

doi: 10.7690/bgzd.2018.01.011

## 基于自适应拦截制导律的多目标分配准则

白国玉<sup>1,2</sup>, 沈怀荣<sup>1</sup>, 李 轶<sup>3</sup>, 段永胜<sup>1</sup>, 张庆忠<sup>2</sup>

(1. 装备学院航天装备系, 北京 101416; 2. 酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750;  
3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对空间多目标任务分配和拦截导引问题, 以顺逆轨自适应拦截制导律为基础, 对 OTPN 的多目标分配策略进行研究, 建立了以拦截任务等级序列准则为核心的多目标分配及拦截导引参数配置方法, 并进行了多目标拦截数值仿真。仿真结果表明: 该方法简单易行, 反应灵活, 计算量小, 解决了以往多对多拦截中只能基于单一拦截模式的不足, 在保证最大的拦截成功率的同时可充分发挥顺、逆轨拦截模式的优势并具有灵活的应变调整能力, 可以满足多对多拦截中目标分配和拦截效果达成的需求。

**关键词:** 多目标; 分配; 准则; 自适应; 拦截; 制导律

**中图分类号:** TJ761.7 **文献标志码:** A

## Multi-target Assignment Criteria Based on Adaptive Interception Guidance Law

Bai Guoyu<sup>1,2</sup>, Shen Huairong<sup>1</sup>, Li Yuan<sup>3</sup>, Duan Yongsheng<sup>1</sup>, Zhang Qingzhong<sup>2</sup>

(1. Department of Spaceflight Equipment, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;  
2. Jiuquan Satellite Launch Centre, Jiuquan 732750, China;  
3. Beijing Institute of Tracking & Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of mission assignment and interception guidance for multiple targets in space, based on the adaptive guidance law of head-on and head-pursuit interception mode, the multi targets assignment strategy of OTPN has been studied, and criteria sequences to assignment was established as the core of interception mission assignment and parameter configuration for interception guidance, and carry out multi-target interception numerical simulation. The simulation results verify the validity of this method, which is simple, flexible, and easy for calculation. The method solved the inadequacy that all interceptors must take the same mode when intercepting multi-targets, and ensuring the maximum interception success rate as well as in giving full play to advantage of head-on and head-pursuit interception mode, and has a flexible adjustment ability also, which can meet the requirements of target assignment and interception effect for multiple to multiple interception.

**Keywords:** multi-target; assignment; criteria; adaptive; interception; guidance law

### 0 引言

对于同时拦截多个目标的任务需求, 增加拦截器数量是提高拦截成功率、确保摧毁的有效手段。使用简单便捷、科学合理的拦截弹分配策略, 为参与攻击的拦截器指定攻击对象并取得满意的攻击效果, 是多目标拦截中迫切需要解决的问题。

当前, 目标分配方法的研究主要分为 2 类。一类为经典法: Rosenberger 等<sup>[1]</sup>将目标分配问题作为线性整数规划问题进行研究, 提出了基于拍卖理论的贪婪算法和枚举求最优解方法; 宋业新等<sup>[2]</sup>采用匈牙利算法解决目标分配问题, 通用性较广, 但稳定性会随着目标数的增大而下降。另一类是引入了智能优化理论的现代算法: Lee 等<sup>[3]</sup>基于改进的免疫蚁群算法, 以我方最小损失为期望建立目标函数, 能够快速得出最优解并能避免算法的未成熟收敛,

但当目标量过大时会存在较大误差; Song 等<sup>[4]</sup>将目标函数线性化后用遗传算法来求解带约束的目标分配问题, 使用启发算法选择初始种群; Wacholder<sup>[5]</sup>将神经网络引入导弹防御的目标分配问题, 列出所有的拦截器与目标分配组合, 选出成功概率最高的组合作为最优解; 王玮等<sup>[6]</sup>提出资源受限模型和染色体编码格式, 用交叉变异选择等方法求解分配问题; 叶文等<sup>[7]</sup>提出的粒子群目标分配算法并改进了算法的搜索能力; 马飞等<sup>[8]</sup>用博弈理论来解决目标的分配问题。

基于各类算法的目标分配方法能在一定程度上解决目标分配问题, 然而这类方法对拦截弹和目标的运动信息的完整性和准确性依赖性非常高, 关键信息的误差和缺失以及拦截态势的变化会严重影响拦截效果, 尤其是随着目标数增加使得算法的运算

