Vol. 45, No. 12 December, 2015

文章编号:1001-5078(2015)12-1473-04

·光电对抗 ·

多枚红外诱饵弹运动轨迹仿真

吴晓迪1,2,3,黄超超1,2,3

(1. 电子工程学院,安徽 合肥 230037;2. 红外与低温等离子体安徽省重点实验室,安徽 合肥 230037;3. 脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037)

摘 要:对于载机连续发射多枚红外诱饵弹的运动轨迹进行了仿真。首先考虑无动力燃烧型 诱饵弹在发射后因为燃烧而导致质量损失的因素,建立了诱饵弹运动轨迹递归迭代计算模型, 然后运用此模型计算了不同条件下的多枚诱饵弹发射后的运动轨迹,最后利用可视化技术对 载机平台发射多枚诱饵弹的场景进行了可视化仿真。

关键词:红外诱饵弹;质量损失;迭代计算;运动轨迹

中图分类号:TN972 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2015.12.013

Simulation for the motion traces of infrared decoys

WU Xiao-di^{1,2,3}, HUANG Chao-chao^{1,2,3}

(1. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei 230037, China;

3. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The motion traces of a few infrared decoys launched by airplane were simulated. First, the trace iteration calculation model of an infrared decoy without dynamic force was built with consideration of quality losing factor caused by burning. Second, the motion traces of a few decoys in different condition were calculated with the use of this model. Finally, the launching process scene of decoys was visually simulated with the use of the visual technology. **Key words**: infrared decoys; quality losing; iteration calculation; motion traces

1 引 言

机载红外诱饵弹是飞机在对抗红外制导导弹时 的一种常见而有效的对抗手段。在实战中,载机在 遇到空中威胁时往往同时释放多枚红外诱饵弹,以 增加干扰红外武器的概率。因此了解不同条件下多 枚诱饵弹发射后的运动轨迹具有重要的实战价值: 对载机而言,它能够指导诱饵弹的发射时机和发射 角度,已达到最佳的干扰效果;对红外制导武器而言 可以改进其跟踪制导算法,以便更加有效地排除干 扰,攻击真实目标。

2 诱饵弹运动轨迹模型

诱饵弹在发射时载机本身在空中具有一定 的姿态,而诱饵弹发射时的速度和角度是相对于 载机平台而言的,要得到诱饵弹在大地坐标系下 的运动轨迹,首先必须对诱饵弹的坐标系统进行 转换^[1,2]。

设载机速度 v_p 、诱饵弹相对载机的初始速度 v_s 、诱饵弹在发射时相对于载机坐标系的水平角和 俯仰角分别为 ϕ_1 (0°~360°)和 θ_1 (-90°~90°), 则其相对于载机的速度分量 v'_{x_0} 、 v'_{x_0} 、 v'_{z_0} 为^[3-4]:

收稿日期:2015-04-03;修订日期:2015-05-18

作者简介:吴晓迪(1980 -),男,博士,助理研究员,主要研究领域为目标与背景的光学特性及计算机可视化仿真。 E-mail:wuxiaodi195@ sina.com

$$\begin{cases} v'_{x_0} = v_p + v_s \cos\theta_1 \cos\phi_1 \\ v'_{y_0} = v_s \sin\theta_1 \\ v'_{z_0} = v_s \cos\theta_1 \sin\phi_1 \\ \\ \begin{bmatrix} v_{x_0} \\ v_{y_0} \\ v_{z_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma_0 & \sin\gamma_0 \\ 0 & -\sin\gamma_0 & \cos\gamma_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

目前装备的红外诱饵弹大多数是无动力燃烧 型,在发射后即迅速燃烧,并释放出大量的热能,同 时其质量也在不断降低。因此在计算干扰弹运动轨 迹时必须考虑质量的变化因素。设红外诱饵弹燃烧 速率为 *m*,则其在燃烧结束前任意时刻 *t* 的质量为:

$$m_t = m_0 - \dot{m}t \tag{3}$$

要计算诱饵弹的瞬时速度还要了解诱饵弹发射 后的受力情况,对于没有自有动力系统的诱饵弹而 言,由于燃烧造成的诱饵弹周边大气环境的持续变 化,使得完成真实的对其受力情况进行建模变得非 常复杂,在本文中进行了简化处理,主要考虑诱饵弹 发射后受重力和空气阻力的影响因素,其中空气阻 力可以表示为:

$$f = \frac{1}{2}C_d\rho Sv^2 \tag{4}$$

其中, C_d 为风阻系数,本文设为常数 0.8; ρ 为空气 密度,本文设为 1.21 kg/m³; S 为诱饵弹迎风面积,本文设为 0.02 m²。在大地坐标系下,诱饵弹在 X 和 Z 轴方向上主要受到空气阻力的影响,而在 Y 方 向上则受到空气阻力和重力的共同作用。

