

## 脉冲修正弹控制参数粒子群优化算法\*

孙瑞胜<sup>1</sup>, 洪 侨<sup>1</sup>, 陈晋璋<sup>1</sup>, 孙传杰<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国工程物理研究院 结构力学所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**针对脉冲修正弹自身控制离散不连续特征,开展脉冲修正弹脉冲控制参数优化设计方法研究。考虑到脉冲成本和精度的双重要求,选择以脉冲发动机工作次数和脱靶量最少为双目标的函数。在风干扰条件下,提出以脉冲控制时间间隔为离散脉冲控制参数设计变量建立优化模型,以此发展一种改进型递减惯性权重粒子群优化脉冲控制参数的方法,提高修正参数优化收敛速度。仿真结果表明:该算法能快速有效地获得最优解,为在干扰条件下寻找最优的脉冲修正参数和脉冲工作方式提供一种优化设计思路。

**关键词:**脉冲修正弹;离散化;优化设计;粒子群算法

中图分类号:TJ760.12 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2016)04-159-05

## Particle swarm optimization method for impulse-correction projectiles

SUN Ruisheng<sup>1</sup>, HONG Qiao<sup>1</sup>, CHEN Jinzhang<sup>1</sup>, SUN Chuanjie<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** According to the discontinuous characteristics of impulse correction projectile, a class of parameters optimization method for its control system was presented. Considering the two requirements of the correction cost and precision of impulse thrusters, the minimum amount of numbers of impulse thrusters and the control miss-distance were taken as a double-objective function, and it was put forward to select the time interval between the two neighboring impulse forces as design variable in condition of wind disturbance. Based on this, a modified particle swarm optimization algorithm was developed to improve the convergence speed of this optimization process. The simulation result indicates that the presented optimization algorithm can obtain the optimal solution efficiently, which provides a reference approach to find the optimal impulse correction parameters and work modes under wind disturbance.

**Key words:** impulse-correction projectile; discretization; optimization design; particle swarm optimization

脉冲式末段简易修正弹药通过在弹身周向加装小型脉冲火箭发动机提供直接控制力,迅速改变弹丸速度方向,修正弹道轨迹,具有过渡时间短、效费比高、制导技术简便等优点,倍受国内外学者的关注<sup>[1-5]</sup>。文献[4]研究了二维弹道修正弹丸的脉冲力大小和相对质心的作用位置参数对脱靶量影响关系。文献[5]理论分析了脉冲推冲器工作时间的不同对火箭弹横向和纵向修正能力影响,并通过仿真手段开展了横向和纵向修正优化策略研究。陈国光、王中原等在脉冲修正弹道的实时计算算法<sup>[6]</sup>、脉冲力对弹道稳定影响<sup>[7]</sup>等方面取得了一些重要的研究成果。然而,由于脉冲修正弹丸脉冲发动机的冲量和个数都是有限的,也只能进行离散的、有限次修正,不像舵面控

制的有翼弹箭可以在末段弹道对弹箭实施连续控制。这个特点使得传统的设计方法很难直接应用到脉冲修正弹丸的设计当中。

文献[8]中提出了一种基于罚函数方法的粒子群优化算法的方法,完成了脉冲发动机个数、单脉冲冲量、脉冲发动机相对于弹体质心的轴向布置位置及弹体尾翼斜置角等总体参数的静态优化设计工作。但其仅仅考虑在标准条件下脉冲总体参数的设计优化,没有考虑风干扰对脉冲修正弹道的影响,也没有给出脉冲作用的具体工作方式和时间间隔。这是进行脉冲修正控制深入研究的关键问题。

在此基础上,根据脉冲修正的离散控制特点,本文提出了一种改进的粒子群优化(Particle

\* 收稿日期:2015-05-08

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助项目(11176012);一院高校联合创新基金资助项目(CALT201302)

作者简介:孙瑞胜(1978—),男,江苏盐城人,副教授,博士,E-mail:srscom@163.com

Swarm Optimization, PSO) 算法, 以脉冲控制时间间隔为离散脉冲控制参数设计变量建立优化模型, 将问题转化为一个非线性规划问题, 并在考虑风干扰对弹丸稳定性和脱靶量影响的同时, 求取满足修正射程偏差所需要的最小脉冲个数以及末段脉冲控制的工作方式。

