红外诱饵对成像制导导弹影响规律研究

周卫文[1,3],康美玲[2],周泽强[1,3]

(1. 上海航天控制技术研究所,上海 201109;
2. 上海航天技术研究院,上海 201109;
3. 中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心,上海 201109)

摘　要:在复杂对抗环境下,目标通过投放红外诱饵干扰红外成像导引头的识别与跟踪,从而影响导弹的精确制导,通过对不同影响因素的分析,揭示红外诱饵对成像导弹的作用机理,总结红外诱饵对导弹制导导引的影响规律。首先建立了红外诱饵、目标及导弹制导的链路仿真模型,在分析总结红外诱饵的主要影响因素基础上,分别评估了红外诱饵的投放距离、导引头图像目标识别时间及多颗诱饵弹投放间隔等因素对导弹制导导引的影响,给出了各因素对制导系统及导引系统影响的仿真结果,总结分析红外诱饵对红外成像导弹的影响机理及影响规律。

关键词:红外导弹;　红外诱饵;　制导精度;　影响规律

中图分类号:TN976　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201948.1204004

Research of infrared flares influence mechanism on the imaging guidance missile

Zhou Weiwen[1,3], Kang Meiling[2], Zhou Zeqiang[1,3]

(1. Shanghai Institute of Aerospace Control Technology, Shanghai 201109, China;
2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;
3. Infrared Detection Technology Research & Development Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

Abstract: In the complex combat environment, the infrared flares was used by a plane to counter the recognition and tracking of infrared imaging seekers in order to affect guidance precision of missiles. Through the analysis of main influencing factors, the effect mechanism of infrared flares on imaging missile was revealed. First, the simulation model of infrared flares, target plane and missile guidance link were established. On the basis of analyzing and summarizing the main influencing factors of infrared flares, the effects of infrared flares launch distance, seeker target recognition time and launch interval of multiple flares were evaluated respectively. The sumulation results of the influence of various factors on the guidance and seeker systems were proposed. The influence mechanism and discipline of infrared flares on infrared imaging missiles were summarized and analyzed.

Key words: infrared missile;　infrared flares;　guidance precision;　influence mechanism

收稿日期:2019-08-13;　**修订日期**:2019-10-14

基金项目:国家 973 计划(613271010204)

作者简介:周卫文(1982-),男,高级工程师,博士,主要从事红外探测制导总体及抗干扰技术方面的研究。
Email:weiwen@126.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0 引 言

随着战争形态的不断变化，未来红外精确武器系统所面临的作战环境越来越恶劣，不断发展的各种诱饵干扰技术对红外成像导引头构成很大的威胁,大大降低了导弹的命中概率和精度,对红外成像末制导武器的抗干扰能力提出了更高的要求[1-2]。

在对抗环境下，目标载机通过投放红外诱饵极大提升了诱骗来袭导弹的能力，从而使红外导引头出现识别目标错误或识别延迟，造成红外导引头跟踪出现跳动现象，进而影响红外成像导引头工作过程中的识别快速性及跟踪稳定性 [3-6]。文中以红外点源诱饵为例，分析了红外诱饵对红外成像制导制导的影响规律,分别从不同投放方式、作用距离、识别时间、投放间隔等方面对红外诱饵影响导弹的机理进行了分析。

1 红外诱饵作用机理

红外诱饵弹被抛射后，燃烧药柱产生高温火焰并在特定的光谱范围内产生红外辐射，从而欺骗红外探测系统。红外导引头通过探测目标的红外辐射信号从而截获并攻击目标,在目标识别过程中,干扰弹和目标同时出现在导引头瞬时视场内。当图像处理算法未能识别出目标时，导引头光轴跟踪两者的等效辐射能量中心；当图像处理算法无法识别目标时,随着红外诱饵与目标的距离越来越远,目标有可能逃出瞬时视场;图像处理算法重新识别出目标后,导引头光轴指向需要从等效辐射能量中心跳回到目标处，光轴跟踪指令的跳跃对导引头控制和导弹制导均会产生不利影响。具体过程如图 1 所示。

