

弹道导弹再入段拦截的毁伤效果评估

胡晓伟, 胡国平, 王宇晨

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 从跟踪雷达的角度进行了再入段弹道导弹毁伤效果评估的研究。分析了弹道导弹在再入段遭到拦截时可能发生的 2 种情况, 在此基础上将弹道系数引入弹道目标毁伤效果评估中, 提出了基于弹道系数估计的弹道导弹再入段拦截的毁伤效果评估方法, 仿真了 3 种弹道目标即完整弹头、弹体残骸、小碎片的弹道系数, 证明了该方法在毁伤评估中的可行性。通过仿真机动变轨和碰撞变轨 2 种模型下的弹头运动轨迹, 研究了目标机动对弹道导弹毁伤评估可能造成的影响, 并得出可以避免这种影响的方法。

关键词 弹道导弹; 再入段拦截; 毁伤效果评估; 弹道系数

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.02.010

中图分类号 V37 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)02-0041-04

Battle Damage Assessment Methods in TBM Reentry Interception

HU Xiao-wei, HU Guo-ping, WANG Yu-chen

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Battle damage assessment in TBM reentry interception is studied from the perspective of tracking radar. Firstly, the paper analyzes two kinds of circumstances when reentry TBM is intercepted. Based on this, the ballistic coefficient method is applied to TBM battle damage assessment, and a method of calculating ballistic coefficient is introduced. Then a method of TBM Battle damage assessment based on ballistic coefficient estimation is put forward. By simulating the ballistic coefficients of three ballistic targets complete warhead, wreckage and litter pieces, the assessing method proved to be available. The influence of radar measurement accuracy on the evaluating error of ballistic coefficient is analyzed by simulation, and it comes to the conclusion that the improvement of radar measurement accuracy benefits the assessing accuracy of TBM battle damage. Finally, the effect of target maneuver on assessment is studied by simulating the warheads' contrails in maneuver-shifting contrail model and in collision-shifting contrail model, and the solution is summarized to avoid this effect.

Key words: ballistic missile; reentry interception; battle damage assessment; ballistic coefficient

在进行弹道导弹拦截效果评估时, 通常采用的方法是在拦截后的一段时间内通过观察雷达显示器

上目标是否消失来判断。但这种传统的方法远远无法满足反导作战, 尤其是再入段拦截作战对实时性

收稿日期: 2012-09-11

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2012JM8020)

作者简介: 胡晓伟(1987-), 男, 河北邢台人, 博士生, 主要从事 TBM 拦截效果评估研究. E-mail: 601237134@qq.com

引用格式: 胡晓伟, 胡国平, 王宇晨. 弹道导弹再入段拦截的毁伤效果评估[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(1): 41-43. HU Xiao-wei, HU Guoping, WANG Yuchen. Battle damage assessment methods in TBM reentry interception[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(1): 41-43.

和精确性的要求^[1]。

目前国内外公开发表的文献中,完全针对反导系统拦截效果评估这方面的还较少。在一些相关领域的研究中有考虑将贝叶斯网络和模糊综合评判等方法应用到作战评估^[2-3],但这些方法一方面过分依赖于先验知识的获取,使评估结果易受主观因素的影响;同时,对反导拦截这一特定的作战环境没有专门的针对性,导致这些方法在实际中的可行性不强。为此,本文充分考虑反导作战的特殊性,从在反导系统中占有重要地位的跟踪雷达入手,基于跟踪雷达导弹毁伤特征信息,探讨再入段拦截毁伤效果评估的新方法。

1 弹道导弹毁伤特性分析

弹道导弹在再入大气层遭到拦截时,可能发生的情况有2种^[3-4]。一种是弹头受到动能弹撞击或拦截弹爆炸冲击波作用发生功能或结构性损伤,但未发生爆炸。弹头会在外来冲击力的作用下偏离原轨道,运动轨迹发生较大转弯。此时可以根据轨道变化程度进行毁伤效果的估计。同时需要考虑弹头进行躲避式机动情况下弹道轨迹同样也会发生变化,从而对毁伤评估产生影响。

