

文章编号: 1672-8785(2022)11-0001-07

导弹抗红外诱饵干扰的六自由度 半实物仿真研究

杨锁昌¹ 张敦絮¹ 郑旭¹ 方丹¹ 宋祥君²

(1. 陆军工程大学(石家庄校区), 河北 石家庄 050000;

2. 中国人民解放军 32181 部队, 陕西 西安 710000)

摘 要: 导弹作为精确制导武器已经广泛运用于战场, 与之相应的对抗措施也在飞速发展。红外诱饵已经成为影响光电导引头制导导弹作战效能的重要因素。为了研究红外自寻的导弹的抗诱饵干扰能力, 利用半实物仿真系统构建了红外诱饵干扰条件下的导弹飞行物理效应环境, 分析了导弹的抗红外诱饵干扰能力。通过半实物仿真试验可知, 适当设置目标和诱饵之间的距离可以起到诱偏红外制导导弹攻击静止目标的作用; 对于机动目标, 若在合适的时机投放诱饵, 则可有效诱偏红外制导导弹攻击。

关键词: 红外诱饵; 导弹抗干扰; 半实物仿真

中图分类号: TJ765 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.11.001

Research on Six Degrees of Freedom Hardware-in-the-loop Simulation for Missile Anti-infrared Decoy Jamming

YANG Suo-chang¹, ZHANG Dun-xu¹, ZHENG Xu¹, FANG Dan¹, SONG Xiang-jun²

(1. Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China;

2. Unit 32181 of PLA, Xi'an 710000, China)

Abstract: As precision guided weapons, missiles have been widely used in the battlefield, and corresponding countermeasures are also developing rapidly. Infrared decoy has become an important factor affecting the combat effectiveness of the guided missile with photoelectric seeker. In order to study the anti-decoy jamming ability of infrared self-homing missile, the physical effect environment of missile flight under the condition of infrared decoy jamming is constructed by using hardware-in-the-loop simulation system, and the anti-infrared decoy jamming ability of missile is analyzed in this paper. Through the hardware-in-the-loop simulation test, it can be seen that setting the distance between target and decoy properly can induce infrared guided missile to attack stationary target. For maneuvering target, if the decoy is placed at the right time, it can effectively induce infrared guided missile attack.

Key words: infrared decoy; missile anti-jamming; hardware-in-the-loop simulation

收稿日期: 2022-08-20

作者简介: 杨锁昌(1969-), 男, 河北定州人, 教授, 博士, 主要研究方向为精确制导理论与技术。

E-mail: yscyse2003@sina.com

0 引言

导弹红外寻的制导是通过导弹设备接收目标辐射或反射的红外光来形成点源信号或图像信号的。经过处理后,它可以实现目标跟踪,并对导弹进行制导控制,因此是导弹的重要制导方法。红外干扰弹通过药柱或者箔片燃烧产生辐射,形成点源或非点源红外诱饵。点源红外诱饵的红外辐射强度是受保护目标红外辐射强度的数倍,以欺骗红外寻的制导武器偏离目标;而非点源红外诱饵则用于模拟受保护目标的红外图像特征,干扰红外成像制导导弹^[1]。为了应对日益复杂的战场环境,研究红外自寻的导弹跟踪制导过程中的抗干扰能力显得尤为重要。目前研究导弹抗干扰能力主要有数学仿真试验法、半实物仿真试验法和外场综合试验法等方法。

导弹反红外诱饵干扰的研究包括建立干扰模型和导弹模型,并分析它们的相对关系。在红外诱饵干扰建模方面,张文华等人利用流体力学和热传导理论,建立了红外诱饵的气动数学模型^[2]。郭亚峰等人通过粒子系统模拟点源红外诱饵^[3]。孔晓玲等人基于非点源红外诱饵的工作机理,建立了面源红外诱饵仿真模型^[4]。李慎波和李传良等人分别基于导引头跟踪模型和目标机动建立了导弹抗红外干扰模型^[5-6]。Viau C R 等人采用仿真方法分别分析了点源和面源红外诱饵对导弹的干扰效能^[7]。张喜涛等人基于导弹数学模型,从对抗环境、导弹总体、制导系统及导引头多个层次对红外对抗机理进行了系统分析,但未考虑实际情况中的导弹过载限制^[8]。为了较为逼真地模拟红外成像导引头和红外诱饵弹对抗场景,韦卓等人采用了三轴转台和火箭橇相结合的试验方式,但却需要解决平滑转台跟踪角度问题和超调振动问题^[9]。