## 1 优化模型

### 1.1 飞行运动方程

假设地球为平面, 且忽略地球自转影响, 在纵向平面内建立末修弹的运动数学模型。

$$\begin{cases} \dot{v} = (-P\sin\alpha - X - mg\sin\theta)/m \\ \dot{\theta} = (P\cos\alpha + Y - mg\cos\theta)/(mv) \\ \dot{\omega}_z = (Pl + M_z)/J_z \\ \dot{\vartheta} = \dot{\omega}_z \\ \dot{x} = v\cos\theta \\ \dot{y} = v\sin\theta \\ \dot{m} = -m_c \\ \alpha = \vartheta - \theta \\ \varepsilon(t, P, \dots) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $P$  为脉冲控制力;  $l$  为控制力离弹丸质心的距离;  $v$  为速度;  $\theta$  为弹道倾角;  $x, y$  分别为弹丸纵程和射高;  $m$  为质量;  $\alpha$  为飞行攻角;  $X, Y$  分别为阻力和升力;  $m_c$  为质量流量;  $\varepsilon(t, P, \dots) = 0$  为脉冲控制方程。

考虑到弹丸飞行过程中风干扰的影响, 建立干扰补充方程。

$$\begin{cases} v_r = \sqrt{(\dot{x} - w_x)^2 + \dot{y}^2} \\ \theta_r = \text{atan}\left(\frac{\dot{y}}{\dot{x} - w_x}\right) \\ \alpha_r = \vartheta - \theta_r \\ Ma = \frac{v_r}{C} \\ X = qSC_x(\alpha_r, Ma) \\ Y = qSC_y(\alpha_r, Ma) \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $w_x$  为作用在全弹道上的水平风速, 定义顺风为正, 逆风为负;  $Ma$  为马赫数;  $C$  为声速;  $q$  为来流的动压头;  $S$  为弹丸参考面积;  $C_x$  和  $C_y$  分别为阻力系数和升力系数; 下标  $r$  表示弹丸与气流的相对运动。

### 1.2 约束条件

弹丸在末段修正的过程中不仅受到运动方程组的约束, 同时也受到一些过程变量和终端状态的约束。

1) 为了保证弹丸在全弹道飞行时候的稳定性, 要求弹丸的飞行攻角不能太大, 至少不能超过临界攻角  $\Delta_{\max}$ 。

$$|\alpha| \leq \Delta_{\max}$$

2) 脉冲修正要求弹丸有一定精度要求, 也就是说, 脱靶量  $\Delta R$  不能太大。

$$\Delta R \leq \Delta R_{\text{CEP}}$$

3) 满足脉冲修正自身的能量限制, 即脉冲发动机推力工作数  $n$  受到总脉冲数  $N_{\text{im}}$  的限制。

$$n < N_{\text{im}}$$

### 1.3 性能函数

考虑脉冲修正弹成本因素和控制精度要求, 不仅期望脉冲发动机的总冲或总个数最小, 以达到成本最低的目标, 而且还要求修正弹道的控制精度(脱靶量)也要尽可能小。因而, 这是一个以脉冲发动机个数  $n$  和弹丸的脱靶量  $\Delta R$  为优化目标的多目标优化问题。这两个目标是矛盾的, 也就是说, 增加脉冲的个数进行多次修正固然一定程度上能够提高弹丸的控制精度, 但同时也增加了修正弹的控制成本。为了协调这两个目标优化函数的矛盾, 通过对各个目标函数进行加权求和, 将其转化为一个总的单目标优化问题。因此, 这个目标函数可以写为:

$$\min J = \min \left[ k \cdot \frac{n}{N_{\text{im}}} + (1 - k) \cdot \frac{\Delta R}{\Delta R_{\text{CEP}}} \right] \quad (3)$$

其中,  $k$  表示脉冲个数 ( $n/N_{\text{im}}$ ) 在总优化目标中所占的比例系数。  $k$  越大, 表示  $n/N_{\text{im}}$  对  $J$  的影响越重要。

## 2 改进的粒子群优化方法

### 2.1 控制变量离散化

脉冲控制方式与传统的连续性控制不同, 本身具有离散的特点。针对这种情况, 可以选择相邻脉冲控制力和控制力之间的时间间隔作为设计变量进行离散化。离散方法如下:

