

引用格式:吴威,吴玲,卢发兴.基于最大命中概率的新型舰炮对海射击火控解算技术[J].电光与控制,2019,26(3):44-48. WU W, WU L, LU F X. Maximum hitting probability based fire control calculation for new shipboard gun against sea target[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(3): 44-48.

## 基于最大命中概率的新型舰炮对海射击火控解算技术

吴威, 吴玲, 卢发兴  
(海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033)

**摘要:** 根据新型舰炮初速可控的特点,提出了一种基于最大命中概率的射击诸元解算方法。初速可控舰炮增加了弹丸初速作为射击诸元要素。对视距内目标进行打击时,命中概率与弹丸初速之间存在着非线性变化关系。通过建立弹丸外弹道模型和解命中方程,进行弹道解算,并基于黄金分割的概念,采用二分法求解弹丸初速。该方法以命中概率最大为约束,可有效进行新能源舰炮武器的射击诸元解算。

**关键词:** 新型舰炮; 火控解算; 命中概率; 弹丸初速; 二分法

**中图分类号:** TJ391      **文献标志码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.03.010

## Maximum Hitting Probability Based Fire Control Calculation for New Shipboard Gun Against Sea Target

WU Wei, WU Ling, LU Fa-xing  
(Weapon Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** According to the characteristics of controllable muzzle velocity of the new shipboard gun, a method for calculating the firing data based on maximum hitting probability is proposed. The projectile muzzle velocity is added as a new firing data element of the shipboard gun with controllable muzzle velocity. When striking the sea target within visual range, there is a nonlinear relationship between the hitting probability and projectile muzzle velocity. The model of projectile exterior ballistic trajectory and the equation for solving hit problem are established for calculating the trajectory. Based on the concept of golden section, the projectile muzzle velocity is obtained through dichotomy. Constrained by the condition of maximum hitting probability, the method can calculate the firing data of the new-energy shipboard gun weapon effectively.

**Key words:** new shipboard gun; fire control calculation; hitting probability; projectile muzzle velocity; dichotomy

### 0 引言

新能源发射技术发展迅速,电磁轨道炮、电热化学炮等初速可调的新型武器<sup>[1]</sup>应用前景广阔。弹丸初速是新型舰炮必须考虑的射击诸元要素,因此,传统舰炮火控解算技术已经不适用于新型舰炮武器系统。诸元解算是火控系统的核心任务之一,传统舰炮求解射击诸元一般采用射表法、解弹道方程组法<sup>[2]</sup>;数值方法解弹道方程通常采用二分法和落点诸元信息的弹道解算方法<sup>[3-5]</sup>,研究较为成熟。目前,国内外对电磁轨道炮

等新型舰炮发射技术和外弹道展开了研究<sup>[6-9]</sup>,求解新型舰炮武器射击诸元,是当前亟待解决的问题。

新能源武器发射的弹丸初速可调,对视距内同一目标进行打击,命中概率随弹丸初速的改变,存在着非线性变化关系,弹丸初速是新型舰炮火控解算必需的射击诸元要素。本文建立了弹丸外弹道模型,基于射角逼近法建立解命中方程,进行弹道解算,以命中概率最大为约束条件,采用二分法求解射击诸元,为新型舰炮武器火控解算、射表制定提供理论依据。

### 1 弹丸外弹道模型

弹丸外弹道模型是弹道解算和求解射击诸元的基础。建立新型舰炮弹丸外弹道模型,采用直角坐标系  $OXYZ$ ,  $O$  在发射点,轴线  $OX$  位于水平面上,方向为弹