为了在实验室中更真实地模拟导弹抗红外诱饵干扰的物理环境,本文设计了一种半实物仿真系统。基于模型模拟导弹飞行环境,并利用仿真模型模拟干扰测试系统中的目标和诱饵。

然后结合导弹导引头、飞行控制系统和舵机等导弹弹上设备组成仿真系统。在仿真实验室开展干扰仿真试验。在确保试验置信度和费效比的同时,有效模拟现有导弹在红外诱饵干扰下的跟踪制导情况,并为提高复杂光电环境下导弹的抗干扰能力和战术优化提供重要依据。

1 导弹半实物仿真系统构架

图 1 所示为本文构建的导弹抗红外诱饵干扰半实物仿真系统的体系结构。该系统可将导弹的动力学、运动学模型与导弹的弹载计算机、惯性测量装置、舵机等实物组成一个硬件在环仿真回路。仿真结果可以更接近导弹的实物飞行试验。

1.1 仿真综合控制台

仿真综合控制台由 Windows NT 工作站、VMIC 通讯网卡、以太网和机柜组成,用于对导弹半实物仿真试验进行资源配置和进程控制。综合控制台加载基于 Matlab/Simulink 搭建的导弹仿真模型,通过 RT-LAB 实时仿真平台进行编译并将其结果下载到飞行动力学子系统进行实时仿真。综合控制台通过 VMIC 网络向其他仿真设备发送初始化、准备、运行、停止和异常终止等消息,调度仿真系统执行仿真任务。

1.2 飞行动力学仿真系统

采用飞行动力学仿真系统,实时求解导弹的姿态和位置。该系统包括导弹六自由度动力学模型、运动学模型、空气动力学模型、发动机模型、质量模型、导弹目标相对运动模型和导弹飞行控制系统模型。它采用模型分配机制,仿真步长低至 10 μ s,精度高达 10 ns,试验采用 1 ms 定步长仿真,能够充分满足导弹实时飞行控制要求。仿真计算机将导弹空间姿态、舵机铰链力矩、导弹目标相对距离和方位的模拟数据发送到 VMIC 网络内存空间,用于驱动三轴转台、负载模拟器、目标模拟器等仿真设备,并从 VMIC 网络的存储空间读取目标方位、导弹舵偏角、姿态角等导弹部件的测量信息,连同相应的数学模型一起完成导弹半实物闭环仿真试验。

