多拦截器总体拦截方案设计与分析

谢 愈 刘鲁华 汤国建 崔俊峰

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073) (中国太原卫星发射中心, 太原 030027)

摘 要: 多拦截器(MKV,Multiple Kill Vehicle Interceptor)通过采用一个运载母仓携带多个小型动能拦截器对目标实施动能拦截,有望克服传统动能拦截武器多目标识别及拦截的难题. 以 MKV 对远程弹道导弹多弹头中段拦截为背景,设计了 MKV 的总体方案,分析了 MKV 基本作战流程;并分别针对 MKV 制导策略、释放策略、MKV 机动能力对拦截的影响以及 MKV 目标分配策略等几个关键问题开展研究. 仿真分析表明,采用所设计的 MKV 方案能够实现对远程弹道导弹多弹头的拦截.

关 键 词: 多拦截器; 拦截方案; 多拦截器制导; 多拦截器释放; 多目标分配

中图分类号: V 448

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)03-0303-06

Design and analysis of interception project for multiple kill vehicle interceptor

Xie Yu Liu Luhua Tang Guojian

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Cui Junfeng

(Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030027, China)

Abstract: The multiple kill vehicle (MKV) interceptor consists of a carrier vehicle and some small kill vehicles that can intercept targets independently. It is capable of solving the difficulties of traditional kinetic energy interceptor, such as multiple targets identification and interception. The interception project of MKV interceptor was designed based on midcourse interception for multiple warheads of long-range ballistic missile, and the MKV-target engagement process was analyzed. Furtherly, some key issues such as MKV guidance strategy, MKV release strategy, influence of maneuverability on interception, and targets assignment strategy were studied. The simulations demonstrate that the designed interception project is adaptable of multiple warheads interception for a long-range ballistic missile.

Key words: multiple kill vehicle interceptor; interception project; MKV guidance; MKV release; target assignment

近年来,动能拦截武器的发展取得了长足进步,并进入实际部署阶段. 传统的动能拦截武器一般是通过一枚拦截弹携带单个动能拦截器对目标实施拦截,在应对弹道导弹多弹头分导、释放诱饵等突防模式时存在较大难度. 为了克服这个问题,美国本世纪初开始着手研究一种称为多拦截器(MKV,Multiple Kill Vehicle Interceptor)[1-2]的新型动能拦截武器. 据称它能够利用一个运载器发射若干个小的动能拦截器对一定范围内所有被认为是威胁的目标实施拦截,也即使得动能拦截模式由传统的"狙击枪型"转向"霰弹枪型",从而回避了真假目标识别的难题,并且只需发射一枚拦截弹即可实现同时对一定范围内多个目标的拦截,降低了成本.

收稿日期: 2010-11-24; **网络出版时间**: 2012-03-28 15:12

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120328.1512.002.html

作者简介: 谢 愈(1982-),男,湖南宁乡人,博士生,xieyu_nudt@139.com.

美国同时对两种 MKV 方案开展了研究,即雷声(Raytheon)公司的 MKV-R 方案和洛克希德·马丁(Lockheed Martin)公司的 MKV-L 方案. MKV-R 采用先导者-后续者的方案,第 1 枚拦截器作为先导者对目标进行评估,并作为整个拦截任务的指挥者,指派后面各个拦截器对目标实施拦截. MKV-L 方案是最终确定的方案,由一个母仓携带多个微小拦截器组成. 微小拦截器大小相当于一个咖啡罐,重 4 ~ 6 kg. 母仓和每个微小拦截器均带有目标探测器. 接近目标群时,运载母舱释放微小拦截器,各微小拦截器运用成像传感器子系统选择一个合理的碰撞点,然后向目标点飞行并进行最后的碰撞拦截[2]. 虽然由于资金上的原因及战略上调整,美国政府 2010 年暂停了对 MKV 研究计划的资助,但是 MKV 作为一种弹道导弹防御新模式,有望从根本上解决传统弹道导弹防御模式的不足,具有巨大的军事应用前景,必将成为弹道导弹防御的新锐.

