

引用格式:王道重,滕克难,肖玉杰,等.基于制导误差的地空导弹接力制导决策研究[J].电光与控制,2019,26(9):1-4. WANG D Z, TENG K N, XIAO Y J, et al. Relay guidance decision-making of surface-to-air missile based on guidance error[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9):1-4.

基于制导误差的地空导弹接力制导决策研究

王道重¹, 滕克难¹, 肖玉杰², 刘胜男³, 张海龙⁴

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 海军研究院, 北京 100161;

3. 海军驻沈阳地区航空军事代表室, 沈阳 110000; 4. 中国人民解放军91421部队, 山东 青岛 266011)

摘要:介绍了地空导弹发生接力制导的3种作战情况以及接力制导的作战流程;从制导误差和制导交接成功概率出发,构建了制导决策优选模型;利用制导决策优选模型对地空导弹接力制导决策进行仿真验证,仿真结果表明,制导决策优选模型能够选出最优的制导通道,可为指挥员决策提供依据。

关键词:地空导弹;制导误差;接力制导;制导决策

中图分类号: TJ765.3

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.001

Relay Guidance Decision-Making of Surface-to-Air Missile Based on Guidance Error

WANG Dao-zhong¹, TENG Ke-nan¹, XIAO Yu-jie², LIU Sheng-nan³, ZHANG Hai-long⁴

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China; 3. Aviation

Military Representative Office of PLA in Shenyang, Shenyang 110000, China; 4. No.91421 Unit of PLA, Qingdao 266011, China)

Abstract: Three kinds of operational situation of relay guidance of surface-to-air missiles and the operational process of relay guidance are presented. Based on the guidance error and the successful probability of relay guidance, the model of guidance decision-making optimization is constructed. The model of guidance optimization is used to simulate and verify the relay guidance decision on surface-to-air missile. The simulation results show that the guidance optimization model can select the optimal guidance channel and provide a basis for the commander's decision-making.

Key words: surface-to-air missile; guidance error; relay guidance; guidance decision-making

0 引言

关于接力制导,文献[1]根据一体化防空反导的作战思想,首先提出接力制导的概念,但没有对接力制导的相关技术进行更深入的研究;文献[2]对接力制导时产生的“协同制导通道”进行了全面阐述,但没有给出选择制导节点的具体方法;文献[3]根据协同制导通路的概念,分析了影响协同制导通路的误差因素,构建制导通路优选模型,并加以验证,可为制导决策的研究提供依据;文献[4-5]应用优势函数来表示协同制导能力,进而给出制导决策模型,但不适用于接力制导作战模式;文献[6]基于制导通路的方法构建模型进行制导决策研究,但没有考虑制导误差这一重要因

素。制导决策属于武器装备与作战指挥一体化的范畴,从上述国内外研究现状来看,制导决策的研究方法有很多,尤其在接力制导作战模式下,而如何选择制导节点是制导决策问题研究的主要需求和难点,本文将基于制导误差这一关键因素,充分考虑制导交接成功概率,对地空导弹接力制导的制导决策方法进行更深入的研究。

1 发生接力制导的作战背景

一般地空导弹网络化协同防空需要接力制导有以下3种作战情况:

1) 地空导弹已发射,但发射平台由于各种原因在制导系统发生故障时,需要协同平台对已发射的导弹进行接力制导;

2) 地空导弹已发射,但发射平台需要采用无线电静默的方式来规避敌方反辐射导弹时,一般需要协同平台对已发射的导弹进行接力制导,如此切换制导平台,既不影响导弹制导,又可以规避反辐射导弹的攻击;

收稿日期:2018-09-18

修回日期:2019-08-20

基金项目:国家自然科学基金(51605487)

作者简介:王道重(1988—),男,辽宁昌图人,硕士,讲师,研究方向为海军航空导弹、装备作战应用。

3) 发射平台通过外部信息制导的作战方式发射导弹,导弹在中制导阶段,飞入提供外部信息的协同平台的制导空域,此时采用接力制导,将制导权交给协同平台,可大大减少制导误差,提高命中概率。