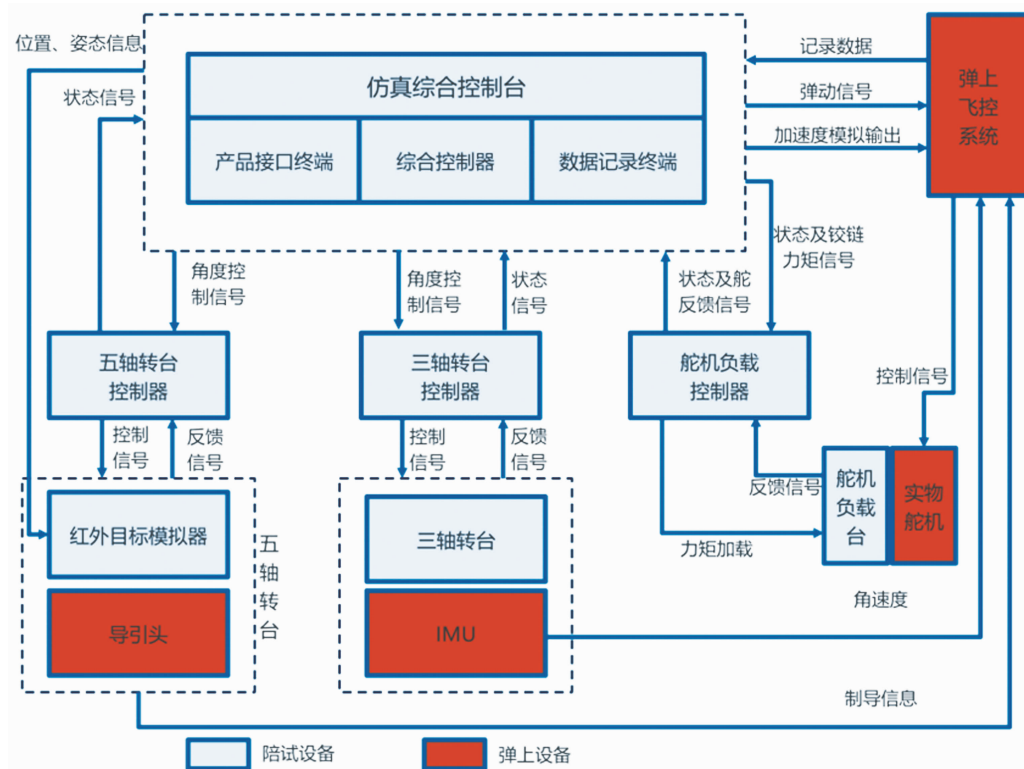


图 1 导弹半实物仿真系统构架

1.3 产品测试接口终端

产品测试接口终端具有采集、激励和专用接口通信模拟功能。首先采集导弹实物部组件的信号, 并将信号数据发送到 VMIC 网络内存空间; 然后将仿真模型中计算得到的控制数据转换为电信号, 并将其输出给导弹实物组件激励执行机构; 另外还可以通过 RS422 等接口与导弹实物部组件通信, 完成导弹自检、发射诸元装订等任务, 从而模拟火控装置完成导弹的发射装备工作。

1.4 三轴电动转台

三轴电动转台根据模型计算得到的弹体姿态控制转台框架进行转动, 具有滚转、俯仰、偏航三轴速率、位置、角振动仿真功能。三轴电动转台的角位置控制精度小于等于 0.005° , 俯仰、偏航最大角速率为 $0.2^\circ/\text{ms}$, 导弹最大姿态角速率小于等于 $0.14^\circ/\text{ms}$ 。转台能够模拟导弹在空中飞行时的姿态变化, 为惯性测量组件提供一个逼真的物理效应环境。

1.5 五轴测试转台

五轴仿真转台包括三轴飞行仿真转台及二

轴目标模拟转台。三轴飞行仿真转台嵌套在二轴目标模拟转台内部。后者模拟目标偏航、俯仰角运动, 前者承载导弹导引头并模拟俯仰、偏航、滚转角运动。该转台系统形成五自由度空间仿真环境, 用于导弹末段寻的制导和弹目交会仿真。

1.6 四通道电动负载模拟器

四通道电动负载模拟器用于模拟导弹飞行过程中的舵机铰链扭矩。它接收导弹飞行速度、高度和舵面偏转角等信息, 形成瞬时铰链扭矩输出, 并将其加载到导弹舵机组件中。

1.7 数据记录终端

数据记录终端用于记录导弹仿真试验过程中各节点和仿真模型生成的仿真数据, 便于对试验后的仿真数据进行查看、统计和分析。

2 导弹抗干扰六自由度仿真模型的建立

导弹抗干扰的六自由度仿真建模包括建立导弹模型、目标模型和红外诱饵干扰模型。

2.1 导弹模型

导弹模型包括导弹质心运动学模型、导弹质心动力学模型、导弹姿态动力学和运动学模

型、导弹制导律模型等。

2.1.1 导弹质心运动学模型

导弹质心运动学模型以地面坐标系为基准, 利用导弹坐标系和地面坐标系之间的夹角关系, 描述了导弹质心位移和速度之间的关系:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V_x = V \cos q \cos y_v \\ \frac{dy}{dt} = V_y = V \sin q \\ \frac{dz}{dt} = V_z = -V \cos q \sin y_v \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = P \cos a \cos b - X - mg \sin q \\ mV \frac{dq}{dt} = P(\sin a \cos g_v + \cos a \sin b \sin g_v) + Y \cos g_v - Z \sin g_v - mg \cos q \\ -mV \cos q \frac{dy_v}{dt} = P(\sin a \sin g_v - \cos a \sin b \cos g_v) + Y \sin g_v + Z \cos g_v \end{cases} \quad (2)$$

式中, m 为导弹质量; P 为导弹发动机推力; X 为导弹受到的空气阻力; Y 为导弹气动升力; Z 为导弹气动侧向力; a 为攻角; b 为侧滑角; g_v 为速度倾斜角。