1) 引入脉冲参数  $P_i$ , 根据脉冲工作特点易知, 脉冲只有两种状态:

$$P_i = \begin{cases} 4000, & \delta_i > 0 \\ 0, & \delta_i < 0 \end{cases}$$

其中:  $i = 0, 1, 2, \dots, 31$ ;  $\delta_i > 0$  表示脉冲工作;  $\delta_i < 0$  表示脉冲不工作。

2) 引入参数  $Tu_i, Tu_i$  为  $P_{i-1}$  和  $P_i$  两个相邻脉冲之间的时间间隔。其中,  $i = 0, 1, 2, \dots, 31$ 。

控制变量离散化的示意如图 1 所示。

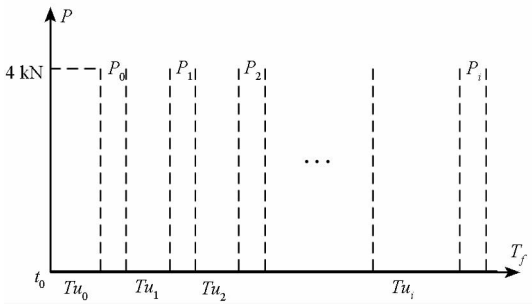


图1 脉冲控制变量离散化示意图

Fig.1 Diagram of discretization impulse control variable

### 2.2 基于递减惯性权重的改进 PSO 算法

PSO 算法的基本思想是将所优化问题的每一个解称为一个微粒,每个微粒在  $n$  维搜索空间中以一定的速度飞行,通过适应度函数来衡量微粒的优劣。微粒根据自己的飞行经验以及其他微粒的飞行经验,来动态调整飞行速度,以期向群体中最好微粒位置飞行,从而使所优化问题得到最优解。粒子更新自己的速度和位置基本公式为:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = w \cdot v_{id}^k + c_1 r_1 (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (gbest_{id}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $pbest_{id}^k$ 为粒子历史最好位置, $x_{id}^k$ 为粒子当前位置,代表优化问题的一组解, $gbest_{id}^k$ 为种群历史最好位置; $v_{id}^k$ 为粒子在解空间中的飞行速度,代表当前解在解空间中的变化快慢; $c_1, c_2$ 为加速因子; $r_1, r_2$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; $w$ 是惯性权重因子。

PSO 算法思想早在 1995 年由 Eberhart 博士和 Kennedy 博士提出之后<sup>[9]</sup>,受到许多学者引用和改进<sup>[10]</sup>。它在集群智能方法中受到青睐的重要原因其使用了该组个体的整体经验,而不仅仅只用每个单个颗粒(即一个潜在的解决方案)的经验,其收敛速度比其他方法更快。文献[11]提出一种基于变惯性权重及动态邻域的改进 PSO 算法,将有向动态类无标度网络作为粒子寻优的邻域并与变惯性法结合,使得粒子能够在误差范围内提高局部收敛能力。本文在此基础上采用线性递减惯性权重的办法,即线性递减改变式(3)中的惯性权重因子  $w$ 。从前述控制变量离散化的过程可知,设计变量  $P_i, Tu_i$  为粒子位置向量,即脉冲修正弹的控制变量。图 2 给出了整个迭代算法的基本流程。

1) 初始化模型:将弹道参数、粒子群算法参数等初始化。

- 2) 根据式(4)更新粒子速度、位置信息。
- 3) 根据以上离散化方法得到  $P_i, Tu_i$ , 作为控制量。
- 4) 代入控制量,解算弹道模型。
- 5) 计算综合目标函数  $J$ ,调整个体最优适应度和种群最优适应度。
- 6) 如果满足终止条件,则停止计算,输出最优个体位置及最优适应度;否则,根据个体和种群的最优适应度调整粒子的速度和位置,返回步骤 3 继续迭代。