收稿日期:2018-03-20

修回日期:2018-04-16

作者简介:吴威(1994—),男,河南驻马店人,硕士生,研究方向为作战指挥系统。

丸移动方向;轴线  $OY$  垂直于轴线  $OX$ , 方向为垂直向上;轴线  $OZ$  垂直于轴线  $OX$  和  $OY$ , 建立右手坐标系。考虑弹丸旋转、科里奥利力、重力加速度以及偏流的影响,可以得到弹丸运动微分方程组<sup>[10]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{x} = u \\ \dot{y} = w \\ \dot{z} = q \\ \dot{u} = -a \cdot \cos \theta \cos \psi + \varepsilon_x \\ \dot{w} = -a \cdot \sin \theta - g_T + \varepsilon_y \\ \dot{q} = -a \cdot \cos \theta \sin \psi + \varepsilon_z \\ \dot{\omega}_\xi = -b \cdot H(y) \cdot V \cdot K_R(V_T) \cdot \omega_\xi \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(x, y, z)$  和  $(u, w, q)$  分别为弹丸质心和速度在直角坐标系  $OXYZ$  各坐标轴上的分量;  $g_T$  为弹丸的重力加速度;  $\omega_\xi$  为弹丸纵轴方向的角速度;  $a = c\pi(h) \cdot F(V_T)$  为空气阻力加速度;  $\psi$  为偏流角;  $\theta$  为弹丸倾角,  $V = \sqrt{u^2 + w^2 + q^2}$  为弹丸速度;  $H(y)$  为空气密度函数;  $K_R(V_T)$  为极阻尼力矩函数; 转动系数  $b$  为常数;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  为各个方向的修正加速度, 其数学表达式为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = -x \cdot g_T / R(y) + 2w\Omega_z \\ \varepsilon_y = 2y \cdot g_T / R(y) + 2u\Omega_z \\ \varepsilon_z = f(t) - 2(w\Omega_x - u\Omega_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f(t)$  为偏流系数;  $R(y)$  为曲率半径;  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$  为地球自转角速度  $\Omega$  在  $x, y, z$  轴上的分量,  $\Omega = 7.2921 \times 10^{-5}$  rad/s。

对于任意时刻  $t$ , 均可以确定弹丸倾角  $\theta$  和偏流角  $\psi$ , 即

$$\begin{cases} \theta = \arctan \frac{w}{\sqrt{u^2 + q^2}} \\ \psi = \arctan \frac{q}{u} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)方程组的初始条件为:  $t = 0, x = 0, y = 0, z = 0, u = V_0 \cos \theta_0 \cos \psi_0, q = V_0 \cos \theta_0 \sin \psi_0, w = V_0 \sin \theta_0, \omega_{\xi 0} = 0, \psi_0 = 0, V_0$  为弹丸初速,  $\theta_0$  为弹丸射角。

## 2 解命中方程

对于初速可控舰炮, 对视距内同一个目标进行打击, 不同的弹丸初速确定不同的弹丸外弹道。因此, 已知目标方位信息, 若给定弹丸初速, 则弹丸外弹道唯一。此时, 可根据弹丸初速和目标信息计算弹丸与目标的相遇点坐标, 求解相应的弹丸射角<sup>[11]</sup>, 本文将通过射角逼近法求解弹丸射角。建立直角坐标系  $OX'Y'Z'$ , 如图1所示, 原点  $O$  与炮弹发射点重合, 轴  $OX'$  处于水平面上, 与射击瞬间目标速度矢量在水平面上的投影平行,  $OY'$  轴向上垂直,  $OZ'$  轴垂直于  $OX'Y'$  平面, 方向为右侧坐标

系所形成方向。

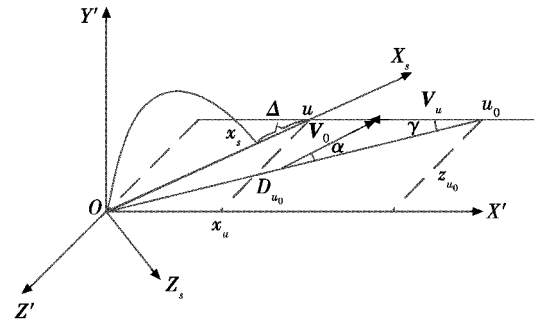


图1 弹丸与目标运动示意图

Fig.1 Schematic diagram of projectile and target motion

假设发射瞬间( $t = 0$ )目标位于点  $u_0(x_{u_0}, 0, z_{u_0})$ , 目标沿直线平稳移动, 炮弹飞行时间为  $t_1$ 。为了使炮弹命中目标, 应对目标提前点进行射击, 点  $u(x_u, 0, z_{u_0})$  为炮弹与目标相遇的第一个近似提前点坐标。弹丸速度固定为  $V_0$ , 炮弹发射瞬间到目标之间的水平距离为  $D_{u_0}$ , 根据图1中的  $Ouu_0$  航迹三角形可以求出