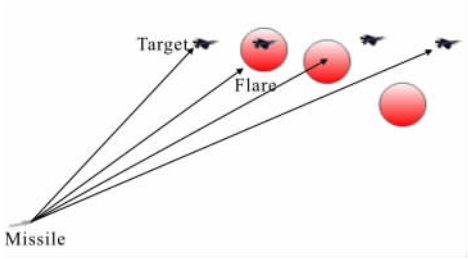


图 1 红外诱饵干扰过程中导弹跟踪示意图

Fig.1 Missile tracking in infrared flars interference process

2 红外诱饵弹模型

典型红外诱饵弹主要参数如表 1 所示。

表 1 典型红外诱饵弹参数

Tab.1 Typical infrared flares missile parameters

Weight/kg	Altitude/km	Formative time/s	Burning duration/s	Separate time/m·s^{-1}
0.8	<30	t_o<0.5	t_o<0.3	15-30

红外诱饵弹运动方程首先要考虑诱饵弹发射后受到空气阻力的影响,产生的加速度可表示如下：

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-\frac{\rho_a g v^2}{2\beta} \tag{1}$$

式中：ρ_a 为大气密度；v 为速度；g 为重力加速度；β 为弹道系数。

β 由公式(2)定义：

$$\beta=\frac{w}{C_d A_{ref}} \tag{2}$$

式中：C_d 为阻力系数；A_{ref} 为与阻力系数有关的参考面积，一般取诱饵弹最大横截面积；w 为干扰弹质量,由公式(3)定义：

$$w=w_0-\frac{w_1}{T}t \tag{3}$$

式中：w_0 为诱饵弹质量；T 为诱饵弹全部燃烧时间；t 为诱饵弹燃烧时间；w_1 为诱饵弹装药质量。

诱饵弹在三个方向的运动方程可表示如下：

$$\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=-\frac{\rho_a g v^2 C_d A_{ref}}{2w}\times\frac{v_c}{v}-g \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=-\frac{\rho_a g v^2 C_d A_{ref}}{2w}\times\frac{v_x}{v} \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}=-\frac{\rho_a g v^2 C_d A_{ref}}{2w}\times\frac{v_z}{v} \tag{6}$$

根据红外诱饵弹的阻力系数、质量变化规律和运动方程可以建立诱饵弹运动特性模型。

3 红外诱饵影响规律分析

红外导弹通常采用比例制导或者扩展比例制导规律进行寻的,弹目正常的弹道关系如图 2 所示,视线角速度趋近于 0,视线角近似为常值,导弹飞向弹

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

目遭遇点,直至摧毁目标。

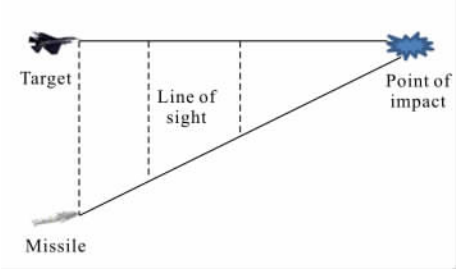


图 2 弹道关系示意图

Fig.2 Figure of missile trajectory relationship

当存在红外诱饵干扰后，正常的弹目视线上叠加了扰动,如图 3 所示。多颗红外诱饵弹的投放则在弹道弹目视线上叠加多个扰动。与干扰投放相关的因素主要有投放距离、识别时间、投放间隔等,需要客观地分析红外诱饵对成像导弹的影响规律。

