

引用格式:张海峰,韩芳林,潘长鹏.基于DBN的察打一体无人机作战效能评估[J].电光与控制,2019,26(4):77-80,85. ZHANG H F, HAN F L, PAN C P. DBN-based combat effectiveness evaluation of reconnaissance/strike UAV[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4):77-80, 85.

基于DBN的察打一体无人机作战效能评估

张海峰, 韩芳林, 潘长鹏
(海军航空大学, 山东烟台 264001)

摘要:为解决在复杂战场环境下察打一体无人机作战效能的有效评估问题,结合无人机的作战使用过程,分析了影响无人机作战效能的主要因素;运用动态贝叶斯网络方法构建了无人机作战效能的评估模型,并给出了变量属性等级和网络关键参数的计算方法。通过Netica工具对无人机的作战效能进行动态评估仿真,验证了模型的有效性和可行性。动态贝叶斯网络模型为无人机的作战运用和装备研制改进提供了参考依据。

关键词: 无人机; 效能评估; 作战效能; 动态贝叶斯网络; 察打一体

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.015

DBN-Based Combat Effectiveness Evaluation of Reconnaissance/Strike UAV

ZHANG Hai-feng, HAN Fang-lin, PAN Chang-peng
(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: To address the issue of effective evaluation of Reconnaissance/Strike UAV (R/S UAV) combat effectiveness in complex battlefield environment, the main factors affecting the operational efficiency of the UAV are analyzed based on the UAV's operational process. A combat effectiveness evaluation model of R/S UAV is built by using the Dynamic Bayesian Network (DBN) method, and the calculation methods of the variable attribute level and the key parameters are given. The Netica tool is utilized to dynamically evaluate and simulate the combat effectiveness of the UAV, and the validity and feasibility of this model are proved. The model can serve as a reference for the combat operation and equipment development of the UAV.

Key words: UAV; effectiveness evaluation; operational efficiency; DBN; reconnaissance/strike

0 引言

在最近发生的几场局部战争中,察打一体无人机以其无人驾驶、多样灵活、察打结合、性价比高等优点在军事行动中大放异彩。深入研究察打一体无人机的作战效能对其作战使用和装备发展具有较强的现实指导意义。目前,无人机作战效能评估方法有多种,如指数分析法^[1]、ADC法、神经网络法、层次分析法^[2]等,这些方法忽略了评估过程中的不确定性和随机性,局限性很大。动态贝叶斯网络将静态贝叶斯网络结构与时间信息相融合,具有对随机过程的不确定性问题进行完整表达、推导学习和动态评估的能力^[3-6]。为此,本文将基于动态贝叶斯网络技术对无人机作战效能展开评估。

1 贝叶斯网络概述

1.1 静态贝叶斯网络

贝叶斯网络由网络结构和条件概率两部分组成。贝叶斯的网络结构是一个有向无环图,由节点和有向弧组成^[7]。

设给定一个随机变量集 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 其中 X_i 为 m 维向量。贝叶斯网络表述 X 上的联合条件概率分布,定义为 $B = \langle G, P \rangle$, G 为有向无环图,节点分别对应于 X 中的变量,每条弧代表变量间的依赖关系。如果有一条由变量 Y 到 X 的弧,则 Y 是 X 的父节点, X 是 Y 的子节点,没有父节点的节点称为根节点,没有子节点的节点称为叶节点,每个变量与其非子节点相互独立。 P 表示任意节点与其父节点的依赖程度。

贝叶斯网络表示变量集合 X 上的联合条件概率分布算式为

$$p(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n p(X_i | Pa_i) \quad (1)$$

收稿日期:2018-05-07

修回日期:2018-05-29

作者简介:张海峰(1969—),男,河北石家庄人,硕士,副教授,研究方向为海军兵种作战运用和武器系统作战效能建模仿真。

式中, Pa_i 为节点 X_i 的父节点。

1.2 动态贝叶斯网络

动态贝叶斯网络是将静态贝叶斯网络与时间信息相结合而形成的具有处理随机过程数据能力的系统模型,它融合了前后时间片的状态转移概率,考虑到了随机过程的连续性。为方便对无人机系统作战效能进行评估研究,对其做如下假设和处理^[8]。