2.1.3 导弹姿态动力学模型

导弹姿态动力学模型描述了导弹角速度变化规律与作用在导弹上力矩的变化规律之间的关系:

$$\begin{cases} J_{x1} \frac{d\omega_{x1}}{dt} + (J_{z1} - J_{y1})\omega_{y1}\omega_{z1} = M_{x1} \\ J_{x1} \frac{d\omega_{y1}}{dt} + (J_{x1} - J_{z1})\omega_{z1}\omega_{x1} = M_{y1} \\ J_{z1} \frac{d\omega_{z1}}{dt} + (J_{y1} - J_{x1})\omega_{x1}\omega_{y1} = M_{z1} \end{cases} \quad (3)$$

式中, J_{x1} 、 J_{y1} 、 J_{z1} 分别为导弹的转动惯量在弹体系三个方向上的分量; M_{x1} 、 M_{y1} 、 M_{z1} 分别为导弹所受力矩在弹体系三个方向上的分量; ω_{x1} 、 ω_{y1} 、 ω_{z1} 分别为导弹在三个方向上的转动角速度。

2.1.4 导弹姿态运动学模型

导弹姿态运动学模型利用弹体坐标系和地面坐标系之间的方向余弦关系, 描述了导弹姿

式中, $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$, 表示导弹速度模值; V_x 、 V_y 、 V_z 分别为导弹速度在发射坐标系各轴上的投影; x 、 y 、 z 分别为导弹位移在发射坐标系各轴上的投影; q 为弹道倾角; y_v 为弹道偏角。

2.1.2 导弹质心动力学模型

导弹质心动力学模型描述了导弹飞行速度大小和方向的变化规律与作用在导弹上力的变化规律之间的关系:

态角速度和转动角速度分量之间的关系:

$$\begin{cases} \frac{dJ}{dt} = \omega_{y1} \sin g + \omega_{z1} \cos g \\ \frac{dy}{dt} = \frac{1}{\cos J}(\omega_{y1} \cos g - \omega_{z1} \sin g) \\ \frac{dg}{dt} = \omega_{x1} - \tan J(\omega_{y1} \cos g - \omega_{z1} \sin g) \end{cases} \quad (4)$$

式中, J 、 y 、 g 分别为俯仰角、偏航角和滚转角。

2.1.5 导引律模型

导弹与目标之间的相对运动关系通过自寻的制导描述。增强型比例导引律是在无动力学滞后情况下基于目标机动的最优制导律^[10], 即

$$\begin{cases} \dot{r} = V_T \cos \eta_T - V_M \cos \eta_M \\ r \dot{q} = V_M \sin \eta_M - V_T \cos \eta_T \\ q = \sigma_M + \eta_M = \sigma_T + \eta_T \\ a_{APN} = (n+3)V_M \dot{q} + \frac{n+3}{2}a_T \end{cases} \quad (5)$$

式中, r 为弹目间距离, q 为弹目视线角, σ_M 和 σ_T 分别为导弹弹道角和目标航向角, η_M 和 η_T 分别为导弹和目标的速度矢量前置角, a_T 为目标加速度, a_{APN} 和 n 分别表示增强比例导引和导引系数。

2.2 目标运动模型

目标运动模型可用式(6)表示:

$$\begin{cases} V_{tx} = V_{tx0} + a_{tx}t, V_{ty} = V_{ty0} + a_{ty}t, \\ V_{tz} = V_{tz0} + a_{tz}t \\ x_t = x_{t0} + V_{tx0}t + \frac{1}{2}a_{tx}t^2 \\ y_t = y_{t0} + V_{ty0}t + \frac{1}{2}a_{ty}t^2 \\ z_t = z_{t0} + V_{tz0}t + \frac{1}{2}a_{tz}t^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, V_{tx0} 、 V_{ty0} 、 V_{tz0} 为目标速度的初始值; a_{tx} 、 a_{ty} 、 a_{tz} 为目标加速度在地面坐标系上的分量; x_{t0} 、 y_{t0} 、 z_{t0} 为目标初始位置在地面坐标系上的分量。

2.3 红外诱饵干扰模型

当目标受到导弹攻击时, 可以通过投掷红外诱饵弹在红外制导导弹的视场中形成一个假目标, 从而达到干扰导弹准确制导的目的^[4]。设定红外诱饵为 G, 辐射强度为 F_G , 目标红外辐射强度为 F_T 。

