超视距空战中多机协同制导方法

冉华明 周 锐 吴 江 董卓宁

(北京航空航天大学 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 对空空导弹制导权交接的任务分配问题,根据己方飞机与制导权需交接的导弹的态势建立了对导弹的态势优势模型;根据己方飞机对该导弹攻击目标的态势建立了对目标的探测能力模型;根据敌方飞机对己方飞机的态势建立了己方飞机受到的威胁度模型;根据敌我双方飞机的空战能力建立了空战效能优势模型.在这4种模型的基础上建立了己方飞机对导弹的总的制导优势模型.在总的制导优势的基础上建立了协同制导任务分配模型,并采用遗传算法对协同制导任务分配问题进行优化求解.仿真结果表明,该方法能够实时地计算制导优势和进行任务分配,有效地完成多机协同制导.

关 键 词: 超视距空战; 协同制导; 制导权交接; 任务分配; 制导优势

中图分类号: TJ 765.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)10-1457-06

Cooperative guidance of multi aircraft in beyond-visual-range air combat

Ran Huaming Zhou Rui Wu Jiang Dong Zhuoning

(Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To solve the task allocation problem of air-to-air missile guidance power handover, according to the situation of our aircrafts to missiles whose guidance power needs to be turned over, situational advantage model to the missiles was established. Detecting capability model to missiles' targets was established by the situation of our aircrafts to the targets. Threat degree model of enemy aircrafts to our aircrafts was established by the situation of enemy aircrafts to our aircrafts. Air combat effectiveness advantage model was established by the air combat capability of both sides. On the basis of these four models, the whole guidance superiority model of our aircrafts to missiles was established. Cooperative guidance task allocation model was established based on the whole guidance superiority, genetic algorithm was used to optimize and solve the cooperative guidance task allocation problem. The simulation results demonstrate that this method can calculate guidance superiority and do task allocation in real time, and can accomplish multiple cooperative guidance feasibility.

Key words: beyond-visual-range air combat; cooperative guidance; guidance power handover; task allocation; guidance superiority

多机协同制导是超视距协同作战的关键技术之一.当正在对导弹进行引导的飞机受到威胁或需要执行其他任务时,需要将本机对导弹的制导权移交给其他飞机,实现多机协同制导[1-2].

目前,国外对多机协同制导的研究比较少见[3-7],国内关于多机协同制导的研究正在逐渐深入[1-2,8-11].文献[8]提出了双机协同制导的概念,给出了双机协同制导的过程描述,为协同制导提供了理论基础,但其未对多机编队协同制导问题进行展开.文献[1]提出用制导优势来表征编队内其他飞机对导弹协同制导的能力,给出了制导权移交决策模型,但在建模中未考虑己方飞机

收稿日期: 2013-10-30; **网络出版时间**: 2013-12-30 14:54; **DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0620

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20131230.1454.002.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273349,61175109,61203223,61333004); 航空科学基金资助项目(2011ZC13001,2013ZA18001)

作者简介: 冉华明(1990-),男,重庆万州人,硕士生,ranhuaming7245@163.com.

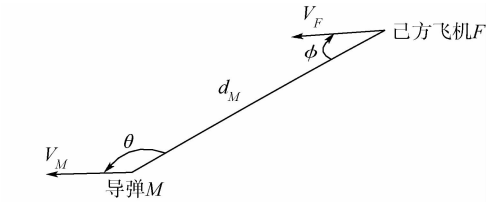
与导弹的照射关系. 文献[2]构建了我机对目标机制导优先权模型以及我机对空空导弹制导优先权模型,建立了空空导弹制导权移交的任务分配模型,但未考虑己方雷达的探测角度等约束条件.

本文对多机协同制导优势进行了建模分析,并建立了协同制导任务分配模型.