另一种情况是弹头受到动能拦截弹撞击发生爆炸。此时弹头和壳体就会变成具有不同尺寸和速率的小碎片云团。如果爆炸充分,将会产生尺寸非常小、径向速度非常高的小碎片云,这些小碎片由于雷达截面积(RCS)小,爆炸后目标将在跟踪雷达的显示器上消失,从而可判断拦截成功;如果爆炸不充分,可能产生尺寸较大的弹体残骸和小碎片,这些残骸和碎片的RCS较大,在速度上的直接改变也有限,所以可能被跟踪雷达错误地认作目标,从而影响对弹道导弹毁伤效果的评估。

弹体残骸和碎片与弹头相比,质量上减小了,但由于形状不规则迎风面积大导致在大气层受到的空气阻力反而增大,残骸碎片与弹头的这些特性差异

可以用再入目标的弹道系数来反映。

2 弹道系数及其估计方法

弹道系数是再入大气层目标质量和外形的组合参数,是再入总体飞行性能的集中体现^[5-6]。弹道系数相同的再入目标,具有相同的运动规律,弹道系数不同的再入目标,有着不同的减速特性。因此,在弹道导弹遭到拦截后,可以通过雷达跟踪测量目标运动参数估计目标的弹道系数,不同弹道系数代表了毁伤后产生了不同的弹道目标,从而可以确定弹道导弹的毁伤情况。

弹道目标的弹道系数通常不能直接计算^[7-10],而是通过雷达测量目标运动参数估计得到。弹道系数的计算公式^[8]为:

$$\beta = \frac{\rho v^2}{2(g \cos \theta - \dot{v})} \quad (1)$$

式中: $\theta = \arccos\left(-\frac{\dot{r} \sin \epsilon + r \dot{\epsilon} \cos \epsilon}{v}\right)$ 为目标再入角;

$v = \sqrt{\dot{r}^2 + (r \dot{\epsilon})^2 + (r \dot{\alpha} \cos \epsilon)^2}$ 为再入速度; $h = r \sin \epsilon$

为目标距地面高度; $g = g_0 \left(\frac{R_0}{R_0 + h}\right)^2$ 为重力加速度;

$\rho(h) = \rho_0 e^{-bh}$ 为大气密度; $\epsilon, \dot{\alpha}$ 分别为雷达测量方位角和俯仰角速度; R_0 为地球平均半径; g_0 为地球表面重力加速度; ρ_0 为地球表面大气密度。这些参数都可以由雷达测量值 $\mathbf{X} = [r \ \alpha \ \epsilon \ \dot{r}]$ 计算得到,最后代入式(1)便可以计算出目标的弹道系数。

3 基于弹道系数估计的弹道导弹毁伤效果评估

为了研究弹道导弹在不同毁伤程度下产生的弹道目标的运动特点,设置3种不同毁伤情况下产生的弹道目标的初始参数,见表1。

表1 弹道目标仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of ballistic targets

弹道导弹毁伤情况	拦截后产生的弹道目标类型	h/km	$v/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	θ/rad	β
未损伤	完整弹头	100	3	0.714	5 000
未充分爆炸,部分损伤	弹体残骸	100	4	0.765	1 000
充分爆炸,完全毁伤	小碎片	100	10	1.432	100

为了模拟的真实性,通过以下方法获取目标的雷达测量值:首先在地心直角坐标系中分析弹道目标的运动状态,之后设定雷达在地心直角坐标中位

置,将目标的运动轨迹转化到雷达东北天直角坐标系中,最后通过雷达直、极坐标转换关系得到雷达可以实际得到的极坐标下的目标观测参数。由于篇幅

限制,具体转化过程不再详细叙述。

在利用以上步骤得到雷达测量值 $\mathbf{X} = [r \ \alpha \ \varepsilon \ \dot{r}]$ 后,通过式(1)可以计算 3 种弹道目标的弹道系数,图 1 为各弹道目标弹道系数的仿真结果。