2 接力制导的具体流程

地空导弹各火力单元组网后,满足发生接力制导的作战条件时,应采用接力制导的作战模式,其具体流程如图1所示。

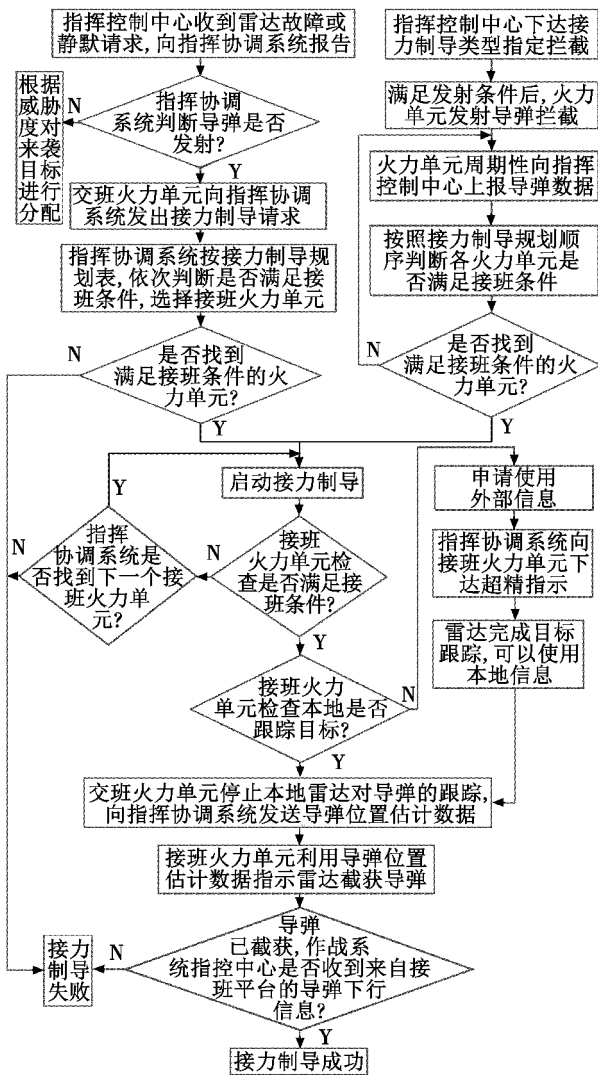


图1 接力制导的流程

Fig. 1 Process of relay guidance

1) 地空导弹各火力单元组网后,各作战节点(如指挥控制节点、探测跟踪节点、发射节点、制导节点等)由作战系统指挥控制中心统一指挥,当指挥控制中心收到某火力单元的接力制导请求时,根据指挥协调系统选择接班火力单元,启动接力制导;或者指挥控制中心下达接力制导类型指定拦截,发射节点不断将导弹下行信息反馈给指挥协调系统,由指挥协调系统选择

接班火力单元,启动接力制导。

2) 被选择的接班火力单元根据自身制导能力判断是否满足接班条件(同一时间制导的导弹数不大于其最大可制导导弹数),若满足,则进行下一步;若不满足,则由指挥协调系统重新分配接班平台。

3) 被选择的接班火力单元判断是否对已发射的导弹稳定跟踪,“是”,则根据交班平台的导弹信息进行截获;“否”,则进行外部信息制导,直到对导弹进行稳定跟踪,可以使用本地信息进行制导。

4) 接班平台已截获导弹,并能够对导弹进行制导,若协同防空作战系统指挥控制中心收到来自接班平台发送的导弹下行信息,说明接力制导已成功;否则说明接力制导失败。

3 制导决策优选模型

3.1 制导误差分析

地空导弹在射击时,其理想弹道和实际飞行弹道是不一致的,它们之间的偏差被称为制导误差^[7]。以垂直于目标视线的平面为特征平面,如图2所示。

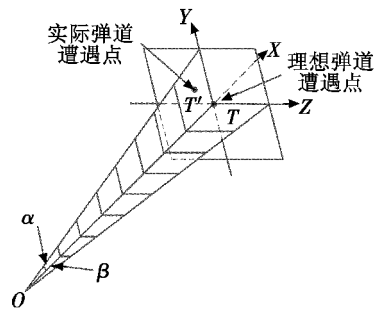


图2 制导误差特征平面

Fig. 2 Characteristic plane of guidance error

图中,OX轴为目标视线,平面YTZ为特征平面,OX轴垂直于平面YTZ,α为高低角,β为方位角。实际弹道遭遇点T'是围绕中心点T散布的,理论和试验数据证明,制导误差在特征平面内服从正态分布^[7-8]。