1 制导优势模型

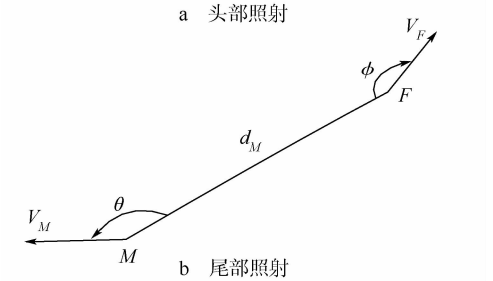
1.1 己方飞机对导弹的态势优势

飞机的指令发射吊舱的头部和尾部都装有相同的天线,导弹的收/发天线则一般安装在导弹尾部. 飞机与导弹之间通信可分为尾部照射和头部照射两种,分别如图 1a 和图 1b 所示[9].



V_F—己方飞机速度; V_M—导弹速度; ϕ—导弹方位角;
d_M—导弹与飞机距离; θ—导弹与飞机视线夹角.

a 头部照射



b 尾部照射

图 1 己方飞机对导弹的几何态势

Fig. 1 Situation of our aircraft to missile

飞机必须处于导弹的尾部天线工作的最大角度的范围内,构建导弹角度优势:

$$T_{\text{gui}_\theta}=\begin{cases}0 & |\theta|<180^\circ-\theta_{\max}\\ e^{\frac{|\theta|-180^\circ}{180^\circ}} & |\theta|\geqslant 180^\circ-\theta_{\max}\end{cases} \tag{1}$$

式中 $\theta_{\max}$ 为导弹的尾部天线工作的最大角度.

导弹必须处于飞机的指令天线的最大搜索角度的范围内,构建己方飞机角度优势:

$$T_{\text{gui}_\phi}=\begin{cases}e^{\frac{-|\phi|}{180^\circ}} & 0^\circ\leqslant|\phi|\leqslant\phi_{\max}\\ 0 & \phi_{\max}<|\phi|<180^\circ-\phi_{\max}\\ e^{2\times\frac{|\phi|-180^\circ}{180^\circ}} & 180^\circ-\phi_{\max}\leqslant|\phi|\leqslant 180^\circ\end{cases} \tag{2}$$

式中 $\phi_{\max}$ 为飞机的指令天线的最大搜索角度.

当己方飞机和导弹同时处于对方天线工作时的最大角度之内时,它们之间才能进行联系,构建总的角度优势:

$$T_{\text{gui}_\alpha}=(T_{\text{gui}_\theta})^{\gamma_1}\times(T_{\text{gui}_\phi})^{\gamma_2} \tag{3}$$

式中,$0\leqslant\gamma_1,\gamma_2\leqslant 1$, $\gamma_1+\gamma_2=1$, 取 $\gamma_1=0.5$, $\gamma_2=0.5$.

当飞机与导弹的距离不大于机载雷达对导弹的最大制导距离时,己方飞机与导弹之间才能进行联系[2],构建距离优势:

$$T_{\text{gui}_d}=\begin{cases}0 & d_M>R\\ e^{\frac{-d_M}{R}} & d_M\leqslant R\end{cases} \tag{4}$$

式中 R 为机载雷达对导弹的最大制导距离.

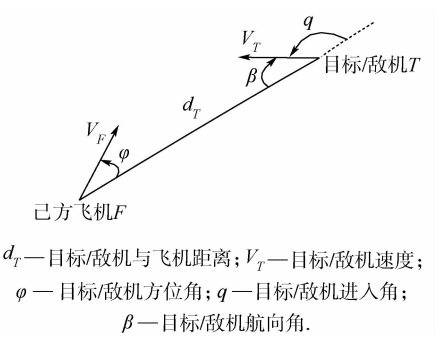
当己方飞机与导弹之间的角度和距离都满足己方飞机与导弹的约束时,它们之间才能进行联系,构建己方飞机对导弹的态势优势:

$$T_{\text{gui}}=(T_{\text{gui}_\alpha})^{u_1}\times(T_{\text{gui}_d})^{u_2} \tag{5}$$

式中,$0\leqslant u_1,u_2\leqslant 1$, $u_1+u_2=1$, 取 $u_1=0.5$, $u_2=0.5$.

