

无人机对地多目标攻击决策研究

王庆江, 彭军, 曾儒伟, 徐学文, 倪保航, 单鑫

(海军航空工程学院接改装训练大队, 山东烟台 264001)

摘要: 攻击决策是无人机对地攻击的重要内容之一,它包括火力分配(武器选择、武器分配)和目标决策(目标选择、目标排序)。在得到目标、载机、武器信息的前提下,通过动态贝叶斯网络推理模型,选择出用于进行攻击的武器类型;以 Monte Carlo 仿真结果为基础,完成攻击时的武器分配。以上两步结果为前提,通过构造相应表格并对此表进行查询,完成了目标选择和目标排序。仿真结果验证了此多目标攻击决策法的合理性和有效性。

关键词: 无人机; 多目标攻击; 动态贝叶斯网络; Monte Carlo; 激光制导武器

中图分类号: V279; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)11-0057-05

Decision-Making of UAVs for Air-to-Ground Multi-Target Attacking

WANG Qing-jiang, PENG Jun, ZENG Ru-wei, XU Xue-wen, NI Bao-hang, SHAN Xin

(Brigade of Equipment Receiving & Training, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Attack decision-making is very important for UAVs in air-to-ground attacking, which consists of weapon-target assignment (including weapon selection and weapon allocation) and target decision-making (including target selecting and target sequencing). Based on the information of targets, carrier-aircraft, and weapons, the types of weapon were selected through Dynamic Bayesian Networks (DBN) and its inference model. Then, weapon assignment was implemented based on the Monte Carlo simulation results. According to the results obtained through the steps before, target selecting and target sequencing were accomplished. Simulation was made and the result verified the rationality and validity of the decision-making method for multi-target attacking.

Key words: UAV; multi-target attacking; dynamic Bayesian network; Monte Carlo; laser guided weapon

0 引言

在军事领域中,无人机不但执行战场侦察和监控等“传统”任务^[1],还执行对地攻击任务。目前,应用于实战的无人对地攻击机是美军的 MQ-9(又称 MQ-1B, RQ-1B)“捕食者”^[2],美军最初为“捕食者”挂载的武器是“海尔法”导弹,2003年美军决定为其配备“联合直接攻击弹药”(JDAM)。随着新型无人机及其配套武器的发展,无人机携带的武器类型及需要完成的作战任务将越来越多,并涉及到相关的理论领域^[3-4]。

目前国内对“无人机在战场中应用”这个议题多集中于理论研究阶段,无人机对地攻击时的攻击决策主要集中在目标选择、攻击次序、任务分配^[5-9]等领

域,对攻击过程中使用的武器只是假设为某种导弹,而且没有考虑无人机挂载多种制导武器执行对地攻击任务。

实战中,无人机使用的武器通常是精确制导武器。考虑到未来的发展和无人机自身特点,本文假设无人机挂载可控、无动力的激光制导炸弹(简称炸弹)和可控、有动力的激光制导导弹(简称导弹)两种武器执行对地攻击任务,并对攻击前的目标选择与排序、武器选择分配等问题进行了研究,从而在理论上为“无人机携带多种武器执行对地攻击任务”的攻击决策提供了一种新的解决方案。

1 贝叶斯网络

1.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络^[10-12](Bayesian Networks, BN)是以概率论及图论为理论基础,利用历史数据和当前观察到

的数据来估计网络中其他变量状态的一种方法,它特别适用于处理不确定性问题。在贝叶斯网络理论中用到的主要概率论公式有链规则、贝叶斯公式等,用到的概念主要有父节点与子节点、条件概率分布表(CPT)、d分离等。

1.2 动态贝叶斯网络

BN 是描述某一时刻事件变量集合之间因果关系的一种方法,而动态贝叶斯网络^[12-14](Dynamic Bayesian Networks, DBN)则是对 BN 的一种扩展:DBN 是描述事件变量集沿时间轴变化的一种方法。DBN 示意如图 1 所示。

