

中远程空空导弹多机协同中制导交接方法*

刁兴华, 方洋旺, 张磊, 高翔, 毛东辉
(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:针对在同类型空中平台协同作战条件下,中远程空空导弹中制导权在移交过程中存在信息突变的问题,提出采用“虚拟目标”法对突变信息进行渐近处理,使虚拟目标逐步向真实目标运动,最终“导弹—虚拟目标”视线角与“导弹—真实目标”视线角重合,则中制导权移交结束;提出三种不同的中制导权交接律,在目标不机动/机动两种情形下,通过仿真分析不同模式下的交接律对空空导弹过载的影响。仿真结果证实适当平缓地进行制导权移交能将突变信息转化为接近于目标机动形成的、导弹自身能够处理的突变信息。避免了直接交接使导弹过载突变到非正常值的情况,使中制导交接能够平稳进行。

关键词:中远程空空导弹;协同制导;制导权移交;信息突变;虚拟目标法

中图分类号:TJ762 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)03-0077-06

Method of guidance handover in midcourse guidance phase of air-to-air missile about cooperative multi-platform

DIAO Xinghua, FANG Yangwang, ZHANG Lei, GAO Xiang, MAO Donghui

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of target information break in the process of handing over the guidance of Mid-Long range air-to-air missile between the same kinds of aircrafts in cooperative air combat, a method of “virtual target” was proposed; the virtual target approached the real target gradually, when the aspect angle of missile-virtual target and the missile-real target matched, and the process of handing over the guidance was over. Three different modes of approaching movement was proposed, and the affection on the over loading of air-to-air missile was analyzed through simulation of the situation of the target in the process of maneuvering and not maneuvering. The simulation results showed that handing over the guidance appropriately and moderately can transform the break information which is unmanageable into the break information which is manageable, and can avoid the information breaking into improper value if the guidance is handed over roughly.

Key words: air-to-air missile; cooperative guidance; guidance handover; information break; virtual target method

网络化作战条件下,各战斗机平台通过数据链连结为一个整体,实现了态势信息共享及武器的协同控制^[1-3],有效提高了作战效能。通过协同制导^[4-5],即发射平台将导弹的中制导权移交给另一架新的制导平台,制导权移交成功后,导弹继续由新的平台进行中制导,原制导平台退出,确保了对目标的有效攻击。

但由于平台传感器的性能有差异,如系统误差不同。导致各平台提供的制导信息不一致,甚至存在较大偏差,如果将这些信息不加处理地移交给导弹,会造成导弹过载突变^[6],影响弹道的稳定性,甚至导致制导权移交失败。为实现弹道及制导指令的平稳过渡,需设计空空导弹中制导交接律。

目前,国外能检索到这方面的公开文献很少。国内仅对舰空导弹的协同制导有相关研究,但较少关注制导交接过程中信息突变的问题,如文献[7-8]研究了舰空导弹接力切换式制导交接过程并提出实现方案;文献[9]对协同制导交接区和协同制导航路规划进行了研究,以上文献侧重于对制导权切换的时机及约束条件进行探讨,没有涉及制导切换时信息突变的处理。文献[10]通过引进平滑因子,设计了舰空导弹多平台接力制导的交接律,但未能进行深入分析。

本文重点研究在具备制导权移交时机及约束条件的情况下,由于平台传感器性能差异带来的制导信息突变问题,提出制导信息突变的处理原则、方法及流程,以及三种不同模式的中制导交

* 收稿日期:2013-10-02

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2014JQ8339)

作者简介:刁兴华(1984—),男,山西翼城人,博士研究生,E-mail:diaoxh@163.com;

方洋旺(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:ywfang2008@sohu.com

接律。

1 问题描述

绝大多数空空超视距拦截导弹的中制导一般采用惯性制导加无线电指令修正方式,导弹自身的运动参数由惯导系统提供,目标信息则以无线电指令的方式由载机发送给导弹^[11]。

