而将猎物越逼越紧, 最后全部吞下。

座头鲸在捕获猎物过程中, 一群鲸鱼会共同在海洋中寻找猎物, 当某条鲸鱼首先发现猎物后, 其他鲸鱼便向它游来, 抢夺鱼虾。

将上述捕食过程应用到鲸鱼优化算法求解问题的过程中, 一个鲸鱼个体表示一个解, 若干个鲸鱼个体表示若干个解。使用鲸鱼优化算法寻求最优解的过程, 就是一群鲸鱼个体不断更新个体位置, 直至搜索到满意的解为止^[10]。

鲸鱼优化算法分为包围猎物、气泡网攻击和搜索捕食 3 个阶段。

收稿日期: 2023-10-23; 修回日期: 2023-11-20

第一作者: 王 鑫(1996—), 男, 江苏人, 硕士。

1.1 包围猎物

座头鲸捕食首先要找到猎物,然后围着猎物转。因为最优的解在空间中没有确定,鲸鱼优化算法假设目前最佳的鲸鱼位置就是目标猎物位置或接近最佳的目标猎物位置。明确最佳目标位置之后,其他鲸鱼将向目标猎物位置靠近。此行为由以下方程式表示:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \right|; \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}. \quad (2)$$

式中: \vec{A} , \vec{C} 为系数向量; t 为当前迭代的次数; $\vec{X}^*(t)$ 为当前最优鲸鱼的位置; $\vec{X}(t)$ 为其余鲸鱼个体的位置, $\vec{X}^*(t)$ 在每次迭代后,都会重新定义为当前的最优值。向量 \vec{A} , \vec{C} 的具体表达公式:

$$\vec{A} = 2\vec{a}\vec{r} - \vec{a}; \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}. \quad (4)$$

式中: \vec{a} 的大小在迭代过程中从 2 到 0 线性减小; \vec{r} 为一个随机向量,取值范围为 $[0 \sim 1]$ 。

1.2 气泡网攻击

依据座头鲸气泡网觅食的机制,建立如下 2 个数学模型描述该行为:

1) 收缩包围。

通过减小式(3)中的 a 值来实现, \vec{A} 的值随着 a 的缩小而缩小,如果 \vec{A} 的大小在 $[-1, 1]$ 之间,鲸鱼个体根据最优目标位置更新自身位置,随着迭代次数增加,鲸鱼对猎物的包围也逐步收缩。

2) 螺旋式位置更新。

首先计算最优鲸鱼与其他鲸鱼的距离,之后创建一个含余弦函数的螺旋数学模型,其他鲸鱼位置朝着最优位置螺旋式更新:

$$\vec{X}_k^{j+1} = \vec{X}_k^* + \vec{D}_k \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l). \quad (5)$$

式中: \vec{D}_k 向量的大小为最优鲸鱼个体与其他个体的距离, $\vec{D}_k = \left| \vec{X}_k^* - \vec{X}_k^j \right|$; b 为对数螺旋形状常数; l 为 $[-1, 1]$ 中的随机值。鲸鱼捕食过程中,沿着螺旋形路径游动的同时缩小包围圈,鲸鱼算法添加一个 0.5 的选择阈值模拟这 2 种同时发生的行为,保证收缩包围机制或螺旋式位置更新机制的概率都是相同的。数学模型为:

$$\vec{X}_{j+1} = \begin{cases} \vec{X}_j - \vec{A} \times \vec{D} & p < 0.5 \\ \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}_j & p \geq 0.5 \end{cases}. \quad (6)$$

式中 p 为 $[-1, 1]$ 上的随机数。

1.3 随机搜索捕食

气泡网攻击的搜索猎物策略法过于固定,容易陷入局部最优;因此,加入随机搜索的功能,增强了搜索能力,即在大于 1 或小于 -1 时, \vec{A} 的大小取随机值,鲸鱼个体能够偏离既定的搜索路径,提高搜索到合适猎物的概率,使鲸鱼算法实现一定的全局搜索功能。数学模型为:

$$\vec{X} = \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{A} \times \vec{D}; \quad (7)$$