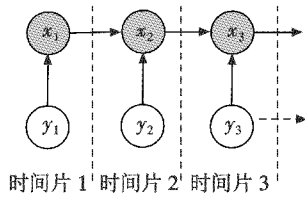


图 1 DBN 示意图

Fig. 1 Diagram of DBN

对于 DBN 来说,它的某一个时间片实际上是指对事件变量集的某一次观察,例如,时间片 1、2、3 就是指对事件变量集所构成的 BN 的第 1 次、第 2 次、第 3 次观察,因此,对于 DBN 来说,它的某一个时间片内的 BN 可以看成 BN,由此,BN 中的相关定义及结论,原则上在 DBN 中都可以使用。在 DBN 中,其变量集中有些变量的状态可以通过观察得到(这被称为证据出现),这样的变量就叫作观测节点,它用字母 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$ 表示;同理,变量集中其他变量的状态不是通过观测而是通过 BN 推理得到,这样的变量就叫作隐藏节点,它用字母 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 表示。

对于 DBN,当证据出现时令人感兴趣的是隐藏节点处于某种状态的概率。由图 1 可知:在时间片 1 内隐藏节点 x_1 的状态分布只与 DBN 的网络结构、 x_1 与 y_1 间 CPT、节点 y_1 的证据有关;在时间片 2 内隐藏节点 x_2 的状态分布除了与 DBN 的网络结构、 x_2 与 y_2 间的 CPT、观测节点 y_1 和 y_2 的证据有关外,还与 x_1 与 x_2 间的 CPT 有关。下面推导各时间片内隐藏节点 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 状态分布的计算公式。

设某个 DBN 由 m 个观测节点 $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_m)$ 、 n 个隐藏节点 $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 组成并且时间片为 T 个。一般情况下任意一个观测节点都是多态分布,因此当时间片为 T 时,由 BN 相关知识及公式,可得观测节点表示为(同理,一般情况下任意一个隐藏节点 x 的状态也有类似的表述)

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_m) = ((y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1a}), (y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2b}), \dots, (y_{m1}, y_{m2}, y_{m3}, \dots, y_{mz})) = ((y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11a}), (y_{121}, y_{122},$$

$$\dots, y_{12b}), \dots, (y_{1m1}, y_{1m2}, y_{1m3}, \dots, y_{1mz})) \quad (\text{时间片 } 1) \\ \dots, y_{ijk}, \dots, \quad (\text{时间片 } i) \\ (\dots, (y_{im1}, y_{im2}, \dots, y_{imz})) \quad (\text{时间片 } t) \quad (1)$$

假设通过观察,已知观测节点的状态,即证据出现,那么在此观测节点的状态分布下,由式(1)可知隐藏节点 x 处于某种状态分布的概率分布为

$$P(x|y) = P([(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}), \dots, (x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tm})] | [y_{111}, \dots, y_{tzm}]) \quad (2)$$

式中,如果第 s 个节点有 ss 种状态的话, x_{is} 表示在时间片 i 内第 s 个节点处于状态 $p(p \in (1, 2, \dots, ss))$ 的一种省略写法,由概率论的定义,式(2)可改写为

$$P(x|y) = \sum_{k \in ((1,2,\dots,a) \cup \dots, (1,2,\dots,s))} [P((x_{11}, \dots, x_{is}, \dots, x_{tn}) | (y_{111}, \dots, y_{ijk}, \dots, y_{tzm})) \times P(y_{ijk})] = \sum_{i=1}^k [P((x_{11}, \dots, x_{is}, \dots, x_{tn}) | (y_{111}, \dots, y_{ijk}, \dots, y_{tzm})) \times P(y_{ijk})] \quad (3)$$

对式(3)进行变形,结合 BN 中的 d 分离假设,就得到隐藏节点在某个时间片内处于某种状态的分布概率为

$$P(x|y) = P([(x_{11}, \dots, x_{1n}), \dots, x_{is}, \dots, (x_{t1}, \dots, x_{tm})] | [y_{111}, \dots, y_{ijk}, \dots, y_{tzm}]) = \sum_{k \in ((1,2,\dots,a) \cup \dots, (1,2,\dots,s))} \left\{ \frac{\prod_{i=1}^n P(x_{i1} | P_{i1}(x_{i1})) \times \prod_{j=1}^m P(x_{ij} | P_{ij}(x_{ij}))}{\sum_{u=1}^a [\prod_{i=1}^n P(x_{i1} | P_{i1}(x_{i1})) \times \prod_{j=1}^m P(x_{ij} | P_{ij}(x_{ij}))]} \times P(y_{ijk}) \right\} \quad (4)$$