1.2 己方飞机对目标的探测能力

候选制导飞机与目标的态势如图 2 所示.



d_T—目标/敌机与飞机距离; V_T—目标/敌机速度;
φ—目标/敌机方位角; q—目标/敌机进入角;
β—目标/敌机航向角.

图 2 敌我双方态势图

Fig. 2 Situation of both sides

当方位角在己方飞机雷达的最大探测角范围内时,才认为飞机对目标具有探测能力,构建目标方位角优势:

$$T_{\text{det}_\varphi}=\begin{cases}0 & |\varphi|>\varphi_{FR\max}\\ e^{-\frac{|\varphi|}{\varphi_{FR\max}}} & |\varphi|\leqslant\varphi_{FR\max}\end{cases} \tag{6}$$

式中 $\varphi_{FR\max}$ 为己方飞机的雷达的最大探测角.

现代机载雷达大多数都为脉冲多普勒雷达(PD 雷达),其对迎头目标的探测能力最强;而其对处于正侧方一定角度范围内的目标却没有探测能力;对尾随的目标的探测能力远小于对迎头目标探测能力[12]. 构建目标进入角优势:

$$T_{\text{det}_q}=\begin{cases}\cos(180^\circ-|q|)\times e^{-\frac{\pi\times(180^\circ-|q|)}{180^\circ}} & 90^\circ\leqslant|q|\leqslant 180^\circ\\ \frac{1}{2}\times\cos(|q|)\times e^{-\frac{\pi\times(|q|)}{180^\circ}} & 0^\circ\leqslant|q|<90^\circ\end{cases} \tag{7}$$

方位角优势和进入角优势具有一定的耦合性,构建总的探测角度优势:

$$T_{\mathrm{det_}\alpha}=(T_{\mathrm{det_}\varphi})^{\gamma_1}\times(T_{\mathrm{det_}q})^{\gamma_2} \tag{8}$$

式中,$0\leqslant\gamma_1,\gamma_2\leqslant1$,$\gamma_1+\gamma_2=1$,取 $\gamma_1=0.5$,$\gamma_2=0.5$.

当己方飞机与目标的距离不大于己方机载雷达的最大探测距离时,才认为己方飞机对目标具有探测能力[13].构建探测距离优势:

$$T_{\mathrm{det}_d}=\begin{cases}0 & d_T>D_{F\mathrm{Rmax}}\\ \mathrm{e}^{-\frac{3\times d_T}{D_{F\mathrm{Rmax}}}} & d_T\leqslant D_{F\mathrm{Rmax}}\end{cases} \tag{9}$$

式中 $D_{F\mathrm{Rmax}}$ 为己方机载雷达的最大探测距离.

由于距离和角度有一定的耦合性,构建己方飞机对目标的总的探测能力:

$$T_{\mathrm{det}}=(T_{\mathrm{det_}\alpha})^{u_1}\times(T_{\mathrm{det}_d})^{u_2} \tag{10}$$

式中,$0\leqslant u_1,u_2\leqslant1$,$u_1+u_2=1$,取 $u_1=0.5$,$u_2=0.5$.

1.3　己方飞机受到的敌方飞机威胁度

根据航向角及敌方飞机的角度性能,构建角度威胁因子[13]:

$$T_{\mathrm{thr_}\alpha}=\begin{cases}0 & |\beta|>\varphi_{\mathrm{Rmax}}\\ 0.3-\dfrac{|\beta|-\varphi_{M\mathrm{max}}}{10(\varphi_{\mathrm{Rmax}}-\varphi_{M\mathrm{max}})} & \varphi_{M\mathrm{max}}\leqslant|\beta|\leqslant\varphi_{\mathrm{Rmax}}\\ 0.8-\dfrac{|\beta|-\varphi_{M\mathrm{kmax}}}{2(\varphi_{M\mathrm{max}}-\varphi_{M\mathrm{kmax}})} & \varphi_{M\mathrm{kmax}}\leqslant|\beta|\leqslant\varphi_{M\mathrm{max}}\\ 1 & 0^\circ\leqslant|\beta|\leqslant\varphi_{M\mathrm{kmax}}\end{cases} \tag{11}$$

式中,φ_{Rmax} 为敌机雷达最大搜索角度;$\varphi_{M\mathrm{max}}$ 为敌方导弹的最大攻击角度;$\varphi_{M\mathrm{kmax}}$ 为敌方不可逃逸区最大角度.