$$t_1 = D_{u_0} / (V_0 \cos \alpha + V_u \cos \gamma) \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} D_{u_0} = \sqrt{x_{u_0}^2 + z_{u_0}^2} \\ \gamma = \arccos \frac{x_{u_0}}{D_{u_0}} \\ \alpha = \arcsin (V_u \sin \gamma / V_0) \end{cases} \quad (5)$$

此时, 目标提前点  $u$  的坐标为

$$\begin{cases} x_u = x_{u_0} - V_u t_n \\ Y_u = 0 \\ z_u = z_{u_0} \end{cases} \quad (6)$$

以炮弹发射点为坐标原点  $O$ , 弹丸发射点与目标提前点连线所在方向为  $OX_s$  轴,  $OY'$  轴向上垂直,  $OZ_s$  轴垂直于  $OX_s Y'$  平面, 方向为右侧坐标系所形成方向, 得到直角坐标系  $OX_s Y' Z_s$ 。穿过点  $u$  的  $OX_s Y'$  垂直面, 为弹丸射击的第一个近似射弹面。  $OX_s Y' Z_s$  坐标系中, 点  $u$  的坐标变换为

$$\begin{cases} x_{su} = \sqrt{x_u^2 + z_{u_0}^2} \\ y_{su} = 0 \\ z_{su} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

不考虑空气阻力、弹丸旋转、科里奥利力以及偏流, 得到简化弹丸运动微分方程组来确定炮弹的命中弹道, 即

$$\begin{cases} \dot{u} = 0 \\ \dot{w} = -g_T \\ \dot{x} = u \\ \dot{y} = w \end{cases} \quad (8)$$

在初始条件  $t = 0, x = 0, y = 0, u = V_0 \cos \theta_0, w =$

$V_0 \sin \theta_0$  下,积分求解得到炮弹的运动方程为

$$y = x \tan \theta_0 - \frac{g_T x^2}{2V_0^2 \cos^2 \theta_0} \quad (9)$$

由三角学知识,将式(9)进行变换,可以得到

$$\tan^2 \theta_0 - 2 \frac{V_0^2}{x g_T} \tan \theta_0 + 1 + \frac{2y V_0^2}{x^2 g_T} = 0 \quad (10)$$

求解所得命中弹道的射角,作为弹丸射角的第一个近似值,将  $y = y_{su}, x = x_{su}$  代入式(10)求解得到

$$\tan \theta_0 = \frac{V_0^2}{x_{su} g_T} \pm \sqrt{\left(\frac{V_0^2}{x_{su} g_T}\right)^2 - \left(1 + \frac{2y_{su} V_0^2}{x_{su}^2 g_T}\right)} \quad (11)$$

取较小值作为射角初始角,可以得到弹丸射角的第一个近似值为

$$\theta_0 = \arctan \left( \frac{V_0^2}{x_{su} g_T} - \sqrt{\left(\frac{V_0^2}{x_{su} g_T}\right)^2 - \left(1 + \frac{2y_{su} V_0^2}{x_{su}^2 g_T}\right)} \right) \quad (12)$$

考虑空气阻力、弹丸旋转、科里奥利力以及偏流,解算弹道微分方程组得到炮弹的落点坐标为  $u_s(x_s, y_s, z_s)$ ,  $\Delta$  为弹丸落点与目标提前点吻合的精确度。当  $|x_s - x_{su}| < \Delta$  时,对应命中弹道的射角  $\theta_0$  以及目标提前坐标被认为是求出值,反之,则计算新弹丸射角为  $\theta_{0i+1}$ 。射角的第一个近似值  $\theta_{01}$  对应提前距离  $x_s$ ,射角的第二个近似值  $\theta_{02}$  对应需要的提前距离  $x_{su}$ ,此时求出下列比例

$$\frac{\theta_{01}}{\theta_{02}} = \frac{x_{su}}{x_s} \quad (13)$$

因此,可以得到弹丸射角求解公式为

$$\theta_{0i+1} = \frac{x_{su}}{x_s} \theta_{0i} \quad i = 1, 2, \dots \quad (14)$$