2 对地攻击决策

2.1 决策流程

无人机对地攻击时攻击决策的任务实际上就是解决 4 个问题:武器选择、武器分配、目标选择、目标排序,如图 2 所示。

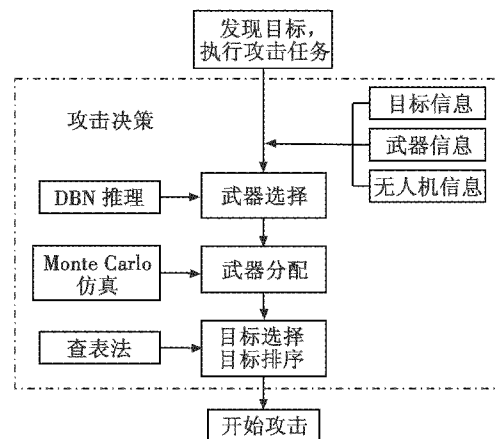


图 2 攻击决策示意图

Fig. 2 Block diagram of attack decision-making

对地攻击决策的输入量是目标特性参数、无人机特性参数、武器特性参数;其输出量是对被攻击目标群的决策结果,即武器类型、武器数量、选择的目標、目标被攻击的顺序。根据系统模块化思想,将攻击决策按

照功能分成 3 个步骤：

1) 基于 DBN 的武器使用概率的确定,对于任意一个目标,通过 DBN 推理,得到使用炸弹或导弹对其进行攻击时的使用概率,从而完成武器选择;

2) 基于 Monte Carlo 仿真法^[15]确定所需武器数量,通过 Monte Carlo 仿真法求出分别使用炸弹^[16]和导弹^[15]对目标进行攻击时所需武器数量,从而完成武器分配;

3) 基于查表法的攻击决策,分别以炸弹和导弹为列、以所有目标为行,将步骤 1) 中得到的数据填入相应的位置从而得到一张表,通过一定的规则进行查表并对结果做进一步处理,就可以得到对目标进行攻击时的攻击顺序、所用武器类型及其数量,从而完成目标选择和目标排序。

2.2 BN 的建立

2.2.1 基于 DBN 的武器使用概率

武器使用概率的作用是确定炸弹和导弹的使用概率,也就是选择武器的类型。

使用基于 DBN 的武器使用概率进行武器类型选择时,首先要确定 DBN 的输入参数。

DBN 的第 1 个特征参数为目标与无人机之间的距离 d^{UAV} (单位为 m)。当无人机飞行路径确定时,无人机与被攻击目标间的距离在一定程度上决定了目标的被攻击顺序。根据炸弹和导弹的特性可知,只有目标在其攻击区内,才能对目标攻击。

DBN 的第 2 个特征参数为目标的速度 V^{con} (单位为 m/s)。考虑到对目标攻击过程需要耗费一定时间,如果目标具有机动能力,在其还没有被攻击前可能逃逸或隐藏,因此对机动目标应该优先打击。当目标的运动速度较大时,根据武器的特性可知,使用炸弹不合适,应使用导弹。

DBN 的第 3 个特征参数为目标间的相对距离属性 C_k (C_k 为第 k 个目标与距离其最近的目标之间的相对距离属性, $C_k \in [0, 1]$)。显然,对于同一件武器,在同样散布分布的情况下,一枚武器对集群目标的杀伤效能要优于对稀疏目标的杀伤效能。此外,目标距离较近时,有利于无人机对下一个目标进行攻击。设 n 个目标的位置已知,并假设第 k 个目标与距离其最近的第 h 个目标之间的距离为 C_{kh}^{aim} (单位为 m),在所有任意两目标间的距离中,最大距离为 D_{max}^{aim} ,由此目标的相对距离属性 C_k^h 为

$$C_k = \frac{D_{kh}^{aim}}{D_{max}^{aim}} \quad (5)$$

DBN 的输入参数确定后,接下来要确定 DBN 的结构。由上述可知:DBN 的输入参数为 d^{UAV} , V^{con} 和 C_k ,这也是它的观测节点;无人机可以使用的武器为炸弹

(简称 B)和导弹(简称 M),这也是它的隐藏节点。设目标共有 N 个,那么对于时间片 T ,某个目标 N_x ($N_x \in (1, 2, \dots, N)$) 的 DBN 结构如图 3 所示。

