

一种考虑风场影响的导弹动态可攻击区 智能计算方法*

王 昕 南 英

南京航空航天大学航天学院, 南京 211100



摘 要 针对导弹发射后可攻击区的计算问题, 基于导弹与目标的运动模型, 论证了风场对弹道以及命中结果的影响, 在此基础上考虑目标机动和随机风场的影响, 提出了一种精度较高、运算量较小的平移数值算法, 对导弹的可攻击区进行了数值仿真计算并研究了其物理性质。仿真实验结果表明, 通常情况下, 发射一段时间后拦截导弹的可攻击区范围会受随机风场和敌我态势的改变而产生变化, 相对于传统的导弹可发射区只能反应射前敌我态势, 实时性较差的缺点, 本文所提出的可攻击区算法对未来战场态势快速变化的空战环境具有更好的适应性。

关键词 可攻击区; 空空导弹; 数值计算; 随机风场

中图分类号: V249 **文献标识码:** A

文章编号: 1006-3242(2022)06-0074-06

An Intelligent Calculation Method of Missile Dynamic Attack Zone under Consideration of the Influence of Wind Field

Wang Xin, Nan Ying

College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China

Abstract Aiming at the calculation of the missile's attack zone after launch, based on the motion model of the missile and the target, the influence of the wind field on the trajectory and hit results is demonstrated. On this basis, under consideration of the influence of the target's maneuver and random wind field, a translation numerical algorithm with high precision and less computation is proposed. The missile's attack zone is numerically simulated and its physical properties are studied. The simulation results show that, generally, the range of the interceptor missile's attack zone can be affected by the random wind field and the change of the enemy and friend situation after a period of time. Compared with the traditional missile's attack zone which can only reflect the enemy and friend situation before the launch, and has poor real-time performance, the attack zone algorithm proposed in this paper has better adaptability to the air combat environment with rapid changes in the future battlefield situation.

Key words Attack zone; Air-to-air missile; Numerical calculation; Random wind field

* 航空科学基金(ASFC-201929052002)

收稿日期: 2022-07-07

作者简介: 王昕(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为导弹的制导与控制。E-mail: wangxinwang@nuaa.edu.cn;
南英(1964-), 男, 教授, 主要研究方向为飞行力学与控制、飞行器设计与飞行仿真。E-mail: nanying@nuaa.edu.cn。

0 引言

对导弹在发射后的可攻击区算法和物理性质进行了研究,传统的导弹可发射区指的是发射时刻我方导弹可能拦截到敌方飞行器的一片空间区域^[1],是飞行员和防空指挥员在对抗中决定是否进行机动占位^[2]的重要参考,目前大多数的导弹在发射前由火控雷达计算导弹可发射区。可发射区的计算可分为直接模拟法^[3]、查表插值法^[4]和各种逼近拟合法^[5],这些计算方法有以下特点:

1) 模拟法通过弹目相对运动以及动力学模型直接计算可攻击区边界,但是在搜索可攻击区边界时会遇到计算量大,精度低且耗时长的问题,改进的快速模拟法^[6]通过引入变步长^[7],3-D 动力学模型^[8]等方法加快积分循环次数,但是简化的模型面容易导致计算结果失去真实性;

2) 在工程中应用较多的查表插值法是对影响可攻击区的多元因素建立表格,通过对表格中离散数据进行线性插值,得到所需的可攻击区数值,但其对计算机内存容量要求高;

3) 逼近拟合法主要有神经网络拟合法^[9]和多项式拟合法^[10]。后者存在多项式系数与影响可攻击区变量之间具体对应关系难以建立且系数迭代确定需要大量数据支撑的缺点^[11]。

本文提出了计算可攻击区的平移数值法,并对目标机动、风场对可攻击区范围的影响进行了数值仿真,对动态可攻击区的物理性质与变化进行了仿真研究,验证了算法本身的精度和收敛性,以及平移数值算法和评估方法的有效性。

1 导弹动态可攻击区的数学描述

1.1 攻击区的数学描述

导弹发射后的动态可攻击区是指以 T 时刻导弹所处的位置为参考点,基于导弹和目标的飞行状态,双方飞行器的实时参数以及制导系统等子系统的工作状态、目标的威胁程度以及其他随机因素,满足上述所有约束条件,导弹能够命中目标的 4-D 空间区域,具体描述见式(1):

