

doi: 10.7690/bgzdh.2018.04.014

不确定信息条件下先进 UAV 综合效能评估方法

陈 华, 陈敬志, 刘 伟

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要:为解决 UAV 效能评估准则权重信息不确定条件下的效能评估问题, 提出一种不确定信息条件下先进 UAV 综合效能评估方法。基于 UAV 的自主控制能力, 建立更加综合的 UAV 效能评估模型; 通过分析 UAV 的侦察效能、攻击效能和自主控制效能, 对该评估方法进行验证, 并利用 Matlab 仿真实验进行验证。仿真结果表明: 该方法计算方法简单、分析结果直观、简洁, 具有一定的有效性和适用性。

关键词: 先进无人机; 效能评估; 不确定信息; 效能准则

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Advanced UAV Comprehensive Effectiveness Evaluation Method under Uncertain Information Conditions

Chen Hua, Chen Jingzhi, Liu Wei

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: For solving the effectiveness evaluation problem of UVA under uncertain weighting conditions, put forwards the advanced UVA comprehensive evaluation method under uncertain information conditions. Based on the UAV autonomous control method, establish more comprehensive UAV effectiveness evaluation model. Through analyzing UAV reconnoiter effectiveness, attack effectiveness and autonomous control effectiveness, and use Matlab simulation evaluation to verify the method. The simulation method shows that the calculation of method is easy and the analysis result is intuitive and simple, it has validity and suitability.

Keyword: advance UAV; effectiveness evaluation; uncertain information; effectiveness criteria

0 引言

当前, 针对 UAV 的效能评估成为一个热门研究课题。但是, 目前针对 UAV 的效能评估大都仅仅围绕 UAV 的侦察效能和作战效能 2 个方面, 缺少对综合效能的评估^[1-2]。UAV 技术的发展将逐渐摆脱人工遥控, 实现完全自主控制; 因此, 对 UAV 自主控制等能力的评估将在其效能评估中成为重要因素。UAV 综合效能评估无论对 UAV 的设计定型, 还是对选取合适的 UAV 去执行军事任务都很重要。为此, 笔者建立了一套更加综合的 UAV 效能评估模型。

在 UAV 以往的综合效能评估中, 由于评估准则较多, 但准则之间的权重又往往无法定量给出, 从而无法准确计算出 UAV 的综合效能值^[3-4]。为此, 笔者提出一种解决 UAV 效能评估准则权重信息不确定条件下的效能评估问题的方法。

1 效能评估准则

目前, 针对 UAV 的效能评估大都集中在 UAV 的侦察和攻击效能上^[5]。相应的 UAV 效能评估模型

通常为

$$E_{\text{传统}} = (w_1 c_{\text{侦察}} + w_2 c_{\text{攻击}}) ADS \quad (1)$$

其中: $c_{\text{侦察}}$ 为 UAV 的侦察能力; $c_{\text{攻击}}$ 为 UAV 的攻击能力; w_1 和 w_2 分别为 UAV 侦察能力和攻击能力在综合效能中所占的权重; A 为 UAV 的可用度; D 为 UAV 的可靠度; S 为 UAV 的保障度。

伴随着航空技术的不断发展, 第六代战斗机很可能将是先进无人机。无人驾驶的先进无人机具备很高的自主控制能力^[6]。对先进 UAV 的综合效能评估还应该包括 UAV 的自主控制能力, 因此更加综合的 UAV 效能评估模型可以表达为

$$E_{\text{综合}} = (w_1 c_{\text{侦察}} + w_2 c_{\text{攻击}} + w_3 c_{\text{自主}}) ADS \quad (2)$$

其中: $c_{\text{自主}}$ 为 UAV 的自主控制能力; w_3 为 UAV 的自主控制能力在综合效能中所占的权重。

1.1 侦察效能分析

先进 UAV 首先应该具备执行侦察的基本能力, 而对 UAV 的侦察效能评估可主要衡量 5 个项目, 它们分别是: 基本性能、机动性、探测目标能力、

收稿日期: 2017-12-19; 修回日期: 2018-01-22

作者简介: 陈 华(1978—), 男, 宁夏人, 硕士, 高级工程师, 从事火控武器系统效能分析研究。

生存力、航程。侦察效能评估的公式可以表示为

$$c_{\text{侦察}} = [\ln B + \ln A_1] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \quad (3)$$

