

文章编号: 1672-8785(2017)06-0036-05

基于 MOS 电阻阵的红外诱饵运动模拟

薛芬芬 王碧云 杨 栋 宋敏敏

(上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 为了以较小代价验证红外制导导弹对抗红外诱饵的能力, 需要提高红外半实物仿真水平, 而基于 MOS 电阻阵的红外半实物仿真则是众多手段中最有效的方法之一。利用 MOS 电阻阵对红外诱饵进行了模拟和仿真, 并建立了红外诱饵模型, 尤其是红外诱饵运动模型。同时, 在外场实测了经红外诱饵运动轨迹校正后所建立的红外诱饵理论模型。结果表明, 红外诱饵运动轨迹模拟的逼真度是能否有效验证和提升红外制导导弹抗红外诱饵能力的关键。

关键词: MOS 电阻阵; 红外诱饵; 半实物仿真; 运动模型

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.06.007

Simulation of Infrared Decoy Motion Based on MOS Resistor Array

XUE Fen-fen, WANG Bi-yun, YANG Dong, SONG Min-min

(Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: To verify the capability of infrared guided missiles against infrared decoy at less cost, the ability of infrared hardware-in-the-loop simulation should be improved. The infrared hardware-in-the-loop simulation based on MOS resistor arrays is one of the most effective simulation methods in many means. Infrared decoy is simulated by using a MOS resistor array and an infrared decoy model. Particularly, an infrared decoy motion model is established. Then, the theoretical model of infrared decoy established after the correction of the trajectory of infrared decoy is measured in the fields. The result shows that the realistic simulation of infrared decoy trajectory is the key to the effective verification and improvement of the capability of infrared guided missiles against infrared decoy.

Key words: MOS resistance array; infrared decoy; hardware-in-the-loop simulation; motion model

0 引言

如何有效验证和提升红外制导导弹对抗红外诱饵的能力是近年来红外制导领域的研究重点, 而红外半实物仿真尤其是基于 MOS 电阻阵的红外对抗场景仿真则是有效提高这种能力的重要手段之一。由于具有帧频高、辐射温度高以

及响应快速等特点, MOS 电阻阵^[1-4]可以较为真实地模拟现实物理环境的红外辐射状态, 因此在模拟红外诱饵的辐射特性及其运动状态的剧烈变化方面具有一定的优势。

本文主要研究基于 MOS 电阻阵的红外场景生成技术^[5-7], 并以此来实现红外诱饵的运动仿真和模拟。如何逼真地模拟和仿真红外诱饵

收稿日期: 2017-02-15

作者简介: 薛芬芬 (1986-), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为红外探测与仿真测试。

E-mail: fenfen923@126.com

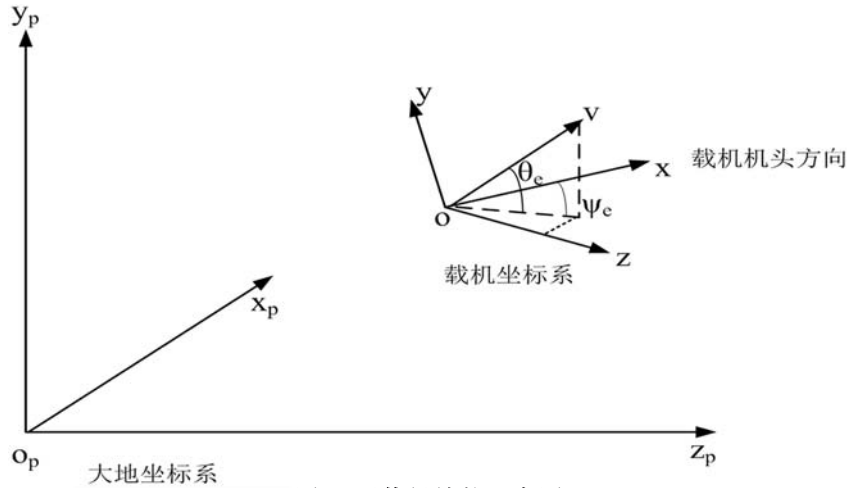


图1 干扰投放的示意图

被投放后的运动状态(尤其是载机在做机动时红外诱饵的运动轨迹)是有效验证和提升红外制导导弹抗干扰能力的关键。具体说来,就是要考虑投放环境、重力、经纬度以及大气衰减等因素的影响,建立红外诱饵的理论运动模型,同时在机动情况下对该模型进行修正。