在参考美国 MKV-L 基本思路的基础上,以 MKV 对远程弹道导弹多弹头中段拦截为背景,设计了 MKV 总体方案. 重点针对 MKV 制导策略、MKV 释放策略、MKV 机动能力对拦截的影响、MKV 目标分配策略等几个关键问题展开研究,得出了一些有意义的结论,可为 MKV 总体方案确定及进一步深入研究提供参考.

1 MKV 总体方案及基本作战流程

图 1 为 MKV 对弹道导弹多弹头中段拦截示意图.

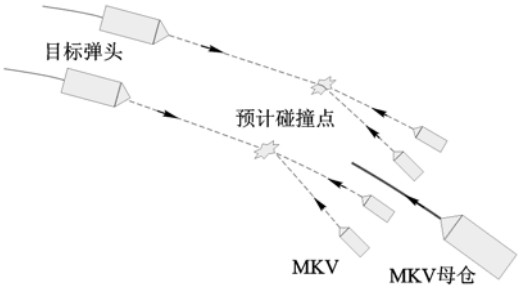

图 1 MKV 拦截示意图

假设弹道导弹多弹头中段飞行无机动,各弹头对应落点散布范围不超过 300 km,弹头数不超过 5 枚. 由于 MKV 为中段拦截,拦截时各目标弹头间相距不会太远. 另外,在释放 MKV 前,MKV 母仓能够进行初略制导,并调整母仓的姿态,以满足 MKV 释放要求. 在此假设下,制定 MKV 拦截系统的基本方案如下:整个 MKV 拦截系统由一个运载母仓携带 5 ~ 10 枚小型 MKV 组成. MKV 拦截系统具备独立的跟踪探测能力,母仓配置了远程探测设备以实现对目标的捕获和跟踪测量,并安装了轨控和姿控发动机进行制导和姿态控制. 设定每个 MKV 质量为 10 kg,其中燃料4.5 kg. MKV 的大小根据母仓大小、MKV 数目及 MKV 上各设备的小型化水平加以确定. 各 MKV 均安装导引头,可探测范围 0.1 ~ 60 km. MKV 轨控推力由喷嘴“+”字形配置安装在质心位置的发动机提供,每个喷嘴推力固定为 1 000 N,比冲量为 300 s.

MKV 运载母仓的功能包括对目标的捕获和跟踪探测,并根据目标的相关运动特性,实现目标威胁评估、目标拦截分配、MKV 释放等,必要时还可对 MKV 最终的拦截效果进行评估,并将评估结果反馈给地面指控中心. MKV 基本作战流程如图 2 所示.

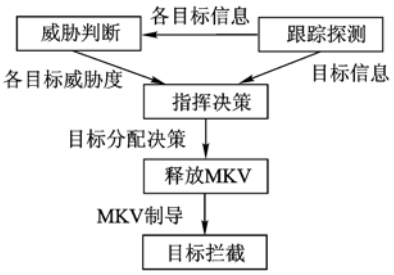

图 2 MKV 基本作战流程

跟踪探测系统捕获目标并进行跟踪探测,将目标信息传递给威胁判断系统;威胁判断系统据此分析各个目标的威胁度;指挥决策系统依据跟踪探测系统提供的目标信息、威胁判断系统提供的各目标威胁度,生成目标分配决策,为每个目标分配合适的 MKV;母仓依据目标分配决策,在适当的时机释放 MKV,对目标进行拦截;MKV 释放后,配置在母仓前面,当 MKV 和目标接近到一定程度后,MKV 开始进行制导,实现对目标弹头的拦截.

2 MKV 制导策略

2.1 中制导方法

MKV 中制导的目的是使拦截终端预测脱靶量在 MKV 末制导的修偏范围内,因此对制导精度要求不高. MKV 中制导采用基于预测零控脱靶量的制导方法[3]. 在当前时刻 t_p 预报脱靶量 $\boldsymbol{\rho}_m(t_p,t^*)$,即满足:

$$\dot{\boldsymbol{\rho}}(t^*)\cdot\boldsymbol{\rho}(t^*)=0$$

其中 t^* 为预测命中时刻.