收稿日期: 2017-09-10; 修回日期: 2017-10-13

作者简介: 白国玉(1974—), 男, 山西人, 博士, 高级工程师, 从事航天发射及任务总体研究。

量和时间呈指数增长，结果的稳定性变差。另外，目标的拦截分配方式受到拦截弹制导方式和捕获能力的制约；因此，对目标分配策略的设计必须考虑所用拦截制导律的特性，才能满足实际拦截的需求。

基于空间多目标拦截中时间要求高、随机性大、结果要求苛刻的特点，笔者将目标分配问题和拦截子弹的制导运算和性能相结合，针对空间拦截的导引基础和战术需求，基于具有大范围捕获能力的全向拦截制导律，建立等级序列准则的目标分配和导引方法。该方法融合了拦截制导特性和拦截参数优化设置，具有计算快速、无漏拦截、可靠性高、反应灵活的特点。

### 1 顺逆轨自适应拦截制导律

全向比例拦截制导律 (omni-directional true proportion navigation, OTPN)<sup>[9]</sup>适用于拦截大气层外高速目标，通过在控制力导引计算中引入速度前置角变化，以单一制导律同时满足低、高速目标的顺、逆轨拦截导引需求(如图 1 所示)。与传统拦截制导律相比，OTPN 制导律适应性广、捕获范围大，可实现全平面内的拦截制导。

OTPN 基本制导方程为：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\gamma}{dt} &= N \frac{d\lambda}{dt} \quad (|\theta| < \frac{\pi}{2}) \\ \frac{d\gamma}{dt} &= -N \frac{d\lambda}{dt} \quad (|\theta| > \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

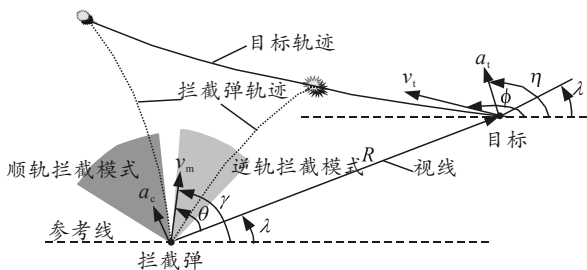


图 1 全向比例制导律实施顺逆轨拦截示意图

拦截弹的控制力垂直视线，控制力方程为

$$a_c = \frac{N v_m}{\cos \theta} \dot{\lambda} \quad (N > 0) \quad (2)$$

式(2)无需额外增加修正项即可兼容机动目标的拦截制导计算，能避免目标机动参数估计误差对制导精度的影响<sup>[10]</sup>。

### 2 基于 OTPN 的多目标分配策略研究

为方便研究，针对多拦截弹拦截多个目标的问题(以下简称为多对多拦截)作出如下假设：

1) 拦截弹数不少于目标数，即  $N_m \geq N_t$ ， $N_m$  为

拦截弹数量， $N_t$  为目标数量；

- 2) 所有目标来袭方向相同，且为平行飞行；
- 3) 各目标重要度相同；
- 4) 拦截弹的初始路径角可优化调整。

#### 2.1 拦截中目标分配的等级序列准则

在 OTPN 拦截导引的基础上，以多目标拦截任务中能迅速合理地给各拦截弹分配攻击目标和选择初始参数、取得最好的作战效果为目的<sup>[11]</sup>，笔者设计了多对多拦截任务中拦截弹分配攻击目标的序列准则，在目标分配计算中设定上级准则对下级准则具有绝对优先权：

1) 完备准则。保证每一个目标至少分配到一枚拦截弹实施拦截，不允许有未分配拦截的目标。

2) 均化准则。在不考虑目标识别结果和重要度排序的情况下，设定所有需拦截的目标的重要性相等，任意目标之间分配的拦截弹数量之差不大于 2。

3) 由近及远准则。按照目标由近及远的顺序依次进行拦截弹的分配。

4) 精度优先准则(顺轨优先)。相对于传统的逆轨拦截模式，顺轨拦截具有控制力小、相对速度小、捕获区域大以及脱靶量小等优势<sup>[12]</sup>，即顺轨拦截命中概率更高，因此首先须保证对目标的顺轨拦截。