1 红外诱饵运动模型

1.1 理论基础

在建立红外诱饵运动模型时,令载机速度为 v_p , 投放速度为 v_f , 即红外诱饵在投放时刻的速度为 v_e , 它是载机速度和发射速度的矢量合成。其中, v_p 在大地坐标系下, v_f 在机体坐标系下。

同时考虑载机上诱饵弹发射器的不同安装方位,因为它会直接影响诱饵弹发射时相对于大地坐标系的初速度方向。假设在红外诱饵弹的发射时刻,载机位置在大地坐标系中的坐标为 (x_{p0}, y_{p0}, z_{p0}) , 红外诱饵弹出膛后发生燃烧反应的微元体的质量为 m_0 , 重力加速度为 g , 发

射速度为 v_f 。假定红外干扰弹发射器相对于载体的安装位置的中心点与载体坐标系的原点重合,安装方位由俯仰角 θ_e 和偏航角 ψ_e 表示,即确定初始发射速度的方向。其中,红外诱饵投放器的安装方向与载机机身平面之间的夹角是俯仰角,它与载机头部的俯视方向一致时为负值;红外诱饵投放器的安装方向与载机头部的纵向方向之间的夹角是偏航角。从载机头部向尾部看时,红外诱饵投放器的偏航角的顺时针方向为正值。如图1所示, θ_e 为正值, ψ_e 为负值。

计算出膛时刻红外诱饵弹在将大地坐标系的原点平移到诱饵弹发射位置的坐标系中的初速度分量 $(v_{x00}, v_{y00}, v_{z00})^T$ 。在出膛时刻,红外诱饵弹在机体坐标系中的初速度分量为 $(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0})^T$, 即

$$\begin{cases} v_{x0} = v_f \cos \theta_e \cos \psi_e \\ v_{y0} = v_f \sin \theta_e \\ v_{z0} = v_f \cos \theta_e \sin \psi_e \end{cases} \quad (1)$$

机体坐标系到准大地坐标系的转换矩阵为

$$\begin{aligned} L_2 &= \begin{pmatrix} \cos \psi_p & 0 & \sin \psi_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_p & 0 & \cos \psi_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_p & -\sin \theta_p & 0 \\ \sin \theta_p & \cos \theta_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_p & -\sin \gamma_p \\ 0 & \sin \gamma_p & \cos \gamma_p \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta_p \cos \psi_p & -\sin \theta_p \cos \psi_p \cos \gamma_p + \sin \psi_p \sin \gamma_p & \sin \theta_p \cos \psi_p \sin \gamma_p + \sin \psi_p \cos \gamma_p \\ \sin \theta_p & \cos \theta_p \cos \gamma_p & -\cos \theta_p \sin \gamma_p \\ -\cos \theta_p \sin \psi_p & \sin \theta_p \sin \psi_p \cos \gamma_p + \cos \psi_p \sin \gamma_p & -\sin \theta_p \sin \psi_p \sin \gamma_p + \cos \psi_p \cos \gamma_p \end{pmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

式中, ψ_p 为偏航角; θ_p 为俯仰角; γ_p 为滚转角。因此, 经计算可以得到红外诱饵弹在出膛时刻的初速度分量:

$$\begin{pmatrix} v_{x00} \\ v_{y00} \\ v_{z00} \end{pmatrix} = L_2 \begin{pmatrix} v_{x0} \\ v_{y0} \\ v_{z0} \end{pmatrix} \quad (3)$$

