

引用格式: 黄威, 任洋. 基于自适应步长的空空导弹攻击区解算方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(5): 55-58. HUANG W, REN Y. Adaptive step-size based calculation of air-to-air missile launch envelopes[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(5): 55-58.

基于自适应步长的空空导弹攻击区解算方法

黄 威, 任 洋

(空军工程大学航空机务士官学校, 河南 信阳 464000)

摘 要: 针对传统空空导弹攻击区解算过程中解算精度和速度的矛盾, 提出了基于自适应步长黄金分割法的边界搜索方法。在建立导弹和目标三自由度弹道模型的基础上, 引入脱靶量为自适应变量, 对传统黄金分割法步长进行改进。仿真结果表明, 该算法可在部分提高攻击区解算速度的前提下, 较大程度提升计算精度, 满足机载火控系统攻击区解算的实时性和精度要求。

关键词: 空空导弹; 火力控制系统; 攻击区解算; 黄金分割法; 自适应步长

中图分类号: TP762.2 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2019.05.010

Adaptive Step-Size Based Calculation of Air-to-Air Missile Launch Envelopes

HUANG Wei, REN Yang

(Aviation Maintenance NCO Academy, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Aimed at the contradiction between the accuracy and speed of the traditional air-to-air missile attack area in calculation process, a boundary search algorithm based on adaptive step-size golden section method is proposed. The three degree-of-freedom ballistic models are established for the missile and the target. Then, the miss distance is used as the adaptive variable to improve the size of the traditional golden section method. Simulation results show that the algorithm can improve the attack area calculation accuracy to a large extent under the premise of increasing calculation speed. The method can meet the requirements of airborne fire control system on real-time performance and accuracy for the attack area calculation.

Key words: air-to-air missile; fire control system; attack area calculation; golden section method; adaptive step-size

0 引言

空空导弹可攻击区的计算对于飞机空中占位和对抗具有重要意义, 一直是相关领域研究的重点^[1-7]。张平等^[3-5]提出了利用经典的等距分割及黄金分割对空空导弹攻击区远近边界进行搜索法, 较大地节省了运算时间, 但运算精度还有待提高; 王海涛等^[6-7]采用神经网络及遗传算法对攻击区远近边界进行搜索, 提高了搜索精度, 但神经网络需要经验边界的训练, 应对目标高速机动能力较差; 而遗传算法所需运行时间较长, 不利于空中实时应用。

本文在预估边界区间的基础上, 引入脱靶量作为自适应变量, 对传统的黄金分割法进行了改进, 用此方法对空空导弹攻击区远近边界进行搜索, 可减少搜索循环次数, 在提高一定运算速度的同时, 较大程度地提高边界搜索精度。

1 弹目模型及控制方法

1.1 空空导弹模型

为有效提高实时解算效率, 采用空空导弹三自由度质点模型, 并做出如下假设:

- 1) 忽略导弹攻角及侧风的影响;
- 2) 积分步长时间内导弹参数不发生变化;
- 3) 以地面坐标系为惯性坐标系, 不考虑地球自转的影响。

导弹的运动学方程组为^[8]

收稿日期: 2018-05-30

修回日期: 2019-02-28

作者简介: 黄 威(1971—)男, 河南息县人, 硕士, 副教授, 研究方向为航空火力指挥与控制。

$$\begin{cases} \dot{x}_m = v_m \cos \theta_m \cos \varphi_m \\ \dot{z}_m = v_m \cos \theta_m \sin \varphi_m \\ \dot{y}_m = v_m \sin \theta_m \\ \dot{v}_m = \frac{(P_m - D_m)}{m_m} - g \sin \theta_m \\ \dot{\theta}_m = \frac{(n_{my} - \cos \theta_m) g}{v_m} \\ \dot{\varphi}_m = \frac{n_{mz} g}{v_m \cos \theta_m} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_m 为导弹质量; (x_m, z_m, y_m) 为导弹所处位置; v_m, θ_m, φ_m 分别为导弹的速度、弹道倾角和偏角; P_m, D_m 分别为导弹的推力和所受阻力; n_{my} 和 n_{mz} 分别为导弹在俯仰和偏航方向上的过载。