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{\max}(t) = \mathbf{f}_{R_{\max}}(\mathbf{X}_m(t), M_{msl}, \mathbf{X}_t(t), M_{tgt}, S_{tgt}(t), \xi(t)) \\ \mathbf{R}_{\min}(t) = \mathbf{f}_{R_{\min}}(\mathbf{X}_m(t), M_{msl}, \mathbf{X}_t(t), M_{tgt}, S_{tgt}(t), \xi(t)) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, \mathbf{R}_{\max} 是可攻击区的外边界; \mathbf{R}_{\min} 是可攻击区的内边界; \mathbf{X}_m 和 \mathbf{X}_t 是导弹和目标的飞行状态, M_{msl} 和 M_{tgt} 是可攻击区计算中的一些静态因素、发动机特性、制导律、最大过载和气动特性等; S_{tgt} 是目标采取的机动规避; $\xi(t)$ 是飞行过程中的随机风场。导弹和目标的相对方位关系可以用图 1 所示相对视线倾角 $\gamma_{M,T}$ 和相对视线偏角 $\psi_{M,T}$ 描述。

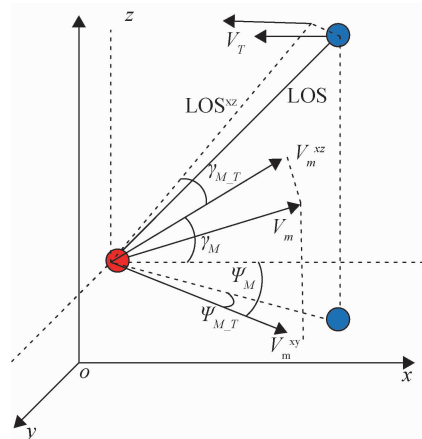


图 1 相对视线倾角和相对视线偏角

1.2 导弹的运动模型

由于攻防对抗是一个高度时敏的过程,为了保证计算结果的准确性,导弹的运动方程需要考虑姿态变化,建立导弹和目标模型时所采取的各种坐标系参考文献[12]。

导弹质心运动的动力学方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} m\dot{V} = P\cos\alpha - X - G\sin\theta \\ mV\dot{\theta} = P(\sin\alpha\cos\gamma_v + \cos\alpha\cos\beta\sin\gamma_v + \\ \quad Y\cos\gamma_v - Z\sin\gamma_v - G\cos\theta) \\ -mV\cos\dot{\psi}_v = P(\sin\alpha\sin\gamma_v - \cos\alpha \cdot \\ \quad \sin\beta\cos\gamma_v) + Y\sin\gamma_v + Z\cos\gamma_v \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, (α, β) 分别是攻角和侧滑角; (γ_v, ψ_v) 分别是速度倾斜角和弹道偏角; (X, Y, Z) 分别是阻力、升力和侧力;

导弹的运动学可建立在地面坐标系中,如式(3):

$$\begin{cases} \dot{x} = V\cos\theta\cos\psi_v \\ \dot{y} = V\sin\theta \\ \dot{z} = -V\cos\theta\sin\psi_v \end{cases} \quad (3)$$

(x, y, z) 是导弹在地面坐标系中的位置; θ 是弹道倾角; V 是导弹的速度大小。

导弹围绕质心转动的动力学方程如式(4):

$$\begin{cases} M_{x1} = J_{x1}\dot{\omega}_{x1} + (J_{z1} - J_{y1})\omega_{z1}\omega_{y1} \\ M_{y1} = J_{y1}\dot{\omega}_{y1} + (J_{x1} - J_{z1})\omega_{x1}\omega_{z1} \\ M_{z1} = J_{z1}\dot{\omega}_{z1} + (J_{y1} - J_{x1})\omega_{y1}\omega_{x1} \end{cases} \quad (4)$$

(J_{x1}, J_{y1}, J_{z1}) 是导弹的转动惯量; $(\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1})$ 是导弹在弹体坐标系的转动速度; (M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}) 是作用在质心的力矩在弹体坐标系各轴的分量。

导弹围绕质心转动的运动学方程如式(5):

$$\begin{cases} \dot{\vartheta} = \omega_{y1}\sin\gamma + \omega_{z1}\cos\gamma \\ \dot{\psi} = (\omega_{y1}\cos\gamma - \omega_{z1}\sin\gamma)/\cos\vartheta \\ \dot{\gamma} = \omega_{x1} - (\omega_{y1}\cos\gamma - \omega_{z1}\sin\gamma)\tan\vartheta \end{cases} \quad (5)$$