其中： B 为机动性参数； A_1 为探测目标能力参数； ε_1 为生存力系数； ε_2 为航程系数； ε_3 为基本性能系数。

机动性参数 B 用 UAV 最大允许过载 $n_{y\text{max}}$ 、最大稳定盘旋过载 $n_{y\text{盘}}$ 和最大单位重力剩余功率 SEP (m/s) 求得。计算公式为

$$B = n_{y\text{max}} + n_{y\text{盘}} + \text{SEP} \times 9 / 300 \quad (4)$$

探测目标能力参数 A_1 包括 2 部分：雷达探测能力参数 A^r 和光电/红外传感器探测能力参数 $A^{EO/IR}$ 。计算公式为

$$A_1 = A^r + A^{EO/IR} \quad (5)$$

雷达探测能力参数 A^r 包括：最大发现目标距离 R_{max} 、发现目标概率 P_d 、最大搜索总方位角 φ_{max} 、雷达体制衡量系数 k_2 、同时跟踪目标数量 m 。计算公式为

$$A^r = \frac{R_{\text{max}}^2}{4} \times \frac{\varphi_{\text{max}}}{360} \times P_d k_2 m^{0.05} \quad (6)$$

生存力系数 ε_1 可用 UAV 几何尺寸与雷达截面积 RCS 为主要代表因素。计算公式为

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{10}{\text{翼展}} + \frac{15}{\text{全长}} + \frac{5}{\text{RCS}} \right)^{0.0625} \quad (7)$$

航程系数 ε_2 主要与机内燃油最大航程有关，计算公式为

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\text{机内燃油最大航程}}{1400} \right)^{0.25} \quad (8)$$

基本性能系数 ε_3 主要包括：巡航速度 $v_{\text{巡航}}$ 、使用升限 H 、最大续航时间 T_{max} 。计算公式为

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{v_{\text{巡航}}}{600} \times \frac{H}{18} \times \frac{T_{\text{max}}}{40} \right)^{1/3} \quad (9)$$

1.2 攻击效能分析

UAV 攻击能力主要包括：空对空攻击能力和空对地攻击能力。目前，先进 UAV 的攻击能力主要为空对地的攻击能力。空对地作战能力指数主要包括：最大航程 R 、突防系数 P_e 、远程武器系数 R_m 、对地攻击效率系数 P_a 、核武器系数 W_n 、最大载弹量 W_B 、基本性能系数 ε_3 。计算公式为

$$c_{\text{攻击}} = [\ln(R \times P_e \times R_m \times P_n) + \ln(W_B \times P_a \times W_n)] \varepsilon_3 \quad (10)$$

最大航程系数 R 主要与以下几个因素有关：升阻比 K 、巡航速度 $v_{\text{巡航}}$ 、发动机耗油率 C_e 、飞机起飞质量 G_0 和飞机载油量 $G_{\text{油}}$ 。计算公式为

$$R = \frac{K v_{\text{巡航}}}{C_e} \ln \left(\frac{G_0}{G_0 - G_{\text{油}}} \right) \quad (11)$$

突防系数 P_e 主要与以下几个因素有关：生存力系数 ε_1 、最大允许过载 $n_{y\text{max}}$ 、突防最低高度 $H_{\text{突}}$ 、突防速度 $v_{\text{突}}$ 和装甲系数 $k_{\text{装甲}}$ 。计算公式为

$$P_e = [0.25 \times \varepsilon_1 + 0.15 \times k_{\text{装甲}} + 0.1 \times n_{y\text{max}} / 9 + 0.25 \times 100 / H_{\text{突}} + 0.25 \times v_{\text{突}} / 1200] \quad (12)$$

远程武器系数 R_m 主要的相关因素有：武器射程 D_{max} ，武器品种修正系数 $K_{\text{武器}}$ 和武器数量 n 。计算公式为

$$R_m = (D_{\text{max}} / 3) \times K_{\text{武器}} \sqrt{n} + 1 \quad (13)$$

对地攻击效率系数 P 主要与以下几个因素有关：挂架数量 $n_{\text{挂架}}$ 、武器精度系数 $k_{\text{精度}}$ 和发现目标能力系数 $c_{\text{发现}}$ 。计算公式为

$$P_a = \frac{0.2 \times n_{\text{挂架}}}{15} + 0.4 \times k_{\text{精度}} + 0.4 \times c_{\text{发现}} \quad (14)$$

