

防空火力压制任务中反辐射无人机搜索航路优选

刘培宾, 盛怀洁

(国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037)

摘要 反辐射无人机在执行对敌防空火力压制任务时典型的搜索航路有跑道形和“8”字形 2 种。建立“视场覆盖率”这一指标来衡量两典型搜索航路对目标雷达的压制效果, 实现对这两典型搜索航路的优选。为此, 首先通过建立数学模型的方法分别求得两种搜索航路的视场覆盖率, 然后分别分析了无人机转弯半径、航路规划空间直线长度对两搜索航路视场覆盖率的影响, 最后综合考虑了无人机导引头水平机械视场周期扫描对两搜索航路视场覆盖率理论计算值的影响。计算结果表明: 在航路规划空间大小、无人机转弯半径一定的情况下, 两典型搜索航路的视场覆盖率均低于 50%, 但“8”字形搜索航路视场覆盖率明显高于跑道形搜索航路, 对目标雷达的压制效果更好。

关键词 反辐射无人机; 典型搜索航路; 视场覆盖率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.01.014

中图分类号 V249; TJ85 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)01-0087-05

A Search Route Optimization of Anti-Radiation UAV in SEAD Mission

LIU Peibin, SHENG Huaijie

(College of Electronic Countermeasures, National University of
Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract In regard to the typical search route of the anti-radiation UAV in the execution of SEAD mission, there are two kinds of runway-shaped and “8”-shaped. In this paper, the “field coverage rate” index is established to measure the suppression effect of two typical search routes on the target radar, and the optimization of these two typical search routes is realized. For this reason, firstly, the field coverage of the two search routes is obtained by establishing a mathematical model, and then the influence of the turning radius of the UAV and the linear length of the route planning space on the coverage of the two search routes is analyzed. The influence of the horizontal mechanical field of view of the UAV seeker on the theoretical calculation of the field coverage of the two search routes is considered. The calculation results show that the field coverage of the two typical search routes is less than 50% when the planning space size of the route and the turning radius of the drone are fixed, but the field of view coverage of the “8”-shaped search route is significantly higher than that of the runway-shaped search route. The “8”-shaped search route has a good suppression effect on the target radar.

Key words anti-radiation UAV; typical search route; field coverage rate

收稿日期: 2019-01-11

基金项目: 安徽省自然科学基金(1608085QF140)

作者简介: 刘培宾(1995—), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 主要从事电子对抗无人机任务规划研究。E-mail: liupeibin@163.com

引用格式: 刘培宾, 盛怀洁. 防空火力压制任务中反辐射无人机搜索航路优选[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(1): 87-91.
LIU Peibin, SHENG Huaijie. A Search Route Optimization of Anti-Radiation UAV in SEAD Mission[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(1): 87-91.

反辐射无人机是一种利用敌方雷达辐射的电磁信号发现、跟踪以至最后摧毁雷达的武器系统^[1],具有费效比高、滞空时间长、作战使用灵活等优点。反辐射无人机作为电子进攻的重要手段之一,是执行对敌防空火力压制(Suppression of Enemy Air Defense, SEAD)的一种重要武器系统。

目前,针对反辐射无人机作战方面的研究一方面集中在对导引头技术的研究,比如对抗雷达关机技术^[2-3]的研究、对导引头测向技术^[4-5]的研究,对同源诱骗技术^[6-7]的研究以及对搜索航路规划问题的研究^[8]等;另一方面集中在对作战效能分析评估的研究,比如文献[9]从效能评估和作战模拟的角度,建立了包括导引头信号截获、航迹计算、作战决策以及雷达击毁等一系列模型;文献[10~12]针对防空火力压制任务中反辐射无人机作战效能进行分析,建立了不同的作战效能评估模型;针对多架反辐射无人机作战效能分析问题,文献[13~14]建立了作战效能表达式,并分析了攻击资源的分配问题;文献[15]分析了火力对抗与反辐射无人机突防概率的影响,得出了反辐射无人机的作战效能与火力和电子对抗的关系。从已发表的文献资料来看,针对反辐射无人机作战方面的研究鲜有涉及到航路规划的定量计算、优选问题。

本文拟通过建立“视场覆盖率”这一航路规划评价指标来衡量两搜索航路对目标雷达的压制效果。通过对2种典型搜索航路的视场覆盖率进行定量计算,并进行对比,实现对2种典型反辐射无人机搜索航路的优选,来辅助作战指挥员进行科学决策,提高反辐射无人机的作战效能。