根据敌我双方距离及敌方飞机距离性能,构建距离威胁因子[13]:

$$T_{\mathrm{thr}_d}=\begin{cases}0 & d_T>D_{\mathrm{Rmax}}\\ 0.5\mathrm{e}^{-\frac{d_T-D_{M\mathrm{max}}}{D_{\mathrm{Rmax}}-D_{M\mathrm{max}}}} & D_{M\mathrm{max}}\leqslant d_T\leqslant D_{\mathrm{Rmax}}\\ 2^{-\frac{d_T-D_{M\mathrm{kmax}}}{D_{M\mathrm{max}}-D_{M\mathrm{kmax}}}} & D_{M\mathrm{kmax}}\leqslant d_T\leqslant D_{M\mathrm{max}}\\ 1 & D_{M\mathrm{kmin}}\leqslant d_T\leqslant D_{M\mathrm{kmax}}\\ 2^{\frac{d_T-D_{M\mathrm{kmin}}}{D_{M\mathrm{kmin}}}} & 0\leqslant d_T\leqslant D_{M\mathrm{kmin}}\end{cases} \tag{12}$$

式中,D_{Rmax} 为敌方飞机雷达最大搜索距离;$D_{M\mathrm{max}}$ 为敌方导弹最大攻击距离;$D_{M\mathrm{kmax}}$ 和 $D_{M\mathrm{kmin}}$ 分别为敌方导弹最大/最小不可逃逸区距离.

在空战中,飞机的速度越大,导弹攻击的成功概率就越高.根据敌我双方速度,构建速度威胁因子[1,13]:

$$T_{\mathrm{thr}_v}=\begin{cases}0.1 & V_T\leqslant0.5V_F\\ 1.5-\dfrac{V_T}{V_F} & 0.5V_F<V_T<1.5V_F\\ 1.0 & V_T\geqslant1.5V_F\end{cases} \tag{13}$$

由于距离和角度有一定的耦合性,构建己方飞机受到的敌方飞机威胁度:

$$T_{\mathrm{thr}}=k_1\times(T_{\mathrm{thr_}\alpha})^{\gamma_1}\times(T_{\mathrm{thr}_d})^{\gamma_2}+k_2\times T_{\mathrm{thr}_v} \tag{14}$$

式中,$0\leqslant\gamma_1,\gamma_2\leqslant1$,$\gamma_1+\gamma_2=1$;$0\leqslant k_1,k_2\leqslant1$,$k_1+k_2=1$.在本文中,取 $\gamma_1=0.5$,$\gamma_2=0.5$,$k_1=0.85$,$k_2=0.15$.

1.4　空战效能优势函数

战斗机的空对空作战能力指数可表示为[14]

$$C=\left[\ln B+\ln\left(\sum A_1+1\right)+\ln\left(\sum A_2\right)\right]\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \tag{15}$$

式中,B,A_1 和 A_2 分别表示战斗机的机动性参数、火力衡量参数以及探测能力衡量参数;ε_1,ε_2,ε_3 和 ε_4 分别表示飞行员操纵效能系数、生存力系数、航程系数以及电子对抗能力系数[14].

对敌我双方的空战能力指数进行归一化处理,构建空战效能优势函数[1,13]:

$$T_C=\begin{cases}0 & C_F/C_T<0.3\\ 0.25 & 0.3\leqslant C_F/C_T<1\\ 0.5 & C_F/C_T=1\\ 0.75 & 1<C_F/C_T\leqslant1.5\\ 1 & C_F/C_T\geqslant1.5\end{cases} \tag{16}$$

式中,C_F 为己方飞机空战能力指数;C_T 为敌方飞机空战能力指数.