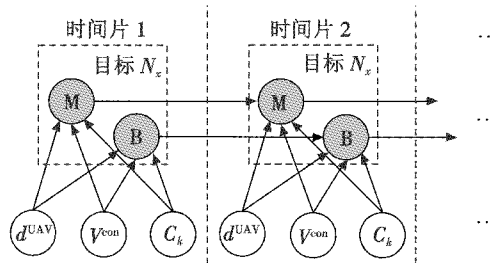


图 3 DBN 的结构图

Fig. 3 Structure of DBN

DBN 的观察节点和隐藏节点确定后,还要对其状态进行离散化,并对各节点进行概率分配。概率分配分为两种情况:对于隐藏节点,给出它的先验概率;对于观测节点,给出它的条件概率。概率的确定可以通过对大量的试验数据或相关的历史数据进行统计后得出,也可以由相关专家根据经验直接给出。DBN 的“ x_{n+1} 与 x_n 间 CPT”是反映相邻两时间片之间隐藏节点间关系的参数,来源与上述相同。

得到 DBN 的先验概率、相应的 CPT、观察节点的观察值及 DBN 结构图后,就可以通过 2 节所示公式来计算 DBN 中隐藏节点处于某种状态的概率。

2.2.2 确定所需武器数量

确定所需武器数量是通过 Monte Carlo 仿真法来实现^[15]。Monte Carlo 仿真法的过程简述如下:1) 建立目标的毁伤模型,并指定对目标的要求毁伤概率 P_{n-kill} ;2) 使用 Monte Carlo 法,通过多次仿真求得单枚武器对此目标的杀伤概率 P_{kill} ;3) 通过

$$m = \begin{cases} 1 & P_{kill} \geq P_{n-kill} \\ \text{int} \left[\frac{\ln(1 - P_{n-kill})}{\ln(1 - P_{kill})} \right] & P_{kill} < P_{n-kill} \end{cases} \quad (6)$$

来确定所需武器的数量 m 。建立一个表,以目标为列、分别以炸弹和导弹为行,在中间相应位置填入武器数量,就可以得到一个“目标—所需武器数量对应表 (Target-Amount of Weapons Table, TAWT)”。

2.2.3 基于查表法的决策

本步骤的作用是确定哪些是被攻击目标、对其攻击顺序、使用武器类型,它的工作过程实质上是建立一个二维表格并对此表格进行查表的过程,过程如下所述。

1) 将所有的目标作为行,在每个时间片内以炸弹和导弹为列建立目标—武器对照表 (Target-Weapon Table, TWT)。

2) 对于每个目标,将 2.2.1 节中得到的使用炸弹或导弹的概率值填入 TWT 的相应格中。

3) 在 TWT 内所有的格中,找出数值最大的一个格,此格所在列对应的目标就是被选定的、最先被攻击的目标,设其为 T_i ,此格所在行对应的武器就是攻击 T_i 的最佳武器。当两个目标的概率值相同时,依次以 d^{UAV}, V^{con}, C_k 为标准进行判断。若还不能判断出,则随机排序。根据 T_i 及其所使用的最佳武器对 2.2.2 节确定的 TAWT 进行查表,就可以得到 T_i 所需此种武器的数量。这样,被选择的目标、目标被攻击的顺序、使用的武器类型、所需此种武器的数量都已确定。将 TWT 中 T_i 所在列的内容全部清零,表示 T_i 已排序和选择完毕。

4) 根据与 T_i 所对应的最佳武器的数量,将无人机相应武器的数量减少,直到为零。当使用的武器达不到所需数量要求时,表明无人机已无能力攻击此目标,将此目标放弃。

5) 当所有武器的剩余量为零或目标都排序完毕时,对目标的排序及武器分配工作结束。反之转到 3),对 TWT 表中剩余目标继续进行目标选择与排序,并确定最佳武器的类型和数量。

3 仿真算例

3.1 仿真算例

设无人机载有 3 枚炸弹和 3 枚导弹对 5 个目标进行攻击,在 3 个时间片内的观测值如表 1 所示。在观测过程中,无人机、目标 c、d 都在做匀速直线运动,它们的运动方向都与坐标系的 X 轴同方向。目标 a、b、e 为固定目标。