对于地面目标, 通常采用抛射法来释放红外诱饵弹。在仿真中, 以目标为中心设置地面坐标系 X_T 、 Y_T 、 Z_T 。其中, O_T 为目标坐标的原点, X_T 、 Y_T 、 Z_T 的正方向与导弹发射系坐标的正方向相同。设定红外诱饵为 G, 诱饵弹抛射初始速度为 V_{G0} , 方位角为 q_{G0} 、仰角为 a_{G0} 。图 2 为诱饵弹空间分布示意图。

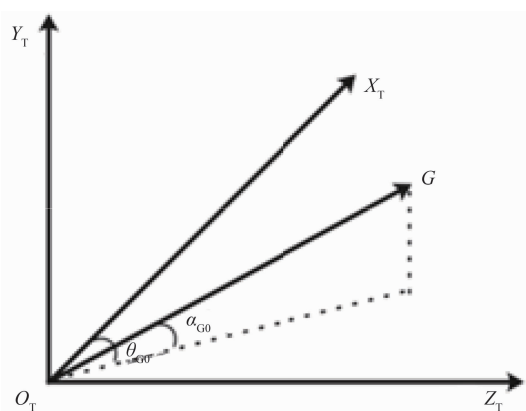


图 2 诱饵弹空间分布示意图

诱饵在运动过程中受到重力和空气阻力的共同作用, 空气阻力与诱饵子弹的方向相反。

诱饵弹的运动模型为

$$\begin{cases} a_{GX} = -F \cos a_{G0} \cos q_{G0} / m \\ a_{GY} = -g F \sin a_{G0} / m \\ a_{GZ} = -F \cos a_{G0} \sin q_{G0} / m \end{cases} \quad (7)$$

式中, a_{Gx} 、 a_{Gy} 、 a_{Gz} 为诱饵在目标坐标系三轴上的加速度分量; F 为诱饵受到的空气阻力, $F=1/2C_G r S_G V_G^2$; m 为诱饵质量; C_G 为诱饵受到的空气阻力系数; S_G 为干扰诱饵弹的有效阻力面积; V_G 为诱饵弹的速度。

$$\begin{cases} V_{Gx} = V_{G0} \cos a_{G0} \cos q_{G0} + a_{Gx}t \\ V_{Gy} = V_{G0} \cos a_{G0} + a_{Gy}t \\ V_{Gz} = V_{G0} \cos a_{G0} \sin q_{G0} + a_{Gz}t \\ V_G = \sqrt{V_{Gx}^2 + V_{Gz}^2 + V_{Gy}^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中, V_{Gx} 、 V_{Gy} 、 V_{Gz} 分别为诱饵速度在目标坐标三轴上的投影。

干扰诱饵弹在目标坐标系上的位移为

$$\begin{cases} X_G = X_T + V_{Gx}t + 1/2a_{Gx}t^2 \\ Y_G = Y_T + V_{Gy}t + 1/2a_{Gy}t^2 \\ Z_G = Z_T + V_{Gz}t + 1/2a_{Gz}t^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, X_G 、 Y_G 、 Z_G 分别为干扰诱饵位移在目标坐标系三轴上的投影。

3 仿真结果及分析

通常情况下, 导弹红外导引头的俯仰视场小于偏航视场, 表明红外导引头在纵向方向上识别目标的能力大于识别横向目标的能力。为了测试导弹的抗干扰能力, 在横向上设置了红外诱饵。为了简单起见, 从固定目标诱饵和移动目标诱饵两个方面设计试验。

3.1 固定目标和诱饵下的导弹命中精度仿真试验

设置目标红外辐射强度 F_T 等于诱饵辐射强度 F_G , 对无红外诱饵以及目标与诱饵间的距离 R_{TG} 为 5 m、10 m、20 m、30 m、40 m、50 m 等情况进行试验。不同 R_{TG} 导弹弹着点与目标中心的偏差如图 3 所示。可以看出, 在目标横轴方向设置诱饵时主要影响导弹的横向落点。