### 3 射击诸元解算

#### 3.1 基于最大命中概率的最优弹丸初速求解

假设以矩形目标中心为瞄准点,得到目标命中界为  $L_x \times L_z$ ,考虑对海上目标射击时,在  $x$  轴和  $z$  轴上的随机误差分量相互独立,则发射一发弹丸的命中概率<sup>[12]</sup>为

$$P(x, z) = \iint_R \varphi(x, z) dx dz = \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \varphi(x) dx \int_{-L_z/2}^{L_z/2} \varphi(z) dz \quad (15)$$

式中:  $\varphi(x), \varphi(z)$  分别为弹着散布误差在  $x, z$  轴上的正态分布密度函数,即

$$\varphi(x) = \frac{\rho}{\sqrt{\pi} E_x} \exp \left[ -\rho^2 \frac{(x - m_x)^2}{E_x^2} \right] \quad (16)$$

式中:  $\rho = 0.4769$  为正态常数;  $m_x$  为系统误差;  $E_x$  为随机误差。类似可求得  $\varphi(z)$ 。

新型舰炮初速可调,弹丸初速影响着弹丸飞行时间和弹丸落角,改变系统误差和目标命中界<sup>[13-14]</sup>,进而改变命中概率。对于视距内的同一个目标,由弹丸

外弹道方程和解命中方程,命中概率与弹丸初速之间呈现非线性变化关系,如图2所示,命中概率与弹丸初速之间的关系可简化表示为  $P = f(V_0)$ 。

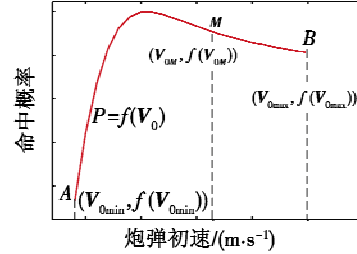


图2 命中概率随弹丸初速变化示意图

Fig.2 Hitting probability vs projectile muzzle velocity

弹丸初速作为新型舰炮的射击诸元要素,以命中概率最大为约束条件,求解最优弹丸初速  $V_0$ 。已知弹丸初速取值范围为  $[V_{0min}, V_{0max}]$ ,基于黄金分割的概念,采用二分法<sup>[15]</sup>对这个闭区间内的极值进行求解。假设曲线  $P = f(V_0)$  两端坐标分别为  $A(V_{0min}, f(V_{0min}))$ ,  $B(V_{0max}, f(V_{0max}))$ ,  $AB$  的黄金分割点  $M$  的坐标为  $(V_{0M}, f(V_{0M}))$ ,其中

$$V_{0M} = V_{0min} + \frac{\sqrt{5}-1}{2} \cdot (V_{0max} - V_{0min}) \quad (17)$$

弹丸初速误差指的是发射弹丸的初速允许的偏差量。假设弹丸初速误差为  $V_{error}$ ,可以求解得到当前距离时弹丸对目标的最大命中概率  $P_{max}$  和相应的弹丸初速  $V_{0best}$ ,基本流程如下:

- 1) 初始化参数,包含目标信息及弹丸初速取值范围  $[V_{0min}, V_{0max}]$ ;
- 2) 联合解命中方程以及外弹道微分方程组,进行弹道解算,计算命中概率  $P = f(V_0)$ ;
- 3) 基于黄金分割的概念,采用二分法确定黄金分割点  $M$  的弹丸初速  $V_{0M}$ ;
- 4) 在黄金分割点  $M$  左侧取值弹丸初速  $V_{0M} - V_{error}$ ,若  $f(V_{0M} - V_{error}) \leq f(V_{0M})$ ,则取值  $V_{0min} = V_{0M}$ ,若  $f(V_{0M} - V_{error}) > f(V_{0M})$ ,则取值  $V_{0max} = V_{0M}$ ;
- 5) 满足约束条件  $|V_{0max} - V_{0min}| \leq V_{error}$  时,停止循环,否则返回步骤3);
- 6) 求解得到命中概率最大时,弹丸对目标的命中概率  $P = P_{max}$  和最优弹丸初速  $V_0 = V_{0best}$ 。