在网络化作战中,作为接替中制导的平台可以与原平台的类型不同^[12-13]。为研究方便,本文假定接替制导的平台及其传感器与原制导平台类型相同,均为战斗机平台且采用机载火控雷达探测目标。

机载雷达对目标的测量数据中包含两种误差:一种是随机误差,可利用滤波等方法使误差的方差在统计意义下最小化,在一定程度上克服随机误差;另一种是系统误差,系统误差是复杂、慢变、非随机变化的,在相对较长一段时间内可以看作未知的“恒定值”^[14]。平台间机载雷达的系统误差不同,将导致中制导权移交时目标信息的突变。本文假定各平台经过滤波将随机误差消除到最小,主要考虑系统误差对中制导权移交的影响。

空空导弹中制导移交问题描述如下:

当导弹由第 i 个平台的制导区间飞向第 $i+1$ 个平台的制导区间时,导弹完成制导权的交接。设第 i 个协同制导平台提供的目标坐标为 (x_T, y_T) , 目标速度为 v_T 。第 $i+1$ 个制导平台所提供的信息相比第 i 个平台有一增量,目标坐标为 $(x_T + \Delta x_T, y_T + \Delta y_T)$, 目标速度为 $v_T + \Delta v_T$ 。

如果不采用交接律而直接进行制导权移交,则弹目视线角在一个采样周期 T 内的增量为

$$\Delta \tilde{q} = \Delta q_{normal} + \Delta q_{break} \quad (1)$$

$$\dot{\tilde{q}} = \frac{\Delta \tilde{q}}{T} = \frac{(\Delta q_{normal} + \Delta q_{break})}{T} = \dot{q}_{normal} + \dot{q}_{break} \quad (2)$$

式(1)中 Δq_{normal} 为目标机动造成的弹目视线角变化,如果目标不机动则 $\Delta q_{normal} = 0$, Δq_{break} 为由于信息的突变导致的目标视线角变化,式(2)中 \dot{q}_{normal} 为目标机动引起的弹目视线角变化率, \dot{q}_{break} 为由于信息突变引起的目标视线角变化率。

假设采用比例导引律,即 $\dot{\theta}_m = N\dot{q}$, 式中 $\dot{\theta}_m$ 为导弹弹道倾角速度, N 为比例系数, \dot{q} 为视线角速度。过载 $n_y = \frac{v_m \dot{\theta}_m}{g}$, 式中 v_m 为导弹瞬时速度, g 为重力加速度。

则交接瞬时导弹的过载为

$$n_y = \frac{v_m}{g} N \dot{\tilde{q}} = \frac{v_m}{g} N (\dot{q}_{normal} + \dot{q}_{break})$$

$$= \frac{v_m}{g} N \dot{q}_{normal} + \frac{v_m}{g} N \dot{q}_{break} \quad (3)$$

可以看出,交接的瞬时过载包含两部分:第一部分为正常过载,即目标机动产生的过载,如果中制导权不移交给新的平台,这一部分过载也是存在的;第二部分为交接时的目标信息突变造成的额外过载。

因此,相比于单一平台制导,在中制导权移交时,由于接替制导平台与原平台目标信息的精度误差而造成的过载变化为 $\frac{v_m N \Delta q_{break}}{gT}$ 。若 $\Delta q_{break} = 0.01 \text{ rad}$, $N = 3$, $v_m = 680 \text{ m/s}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $T = 0.1 \text{ s}$, 则 $\frac{v_m N \Delta q_{break}}{gT} = 20.9$ 。即过载在一个采样周期内突然增大 $20.9g$, 从而造成导弹弹道突变,有可能使导弹失控。

2 中制导权移交分析

2.1 中制导权移交原则及方法

为实现中制导权的平稳移交,需要对交接过程进行设计。事实上,制导权的交接过程,就是让导弹“接受”新平台的制导指令的过程。由式(3)可知,在一个指令发送周期内完成交接,容易造成导弹瞬时过载的突变,为此,可以分若干个周期来完成,逐步交接。

