

机载红外烟幕使用方法

童中翔¹, 王超哲¹, 武卫¹, 李传良²

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464200)

摘 要:烟幕弹作为一种性价比高的装备广泛地应用在地面红外对抗领域。但在空空对抗领域,由于烟幕容易受到高速气流的影响,利用烟幕有效对抗空空红外制导导弹目前还是个难题。把载机、烟幕和导弹作为一个系统,将烟幕弹的发射时机、初始速度大小及方向与载机的规避相结合,利用相对运动的原理实现发射烟幕弹的精确定位,得出烟幕弹的发射方法;充分利用烟幕的遮蔽效应得出载机的机动规避轨迹,并反推出载机的控制率,得出载机的规避方法。从而解决了高速气流对烟幕的影响,得到了机载烟幕弹对红外制导导弹的干扰方法。通过对载机、烟幕、导弹复杂系统的红外对抗仿真,验证了这一干扰方法的可行性,并为机载红外干扰系统的设计及红外对抗战法的制定提供了参考。

关键词: 红外对抗; 红外烟幕; 干扰方法; 导弹逼近告警系统

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)01-0023-05

烟幕干扰属于大面积屏障干扰。为了对付战场上日益广泛使用的先进红外探测器材,人们对烟幕遮蔽能力的要求已从可见光波段拓展到近、中、远红外波段,可遮蔽 90% 以上红外光^[1-4],使红外制导导弹无法形成制导信号。烟幕弹作为一种性价比高的装备广泛地应用在地面红外对抗领域^[5-6]。但在空空对抗领域,由于烟幕容易受到高速气流的影响,利用烟幕有效对抗空空红外制导导弹目前还是个难题^[7]。作者经过反复研究,把载机、烟幕和导弹作为一个系统来考虑,利用干扰方法很好地解决了这个难题。

1 机载烟幕弹的发射方法

烟幕弹的发射方法包括烟幕弹发射的时机、相对发射速度大小和方向。通过对烟幕弹的发射实现既不浪费烟幕的材料,又最大限度地保证烟幕的遮蔽效果。

1.1 发射烟幕弹精确定位

对于烟幕弹的发射,要求烟幕弹爆炸时,烟幕的中心位于弹目线上,烟幕的绝对速度最小,以消除相对气流的影响,最大限度地遮蔽载机。对于给定型号的烟幕弹,从发射到爆炸的时间是一定的,要实现烟幕弹的精确定位,只能通过适当选择烟幕弹初始速度的大小和方向(此速度是指烟幕弹发射时相对于载机的速度)。烟幕弹爆炸前受到重力和气动阻力作用而运动,空气浮力可忽略不计,相对运动轨迹见图 1。

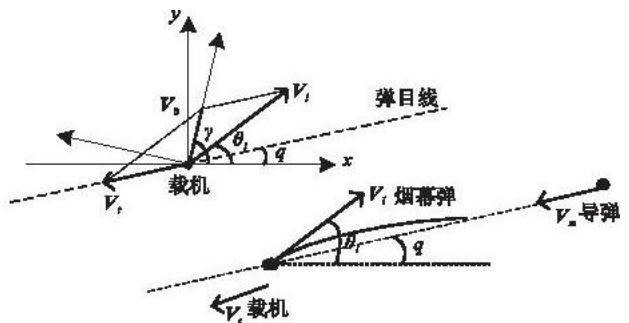


图 1 烟幕弹相对运动轨迹及与载机的速度合成

Fig. 1 Relative motion trace of smoke bomb and the composition of velocity with plane

* 收稿日期: 2008-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60772162)

作者简介: 童中翔(1958-),男,河南洛阳人,教授,主要从事飞行器攻防对抗仿真研究. E-mail: tzxky@163.com

图1中: V_i 为烟幕弹相对于载机的发射速度; θ_i 为烟幕弹相对于载机的发射速度与水平面的夹角; q 为弹目线与水平面的夹角; V_c 为载机的速度(由飞机运动方程求得,见文献[8]); V_m 为导弹的速度(由导弹运动方程求得,见文献[9]); V_0 为烟幕弹的初始绝对速度; γ_0 为烟幕弹的初始绝对速度与水平面的夹角。

根据速度合成法则, $V_0 = V_i + V_c$ 可得到 V_i 、 θ_i 与 V_0 、 γ_0 的关系式:

$$\begin{cases} V_0 \cos(\gamma_0 - \theta_i) = V_i - V_c \cos(\theta_i - q) \\ V_0 \sin(\gamma_0 - \theta_i) = V_i \sin(\theta_i - q) \end{cases} \quad (1)$$

