

基于 DoDAF 的无人机协同作战效能评估

王 瑛, 史翔宇, 李 超

(空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安, 710051)

摘要 对无人机协同作战进行效能评估能够有效分析系统性能好坏,对提升系统作战能力有积极意义。针对无人机作战编队,使用 DoDAF 构建无人协同作战体系框架,分析作战活动与能力之间的关系,建立协同作战能力指标体系;对于不同类型的指标进行差异化处理,分别采用尺度标度法、概率计算法与聚合法处理量纲类指标、定量型概率类指标与定性型概率类指标;使用 ADC 模型,扩展系统能力向量,将生存能力、电子对抗能力等综合性指标考虑在内,突破单项指标的局限性;最后以对地作战典型任务下的无人机协同作战为场景,使用该方法对不同作战方案进行效能评估,计算结果验证了该方法的有效性。

关键词 DoDAF;ADC 模型;无人机体系;协同作战;效能评估

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.06.011

中图分类号 V37 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)06-0066-07

Research on Evaluation of UAV Cooperative Combat Effectiveness Based on DoDAF

WANG Ying, SHI Xiangyu, LI Chao

(Equipment Management and UAV Engineering College, Air Force Engineering University,
Xi'an 710051, China)

Abstract UAV collaborative operation is characterized by the advantages of high mission completion and low operational consumption, and is one of the main trends in future operations. Effectiveness assessment of UAV cooperative operations can be effectively used to analyze the performance of the system and has a certain of positive significance for improving the combat capability of the system. In view of making the formation of unmanned cooperative combat system by using DoDAF (Department of Defense Architectural Framework), the relationships between the combat activities and the capabilities are analyzed, a coordinated combat capability index system is established. different types of indexes Processing are differentiated respectively by using scale scaling method, probability calculation method, and aggregation method to deal with dimensional indicators, quantitative probability indicators and qualitative probability indicators. ADC (availability dependability capability) model is utilized for expanding system capability vectors, taking into account the comprehensive indicators, such as survivability and electronic confrontation capabilities, breaking through the limitations of single indicators. Finally, taking the UAV collaboration under the typ-

收稿日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(71601183)

作者简介: 王 瑛(1967—),女,陕西华县人,博士,教授,主要从事系统工程研究。E-mail:systemkgd@163.com

通信作者: 史翔宇(1996—),男,河南光山人,硕士生,主要从事系统工程研究。E-mail:sxy19960326@163.com

引用格式: 王瑛, 史翔宇, 李超. 基于 DoDAF 的无人机协同作战效能评估研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(6): 66-72.
WANG Ying, SHI Xiangyu, LI Chao. Research on Evaluation of UAV Cooperative Combat Effectiveness Based on DoDAF[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(6): 66-72.

ical mission of ground combat as a scenario, by the method proposed in this paper, the effectiveness of different combat options is evaluated and calculated. The calculation results verify the effectiveness of the method. And the method is valid.

Key words DoDAF; ADC model; UAV system; cooperative operation; effectiveness evaluation

无人机协同作战是指多架无人机将各自的作战资源和空间占位整合,协同完成作战任务,是未来战场上作战模式主要发展趋势之一^[1]。在执行作战使命之前,需要对实施方案进行整体效能评估^[2-3],给决策者在方案选取方面提供数据支撑,有效提高协同作战任务执行的成功率^[4]。

DoDAF(Department of Defense Architectural Framework, DoDAF)是用于体系结构开发的顶层框架模型,研究体系结构的框架模型和顶层概念,可为决策者制定方案提供支撑,适用于体系结构的构建与分析^[5]。李大喜^[6]使用 DoDAF 视图产品建立空基反导装备体系结构可执行模型;高松^[7]使用 DoDAF 针对岛礁防空反导作战构建了岛礁防空反导电子对抗装备体系顶层概念框架。DoDAF 在体系结构描述、作战活动分析等方面是一种有效的工具。