记 MKV 末制导最大修偏距离为 ρ_{max},则当

$|\boldsymbol{\rho}_m(t_p,t^*)|\geqslant\rho_{max}$时需要施加中制导. 认为 MKV 在飞行过程中纵轴始终指向目标(即视线方向),则只需在 MKV 视线坐标系法向和侧向施加推力,因此有

$$\left.\begin{aligned} n_{csy}&=\begin{cases} n_0\mathrm{sign}(\rho_{my}) & |\rho_{my}|\geqslant\rho_{max}\\ 0 & |\rho_{my}|<\rho_{max}\end{cases}\\ n_{csz}&=\begin{cases} n_0\mathrm{sign}(\rho_{mz}) & |\rho_{mz}|\geqslant\rho_{max}\\ 0 & |\rho_{mz}|<\rho_{max}\end{cases}\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

式中,n_0 为轨控发动机能提供的机动过载;n_{csy},n_{csz}分别为 MKV 法向和侧向过载;ρ_{my},ρ_{mz}分别为$\boldsymbol{\rho}_m(t_p,t^*)$在 MKV 视线坐标系法向、侧向的分量.

2.2　末制导方法

根据前面所制定的总体方案,MKV 发动机“+”字形对称配置,推力为常值,因此本文采用侧向常推力比例导引开关控制方法. 发动机控制规律如下[3]:

$$\left.\begin{aligned} n_{csy}&=\begin{cases} n_0\mathrm{sign}(\omega_z) & |\omega_z|\geqslant\omega_{on}\text{或}\ \omega_{off}<|\omega_z|<\omega_{on}\text{且}\ n_{csy}(t-\Delta t)\neq0\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\\ n_{csz}&=\begin{cases} n_0\mathrm{sign}(-\omega_y) & |\omega_y|\geqslant\omega_{on}\text{或}\ \omega_{off}<|\omega_y|<\omega_{on}\text{且}\ n_{csz}(t-\Delta t)\neq0\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

式中,ω_y,ω_z 分别为视线转率在 MKV 视线坐标系法向和侧向上的分量;ω_{on},ω_{off}为轨控发动机开关时的视线转率阈值;t 为当前时刻,$t-\Delta t$ 为 t 之前的瞬时. 当进入 MKV 导引头测量盲区时,令$n_{csy}=n_{csz}=0$.

2.3　制导策略分析

由于目标弹头和 MKV 均有多个,下面选择一个典型目标弹头和 MKV 为例进行分析. MKV 对该弹头的零控脱靶量约 24 km,两者相对速度约 10 km/s. 这种情况下需引入中制导才能实现对目标弹头的拦截(下文分析与此同).

设距目标弹头 400 km 和 60 km 时分别启动中制导和末制导,当预测脱靶量小于 500 m 时结束中制导. 图 3 和图 4 分别给出了 MKV 脱靶量 L_m 及燃料消耗量 M_f 与中制导和末制导启动时机(分别用制导启动时 MKV 与目标弹头的相对距离 L_1 和 L_2 衡量)的关系.

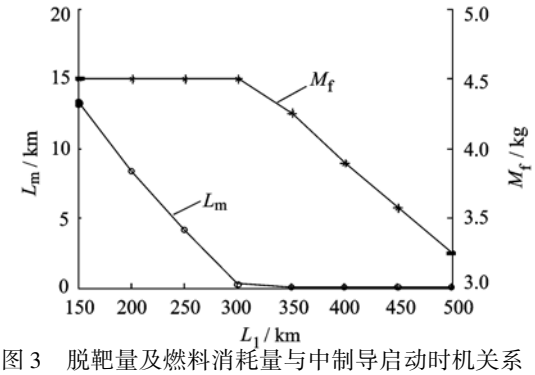

图 3　脱靶量及燃料消耗量与中制导启动时机关系

由图 3 可以看出,中制导应在距目标大于 350 km 时启动,启动太晚,发动机燃料将提前消耗完,无法完成末制导. 另外,一定范围内中制导启动时机越早,燃料消耗也越少. 由图 4 可知,MKV 应在距弹头大于 40 km 时开始末制导,但末制导启动也不能太早,否则会对导引头探测距离有更高的要求. 根据所确定的总体方案,在距目标 40 ~ 60 km 启动末制导比较合适,此时燃料消耗约 3.85 kg,满足设计要求.