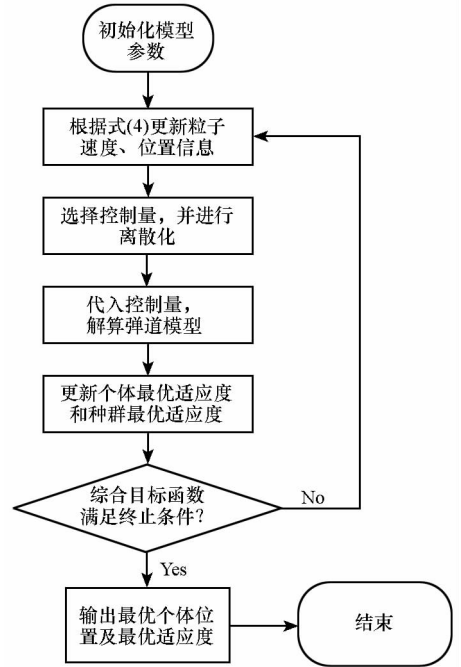


图2 粒子群迭代算法的基本流程

Fig.2 Process of particle swarm optimization algorithm

### 3 仿真算例分析

#### 3.1 初始计算参数

末端修正弹的初始弹道计算条件为: $m_0 = 40 \text{ kg}, v_0 = 650 \text{ m/s}, x_0 = 0 \text{ m}, y_0 = 0 \text{ m}, \omega_{z0} = 0 \text{ rad/s}, \theta_0 = \theta_0 = 45^\circ, \alpha_0 = 0^\circ, l = 0.015 \text{ m}, w = -5 \text{ m/s}$ 。

脉冲的作用方式为:每次作用只能喷一个脉冲,单个发动机工作时间为  $0.015 \text{ s}$ ,提供的脉冲力大小为  $4000 \text{ N}$ 。

末端修正的起控高度为弹道下降段  $h = 3000 \text{ m}$ ,计算时  $\Delta_{\max} = 15^\circ, \Delta R_{\text{CEP}} = 5 \text{ m}$ ,所取粒子群算法参数为:种群规模取 30,社会系数和认知系数  $c_1 = c_2 = 1.8$ ,惯性权重  $w$  由  $1.0$  线性递减到  $0.4$ ,最大迭代次数为  $150$  次。

### 3.2 仿真结果与分析

根据 3.1 节中给出的弹道初始条件,进行仿真。图 3 ~ 7 为不同条件下弹道参数对比曲线。图中“自然弹道”,是不考虑干扰且无脉冲作用时弹丸自由飞行的弹道;“干扰弹道”,是在这个弹丸飞行过程中考虑风干扰得到的弹道,但没有脉冲控制;“优化弹道”,是经过 PSO 优化算法求出的最优目标函数下得到的最优控制弹道。图 8 为最优弹道脉冲控制力随时间的分布。