交接过程持续的时间越长,则分散在每个周期上的额外过载越小,但该过程并不是越长越好,需要遵循以下原则:

- 1) 每个周期内产生的过载要在导弹可承受范围内,即 $n_y < n_{y\max}$;
- 2) 是过载变化尽量平滑;
- 3) 是交接时间尽量短。

为使中制导权的交接平稳进行,可采用“虚拟目标”的方法将制导信息从一个平台转移到另一个平台:交接过程中,交接平台通过在自身探测目标信息的基础上逐步增加两平台间的精度误差信息,形成一个虚拟目标,该虚拟目标逐步接近接替制导平台探测的目标,直到重合。如图 1 所示。

这与一般情形下的中制导相同^[11,15],区别在于,虚拟目标的运动是在平台 i 信息的基础上,叠加了一个从平台 i 信息向平台 $i+1$ 信息标移动的运动。如图 1 所示,虚拟目标的速度 $V_{virtual}$ 可分解为平台 i 探测的目标运动速度 V_T^i 以及接近速度 $V_{approach}$, 即

$$V_{virtual} = V_T^i + V_{approach} \quad (4)$$

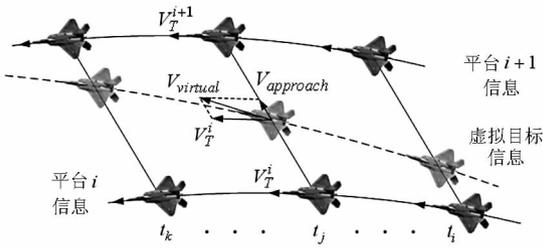


图1 虚拟目标轨迹

Fig. 1 Virtual target track

2.2 中制导权移交流程设计

制导权的交接过程可分为三个阶段:

1) 交接准备

a) 平台 i 选定平台 $i+1$ 作为接替制导的平台, 双方通过数据链交换探测到的目标信息, 平台 i 通过对连续若干个采样周期的数据进行对比计算, 得到两平台探测目标信息的精度差, 包括目标位置精度差 L_{break} 及目标速度精度差 V_{break} , 且有

$$L_{break} = \text{const}, V_{break} \approx 0 \quad (5)$$

因此, 制导权的交接过程主要是对目标位置精度差 L_{break} 进行过渡。

b) 平台 i 根据 L_{break} 制定交接方案。主要包括:

① 交接时间 $T_{handover}$

即确定在随后的时间区间 $[0, MT]$ 内, 完成制导信息的过渡, T 为制导指令发送周期, M 为实施中制导权移交的指令周期数, $T_{handover} = MT$ 。

② 接近运动 $M_{approach}$ 方式

$M_{approach}$ 可设计为匀速或变速运动, 不同的运动方式对导弹过载的影响是不同的, 有

$$\int_{(i-1)T}^{iT} V_{approach} = \Delta L_{break}^i \quad (6)$$

$$\int_0^{T_{handover}} V_{approach} = L_{break} \quad (7)$$

$$\dot{q}_{break}(t) = f(V_{approach}, t) \quad (8)$$

其中, 式(6)为在一个指令发射周期内, 位置精度差的变化量; 式(7)为在交接时间内, 接近运动的位移应为总的位置精度差; 式(8)为由 $V_{approach}$ 引起的弹目视线角速度变化率^[16]。如采用比例导引律, 则在每个调整周期内, 将式(8)代入式(3), 还应满足 $n_y < n_{y,max}$ 。

2) 交接实施

该阶段包含两方面的内容:

a) 平台 i 根据制定的交接方案, 在指令发送周期内, 将自身探测的目标机动引起的距离变化信息 ΔL_{normal} 加上目标位置精度差增量 ΔL_{break}^i , 在基准坐标系 $OXYZ$ 三个坐标轴上的投影, 进行编码, 形成无线电指令发送给导弹, 导弹计算机进行