烟幕弹爆炸前受重力和气动阻力的作用,动力学方程如下:

$$\begin{cases} m dV/dt = -X - mg \sin \gamma \\ m V d\gamma/dt = -mg \cos \gamma \\ X = 1/2 C_x \rho V^2 S \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为烟幕弹的质量; V 为烟幕弹的绝对速度; γ 为烟幕弹的绝对速度与水平面的夹角; X 为气动阻力; C_x 为烟幕弹的阻力系数; ρ 为空气密度; S 为烟幕弹的迎风面积。

烟幕弹爆炸前的运动学方程如下(以图1所示的地面坐标系):

$$\begin{cases} dx/dt = V \cos \gamma \\ dy/dt = V \sin \gamma \end{cases} \quad (3)$$

已知烟幕弹从发射到爆炸的时间为 t_b , 给定初始条件: V_i (选取时较 V_c 稍大)、 θ_i 、 x_0 、 y_0 , 联立方程(1)、(2)、(3)可求得烟幕弹爆炸时刻所处的位置 x_{t_b} 、 y_{t_b} 。以下式求得 q' :

$$\sin q' = (y_{t_b} - y_0) / (x_{t_b} - x_0) \quad (4)$$

1) 若 $q' = q$, 则就是实现烟幕弹精确定位的初始速度大小和方向;

2) 若 $q' > q$, 则应该适当减小 θ_i , 利用新的初始条件 θ_i 、 V_i 、 x_0 、 y_0 求解方程组, 得出的 q' 重新与 q 进行比较;

3) 若 $q' < q$, 则应该适当增大 θ_i , 利用新的初始条件 θ_i 、 V_i 、 x_0 、 y_0 求解方程组, 得出的 q' 重新与 q 进行比较。

经过若干次比较和计算, 最终得出实现烟幕弹精确定位的初始速度大小和方向 V_i 与 θ_i 。

1.2 烟幕位置实时计算

烟幕弹爆炸后受重力、气动阻力和空气浮力的作用(忽略烟幕形成的时间), 其动力学方程如下:

$$\begin{cases} m dV/dt = -X - (m - m_a) g \sin \gamma \\ m V d\gamma/dt = - (m - m_a) g \cos \gamma \\ X = 1/2 C_x \rho V^2 S \end{cases} \quad (5)$$

式中 m_a 为烟幕排开空气的质量。

联立求解方程组(3)、(5), 可得出爆炸后烟幕的运动轨迹。

2 载机规避控制律

精确控制载机的飞行轨迹, 要求导弹穿过烟幕前, 保证载机既能实时处于烟幕的遮蔽区域内, 又能最大限度地逃出导弹的跟踪视场, 这是确定载机飞控系统控制律的前提。

2.1 载机规避原理分析

烟幕对导弹的遮蔽区域是个圆锥体, 随着导弹的逼近, 圆锥角逐渐扩大。当导弹距离烟幕较远时, 圆锥体的顶角很小, 载机在垂直弹目线方向上的可运动距离较小, 只能作沿导弹烟幕中心连线的直线运动或半径非常大的曲线运动, 称这段轨迹为“精确控制区”。随着导弹逼近烟幕, 遮蔽区域迅速扩大, 载机的可运动距离非常大, 此时, 载机即使垂直弹目线运动也不会逃出烟幕的遮蔽区域, 为了最大可能地摆脱导弹的追踪, 载机应该垂直弹目线加速运动, 称这段轨迹为“加速逃逸区”。当导弹穿过烟幕后, 确保载机不在导弹的跟踪视场内, 则规避成功。

由以上分析可知,载机的机动规避轨迹应该是一条由“精确控制区”和“加速逃逸区”组成的沿着烟幕对导弹遮蔽区域的边界(形似“喇叭状曲面”)的曲线,见图 2。“喇叭状曲面”由导弹和烟幕的运动决定。载机的规避轨迹可以是曲面上的任意一条曲线。但是,考虑到载机在规避中要获得尽可能大的速度,可以将重力势能转换为动能获取速度,因此载机的机动规避轨迹应该在“喇叭状曲面”的下半部分。