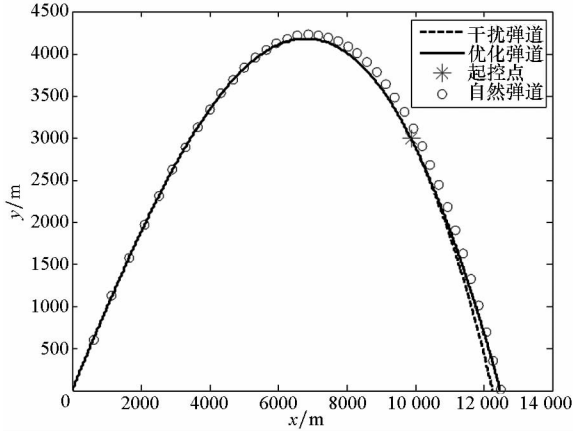


图 3 运动轨迹对比曲线

Fig. 3 Comparison curve of trajectory

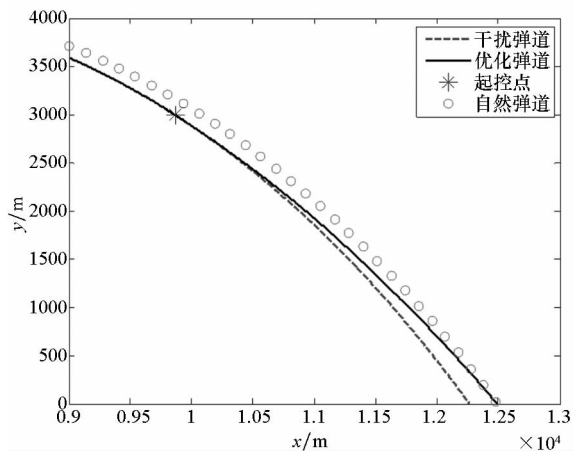


图 4 末段轨迹对比曲线

Fig. 4 Comparison curve of terminal trajectory

从图 3 ~ 8 的优化结果可以看出:①脉冲作用能够有效地修正由风干扰所引起的射程偏差,在风的干扰情况下,脉冲修正距离  $\Delta x = 218.9 \text{ m}$ ,脱靶量为  $0.5 \text{ m}$ 。②PSO 算法在保证修正距离和脱靶量的前提下,所需要的脉冲个数  $n = 9 \ll 32$ ,节约了脉冲所要消耗的能量。③从图 8 中可以看出,脉冲修正在高空(图左段)的作用个数多,时间间隔短,而在低空作用个数少,时间间隔长。原

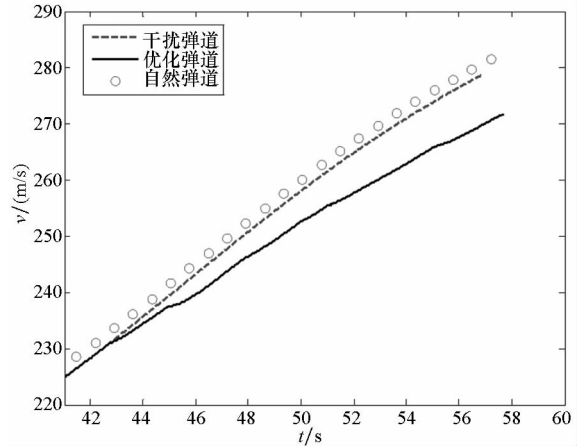


图 5  $v - t$  对比曲线

Fig. 5 Comparison curve of  $v$  and  $t$

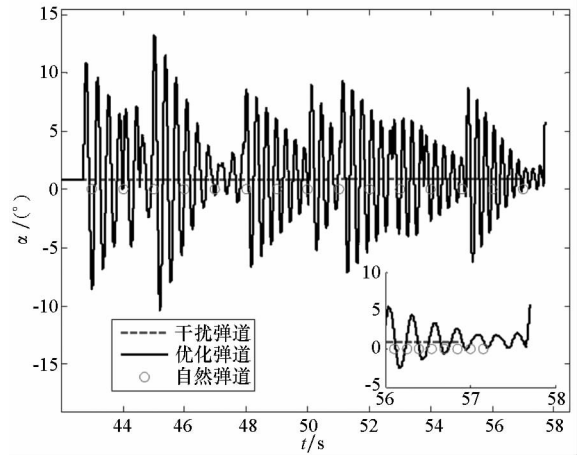


图 6  $\alpha - t$  对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of  $\alpha$  and  $t$

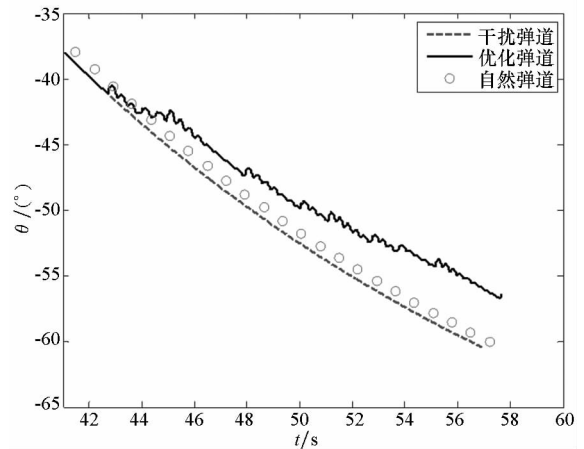
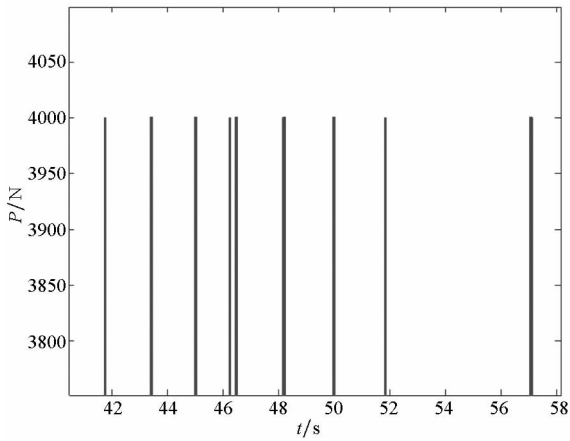