修正计算^[11,15], 即

$$\Delta L = \Delta L_{normal} + \Delta L_{break}^i \quad (9)$$

b) 在指令发送间隔内, 导弹计算机对目标的运动进行外推计算。其中, 平台 i 探测的目标信息按照匀速直线运动进行外推, 接近运动 $M_{approach}$ 采用在准备阶段确定的运动规律进行外推, 最后合成为虚拟目标的运动。

3) 交接结束

经过 M 个指令发送周期, 平台 i 发送给导弹的制导指令已与平台 $i+1$ 的相同。此时, 平台 i 通知平台 $i+1$ 从下一个指令发送周期开始, 导弹直接接受来自平台 $i+1$ 的制导指令。当平台 $i+1$ 开始向导弹发送制导指令, 中制导交接结束。

2.3 交接律设计

前面提到, $M_{approach}$ 的不同运动方式对导弹过载的影响不同。下面提出三种不同交接模式

1) 模式1: 匀速交接

$$V_{approach} = \frac{L_{break}}{T_{handover}} = \text{const} \quad (10)$$

2) 模式2: 匀加减速交接

$M_{approach}$ 的初速度为0, 末速度为0, 前半程为匀加速运动, 后半程为匀减速运动, 位移为 L_{break} , 运动时间为 $T_{handover}$, 可得接近运动的加速度 $a_{approach}$ 为

$$a_{approach} = \begin{cases} \frac{4L_{break}}{T_{handover}^2}, & t \in \left[0, \frac{T_{handover}}{2}\right] \\ -\frac{4L_{break}}{T_{handover}^2}, & t \in \left[\frac{T_{handover}}{2}, T_{handover}\right] \end{cases} \quad (11)$$

3) 模式3: 变加减速交接

$M_{approach}$ 的初速度为0, 末速度为0, 位移随时间的变化规律为三角函数

$$L_{approach}(t) = \frac{1 - \cos \frac{\pi t}{T_{handover}}}{2} \cdot L_{break}, \quad t \in [0, T_{handover}] \quad (12)$$

对上式求导, 有

$$V_{approach}(t) = \frac{L_{break} \pi}{2T_{handover}} \sin \frac{\pi t}{T_{handover}}, \quad t \in [0, T_{handover}] \quad (13)$$

对式(13)求导, 得

$$a_{approach}(t) = \frac{L_{break} \pi^2}{2(T_{handover}^2)} \cos \frac{\pi t}{T_{handover}}, \quad t \in [0, T_{handover}] \quad (14)$$

由式(14)可以看出, $a_{approach}$ 是时间 t 的函数。

3 仿真研究

为研究方便,本文仅对 (x, y) 平面内弹目运动进行分析。设导弹初始位置 (x_M, y_M) 为 $(0\text{m}, 1\ 000\text{m})$, 弹道倾角 $\theta_M = 0^\circ$, 速度 $V_M = 800\text{m/s}$; 目标初始位置 (x_T, y_T) 为 $(80\ 000\text{m}, 7\ 000\text{m})$, 航迹倾角 $\theta_T = 0^\circ$, 速度 $V_T = 200\text{m/s}$; 进行中制导权移交时, 弹目距离 58km , 经换算后位置精度差为 0.55km , $n_{y\max} = 30g$, $M = 10$, 移交时刻 $t_0 = 25\text{s}$, 中制导指令发送周期 $T = 1.0\text{s}$, 则移交持续时间 $T_{\text{handover}} = 10\text{s}$, 仿真步长为 0.1s 。

本文只讨论中制导权移交的情形, 因此不考虑中末制导交班以及末制导。

分别对目标不机动、机动两种情况进行仿真。假设导弹中制导采用比例导引律, 导航比 $N = 3$, 取 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 。再分别对单机制导(无制导权移交)、中制导直接交接(无过渡交接)以及采用不同交接律时弹目曲线及导弹过载 n_y 随时间变化曲线进行仿真对比。