1.3 自主控制效能分析

目前，国内外广泛认可的用来衡量 UAV 自主控制性能的方法是由美国空军研究实验室 (AFRL) 定义的自主控制等级 (autonomous control level, ACL) 的 10 个等级。在 2009 公布的《Unmanned Aircraft System Roadmap 2009-2034》中，比较明确地对当今有代表性的、在研的和未来规划的美国 UAV 的 ACL 进行了定义^[7-8]。其对 ACL 的 10 个等级的定义如表 1。

表 1 ACL 等级定义

级别	英文原文	中文译文
10	Fully Autonomous Swarm	完全自主群体
9	Group Strategic Goals	团队战略目标
8	Distributed Control	分布控制
7	Group Tactical Goals	团队战术目标
6	Group Tactical Re-plan	团队战术重规划
5	Group Coordination	团队协同
4	Onboard Route Re-plan	路径实时重规划
3	Adapt to Failure and Flight Conditions	适应故障和飞行条件
2	Real Time Health/Diagnosis	实时健康诊断
1	Remotely Guided	遥控引导

参考上述定义，可以给 UAV 评定一个 ACL 值。虽然该 ACL 值还不能比较明确地说明 UAV 的自主控制水平，但一个较粗略的值还是可以一定程度上

说明 UAV 的自主控制水平和比较各 UAV 之间自主控制能力的高低。

2 效能评估方法

在上述 UAV 综合效能评估模型中, UAV 不同的效能值 $c_{\text{侦察}}$ 、 $c_{\text{攻击}}$ 和 $c_{\text{自主}}$ 之间的权重, 即重要性无法定量给出, 而往往是定性给出, 如 $w_1 < w_2 < w_3$ 。因此, 无法计算出每个 UAV 确定的综合效能值。但是, 利用不同效能值之间的定性权重信息可以通过计算, 得到不同 UAV 综合效能值之间的大小排序。评估方法的主要思想是: 利用统计学的思想, 首先, 随机产生满足权重条件的权重组合; 然后, 根据权重组合计算出不同 UAV 的综合效能值, 并得出不同 UAV 效能值之间的排序, 得到每个 UAV 的排名; 最后, 统计得出每个 UAV 处于每个排名的次数, 并依据排名次数得出所有 UAV 的最终综合效能值排名^[9]。

设 M 代表参与效能评估的 UAV 类型数目, N 代表评估方法的迭代次数, i 代表第 i 个 UAV, j 代表 UAV 的综合效能值排第 j 名, k 代表第 k 次迭代。

效能评估过程中, 由于 UAV 的不同效能值之间的量纲不同, 故需要一个归一化的过程。具体为: 设 $\mathbf{c}^i = (c_{\text{侦察}}^i, c_{\text{攻击}}^i, c_{\text{自主}}^i)$ 代表第 i 个 UAV 的原始效能评估信息向量, $c_{\text{侦察}}^{\max} = \max_{1 \leq i \leq M} c_{\text{侦察}}^i$, $c_{\text{攻击}}^{\max} = \max_{1 \leq i \leq M} c_{\text{攻击}}^i$, $c_{\text{自主}}^{\max} = \max_{1 \leq i \leq M} c_{\text{自主}}^i$, 则第 i 个 UAV 归一化后的的效能评估信息向量为 $\mathbf{c}^i = (c_{\text{侦察}}^i, c_{\text{攻击}}^i, c_{\text{自主}}^i)$, 其中 $c_{\text{侦察}}^i = c_{\text{侦察}}^i / c_{\text{侦察}}^{\max}$, $c_{\text{攻击}}^i = c_{\text{攻击}}^i / c_{\text{攻击}}^{\max}$, $c_{\text{自主}}^i = c_{\text{自主}}^i / c_{\text{自主}}^{\max}$ 。