1) 假设随机过程满足马尔可夫性

$$P(X^{t+1}/X^1, X^2, \dots, X^t) = P(X^{t+1}/X^t) \quad (2)$$

即 $t+1$ 时刻的状态只受 t 时刻的影响。

2) 假设在有限时间范围内,相邻的随机过程稳定。即对任意的 t 时刻,条件概率 $P(X^t/X^{t-1})$ 都是相同的,为一个独立于时间的常量。

基于以上假设,建立一个随机过程在时间轨迹上的动态贝叶斯网络,对任意时刻 $t, X^1, X^2, \dots, X^{t+1}$ 联合概率分布为

$$P(X^1, X^2, \dots, X^{t+1}) = P_{B_0}(X^1) \prod_{i=1}^{t+1} P_{B_{i-1}}(X^{i+1}/X^i) \quad (3)$$

式中: P_{B_0} 为初始状态的概率分布; $P_{B_{i-1}}$ 为 t 时刻到 $t+1$ 时刻的转移概率分布,反映相邻时间片之间的因果关系。

2 基于动态贝叶斯网络的评估模型

运用动态贝叶斯网络进行无人机作战效能评估,一般采用以下步骤:1) 分析影响无人机作战效能评估的因素,确定贝叶斯网络的变量节点以及属性等级;2) 依托变量节点因果关系,构造贝叶斯网络拓扑结构;3) 确定动态贝叶斯网络参数,求得反映变量因果关系的条件概率和转移概率。

2.1 无人机作战效能评估影响因素分析

本文分析考虑无人机在获取目标信息后以规划好的作战任务对目标进行搜索、攻击的情况。无人机根据目标情报描述,对任务区域进行搜索;发现疑似目标后,进行识别、定位和攻击决策;在确认目标属性并接到指令后,对目标实施攻击;完成攻击后返航^[9]。可见,无人机的作战过程是一个动态的演变过程,影响其作战效能的主要因素可以从以下几个方面分析。

1) 生存能力。无人机的作战生存力可定义为“无人机躲避或承受人为敌对环境的能力”,主要取决于无人机的易感性、易损性和可靠度以及对目标的探测、防卫能力。

2) 环境适应能力。无人机在作战过程中不仅要克服自然环境的影响,还要克服复杂的战场电磁环境影响,以确保飞行的可靠性和数据通信的稳定性。

3) 作战能力。无人机系统的作战能力反映设计者赋予武器系统的“本领”,是系统在设计要求范围内工作时,成功完成其任务的概率。依据作战过程分析,其作战任务主要包括搜索识别目标以及对地(海)攻击。

2.2 构建无人机作战效能评估贝叶斯网络模型

根据无人机的系统组成特点和作战过程分析,结合专家的经验知识,可得到影响无人机作战效能的主要因素包括无人机的生存能力、环境适应能力、侦察能力和攻击能力。将因素指标转换成贝叶斯网络的变量节点;依据因素指标之间的依赖关系,确定贝叶斯网络中变量节点的因果关系。由此构建出察打无人机作战效能评估的静态贝叶斯网络模型,将其按时间序列展开可构建动态贝叶斯网络模型^[10],如图 1 所示。