$(\vartheta, \psi, \gamma)$ 分别是导弹的俯仰角、偏航角和倾斜角。

1.3 目标的运动模型

在地面坐标系建立目标运动学模型如式(6)~(7):

$$\begin{cases} \dot{x}_t = v_t \cos\theta_t \cos\phi_t \\ \dot{y}_t = v_t \sin\theta_t \\ \dot{z}_t = -v_t \cos\theta_t \sin\phi_t \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{v}_t = n_{tx}g \\ \dot{\theta}_t = n_{ty}g/v_t \\ \dot{\phi}_t = n_{tz}g/v_t \cos\theta_t \end{cases} \quad (7)$$

(x, y, z) 是目标在地面坐标系中的位置坐标; (n_{tx}, n_{ty}, n_{tz}) 是目标的指令过载; (v_t, θ_t, ϕ_t) 分别是目标的速度、航迹倾角和航迹偏角。

2 计算可攻击区的平移数值算法

如果可以获知目标的速度、航向和高度等状态,那么对于采用比例导引法的导弹来说,就能够通过计算弹目视线的旋转速率产生制导指令,精确模拟出某个机动目标出现在战场时我方导弹的可攻击区。本节首先研究风场对飞行弹道的影响,最后在标准攻击区的搜索算法基础上,提出计算存在目标机动和风场的导弹可攻击区的平移数值法。

2.1 风场对飞行弹道的影响

为了论证平移数值算法的可行性,需要先研究风场对可攻击区内导弹飞行弹道的影响。假设导弹发射初始位置为(0,10,0)km,目标1初始位置为(20,5,1.5)km,在不同方向风场的作用下,导弹与目标的相对位置会在该方向上产生误差(取5%的误差值),为了便于观察仿真结果,将这种相对的距离

误差替换为目标的初始位置误差,目标2的初始位置增加5%后变为(21,5.25,1.575)km,目标3初始位置减少5%变为(19,4.75,1.425)km,目标采取立体U型机动来规避导弹,因目标初始位置不同所导致的弹道曲线以及飞行状态变化如图2和图3。

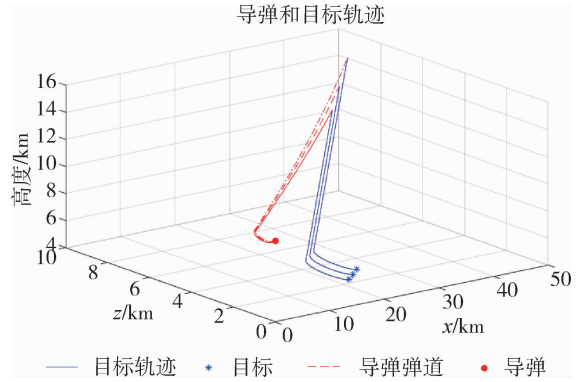
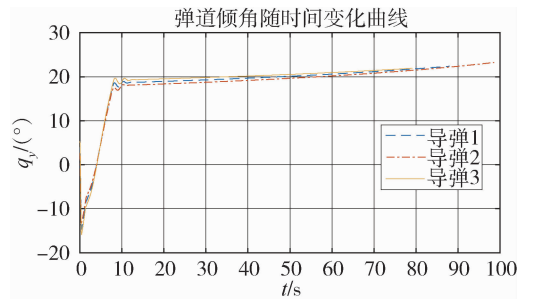
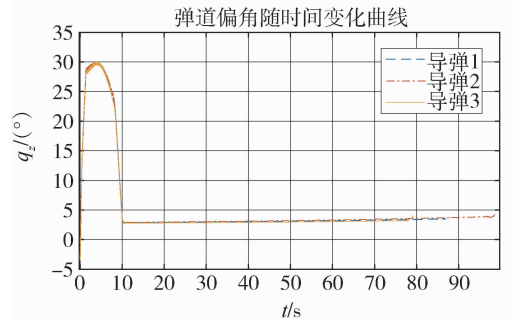