5) 模式均衡准则。逆轨拦截比顺轨拦截所需的时间更短，在上一枚同目标拦截弹为顺轨拦截时，下一枚分配给特定目标的拦截弹采用逆轨模式以尽早拦截目标。

6) 同模式下碰撞点间距最大准则。相同拦截模式下，初始发射参数依照同模式下捕获范围内碰撞点间距最大的原则进行选定，以尽量消除目标机动规避对拦截的影响，扩大拦截弹的捕获覆盖范围。

7) 剩余顺轨弹复用准则；当某一个目标确定已经被逆轨拦截成功后，原分配在该目标的顺轨拦截弹重新分给未被摧毁的目标，继续实施拦截导引。

#### 2.2 多对多拦截分配策略

按照 2.1 节所述目标分配序列准则，拦截弹分配公式为

$$N_m \div N_t = N_a \dots m, \quad (3)$$

即对距离拦截弹发射点由近及远的  $m$  个目标分配  $N_a + 1$  枚拦截弹，剩余目标均分配  $N_a$  枚拦截弹。若  $N_a$  为奇数，对于前  $m$  个目标各有  $(N_a + 1) / 2$  枚弹进行顺/逆轨拦截；其他目标有  $(N_a + 1) / 2$  枚弹顺轨拦截， $(N_a - 1) / 2$  枚弹逆轨拦截。若  $N_a$  为偶数，前  $m$  个

目标各有  $(N_a + 2)/2$  枚弹顺轨拦截， $N_a/2$  枚弹逆轨拦截；其他目标各有  $N_a/2$  枚弹用于顺、逆轨拦截。

由上述准则序列的运行过程和计算方式可看出，此分配方式只需要对目标和拦截弹进行编号、排序就可以完成各拦截弹攻击目标和拦截模式的分配，然后依据参与同目标同模式拦截任务的拦截弹数量设定各拦截弹的初始导引参数和发射角度，计算量较基于各类算法的目标分配方法大为减少。

按照上述序列准则和分配公式，得出目标数为 3 的不同拦截弹数量的分配结果见表 1。

表 1 三目标多弹拦截分配结果

拦截弹总数	目标 1		目标 2		目标 3	
	逆轨拦截数	顺轨拦截数	逆轨拦截数	顺轨拦截数	逆轨拦截数	顺轨拦截数
3	0	1	0	1	0	1
4	0	1	0	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	2
8	1	1	1	2	1	2

### 3 多目标拦截数值仿真

为验证笔者提出的多目标分配策略的有效性，使用 Matlab 软件进行拦截仿真。仿真中按分配准则进行拦截弹攻击目标分配和选取初始拦截参数，所有拦截弹均使用 OTPN 完成拦截导引，设定拦截弹失盲后保持之前控制指令继续前进，有效拦截设定为拦截弹与目标的最小距离(即脱靶量)小于 1 m。

#### 3.1 双目标拦截仿真

目标数量为 2 的拦截仿真初始参数设定见表 2。

表 2 仿真初始参数设定

参数名称	取值
目标 1 初始位置/m	(10 000, 10 250)
目标 2 初始位置/m	(10 000, 9 750)
拦截弹初始位置/m	(19 903, 8 608)
目标速度/(m/s)	1 000
拦截弹速度/(m/s)	500
导航比	5
初始目标速度倾角/(°)	0
初始视线角/(°)	172
制导失盲距离/m	30

#### 3.1.1 捕获区域计算和碰撞点分配

计算出拦截弹在 OTPN 导引下的顺、逆轨拦截捕获区域、碰撞点及拦截时间的分布情况见表 3。

表 3 OTPN 拦截参数范围

目标编号	拦截模式	捕获区域/(°)	拦截时间范围/s	碰撞点分布/( $\times 10^4$ m)
1	逆轨	82.0~184.6	6.88~7.76	(1.69,1.00)~(1.78,1.00)
	顺轨	-54.9~82.0	17.53~19.53	(2.75,1.00)~(2.95,1.00)
2	逆轨	87.2~204.2	6.74~7.68	(1.67,1.00)~(1.77,1.00)
	顺轨	-66.1~82.0	17.64~19.67	(2.76,1.00)~(2.97,1.00)

根据表 3，将目标 1 的逆轨拦截初始发射区域选为  $82.0^\circ \sim 151.5^\circ$ ，顺轨拦截的初始发射区域选为  $10.0^\circ \sim 82.0^\circ$ ；目标 2 的逆轨拦截初始发射区域选为  $87.2^\circ \sim 160.2^\circ$ ，顺轨拦截初始发射区域选为  $6.9^\circ \sim 82.0^\circ$ 。