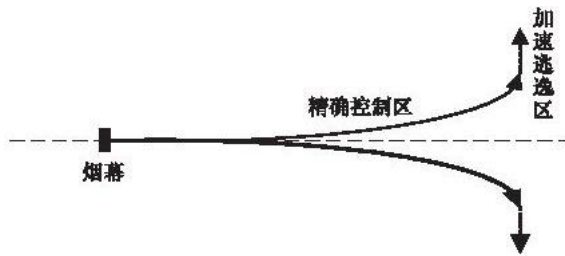
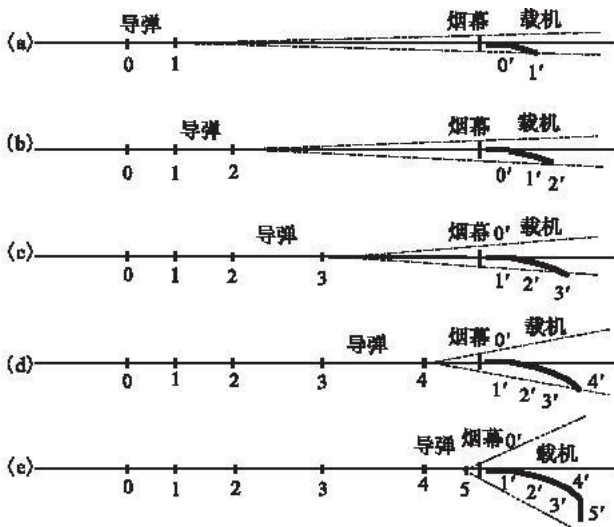


图 2 载机运动轨迹集曲面

Fig. 2 Integration camber of target warcraft motion trace

2.2 载机机动规避轨迹

根据对载机规避原理的分析,可做出图 3 的导弹攻击、载机规避的一个运动简图。整个过程分为 6 个时间段,导弹运动到位置“0”之前,载机一直沿初始弹目线运动;而后,导弹从位置“0”经过“1”、“2”、“3”、“4”运动到“5”,同时载机沿 0'-1'-2'-3'-4'-5'运动。



3 烟幕遮蔽区域内载机规避的运动简图(不考虑烟幕向下运动)

Fig. 3 Maneuver motion of target in screen's shelter

(ignoring descending motion of screen)

为了达到最好的遮蔽效果,要求载机必须每一时刻都在烟幕的遮蔽区域内,同时尽可能地远离导弹视线。因此,载机的位置就是每一时刻都位于烟幕遮蔽区域的边界面上。烟幕的遮蔽区域是随着导弹到烟幕距离的变化而非线性变化的,在导弹距离烟幕较近时,遮蔽区域迅速扩大,载机有可能达不到遮蔽区域的边界,此时,载机应该以最大的速度向边界面运动。

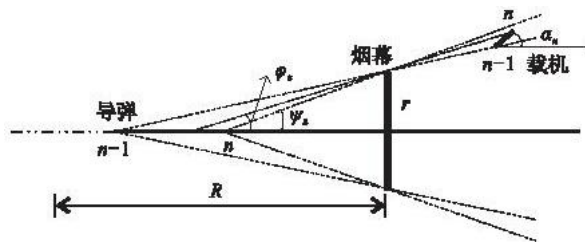


图 4 运动过程分析图

Fig. 4 Analysis of motion process

根据载机的初始速度、加速性能和飞行速度包线,可以大致确定每一时刻载机的速度大小 V_{ii} (“精确控制区”内的 V_{ii} 主要由载机的初始速度确定,“加速逃逸区”内的 V_{ii} 主要由载机的加速性能和飞行速度包线确定),得到载机的速度集为 $V_i = \{V_{i1}, \dots, V_{i2}, \dots, V_{im}\}$ 。

由载机的速度集和导弹的运动确定载机的机动规避轨迹。将烟幕弹发射后的载机规避过程分为若干个时间段,研究 $(n-1) \rightarrow n$ 时间段 Δt_n 内的运动见图 4。由图 4 所示建立相关的数学关系得:

$$\begin{cases} \tan \psi_n = r / (R - \sum_{i=1}^n V_{mi} \Delta t_i) \\ \tan \varphi_n = (\sum_{i=1}^n V_{ii} \sin \alpha_i \Delta t_i - \gamma) / (t_b V_{i0} + \sum_{i=1}^n V_{ii} \cos \alpha_i \Delta t_i) \end{cases} \quad (6)$$