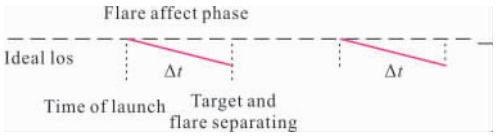


图 3 连续投放诱饵下的视线变化示意图

Fig.3 Diagram of sight change with continuous dropped flares

为了能够合理分析红外诱饵对导弹制导系统影响规律，需要建立导弹制导控制模型、目标运动模型、诱饵运动辐射模型及影响要素分布。影响规律分析方法如图 4 所示。

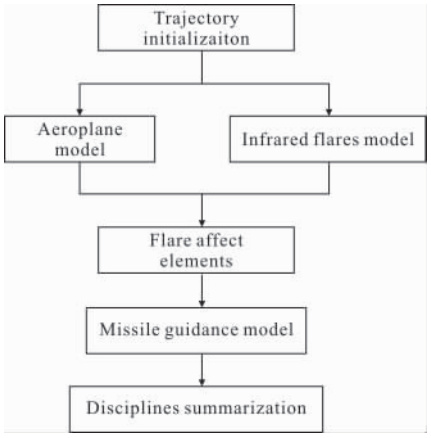


图 4 影响规律分析方法示意图

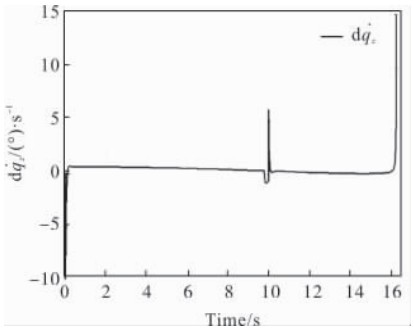
Fig.4 Diagram of influence mechanism analyzing method

通过对飞机目标模型、诱饵目标模型及导弹制导控制模型的建立,带入不同的诱饵投放要素,评估红外诱饵对制导的影响规律。

3.1 诱饵投放距离对导引制导的影响分析

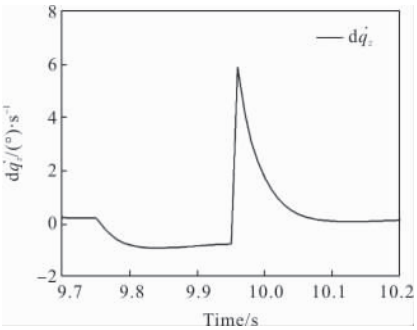
当红外诱饵弹和目标同时出现在红外导引头视场内时,由于图像识别需要一定的时间间隔,在未识别出时,导弹跟踪两者的等效辐射能量中心。仿真分析中,假定投掷红外诱饵弹后,当图像处理算法未识别出目标时，导弹跟踪诱饵和目标的等效辐射能量中心,图像算法识别时间为 0.2 s。仿真分析中假定导弹初速度 V_0=400 m/s，导弹初始位置:x_0=0 m,y_0=1 000 m,z_0=0,初始弹道倾角 θ_0=0,初始弹道偏角 ψ_0=0。目标初速度 V_0=300 m/s,目标初始位置 x_0=7 000 m,y_0=3 000 m,z_0=0，导引头图像识别时间 Δt=0.2 s,分析不同的诱饵投放距离对导引头和制导系统的影响。

图 6 给出了导引头识别时间 Δt=0.2s,R=3 500 m 时投放诱饵对视线角速度、光轴指向及过载指令的影响,由图可以得出,当单颗诱饵弹投放时,视线角在识别时间内持续形成一个角度偏差，在识别目标后,视线角速度出现一个巨大的跳动,从而影响导弹过载指令的变化。



(a) $\dot{q}_z$ 的变化

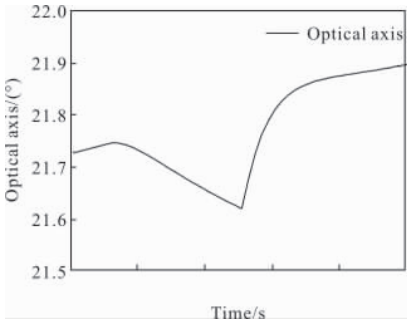
(a) Change of $\dot{q}_z$



(b) $\dot{q}_z$ 的放大

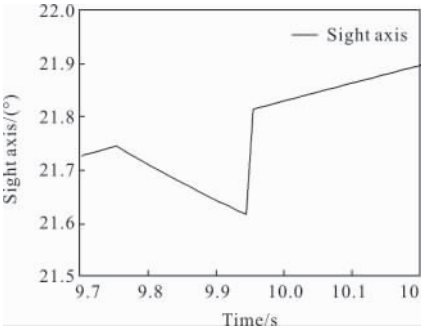
(b) Zoom of $\dot{q}_z$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