ADC(Availability Dependability Capability, ADC)模型考虑问题全面、数学模型严谨,是目前对武器系统实施效能评估有效的评估方法^[8]。包悦^[9]借鉴 Markov 过程将 ADC 模型简化,实现了对反导导弹战斗部作战的效能评估;陈强^[10]综合幂指数法与层次分析法处理能力矩阵,再使用 ADC 模型实施数据链系统作战效能评估。ADC 模型对装备体系的可用度、可信度、能力综合分析,适合对复杂系统进行效能评估^[11]。

本文以无人机协同作战为研究对象,采用 DoDAF 开展对无人机协同作战结构的分析,得到无人机协同作战的效能评估能力指标体系,通过 ADC 模型对无人机协同作战进行效能评估。最后以典型对地作战任务进行实例分析,验证了效能评估方法的可行性和合理性。

1 无人机协同作战指标体系构建方法

在当今复杂的国际局势下,提高无人机协同作战能力有利于我国实施积极防御的军事战略。本文基于 DoDAF 分析无人机协同作战军事需求,并构建无人机协同作战体系。

1.1 基于 DoDAF 的建模过程

1)作战任务描述。DoDAF 将使命任务转化为

高级作战概念图(OV-1),让建模人员对作战使命有一个直观、具体化的了解。

2)作战活动描述。将作战使命分解为包含时序关系的若干子任务,梳理任务与子任务的层层聚合关系。DoDAF 中的作战活动分解视图(OV-5a)可以有效满足这些需求。

3)作战能力描述。为了得到无人机协同作战的指标体系,需要建立作战任务和作战活动之间的映射关系,然后对能力进行分解,得到子能力和相应的能力指标需求,主要涉及 DoDAF 中作战活动到系统功能追踪矩阵(SV-5a)和能力列表(CV-2)。

通过作战任务—作战活动—作战能力的逻辑关系,可以从文字描述的使命任务中分析获得效能评估体系结构及相关的能力指标需求,见图 1。

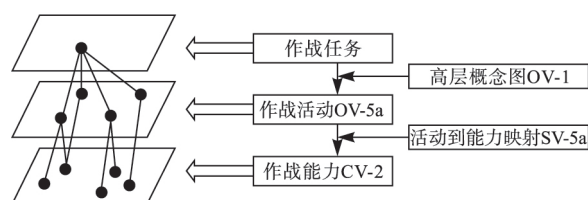


图1 DoDAF 建模过程

1.2 无人机协同作战指标体系构建

1.2.1 作战想定

若干架无人机在起飞后进入目标区域开始侦查,期间可能受到空空威胁、地空威胁以及电子干扰。无人机探测到作战目标后实施武力打击,对目标进行毁伤评估后,判断目标状态后,再选择实施第二轮武力打击或者返航。

1.2.2 构建协同作战指标体系

1)对军事需求进行分析,得到作战使命,构建高级概念图。无人机协同作战的高级作战概念图刻画出作战过程,见图 2。

2)对无人机协同作战高级作战概念图中各个活动进行分解,生成活动分解视图见图 3。图中包含 16 项作战活动,具体见表 1。

3)分析各项活动所涉及的作战能力,得到无人机协同作战活动到能力追踪矩阵,见表 2 所示。通过作战活动到能力追踪矩阵,可以清晰直观地表现出作战活动与协同作战能的映射关系。

将所需要的能力进一步分析,得到无人机协同作战效能指标体系,如图 4 所示。

2 基于 ADC 的协同作战效能评估方法

2.1 基于 ADC 的协同作战效能评估

无人机协同作战涉及的效能评估指标主要分为量纲型指标和概率型指标。使用效用函数法对量纲

型指标进行处理,概率型指标分为定量和定性2类,使用概率法处理定量指标,使用标度法处理定性目标。再将它们聚合生成能力向量 C ;对于可靠性指标,使用比例算法生成可用性向量 A ,再使用指数法处理指标得到可信度矩阵 D ,见图5。