1.2 目标运动模型

目标飞行运动模型为

$$\begin{cases} \dot{v}_t = a_{tx} \\ \dot{\theta}_t = a_{ty}/v_t \\ \dot{\varphi}_t = a_{tz}/(v_t \cos \theta_t) \\ \dot{y}_t = v_t \sin \theta_t \\ \dot{x}_t = v_t \cos \theta_t \cos \varphi_t \\ \dot{z}_t = v_t \cos \theta_t \sin \varphi_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_t, θ_t, φ_t 分别为目标的速度、俯仰角和偏航角; a_{tx}, a_{ty}, a_{tz} 为地面坐标系中目标飞行加速度分量; (y_t, x_t, z_t) 为目标的三维运动轨迹。本文计算过程中假设目标的运动状态已知。

1.3 相对运动方程组

弹目相对运动方程组为

$$\begin{cases} r_x = x_t - x_m \\ r_y = y_t - y_m \\ r_z = z_t - z_m \\ r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \\ q_\varepsilon = \arcsin(r_y / \sqrt{r_x^2 + r_z^2}) \\ q_\beta = \arctan(r_z / r_x) \end{cases} \quad (3)$$

式中: r 为目标相对导弹的位置矢量; r_x, r_y, r_z 为 r 在地面坐标系下的分量; q_ε 为弹目视线倾角; q_β 为弹目视线偏角。

1.4 控制方法

计算导弹的弹道过程采用比例导引法, 导弹速度方向变化率 $\dot{\theta}$ 与弹目视线角速率 \dot{q} 满足

$$\dot{\theta} = K \dot{q} \quad (5)$$

式中 K 为导引系数。

弹上导引头最大视线跟踪角速度为 ω_{\max} , 有

$$\dot{q} = \begin{cases} \omega_{\max} \operatorname{sgn} \dot{q} & |\dot{q}| \geq \omega_{\max} \\ \dot{q} & |\dot{q}| < \omega_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

弹上舵机的延时特性可以简单描述为

$$\dot{n} = \frac{n_i - n_{i-1}}{\tau_m} \quad (7)$$

式中: n 为导弹的实际过载; τ_m 表示系统反应时间。舵机的实际控制过载为

$$n = n_{i-1} + \dot{n} \Delta t \quad (8)$$

式中 Δt 为控制时间积分步长。

导弹的实际过载 n 受到其可用过载 n_K 的限制, 两者关系为

$$n = \begin{cases} n & |n| \leq n_K \\ n_K \operatorname{sgn} n & |n| > n_K \end{cases} \quad (9)$$

2 自适应步长的可攻击区解算方法

2.1 可攻击区远近边界预估

为减少运算量, 本文采用目标水平等速机动时的可攻击距离作为远近边界预估值^[9], 可利用如下近似方法求得, 即

$$D_0 = \begin{cases} (2300 + H_0/3) \sqrt{0.8/M_{m0}} + d & \text{求远包线} \\ 270 + d & \text{求近包线} \end{cases} \quad (10)$$

式中: D_0 为初始计算距离; H_0 为起始计算高度; M_{m0} 为导弹的起始马赫数; d 为考虑不同方位角的修正量, 其计算方法为

$$d = \begin{cases} 2000 \times (M_{m0} - M_{t0} \cos \psi) & \text{求远包线} \\ 200 \times (M_{m0} - M_{t0} \cos \psi) & \text{求近包线} \end{cases} \quad (11)$$

式中: M_{t0} 为目标的起始马赫数; ψ 为起始方位角。

2.2 自适应步长黄金分割法的距离边界搜索

1) 确定搜索区间。从初始距离 D_0 开始计算, 每次增加或减少 ΔD 距离, 当前后两次命中结果发生改变时, 以此两次的距离作为求 S 远(或 S 近)的区间 $[a_0, b_0]$ 。其中 ΔD 为

$$\Delta D = \begin{cases} 100 + H_0/60 & \text{求远边界} \\ 30 + H_0/100 & \text{求近边界} \end{cases} \quad (12)$$

2) 引入脱靶量为自适应变量^[9]。导弹判定“命中”时, 即认定其进入以目标为中心的有效杀伤半径 R_s 范围内, 但由于导弹进入的相对角度不同, 可能造成与目标交会时的最近距离(脱靶量)不同, 杀伤效果也会产生差异。

当导弹进入以目标为中心的有效杀伤半径时, 连续判断导弹与目标相对距离变化率 \dot{D} 的符号。当 \dot{D} 的符号由负变为正时, 即导弹与目标的距离由近变远的时刻, 记录前一个时刻导弹的坐标 $A(x_a, y_a, z_a)$ 和后一个时刻导弹的坐标 $B(x_b, y_b, z_b)$, 假设此时目标的坐标为 $T(x_t, y_t, z_t)$, 则脱靶量为

$$R_{cl} = \sqrt{\frac{(U \cdot p - V \cdot m)^2 + (V \cdot l - W \cdot p)^2 + (W \cdot m - U \cdot l)^2}{l^2 + m^2 + p^2}} \quad (13)$$