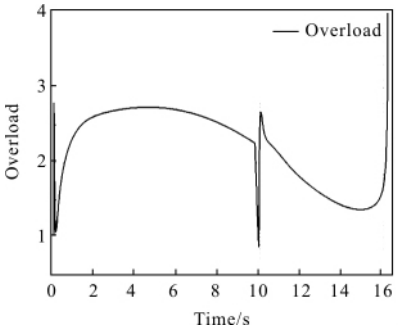
(c) 光轴的变化

(c) Change of optical axis



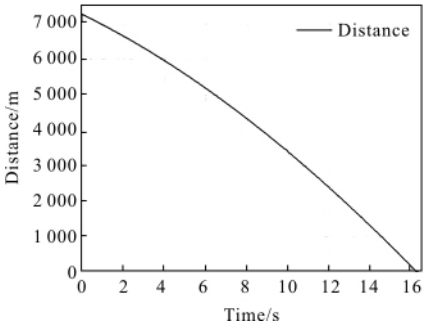
(d) 视线的变化

(d) Change of sight axis



(e) 过载指令 Y 的变化

(e) Change of overload command Y



(f) 距离的变化

(f) Change of distance

图 6 R=3 500 m,图像识别时间 Δt=0.2 s 时红外诱饵对导引跟踪和制导的影响

Fig.6 Influence of infrared flares on seeker tracking and guidance with R=3 500 m, recognition time Δt=0.2 s

采用相同的分析方法，仿真了红外诱饵投放距离分别为 R=6 500 m 和 R=500 m 时,红外诱饵对导引制导的影响如表 2 所示。

表 2 不同诱饵投放距离对导引头跟踪制导的影响

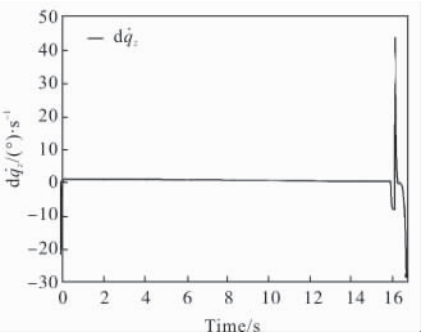
Tab.2 Influence of seeker tracking and guidance with different flares dropped distances

	R=6 500 m	R=3 500 m	R=500 m
Fluctuant of LOS $\dot{q}_z$/(°)·s^{-1}	4	6	45
Y overload/g	0.5	1.2	12
Miss distance/m	5	5	30

由仿真结果可知当导引头对诱饵的识别时间 Δt 固定时,弹目相对距离 R 越小,诱饵造成的视线角速度变化和过载变化越大,脱靶量超差的可能性越大。

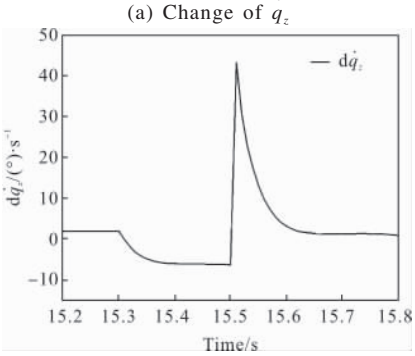
3.2 目标识别时间对导引制导的影响分析

第 3.1 节中,假设当导引头无法识别目标与诱饵时,导引头跟踪两者的等效辐射能量中心,当导引头识别出目标后，导引头光轴指向从等效辐射能量中心跳回目标位置。为了评估导引头识别时间对制导导引的影响，分别设置图像识别时间 Δt 为 0.1、0.15、0.2 s。图 7 给出弹目相对距离 R=500 m,识别