1) 目标不机动

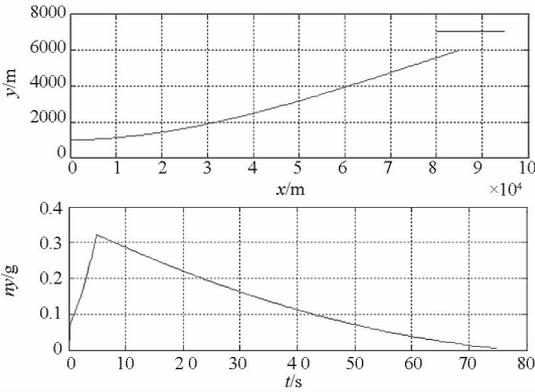


图 2 单机中制导

Fig. 2 Midcourse guidance of single platform

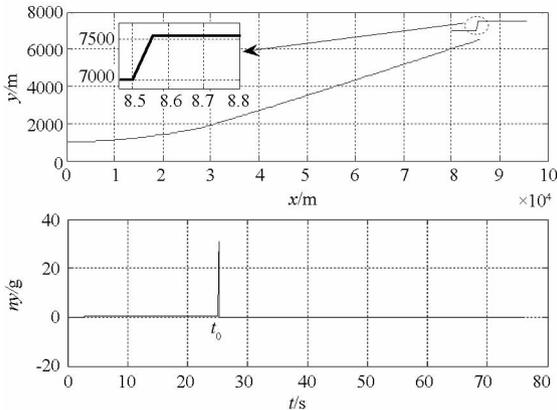


图 3 中制导无过渡交接

Fig. 3 Hand over the guidance roughly

如图 2 所示, 在无中制导权移交且目标不机

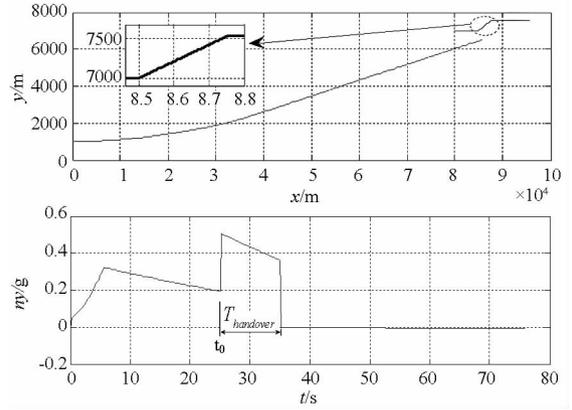


图 4 中制导交接模式 1

Fig. 4 Hand over the guidance in mode 1

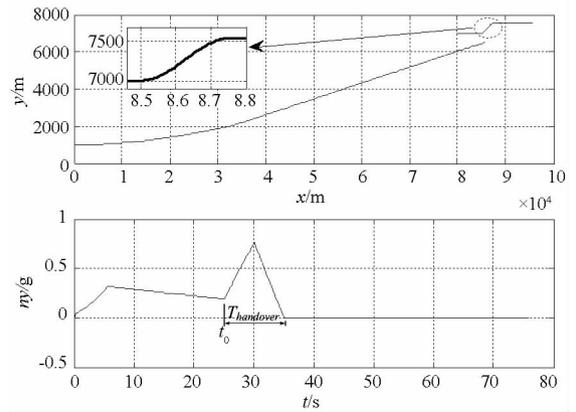


图 5 中制导交接模式 2

Fig. 5 Hand over the guidance in mode 2

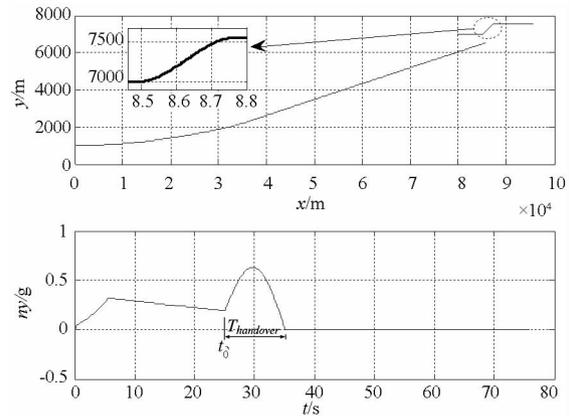


图 6 中制导交接模式 3

Fig. 6 Hand over the guidance in mode 3

动的情况下, 导弹过载较小, 变化较平稳。图 3 显示, 中制导权直接交接造成导弹过载瞬间突变, 远大于单机制导情形下的导弹过载, 实际中不利于弹道稳定。若平缓地将制导权移交给另一个平台, 如图 4、5、6 所示, 能有效改善导弹过载突变到非正常值的情况。图 4 中过载有突变, 但突变量较小, 远低于导弹可用过载; 图 5、6 显示, 这两种交接模式过载无突变且过载变化相对平滑。

2) 目标机动

设中制导期间,目标作最大过载为 0.5g 的正弦机动。

图 7 至图 11 中过载的突变量是导弹外推的目标信息与制导指令中目标信息不一致造成的,因目标的机动过载较小,导弹过载的突变量也较小,且随着弹目距离的减小,呈增大趋势,这是因为弹目距离越近,目标机动所引起的弹目视线角速率就越大。

如图 8 所示,中制导权直接交接造成的导弹过载突变,远大于目标机动形成的导弹过载。由图 9、10、11 可以看出,适当平缓地进行制导权交接能将突变转化为持续地微量变化。对比图 4、5、6,同一种交接模式在两种仿真环境下对导弹过载的影响相同,这是由于制导权移交时,导弹可以对接近运动进行精确地外推,由此而引起的过载变化也是相同的。所以图 4 与图 9,图 5 与图 10,以及图 6 与图 11 中交接段导弹过载变化趋势相同,但由于前者不机动,因而无修正过载,后者作正弦机动,在指令发送时刻需要进行修正。