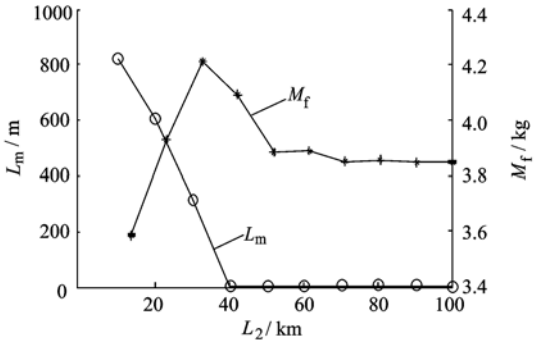

图 4　脱靶量及燃料消耗量与末制导启动时机关系

3　MKV 释放策略

MKV 释放策略包括 MKV 释放速度和释放时机两方面,其中释放速度又包括释放速度大小及释放方位. 不同的释放策略对 MKV 释放后的空域布局、MKV 的拦截效果等有直接影响. 沿着 MKV 母仓弹轴方向看,MKV 释放方式如图 5 所示. 各 MKV 释放速度大小为 δv,为了确保释放后各 MKV 配置在母仓前面飞行,MKV 释放速度方向与弹轴 x 的夹角小于 90°.

从 MKV 释放时机来说,有两种释放方式. 一种是在发现目标弹头之前释放 MKV,使 MKV 伴飞于母仓周围,当 MKV 母仓上的探测装置发现目标弹头后,母仓作战指控系统分配 MKV 对其进行拦截. 这种释放策略的优点是反应速度快,一旦发现目标后,马上可由指控决策系统指派 MKV 对其进行拦截,从而一定程度上可降低对母仓探测距离的要求,缺点是过早的释放 MKV,增加了 MKV 和母仓间信息交互及指控的难度;另一种释放策略是母仓在探测到目标后,再在合适的时机

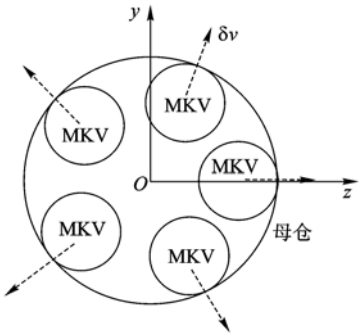

图 5 MKV 释放示意图

释放 MKV 进行拦截,这种方式针对性比较强,但反应速度不够快,因此需较早的发现目标.

MKV 脱靶量 L_m 及燃料消耗量 M_f 与 MKV 释放策略有一定关系. 图 6 和图 7 分别对应 MKV 释放速度大小为 30 m/s、速度方向与母仓弹轴夹角为 45°情况下,L_m 及 M_f 与释放时机(用 MKV 释放时与目标的相对距离 L_r 衡量)和释放速度大小 V_r 的关系.