(a) $\dot{q}_z$ 的变化

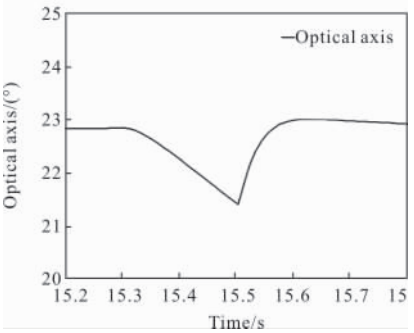
(a) Change of $\dot{q}_z$



(b) $\dot{q}_z$ 的放大

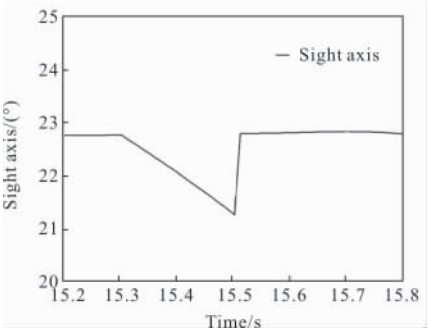
(b) Zoom of $\dot{q}_z$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



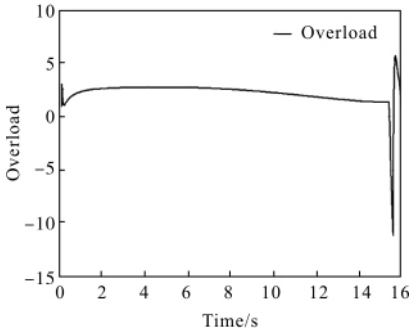
(c) 光轴的变化

(c) Change of optical aixs



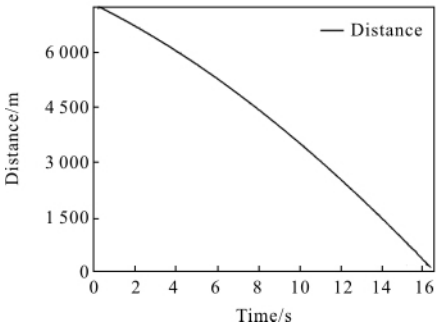
(d) 视线的变化

(d) Change of sight aixs



(e) 过载指令 Y 的变化

(e) Change of overload command Y



(f) 距离的变化

(f) Change of distance

图 7 R=500 m,Δt=0.1 s 时红外诱饵对导引头跟踪和制导的影响

Fig.7 Influence of infrared flares on seeker tracking and guidance with R=500 m, recognition time Δt=0.1 s

时间 Δt=0.2 s 时,诱饵对导引制导的影响评估曲线。

采用相同的分析方法，为了评估不同诱饵识别时间对导引制导的影响，给出 Δt=0.1 s,Δt=0.5 s 时,投放诱饵对导引制导的影响。如表3 所示。

表 3 R=500 m 时不同诱饵识别时间对导引头跟踪制导的影响

Tab.3 Influence of seeker tracking and guidance with different flare recognition times (R=500 m)

	Δt=0.1 s	Δt=0.15 s	Δt=0.2 s
Fluctuant of LOS $\dot{q}_z$/(°)·s^{-1}	25	40	45
Y overload/g	4	9	12
Miss distance/m	5	14	30

由图 7 及表 3 可得以下结论：

(1) 当诱饵的投放距离 R 不变时,对诱饵的识别时间 Δt 越长,诱饵造成的视线角速度和过载变化越大。

(2) 通常情况下，诱饵造成的导引头稳定平台的抖动，远远小于导引头稳定平台的跟踪能力及稳定能力。当图像识别出目标后,导引头能够迅速将光轴指向目标并能够保持稳定跟踪，但光轴指向的跳跃会对视线角速度和过载指令造成影响,从而影响制导精度。

3.3 诱饵投放间隔对导引制导的影响分析

在攻击过程中,存在目标平台连续投放多颗诱饵弹的情况，诱饵的投放间隔不同其对导引制导系统的影响也不尽相同，所以需要分析诱饵弹联投模式下投放间隔对导引头和制导系统的影响。假设目标连续投放三颗诱饵弹，每颗诱饵弹的识别时间 Δt=0.2 s,T_{go} 表示剩余飞行时间，不同的投放时刻用诱饵投放时 T_{go} 时间表示，从而考察诱饵投放间隔对导引制导的影响。图 8 给出的是诱饵识别时间 Δt=0.2 s,T_{go}=3.5 s, T_{go}=1.5 s, T_{go}=1 s 时诱饵对导引制导的影响。