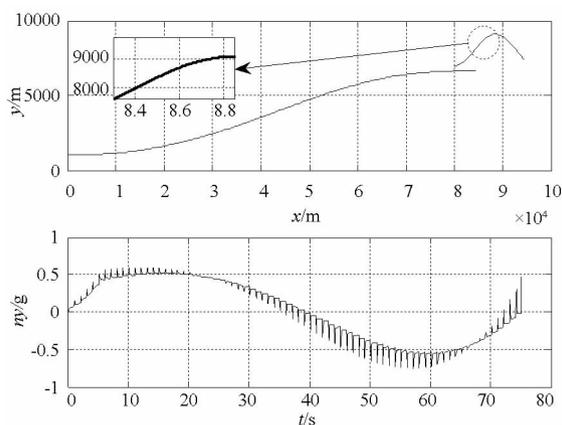


图 7 单机中制导

Fig. 7 Midcourse guidance of single platform

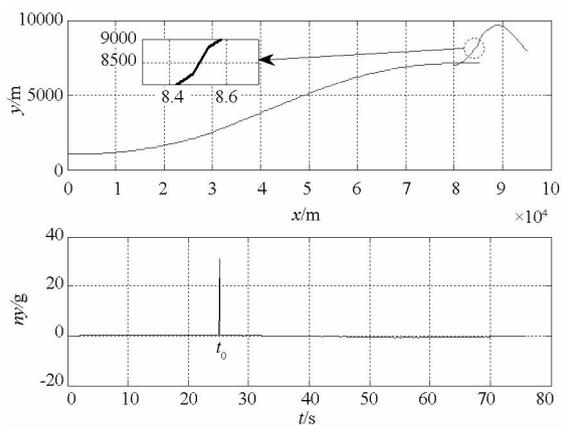


图 8 中制导无过渡交接

Fig. 8 Hand over the guidance roughly

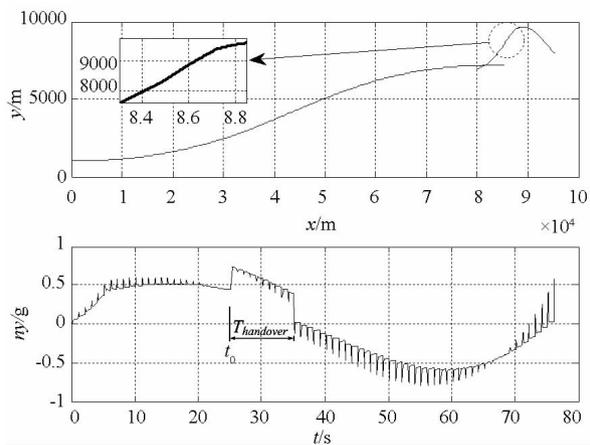


图 9 中制导交接模式 1

Fig. 9 Hand over the guidance in mode 1

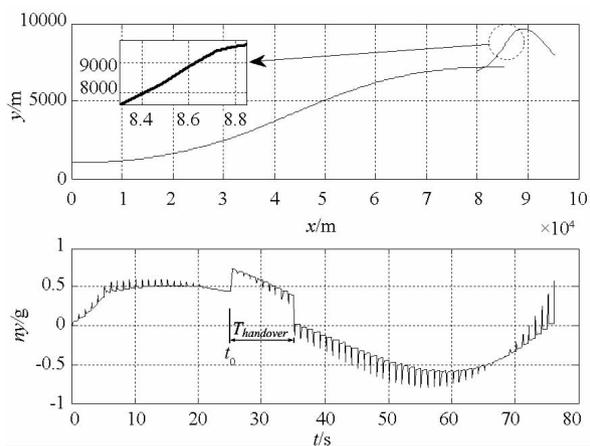


图 10 中制导交接模式 2

Fig. 10 Hand over the guidance in mode 2