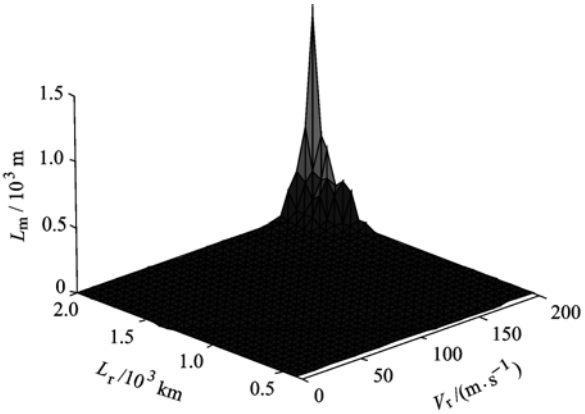

图 6 脱靶量与释放时机和释放速度的关系

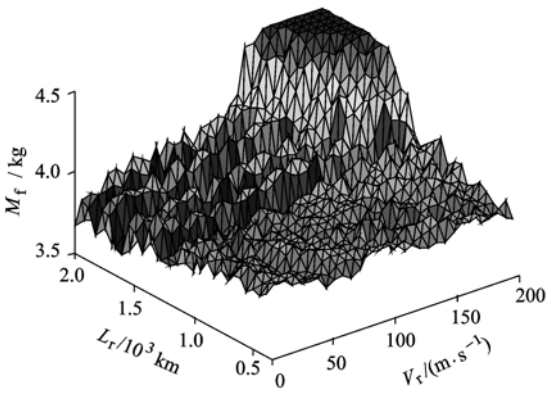

图 7 燃料消耗量与释放时机和释放速度的关系

由图 6 和图 7 可看出,在考虑中制导的情况下,MKV 释放速度和释放时机选择范围较大,但当释放速度过大且释放时机过早,会因为发动机燃料不足而无法实施对弹头的拦截.

4 MKV 机动能力影响

为确保对弹头的拦截,MKV 需要具备较强的机动能力. MKV 机动能力与轨控发动机推力大小及燃料质量(或发动机工作时间)有关. 图 8 为假设 MKV 释放速度为 30 m/s,MKV 脱靶量 L_m 与轨控发动机推力大小 P 和燃料质量 M_f 的关系. 由图可知,为保证 MKV 对弹头实施拦截,轨控发动机燃料总质量不少于 3.85 kg,推力应大于 600 N,可见本文所制定的 MKV 基本方案满足上述要求.

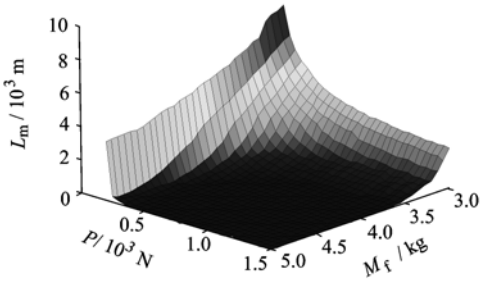

图 8 MKV 脱靶量与推力及燃料的关系

5 目标分配策略

针对多个目标弹头,需释放多个 MKV 进行拦截,这就涉及到目标分配策略的问题. 目标分配策略的关键是对目标威胁进行评估,并确定相应的目标分配原则.

5.1 目标威胁评估

对防御方来说,同时进攻的多个弹头的“严重性”和“紧迫性”一般会有所差别,给予“严重性”和“紧迫性”以定量的描述称为弹头的威胁度[4]. 利用威胁度,可以区别多个目标的轻重缓急,为 MKV 的目标分配及拦截提供依据. 本文中,“严重性”可以用弹头所打击目标的重要程度、弹头的精度及弹头的威力来综合衡量;“紧迫性”可用从发现弹头到弹头命中目标的时间来衡量.

1)“严重性”的定量描述方法

在不考虑弹头机动变轨情况下,可对目标弹头的落点位置进行预测,进而可对弹头的威胁进行评估.

设目标弹头落点区域共有 n 个防御区域 O_i ($i=1,\cdots,n$). 为研究方便,假设所有防御区域为半径 R'_i 的圆形,各个区域的重要度为 I_i ($\in[0,1]$). 弹头 $h_j(j=1,2,\cdots)$ 预测落点到各防御区域中心的距离为 r_i. 根据先验信息获得弹头毁伤半

径为 R_j.

弹头 h_j 对防御区域 O_i 的摧毁能力采用如下函数描述:

$$S_i^j(r_i)=\mathrm{e}^{-k_i\left(\frac{r_i}{R'_i+R_j}\right)^2} \tag{3}$$

式中,k_i 为常数.

从“严重性”方面来说,弹头 h_j 的威胁 u_{f}^j 可表示为

$$u_{\mathrm{f}}^j=\frac{\sum_{i=1}^{n}S_i^j(r_i)I_i}{n} \tag{4}$$

2)“紧迫性”的定量描述方法

弹头 h_j 待飞时间 t_{go}^j 越短,留给 MKV 拦截的时间也越短,并且对 MKV 的机动能力要求也越高,从而可认为弹头威胁度也越大. 从待飞时间方面考虑,若 t_{go}^j 大于某一值 $t_{\max}$ 时,认为弹头不构成威胁. 一般情况下,可取 $t_{\max}$ 为探测系统最大探测距离对应的弹头待飞时间. 设某时刻通过探测设备获得弹头 h_j 的位置和速度大小分别为 r_k^j 和 v_k^j,则待飞时间 t_{go}^j 为[5]