采用复合制导^[9]的地空导弹,其制导误差与射程的关系如图3所示。

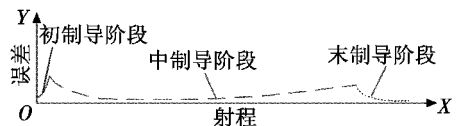


图3 制导误差与射程的关系

Fig. 3 The relationship of guidance error and attack range

在直角坐标系XOY中,OX轴表示导弹射程,OY轴表示误差,导弹系统装订参数后发射导弹进入初制导阶段,因为此阶段不能对导弹进行指令修正,且时间很短,所以初制导阶段不能进行接力制导,此时误差相对于中、末制导阶段较大;在中制导阶段,时间较长,采用“捷

“联惯导+指令修正”可以进行接力制导,开始时,导弹与制导站的距离越大误差越小,但到一定距离后,制导误差会随着射程的增加而增大;在末制导阶段,导弹制导方式为自动寻的制导,地面雷达在此阶段不再制导导弹,所以接力制导不能发生在末制导阶段,制导误差随着射程的增加而减小,最后与目标遭遇。接力制导是在导弹中制导阶段发生的,影响其制导能力的主要因素有制导节点的制导能力和制导交接的成功概率。

在中制导阶段,指控中心是根据地空导弹信息和目标信息来对地空导弹进行指令修正的,所测量的地空导弹和目标信息的精度将直接影响其制导能力。记导弹测量误差为 $\Delta M(\Delta l_m, \Delta \alpha_m, \Delta \beta_m)$, Δl_m 表示导弹距离误差, $\Delta \alpha_m$ 表示导弹高低角误差, $\Delta \beta_m$ 表示导弹方位角误差;目标测量误差为 $\Delta T(\Delta l_t, \Delta \alpha_t, \Delta \beta_t)$, Δl_t 表示目标距离误差, $\Delta \alpha_t$ 表示目标高低角误差, $\Delta \beta_t$ 表示目标方位角误差;根据文献[7-8],距离误差、高低角误差和方位角误差是相互独立且符合正态分布的,如表1所示。

表1 测量误差分布

Table 1 Density function of measuring error

参数	误差	参数	误差
Δl_m	$N(0, \sigma_{lm}^2)$	Δl_t	$N(0, \sigma_{lt}^2)$
$\Delta \alpha_m$	$N(0, \sigma_{\alpha m}^2)$	$\Delta \alpha_t$	$N(0, \sigma_{\alpha t}^2)$
$\Delta \beta_m$	$N(0, \sigma_{\beta m}^2)$	$\Delta \beta_t$	$N(0, \sigma_{\beta t}^2)$

由于方差可以度量真实数据和期望的差距,本文将应用方差加权法来衡量制导能力,则第 i 个制导节点的测量偏差指数为

$$W_i = \omega_1 \frac{\sigma_{i lm}^2}{\max_{(1-n)} \{ \sigma_{lm}^2 \}} + \omega_2 \frac{\sigma_{i \alpha m}^2}{\max_{(1-n)} \{ \sigma_{\alpha m}^2 \}} + \omega_3 \frac{\sigma_{i \beta m}^2}{\max_{(1-n)} \{ \sigma_{\beta m}^2 \}} + \omega_4 \frac{\sigma_{i lt}^2}{\max_{(1-n)} \{ \sigma_{lt}^2 \}} + \omega_5 \frac{\sigma_{i \alpha t}^2}{\max_{(1-n)} \{ \sigma_{\alpha t}^2 \}} + \omega_6 \frac{\sigma_{i \beta t}^2}{\max_{(1-n)} \{ \sigma_{\beta t}^2 \}} \quad (1)$$

式中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$ 表示加权系数,且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 = 1$,可由专家打分确定。在打分过程中,应分别考虑导弹距离误差、导弹高低角误差、导弹方位角误差、目标距离误差、目标高低角误差和目标方位角误差的权重,一般同一类型的误差影响权重相等,某个因素的加权系数越大,说明该因素对制导误差的影响越大,所以对制导决策的影响就越大。