#### 3.1.2 三对二拦截仿真

经计算，拦截弹的初始速度倾角为  $10.0^\circ$  时对目标 1 的顺轨拦截时间最小；针对目标 2 的顺/逆轨拦截最小时间分别取值为初始速度倾角  $6.9^\circ$  和  $160.2^\circ$ ，以这 3 个角度分别作为 3 枚拦截弹的初始发射角，拦截仿真结果见表 4 及图 2、图 3。

轨迹编号	拦截弹编号	目标选择	拦截模式	初始速度倾角/(°)	控制力/(m/s)	脱靶量/m	拦截时间/s	碰撞点/( $\times 10^4$ m)
1	1	2	顺轨	6.90	2.536	0.016 9	19.67	(2.97,0.98)
2	2	1	顺轨	10.0	2.504	0.025 7	19.53	(2.95,1.03)
3	3	2	逆轨	160.2	3.253	0.055 6	6.73	(1.67,0.98)
4	1	2→1	顺轨	6.90	53.446	0.059 8	19.51	(2.95,1.03)

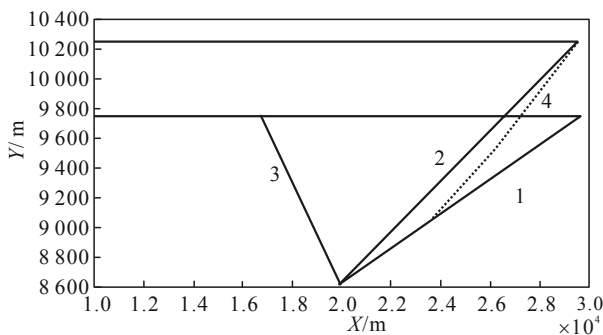


图 2 三对二拦截仿真轨迹

图 2 中，虚线的轨迹 4 为 1 号拦截弹遵循目标分配准则 7，在已知目标 2 被逆轨成功拦截后，变更攻击目标后的飞行轨迹，表 4 与图 2 中轨迹编号相对应。

仿真结果分析：

1) 3 枚拦截弹按照时间最小的发射角度拦截目标，飞行轨迹平直、控制力需求小、脱靶量低，拦截效果满足要求；

2) 1 号和 3 号弹分配用于拦截目标 2。3 号弹拦截成功后，1 号弹自动转向目标 1 继续进行拦截导

引(图 2 所示), 而当 3 号弹拦截不成功时, 1 号弹保持对目标 2 实施顺轨拦截;

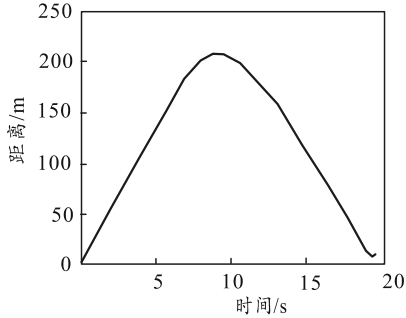


图 3 轨迹 2 与轨迹 4 实时弹间距离

3) 图 2 中, 1 号弹转向后轨迹与 2 号弹轨迹较为接近, 但由图 3 看出, 两弹飞行过程中最小间隔大于 10 m, 并未发生碰撞。

### 3.1.3 七对二拦截仿真

在七对二拦截策略中, 其中前 3 枚拦截弹与 3.1.2 节中设定相同, 为保障预定碰撞点的间距最大, 增加的 2 枚顺轨拦截弹的初始速度倾角均设为 82°; 目标 1 和目标 2 分配的逆轨拦截弹初始速度倾角分别设定为 151.5°和 87.2°, 仿真结果见表 5 和图 4、图 5。