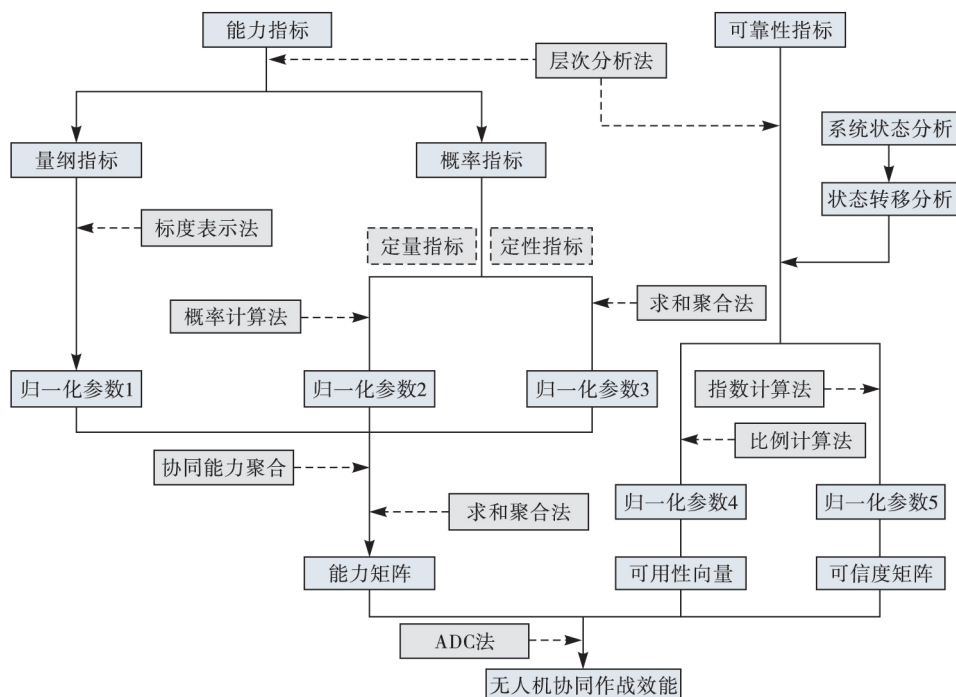


图5 无人机协同作战效能模型的建立步骤与方法

2.1.1 可用性模型的建立

A 表示开始执行作战活动时无人机协同编队可能处于的状态,是对作战任务开始时系统状态的描述。假设某次任务出动 n 架 A 型无人机, m 架 B 型无人机,由于作战环境、侦查范围、作战目标个数及防御能力以及无人机最大航行时间等的影响,至少保持 k 架无人机处于正常状态才能执行任务。

同种类型的无人机可用度相同,平均故障间隔时间为 $MTBF$,平均修复时间为 $MTTR$,可用度 $a_{si}^{[12]}$ 为:

$$a_{si} = \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i} \quad (1)$$

式中: $i=1,2,\dots,n$ 表示无人机的种类。

则系统状态计算步骤如下:

步骤1 记无人机故障数为 $j(j=0,1,\dots,n+m)$, A 型无人机故障数为 l ,初始 $j=0, l=0$,计算有 j 架无人机故障时系统的状态;

步骤2 $N=n-l, M=m-(j-l)$ 分别表示正常状态的无人机数量;

步骤3 判断 $N \geq 0, M \geq 0$,判断此种状态中处于正常状态的无人机数量是否为正。若是,则这是系统的一种状态,计算系统处于此种状态的概率;若

否,则这种情况不是系统的状态,执行步骤4;

步骤4 假设 A 型无人机故障数为 $l=l+1$,判断此时 l 是否大于总故障数 j 。若否,转到步骤2,计算系统可能处于的状态;若是,则系统故障数为 j 的情况已经筛选完毕,执行步骤5;