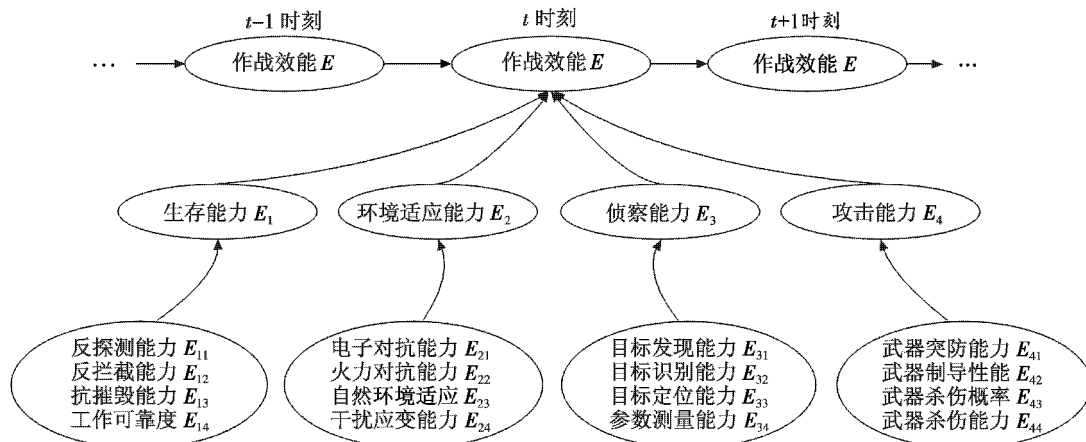


图 1 无人机作战效能评估动态贝叶斯网络模型

Fig.1 DBN model of the UAV combat effectiveness evaluation

2.3 确定变量节点属性等级

假定,邀请无人机研发使用等领域内比较权威的专家 n 人组成无人机作战效能评估专家组。专家组对

无人机作战效能评估的贝叶斯网络变量节点进行属性等级确定^[11], $\{E, E_1, E_2, E_3, E_4\}$ 为 {好, 一般, 差}, 即 {good, general, bad}, 其余变量为 {强, 中, 弱}, 即

{strong, general, weak}。

2.4 隶属度函数

贝叶斯网络模型各变量节点的属性等级都是模糊分类的结果,但输入贝叶斯网络模型的数据是似然概率;这里,使用隶属度来实现观测数据与似然概率之间的转化。假设观测数据 x 是包含 n 个特征的向量,即 $x = (p_1, p_2, \dots, p_n)$,隶属度函数表示为^[12]

$$p_i = \left(1 + \left| \frac{a_i - \bar{a}_i}{M} \right|^E\right)^{-1} \quad p_i \in [0,1] \quad (4)$$

式中: \bar{a}_i 为已知数据的第 i 个特征的平均值; a_i 为第 i 个特征的观测值; M 为常数; E 决定了隶属度函数的形状。

2.5 确定贝叶斯网络的关键参数

确定贝叶斯网络结构和属性等级后,就需要给出贝叶斯网络的概率分布。本文采用专家打分法来确定其概率分布,形成条件概率表(CPT)^[13]。为说明方法,假设变量 A_1 和 A_2 是节点 A_3 的父节点,节点 A_3 的条件概率如表 1 所示。

表 1 节点 A_3 的条件概率表

Table 1 CPT of A_3

A_1	A_2	A_3	
		好	差
好	好	n_{11}/n	n_{12}/n
	差	n_{21}/n	n_{22}/n
差	好	n_{31}/n	n_{32}/n
	差	n_{41}/n	n_{42}/n

表 1 中, n_{ij}/n 表示在 A_1 和 A_2 属性为好(差)的条件下 n 个专家中有 n_{ij} 个专家认为 A_3 的属性为好(差)。以此类推,可以确定贝叶斯网络中其他节点的 CPT。

3 算例仿真分析

假设无人机在获取目标信息后以规划好的作战任务对目标进行搜索、攻击,每个观测节点的证据已经给出,并假设它们相互独立。从无人机抵近任务区域连续观测 6 个时刻,根据不同时刻得到的证据,设定无人机 6 个时刻的观测值,如表 2 所示。

表 2 无人机观测数据

Table 2 Observed data of UAV

时刻	E_{11}	E_{12}	E_{13}	E_{14}	E_{21}	E_{22}	E_{23}	E_{24}
1	(0.96,0.04,0.00)	(0.95,0.05,0.00)	(0.91,0.09,0.00)	(0.97,0.03,0.00)	(0.92,0.08,0.00)	(0.91,0.09,0.00)	(0.97,0.03,0.00)	(0.89,0.11,0.00)
2	(0.85,0.10,0.05)	(0.82,0.08,0.10)	(0.72,0.18,0.10)	(0.86,0.10,0.04)	(0.81,0.10,0.09)	(0.82,0.10,0.08)	(0.83,0.10,0.07)	(0.71,0.19,0.10)
3	(0.76,0.10,0.14)	(0.73,0.10,0.17)	(0.65,0.15,0.20)	(0.75,0.10,0.15)	(0.72,0.10,0.18)	(0.73,0.10,0.17)	(0.71,0.10,0.19)	(0.62,0.10,0.28)
4	(0.62,0.20,0.18)	(0.61,0.19,0.20)	(0.51,0.19,0.30)	(0.63,0.17,0.20)	(0.52,0.20,0.28)	(0.51,0.29,0.20)	(0.63,0.17,0.20)	(0.51,0.19,0.30)
5	(0.51,0.30,0.19)	(0.55,0.25,0.20)	(0.37,0.23,0.40)	(0.59,0.21,0.20)	(0.41,0.30,0.29)	(0.45,0.25,0.30)	(0.56,0.24,0.20)	(0.35,0.25,0.40)
6	(0.39,0.30,0.31)	(0.42,0.28,0.30)	(0.26,0.24,0.50)	(0.52,0.28,0.20)	(0.32,0.30,0.38)	(0.32,0.28,0.40)	(0.49,0.30,0.21)	(0.21,0.29,0.50)