1 优选决策模型的建立

传统航路优选的方法主要有评分评价法、层次分析法^[16-17]、灰色关联法^[18-19]、模糊综合评价法^[20]等,对于航路的优选大多是综合考虑载荷特性,任务要求、威胁情况和目标状态等因素,而反辐射无人机主要用来执行对敌防空火力压制任务,所以在进行反辐射无人机的搜索航路规划时除了考虑航路的安全性以及可飞性外,主要考虑其任务执行需要,即反辐射无人机在沿搜索航路飞行时目标雷达尽可能处于反辐射无人机的导引头的搜索视场范围内,增大目标雷达信号被搜索截获的概率。本文在进行航路优选时基于以下原则:①目标雷达为单目标雷达,且具体位置已知;②两典型搜索航路满足安全性以及可飞性等要求;③不考虑具体雷达型号、雷达诱饵、雷达是否开机以及导引头对雷达信号的搜索、截获、跟踪问题。

因为只有目标雷达处于反辐射无人机导引头视场范围之内才是有效搜索压制的前提,所以本文的搜索航路优选只考虑无人机的任务执行需要,即无人机导引头对目标雷达的视场覆盖情况。

定义“视场覆盖率” W 来表示搜索航路的视场覆盖程度,衡量搜索航路对目标雷达的压制效果:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^N L_{\text{视场}}(i)}{\sum_{j=1}^M L(j)} \quad (1)$$

式中: M 表示规划的搜索航路中航路段的总个数; N 表示导引头视场覆盖目标雷达航路段个数,航路段为航路中相邻两航程点组成的线段; $L_{\text{视场}}(i)$ 表示视场覆盖航路中第 i 段航路的长度; $L(j)$ 表示第 j 段航路的长度。

接下来对反辐射无人机导引头视场覆盖特点进行分析。

反辐射无人机导引头瞬时视场为某一时刻机械视场和瞬时电视场覆盖范围之和,水平机械视场随导引头从 $-\beta$ 到 β 周期转动,瞬时电视场大小为一固定覆盖范围($-\gamma \sim \gamma$,且 $\gamma > \beta$),图1展示了机械视场为 0° 时的瞬时视场,四边形 $ABCD$ 为导引头在某一时刻的瞬时视场覆盖范围。

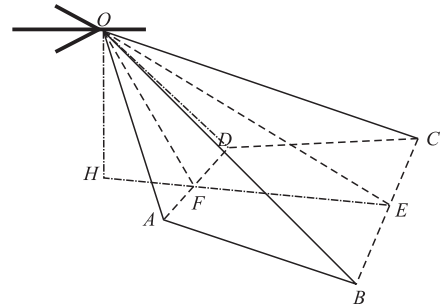


图1 反辐射无人机某一时刻视场覆盖范围

在考虑水平视场约束时,反辐射无人机最大水平视场角为 φ_0 (其中 $\varphi_0 = \gamma + \beta$),无人机与目标雷达在水平方向夹角 φ 要满足下式:

$$\varphi \leq \varphi_0 \quad (2)$$

在考虑俯仰视场约束时,由于图1中 HF 、 HE 的存在,反辐射无人机与目标雷达的水平距离 r 要满足距离约束,即:

$$d_{\min} \leq r \leq d_{\max} \quad (3)$$

式中: d_{\min} 为 HF 的长度; d_{\max} 为 HE 的长度。

式(2)~(3)即为导引头视场覆盖准则。下面根据式(2)~(3)建模分析两传统搜索航路的视场覆盖率。

2 两种典型的搜索航路建模

2.1 跑道形搜索航路建模

反辐射无人机跑道形搜索航路由2段半径为 r

的半圆弧和 2 条长为 $2l$ 的平行直线型航路构成,以雷达为坐标原点建立直角坐标系,如图 2 所示。图 2 中虚线为考虑俯仰视场约束时的视场覆盖盲区,半径为 d_{\min} (由于 d_{\min} 较小,一般 $r > d_{\min}$, 所以考虑 $r > d_{\min}$ 的情形), 并且假设在航路规划时满足式 (3) 中 $r \leq d_{\max}$ 的距离约束条件, 无人机从 $A(-l, -r)$ 位置进入跑道形搜索航线。