表 1 列出了 R_{TG} 取不同值时导弹弹着点与目标中心在 Z 轴方向上的差值。导弹弹着

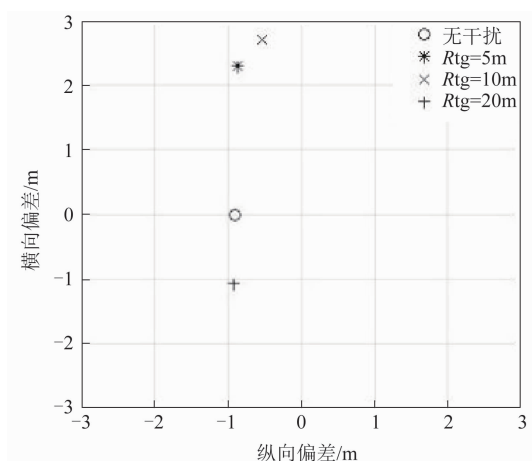
图 3 不同 R_{TG} 导弹弹着点与目标中心的偏差

表 1 静止条件下弹着点与目标中心的差值表

R_{TG}/m	无干扰	VZ/m
5.00	-0.01	2.28
10.00	-0.01	2.70
20.00	-0.01	-1.08
30.00	-0.01	-1.03
40.00	-0.01	0.27
50.00	-0.01	0.09

点与目标间的横向偏差 VZ 随着 Z_{TG} 的增大而呈现出先增大再减小的情况。不同 R_{TG} 下导弹偏航舵偏角和法向过载随时间的变化曲线分别如图 4(a)和图 4(b)所示。

通过仿真试验可以看出, 导弹红外导引头在距目标一定距离时, 能从视场中分辨出真目标和假目标, 并生成调整导弹方向舵偏转角度的控制指令, 从而产生法向过载, 使导弹飞向目标。随着 R_{TG} 的增大, 导弹能在更远距离识别目标, 修正导弹姿态, 从而降低 VZ 。

3.2 机动目标和诱饵下的导弹命中精度仿真试验

设定目标以 $V_{TZ}=10$ m/s 的速度向 Z 轴正方向机动。当目标发现导弹攻击 V_t 后做出释放诱饵举措。经查, 红外诱饵弹的分离速度为 $15\sim 30$ m/s。鉴于前面的试验结果, 设定诱饵向 Z 轴正方向以最大速度 V_{GZ} (30 m/s) 与目标分离, 并且在没有诱饵和存在诱饵的情况下进行导弹命中精度试验。表 2 列出了 V_t 取不同值时导弹弹着点与目标中心在 Z 轴方向上的差

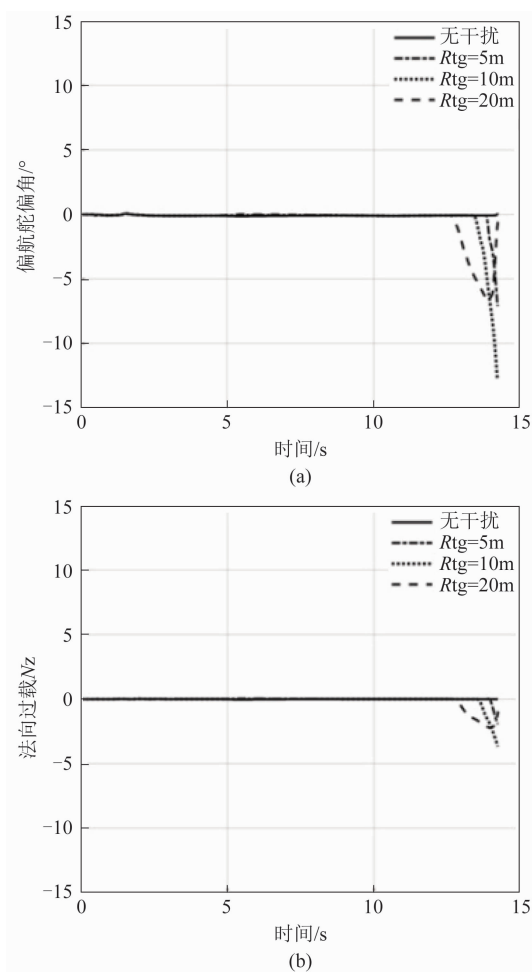


图 4 导弹偏航舵偏角和法向过载随时间的变化曲线

值。可以看出, 随着 V_t 的增大, 导弹弹着点与目标中心之间的差值呈现出增大-减小-增大-减小的过程。

表 2 目标机动释放诱饵后导弹弹着点与目标中心的差值表

V_t/s	无干扰	VZ/m
2~7	0.01	0.01
8	0.01	0.03
9	0.01	0.05
10	0.01	0.09
11	0.01	-0.40
12	0.01	-1.38
13	0.01	2.30
14	0.01	7.06
15	0.01	7.02
16	0.01	-0.71
17	0.01	-8.23
18	0.01	-5.03