$\mathbf{w}_k = (w_k^1, w_k^2, w_k^3)$ 代表第 k 次迭代产生的权重向量, $E_i(\mathbf{c}^i, \mathbf{w}_k)$ 代表第 k 次迭代第 i 个 UAV 的综合效能值。文中对 UAV 的可用度、任务可靠性和保障度的计算不予讨论, 故综合效能评估值可以简化为:

$$E_i(\mathbf{c}^i, \mathbf{w}_k) = (w_k^1 c_{\text{侦察}}^i + w_k^2 c_{\text{攻击}}^i + w_k^3 c_{\text{自主}}^i)。 \quad (15)$$

设 T_k^i 表示第 i 个 UAV 在第 k 次迭代中的排名, 则

$$T_k^i = 1 + \sum_{l=1, l \neq i}^M \rho(E_l(\mathbf{c}^l, \mathbf{w}_k) > E_i(\mathbf{c}^i, \mathbf{w}_k))。 \quad (16)$$

其中 $\rho(E_l(\mathbf{c}^l, \mathbf{w}_k) > E_i(\mathbf{c}^i, \mathbf{w}_k))$ 为判断函数, 如果 $E_l(\mathbf{c}^l, \mathbf{w}_k) > E_i(\mathbf{c}^i, \mathbf{w}_k)$, 则 $\rho(E_l(\mathbf{c}^l, \mathbf{w}_k) > E_i(\mathbf{c}^i, \mathbf{w}_k)) = 1$; 否, 则 $\rho(E_l(\mathbf{c}^l, \mathbf{w}_k) > E_i(\mathbf{c}^i, \mathbf{w}_k)) = 0$ 。

设 r_k^{ij} 表示第 i 个 UAV 在第 k 次迭代中排第 j 名的情况, 如果 $r_k^{ij} = 1$, 则 UAV 排第 j 名; 否, 则不排第 j 名, 则

$$r_k^{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } j = T_k^i \\ 0 & \text{if } j \neq T_k^i \end{cases}。 \quad (17)$$

设 r_i^j 表示第 i 个 UAV 迭代以后排第 j 名的次数, 则

$$r_i^j = \sum_{k=1}^N r_k^{ij}。 \quad (18)$$

设 R_i^j 表示第 i 个 UAV 迭代以后排第 j 名的概率, 则

$$R_i^j = r_i^j / N。 \quad (19)$$

一般来说, 评估方法根据 UAV 的 R_i^j 值的大小作为评估依据, 即如果 R_i^1 最大, 则说明第 i 个 UAV 综合效能最优。当 2 个 UAV 存在 $R_a^1 = R_b^1$ 的情况时, 则比较 R_a^2 和 R_b^2 的大小, 依此类推。

3 仿真试验

仿真试验以全球鹰、捕食者-B 和 X-45C 3 种先进 UAV 作为效能评估对象, 利用 Matlab 6.5 进行编程计算, 迭代次数 $N = 10\,000$, 分别对 UAV 侦察效能、攻击效能和自主控制能力权重大小顺序不同的 $A_3^2 = 6$ 种情况进行了对比。

首先, 利用侦察效能、攻击效能和自主控制能力分析方法得到 3 款无人机的各项效能指数见表 2。

表 2 UAV 效能指数

型号	$c_{\text{侦察}}$	$c_{\text{攻击}}$	$c_{\text{自主}}$
全球鹰	10.56	6.21	3
捕食者-B	1.01	24.07	2
X-45C	4.63	15.49	6

其次, 利用文中的效能评估方法, 经过计算得到不同权重情况下的 UAV 综合效能信息, 见表 3。

表 3 $w_3 > w_2 > w_1$

型号	R_i^1	R_i^2	R_i^3
全球鹰	0	0.608 4	0.391 6
捕食者-B	0	0.391 6	0.608 4
X-45C	1.000 0	0	0

由上述结果可知: 在 UAV 自主控制效能权重 $>$ 攻击效能权重 $>$ 侦察效能权重的情况下, X-45C 的综合效能最优。而事实上, X-45C 不但具有很高自主控制水平, 而且具有较好的攻击能力, 所以它的综合效能在这种情况下最优。具体见表 4。

表 4 $w_3 > w_1 > w_2$

型号	R_i^1	R_i^2	R_i^3
全球鹰	0.012 6	0.987 4	0
捕食者-B	0	0	1.000 0
X-45C	0.987 4	0.012 6	0