接下来分析红外诱饵弹在出膛后的受力情况。计算(仿真)任意时刻 t 红外诱饵弹在将大地坐标系的原点平移到诱饵弹发射时位置的坐标系中的速度分量 $(v_x, v_y, v_z)^T$ 。投放后, 红外诱饵弹在空中主要受到升力、阻力、投射力和重力的影响。本文所建模型只考虑阻力和重力, 并忽略风速对红外诱饵弹的影响。其中, 阻力 f 是关于红外诱饵弹的几何形状、速度、质量和大气密度的函数。定义 α 为诱饵弹速度 v 在 xoz 平面上的投影, β 为诱饵弹速度 v 在 xoy 平面上的投影。

$$f = m \frac{\rho g v^2}{2\beta} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{m}{C_d A_{ref}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_x = -\frac{C_d A_{ref} \rho g v^2}{2} * \frac{\cos \alpha v_{x00}}{\sqrt{v_{x00}^2 + v_{z00}^2}} \\ f_y = -\frac{C_d A_{ref} \rho g v^2}{2} * \frac{v_{y00}}{\sqrt{v_{x00}^2 + v_{y00}^2 + v_{z00}^2}} \\ f_z = -\frac{C_d A_{ref} \rho g v^2}{2} * \frac{\cos \alpha v_{z00}}{\sqrt{v_{x00}^2 + v_{z00}^2}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, C_d 为阻力系数, 它与速度及几何体形状有关; v 为红外诱饵弹的瞬时速度; ρ 为大气密度; 模型中所使用的大气密度随高度变化, 在仿真过程中可通过查表给出; A_{ref} 为红外干扰弹的迎风面积。

在准大地坐标系中, 计算(仿真)时刻 t 红外诱饵在不同坐标轴上的速度分量: X 轴方向上的速度分量为 $m \frac{dv_x}{dt} = f_x$; Y 轴方向上的速度分量为 $m \frac{dv_y}{dt} = -mg + f_y$; Z 轴方向上的速度分量为 $m \frac{dv_z}{dt} = f_z$ 。最后, 在大地坐标系中, 计算红外干扰弹在(仿真)任意时刻 t 的位置坐标 $(x, y, z)^T$ 。

假设红外诱饵在每个仿真步长 t 内都是匀速运动, 即 $\frac{d\vec{x}}{dt} \approx \vec{v}$, 并且 t 取得很小, 同时仿真时间取为 1 ms。基于四阶龙格-库塔法^[8], 通过利用每个时刻的速度并将其与飞机的位置坐标合成, 即可近似计算出(仿真)任意时刻 t 红外干扰弹在大地坐标系中的位置坐标 $(x, y, z)^T$ 。

2 基于 MOS 电阻阵的红外诱饵仿真

根据红外诱饵理论模型的理论基础, 利用基于 MOS 电阻阵的动态红外场景渲染和驱动软件进行红外诱饵仿真。

2.1 不同弹道下的红外诱饵轨迹

利用基于 MOS 电阻阵的红外场景生成器得到了不同航路、不同高差情况下, 干扰向上投放和向下投放时的运动方向。具体投放条件如下: 干扰投放的间隔时间为 1 s, 投放的初速度为 15 m/s, 干扰投放的阻力系数为 0.25; 同时, 导弹和目标的飞行速度均为 270 m/s。表 1 和表 2 分别列出了干扰向上投放和向下投放时的仿真结果。

2.2 机动状态下的红外诱饵运动模拟

载机做机动时本身会带有姿态, 因此红外诱饵出膛后的初始方向已跟载机不做机动时不一样, 这就需要考虑载机姿态的影响。具体说来, 在仿真过程中, 需要利用载机的攻角 θ_{faiv} 和侧滑角 φ_{thitav} 对红外诱饵的初始投放方向进行修正。修正后, 红外诱饵弹在出膛时刻的初速度分量为

$$\begin{pmatrix} v_{x00} \\ v_{y00} \\ v_{z00} \end{pmatrix} = L_2 \begin{pmatrix} v_{x0} \\ v_{y0} \\ v_{z0} \end{pmatrix} + V_p \begin{pmatrix} \cos \theta_{faiv} * \cos \varphi_{thitav} \\ \sin \theta_{faiv} \\ -\cos \theta_{faiv} * \sin \varphi_{thitav} \end{pmatrix} \quad (7)$$