步骤5 假设系统总故障数为 $j=j+1$,判断 j 是否大于系统允许的总故障数 $n+m-k$ 。若是,则转到步骤2,计算此时系统可能处于的状态;若否,则系统可能处于的状态判断完毕;

步骤6 输出 A 。

计算流程见图6。

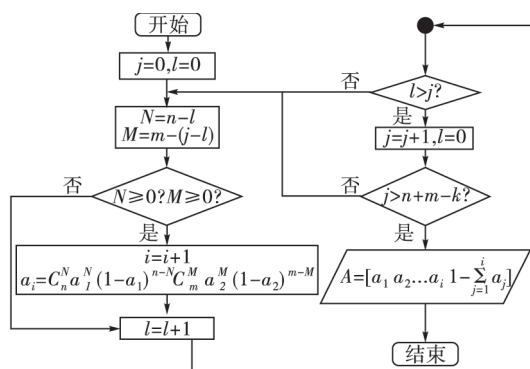


图6 可用性向量 A 的计算步骤

2.1.2 可信度模型的建立

可信度矩阵 D 表示无人机协同作战系统状态改变的概率,假设系统的状态有 n 个,每种状态可以相互转移, D 可表示为:

$$D(t) = \begin{bmatrix} d_{11}(t) & d_{12}(t) & \cdots & d_{1n}(t) \\ d_{21}(t) & d_{22}(t) & \cdots & d_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1}(t) & d_{n2}(t) & \cdots & d_{nn}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

d_{ij} 表示从状态 S_i 转移到 S_j 的概率,若系统是不可修复的,则:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11}(t) & d_{12}(t) & \cdots & d_{1n}(t) \\ 0 & d_{22}(t) & \cdots & d_{2n}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设无人机在执行任务过程中出现故障不可修复, t 时刻无人机可靠度 $R_i(t)$ [12] 为:

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (4)$$

$$\lambda_i = 1/MTBF_i$$

式中: $i=1,2,\dots,n$ 表示无人机的种类。

对地攻击型无人机生存力 S_w 主要影响因素包括 [13]: 雷达反射截面积 (RCS)、电子对抗能力以及无人机的几何尺寸:

$$S_w = 0.25 \overline{\epsilon_e} (5/RCS) 0.25 + 0.15 \overline{In} + 0.2 \overline{ACL} \cdot \overline{DL} + 0.15 \overline{Mane} + 0.15 \overline{S} + 0.1 \overline{L_{all}} \quad (5)$$

式中: ϵ_e 为电子对抗能力系数; $RCS(m^2)$ 指无人攻击机迎头方向雷达反射截面积的均值; In 表示红外隐身能力; ACL 指无人机自主化等级; DL 为无人机数据链能力; $Mane$ 为无人机机动能力; S 为机翼面积,单位为 m^2 ; L_{all} 为无人攻击机的长度,单位为 m 。

无人机的可用率 U_i 为:

$$U_i(t) = R_i(t) S_{wri} \quad (6)$$

假设系统的第 1 种状态为所有无人机正常,第 2 种状态为 $n-1$ 架 A 型无人机正常, m 架 B 型无人机正常,则 t 时刻系统由状态 1 转化为状态 2 的概率 $d_{12}(t)$ 为:

$$d_{12}(t) = U_2(t)^m C_n^1 U_1(t) n - 1 (1 - U_1(t)) \quad (7)$$

其余状态转移概率 d_{ij} 均可如此计算,可得:

$$D = (d_{ij})_{n \times n}, i > j \text{ 时 } d_{ij} = 0 \quad (8)$$

2.1.3 能力模型的建立

无人机协同作战能力向量为:

$$C = [c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_i \quad \cdots \quad c_n]^T \quad (9)$$