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \times \vec{X}_{\text{rand}} - \vec{X} \right|. \quad (8)$$

式中 \vec{X}_{rand} 为从当前鲸群中随机选择的位置。

相比于其他类型的优化算法,鲸鱼算法寻优速度快,参数较少,具有极强的跳出局部极值的能力。具体流程如图 1 所示。

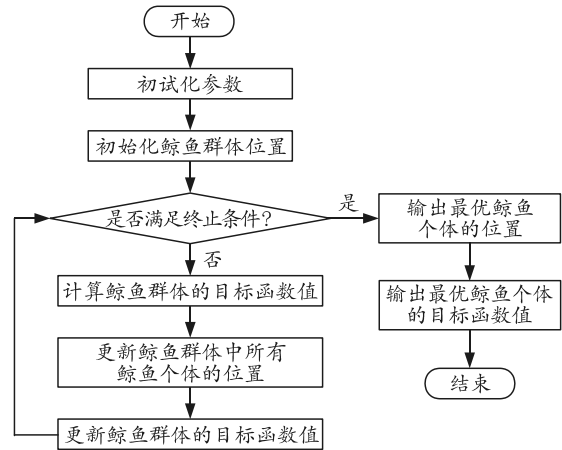


图 1 鲸鱼算法寻优流程

2 内弹道数学模型

2.1 基本假设

建立的计算模型基于以下假设:

- 1) 单一装药;
- 2) 药粒燃烧是在平均压力下并且都遵循燃烧速度定律;
- 3) 用次要系数 φ 来考虑其他次要功;
- 4) 火药气体服从诺贝尔—阿贝尔方程;
- 5) 单位质量的火药在燃烧过程中所释放的能量及生成的火药气体的温度均视为定值;
- 6) 火药力 f 、余容 α 及比热比 k 均视建立的计算模型基于以下的假设。

2.2 内弹道数学模型

该航炮所用发射药为七孔火药。建立基于多孔火药的经典内弹道数学模型:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \begin{cases} \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2) & (Z < 1) \\ \chi_s \frac{Z}{Z_k} (1 + \lambda_s \frac{Z}{Z_k}) & (1 \leq Z \leq Z_k) \\ 1 & (Z > Z_k) \end{cases} \\ \frac{dZ}{dt} &= \begin{cases} \frac{u_1}{e_1} p^n & (Z \leq Z_k) \\ 0 & (Z > Z_k) \end{cases} \\ v &= \frac{dl}{dt} \\ Sp = \varphi m \frac{dv}{dt} Sp(l + l_\psi) &= f \omega \psi - \frac{\theta}{2} \varphi m v^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： ψ 为气体生成百分数； Z 为已燃相对厚度； μ 为火药形状特征量； t 为弹丸在膛内运动的时间； u_1 为燃速常数； e_1 为 1/2 火药起始厚度； n 为燃速指数； p 为平均压力； S 为炮膛横断面面积； φ 为次要功计算系数； m 为弹丸重量； v 为弹丸运动的速度； l 为弹丸行程长； l_ψ 为药室自由容积缩径长， $l_\psi = l_0 [1 - \Delta(1 - \varphi) / \rho - \alpha \Delta \psi]$ ， $\Delta = \omega / V_0$ ， ρ 为火药密度； f 为火药力； φ 为次要功计算系数； ω 为装药量； $\theta = k - 1$ ， k 为绝热指数^[9]。利用原始数据，采用四阶龙格—库塔法对该火炮内弹道方程组进行数值求解，得到最大膛压、初速的计算值分别为 371 MPa 和 988 m/s。