表 5 七对二拦截仿真结果

轨迹编号	拦截弹编号	目标选择	拦截模式	初始速度倾角/(°)	控制力/(m/s)	脱靶量/m	拦截总时间/s	碰撞点/( $\times 10^4$ m)
1	1	2	顺轨	6.9	2.536	0.016 9	19.67	(2.97,0.98)
2	2	1	顺轨	10.0	2.504	0.025 7	19.53	(2.95,1.03)
3	3	2	逆轨	160.2	3.253	0.055 6	6.73	(1.67,0.98)
4	4	1	逆轨	151.5	3.506	0.052 6	6.88	(1.69,1.03)
5	5	2	顺轨	82.0	817.323	0.067 2	17.64	(2.76,0.98)
6	6	1	顺轨	82.0	780.995	0.040 3	17.53	(2.75,1.03)
7	7	2	逆轨	87.2	4 111.797	0.232 6	7.68	(1.77,0.98)
8	1	2→1	顺轨	6.9	53.446	0.059 8	19.51	(2.95,1.03)
9	5	2→1	顺轨	82.0	753.723	0.089 4	17.77	(2.78,1.03)
10	1	2→1	顺轨	6.9	58.372	0.021 1	19.50	(2.95,1.03)
11	5	2→1	顺轨	82.0	748.257	0.068 1	17.78	(2.78,1.03)
12	2	1→2	顺轨	10.0	53.425	0.038 1	19.65	(2.97,0.98)
13	6	1→2	顺轨	82.0	856.491	0.069 2	17.35	(2.74,0.98)

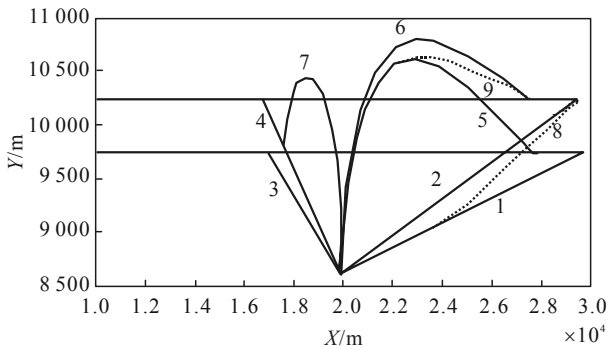


图 4 七对二拦截仿真结果(未变更目标)

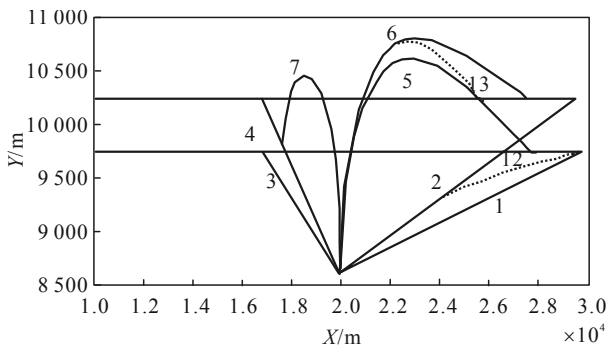


图 5 七对二拦截仿真结果(目标 1 逆轨拦截成功)

图 4 为 3 号弹拦截成功、4 号弹拦截失败后顺

轨拦截弹 1、5 改变攻击目标的飞行轨迹; 图 5 为 4 号弹拦截成功而 3 号弹拦截失败后顺轨拦截弹 2、6 改变攻击目标的飞行轨迹。由于在 7 号弹拦截成功而 4 号弹拦截失败情况下的仿真轨迹与图 4 相似, 故不再重复, 仅在表 5 中给出对应仿真结果。同样, 在所有逆轨弹拦截均失败时, 各顺轨弹按实线轨迹完成拦截。

结合表 5、图 4 和图 5 可知:

1) 针对两目标的各拦截模式下不同拦截弹碰撞点距离最远、时间间隔最长, 初始速度倾角选择符合拦截策略要求;

2) 由图 4 与图 5 看出, 顺轨拦截弹可在所选目标被逆轨拦截结束成功后重新选择目标, 提高对剩余目标的拦截成功概率, 拦截策略具备灵活反应能力, 能使有限的拦截弹发挥出更高的拦截成功率。

### 3.2 三目标拦截仿真

目标数量为 3 时多弹拦截的仿真参数设定如表 6 所示, 未列出参数设定均同表 2。

表 6 三目标拦截仿真初始参数设定

参数名称	取值
目标 1 初始位置	(10 000,10 200)
目标 2 初始位置	(10 000,10 000)
目标 3 初始位置	(10 000,9 700)