式中: c_i 表示系统处于状态 i 时完成任务的概率。

从 2.1 节可知,对于量纲类能力指标,如攻击能力、有效系统容量等,使用尺度标度法进行处理。尺

度标度法使用灵活,对单系统或方案评价时有很好的效果。首先,设计一个标尺,如优 (0.8~1.0),良 (0.65~0.8),中 (0.55~0.65),差 (0.3~0.55),然后使用专家评价法对性能指标打分,最终得到量化均值 $c_{li} (i=1,2,\dots,n)$ 。

对于定量型概率类能力指标,使用概率计算法进行处理。如无人机机动能力 E_{JD} ,是无人机执行对地攻击任务的重要组成部分,影响无人机机动能力的因素主有最大使用过载 $n_{y_{max}}$ 、最大盘旋过载 n_{ycir} 以及最大单位剩余功率 sep [13]:

$$E_{JD} = \frac{1}{9} \times \sqrt{n_{y_{max}} \times n_{ycir}} \times \frac{sep}{300} \quad (10)$$

对于定性型概率类指标,使用求和聚合法进行处理。如无人机自主决策能力 C_{tr} ,无人机自身传感器将周围态势感知情况传给无人机计算机,并根据无人机的智能化系统做出行动指令。态势感知能力 T_s 和智能化水平 Z_n 是影响自主决策能力的关键指标,确定相应的权重 ω_1, ω_2 ,计算公式如下:

$$C_{tr} = \omega_1 T_s + \omega_2 Z_n \quad (11)$$

对于归一量化后的各项能力指标,使用求和聚合法先求出系统的各项协同能力,再整合得到系统处于状态 i 时的综合能力 c_i ,分析系统处于不同状态下的综合能力,即可得到无人机协同作战能力向量 C 。

3 实例分析

假设此次任务共出动 A、B 2 种察打一体无人机共 4 架,且任务执行过程中至少保持 3 架无人机处于正常状态,任务持续时间 1 h,且任务执行过程中无人机故障不可修复,则有如下方案:① 1 架 A 类无人机,3 架 B 类无人机;② 2 架 A 类无人机,2 架 B 类无人机;③ 3 架 A 类无人机,1 架 B 类无人机;④ 4 架 A 类无人机;⑤ 4 架 B 类无人机。

A、B 无人机的性能指标见表 3,下面计算方案①的作战效能。

表 3 无人机性能指标

性能指标	A 型无人机	B 型无人机
SAR 雷达/个	1	0
电子信号侦查设备/个	1	1
可见光/红外探测装置/个	0	1
攻击载荷/个	4	9
MTBF/h	70	50
MTTR/h	1	1
RCS/ m^2	0.80	0.93
S/ m^2	63.2	58.3
L_{all}/m	11.63	8.13

3.1 可用性向量 A 的计算

执行任务的 4 架无人机属于并联关系,要保证至

少 3 架无人机处于正常,系统有 4 种状态,如表 4 所示。

表 4 无人机协同作战系统状态表

状态	状态含义说明	取值
1	4 架无人机均正常,可以作战	$a_1 = a_{s1} a_{s2}^3$
2	1 架无人机 A 正常,2 架无人机 B 正常,可以作战	$a_2 = a_{s1} C_3^2 a_{s2}^2 (1 - a_{s2})$
3	无人机 A 故障,3 架无人机 B 正常,可以作战	$a_3 = (1 - a_{s1}) a_{s2}^3$
4	至少 2 架无人机故障,不能作战	$a_4 = 1 - \sum_{i=1}^3 a_i$