时刻	E_{31}	E_{32}	E_{33}	E_{34}	E_{41}	E_{42}	E_{43}	E_{44}
1	(0.66,0.20,0.14)	(0.63,0.20,0.17)	(0.62,0.20,0.18)	(0.67,0.20,0.13)	(0.61,0.20,0.19)	(0.65,0.20,0.15)	(0.66,0.14,0.20)	(0.62,0.20,0.18)
2	(0.78,0.10,0.12)	(0.72,0.18,0.10)	(0.77,0.10,0.13)	(0.76,0.20,0.04)	(0.75,0.10,0.15)	(0.78,0.10,0.12)	(0.75,0.10,0.15)	(0.72,0.18,0.10)
3	(0.96,0.04,0.00)	(0.92,0.08,0.00)	(0.95,0.05,0.00)	(0.93,0.07,0.00)	(0.92,0.08,0.00)	(0.95,0.05,0.00)	(0.97,0.03,0.00)	(0.92,0.08,0.00)
4	(0.89,0.10,0.01)	(0.87,0.10,0.03)	(0.88,0.10,0.02)	(0.89,0.10,0.01)	(0.85,0.10,0.05)	(0.88,0.10,0.02)	(0.89,0.10,0.01)	(0.86,0.10,0.04)
5	(0.85,0.10,0.05)	(0.82,0.10,0.08)	(0.83,0.10,0.07)	(0.82,0.08,0.10)	(0.78,0.12,0.10)	(0.81,0.09,0.10)	(0.85,0.05,0.10)	(0.82,0.10,0.08)
6	(0.79,0.10,0.11)	(0.75,0.10,0.15)	(0.76,0.10,0.14)	(0.78,0.10,0.12)	(0.65,0.20,0.15)	(0.72,0.20,0.08)	(0.79,0.11,0.10)	(0.77,0.10,0.13)