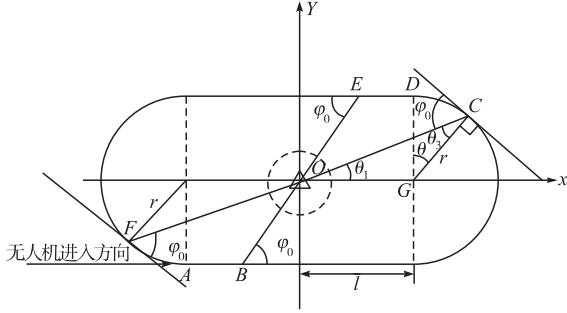


图 2 跑道形搜索航路示意图

基于图 2, 可将跑道形搜索航路的解析表达式描述为:

$$y = \begin{cases} \pm r, & -l \leq x \leq l \\ \pm \sqrt{r^2 - (x+l)^2}, & -l-r \leq x \leq -l \\ \pm \sqrt{r^2 - (x-l)^2}, & l \leq x \leq l+r \end{cases} \quad (4)$$

图 2 可以看出, 当无人机飞到 B 点时, 此时与目标雷达视场角达到 φ_0 , 无人机飞过 B 点后导引头视场将无法覆盖雷达, 故在航线 AB 段反辐射无人机视场可以覆盖雷达, 同理可得航线 CD、DE、FA 段反辐射无人机视场均可以覆盖雷达, 为了简化计算忽略转弯时飞机姿态角变化对视场覆盖的影响。

接下来, 计算视场覆盖率 W 。

航线 AB 段长度 $L_{\text{yuz}}(1)$ 为:

$$L_{\text{yuz}}(1) = l - \frac{r}{\tan \varphi_0} \quad (5)$$

由对称性得, 航线 DE 段长度 $L_{\text{yuz}}(3) = L_{\text{yuz}}(1)$ 。

同理, 航线 CD 段长度等于航线 FA 段长度, 即 $L_{\text{yuz}}(2) = L_{\text{yuz}}(4)$, 下面将求 $L_{\text{yuz}}(2)$ 的长度。

在 $\triangle OGC$ 中, 由正弦定理:

$$\frac{l}{\sin \theta_2} = \frac{l}{\sin(90 - \varphi_0)} = \frac{r}{\sin \theta_1} \quad (6)$$

得到:

$$\sin \theta_1 = \frac{r \cos \varphi_0}{l} \quad (7)$$

从而

$$\sin \theta_1 = \frac{r \cos \varphi_0}{l} \quad (8)$$

在 $\triangle OGC$ 中:

$$\theta = 180 - \theta_1 - \theta_2 - 90 = \varphi_0 - \theta_1 \quad (9)$$

由此可得到:

$$L_{\text{yuz}}(2) = L_{\text{yuz}}(4) = 2\pi r \frac{\theta}{360} \quad (10)$$

所以, 视场覆盖航路总长度为:

$$\sum_{i=1}^4 L_{\text{yuz}}(i) = 2(l - \frac{r}{\tan \varphi_0}) + \frac{4\pi r \theta}{360} \quad (11)$$

搜索航路总长度为:

$$\sum_{j=1}^4 L(j) = 4l + 2\pi r \quad (12)$$

视场覆盖率 W 为:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^4 L_{\text{yuz}}(i)}{\sum_{j=1}^4 L(j)} = \frac{2(l - \frac{r}{\tan \varphi_0}) + \frac{\pi r}{90} [\varphi_0 - \arcsin(\frac{r \cos \varphi_0}{l})]}{4l + 2\pi r} \quad (13)$$

2.2 “8”字形搜索航路建模

反辐射无人机“8”字形搜索航路有 2 段半径为 r 的圆弧和 2 条长为 $2\sqrt{l^2 - r^2}$ 相交直线航路构成, 以雷达为坐标原点建立直角坐标系, 如图 3 所示。图 3 中虚线为考虑俯仰视场约束时的视场覆盖盲区, 半径为 d_{\min} , 同样满足式 (2) 中 $r \leq d_{\max}$ 的距离约束条件, 无人机从 $A(-\sqrt{l^2 - r^2} \cos \alpha, -\sqrt{l^2 - r^2} \sin \alpha)$ 位置进入“8”字形搜索航线。