#### 3.2 射击诸元解算

根据给定的目标信息,为了使弹丸命中目标,必须向舰炮装订相应的射击诸元。对于新型舰炮,射击诸元包含弹丸初速  $V_0$ 、舰炮的稳定方向瞄准角  $\beta$ 、稳定高低瞄准角  $\varphi$  以及弹丸飞行时间  $t_f$ ,即  $(V_0, \beta, \varphi, t_f)$ ,求解流程如图3所示。

由3.1节可以得到以命中概率最大为约束时的弹

丸初速  $V_0$ ，通过弹道解算，可以求取弹丸飞行时间  $t_f$  和弹丸射角  $\theta_0$ ，稳定高低瞄准角  $\varphi$  为

$$\varphi = \theta_0 + \Delta\varphi_0 \quad (18)$$

式中： $\Delta\varphi_0$  为舰炮高低零位修正量。而射击诸元稳定方向瞄准角  $\beta$ ，可以根据图4中目标和舰方位信息，通过以下方式进行计算。

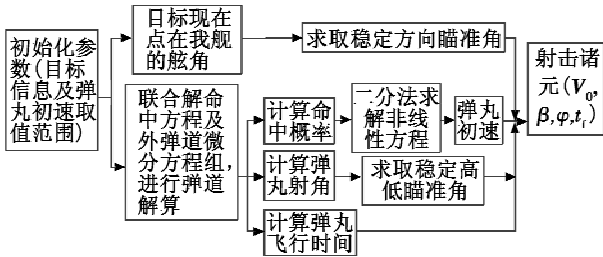


图3 射击诸元求解流程图

Fig.3 Flow chart for solving the shooting parameters

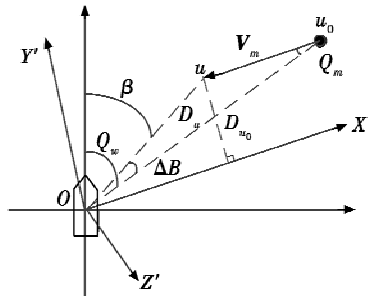


图4 稳定方向瞄准角求解示意图

Fig.4 Schematic diagram of solving steady direction aiming angle

由目标方位角  $B_m$  与目标航向  $C_m$ ，求取目标舷角  $Q_m$  为

$$Q_m = \begin{cases} B_m - \pi - C_m & 0 \leq C_m < B_m \\ B_m + \pi - C_m & B_m \leq C_m < 2\pi \end{cases} \quad (19)$$

式中： $C_m = 2\pi$  时，相当于  $C_m = 0$ 。

由图4中  $Ouu_0$  三角形，根据余弦定理可求得

$$\Delta B = \arccos \frac{D_u^2 + D_{u_0}^2 - (V_m t_f)^2}{2D_u D_{u_0}} \quad (20)$$

式中： $D_{u_0}$  为目标现在点与我舰斜距； $D_u$  为目标提前点与我舰斜距； $V_m$  为目标速度。

因此，可得到目标提前点目标舷角为

$$Q'_m = Q_m + \Delta B \quad (21)$$

则舰炮对目标的稳定方向瞄准角为

$$\beta = \begin{cases} Q_w - \Delta B + \Delta\beta_0 & Q_m < 0 \\ Q_w + \Delta\beta_0 & Q_m = 0 \text{ 或 } Q_m = \pm\pi \\ Q_w + \Delta B + \Delta\beta_0 & Q_m > 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中： $\Delta\beta_0$  为舰炮方向零位修正量； $Q_m$  取值范围  $(-\pi, \pi)$ 。