式中: r 为烟幕的半径; R 为烟幕弹爆炸时导弹到烟幕中心的距离; t_b 为烟幕弹从发射到爆炸的时间; Δt_i 为第 i 个时间段; ψ_n 为第 n 个时间段后烟幕遮蔽区域圆锥体的半顶角; φ_n 为第 n 个时间段后载机与烟幕边界的切线与初始弹目线的夹角(与飞机 Δt_i 内飞行距离相比 r 很小,飞机第一个时间段的机动离开弹目线的垂直距离就大于 r); V_{mi} 为第 i 个时间段导弹相对烟幕的速度; V_{ii} 为第 i 个时间段载机相对烟幕的速度; V_{i0} 为发射烟幕弹时载机的速度; α_i 为第 i 个时间段载机运动轨迹与初始弹目线的夹角。

根据上述分析,可将载机的规避分为以下两种情况:①保持载机速度大小不变,若存在 α_n 使得 $\tan \psi_n = \tan \varphi_n$,此时的 α_n 即为所求;②保持载机速度大小不变,若对于任意的 α_n 都有 $\tan \psi_n > \tan \varphi_n$,此时载机应该加速运动, $\alpha_{n-1} \leq \alpha_n \leq \pi/2$ 。则载机的机动规避轨迹斜率为 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ 。将图 4 中的轨迹进行曲线

拟合,就得到载机的机动规避轨迹。

2.3 载机规避控制律

载机的控制律包括4个参数随时间的变化规律:①载机副翼偏角 $\delta_x(t)$ 随时间的变化规律;②载机方向舵偏角 $\delta_y(t)$ 随时间的变化规律;③载机升降舵偏角 $\delta_z(t)$ 随时间的变化规律;④载机油门舵偏角 $\delta_p(t)$ 随时间的变化规律。将上述求出的载机机动规避轨迹的运动参数代入载机的运动方程可求出载机飞控系统控制律,即得到与载机机动规避轨迹对应的 $\delta_x(t)$ 、 $\delta_y(t)$ 、 $\delta_z(t)$ 、 $\delta_p(t)$ 。

3 仿真结果

把载机、烟幕和导弹作为一个复杂系统进行红外对抗仿真^[10],初始条件:作战高度 $H = 13$ km,某型导弹初始速度 $V_{mi} = 360$ m/s(由攻击机速度决定),烟幕直径 $r = 60$ m,烟幕弹爆炸时间 $t_b = 0.5$ s,某型载机速度 $V_i = 300$ m/s,弹目线水平。从大量仿真结果中找出机载烟幕对红外制导导弹的干扰方法见表1。表中“时机”为发射烟幕弹时导弹离目标的距离。纵向参数为一个时间序列,考虑到载机规避“先缓后急”,采用变时间间隔。仿真结果表明,在导弹距离载机5 km时,机载导弹逼近告警系统以313 m/s的出射速度、6.4°的出射角将烟幕打到弹目线上;同时载机飞控系统按照表中给出的控制律进行规避。得到的导弹脱靶量 $R_{CA} = 92$ m。

表1 干扰方法

Tab. 1 Interfering method

烟幕弹发射控制				载机机动规避控制				
时机/ km	$V_i /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\theta_i /$ ($^\circ$)	$V_{ii} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\alpha_i /$ ($^\circ$)	$\delta_x(t) /$ ($^\circ$)	$\delta_y(t) /$ ($^\circ$)	$\delta_z(t) /$ ($^\circ$)	$\delta_p(t) /$ ($^\circ$)
			300	0	0	0	0	60
			300	0	0	0	0	60
			301	0.04	0	0	0.02	60
			306	0.8	0	0	2.3	60
			311	1.3	0	0	1.9	60
			316	2.8	0	0	2.5	60
			319	5.6	0	0	2.9	60
5	313	6.4	326	10.2	0	0	3.5	60
			327	19	0	0	3.0	60
			331	28.4	0	0	3.9	60
			337	35.2	0	0	4.1	60
			346	43.1	0	0	4.1	60
			378	57.4	0	0	4.1	60
			397	79	0	0	4.1	60
			425	90	0	0	0	60

4 结论

本文针对机载导弹逼近告警系统是否能够精确控制红外烟幕弹的释放时机、初始速度大小和方向,并使载机正确规避,从而实现红外烟幕弹对红外制导导弹达到干扰效果这一难题,把烟幕弹的释放与载机的规避相结合,得出了机载红外烟幕使用方法。此使用方法分为烟幕弹发射方法和载机机动规避方法。在红外对抗中,载机通过导弹逼近告警系统一旦检测到导弹威胁时,应迅速调整载机速度方向与导弹速度方向相同,迫使弹目线空中方位基本保持不变。而后及时向正后方发射烟幕弹,考虑到气动阻力作用,发射速度应略大于载机的速度,使烟幕绝对速度最小;发射上偏角由烟幕弹爆炸时间及弹目线方位决定,以保证烟幕弹爆炸时在弹目线上。精确控制载机的飞行轨迹,要求导弹穿过烟幕前,载机既能实时处于烟幕的遮蔽区域内,又能最大限度地逃出导弹的跟踪视场。载机的机动规避轨迹是一条由“精确控制区”和“加速逃逸区”组成的