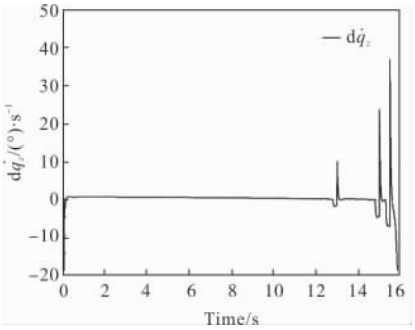
采用相同的分析方法，给出其他不同的诱饵投放间隔对导引制导的影响,如表 4 所示。

由图 8 及表 4 不同诱饵投放间隔对导引制导的仿真分析可得以下结论：

(1) 投放多颗诱饵弹时，当最后一刻诱饵弹投放时 T_{go} 较大(大于 10 倍制导时间常数),一般不会对导弹脱靶量造成影响。这是因为当 T_{go} 较大时，导引头和

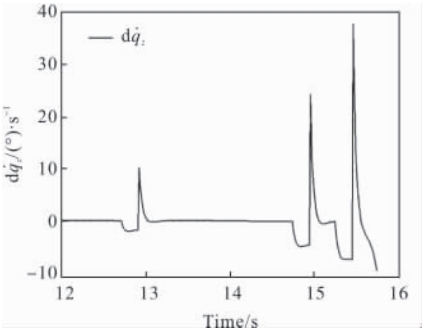
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

制导系统有足够的时间修正目标指向和重新规划弹



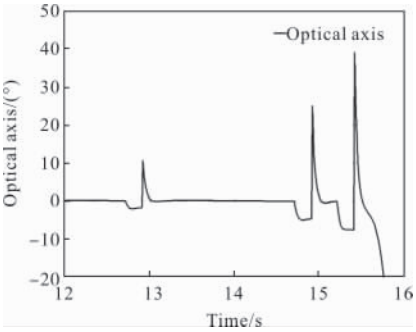
(a) $\dot{q}_z$ 的变化

(a) Change of $\dot{q}_z$



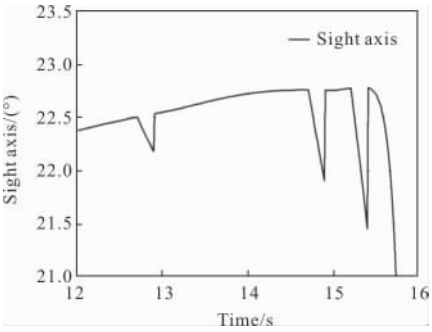
(b) $\dot{q}_z$ 的放大

(b) Zoom of $\dot{q}_z$



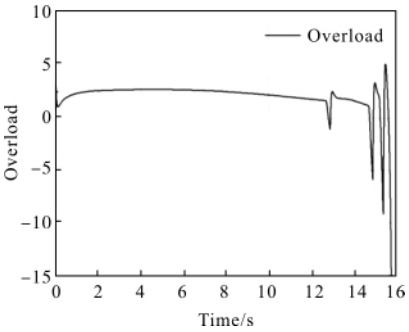
(c) 光轴的变化

(c) Change of optical axis



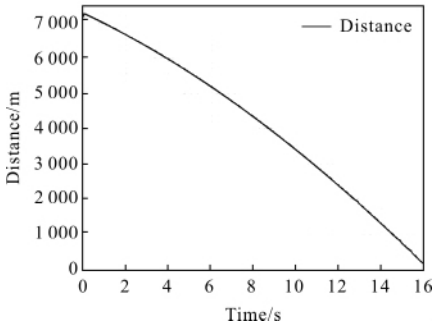
(d) 视线的变化

(d) Change of sight axis



(e) 过载指令 Y 的变化

(e) Change of overload command Y



(f) 距离的变化

(f) Change of distance

图 8 T_{go}=3.5 s, T_{go}=1.5 s, T_{go}=1 s 时投放诱饵对导引头跟踪制导的影响

Fig.8 Influence of infrared flares on seeker tracking and guidance when T_{go}=3.5 s, T_{go}=1.5 s, T_{go}=1 s