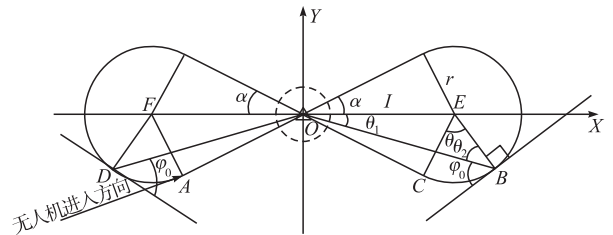


图 3 “8”字形搜索航路示意图

基于图 3, 可将“8”字形搜索航路的解析表达式描述为:

$$y = \begin{cases} \pm x \tan \alpha, & -\sqrt{l^2 - r^2} \cos \alpha \leq x \leq \sqrt{l^2 - r^2} \cos \alpha \\ \pm \sqrt{r^2 - (x+l)^2}, & -l-r \leq x \leq -\sqrt{l^2 - r^2} \cos \alpha \\ \pm \sqrt{r^2 - (x-l)^2}, & \sqrt{l^2 - r^2} \cos \alpha \leq x \leq l+r \end{cases} \quad (14)$$

具体参数设置如图 3 所示, 且 $l = r / \sin \alpha$ 。

由图 3 分析可得, 当无人机从 A 点飞到 O 时, 反辐射无人机导引头视场显然覆盖雷达, 当无人机飞到 B 点时, 此时与目标雷达视场角达到 φ_0 , 无人机从 B 点飞到 O 点时视场也将覆盖雷达, 同理可得航线 DA 段反辐射无人机视场也可以覆盖雷达, 所以航线 AO、BC、CO、DA 段反辐射无人机可以对雷达实现视场覆盖, 同样忽略转弯时飞机姿态角变化对视场覆盖的影响。

航线 AO 段长度 $L_{\text{yuz}}(1)$ 为:

$$L_{yz}(1) = \sqrt{l^2 - r^2} - d_{\min} \quad (15)$$

由对称性得,航线CO段长度 $L_{yz}(1) = L_{yz}(3)$ 。

同理,航线BC段长度等于航线DA段长度,即 $L_{yz}(2) = L_{yz}(4)$,下面将求 $L_{yz}(2)$ 的长度。

在 $\triangle BEO$ 中,由正弦定理:

$$l/\sin\theta_2 = l/\sin(90 - \varphi_0) = r/\sin\theta_1 \quad (16)$$

得到:

$$\sin\theta_1 = r\cos\varphi_0/l \quad (17)$$

从而:

$$\theta_1 = \arcsin(r\cos\varphi_0/l) \quad (18)$$

在 $\triangle BEO$ 中:

$$\theta = 180 - \theta_1 - \theta_2 - (90 - \alpha) = \alpha + \varphi_0 - \theta_1 \quad (19)$$

可得到:

$$L_{yz}(2) = L_{yz}(4) = 2\pi r \frac{\theta}{360} \quad (20)$$

所以,视场覆盖航路总长度为:

$$\sum_{i=1}^4 L_{yz}(i) = 2(\sqrt{l^2 - r^2} - d_{\min}) + 4\pi r\theta/360 \quad (21)$$

搜索航路总长度为:

$$\sum_{j=1}^M L(j) = 4\sqrt{l^2 - r^2} + \frac{90 + \alpha}{45}\pi r \quad (22)$$

视场覆盖率 W 为:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^4 L_{yz}(i) / \sum_{j=1}^M L(j)}{2(\sqrt{l^2 - r^2} - d_{\min}) + \frac{\pi r}{90}[\varphi_0 + \alpha - \arcsin(\frac{r\cos\varphi_0}{l})]} \quad (23)$$

3 视场周期扫描对两航路视场覆盖率的影响

由于反辐射无人机水平机械视场是周期扫描的,视场周期扫描在增大视场覆盖范围的同时,会导致实际航路视场覆盖率比式(13)和(23)的理论计算值偏小,所以在计算航路视场覆盖率时必须要考虑视场周期扫描对两航路视场覆盖率理论计算值的影响。

设无人机速度为 v ,飞行时间为 t ,反辐射无人机与雷达初始相对角度为 α ,初始相对距离为 d ,经过时间 t 后,距离变为 l ,机械视场扫描周期为 T ,如图4所示。