3.2 制导交接成功概率

制导交接成功概率^[10-11]是指制导节点 a 将导弹的制导权交给制导节点 b 的成功概率,影响因素主要包括:1) 导弹落入制导节点 b 的搜索、等待范围概率 p_1 ;2) 制导节点 b 成功截获导弹的概率 p_2 ;3) 制导节点 a 与制导节点 b 之间信息交互的可靠性 p_3 。则制导交接成功概率算式为

$$P = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \quad (2)$$

制导节点制导的导弹实际弹道与理论弹道偏差越小,其制导能力指数就越大,即导弹的实际弹道与理论弹道的偏差与制导节点的制导能力成反比。此外,制导节点的制导交接成功概率越大,其制导能力就越大,即制导节点的交接成功概率与其制导能力成正比,在此构建制导能力评价方程为

$$E = P/W \quad (3)$$

根据图3,导弹中末制导交班时,导弹的位置与此时制导导弹的节点有关,即在接力制导情况下,导弹能否命中目标,主要取决于最后一个制导节点的制导能力。所以,可以根据上述综合制导能力评价方程,在众多“协同制导通道”中选出最优。

4 仿真实例

假设坐标原点 O 为一个需要保卫的要地,部署有要地防空导弹武器系统, A 点和 B 点分别有两个地空导弹火力单元,假设火力单元 O, A, B 可以进行网络化协同防空作战, OX 轴正方向为正东, OY 轴正方向为正北, OA 距离 30 km, OA 与 OX 轴反方向夹角为 30° , OB 距离 25 km, OB 与 OY 夹角为 30° 。假设来袭目标 t 是反辐射导弹,协同作战体系 AOB 需要采用接力制导的作战模式来应对反辐射导弹。设目标 t 的飞行高度为 300 m,火力单元 O, A, B 对于飞行高度 300 m 的目标的探测距离为 100 km,此时,作战态势如图4所示。

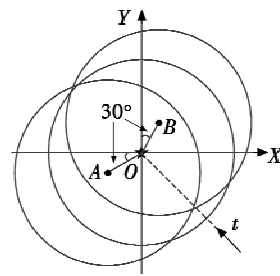


图4 防空态势图

Fig. 4 Sketch map of air defense situation

图中,圆形区域分别表示各火力单元对飞行高度 300 m 的目标的杀伤区远界,设火力单元 O, A, B 对于飞行高度 300 m 的目标的杀伤区远界均为 100 km,此时需要进行协同制导决策。

记火力单元 O, A, B 的制导节点分别为 g_o, g_a, g_b , g_{o-m} 表示节点 O 制导导弹, g_{o-t} 表示节点 O 制导导弹时所测量目标参量, g_a 和 g_b 同理,所对应的误差方差见表2。

根据文献[7-8],导弹和目标的距离误差影响较大,经过专家打分,比例权重系数取 $\omega_1 = \omega_4 = 2.0, \omega_2 = \omega_3 = \omega_5 = \omega_6 = 0.15$ 。根据式(1)可求得制导节点 O, A, B 的测量偏差指数分别为 $W_o = 0.8557, W_a = 0.8780, W_b =$

0.9057。可见,火力单元 O, A, B 的制导误差由小到大排序为 $O \rightarrow A \rightarrow B$ 。

表2 测量误差方差表

Table 2 Variance of measuring error

导弹	误差项	制导节点		
		g_{O-m}	g_{A-m}	g_{B-m}
	$\Delta l/m$	19	22	23
	$\Delta \alpha/(\circ)$	0.5	0.4	0.4
	$\Delta \beta/(\circ)$	0.2	0.25	0.3

目标	误差项	制导节点		
		g_{O-t}	g_{A-t}	g_{B-t}
	$\Delta l/m$	22	20	24
	$\Delta \alpha/(\circ)$	0.25	0.35	0.2
	$\Delta \beta/(\circ)$	0.3	0.25	0.3

根据文献[3]可求得制导交接成功概率,为了便于计算,本文将根据前文给出的制导能力强弱和距离远近给出制导交接成功概率,如表3所示。

表3 制导交接成功概率

Table 3 The success probability of relay guidance

交班平台	接班平台		
	g_O	g_A	g_B
g_O	1	0.85	0.88
g_A	0.90	1	0.80
g_B	0.92	0.80	1

在不考虑各节点对目标的杀伤概率的基础上,分别讨论各节点对目标的制导决策。

1) 火力单元 O 发射导弹拦截目标。

当火力单元 O 发射地空导弹拦截目标时,由于目标是反辐射导弹,火力单元 O 发射地空导弹后,需要采用无线电静默的方式规避反辐射导弹。根据上述条件,可选制导通道分别为 $G_1^O = \{g_O - g_A\}$, $G_2^O = \{g_O - g_B\}$, $G_3^O = \{g_O - g_A - g_O\}$, $G_4^O = \{g_O - g_A - g_B\}$, $G_5^O = \{g_O - g_B - g_O\}$, $G_6^O = \{g_O - g_B - g_A\}$ 。根据式(3),6个制导通道的制导能力指数分别为 $E_1^O = 0.9681$, $E_2^O = 0.9716$, $E_3^O = 0.8940$, $E_4^O = 0.7508$, $E_5^O = 0.9461$, $E_6^O = 0.8018$ 。所以,当火力单元 O 发射地空导弹时,制导决策为 $G_2^O = \{g_O - g_B\}$ 。