式中, l, m, p, W, U, V 是为简化公式而选取的中间变量 $l = x_b - x_a, m = y_b - y_a, p = z_b - z_a, W = x_t - x_a, U = y_t - y_a, V = z_t - z_a$ 。

3) 自适应步长黄金分割法。一般利用黄金分割法对导弹攻击区远边界进行搜索时^[10], 采用

$$R_g = a_i + 0.618(b_i - a_i) \quad (14)$$

式中: R_g 为当次仿真所选取的距离; a_i, b_i 为每一循环的起始区间边界。在分割点位置进行数值积分, 判断导弹是否命中目标。若击中目标, 令 $a_i = R_g, b_i = b_{i-1}$; 否则令 $a_i = a_{i-1}, b_i = R_g$ 重新循环计算, 直至 $|b_i - a_i| < d_s, d_s$ 为区间给定精度。攻击区近边界搜索与此类似。

采用一般黄金分割法进行搜索, 不能在靠近导弹攻击区实际边界时对搜索步长进行调节, 否则会造成搜索精度不高, 并且搜索时间较长。本文利用脱靶量与导弹杀伤半径的比例关系对黄金分割的搜索步长进行自适应改进, 即

$$R_g = \begin{cases} a_i + 0.618 \left(1 - \frac{4R_{CA}}{5R_s} \right) (b_i - a_i) & \text{上一循环命中} \\ a_i + 0.618(b_i - a_i) & \text{上一循环脱靶} \end{cases} \quad (15)$$

采用此种方式, 可在接近“命中”与“脱靶”边界时减少搜索步长, 提高边界计算精度, 在距离边界较远时适当放大步长, 节省搜索时间。

3 算法仿真

3.1 仿真初始条件及中止条件

仿真初始条件采用文献[8]所述。在导弹未命中目标时, 仿真中断条件采用典型攻击区的仿真中断条件^[11], 导弹成功命中目标且引信引爆战斗部实现对目标的杀伤时, 中断条件为 \dot{D} 的符号由负变为正。

3.2 仿真结果及分析

假设目标无法向过载, 取作战高度 $H = 6$ km, 分别采用一般黄金分割法和改进黄金分割法对导弹攻击区进行仿真, 结果如图1所示。

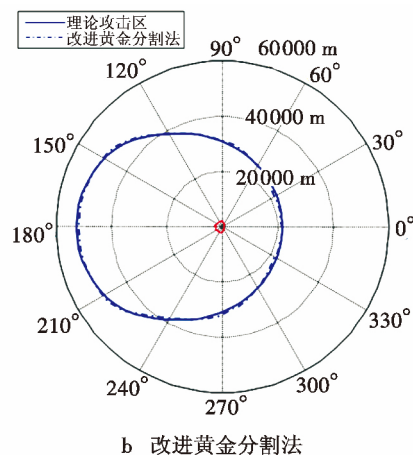
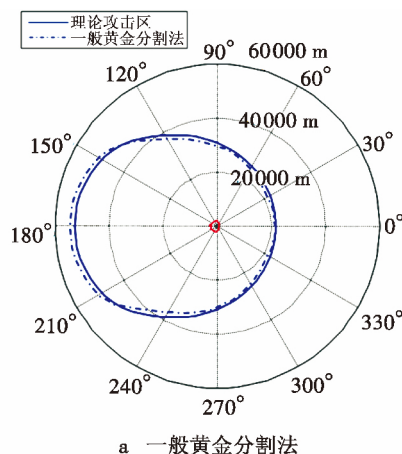


图1 无机动时一般及改进黄金分割法比较

Fig. 1 Comparison of two methods when the target has no maneuvering

由图1可知: 一般黄金分割法由于步长固定, 在导弹对目标进行迎头攻击时, 边界搜索出现了较大误差, 并超出了理论边界; 而采用改进黄金分割法对远近边界进行搜索时, 其精度明显高于一般黄金分割法, 特别是在接近理论边界时, 由于搜索步长变小, 其搜索更贴近边界内沿, 从而提高了精度。