表 1 3 个时间片内的观测值

Table 1 Observation value in three time slices

		时间片 1	时间片 2	时间片 3
无人 机	位置/m	1000,4000,16000	6000,4000,16000	11000,4000,16000
	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	100	100	100
	偏航角/ $(^\circ)$ 、 俯仰角/ $(^\circ)$	0,0	0,0	0,0
	目标 a	位置/m	20000,0,16000	20000,0,16000
	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	0,0,0	0,0,0	0,0,0
目标 b	位置/m	19000,0,15000	19000,0,15000	19000,0,15000
	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	0,0,0	0,0,0	0,0,0
目标 c	位置/m	21000,0,15000	21500,0,15000	22000,0,15000
	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	10,0,0	10,0,0	10,0,0
目标 d	位置/m	20500,0,16500	21000,0,16500	21500,0,16500
	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	10,0,0	10,0,0	10,0,0
目标 e	位置/m	19500,0,16500	19500,0,16500	19500,0,16500
	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	0,0,0	0,0,0	0,0,0

使用 2 节所述的方法进行攻击决策。

首先,确定每个目标分别使用炸弹或导弹的概率。

根据公式和相关信息可以得到在 3 个时间片内 5 个目标分别使用炸弹和导弹的概率(见表 2)。表 2 实际上就是 TWT。

表 2 武器的使用概率

Table 2 Usage probability of the weapon

	时间片 1		时间片 2		时间片 3	
	炸弹	导弹	炸弹	导弹	炸弹	导弹
目标 a	0.0	0.0	0.0	0.3215	0.3421	0.3942
目标 b	0.0	0.0	0.0	0.3924	0.4215	0.4512
目标 c	0.0	0.0	0.0	0.4276	0.0	0.4813
目标 d	0.0	0.0	0.0	0.5124	0.0	0.5312
目标 e	0.0	0.0	0.0	0.3527	0.4122	0.4421

接着,使用 Monte Carlo 仿真法,针对某个目标来确定使用武器的数量(见表 3)。表 3 实际上就是 TAWT。

表 3 武器数量的确定

Table 3 Determination of weapon's quantity

	目标 a	目标 b	目标 c	目标 d	目标 e
炸弹	2	1	1	1	1
导弹	3	1	1	1	1

最后,根据前两部分的结果,使用查表法来完成对地攻击时的攻击决策,其结果见表 4(表中“×”表示由于超出此项的取值范围或者不满足此项的使用条件而不能得到一个正确的值)。根据表 4 的决策结果对目标进行攻击,其仿真结果见图 4(图中无人机的飞行轨迹为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots$)。

表 4 目标的被攻击顺序、所用武器的类型及数量

Table 4 Target sequencing, weapon type and weapon quantity

	时间片 1			时间片 2			时间片 3		
	顺序	炸弹	导弹	顺序	炸弹	导弹	顺序	炸弹	导弹
目标 a	×	×	×	×	×	×	×	×	×
目标 b	×	×	×	3	×	1	3	1	×
目标 c	×	×	×	2	×	1	2	×	1
目标 d	×	×	×	1	×	1	1	×	1
目标 e	×	×	×	×	×	×	4	1	×

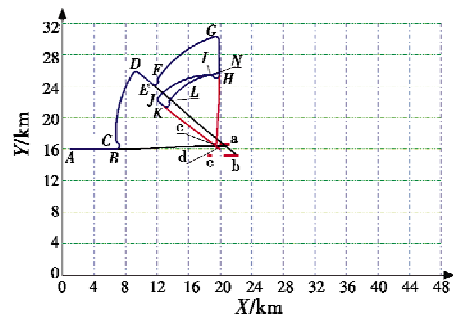


图 4 无人机对地攻击的仿真结果

Fig. 4 Simulation of air-to-ground attack by UAV

3.2 仿真结果说明

在时间片 1,由表 1 的“时间片 1”栏可知,此时无人机与 5 个目标的直线距离都大于 16000 m,它显然超出了炸弹和导弹最大攻击距离的要求,从而使两种武

器都不可用。因此,这时炸弹或导弹的使用概率都为零(见表 2 中“时间片 1”栏所示),也谈不上对目标的被攻击顺序(见表 4 的“时间片 1”栏所示)。这时的仿真结果与实际情况相符。

在时间片 2,由表 1 的“时间片 2”栏可知,此时无人机与 5 个目标的直线距离大约在 11000 ~ 16000 m 之间,它超出了炸弹的最大攻击距离,但满足导弹最大攻击距离的约束。此时只能使用导弹对目标进行攻击。因为目标 d、c 是运动目标,且目标 d 与无人机及目标 a 的距离较目标 c 近,因此应该选择并攻击目标 d,然后是目标 c,两目标的武器使用概率见表 2 中“时间片 2”栏所示。对于目标 d、c,它们各需要一枚导弹,如表 3 所示。对目标 d、c 排完序、分配完武器并确定武器数量后,还有一枚导弹可以用。由于目标 b 距无人机较近,因此第 3 个被攻击目标为目标 b。接下来的被攻击顺序为目标 e 和目标 a,但此时已无武器可以使用,因此目标 e 和目标 a 不被攻击。这时的仿真结果(见表 4 的“时间片 2”栏所示)与实际情况也相符。