### 4 仿真分析

对于初速可控的舰炮，对视距内目标进行打击，以

命中概率最大为约束条件，求解射击诸元  $(V_0, \beta, \varphi, t_f)$ 。以某驱逐舰目标为例，舰长  $L_j = 155$  m，舰宽  $B_j = 20.5$  m，目标航速 25 kn，航向  $C_m = 300^\circ$ ，目标在我舰舷角  $Q_w = 30^\circ$ ，我舰航向  $C_w = 0^\circ$ ， $\Delta\beta_0 = \Delta\varphi_0 = 0^\circ$ 。弹丸初速取值范围  $[V_{0min}, V_{0max}]$  根据舰炮的性能确定，本文中取  $V_{0min} = 900$  m/s， $V_{0max} = 3000$  m/s，弹丸初速误差  $V_{error} = 20$  m/s。对视距内不同距离的目标进行打击，保持目标运动要素不变，进行火控解算。表1给出了目标在不同距离时新型舰炮的射击诸元解算结果。

表1 新型舰炮射击诸元解算列表

Table 1 Shooting parameters of the new type of shipboard gun

目标距离/km	射击诸元				命中概率/%
	最优弹丸初速 $V_0/(m \cdot s^{-1})$	方向瞄准角 $\beta/(^\circ)$	高低瞄准角 $\varphi/(^\circ)$	弹丸飞行时间 $t_f/s$	
3	3000.0	29.995	0.1072	1.12	25.42
6	3000.0	29.995	0.2536	2.50	13.48
9	917.1	29.979	5.3339	14.83	9.63
12	961.8	29.976	8.1280	21.98	7.95
15	1178.8	29.979	7.9535	24.94	6.49
18	1457.5	29.981	7.3594	26.84	5.32
21	1791.5	29.983	6.8032	28.40	4.44
24	2142.6	29.984	6.5983	30.43	3.77
27	2569.8	29.985	6.3038	32.04	3.25
30	3000.0	29.985	6.3121	34.27	2.84

由表1可知，在打击视距内目标时：

- 1) 对同一个距离的目标进行打击，采用上述模型和方法，在给定的弹丸初速误差内，以弹丸对目标的命中概率最大为约束，进行初速可控舰炮的火控解算，可以求解得到舰炮的射击诸元  $(V_0, \beta, \varphi, t_f)$ ；
- 2) 随着目标距离的增加，最优弹丸初速由最大值快速降低，然后逐渐增加至最大值，弹丸对目标的命中概率则逐渐降低。

### 5 结束语

打击视距内目标时，基于命中概率与弹丸初速之间的非线性变化关系，提出了一种新型舰炮射击诸元解算方法，经仿真验证得到如下结论：

- 1) 提出射角逼近法确定弹丸射角，以求解简化的弹丸运动微分方程组得到的射角值作为射角初始角，解决了初始射角求解问题，求解方法简便；
- 2) 以弹丸对目标的最大命中概率为约束条件，采用二分法确定最优弹丸初速，并将其作为射击诸元要素之一固定下来，为其余射击诸元的解算提供基础；
- 3) 随着目标距离的增加，最优弹丸初速受到舰炮发射初速  $V_{0max}$  的限制。