由余弦定理:

$$l = \sqrt{(vt)^2 + d^2 - 2vtd\cos\alpha} \quad (23)$$

由正弦定理:

$$l/\sin\alpha = vt/\sin\Delta\alpha \quad (24)$$

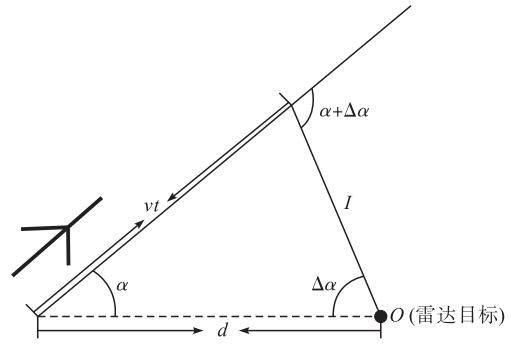


图4 无人机与雷达相对位置关系

得到:

$$\sin\Delta\alpha = vt\sin\alpha/l \quad (25)$$

从而得到:

$$\Delta\alpha = \arcsin(vt\sin\alpha/l) \quad (26)$$

将式(23)代入式(26)得到:

$$\Delta\alpha = \arcsin\left(\frac{vt\sin\alpha}{\sqrt{(vt)^2 + d^2 - 2vtd\cos\alpha}}\right) \quad (27)$$

取 $T = 8$ s, $v = 200$ km/h,在一个扫描周期内, $\Delta\alpha$ 随 α 和 d 的变化情况见图5。

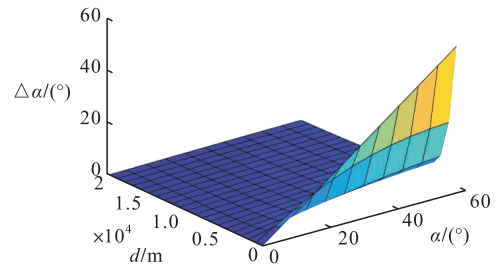


图5 $\Delta\alpha$ 随 α 和 d 的变化图

由图5可以看出,只要规划的搜索航路与目标雷达满足一定距离和角度约束条件使 $\Delta\alpha = 0$,在一个视场扫描周期内,航路视场覆盖率可以认为由初始角度 α 决定,即在一个周期内, α 越小,视场周期扫描对两航路视场覆盖率理论计算值的影响就越小。

下面将对两经典航路视场覆盖率理论计算值受视场周期扫描影响的相对大小进行分析,跑道形航路视场覆盖航段 α 均大于 0° ,而“8”字形航路由于 AO 、 CO 2段航路(其 α 为 0°)的存在,所以可以定性地认为视场周期扫描对“8”字形航路视场覆盖率理论计算值的影响较跑道形航路小。

4 反辐射无人机搜索航路优选

由式(13)和式(23)可以看出,2式均有2个变量 l 和 r ,其中 l 为直线航路长度,主要与航路规划空间大小有关, r 为反辐射无人机的转弯半径,主要与无人机的飞行性能有关,下面将分别分析两变量对视场覆盖率的影响。

4.1 转弯半径 r 对视场覆盖率 W 的影响

参数设置: $l = 10$ km, $\varphi_0 = 60^\circ$, $d_{\min} = 1$ km。

W 随 r 变化情况见图 6。

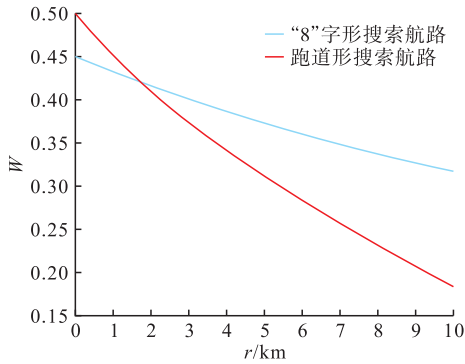


图 6 W 随 r 变化图

由图 6 可以看出,无论是哪种搜索航路,在直线航路长度 l 一定时,转弯半径 r 越大,视场覆盖率 W 越小。所以在搜索航路规划时,可以选取反辐射无人机的最小转弯半径 r_{\min} 为搜索航路规划时的转弯半径。

4.2 直线航路长度 l 对视场覆盖率 W 的影响

参数设置: $r = r_{\min} = 5 \text{ km} > d_{\min}$, $\varphi_0 = 60^\circ$, $d_{\min} = 1 \text{ km}$ 。视场覆盖航路长度以及 W 随 l 变化情况见图 7~8。