下面具体分析载机机动情况下的红外诱饵运动模型。高差为 1 km, 航捷为 1 km, 弹目相遇距离为 15 km。弹目迎头对飞, 其速度均为 0.8 Ma。在弹目距离为 8 km 时投放红外诱饵。载机在投放干扰的同时做 2g 的水平向右机动。假设红外诱饵向下投放。

表 1 干扰向上投放时的仿真结果

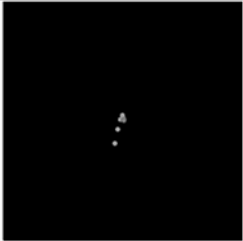
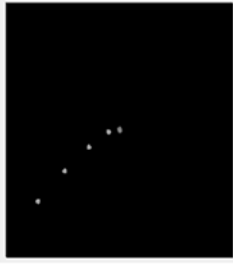
高差				
航路		100m	1000m	2000m
100m				
	1000m			

表 2 干扰向下投放时的仿真结果

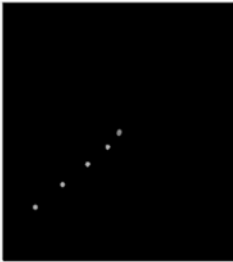
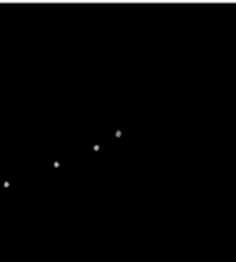
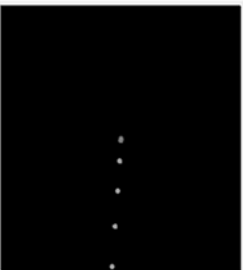
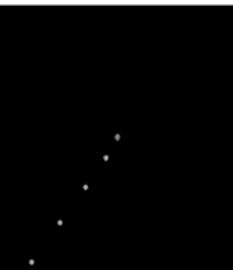
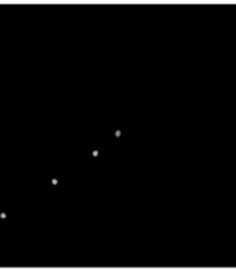
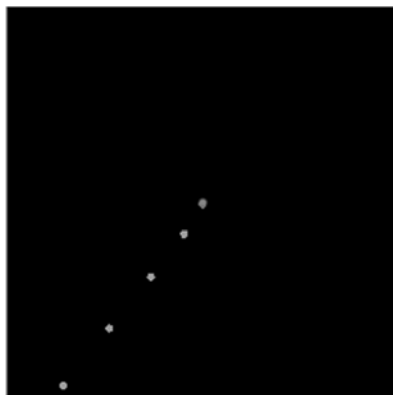
高差				
航路		100m	1000m	2000m
100m				
	1000m			

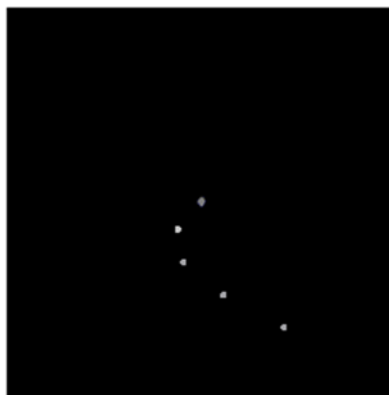
图 2 所示为在载机机动的情况下，是否考虑载机姿态时红外诱饵运动模型的计算结果对比。