在时间片 3,由表 1 的“时间片 3”栏可知,此时无人机与 5 个目标的直线距离都大约在 3000 ~ 11000 m 之间,它同时满足导弹与炸弹最大攻击距离约束,因此炸弹和导弹都可以用来对目标进行攻击。此时 5 个目标被攻击顺序及原因同时间片 2,仿真结果见表 2 中“时间片 3”栏所示。目标 d、c 各需要一枚导弹,目标 b、e 各需要 1 枚炸弹,如表 3 所示。最后被攻击的目标为目标 a,它需要 2 枚炸弹或 3 枚导弹,但此时只有 1 枚导弹和 1 枚炸弹,因此无人机放弃对它的攻击,这时分析的结果与仿真结果(见表 4 的“时间片 3”栏所示)也一致。

4 结束语

本文研究了无人机对地多目标攻击时的决策过程。在决策过程中,不但考虑了对多个目标进行排序的问题,还提出了用多种武器进行攻击时的武器选择、武器数量确定的问题,这种设想比较符合实际,而且目前对其进行的研究较少,因此文中的研究结果比较有现实意义。

文中所述决策过程的重点是 DBN,而 DBN 的核心是其结构和 CPT。考虑到 DBN 的结构和 CPT 与其特征参数和先验知识有关,这决定了本文所提决策方法的准确性依赖于专家经验,也对此种决策方法的应用产生了一定的限制。

参考文献

[1] 宋朱刚,蒋盘林. 高空长航时无人机在情报侦察中的

军事应用与关键技术[J]. 通信对抗,2010,3(3):52-55.

SONG Z G, JIANG P L. Military applications of altitude long endurance UAVs to intelligence reconnaissance and its key technologies [J]. Communication Countermeasures, 2010, 3(3):52-55.

[2] 周义. 伊拉克战争凸现“捕食者”无人机的应用与发展[J]. 国防科技,2003,24(10):12-16.

ZHOU Y. Application and development of “Predator” in the iraqi war [J]. National Defense Science & Technology, 2003, 24(10):12-16.

[3] SCHUMACHER C, CHANDLER P, PACTER M, et al. UAV task assignment with timing constraints (A0343246) [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit Austin, Texas, 2003, doi: 10. 2514/6. 2003-5664.

[4] BEARD R W, MCLAIN T W, GOODRICH M A, et al. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles [C]//IEEE Transaction on robotics and automation, 2002, 18(6):911-922.

[5] 潘莉,周德云,汪凌霄. UCAV 对地多目标序次攻击决策研究[J]. 计算机仿真,2010,27(12):51-54.

PAN L, ZHOU D Y, WANG L X. Research on air-to-ground multi-target sequential attack decision for unmanned combat air vehicle [J]. Simulation of Computer, 2010, 27(12):51-54.

[6] 鲁华,周德云. 基于灰色群体决策的对地多目标攻击研究[J]. 计算机仿真,2010,27(8):44-47.

LU H, ZHOU D Y. Research on group decision-making of grey analytical method based of air-to-ground multi-target combat [J]. Simulation of Computer, 2010, 27(8):44-47.

[7] 周小程,严建钢,谢宇鹏,等. 多无人机对地攻击任务分配算法[J]. 海军航空工程学院学报,2012,27(3):308-312.

ZHOU X C, YAN J G, XIE Y P, et al. Task distributed algorithmic for multi-UAV based on auction mechanism [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(3):308-312.

[8] 张安,史志富,刘海燕,等. 基于贝叶斯优化算法的UCAV 编队对地攻击协同任务分配[J]. 电光与控制,2009,16(1):1-5.

ZHANG A, SHI Z F, LIU H Y, et al. Cooperative task allocation for UAV air-to-ground combat based on Bayesian optimization algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(1):1-5.

[9] 陈攀,姜长生. 基于多专家权重的空对地多目标攻击决策[J]. 电光与控制,2011,18(7):18-21.