2) 火力单元 A 发射导弹拦截目标。

当火力单元 A 发射地空导弹拦截目标时,需要采用接力制导的方式拦截反辐射导弹。根据上述条件,可选制导通道分别为 $G_1^A = \{g_A - g_O\}$, $G_2^A = \{g_A - g_B\}$, $G_3^A = \{g_A - g_O - g_A\}$, $G_4^A = \{g_A - g_O - g_B\}$, $G_5^A = \{g_A - g_B - g_A\}$, $G_6^A = \{g_A - g_B - g_O\}$ 。对应的制导能力指数分别为 $E_1^A = 1.0518$, $E_2^A = 0.8833$, $E_3^A = 0.8713$, $E_4^A = 0.8745$, $E_5^A = 0.7289$, $E_6^A = 0.8601$ 。所以火力单元 A 发射地空导弹拦截目标时,制导决策为 $G_1^A = \{g_A - g_O\}$ 。

3) 火力单元 B 发射导弹拦截目标。

当火力单元 B 发射地空导弹拦截目标时,需要采用接力制导的方式拦截反辐射导弹。根据上述条件,可选

制导通道分别为 $G_1^B = \{g_B - g_O\}$, $G_2^B = \{g_B - g_A\}$, $G_3^B = \{g_B - g_O - g_B\}$, $G_4^B = \{g_B - g_O - g_A\}$, $G_5^B = \{g_B - g_A - g_B\}$, $G_6^B = \{g_B - g_A - g_O\}$ 。对应的制导能力指数分别为 $E_1^B = 1.0751$, $E_2^B = 0.9112$, $E_3^B = 0.8939$, $E_4^B = 0.8907$, $E_5^B = 0.7066$, $E_6^B = 0.8414$ 。所以火力单元 B 发射地空导弹拦截目标时,制导决策为 $G_1^B = \{g_B - g_O\}$ 。

根据以上数据还可以看出,接力制导的交接次数越多,制导通道的制导能力指数越小,所以在实际作战中,应尽量选择制导交接次数较少的通道。

5 结束语

本文以地空导弹网络化协同防空为作战背景,对发生接力制导的作战条件和接力制导流程进行了详细阐述。在综合考虑导弹和目标的距离误差、高低角误差、方位角误差以及制导交接成功概率的基础上,构建了制导决策优选模型,并对模型进行仿真验证。结果表明,制导决策优选模型可以选出最优的“协同制导通道”,仿真数据还表明,接力制导的交接次数越多,制导通道的制导能力就越小。

参考文献

- [1] YOUNG B W. Future integrated fire control[C]//The 10th International Command and Control Research and Technology Symposium, 2005:1-20.
- [2] 滕克难.“协同制导通道”基本概念及其应用分析[J]. 现代防御技术, 2013, 41(4): 44-48.
- [3] 黎子芬, 李相民, 代进进, 等. 编队对地攻击网络化制导决策方法[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(6): 18-22.
- [4] SHAFERMAN V, SHIMA T. Cooperative multiple model adaptive guidance for an aircraft defending missile[J]. Journal of Guidance, Control & Dynamics, 2010, 33(6): 1801-1813.
- [5] RATNOO A, SHIMA T. Formation-flying guidance for cooperative radar detection[J]. Journal of Guidance, Control & Dynamics, 2012, 35(6): 1730-1739.
- [6] 刘敬蜀, 姜文志, 代进进, 等. 动态火力接入下要地防空制导决策方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(6): 537-542.
- [7] 娄寿春. 空空导弹武器系统分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 135-139.
- [8] 周志刚. 机载火力控制系统分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 140-184.
- [9] 王道重, 唐金国, 肖玉杰, 等. 编队舰空导弹接力制导研究[J]. 电光与控制, 2018, 25(9): 84-87.
- [10] 代进进, 李相民, 黎子芬. 舰空导弹协同制导交接班形势判断[J]. 飞行力学, 2012, 30(4): 380-384.
- [11] 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, 2011, 29(1): 50-53.