本文提出的新型舰炮射击诸元求解思路，为新型

舰炮火控解算提供了理论参考,对于新型舰炮射表制定等实际工程应用具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 付彩越. 美国海军新概念武器现状和发展[J]. 舰船科学与技术, 2017, 39(2): 151-154.
- [2] 傅冰, 卢发兴, 孙世岩, 等. 舰艇武器火控基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [3] 程哈, 陈维义, 周敏佳. 舰艇摇摆作用下火炮射击诸元求解模型分析[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(11): 2484-2490.
- [4] 秦鹏飞, 崔青春, 李硕, 等. 基于大口径火炮的实时弹道解算方法研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2015, 36(1): 68-72.
- [5] 邓方, 崔静, 方浩, 等. 基于改进粒子群优化的弹道并行求解算法[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(4): 391-396.
- [6] 乔志明, 雷彬, 吕庆敖, 等. 电磁轨道炮关键技术与发展趋势分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(2): 91-95.
- [7] 尚晓兵. 电磁轨道炮外弹道射击精度分析与评估技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [8] HUNDERTMARK S, LANCELLE D. A scenario for a future European shipboard railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1194-1197.
- [9] GALLANT J, VANDERBEKE E, ALOUAHABI F, et al. Design considerations for an electromagnetic railgun to be used against antiship missiles [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10): 2800-2804.
- [10] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [11] 刘俊邦, 陈远江, 李涛. 面向实战的突击炮解命中问题误差分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(3): 30-35.
- [12] 邢昌凤, 李敏勇, 吴玲. 舰载武器系统效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [13] 卢发兴, 贾正荣, 吴玲. 舰炮初速对命中点预测误差影响分析[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(s1): 21-25.
- [14] 邢昌凤, 隋江波. 舰炮武器对驱逐舰目标射击毁伤定律研究[J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(4): 48-52, 70.
- [15] GOMEZ C, PRADO H, TROFIMCHUK S. Separation dichotomy and wavefronts for a nonlinear convolution equation [J]. Journal of Mathematical Analysis & Applications, 2014, 420(1): 1-19.

(上接第 23 页)

由于仿真中最优轨迹的攻角变化较小,其角速度变化量也相对较小,三通道的信号输出以角秒为单位,仿真实验能够明显地展示出副翼、升降舵和方向舵的偏转对飞行器姿态的有效控制。在最后的跟踪控制实验中,系统能够对副翼的输出信号进行识别,使得飞行器能跟踪最优状态的姿态角。角速度平均跟踪误差为  $6.9 \times 10^{-5} (^{\circ})/s$ , 飞行器可以做出有效调姿,进而稳定地沿着最优轨迹运行。

## 4 结 束 语

本文设计了 LGR 配点下的 hp 自适应伪谱法,使用 SNOPT 求解器对高超声速飞行器进行轨迹优化,并解算出实时的角速度变化,进而得出飞行器副翼、升降舵和方向舵的输出信号,最后使用 Simulink 构建角速度变化跟踪模型对滚转通道的角速度进行跟踪。仿真结果显示,系统能够很好地实现姿态跟踪,使得飞行器沿最优轨迹再入飞行。

### 参 考 文 献

- [1] 张灿, 胡冬冬, 叶蕾, 等. 2017 年国外高超声速飞行器技术发展综述[J]. 战术导弹技术, 2018(1): 47-50, 78.
- [2] 刘世钰. 高超声速飞行器气动特性数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [3] 陈凯捷, 戈新生. 基于 Legendre 伪谱法的空间机器人姿态运动的最优控制[J]. 国际航空航天科学, 2015, 3(4): 77-83.
- [4] 王璐. 伪谱法在最优控制问题中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [5] WANG X W, PENG H J, ZHANG S, et al. A symplectic pseudospectral method for nonlinear optimal control problems with inequality constraints [J]. ISA Transactions, 2017, 68: 335-352.
- [6] 洪蓓, 辛万青. 基于 hp 自适应伪谱法的固体运载火箭轨迹优化[J]. 航天控制, 2012, 30(4): 18-22, 31.
- [7] 夏红伟, 李秋实, 李莉, 等. 基于 hp 自适应伪谱法的飞行器再入轨迹优化与制导[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(6): 818-823.
- [8] 邱文杰, 孟秀云. 基于 hp 自适应伪谱法的飞行器多阶段轨迹优化[J]. 北京理工大学学报: 自然科学版, 2017, 37(4): 412-417.
- [9] 刘渊博, 朱恒伟, 黄小念, 等. 伪谱法求解非光滑最优控制问题的网格优化[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2396-2399.
- [10] 张广豪. 高超声速飞行器滑翔再入轨迹优化与跟踪制导方法研究[D]. 西安: 火箭军工程大学, 2017.
- [11] YU X, LI P, ZHANG Y, et al. The design of fixed-time observer and finite-time fault-tolerant control for hypersonic gliding vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4135-4144.
- [12] 王丽英, 张友安, 黄洁. 带约束的末制导律与伪谱法轨迹优化[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.