$$t_{\mathrm{go}}^j=\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}\left\{\arccos\frac{1-\nu_k^j}{e}+\arccos\frac{(1-\nu_k^j)-(2-\nu_k^j)\dfrac{h_k^j}{r_k^j}}{e}\right\}+e\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}\left\{\sin\left(\arccos\frac{1-\nu_k^j}{e}\right)+\sin\left[\arccos\frac{(1-\nu_k^j)-(2-\nu_k^j)\dfrac{h_k^j}{r_k^j}}{e}\right]\right\} \tag{5}$$

式中,ν_k^j 为能量参数;h_k^j 为高度;a 和 e 分别为弹头 h_j 对应椭圆弹道长半轴及偏心率;$\mu=3.986\times10^{14}\ \mathrm{m^3/s^2}$.

定义弹头 h_j 待飞时间对应的威胁度相对隶属度函数为

$$u_{\mathrm{t}}^j=\begin{cases}1 & t_{\mathrm{go}}^j\leqslant t_{\min}\\ 1-\left(\dfrac{|t_{\mathrm{go}}^j-t_{\min}|}{\sigma}\right)^p & t_{\mathrm{go}}^j\in(t_{\min},t_{\max}]\\ 0 & t_{\mathrm{go}}^j>t_{\max}\end{cases} \tag{6}$$

式中,$\sigma=|t_{\max}-t_{\min}|$,$t_{\min}$ 一般可取 0;p 为决策者给出的常数.

3)弹头威胁度的确定

根据弹头“严重性”和“紧迫性”两方面的定量描述,可确定弹头 h_j 的威胁度为

$$\omega_j=\alpha_{\mathrm{f}}u_{\mathrm{f}}^j+\alpha_{\mathrm{t}}u_{\mathrm{t}}^j \tag{7}$$

式中,α_{f},α_{t} 分别为“严重性”和“紧迫性”对应的权重值,且 $\alpha_{\mathrm{f}}+\alpha_{\mathrm{t}}=1$.

5.2　目标分配原则

令 MKV 数目为 M,弹头数目为 N,目标分配的原则是优先拦截威胁度最大的弹头,目标函数表示为

$$\left.\begin{aligned}&\max J=\sum_{j=1}^{N}\omega_j\left[1-\prod_{i=1}^{M}(1-q_{ij}p_{ij})\right]\\&\text{s.t.}\quad q_{ij}=\begin{cases}1 & \text{第 } i \text{ 个 MKV 拦截第 } j \text{ 个弹头}\\0 & \text{其他}\end{cases}\\&\sum_{i=1}^{M}q_{ij}\leqslant M\\&\sum_{j=1}^{N}q_{ij}=0\text{ 或 }1\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中,$p_{ij}\in[0,1]$ 为第 i 个 MKV 对第 j 个弹头的拦截能力评估值;ω_j 为第 j 个弹头的威胁度. 对式(8)所述的优化问题,如果 MKV 和弹头数目较少,可采用枚举方法直接求解,当 MKV 和弹头数目较多时,多采用遗传算法、蚁群算法等进行求解[6-8].

5.3　多目标拦截分析

设有 4 个目标弹头,平台释放 6 个 MKV 对其进行拦截. MKV 释放速度大小为 30 m/s,速度方向与母仓弹轴夹角为 45°. 从图 5 中 z 轴位置开始,沿逆时钟方向依次将 6 个 MKV 编号为 MKV1 ~ MKV6. 根据前面的分析,MKV 采用中制导 + 末制导的制导方案. 假定各个 MKV 对目标弹头的拦截能力相同,并取式(3)中 $k_i=0.223\,1$. 不考虑落点预测误差,设定防御区 1 和防御区 2 的重要程度分别为 0.9 和 0.8,各目标弹头对应落点与防御区域关系如图 9 所示.