沿着烟幕对载机遮蔽区域边界的下半部的曲线。

参考文献:

- [1] QIU Jijin, MEI Jianting. Interference of the Smokescreen Confronting Infrared Guided Weapons [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006,35(2):213-215.
- [2] Fu Z M. A Two-zone Fire Growth and Smoke Movement Model for Multi-compartment Buildings[J]. Fire Safety Journal, 2000,34(3):257-285.
- [3] ZHU Chenguang, PAN Gongpei, WU Xiaoyun, et al. Diffusion Law of Smoke in Visible Light and Infrared Wavebands [J]. Journal of China Ordnance, 2005,26(2):65-69.
- [4] GUO Liping, CHEN Yongxi, LI Yingxia, et al. Optical Characteristics of Porous Glasses Matrix and Its Light-conducted Mechanism[J]. Journal of Wuhan University of Technology:Materials Science Edition, 2004,19(4):34-36.
- [5] 梁柳,徐迎,金丰年. 烟幕干扰技术综述[J]. 现代防御技术,2007,35(4):22-26.
LIANG Liu, XU Ying, JIN Fengnian. Summarization of Smoke Screen Jamming Technology[J]. Modern Defence Technology, 2007,35(4):22-26. (in Chinese)
- [6] 韩洁,张建奇,何国经. 红外烟幕干扰效果评价方法[J]. 红外与激光工程,2004,33(1):1-4.
HAN Jie, ZHANG Jianqi, HE Guojing. Estimation Technology of the Infrared Smoke Interference Effect[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004,33(1):1-4. (in Chinese)
- [7] HONG Yang, LI Yanjun, WANG Qi. Research on Partner-fly Infrared Decoys[J]. Journal of China Ordnance, 2006,27(4):301-305.
- [8] 童中翔,董小龙,李传良. 超视距机动动作库的可视化设计[J]. 火力与指挥控制,2006,31(7):59-62.
TONG Zhongxiang, DONG Xiaolong, LI Chuanliang. Visual Design of BVRAC Maneuver Movements[J]. Fire Control and Command Control, 2006,31(7):59-62. (in Chinese)
- [9] TONG Zhongxiang, DONG Xiaolong. Integration and Application of DIS and DVR in the Air[J]. The Proceedings of the China Association for Science and Technology,2007,3(3):67-71.
- [10] 童中翔,李传良,姚本君. 红外诱饵干扰下的导弹作战效能仿真[J]. 系统仿真学报,2008,20(11):2868-2871.
TONG Zhongxiang, LI Chuanliang, YAO Benjun. Combat Effectiveness Simulation of Infrared Jam Projected by Fighter Plane [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(11):2868-2871. (in Chinese)

(编辑:田新华)

Research on Interfering Method of Airborne IR Screen

TONG Zhong-xiang¹, WANG Chao-zhe¹, WU Wei¹, LI Chuan-liang²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Air Force No. 1 Aviation College, Xinyang 464200, Henan, China)

Abstract: As a high performance - cost ratio equipment, IR screen is widely used in ground IR countermeasure field. But in air-to-air countermeasure aspect, it is difficult to interfere IR missile effectively with IR screen because of the impact of high speed airflow. The system including target war-craft, IR screen, IR missile is founded. The launching occasion, the original velocity, the orientation of IR screen and the target maneuver are combined together. According to the principle of relative movement, the accurate positioning of IR screen is realized and the launch method of the smoke bomb is obtained. By making full use of IR screen's shade effect, target's elusion trace is received, based which the target's control law is worked out, thereby target's elusion method is obtained. By this way, the influence of high speed airflow on IR screen is eliminated and a method of airborne IR screen interfering in IR missile is found. The simulation of the complex system including target, IR screen and missile shows that the interfering method is feasible, which offers a reference to the design of IR interfering system and the establishment of IR interfering tactic.

Key words: IR countermeasure; IR screen; interfering method; MWS (Missile Warning System)