不同 V_t 下导弹偏航舵偏角和法向过载分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。可以看出, 当导弹受诱饵影响偏离目标飞行时, 随着弹目距离的减小, 导弹识别出目标后产生负的舵偏角和法向过载, 控制导弹飞向目标。随着 V_t 的增大, 导弹需要更大的舵偏角和法向过载来调整弹道, 造成命中精度下降。

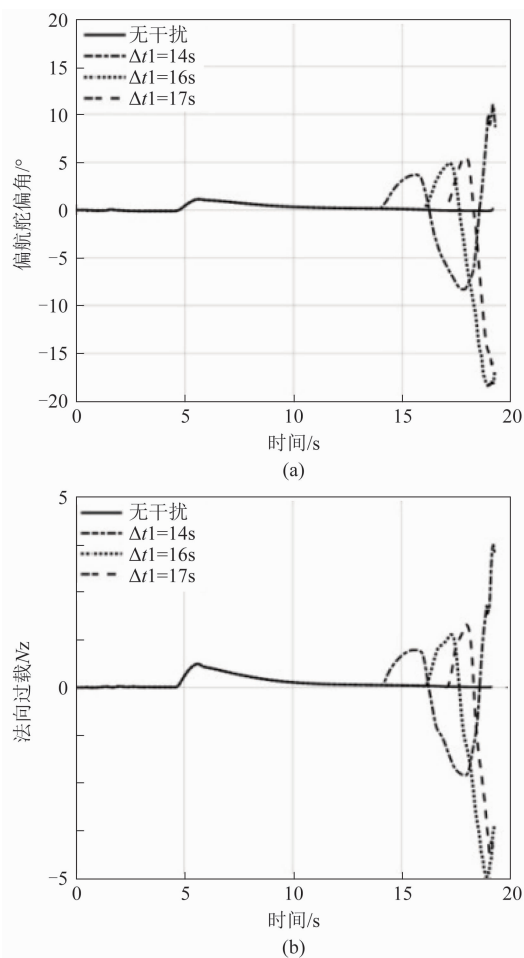


图 5 不同 V_t 下的导弹偏航舵偏角和法向过载

4 结束语

本文通过半实物仿真系统构建了红外诱饵干扰条件下的导弹飞行物理效应环境, 在兼顾试验置信度和费效比的前提下有效模拟了导弹在红外诱饵干扰下的跟踪制导过程。通过导弹

抗红外诱饵干扰的六自由度仿真实验, 可以得出以下结论: 适当地设置目标和诱饵之间的距离可以起到诱偏红外制导导弹攻击静止目标的作用; 对于机动目标, 在适当的时间释放诱饵也可以有效诱偏导弹攻击。这不仅检验了导弹自身抗红外诱饵干扰的能力, 也为有效使用红外诱饵的时机和条件提供了试验数据支撑。

参考文献

- [1] 王景. 光电对抗技术的应用分析 [J]. 科学技术创新, 2020, 15(15): 31-32.
- [2] 张文华, 王星, 张凤鸣, 等. 红外诱饵弹气动辐射特性数学建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(21): 5731-5735.
- [3] 郭亚峰, 吴庆宪, 姜长生. 红外诱饵弹的视景仿真 [J]. 电光与控制, 2012, 19(7): 41-43.
- [4] 孔晓玲, 马胜贤, 杜玉萍, 等. 面源红外干扰弹对抗红外成像制导导弹的仿真研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(1): 78-81.
- [5] 李慎波, 李韬锐, 童中翔, 等. 导弹战术参数对面源红外诱饵干扰效能影响 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 133-142.
- [6] 李传良, 童奇, 王超哲, 等. 目标机飞行参数对面源红外诱饵干扰效能影响 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S1): 128-136.
- [7] Viau C R. Implementation of intensity ratio change and line-of-sight rate change algorithms for imaging infrared trackers [C]. SPIE, 2012, 8355: 83550P.
- [8] 张喜涛, 白晓东, 闫琳, 等. 红外空空导弹抗干扰性能评估指标体系研究 [J]. 红外技术, 2020, 42(11): 1089-1094.
- [9] 韦卓, 黄建忠. 红外成像导引头抗红外诱饵弹动态干扰试验系统构建 [J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(2): 97-100.
- [10] 张飞宇. 增强型比例导引系统制导性能的研究 [J]. 弹道学报, 2010, 22(3): 103-105.