图 7  $\theta - t$  对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of  $\theta$  and  $t$

因是高空修正对射程的影响较大,使用较少的脉冲完成较大的修偏,到了低空再进行小幅度作用,就能保证修正弹的脱靶量。

图8 脉冲控制力  $P$  随时间的分布Fig. 8 Distribution of impulse thrust force  $P$  with  $t$ 

## 4 结论

通过综合考虑脉冲修正弹成本和控制精度两方面的要求,进行对脉冲修正弹修正参数的优化设计研究,可得到以下结论:

1) 针对脉冲离散特点,提出的以脉冲控制时间间隔为离散脉冲控制参数设计变量,并在约束条件下进行参数优化设计的研究思路,是一种理论合理、行之有效的脉冲参数设计方法。

2) 采用一种改进型递减惯性权重粒子群优化算法求解优化模型,计算仿真结果表明,该算法收敛快速且精度可靠。研究结果可为在干扰条件下寻找最优的脉冲修正参数和脉冲工作方式提供一种设计参考方法。

## 参考文献 (References)

[1] Corriveau D, Berner C, Fleck V. Trajectory correction using impulse thrusters for conventional artillery projectiles [C]// Proceedings of 23rd International Symposium on Ballistics, Spain: IBC, 2007: 639-646.

[2] Calise A J, El-Shirbiny H A. An analysis of aerodynamic control for direct fire spinning projectiles [C]// Proceedings

of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2001: AIAA 2001-4217.

[3] Doraiswamy S, Candler G. Detached eddy simulations and Reynolds-averaged Navier-Stokes calculations of a spinning projectile [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(5): 935-945.

[4] 林德福, 徐劲祥, 宋锦武. 弹道修正弹丸的脉冲控制参数设计 [J]. 兵工自动化, 2005, 24(3): 40-43.  
LIN Defu, XU Jingxiang, SONG Jinwu. Design of pulse control parameter for projectile with ballistic correction [J]. Armament Automation, 2005, 24(3): 40-43. (in Chinese)

[5] 李超旺, 高敏, 宋卫东, 等. 脉冲修正火箭弹弹道修正算法优化 [J]. 弹道学报, 2014, 26(4): 24-29.  
LI Chaowang, GAO Min, SONG Weidong, et al. Optimization of trajectory correction method of rocket projectile based on pulse jet control [J]. Journal of Ballistics, 2014, 26(4): 24-29. (in Chinese)

[6] 田晓丽, 陈国光, 辛长范. 弹道修正弹的外弹道实时解算算法研究 [J]. 华北工学院测试技术学报, 2000, 14(1): 44-47.  
TIAN Xiaoli, CHEN Guoguang, XIN Changfan. External ballistic real-time algorithm of trajectory correction projectile [J]. Journal of Test and Measurement Technology of NCIT, 2000, 14(1): 44-47. (in Chinese)

[7] 王中原, 丁松滨, 王良明. 弹道修正弹在脉冲力矩作用下的飞行稳定性条件 [J]. 南京理工大学学报, 2000, 24(4): 322-325.  
WANG Zhongyuan, DING Songbin, WANG Liangming. Flight stability condition for a projectile of corrected trajectory with impulse moments [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(4): 322-325. (in Chinese)

[8] 常思江, 曹小兵, 王中原, 等. 脉冲修正弹参数优化设计方法 [J]. 弹道学报, 2013, 25(1): 32-36.  
CHANG Sijiang, CAO Xiaobing, WANG Zhongyuan, et al. Approach of optimal design of parameters for impulse-correction projectile [J]. Journal of Ballistics, 2013, 25(1): 32-36. (in Chinese)

[9] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [C]// Proceedings of International Symposium on MICRO Machine and Human Science, 1995: 39-43.

[10] Shi Y, Eberhart R. Modified particle swarm optimizer [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings, 1998: 69-73.

[11] Rahimi A, Kumar K D, Alighanbari H. Particle swarm optimization applied to spacecraft reentry trajectory [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2013, 36(1): 307-310.