3.2.1 捕获区域计算和碰撞点分配

根据表 2 和表 6 参数计算得出目标数为 3 时，在 OTPN 导引下的顺、逆轨拦截捕获区域、碰撞点及拦截时间分布如图 6 所示。

根据计算结果和拦截目标分配结果，选定对目标 1 的逆轨拦截发射角为  $82.0^\circ \sim 152.5^\circ$ ，顺轨拦截初始发射角为  $9.7^\circ \sim 82.0^\circ$ ；对目标 2 的逆轨拦截发射角为  $86.4^\circ \sim 155.8^\circ$ ，顺轨拦截发射角为  $8.3^\circ \sim 82.0^\circ$ ；对目标 3 的逆轨拦截发射角为  $88.7^\circ \sim 161.2^\circ$ ，顺轨拦截发射角为  $6.5^\circ \sim 82.0^\circ$ 。

3.2.2 拦截仿真结果

计算出目标 1~3 顺轨拦截最短拦截时间的初

始速度倾角分别为  $9.7^\circ$ 、 $8.3^\circ$  和  $6.5^\circ$ ，目标 2、3 逆轨拦截最短时间的初始速度倾角分别为  $155.8^\circ$  和  $161.2^\circ$ 。仿真结果见表 7 及图 7—图 9。

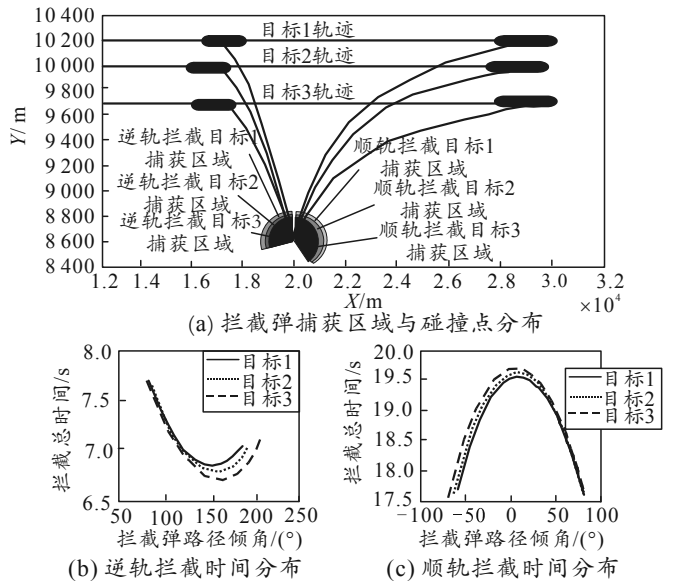


图 6 三目标 OTPN 拦截导引参数分布

表 7 五对三拦截仿真结果

轨迹编号	拦截弹编号	目标选择	拦截模式	初始速度倾角/ $^\circ$	控制力/(m/s)	脱靶量/m	拦截总时间/s	碰撞点/ $(\times 10^4 \text{m})$
1	1	3	顺轨	6.5	1.419	0.031 4	19.69	(2.97,0.97)
2	2	2	顺轨	8.3	1.506	0.013 9	19.61	(2.96,1.00)
3	3	1	顺轨	9.7	3.562	0.025 3	19.54	(2.95,1.02)
4	4	3	逆轨	161.2	5.735	0.046 7	6.72	(1.69,0.97)
5	5	2	逆轨	155.8	2.546	0.045 5	6.82	(1.68,1.00)
6	1	3→2	顺轨	6.5	31.000	0.038 0	19.60	(2.96,1.00)
7	2	2→3	顺轨	8.3	31.145	0.041 4	19.68	(2.97,0.97)
8	1	3→1	顺轨	6.5	52.398	0.034 0	19.53	(2.95,1.02)
9	2	2→1	顺轨	8.3	21.582	0.042 3	19.54	(2.95,1.02)

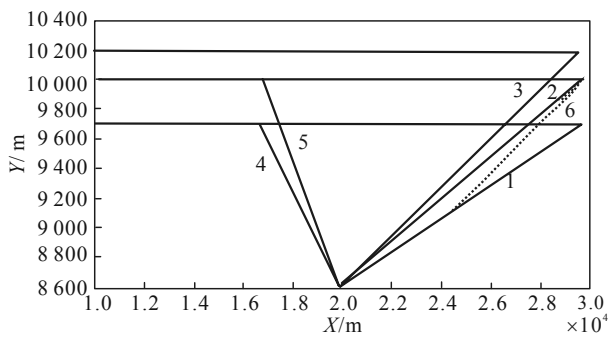


图 7 五对三拦截轨迹(目标 3 逆轨拦截成功)