由表 3 中 A、B 型无人机的 MTBF 与 MTTR 可计算 a_{s1}, a_{s2} ,使用 2.1.1 节流程步骤中的计算 A,可得:

$$A = [0.929, 0.056, 0.013, 0.002] \quad (12)$$

3.2 可信度矩阵 D 的计算

系统共有 4 种状态,则可信度矩阵为 4 阶方阵。已知无人机出现故障不可修复,计算 d_{ij} 的值; d_{11} 表示系统状态由状态 1 转移到状态 1,取值为 $U_1 U_2^3$; d_{12} 表示系统状态由状态 1 转移到状态 2,取值为 $U_1 C_3^1 U_2^2 (1 - U_2)$ 。计算得到可信度矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} U_1 U_2^3 & U_1 C_3^1 U_2^2 (1 - U_2) & (1 - U_1) U_2^3 & 1 - U_2^2 (U_2 + 3U_1 - 3U_1 U_2) \\ 0 & U_1 U_2^2 & 0 & 1 - U_1 U_2^2 \\ 0 & 0 & U_2^3 & 1 - U_2^3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: U_1, U_2 分别为无人机 A 与无人机 B 的可用率;

$$\lambda_1 = \frac{1}{MTBF_1} = \frac{1}{70} = 0.014\ 285;$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{MTBF_2} = \frac{1}{50} = 0.02。$$

$$R_1(1) = e^{-\lambda_1} = 0.985\ 8 \quad (14)$$

$$R_2(1) = e^{-\lambda_2} = 0.980\ 2$$

$$U_1 = S_{w1} R_1(1) = 0.890\ 3$$

$$U_2 = S_{w2} R_2(1) = 0.892\ 4$$

由公式(11)与公式(12)得:

$$D = \begin{bmatrix} 0.632\ 72 & 0.228\ 87 & 0.077\ 96 & 0.060\ 45 \\ 0 & 0.709\ 01 & 0 & 0.290\ 99 \\ 0 & 0 & 0.710\ 69 & 0.289\ 31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.3 能力向量 C 计算

为简化计算过程,在案例中对能力向量的计算只考虑能力的有无。

1) 计算量纲类性能指标

使用尺度标度法,计算 SAR 雷达探测能力、可见光/红外探测能力、电子侦查能力、攻击能力所对应的量化值 $C_{li} (i = 1, 2, 3, 4)$, 计算结果见表 5。

2) 计算概率性指标

使用 2.1.3 中的计算模型,确定信息接收能力、信息处理能力、信息共享能力、协同任务规划、协同控制能力、自主决策能力、协同机动能力、电子对抗能力、飞行性能、战术编队、生存力 $C_{gi} (i = 1, 2, \dots, 11)$, 如表 6 所示。

3) 计算系统能力向量

由专家调查法确定各项能力指标的权重见表 7。

计算无人机协同作战的能力,得:

$$C = [c_1\ c_2\ c_3\ c_4]^T = [0.796\ 0.783\ 0.721\ 0]^T \quad (16)$$

表 5 无人机协同作战量纲指标的计算

性能指标	A 型无人机	B 型无人机
SAR 雷达探测能力	1	0
可见光/红外探测能力	1	1
电子侦查能力	0	1
攻击能力	4	9
C_{j1}	0.726 7	0.000 0
C_{j2}	0.733 5	0.733 5
C_{j3}	0.000 0	0.812 4
C_{j4}	0.390 0	0.873 1

表 6 无人机协同作战概率指标的计算

性能指标	A 型无人机	B 型无人机
C_{g1}	0.425 0	0.371 6
C_{g2}	0.533 3	0.518 9
C_{g3}	0.330 0	0.330 0
C_{g4}	0.330 0	0.330 0
C_{g5}	0.200 0	0.200 0
C_{g6}	0.280 7	0.272 8
C_{g7}	0.835 6	0.840 0
C_{g8}	0.826 5	0.843 3
C_{g9}	0.543 3	0.553 5
C_{g10}	0.424 1	0.424 1
C_{g11}	0.903 1	0.910 5

表 7 无人机协同作战能力指标权重

第 2 层能力指标		第 3 层能力指标	
指标	权重	指标	权重
协同探测能力	0.158	SAR 雷达探测能力	0.685
		可见光/红外探测能力	0.188
		电子侦查能力	0.127
协同通信能力	0.191	信息接收能力	0.447
		信息处理能力	0.231
		信息共享能力	0.322
协同策划能力	0.194	协同任务规划	0.367
		协同控制能力	0.261
		自主决策能力	0.372
协同打击能力	0.211	协同攻击能力	0.425
		协同机动能力	0.303
		电子对抗能力	0.272
协同组队能力	0.246	飞行性能	0.535
		战术编队	0.272
		生存力	0.193