1.5　己方飞机对导弹的制导优势模型

设我方飞机有 M 架,敌机有 N 架,我方第 k 架飞机所制导的导弹需要其他己方飞机进行制导,其正在制导的导弹个数为 L,第 l 个导弹所攻击的目标为第 n_l 架敌机.则可得到己方飞机与导弹的优势矩阵为 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{gui}}$、己方飞机对所有目标飞机的探测能力矩阵 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{det}}$、敌方飞机对己方飞机的威胁度矩阵 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{thr}}$,对威胁度的每一行求平均值,得到敌方飞机对己方飞机的平均威胁度 $\bar{\boldsymbol{T}}_{\mathrm{thr}}$,求取威胁度的每一行最大值,得到敌方飞机对己方飞机的最大威胁度 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{thr_max}}$,最终威胁度为

$$\hat{T}_{\mathrm{thr}}(m,l)=$$

$$\begin{cases} \bar{\boldsymbol{T}}_{\text{thr}}(m,l) & \boldsymbol{T}_{\text{thr_max}}(m,l) < 5 \times \bar{\boldsymbol{T}}_{\text{thr}}(m,l) \\ \boldsymbol{T}_{\text{thr_max}}(m,l) & \boldsymbol{T}_{\text{thr_max}}(m,l) \geqslant 5 \times \bar{\boldsymbol{T}}_{\text{thr}}(m,l) \end{cases} \tag{17}$$

己方飞机与目标飞机的效能优势矩阵 $\boldsymbol{T}_C$,对效能优势矩阵的每一行求平均值,得到平均效能优势矩阵 $\bar{\boldsymbol{T}}_C$. 则飞机对导弹的总的制导优势:

$$\boldsymbol{T} = k_1 \times \boldsymbol{T}_{\text{gui}} + k_2 \times \boldsymbol{T}_{\text{det}} - k_3 \times \hat{\boldsymbol{T}}_{\text{thr}} + k_4 \times \bar{\boldsymbol{T}}_C$$

式中,$\boldsymbol{T}$ 为一个 $M \times L$ 的矩阵;$0 \leqslant k_1, k_2, k_3, k_4 \leqslant 1$, $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1$,可根据不同能力的重要程度选取,在本文中,取 $k_1 = 0.4$, $k_2 = 0.3$, $k_3 = 0.2$, $k_4 = 0.1$.

2 协同制导任务分配

2.1 协同制导任务分配模型

多机协同制导任务分配就是使得总的协同制导优势最大,并满足各种约束条件:

$$J_{\text{gui}} = \max\left(\sum_{l=1}^{L}\sum_{m=1}^{M} x_{ml} \times \boldsymbol{T}_{ml}\right) \tag{18}$$

$$\text{s.t.} \quad x_{ml} \in \{0,1\} \tag{19}$$

$$x_{kl} \neq 1 \tag{20}$$

$$\sum_{m=1}^{M} x_{ml} = 1 \quad l = 1,2,\cdots,L \tag{21}$$

$$\sum_{l=1}^{L} x_{ml} \leqslant L_{m\max} \quad m = 1,2,\cdots,M \tag{22}$$

式(19)表示我方第 m 架飞机是否执行制导任务;式(20)表示我方第 k 架飞机不能执行制导任务,因为它是请求协同制导的飞机;式(21)表示只选择一架飞机作为协同制导的接班机;式(22)表示第 m 架飞机最多能制导的导弹个数为 $L_{m\max}$ 个.

2.2 基于遗传算法的制导任务分配

多机协同制导分配模型是典型的非线性规划模型,对于这种复杂的多变量非线性优化问题,可采用遗传算法来求解[15]. 采用二进制编码,图 3 为编码示意图,编码为长度是 $M \times L$ 的一维数组,数组从前到后均匀地分为 M 段,每段有 L 个元素,每一段都表示一架战机的任务分配情况,1 表示将该导弹分配给该战机,0 表示不分配.