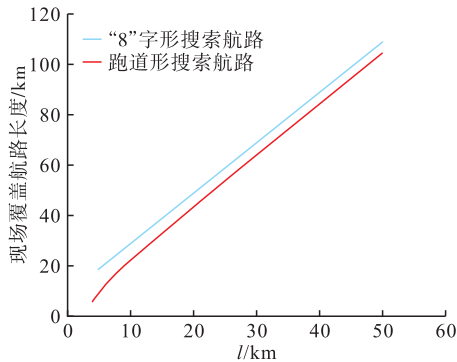


图 7 视场覆盖航路长度随 l 的变化图

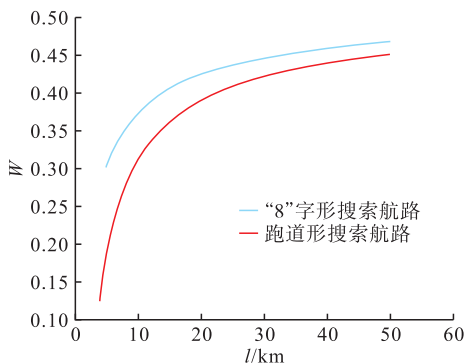


图 8 W 随 l 的变化图

由图 7~8 可以看出,在转弯半径 r 一定的情况下,无论是哪种搜索航路,视场覆盖航段长度、视场覆盖率 W 都随直线航路长度 l 增大而增大,因此要想提高视场覆盖航段长度以及视场覆盖率 W ,必须增大 l ,即航路规划空间横向长度尽可能大。除此之外还可以看到,“8”字形搜索航路视场覆盖航路长度以及航路视场覆盖率明显高于跑道形搜索航路,

所以“8”字形搜索航路对目标雷达的压制效果更好。

5 结语

本文通过建立“视场覆盖率”这一航路规划评价指标来衡量两搜索航路对目标雷达的压制效果,通过对 2 种典型搜索航路的视场覆盖率进行定量计算可得,在航路规划空间大小、无人机转弯半径一定的情况下,“8”字形搜索航路视场覆盖率明显高于跑道形搜索航路,对目标雷达的压制效果更好。

参考文献

- [1] 罗红英,刘进忙.反辐射无人机及其对抗技术[J].指挥控制与仿真,2009,31(3):121-124.
- [2] 王勃,朱学平,杨军.基于自适应 UKF 的反辐射无人机抗雷达关机技术研究[J].计算机测量与控制,2012,20(7):1960-1962.
- [3] 朱学平,杨军,孙杰,祝小平.UKF 在反辐射无人机抗目标雷达关机中的应用[J].火力与指挥控制,2009,34(7):100-102.
- [4] 陶琴,潘英锋.反辐射无人机测向技术仿真分析[J].空军预警学院学报,2017,31(1):36-38,42.
- [5] 赵风东,朱元清,潘英锋.基于 Simulink 的导引头测向流程仿真分析[J].现代防御技术,2013,41(1):64-69.
- [6] 毛莹,张振伍.反辐射无人机与诱偏系统对抗试验方法初探[J].现代防御技术,2016,44(1):124-127,140.
- [7] 张乐平,俞志强.雷达抗反辐射无人机对策研究[J].舰船电子对抗,2002,25(6):3-6.
- [8] 周延安,梅刚.反辐射无人机搜索路径规划研究[J].舰船电子对抗,2006,29(5):8-11.
- [9] 李修和,陈永光,林春应.反辐射无人机的作战效能建模与仿真[J].军事运筹与系统工程,2003(3):24-29.
- [10] 安红,邓扬建.反辐射无人机作战效能定量分析及仿真[J].电子对抗技术,1998,13(4):29-34.
- [11] 王军,耿振余.防空火力压制任务中反辐射无人机的作战效能研究[J].航空科学技术,2014(10):51-54.
- [12] 董阳春,莫翠琼,王天云.基于 ADC 模型的反辐射无人机作战效能研究[J].弹箭与制导学报,2006,26(1):332-334.
- [13] 周延安,梅刚.反辐射无人机作战效能分析[J].舰船电子对抗,2007,30(1):42-45.
- [14] 张元发,陈蓓,尹以新.多架反辐射无人机的作战效能分析[J].空军雷达学院学报,2002,16(2):9-11.
- [15] 王征,王勇,李望西.复杂对抗条件下反辐射无人机作战效能分析[J].火力与指挥控制,2009(S1):138-140,159.
- [16] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [17] 李太平,陈艳,袁大天.航路规划的试飞评估技术初步研究[J].电子测试,2016(12):40-41.
- [18] 马焱,赵捍东,张玮,等.基于自适应烟花算法的多无人机任务分配[J].电光与控制,2018,25(1):37-43.
- [19] 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(7):134-137,176.
- [20] 葛声,刘聪锋,蔡啸.无人机航路规划评估[J].舰船电子对抗,2018,41(1):20-25,50.

(编辑:徐楠楠)