图2 导弹和目标的3-D运动轨迹



(a) 导弹的弹道倾角变化



(b) 导弹的弹道偏角变化

图3 导弹的弹道倾角和弹道偏角变化

由仿真结果可知,当目标的初始位置存在5%的偏差时,随机风场带来的位置误差对弹道曲线以及命中结果的影响并不明显,因此,可以首先不考虑随机风场,仅考虑目标的不同机动模式对导弹可攻击区的影响,建立机载或者弹载数据库,在实战中根据各类传感器获取的风场数据和目标机动类型,直接对标准可攻击区的范围进行缩放或者扩大,以修正后的区域范围作为初始值,进行实时对

抗仿真。如果脱靶,平移目标仿真轨迹使得目标轨迹矩阵的最后一个位置向量与导弹飞行轨迹矩阵的最后一个位置向量重合,此时新的目标轨迹矩阵的第一个位置向量就是可攻击区的一个远(近)边界点。

2.2 平移数值算法

算法示意图见图4。

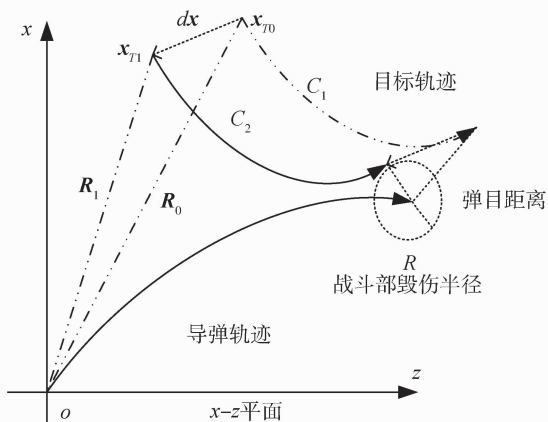


图4 平移后的命中轨迹

以目标初始位置 x_{T0} 作为外边界点, R_0 为可攻击区外边界时,拦截弹脱靶,将脱靶轨迹 C_1 按照 dx 方向后平移到 C_2 ,此时导弹刚好命中目标,以目标位置 x_{T1} 作为新的外边界点, R_1 作为可攻击区外边界距离,则得到一个新的可攻击区外边界点。

算法计算流程见图6,具体计算步骤如下:

1) 设置 t 时刻导弹和目标的初始飞行状态 $\mathbf{X}_i(t)$ 和 $\mathbf{X}_m(t)$ 。

2) $i = 1, j = 1$, 最大容许脱靶量为 R , 纵向平面最大循环次数为 $N_{\Delta y}$, 水平平面最大循环次数为 $N_{\Delta \psi}$, 平移数值法最大循环次数为 K 。

3) 计算当前相对视线倾角 $\gamma(t)_{M-T}$, 针对当前相对视线倾角进行纵向平面划分,得到每个划分点处的虚拟目标的相对视线倾角 $\gamma(t)_{M-T,i}$; 对各纵向平面相对视线倾角 $\gamma(t)_{M-T,i}$ 上的虚拟目标再进行水平面划分,设虚拟目标与拦截飞行器当前状态的相对视线偏角为 $\psi(t)_{M-T}$, 得到拟定的目标相对视线偏角 $\psi(t)_{M-T,i}$, 计算 $N_{\Delta y} \cdot N_{\Delta \psi}$ 个方向上的虚拟目标的可攻击区远边界。

4) 在标准数据表中读取最大(小)可攻击区边界距离 $R_{\max}(R_{\min})$ 。

5) 根据传感器数据建立随机风场模型 $\xi(t)$ 。

6) 设置缩放(扩大)倍数 $F, R_{\max} = R_{\max}(1 \pm F)$ 。

7) 基于式(2)~(7)进行攻防对抗,当弹目末

端距离 dr 小于导弹毁伤半径 ε 视为脱靶。如果命中,则返回6)重新计算。若脱靶,则按照脱靶距离平移目标轨迹,平移向量 $dx = x_{Mf} - x_{Tf}, x_{Mf}$ 是导弹脱靶时的最终位置, x_{Tf} 是目标规避成功时的最终位置。

8) 重置目标的新初始位置 x_{T1} , 记目标脱靶轨迹的初始位置 x_{T0} , 则 $x_{T1} = x_{T0} + (x_{Mf} - x_{Tf}), x_{T1}$ 具体表达式如式(6), 根据式(6)得到的新初始位置 x_{T1} , 得到式(1)中的 $R_{\max}(R_{\min})$ 。