因为红外诱饵与载机的分离情况可直接决定红外制导抗干扰的成功与否，所以需要分析

载机机动下红外诱饵投放后与载机的分离角情况 (红外诱饵投放后导弹与目标连线和红外诱饵与目标连线的夹角)，即分析考虑载机姿态前后对红外诱饵运动的影响。具体计算条件如上，计算结果见图 3。



(a) 修正前的红外诱饵运动轨迹



(b) 修正后的红外诱饵运动轨迹

图 2 红外诱饵运动模型在姿态修正前后的结果对比

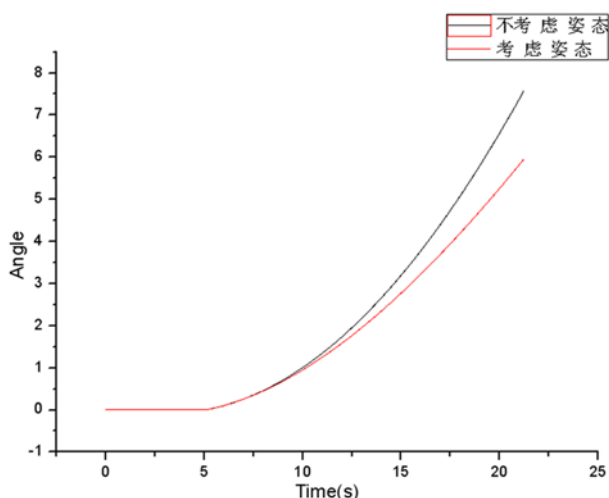


图 3 红外诱饵与载机分离角的对比计算

如图 3 所示,在载机机动的情况下,是否考虑载机姿态对红外诱饵运动影响很大。若不考虑载机姿态,则无法真实反映实际场景中红外诱饵与载机的分离情况。

3 结束语

本文基于 MOS 电阻阵实现了红外诱饵运动模拟,并建立了红外诱饵运动模型。该模型可以实现对经纬度、重力环境以及投放条件等因素的仿真。尤其是通过对载机机动条件下红外诱饵被投放后的运动轨迹进行修正,可以较为逼真地模拟出红外诱饵的运动轨迹,以提高验证红外制导导弹对抗诱饵的真实性。在实际的战场环境中,红外诱饵与目标分离的快慢会直接影响红外导弹抗干扰的成功概率,因此越发要求提高红外诱饵运动仿真的逼真度。本文虽然

基于 MOS 电阻阵实现了红外诱饵投放场景的生成,但是还没有经过实际外场数据的验证。接下来的工作是去外场采集真实环境中的红外诱饵运动数据,然后基于外场数据对现有的运动模型进行修正,即标定红外诱饵运动模型中的投放速度、重力以及阻力参数等等,从而进一步提高红外诱饵运动仿真的逼真度。

参考文献

- [1] 董敏周, 王建华, 孙力, 等. 基于 MOS 电阻阵的红外目标模拟生成系统 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(3): 411-415.
- [2] Williams O M, Goldsmith G C, Stockbridge R G. History of Resistor Array Infrared Projectors: Hind-sight is Always 100% Operability [C]. *SPIE*, 2005, **5785**: 208-224.
- [3] 丁全心, 刘华. 红外成像系统仿真、测试与评价的发展与思考 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(5): 753-758.
- [4] 马斌, 程正喜, 翟厚明, 等. 国产电阻阵列的发展趋势 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(12): 2314-2322.
- [5] 周须峰. 红外目标图像计算机生成与控制技术 [D]. 西安: 西北工业大学, 2002.
- [6] 赵西帅, 吴根水, 赵松庆, 等. 红外成像制导半实物仿真目标图像生成技术 [J]. *测控技术*, 2013, **32**(7): 153-156.
- [7] 胡浩宇, 董敏周, 孙力, 等. 基于 MOS 电阻阵的红外热图像生成控制系统 [J]. *计算机测量与控制*, 2010, **18**(9): 2085-2087.
- [8] 晏水平, 黄树红. 求解运动方程的一种数值算法 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2002, **30**(5): 65-67.