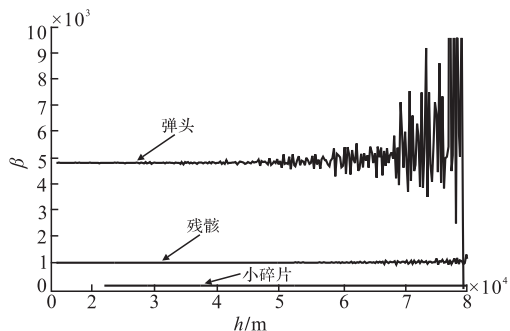


图 1 3 种弹道目标弹道系数仿真

Fig.1 Ballistic coefficients' simulation of three ballistic targets

从仿真结果可以看出,通过雷达观察值计算的弹道系数基本反映了目标真实的弹道系数值,根据不同的计算结果可以将弹体残骸、碎片与弹头区分开来。然而,由于雷达观察值不可避免的存在误差,导致弹道系数的估计值会存在一定的波动,高度越高波动越严重,当弹道系数的估计误差大到一定程度时将无法分辨弹道目标的类型(见图 1 中高度 80 km 左右的情况)。

4 目标机动对弹道导弹毁伤效果评估的影响

目前一些先进的弹道导弹都具有较强的机动能力,以躲避防御系统的拦截。在进行弹道导弹毁伤效果评估时,由弹头机动带来的弹道转弯很容易与弹头遭碰撞变轨相混淆,从而造成毁伤评估的不准

确。为此,本文将通过仿真目标机动变轨与碰撞变轨 2 种运动轨迹,来分析由于目标机动给弹道导弹毁伤效果评估带来的影响。

4.1 机动变轨模型

以二维平面机动为例,弹头最大法向机动过载 a_t ,初始再入角 θ ,弹头质量 m_t ,初始速度 v_0 ,弹道系数 β 。目标从 0 时刻开始以法向加速度 a_t 进行机动,则目标运动过程中加速度可表示为 $a = g + \frac{1}{2} \frac{\rho v^2}{\beta} \frac{v}{|v|} + a_t$, v 为目标运动速度。

4.2 碰撞变轨模型

假设拦截弹与弹头发生刚性碰撞,且拦截弹末动量为 0。拦截弹质量 m_k ,碰撞速度 v_k ,碰撞角度 γ (通常拦截弹对弹道导弹采取逆轨拦截,所以拦截弹速度与弹头轴线夹角 $\gamma \in [0, \pi/2]$)。拦截弹与弹头在 0 时刻发生碰撞,碰撞后的弹头速度 $v = v_0 + \frac{m_k}{m_t} v_k$ 。

在表 2 所给参数条件下,仿真了弹头在以上 2 种变轨模型下 3 s 内的运动轨迹,见图 2。

图 2 2 种变轨模型下的弹头运动轨迹

Fig.2 Warhead' contrails in the different shifting contrail model

表 2 机动和碰撞变轨模型仿真参数

Tab.2 Simulation parameters in maneuver-shifting contrail and collision-shifting contrail model

m_t/kg	$a_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	θ/rad	$v_0/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	β	m_k/kg	$v_k/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	γ/rad
100	5	0	3	5 000	100	1	$[0, \pi/2]$

从图 2 中可以看出,随着 γ 的增大,碰撞变轨模型下的弹头运动轨迹偏离原轨迹的程度也逐步增大,与机动变轨模型下的弹头运动轨迹差异也越来越大。当 $\gamma > \pi/72$ 时,只要跟踪雷达能够在 3 s 内准确跟踪上弹头轨迹,就可以将碰撞变轨与机动变轨 2 种情况分辨开来。