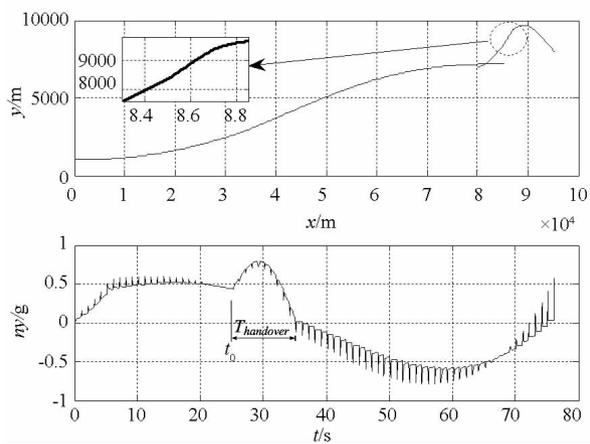


图 11 中制导交接模式 3

Fig. 11 Hand over the guidance in mode 3

设目标作最大过载为 5g 的正弦机动。

如果目标机动过载增大,指令修正时导弹过载也相应增大,但不影响接近运动引起的过载变化,如图 12 所示。

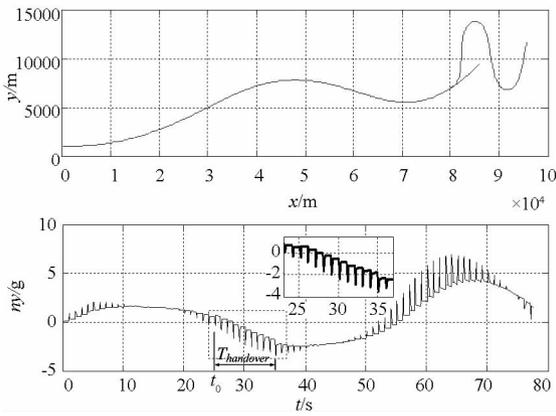


图 12 中制导交接模式 3

Fig. 12 Hand over the guidance in mode 3

4 结论

通过设计前述中远距离空导弹中制导权交接策略及方法,能将目标突变信息引起的导弹非正常过载突变转变为持续缓和的过载变化,使导弹的中制导能够平稳切换,确保中制导交接过程中弹道稳定。