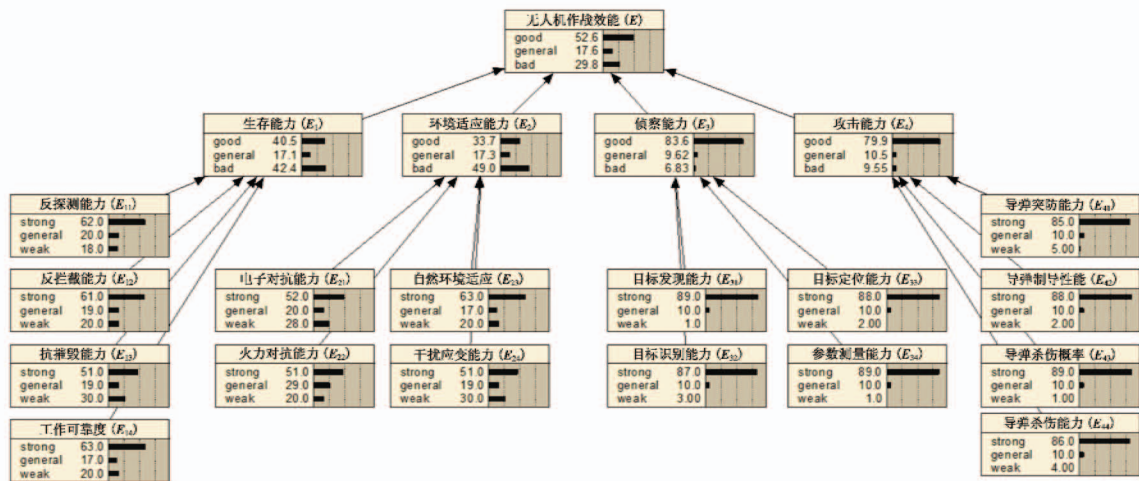


图 2 时刻 4 的动态贝叶斯网络推理结果

Fig. 2 Reasoning results of DBN at Moment 4

本文采用基于决策理论的、图形化的建模开发工具 进行仿真。根据 2.5 节方法给出各节点的条件概率表,

利用 Netica 构建并初始化无人机作战效能评估动态贝叶斯网络模型;以时刻4为例,其动态贝叶斯网络推理

结果如图2所示。将表2数据输入到 Netica 构建的动态贝叶斯网络中,得到不同时刻的推理结果如表3所示。

表3 不同时刻的动态贝叶斯网络推理结果

Table 3 Reasoning results of DBN at different moments

时刻	E_1			E_2			E_3			E_4			E		
	好	一般	差	好	一般	差	好	一般	差	好	一般	差	好	一般	差
1	94.4	4.00	1.62	91.3	6.05	2.70	45.9	17.2	37.0	44.0	17.8	38.1	27.2	14.6	58.2
2	73.8	11.7	14.5	69.0	12.5	18.5	61.3	12.7	26.1	59.1	13.2	27.7	38.3	14.2	47.5
3	56.8	14.3	28.9	49.9	13.6	36.4	93.4	4.83	1.77	91.9	5.98	2.13	71.4	13.0	15.7
4	40.5	17.1	42.4	33.7	17.3	49.0	83.6	9.62	6.83	79.9	10.5	9.55	52.6	17.6	29.8
5	33.3	18.7	48.0	25.4	19.2	55.4	73.1	11.2	15.6	66.4	12.1	21.5	37.2	17.3	45.5
6	22.5	17.3	60.1	17.1	17.8	65.1	60.9	12.4	26.7	54.7	17.6	27.7	24.6	16.6	58.8

无人机各变量(生存能力、环境适应能力、侦察和攻击能力)及作战效能变化趋势如图3、图4所示。

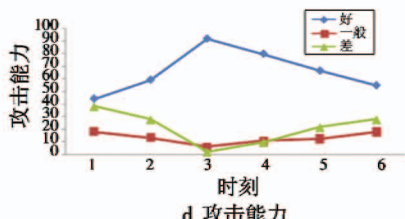
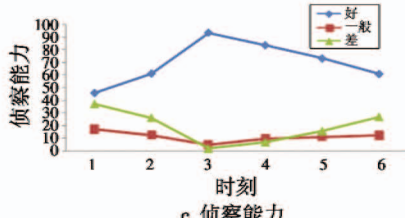
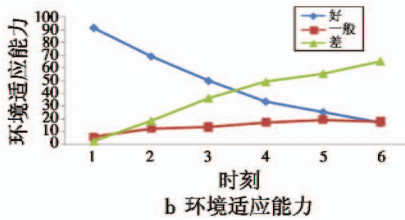
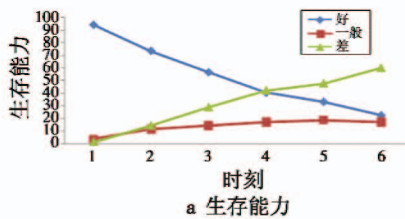


图3 无人机各变量变化趋势图
Fig.3 Change trend of UAV variables

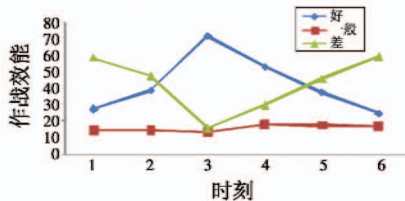


图4 无人机作战效能变化趋势图
Fig.4 Change trend of UAV combat effectiveness

仿真结果表明:1)无人机的生存能力和环境适应

能力随着时间的持续在不断下降,主要是因为无人机的被探测概率逐渐增加、工作可靠性下降、电磁环境和自然环境趋向复杂等;2)随着接敌距离的减小,无人机的侦察能力和攻击能力在逐步提高,但是随着侦察设备和武器系统的性能限制,在达到一定值后趋向缓慢降低;3)无人机侦察能力和攻击能力对无人机作战效能影响最大,但是生存能力和环境适应能力随着作战过程的变化对无人机作战效能也发挥了重要影响。

4 结束语

本文结合察打无人机作战使用过程,分析了影响无人机作战效能的主要因素;针对无人机在作战过程中战场环境复杂、生存能力和环境适应能力存在不确定性、各项指标难以定量分析的问题,利用动态贝叶斯网络能够充分运用领域知识和样本数据对时变随机过程进行有效描述推理,以及处理不确定性问题的优势,建立了无人机作战效能评估的动态贝叶斯网络模型。利用 Netica 工具进行算例仿真,验证了模型的可行性,为察打无人机的作战运用和装备研制改进提供了参考依据。