3 内弹道性能优化过程及结果分析

在利用鲸鱼算法优化航炮内弹道性能时，建立优化模型，首先确定优化设计变量、约束条件以及目标函数等。鉴于该炮追求最大炮口初速，所以目标函数是最大炮口速度，对于优化设计变量的原则是对目标函数影响最大且相互独立。在内弹道设计中，主装药装药量和发射药弧厚的一半直接影响到弹丸速度变化，所以将这 2 个参量作为优化设计变量，原始数据分别为 0.117 kg 和 $0.615/2 * 10^{-3}$ mm，其变化范围分别取 $[0.075, 0.155]$ ， $[0.5/2 * 0.001, 0.7/2 * 0.001]$ ，最后从火炮发射安全角度出发，约束条件为最大膛压，要求小于 375 MPa，采用罚函数法进行约束。

经过测试，设定 50 条鲸鱼，最大迭代次数为 100 次，可以保证收敛稳定性且收敛速度较快。

利用上述鲸鱼算法优化内弹道性能，最优值迭代次数的变化如图 2 所示，可以看出，迭代进行到 68 次时，最优值趋于稳定。

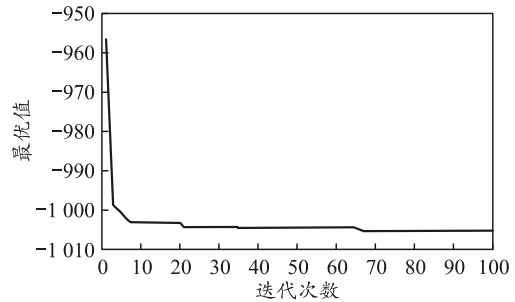


图 2 目标函数随迭代次数的变化曲线

如图 3 和 4 所示，在第 68 次迭代后，2 个优化设计变量也趋向稳定，与最优值迭代曲线的规律基本符合，装药量和 1/2 火药弧厚的取值均在约束条件范围内。

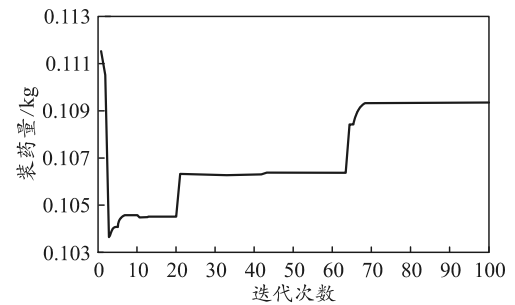


图 3 装药量随迭代次数的变化曲线

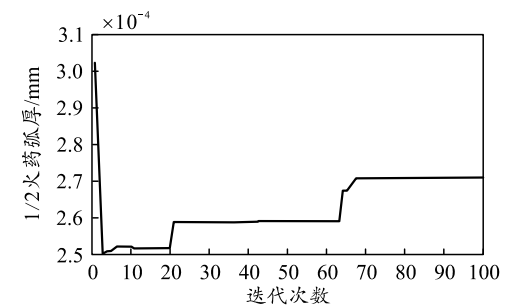


图 4 1/2 弧厚随迭代次数的变化曲线

速度行程优化曲线如图 5 所示，优化后最大速度为 1 005.3 m/s，比优化前的 988 m/s 提高了 17.3 m/s。优化后最佳 1/2 火药弧厚比初始方案的火药弧厚低；因此，燃烧的时间更短，化学能释放的更快，速度也更高。

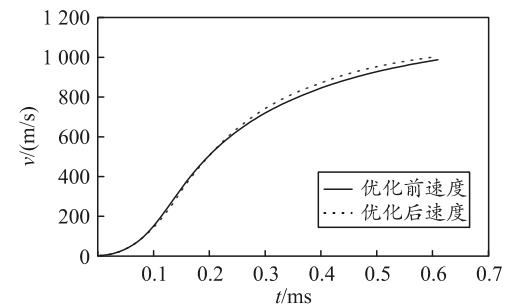


图 5 速度行程曲线