(下转第 74 页)

以及状态监测等均已实现。目前,该电源管理系统已经随机载核心处理平台通过了高低温、振动冲击、电磁兼容、供电特性等试验,后续将继续进行耐久振动、可靠性强化等工程化验证,加强其应用前景。

参 考 文 献

- [1] 牛文生. 综合化航空电子系统对软件开发技术的挑战[J]. 航空计算技术, 2008, 38(1): 1-6.
NIU W S. The challenges for software development in integrated modular avionics [J]. Aeronautical Computing Technique, 2008, 38(1): 1-6.
- [2] 张华. 基于机载处理机的智能供电系统[J]. 计算机工程, 2008, 34(s1): 169-174.
ZHANG H. Smart power system based on aircraft processor[J]. Computer Engineering, 2008, 34(s1): 169-174.
- [3] 霍峰, 戴小氏, 田丹. 综合化航电智能电源控制软件设计与实现[J]. 航空计算技术, 2011, 41(5): 91-94.
HUO F, DAI X D, TIAN D. Design and realization of intelligent power supply software in integrated modular avionics [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(5): 91-94.
- [4] 何亮. 机载火控雷达分布式电源系统研究[J]. 现代雷达, 2005, 27(8): 74-76.
HE L. Research on distributed supply of airborne fire control radar[J]. Modern Radar, 2005, 27(8): 74-76.
- [5] 陈森, 魏华, 徐正喜. 一种控制装置电源短路 FMEA 分析及其解决办法[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(6): 124-127.
CHEN M, WEI H, XU Z X. A FMEA analysis and solutions of short circuit power control device [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(6): 124-127.
- [6] 魏曙光, 马晓军, 闫之峰, 等. 基于 DSP 的坦克电源管理系统设计与实现[J]. 仪表技术, 2008(8): 65-67.
WEI S G, MA X J, YAN Z F, et al. Design and realization of tank power management system based on DSP [J]. Instrumental Technique, 2008(8): 65-67.
- [7] ASAAC Standards ; Part 1-proposed standards for common functional modules[S]. London: UK Defense Standardization, 2005.
- [8] 孟颖悟. 新型机载计算机电源架构的研究[J]. 航空计算技术, 2007, 37(5): 63-65.
MENG Y W. Research on power architecture for next generation airborne computer [J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(5): 63-65.
- [9] 郑耀添. 并联均流技术在高频开关电源中的应用研究[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(6): 169-171.
ZHENG Y T. Study of parallel current sharing for high power switch supply [J]. Microelectronics and Computer, 2006, 23(6): 169-171.
- [10] 古志强, 张才清. 固态雷达发射机多路电源的并联均流设计[J]. 现代雷达, 2007, 29(4): 89-92.
GU Z Q, ZHANG C Q. Current sharing paralleling design of power supplies for solid radar transmitter [J]. Modern Radar, 2007, 29(4): 89-92.
- [11] (上接第 61 页)
CHEN Z, JIANG C S. Decision-making for air to surface multi-target attacking based on multi-expert weights [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(7): 18-21.
- [10] CALLAN R. 人工智能[M]. 黄厚宽, 田盛丰, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 84-124.
CALLAN R. Artificial intelligence [M]. Translated by HUANG H K, TIAN S F. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 84-124.
- [11] WANG Q, GAO X G, CHEN D Q. Pattern recognition for ship based on Bayesian networks [C]//4th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007, 4: 684-688.
- [12] 肖秦琨. 基于动态贝叶斯网络的智能自主优化机制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
XIAO Q K. Research on autonomous optimization based on DBN [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [13] POROPUDAS J, VIRTANEN K. Analyzing air combat simulation results with dynamic Bayesian networks [C]//Simulation Conference, 2007: 1370-1377.
- [14] KANE M J, SAVAKIS A. Bayesian network structure learning and inference in indoor vs outdoor image classification [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004: 479-482.
- [15] 王庆江, 高晓光. 空对面激光制导导弹的仿真与作战效能评估[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(31): 202-205.
WANG Q J, GAO X G. Simulation and effectiveness assessment of air-to-surface laser-guided missile [J]. Computer Engineering and Application, 2007, 43(31): 202-205.
- [16] 王庆江, 高晓光. 激光制导炸弹的仿真及其有效投弹区的计算[J]. 火力指挥与控制, 2008, 33(8): 44-47.
WANG Q J, GAO X G. Simulation and calculation of effective attack area about laser-guided bomb [J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(8): 44-47.