9) 判断 $j \leq N_{\Delta \psi}$ 。若是,则 $j = j + 1$, 转到4); 若否,则转10)。

10) 判断 $i \leq N_{\Delta y}$ 。若是,则 $i = i + 1, j = 1$, 转入4); 若否,输出所有边界点坐标,可以得到该方向和高度的可攻击区远边界。

3 仿真校验

3.1 目标机动对可攻击区范围特性的影响

目标位于可攻击区边缘,导弹在 $t = 0s$ 发射,迎面攻击目标, $t = 10s$, 目标开始进行U形机动, $t = 30s$, 此时弹目相对运动关系为尾追攻击, 仿真结果见图5。

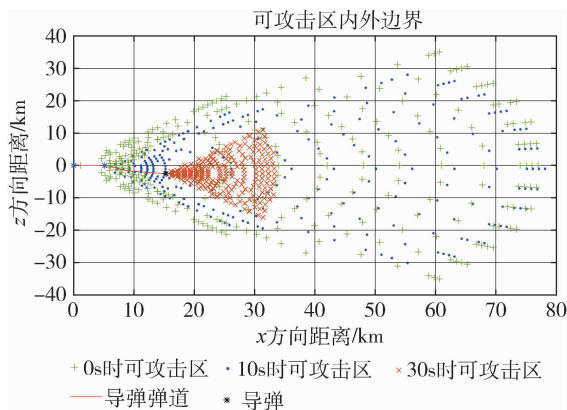


图5 $x-z$ 平面的可攻击区

$t = 10s$ 时目标开始机动,可攻击区水平距离最大值从 72.366km 变为 71.282km, 改变了 1.49%, 并且由于目标机动的方向在改变,使得 $t = 10s$ 攻击区呈现出相对 z 轴的不对称性,向 z 轴负方向漂移了 2.06km, 变化 3.5%。 $t = 30s$ 时目标逃逸机动完毕,发动机做功完毕,由于气动阻力对导弹能量的消耗,可攻击区的范围急剧缩小,相对于 $t = 10s$ 的可攻击区边界范围在 z 方向和 x 方向的变化率分别达到了 53% 和 75.9%。 仿真结果表明,当目标在可攻击区边缘时,发射后的动态可攻击区会产生较大的变化,飞行时间越长,目标采取的反制措施越多,

可攻击区的变化就越明显。

3.2 风场对可攻击区范围的影响

假设导弹直线飞行,迎头攻击目标,目标不机动,对比在 $t = 0\text{s}$ 时的可攻击区与 $t = 30\text{s}$ 时的可攻击区。风场方向设置为 180° 和 0° ,导弹分别逆风飞行和顺风飞行,仿真结果如图 6 所示。假设 10km 高度的平均风速大小为 60m/s ,仿真结果见图 7。

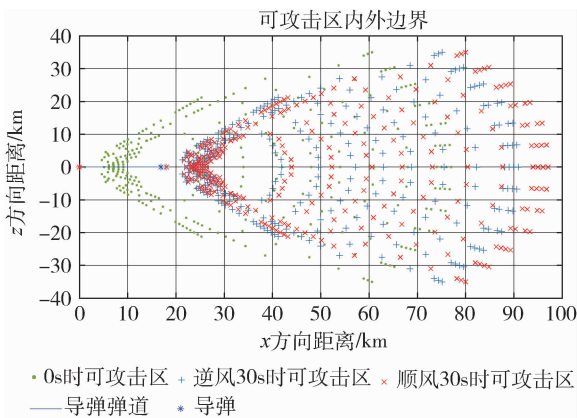


图 6 $x - z$ 平面的可攻击区

图 7 中,在 $t = 0\text{s}$ 时,导弹可攻击区的水平距离是 $[4.634, 77]\text{km}$, $t = 30\text{s}$ 时,逆风飞行的可攻击区的水平距离是 $[21.32, 90.9]\text{km}$,由于风场引起的攻击区最远边界距离减小了 3.84% ,顺风飞行的可攻击区的水平距离是 $[21.69, 97.07]\text{km}$,由于风场引起的攻击区最远边界距离增加了 4.16% ,仿真结果表明,在定向的大小可变的风场中,飞行的导弹动态可攻击区会随风场方向漂移,逆风时减小,顺风时增大。