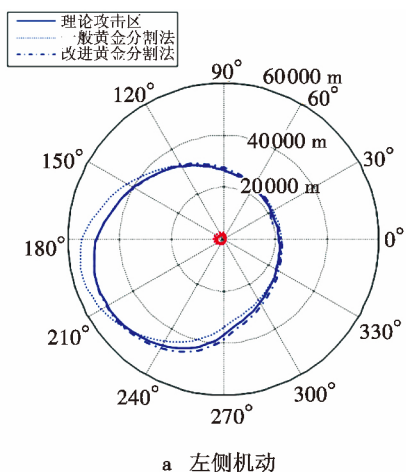
由表1可知, 两种方法在边界搜索精度上差距较大, 改进黄金分割法明显优于一般黄金分割法, 在仿真时间上, 两种方法比较接近, 但改进黄金分割法用时相对较少。

表1 目标无机动时边界搜索误差

Table 1 Boundary search error when the target has no maneuvering

	最大误差/m	平均误差/m	仿真时间/s
一般黄金分割法	837.2	161.4	5.56
改进黄金分割法	45.9	10.7	3.25

为检验两种方法在目标机动时的边界搜索效果, 考虑目标在水平面内分别向左或向右机动。设定目标过载 $n_t = -2g$, 表示目标向左侧机动; $n_t = 2g$, 表示目标向右侧机动。仿真结果如图2所示。



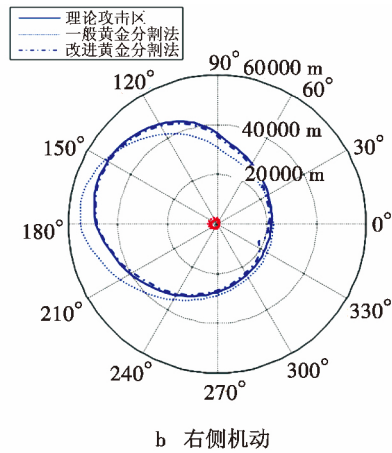


图 2 左、右侧机动时两种方法比较

Fig. 2 Comparison of two methods when the target moves to the left/right side

由图 2 可知,当目标以一定过载向某一方向机动时,导弹可攻击区即向目标机动方向偏转。结合图 2a、图 2b 可以看出,当目标发生机动时,采用一般黄金分割法进行攻击区边界搜索的误差明显增大,无法有效地实时跟随目标运动趋势;而改进黄金分割法由于对步长的控制,可以对运动目标实现有效的分析跟随,使实时解算的攻击区更接近理论攻击区。两种方法在目标运动时,解算攻击区所用时间都有部分延长,但相对于其他算法,用时仍然较短,更接近于实时解算水平,如表 2 所示。

表 2 目标机动时边界搜索误差

Table 2 Boundary search error for target maneuvering

	最大误差/m	平均误差/m	仿真时间/s
一般黄金分割法	1 653.7	804.1	6.27
改进黄金分割法	296.5	76.6	4.76

4 结论

通过仿真验证,本文提出的基于自适应步长的空

空导弹攻击区解算方法可以有效地解决搜索精度和运算速度之间的矛盾,在较大幅度提升精度的基础上,减少了部分运算时间。仿真结果可用于战术研究和分析,对火控系统的实时攻击区解算具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 周志刚. 航空综合火力控制原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] RAO G A, MAHULIKAR S P. Effect of atmospheric transmission and radiance on aircraft infrared signatures [J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(4) : 1046-1054.
- [3] 张平, 方洋旺, 金冲, 等. 空空导弹攻击区实时解算的新方法 [J]. 弹道学报, 2010, 22(4) : 11-14, 18.
- [4] 周灿辉, 周德云, 聂志强, 等. 中程空空导弹可攻击区解算的新方法 [J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(7) : 54-56, 60.
- [5] 杜昌平, 周德云, 江爱伟. 一种空空导弹可攻击区快速算法 [J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(6) : 682-685.
- [6] 王海涛, 佟惠军, 王洋. 基于改进的 BP 神经网络空空导弹攻击区解算方法 [J]. 电子设计工程, 2014, 22(3) : 28-30, 33.
- [7] 俞吉, 周德云, 周灿辉. 基于云模型空空导弹攻击区的拟合方法 [J]. 火力与指挥控制, 2018, 38(7) : 32-35.
- [8] 罗畅, 黄长强, 蔡亚伟, 等. 无人作战飞机对空自主攻击占位研究 [J]. 电光与控制, 2014, 21(9) : 19-25.
- [9] 崔晓宝, 姚伟, 王明志. 弹道计算格斗导弹攻击区的一种快速模拟计算法 [J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(11) : 133-136.
- [10] 王志刚, 张宁, 李伟. 一种空空导弹攻击区的快速解算方法 [J]. 固体火箭技术, 2014, 37(4) : 448-452.
- [11] 李廷杰. 导弹武器系统的效能及其分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.