由上述结果可知：在 UAV 自主控制效能权重 > 侦察效能权重 > 攻击效能权重的情况下，X-45C 的综合效能最优的概率依然最大，但“全球鹰”也以较低的概率成为综合效能最优的 UAV。而事实上，由于“全球鹰”具有很好的侦察效能和较高的自主控制水平，所以它以一定的概率成为效能最优的 UAV，具体见表 5。

表 5 $w_2 > w_3 > w_1$

型号	R_i^1	R_i^2	R_i^3
全球鹰	0	0.028 8	0.971 2
捕食者-B	0.549 4	0.421 8	0.028 8
X-45C	0.450 6	0.549 4	0

由上述结果可知：在 UAV 攻击效能权重 > 自主控制效能权重 > 侦察效能权重的情况下，捕食者-B 成为综合效能最优的 UAV 的概率最大，但 X-45C 与捕食者-B 的概率相差并不大。而事实上，由于捕食者-B 具有很好的攻击效能，所以它成为综合效能最优的 UAV 概率最大，而 X-45C 由于自主控制性能突出，而且具备一定的攻击效能，所以成为综合效能最优 UAV 的概率稍微次于捕食者-B。具体见表 6。

表 6 $w_2 > w_1 > w_3$

型号	R_i^1	R_i^2	R_i^3
全球鹰	0.052 2	0.123 5	0.824 3
捕食者-B	0.700 2	0.156 4	0.143 4
X-45C	0.247 6	0.720 1	0.032 3

由上述结果可知：在 UAV 攻击效能权重 > 侦察效能权重 > 自主控制效能权重的情况下，捕食者-B 成为综合效能最优的 UAV 的概率最大，但 X-45C 的概率降低，同时全球鹰效能最优的概率上升。而事实上，由于自主控制效能的重要性降低，而捕食者-B 的自主控制水平最差，因此它成为综合效能最优的 UAV 概率较上一组试验增加。而由于侦察效能的重要性较上一组有所提升，“全球鹰”具有良好的侦察能力，因此“全球鹰”综合效能最优的概率较上一组增加。结果见表 7。

表 7 $w_1 > w_2 > w_3$

型号	R_i^1	R_i^2	R_i^3
全球鹰	0.930 3	0.069 7	0
捕食者-B	0	0.000 3	0.999 7
X-45C	0.069 7	0.930 0	0.000 3

由上述结果可知：在 UAV 侦察效能权重 > 攻击效能权重 > 自主控制效能权重的情况下，“全球鹰”成为综合效能最优的 UAV 的概率优势明显，但捕食者-B 的概率变为最小。而事实上，由于“全球鹰”的侦察能力较其他两款 UAV 优势明显，而且具有一定的攻击能力，所以其综合效能最优的概率最大也是合情合理的。结果见表 8。

表 8 $w_1 > w_3 > w_2$

型号	R_i^1	R_i^2	R_i^3
全球鹰	0.899 0	0.101 0	0
捕食者-B	0	0	1.000 0
X-45C	0.101 0	0.899 0	0

由上述结果可知：在 UAV 侦察效能权重 > 自主控制效能权重 > 侦察效能权重的情况下，“全球鹰”成为综合效能最优的 UAV 的概率依然最大，但却有所降低，而 X-45C 的概率有所增加。而事实上，由于“全球鹰”的侦察能力虽然优越，但它在侦察效能方面对其他两款 UAV 的优势并没有 X-45C 在自主控制效能方面对其他两款 UAV 的优势大，所以在自主控制效能权重增加的情况下，“全球鹰”成为综合效能最优的 UAV 的概率降低，而 X-45C 的概率有所增加，但“全球鹰”的优势依然明显。

分析上述结果可知：在各个效能准则权重信息不同的情况下，UAV 的综合效能评估结果不同。而在实际作战中，不同的效能评估结果会根据不同的作战任务直接影响参战 UAV 机型的选择。

4 结论

针对效能评估准则权重信息不确定的 UAV 综合效能评估问题，笔者首先建立更加综合的 UAV 效能评估模型，然后提出一种方法解决了效能评估准则权重信息不确定，进而无法比较不同 UAV 综合效能大小的问题。该方法充分考虑了问题中所存在的不确定性，计算方法简单、分析结果直观、简洁。需要指出的是，建立更加综合、精确的先进 UAV 效能评估模型需要更多的研究工作。