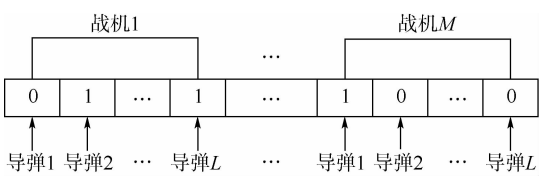


图 3 编码示意图

Fig. 3 Coding schematic

本文中种群大小为 80,采用式(18)计算适应值,采用轮盘赌选择法,交叉算子取 0.75,变异算子取 0.005,最大进化代数取 100 代.

3 仿真结果与分析

假设:己方由 6 架飞机 $F_1, F_2, \cdots, F_6$ 组成空中编队,初始位置分别为(0,20),(4,16),(8,12),(12,8),(16,4),(20,0),单位为 km,x 方向速度为 200 m/s,y 方向速度为 200 m/s;敌方由 3 架飞机 T_1, T_2, T_3 组成空中编队,初始位置分别为(95,105),(100,100),(105,95),单位为 km,x 方向速度为 -250 m/s,y 方向速度为 -150 m/s;敌我双方飞机处于同一水平高度匀速运动,双方的空战效能都为 1;双方飞机性能参数如表 1 和表 2 所示. 攻击方案为 F_3 攻击目标 T_1, T_2, F_4 攻击目标 T_3, $L_{m\max}$ 为 2,采用比例导引法对导弹进行制导,导弹速度为 1 000 m/s,在第 1 060 s 时 F_3 请求其他飞机对导弹进行制导,采样周期为 0.1 s.

表 1 己方飞机参数

Table 1 Parameters of our aircrafts

编号	雷达搜索角/(°)	最大离轴发射角/(°)	雷达探测距离/km	最大发射距离/km	导弹天线圆锥角/(°)
F_1	80	50	140	80	40
F_2	70	50	140	90	40
F_3	70	50	140	80	40
F_4	70	50	160	90	40
F_5	80	50	160	100	40
F_6	80	50	160	80	40

表 2 敌方飞机参数

Table 2 Parameters of enemy aircrafts

编号	雷达搜索角/(°)	最大离轴发射角/(°)	不可逃逸锥角/(°)	雷达探测距离/km	最大发射距离/km	最大不可逃逸距离/km	最小不可逃逸距离/km
T_1	65	35	20	100	60	40	20
T_2	65	30	20	120	70	45	20
T_3	80	35	20	100	60	40	20

飞机对导弹总的制导优势如表 3 所示,M_{31} 表示由 F_3 发射并攻击 T_1 的导弹,M_{32} 表示由 F_3 发射并攻击 T_2 的导弹. 飞机对导弹的制导任务分配结果如表 4 所示,F_2 对 M_{31} 进行接替制导,F_4 对 M_{32} 进行接替制导. 图 4 为遗传算法的种群进化曲线,可以看到最大适应值曲线很快收敛.

表 3　总的制导优势矩阵

Table 3　Total guidance superiority matrix

导弹编号	己方飞机编号					
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
M_{31}	0.360 32	0.377 49	0.375 42	0.367 30	0.346 07	0.068 02
M_{32}	0.352 8	0.375 5	0.388 0	0.382 8	0.360 8	0.078 4

表 4　协同制导任务分配矩阵

Table 4　Collaborative guidance task assignment matrix

导弹编号	己方飞机编号					
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
M_{31}	0	1	0	0	0	0
M_{32}	0	0	0	1	0	0

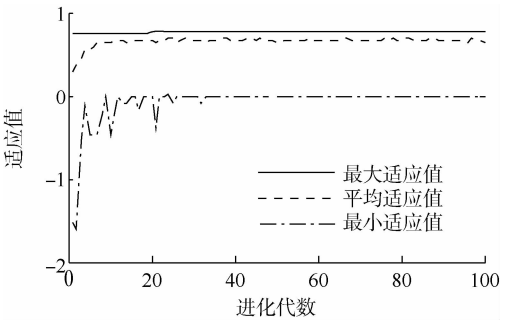


图 4　种群进化曲线

Fig. 4　Evolution curves

己方飞机对需要引导导弹的总的制导优势直方图如图 5 所示,可以看出,选择了除请求制导的飞机以外的总的制导优势最大的飞机对需要接替制导的导弹进行制导,说明分配方案的正确性.