3.3 平移数值算法实时性和精度研究

以攻击区边界误差值(通过在程序中改变导弹战斗部杀伤边界值实现)和迭代次数作为评价指标,比较平移数值法和传统二分法在迭代次数和计算误差上的优劣。假设导弹和目标初始高度均为 10km ,初始速度均为 300m/s ,对比结果如图 7。

当误差容许值较大时,平移数值法并未表现出明显优势。但随着误差容许的增大,平移数值法的误差下降速度更快,算法迭代次数更少,在第 20 次时,平移数值法的误差已经收敛至 22m ,并且很快收敛至 20m 以下;而二分法最终才收敛至 75m 左右。考虑空空导弹的战斗部杀伤半径在 $(10\text{m} \sim 20\text{m})$ 之间,传统二分法较大的脱靶误差难以满足实战需求。

为了进一步验证平移数值法的精度,比较平移数值法和进退法。风场设置为平均风速的 0.5 倍

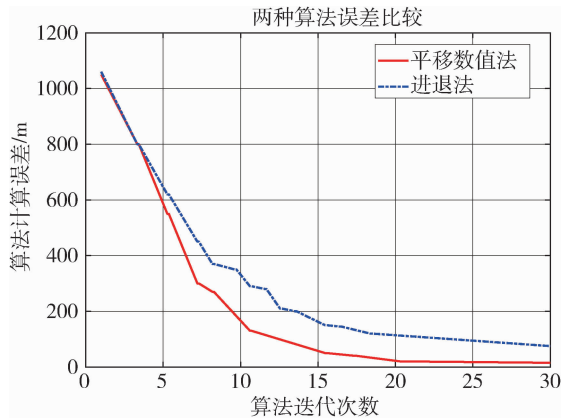


图 7 二分法和平移数值法的比较

(在 10km 处 30m/s),导弹顺风飞行,目标不机动,导弹的初始位置为 $(0, 0, 10)\text{km}$,导弹初始速度为 280m/s ,目标初始速度均为 300m/s , 10km 高度可攻击区远边界随目标进入角的变化仿真结果如图 8 ~ 9 所示。

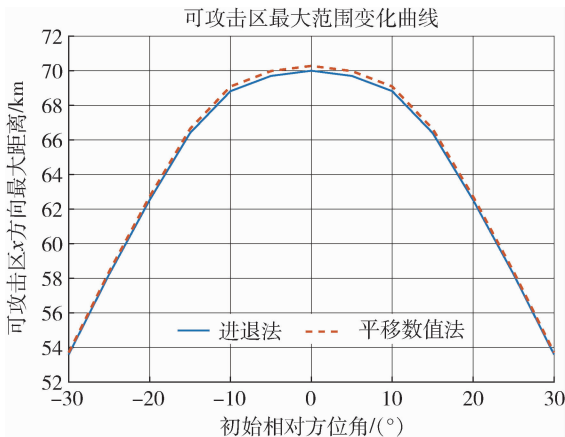


图 8 可攻击区边界随初始相对方位角的变化

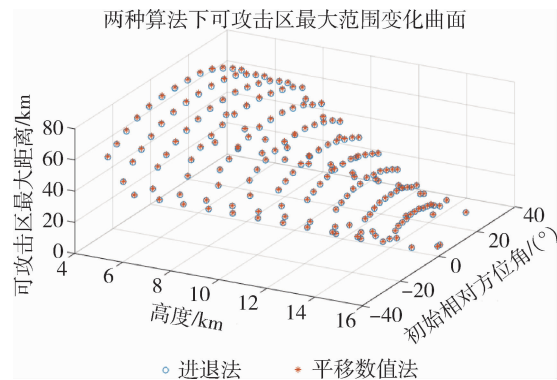


图 9 可攻击区最大范围随高度和初始相对方位角的变化

由图 8 可知随着进入角的增大,攻击区远边界距离随之下降。在同一目标进入角下,两种算法所

计算的攻击区远边界的距离的最大偏差为 0.28km, 百分比偏差为 0.4%。由图 9 可知,攻击区远边界距离也随目标高度的增加而下降。当目标高度在 [4,8]km 时缓慢下降,在 [8,15]km 时快速下降。仿真结果表明,两种攻击区计算方法所计算出的攻击区边界基本重合,精度能够满足工程应用需求。

4 结论

对导弹发射后可攻击区的计算方法和性质进行了研究,通过数值仿真研究动态可攻击区的性质,最终得出了以下结论:

1) 风场对导弹飞行弹道和命中结果的影响不明显,但会对可攻击区的范围产生影响,可攻击区的位置会在风场的范围产生小幅度漂移。

2) 影响可攻击区范围的主要因素是由目标机动所引起的弹目关系改变,以及初始的弹目相对状态,如方位差、高度差等。

3) 与传统射前可发射区的二分搜索法相比,平移数值法在计算速度和精度上都有明显优势。在对实际作战场景进行针对性优化研究后,能够满足多目标交战中精度与实时性的要求。

参 考 文 献

[1] 王杰,丁达理,许明,等. 基于目标逃逸机动预估的空空导弹可发射区[J]. 北京航空航天大学学报. 2019, 45(4): 722-734. (Wang Jie, Ding Dali, Xu Ming, et al. Air-to-air missile launchable area based on target escape maneuver estimation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2019, 45(4): 722-734.)

[2] 董海霞,邹杰,王永庭. 基于协同攻击区模型的多机最优攻击占位决策[J]. 火力与指挥控制. 2018, 43(12): 11-15. (Dong Haixia, Zou Jie, Wang Yongting. Collaborative attack area model for multi-aircrafts of optimal attack occupancy decision[J]. Fire Control & Command Control. 2018, 43(12): 11-15.)

[3] 刘代军,高晓光,李言俊,等. 中远程空空导弹允许攻击区的快速模拟算法[J]. 西北工业大学学报. 1999, 4: 530-533 (Liu Daijun, Gao Xiaoguang, Li Yanjun, et al. A fast simulation algorithm for calculating the allowable attack area for air-to-air missiles [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University. 1999, 4: 530-533.)

[4] 方学毅,刘俊贤,周德云. 基于背景插值的空空导弹攻击区在线模拟方法[J]. 系统工程与电子技术.

2019, 41(6): 1286-1293. (Fang Xueyi, Liu Junxian, Zhou Deyun. Back ground interpolation for on-line simulation of capture zone of air-to-air missiles[J]. Systems Engineering and Electronics. 2019, 41(6): 1286-1293.)

[5] 史振庆,梁晓龙,张佳强,等. 基于 GWO-BP 神经网络的攻击区解算方法[J]. 飞行力学. 2019, 37(3): 64-67 (Shi Zhenqing, Liang Xiaolong, Zhang Jiaqiang, et al. Solution of attack zone based on GWO-BP neural network[J]. Flight Dynamics. 2019, 37(3): 64-67.)

[6] 黄家成,张迎春,罗继勋. 空空导弹攻击区的快速模拟法求解[J]. 弹箭与制导学报. 2003, (S5): 132-134. (Huang Jiacheng, Zhang Yingchun, Luo Jixun. Fast simulation of air-to-air missile launch area [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance. 2003, (S5): 132-134.)

[7] 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 Wei, Ren Yang. Adaptive step-size based calculation of air-to-air missile launch envelopes[J]. Electronics Optics & Control. 2019, 26(5): 55-58.)

[8] 史振庆,梁晓龙,张佳强,等. 目标做规避机动条件下的三维空空导弹攻击区建模与仿真[J]. 弹箭与制导学报. 2019, 39(3): 97-106. (Shi Zhenqing, Liang Xiaolong, Zhang Jiaqiang, et al. Modeling and simulation analysis of 3-D air-to-air missile attack zone under the condition of target maneuvers[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance. 2019, 39(3): 97-106.)

[9] 黄国强,南英,陈芳. 基于 BP 神经网络的有控炸弹攻击区拟合分析[J]. 弹箭与制导学报. 2009, 29(3): 217-220. (Huang Guoqiang, Nan Ying, Chen Fang. Attack zone and trajectory simulation of guided-boob considering many kinds of stochastic interference source [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance. 2009, 29(3): 217-220.)

[10] 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. (Du Changping, Zhou Deyun, Jiang Aiwei. A better method for computing air-to-air missile trajectory [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University. 2006, 24(6): 682-685.)

[11] 惠耀洛,南英,陈峭东,等. 空空导弹动态攻击区的高精度快速算法研究[J]. 弹道学报. 2015, 27(2): 39-45. (Hui Yaoluo, Nan Ying, Chen Shaodong, et al. Research on rapid and high-precision calculation of dynamic attack zone[J]. Journal of Ballistics. 2015, 27(2): 39-45.)

[12] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.