本文提出的三种交接模式对导弹过载的影响均不相同,但仿真表明了在不同条件下各模式的有效性,且实现简单,具有较强的可行性。为协同制导过程中导弹过载突变问题提供了解决方法。

参考文献 (References)

[1] U S Department of Defense. Network centric report to congress[R]. 2001;8-9.

[2] U S Department of Defense. C⁴ISR architecture framework[R]. 1997;12-14.

[3] 童明成,张凤霞,贺建良.网络环境下空中多平台联合攻击作战方式[J].电光与控制,2009,16(5):19-22.
TONG Mingcheng, ZHANG Fengxia, HE Jianliang. Aerial multi-platform joint-attack warfare modes in network environment[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(5):19-22. (in Chinese)

[4] 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 of cooperative guidance for multi-aircraft air combat[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3):610-612. (in Chinese)

[5] 付昭旺,于雷,李战武,等.双机协同导弹指令修正中制导技术[J].火力与指挥控制,2012,37(12):59-63.
FU Zhaowang, YU Lei, LI Zhanwu, et al. Research on command amendment guidance method of double-fighter cooperative missile guidance[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(12):59-63. (in Chinese)

[6] 张建伟,黄树彩,韩朝超.基于 Matlab 的比例导引弹道仿真

分析[J].战术导弹技术,2009,21(3):60-64.

ZHANG Jianwei, HUANG Shucui, HAN Chaocai. Analysis of trajectory of proportional guidance based on matlab [J]. Tactical Missile Technology, 2009, 21(3):60-64. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 赵永涛,胡云安,李静.舰空导弹作战接力切换式制导交接方案设计[J].飞行力学,29(1):50-53.
ZHAO Yongtao, HU Yunan, LI Jing. Design of the relay switch guidance handover scheme for interception of the ship-air missile[J]. Flight Dynamics, 29(1):50-53. (in Chinese)

[9] 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. Simulation research for the guidance relaying zone of formation cooperative aerial defense [J]. Command Control&Simulation, 2009, 31(4):81-83. (in Chinese)

[10] 余名哲,张友安,钱进.基于遭遇点预测的比例导引与多平台接力制导交接律设计[J].海军航空工程学院学报,2010,25(3):255-258.
YU Mingzhe, ZHANG Youan, QIAN Jin. Design of the proportional navigation based on hit point prediction and multi-platform relay-guidance transfer law [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(3):255-258. (in Chinese)

[11] 周志刚.航空综合火力控制原理[M].北京:国防工业出版社,2008:250-252.
ZHOU Zhigang. Aviation integrated fire control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 250-252. (in Chinese)

[12] Richard Scott. Joining the dots: networked platforms extend air defense[J]. Jane's Navy International 2005, (12):26-30.

[13] U S Department of Defense. Joint technical architecture[R]. 2001;19-20.

[14] 何友,修建娟,张晶炜,等.雷达数据处理及应用[M].第二版.北京:电子工业出版社,2009:2-4.
HE You, XIU Jianjuan, ZHANG Jingwei, et al. Radar data processing with applications[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009:2-4. (in Chinese)

[15] 周志刚.机载火力控制系统分析[M].北京:国防工业出版社,2008:239-242.
ZHOU Zhigang. Analysis for airborne fire control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 239-242. (in Chinese)

[16] 周获.寻的导弹新型导引规律[M].北京:国防工业出版社,2002:5-8.
ZHOU Di. New guidance laws for homing missile [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 5-8. (in Chinese)