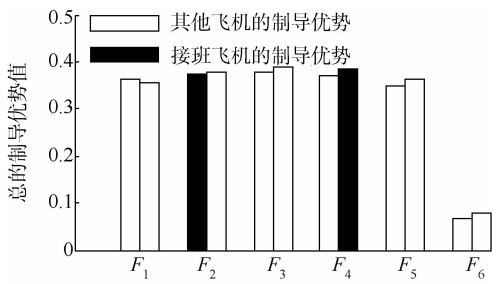


图 5　制导优势直方图

Fig. 5　Histogram of guidance superiority

整个仿真过程中的导弹及飞机的轨迹如图 6 所示. 己方飞机对导弹总的制导优势曲线如图 7 和图 8 所示,图中黑色竖线与总的制导优势曲线的交点的纵坐标表示该时刻飞机对导弹的总的制导优势. 由图 7,对于导弹 M_{31},F_2 的制导优势最大;由图 8,对于导弹 M_{32},F_4 的制导优势最大,这也说明分配方案的正确性.

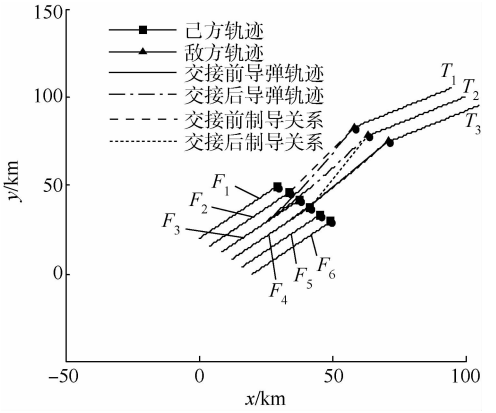


图 6　飞机和导弹飞行轨迹及引导

Fig. 6　Trajectory and the guidance of aircrafts and missiles

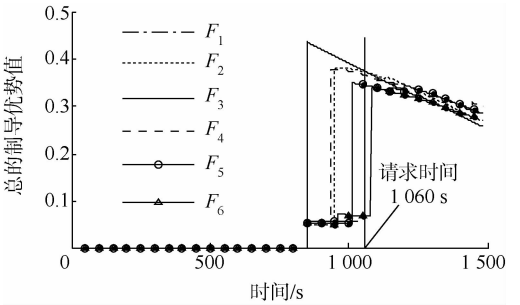


图 7　关于 M_{31} 的总的制导优势曲线

Fig. 7　Total guidance superiority curve of M_{31}

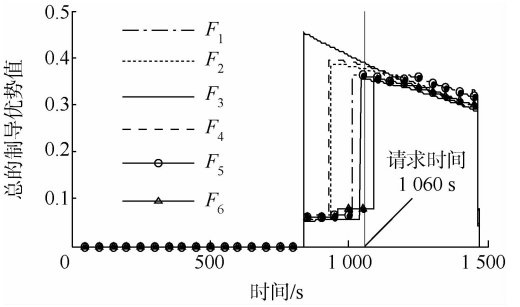


图 8　关于 M_{32} 的总的制导优势曲线

Fig. 8　Total guidance superiority curve of M_{32}

4　结　论

1) 建立了己方飞机对导弹的制导优势模型和协同制导任务分配模型.

2) 己方飞机能够根据本文的协同制导任务分配方法对导弹进行合理的制导任务分配.