向量 X ，求得征兆群对每个故障原因的隶属度，根据最大隶属度原则，确定最终的故障原因。

特种车辆在某次实际训练过程中，出现了空调制冷效果差 (x_1)、系统异常声响 (x_3)、压力表读数

异常 (x_4) 这 3 个故障征兆，根据上述故障征兆集确定方法，故障征兆集

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \{0, 1, 1, 1, 0, 0\}。$$

因此，故障原因

$$Y = X \cdot R = (0, 1, 1, 1, 0, 0) \begin{bmatrix} 0.19 & 0.06 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.09 & 0.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0.1 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.03 & 0 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0.24 & 0.18 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0.02 \\ 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0.02 & 0 & 0 & 0 & 0.17 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.06 & 0 & 0 & 0 & 0.02 \end{bmatrix} =$$

$$(0.01, 0.05, 0.11, 0, 0.3, 0, 0, 0.11, 0.06, 0.03, 0.02)。$$

根据最大隶属度原则：

$$Y_j = \max \{y_j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$$

可以得到第 5 项 $y_5 = 0.3$ 值最大，即 y_5 对应的各种故障征兆的综合隶属度值最大；因此，空调系统发生制冷效果差的原因是 y_5 ，即系统中混有空气，需要对空调系统管道进行排气处理。

5 结论

笔者基于历史维修数据，统计了空调系统故障的故障模式，分析了导致故障征兆的故障原因，通过建立模糊诊断数学模型，确定了故障原因的模糊隶属度，最终确定空调系统发生故障所对应的故障原因。实践结果证明：基于模糊诊断理论的故障诊断方法具有较高的可靠性，能够辅助维修人员及时发现故障原因，并准确定位故障点，大幅缩短故障诊断时间。笔者综合模糊诊断隶属度的确定依赖于专家经验，还需要进一步完善，以提高故障诊断的准确性。

参考文献：

[1] 张怀彬. 基于模糊理论的飞机液压油泵车故障诊断专家系统构建[J]. 辽宁大学学报, 2010, 37(4): 359-362.

[2] 张文修, 吴伟志. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 118-122.

[3] 肖余培, 张野. 一种基于模糊控制的推力变向机构控制仿真[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 81-84.

[4] 孙红岩, 姜雪峰. 智能诊断中动态模糊征兆向量方法[J]. 核动力工程, 2010, 31(2): 67-70.

[5] 王伟, 赵卫强, 刘永贤. 基于模糊诊断原理的航空液压油泵车故障诊断系统的研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(4): 42-46.

[6] LIU XF, MA L, MATHEN J. Machinery Fault Diagnosis Based on Fuzzy Measure and Fuzzy Integral Data Fusion Techniques[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3): 690-700.

[7] 韩兆林, 盛兵, 杨永刚. 模糊诊断技术在武器装备维修中的应用[J]. 科技研究, 2011, 27(1): 45-46.

[8] 赵玉刚, 鞠建波, 杨兵兵. 基于小波变换的电子设备故障诊断技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016(5): 49-52.

(上接第 60 页)

参考文献：

[1] 周鑫, 李新洪, 王谦. 基于威胁建模的 PSO 在 UAV 3 维航路规划中的应用[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 73-75.

[2] RISTO L, JOONAS H, PEKKA S. SMAA - Stochastic multi-objective acceptability analysis[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 106(1): 137-143.

[3] RISTO L, PEKKA S. SMAA-2: Stochastic multi-criteria acceptability analysis for group decision making[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 49(3): 444-454.

[4] RISTO L, KAISA M, PEKKA S. Ordinal criteria in stochastic multi-criteria acceptability analysis (SMAA)

[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147(1): 117-127.

[5] 张毅, 王和平, 党荣军. 高空长航时无人机的总体方案评价准则研究[J]. 计算机仿真, 2006(5): 27-29.

[6] 王和平. 飞机总体参数与作战效能的关系研究[J]. 航空学报, 1994(15): 1077-1080.

[7] 高劲松, 余菲, 季晓光. 无人机自主控制等级的研究现状[J]. 电光与控制, 2009(10): 51-54.

[8] 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011(6): 1075-1083.

[9] 朱宝鏊, 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: 169-178.