由于诱饵弹的质量每时每刻都在发生变化,求 解诱饵弹任意时刻的解析解十分困难,本文采用仿 真迭代的方法对其进行求解,按此思路可以写出诱 饵弹在三个方向上的加速度方程为:

$$\begin{cases} m_{t} \frac{v_{x_{t}} - v_{x_{t-1}}}{\Delta t} = \begin{cases} -\frac{1}{2}C_{d}\rho S v_{x_{t-1}}^{2}, v_{x_{t-1}} > 0\\ \frac{1}{2}C_{d}\rho S v_{x_{t-1}}^{2}, v_{x_{t-1}} \leq 0 \end{cases} \\ m_{t} \frac{v_{y_{t}} - v_{y_{t-1}}}{\Delta t} = \begin{cases} -m_{t}g - \frac{1}{2}C_{d}\rho S v_{y_{t-1}}^{2}, v_{y_{t-1}} > 0\\ -m_{t}g + \frac{1}{2}C_{d}\rho S v_{y_{t-1}}^{2}, v_{y_{t-1}} \leq 0 \end{cases} \\ m_{t} \frac{v_{z_{t}} - v_{z_{t-1}}}{\Delta t} = \begin{cases} -\frac{1}{2}C_{d}\rho S v_{z_{t-1}}^{2}, v_{z_{t-1}} > 0\\ \frac{1}{2}C_{d}\rho S v_{z_{t-1}}^{2}, v_{z_{t-1}} > 0 \end{cases} \\ \frac{1}{2}C_{d}\rho S v_{z_{t-1}}^{2}, v_{z_{t-1}} \leq 0 \end{cases} \end{cases}$$

$$(5)$$

再设载机相对于大地坐标系的偏航角、俯仰角 和滚转角分别为 ϕ_0 、 θ_0 和 γ_0 ,则可计算得到诱饵 弹在大地坐标系下的初始速度 v_{x_0} 、 v_{y_0} 、 v_{z_0} 为^[5-6]:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi_0 & 0 & \sin \phi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi_0 & 0 & \cos \phi_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v'_{x_0} \\ v'_{y_0} \\ v'_{z_0} \end{bmatrix}$$
(2)

由上式可得:

$$\begin{cases} v_{x_{t}} = \begin{cases} -\frac{1}{2} \frac{C_{d} \rho S v_{x_{t-1}}^{2} \Delta t}{m_{t}} + v_{x_{t-1}}, v_{z_{t-1}} > 0\\ \frac{1}{2} \frac{C_{d} \rho S v_{x_{t-1}}^{2} \Delta t}{m_{t}} + v_{x_{t-1}}, v_{z_{t-1}} \leqslant 0 \end{cases}$$

$$v_{y_{t}} = \begin{cases} (-m_{t}g - \frac{1}{2} C_{d} \rho S v_{x_{t-1}}^{2}) \frac{\Delta t}{m_{t}} + v_{y_{t-1}}, v_{y_{t-1}} > 0\\ (-m_{t}g + \frac{1}{2} C_{d} \rho S v_{x_{t-1}}^{2}) \frac{\Delta t}{m_{t}} + v_{y_{t-1}}, v_{y_{t-1}} \leqslant 0 \end{cases}$$

$$v_{z_{t}} = \begin{cases} -\frac{1}{2} \frac{C_{d} \rho S v_{z_{t-1}}^{2} \Delta t}{m_{t}} + v_{z_{t-1}}, v_{z_{t-1}} > 0\\ \frac{1}{2} \frac{C_{d} \rho S v_{z_{t-1}}^{2} \Delta t}{m_{t}} + v_{z_{t-1}}, v_{z_{t-1}} \leqslant 0 \end{cases}$$

$$(6)$$

将诱饵弹的初始速度 v_{x0}、v_{y0}、v_{z0}带入到上式 进行迭代计算即可得到任意时刻三个方向上的速 度。再运用以下公式则可得到诱饵弹在任意时刻 t 在大地坐标系下的位置:

$$\begin{cases} x_{t} = x_{0} + \Delta t \sum_{i=1}^{t} v_{x_{i}} \\ y_{t} = y_{0} + \Delta t \sum_{i=1}^{t} v_{y_{i}} \\ z_{t} = z_{0} + \Delta t \sum_{i=1}^{t} v_{z_{i}} \end{cases}$$
(7)