此外,撞击速度的增大也有利于目标机动和碰撞的区分。本文仿真了在 $\gamma = \pi/72$ 时, v_k 由 1 km/s 增加到 3 km/s 过程中,弹头运动轨迹偏离原轨迹的角度,见表 3。从表中可以看出随着 v_k 的增大,偏离角度也逐渐增大,从而碰撞后的轨迹变化会更加明显,有利于与机动变轨的区分。

表3 不同碰撞速度下的偏离角度($\gamma=\pi/72$)
Tab.3 Shifting angles in different collision speed

$v_k / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
偏离角度/rad	0.022	0.029	0.038	0.049	0.065	0.086	0.118	0.169	0.267	0.518	1.457

综上所述,目标机动会对弹道导弹毁伤效果的评估产生一定影响,但随着拦截弹碰撞速度和碰撞角度的提高这种影响将会变小。当拦截弹末速度达到一定的值或控制碰撞角满足一定要求时,进行弹道导弹毁伤评估时可以忽略目标机动的影响。

5 结语

针对再入段反导中弹道导弹拦截效果评估问题,本文将常用于弹道目标识别的弹道系数估计方法应用于弹道导弹毁伤评估。仿真了弹道导弹不同毁伤程度下的弹道系数,证明该方法可以应用于弹道导弹毁伤评估。同时仿真分析了雷达测量误差对弹道系数估计误差的影响,得出通过减小雷达测量误差可以降低弹道系数估计误差,提高毁伤评估的准确性。仿真了目标机动变轨和碰撞变轨模型下的运动轨迹,分析得出增大碰撞速度和碰撞角度可以减小机动对毁伤评估造成的影响。

参考文献(References):

[1] 胡晓伟,胡国平,王宇晨.反导系统拦截效果综合评估方法[J]. 电讯技术,2012,52(2):136-141.
HU Xiaowei, Hu Guoping, WANG Yuchen. Comprehensive methods of intercepting effect evaluation in anti-TBM system[J]. Telecommunication engineering, 2012, 52(2):136-141.(in Chinese)

[2] Pernkopf F. Bayesian network classifiers versus selective formula not shown NN classifier [J]. Pattern recognition, 2005, 38:1-10.

[3] Jensen Finn V. Bayesian networks and decision graphs [M]. New York: Springer-verlag inc, 2001.

[4] William J F. Interacting multiple model filter for tac-

tical ballistic missile tracking [J]. IEEE trans on aerospace and electronic systems, 2008, 44(2):418-426.

[5] Farina A, Grazzini M. Radar fusion to detect targets part II[J]. Signal processing, 2002, 82(6): 1096-1108.

[6] Martin J J. Atmospheric reentry[M]. New Jersey: Prentice-hall,1966.

[7] Rao A V. Minimum-variance estimation of reentry debris trajectories[J]. Journal of spacecraft and rockets, 2000, 37(3):366-373.

[8] 张泓.再入目标弹道系数的估计、辨识、建模及其数学仿真研究[D].长沙:国防科技大学,2006.
ZHANG Hong. Estimate discriminate modeling and mathematics simulation research of ballistic coefficient for reentry object[D]. Changsha: National university of defense technology, 2006. (in Chinese)

[9] 仵浩,周晓光,王军.基于弹道形成的空基助推段反导拦截弹制导律设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(5):31-35.
WU Hao, ZHOU Xiaoguang, WANG Jun. Design of interceptor guidance llw for air-based ballistic missile defense during the boost phase[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2013, 14(5):31-35. (in Chinese)

[10] 彭鹏,童创明,孙佳佳,等.弹道导弹助推段动态 RCS 特征仿真[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013, 14(5):44-47.
PENG Peng, TONG Chuangming, SUN Jiajia, et al. A simulating study of BM's dynamic RCS characteristics in flight boost phase[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2013, 14(5):44-47. (in Chinese)

(编辑:田新华)