参考文献

- [1] 屈高敏,董彦非,岳源. 地对攻击型无人机作战效能评估[J]. 火力与指挥控制,2016,41(4):145-149.
- [2] 杨勇,吴洋. 基于灰色层次分析法的察打型无人机作战能力评估[J]. 舰船电子工程,2014,34(7):134-137,176.
- [3] 佟守愚,庞世春,杨吉,等. 贝叶斯网络在军事作战中的应用现状及展望[J]. 指挥控制与仿真,2010,32(5):1-4.
- [4] 陈固胜. 基于动态贝叶斯网络的战场信息预测与评估[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- [5] LAITILA P. Bayesian network model for BDA[R]. Espoo:Helsinki University of Technology, 2009.
- [6] 马志军,吉玉洁. 基于贝叶斯网络的舰艇对空作战训练效果评估研究[J]. 舰船电子工程,2016,36(6):28-32.

(下转第85页)

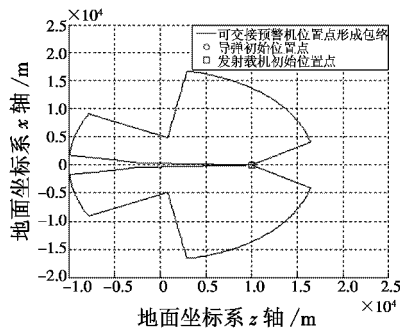


图9 协同制导交接区4

Fig.9 Cooperative guidance handover area 4

对比图7、图8,图9几乎为二者交集。协同制导交接区同时受到预警机制导角度与导弹接收天线角度影响,随其减小而减小。

5 结论

本文以基于预警机中制导的中远距空空导弹为研究对象,采用比例导引律研究了影响协同制导交接区的限制因素,仿真表明:

- 1) 采用黄金分割法能够较为精确地求解出协同制导交接区,可用于不同交接条件下协同制导交接区的求解;
- 2) 协同制导交接区的边界与发射载机、预警机、导弹及目标的自身运动状态有关;
- 3) 在某一确定态势下,制导交接区与预警机制导天线波束宽度及导弹接收天线波束宽度呈正相关关系——在某一范围内,预警机制导角度与导弹接收天

线角度越大,则制导交接区域越大。

参考文献

(上接第80页)

- [7] 厉海涛,金光,周经伦,等. 贝叶斯网络推理算法综述[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(5):935-939.
- [8] 肖秦琨,高嵩,高晓光. 动态贝叶斯网络推理学习理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [9] 徐冠华,董彦非,岳源,等. 基于察打任务的无人机作战效能评估[J]. 火力与指挥控制,2016,41(7):60-64.
- [10] 罗光,贺平. 基于动态贝叶斯网的野战防空演练效果评估研究[J]. 四川兵工学报,2014,35(7):134-138.
- [11] 卞泓斐,杨根源. 基于动态贝叶斯网络的舰艇防空作战威胁评估研究[J]. 兵工自动化,2015,34(5):14-19.
- [12] 刘春生,王斌,卢义成. 基于Netica的机载雷达侦察效能评估[J]. 现代雷达,2017,39(3):8-12.
- [13] 李瀛,王永攀,周一蛟,等. 基于贝叶斯网络的防空预警监视系统作战效能评估[J]. 舰船电子对抗,2015,38(6):70-74.
- [1] 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.
- [2] 肖冰松,方洋旺,许蕴山,等. 双机协作发射与制导中程空空导弹技术研究[J]. 电光与控制,2011,18(2):13-17.
- [3] 付昭旺,丁雷. 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.
- [4] 刁兴华,方洋旺,张磊,等. 中远程空空导弹多机协同制导交接方法[J]. 国防科技大学学报,2014,36(3):77-82.
- [5] 张平,方洋旺,乔治军,等. 超视距空空导弹协同允许发射区解算方法[J]. 电光与控制,2012,19(3):12-16.
- [6] 樊会涛. 空空导弹方案设计原理[M]. 北京:航空工业出版社,2013.
- [7] 李海军,陈育良,姜涛,等. 航空导弹飞行与发射控制[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
- [8] 刁兴华,方洋旺,伍友利,等. 双机编队空空导弹协同发射区模拟仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报,2014,40(3):370-376.
- [9] 吕振瑞,任宏光,王涛. 直升机载空空导弹射后截获误差源研究[J]. 弹箭与制导学报,2017,37(1):169-172.
- [10] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社,2005.