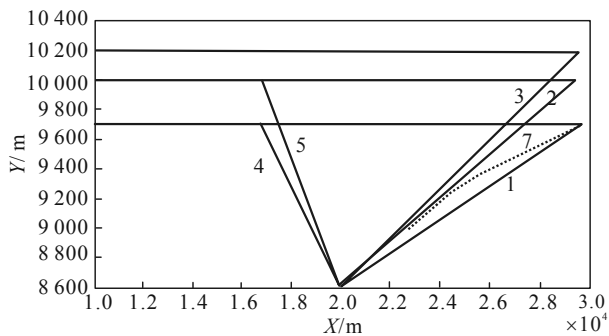


图 8 五对三拦截轨迹(目标 2 逆轨拦截成功)

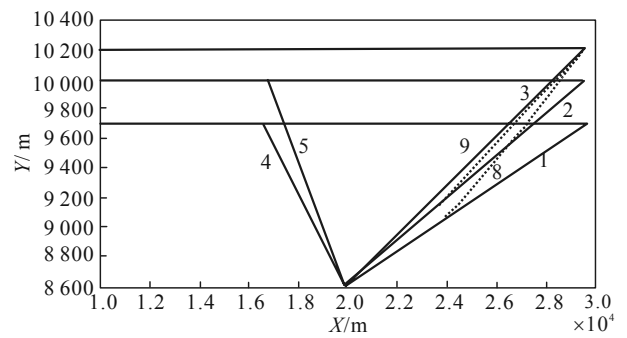


图 9 五对三拦截轨迹(目标 2、3 均逆轨拦截成功)

图 7—图 9 中轨迹编号与表 7 相对应，图 7 为 4 号弹拦截成功、5 号弹拦截失败情况下的轨迹；图 8 为 4 号弹拦截失败，5 号弹拦截成功情况下的轨迹；图 9 为 4 号和 5 号弹均拦截成功情况下的轨迹；如果 4 号和 5 号弹均拦截失败，则其余各弹按实现轨迹拦截目标。

4 结论

笔者设计了基于自适应全向拦截制导律的多目

标拦截分配方法, 将目标分配与拦截制导律的特性相结合, 制定了与全向拦截导引相适应的多目标拦截等级序列准则。该方法不但解决了多对多拦截中只能使用单一模式拦截目标的不足, 而且立足于使顺、逆轨拦截模式的优势有效互补, 提高了对多目标的拦截成功率并具有灵活的应变机制。数值仿真结果验证了该方法的有效性, 可满足多对多拦截中的目标分配需求, 具有简单易行、计算量小、反应灵活的特点。

### 参考文献:

- [1] ROSENBERGER J M, SU H, RATNA H, et al. The generalized weapon target assignment problem[R]. Generalized Weapon Target Assignment Problem, 2005: 1-12.
- [2] 宋业新, 陈绵云, 张曙红, 等. 有约束多目标系统的模糊匈牙利决策及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(2): 78-81.
- [3] LEE Z J, SU S F, LEE C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B Cybernetics A Publication of the IEEE Systems Man & Cybernetics Society. 2002, 33(1): 113-121.
- [4] SONG Z, ZHU F, ZHANG D. A Heuristic Genetic Algorithm for Solving Constrained Weapon-Target Assignment Problem[C]//Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009. ICIS 2009. IEEE International Conference on. IEEE, 2009: 336-341.
- [5] WACHOLDER E. A Neural Network-Based Optimization Algorithm for the Static Weapon-Target Assignment Problem[J]. Informs Journal on Computing, 1989, 1(4): 232-246.
- [6] 王玮, 程树昌, 张玉芝. 基于遗传算法的一类武器目标分配方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1708-1711.
- [7] 叶文, 朱爱红, 潘长鹏, 等. 多UCAV协同目标分配算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 104-108.
- [8] 马飞, 曹泽阳, 刘晖. 基于博弈论的目标分配策略空间构建与搜索[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(9): 1941-1945.
- [9] 白国玉, 沈怀荣, 闫梁, 等. 拦截高速目标的全向真比例制导律研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1116-1125.
- [10] 白国玉, 沈怀荣, 李轶, 等. 机动高速目标的全向拦截制导律研究[J]. 装备学院学报. 2016, 27(4): 75-80.
- [11] 文莹, 闫雅慧. 基于自适应核主元分析的航空发动机异常监测[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 1-4.
- [12] PRASANNA H M, GHOSE D. Retro-proportional-navigation: a new guidance law for interception of high-speed targets[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(2): 377-386.