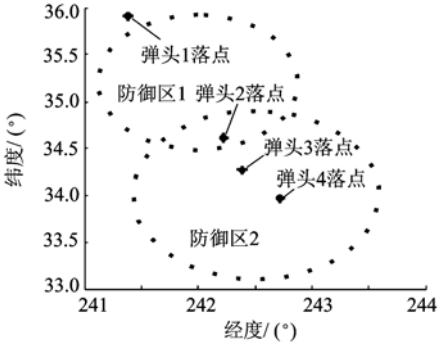

图 9　目标弹头对应落点与防御区域位置关系

各弹头的威胁度值及分配的弹头数见表 1.

表 1　各弹头的威胁度值及分配的弹头数

弹头	威胁度	分配弹头数
弹头 1	0.45	1
弹头 2	0.74	2
弹头 3	0.69	2
弹头 4	0.60	1

设 MKV 探测方位误差为白噪声,标准差为 0.2°,制导周期为 0.01 s. 进行 100 次 Monte Carlo 仿真,统计各 MKV 对相应弹头的拦截脱靶量 L_m 及其标准差 σ_L、燃料消耗量 m_f 及其标准差 σ_m 如表 2 所示. 由仿真结果可知,对威胁度最大的弹头 2 和弹头 3,均分配两个 MKV 进行拦截,各 MKV 拦截效果较好,燃料消耗满足设计要求.

表 2 多弹头拦截结果统计

MKV	对应弹头	L_m/m	σ_L/m	m_f/kg	σ_m/kg
MKV1	弹头 1	0.22	0.13	3.61	0.037
MKV2	弹头 2	0.26	0.16	2.37	0.051
MKV3	弹头 2	0.56	0.38	2.20	0.031
MKV4	弹头 3	0.25	0.15	3.67	0.025
MKV5	弹头 3	0.26	0.15	3.41	0.030
MKV6	弹头 4	0.26	0.14	3.89	0.023

6 结 论

1) 本文所制定的 MKV 拦截系统总体方案合理可行.

2) 当 MKV 相对于弹头的零控脱靶量较大时,需引入中制导. 为了适应各种情况下的拦截需要,建议采用中制导 + 末制导的制导策略.

3) 应在合适的时机启动中制导和末制导. 中制导宜距目标超过 350 km 启动,而末制导距目标 40 ~ 60 km 启动较好.

4) MKV 释放速度和释放时机选择范围较宽,但均不能过大.

5) 轨控发动机推力和燃料质量需满足一定要求,选择推力 1 000 N,燃料质量 4.5 kg 可满足一般拦截要求,且留有一定余量.

参考文献 (References)

[1] Rober W. Missile interceptors may carry dozens of kill[J]. Aviation Week&Space Technology,2004,160(1):50 - 57

[2] Uka H K. Miniature interceptor technology [R]. MDA-02-041,2002

[3] 李翠兰. 地基拦截弹飞行弹道和控制建模与仿真[D]. 长沙:国防科学技术大学航天与材料工程学院,2004
Li Cuilan. Modeling and simulation of trajectory and control for ground-based interceptor [D]. Changsha: College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology,2004(in Chinese)

[4] 温羡峤,刘谭军. 反战术弹道导弹(ATBM)防御系统指挥决策模型研究[J]. 现代防御技术,1997(2):9 - 20
Wen Xianqiao, Liu Tanjun. Research on decision model for anti-tactics ballistic missile[J]. Modern Defence Technology, 1997(2):9 - 20 (in Chinese)

[5] 贾沛然,陈克俊,何力. 远程火箭弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1993:103 - 104
Jia Peiran, Chen Kejun, He Li. Ballistics of long-range ballistic missile[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press,1993:103 - 104 (in Chinese)

[6] Cai Huaiping, Liu Jingxu, Chen Yingwu, et al. Survey of the research on dynamic weapon-target assignment problem[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2006,17(3):559 - 565

[7] Mekawey H I, Abd EL-Wahab M S, Hashem M. Novel goal-based weapon target assignment doctrine [J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication,2009,6:2 - 29

[8] Wang Yanxia, Qian Longjun, Guo Zhi, et al. Weapon target assignment problem satisfying expected damage probabilities based on ant colony algorithm[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2008,19(5):939 - 944

(编 辑:张 嵘)