参考文献 (References)

[1] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等. 多机空战协同制导决策方法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(3):610 - 612
Xiao Bingsong, Fang Yangwang, Hu Shiguo, et al. Decision methods for cooperative guidance in multi-aircraft air warfare[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3): 610 - 612 (in Chinese)

[2] 费爱国,张陆游,刘刚,等. 基于粒子群拍卖混合算法的空空

导弹制导权移交技术[J]. 宇航学报,2013,34(3):342 - 346
Fei Aiguo, Zhang Luyou, Liu Gang, et al. The technique for air-to-air missile guidance superiority handover based on particle swarm auction hybrid algorithm [J]. Journal of Astronautics, 2013,34(3):342 - 346(in Chinese)

[3] Shaferman V, Shima T. Cooperative multiple model adaptive guidance for an aircraft defending missile[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010,33(6):1801 - 1813

[4] Ratnoo A, Shima T. Formation-flying guidance for cooperative radar deception[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012,35(6):1730 - 1739

[5] Storms P P A, Grant T J. Agent coordination mechanisms for multi-national network enabled capabilities[C]//Proceedings of the 11th ICCRTS on Coalition Command and Control in the Networked Era. Cambridge, UK: CCRP, 2006:1 - 20

[6] Young B W. A C2 system for future aerospace warfare[C]//Proceedings of the 2004 International Command and Control Research Technology Symposium. San Diego, CA: CCRP, 2004: 1 - 21

[7] Young B W. Future integrated fire control[C]//Proceedings of the 10th International Command and Control Research and Technology Symposium. McLean, Virginia: CCRP, 2005:1 - 21

[8] 高坚,佟明安. 双机编队协同制导的火控机理[J]. 火力与指挥控制,2009,34(12):38 - 40
Gao Jian, Tong Ming'an. Fire control principle on cooperative guidance with two-fighters team[J]. Fire Control and Command Control, 2009,34(12):38 - 40(in Chinese)

[9] 刁兴华,方洋旺,王鹏,等. 对地攻击协同制导决策方法[J]. 电光与控制,2011,18(3):52 - 53
Diao Xinghua, Fang Yangwang, Wang Peng, et al. Cooperative guidance decision-making in air-to-ground attacking[J]. Electronics Optics & Control, 2011,18(3):52 - 53(in Chinese)

[10] 乔良,王航宇,石章松,等. 编队协同防空制导交接仿真研究[J]. 指挥控制与仿真,2009,31(4):81 - 83
Qiao Liang, Wang Hangyu, Shi Zhangsong, et al. Smulation research for the guidance relaying zone of formation cooperative aerial defense [J]. Command Control & Simulation, 2009, 31(4):81 - 83(in Chinese)

[11] 余亮,邢昌风,王航宇,等. 编队协同防空作战中制导交接问题分析与建模[J]. 舰船电子工程,2008,28(4):47 - 49
Yu Liang, Xing Changfeng, Wang Hangyu, et al. Analysis and modeling for guidance handover in cooperative air defense of ship formation[J]. Ship Electronic Engineering, 2008,28(4): 47 - 49(in Chinese)

[12] 崔晓宝,李楠. 机载 PD 雷达对机动目标探测盲区计算模型研究[J]. 火控雷达技术,2008,37(3):36 - 40
Cui Xiaobao, Li Nan. Research on calculation models for detection blind zone of airborne PD radar against maneuvering targets [J]. Fire Control Radar Technology, 2008,37(3):36 - 40(in Chinese)

[13] 肖冰松,方洋旺,夏海宝,等. 多机协同对空目标探测与攻击任务的最优分配[J]. 火力与指挥控制,2011,36(6):19 - 23
Xiao Bingsong, Fang Yangwang, Xia Haibao, et al. Optimal allocation of aerial target detection and attack in cooperative multi-fighter air combat[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(6):19 - 23(in Chinese)

[14] 朱宝鎏,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2 版. 北京:航空工业出版社,2006
Zhu Baoliu, Zhu Rongchang, Xiong Xiaofei. Fighter plane effectiveness assessment [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2006(in Chinese)

[15] Shima T, Rasmussen S J, Sparks A G, et al. Multiple task assignments for cooperating uninhabited aerial vehicles using genetic algorithms[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(11):3252 - 3269