表 4 识别时间 Δt=0.2 s,不同诱饵投放间隔对导引头跟踪制导的影响

Tab.4 Influence of seeker tracking and guidance with different flares launch intervals (Δt=0.2 s)

Launch time	Miss distance/m
T_{go}>2 s	5
T_{go}=3 s, T_{go}=2 s, T_{go}=1 s	5
T_{go}=3.5 s, T_{go}=2.5 s, T_{go}=1 s	23.34
T_{go}=3.5 s, T_{go}=1.5 s, T_{go}=1 s	133.5

道,从而能够确保导弹击中目标。例如文中仿真中,假设图像识别时间 Δt=0.2 s,当 T_{go}>2 s 时不影响导弹脱靶量。

(2) 在末制导敏感区内,诱饵投放间隔对脱靶量影响较大,但并不是投放间隔越小脱靶量越大,最终

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的脱靶量与诱饵投放间隔、制导敏感区分布及作战态势等多种因素密切相关。

4 结 论

基于红外诱饵对红外成像制导导弹的影响机理,建立了红外诱饵、飞机目标及导弹制导全链路模型,分析了干扰对抗状态下,红外诱饵的运动特性、诱饵投放的距离、导引头对目标识别时间及诱饵连续投放间隔等因素对红外成像导弹导引制导的影响规律。

参考文献:

[1] Gan Yuanliu, Jiang Chong, Liu Yujie, et al. Development of foreign airborne ir decoy technology [J]. ***Electro-optic Technology Applcation***, 2013, 28 (6): 13-18. (in chinese)
淦元柳, 蒋冲, 刘玉杰, 等. 国外机载红外诱饵技术的发展[J]. 光电技术应用, 2013, 28(6): 13-18.

[2] Jia Lintong, Tong Zhongxiang, Wang Chaozhe, et al. Survey on airborne surface-type infrared decoy [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(9): 0904005. (in Chinese)
贾林通, 童中翔, 王超哲, 等. 机载面源红外诱饵及干扰效能研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0904005.

[3] Ning Gongtao, Li Ping, Su Bin, et al. Mechanism of surface-decoy effectiveness against IR FPA imaging guidance [J]. ***Infrared Technology***, 2015, 37 (6): 514-518. (in Chinese)
宁功韬, 栗苹, 苏斌, 等. 面源诱饵对抗红外凝视成像制导机理研究[J]. 红外技术, 2015, 37(6): 514-518.

[4] Wang Zhongxian, Fan Xiang, Ma Donghui, et al. Study of jamming effetct of infrared decoy on infrared imaging guided air-to-air missile[J]. ***Infrared***, 2009, 30 (5): 27-31. (in Chinese)
汪中贤, 樊祥, 马东辉, 等. 红外诱饵对红外成像制导空空导弹的干扰效果研究[J]. 红外, 2009, 30(5): 27-31.

[5] Li Chuanliang, Tong Zhongxiang, Zhao Daowen. Research on methods of countermining infrared imaging air-to-air missile [J]. ***Laser & Infrared***, 2011, 41(12): 1355-1359. (in Chinese)
李传良, 童中翔, 赵道文. 对抗红外成像空空制导导弹的措施研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(12): 1355-1359.

[6] Liu Jiacong, Liu Zhanchen, Zhang Hengxi, et al. The simulation research of IR decoy countermeasure to the IR missile trace [J]. ***Infrared Technology***, 2007, 29(3): 132-134. (in Chinese)
刘加丛, 刘占辰, 张恒喜, 等. 红外诱饵对红外导弹轨迹干扰仿真研究[J]. 红外技术, 2007, 29(3): 132-134.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net