其中, x_0 、 y_0 、 z_0 为干扰弹在发射时初始的空间 位置。

3 多枚诱饵弹运动轨迹计算及可视化仿真

载机发射多枚诱饵弹的方式一般有三种:一是 同时向不同方向发射;二是距离一定时间间隔向同 一方向发射;三是距离一定时间间隔向不同方向发 射。其中第二种和第三种载机平台的空间姿态和空 间位置均有可能发生改变。下面将分别对这三种情 况下的诱饵弹空间运动轨迹进行仿真计算。计算初 始条件设为载机速度 $v_p = 100$ m/s,诱饵弹相对载机 的初始速度 $v_s = 30$ m/s,诱饵弹初始质量 $m_0 = 600$ g, 诱饵弹燃烧速率 $\dot{m} = 125$ g/s,仿真步长 $\Delta t = 0.01$ s, 仿真时间为4 s。为使仿真的结果显示更加直观,设 载机的偏航角、俯仰角和滚转角均为 0°,且从坐标 原点向 X 轴正向移动。

首先对同时向不同方向发射诱饵弹的情况进 行计算,图1显示了载机分别同时向机体两侧前 下方和后上方发射八枚诱饵弹的计算结果。其中 图1(a)的参数设置为 $\theta_1 = -15^\circ$,图1(b)的参数 设置为 30°, ϕ_1 的角度值在计算结果图右上方 标示。





Fig. 1 Tracks of different directional decoys at the same time

图 2 为载机在距离一定时间间隔后向同一方 向发射 4 枚红外诱饵弹的计算结果,其中图 2 (a)为向载机正下方发射诱饵弹,图 2(b)为向载 机正后上方发射诱饵弹,发射时间间隔均为 0.8 s。

图 3 显示了载机平台距离一定时间间隔向不 同方向发射。图 3(a)为向后下方间隔 0.8 s 发 射三颗诱饵弹的情况,图 3(b)则为向后上方间 隔 0.4 s 发射五颗诱饵弹的情况,利用以上模型 并结合三维可视化技术,便可实现对飞机投放红 外诱饵弹的全过程仿真,图 4 给出了苏 - 27 战机 距离一定时间间隔向后上方分别抛射三枚和五 枚诱饵的可视化仿真,其中诱饵弹是基于粒子系 统生成,整个场景利用 OpenGL 三维库接口加以 实现。





图 2 距离一定时间间隔向同一方向发射的诱饵弹运动轨迹 Fig. 2 Tracks of same directional decoys at regular intervals





图 3 距离一定时间间隔向不同方向发射的诱饵弹运动轨迹 Fig. 3 Tracks of different directional decoys at regular intervals







图 4 多诱饵弹可视化仿真 Fig. 4 Visual simulation of decoys

4 结 论

本文考虑无动力燃烧型诱饵弹在燃烧过程而产 生的质量损失,建立了诱饵弹瞬时变化方程组,并运 用诱饵弹运动轨迹迭代计算模型对不同方式抛射的 多枚诱饵弹的运动轨迹进行了计算,最后利用可视 化技术对载机发射诱饵弹的过程进行了仿真。计算 及仿真数据表明采用不同的发射方式会对多枚诱饵 弹的运动轨迹产生较大的变化,进而影响其作战效 能,为机载红外诱饵弹的战术运用提供了一定的参 考价值。

参考文献:

- [1] LU Songtao, CHEN Qi, GAO Donghua. Jamming effectiveness evaluation for shipborne surface-type infrared decoy defensing anti-ship missile[J]. Laser & Infrared, 2014, 44
 (9):25-30. (in Chinese) 刘松涛,陈奇,高东华. 面源红外干扰弹防御反舰导弹 的干扰效果评估[J]. 激光与红外,2014,44(9):25-30.
 [2] JIN Zhengzhi, DU Wenhong, WANG Xing. The Research
- [2] JHV ZhChgZhi, DC Weinhöng, WHYO King. The Research of infrared decoy modeling and visual simulation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010,30(6):31 34. (in Chinese)
 金政芝,杜文红,王星. 红外诱饵弹建模与视景仿真实 现研究[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(6):31 34.
- [3] WANG Hongqiang, FANG Yangwang, WU Youli, et al. The study of infrared decoy jamming characteristic and simulation[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35
 (4):25-28.(in Chinese)
 王洪强,方洋旺,伍有利,等.红外诱饵弹干扰特性与 仿真[J].火力与指挥控制,2010,35(4):25-28.
- [4] HONG Yang, ZHANG Ke, LI Yanjun. Simulation and jamming model of infrared bait[J]. Journal of system simulation, 2006, 18(2):463-466. (in Chinese)
 洪洋,张科,李言俊. 红外诱饵的干扰模型与仿真[J].
 系统仿真学报, 2006, 18(2):463-466.
- [5] Wim de Jong, Frans A M Dam, Gerard J Kunz, et al. IR seeker simulator and IR scene generation to evaluate IR decoy effectiveness [J]. SPIE, 2004, 5615:100 – 111.
- [6] Yang Chunling, Chen Yu, Yang Mengda. Research on infrared decoy movement characteristics and simulation [C]// IEEE conference on Industrial Electronics and Applications, 2012:1892 - 1895.