3.4 可用性向量的计算

执结合前面的计算结果,可得在给定任务下第一种方案的无人机协同作战效能:

$$E=ADC=0.728=[0.929 \quad 0.056 \quad 0.013 \quad 0.002] \times \begin{bmatrix} 0.63272 & 0.22887 & 0.07796 & 0.06045 \\ 0 & 0.70901 & 0 & 0.29099 \\ 0 & 0 & 0.71069 & 0.28931 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.796 \\ 0.783 \\ 0.721 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

同理可计算出其他 4 种方案的作战效能,计算结果如表 8 所示。

表 8 多种无人机协同作战配置方案下的效能值

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
协同作战效能	0.728	0.725	0.711	0.678	0.686

由表 8 分析可得,方案 4 与方案 5 效能较低,它们只选用了一种类型的无人机。2 种无人机能力各有侧重,A 型无人机侦查能力比 B 型无人机强,但是在作战能力方面相对较弱。因此,这 2 种方案整体上分别在作战和侦查方面有所不足,所计算出的无人机协同作战效能偏低。方案 1~3 均选用了不同类型的无人机,整体效能有所提高,其中方案 1 效能最高。这表明在此次任务中,选择 1 架 A 型无人机和 3 架 B 型无人机可以获得最高的作战效能。本文所提出的效能评估方法,可以在数据层面为决策者提供最合适的方案,在无人机协同作战方面有重要的应用参考价值。

4 结论

针对无人机协同作战效能评估问题,本文基于 DoDAF 体系结构模型对无人机协同作战进行建模分析,根据作战任务构建视图,得到无人机协同作战指标体系,并使用 ADC 模型对无人机协同作战进行效能评估。结合案例分析,对察打一体无人机对地作战任务下不同方案进行效能评估,仿真分析结果证明了本文提出的无人机协同作战效能评估方法的有效性。

参考文献

- [1] 姚宗信,李明,陈宗基. 多机协同作战任务决策方法多智能体结构框架[J]. 电光与控制, 2008, 15(3): 1-4,9.
- [2] 吴静,王琪. 编队协同对地攻击总体作战效能评估[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(3):83-86.
- [3] 陈建荣,郭齐胜. 无人机系统的系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(5):45.
- [4] 黄吉传,周德云. 无人机协同作战效能评估指标体系设计与分析[J]. 西安工业大学学报, 2020, 40(1):38-44.
- [5] DoD Architecture Framework Version2.02[R]. USA Department of Defense, 2015.
- [6] 李大喜,张强,李小喜,等. 基于 DoDAF 的空基反导装备体系结构建模[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(5):1036-1041.
- [7] 高松,滕克难,陈健,王美. 基于 DoDAF 的防空反导电子对抗装备体系结构建模[J]. 电光与控制, 2020, 27(4):26-31.
- [8] 闫永玲,张庆波. 改进 ADC 法的 C4ISR 系统效能评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2009, 10(1):47-51.
- [9] 包悦,张志峰,刘力. 基于改进 ADC 模型的反导导弹战斗部作战效能评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(6):30-34.
- [10] 陈强,陈长兴,陈婷,等. 基于 ADC 模型的数据链系统作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(1): 72-76.
- [11] PENG Y J, TAN F. Applied Technology in Effectiveness Assessment of Communication Equipment Based on ADC [J]. Advanced Materials Research, 2014, 3559(1046): 327-330.
- [12] 朱美娴. 防空导弹武器系统可靠性工程设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994:59-92.
- [13] 朱宝鑫,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.

(编辑:徐敏)